



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA



Ricerca di Sistema elettrico

Validazione, e svolgimento dell'assessment tecnologico per le aziende dei 3 settori selezionati: studio di fattibilità dell'improvement tecnologico

F. De Carlo, A. Cantini, L. Leoni, M. Tucci



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

Report RdS/PTR2021/183

Validazione, e svolgimento dell'assessment tecnologico per le aziende dei 3 settori selezionati: studio di fattibilità dell'improvement tecnologico

F. De Carlo, A. Cantini, L. Leoni, M. Tucci
(UNIFI)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo : N.1 - Tecnologie

Progetto: 1.6 – Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali

Work package: 4 – Definizione di best practices e di indicatori di performance per interventi di efficienza energetica

Linea di attività: LA4.15 - Validazione, e svolgimento dell'assessment tecnologico per le aziende dei 2 settori selezionati: studio di fattibilità dell'improvement tecnologico

Responsabile del Progetto: Miriam Benedetti, ENEA

Responsabile del Work package: Fabrizio Martini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *“Analisi del gap tecnologico nella gestione energetica nelle aziende soggette all'obbligo di diagnosi”*

Responsabile scientifico ENEA: Fabrizio Martini

Responsabile scientifico per l'Università di Firenze: Filippo De Carlo

Indice

SOMMARIO.....	7
1 INTRODUZIONE.....	8
2 DESCRIZIONE DELLE BAT E DEGLI INTERVENTI TECNOLOGICI PER RIDURRE I CONSUMI ENERGETICI NEI SETTORI ANALIZZATI	9
2.1 FONDERIE	9
2.1.1 <i>Fusione</i>	13
2.1.2 <i>Stampaggio</i>	16
2.1.3 <i>Colata</i>	18
2.1.4 <i>Finitura</i>	19
2.1.5 <i>Servizi ausiliari e di supporto</i>	20
2.2 IMPIANTI DI SMALTIMENTO DEI RIFIUTI	26
2.2.1 <i>Trattamento meccanico dei rifiuti</i>	28
2.2.2 <i>Trattamento biologico dei rifiuti</i>	32
2.2.3 <i>Trattamento termico dei rifiuti</i>	38
2.2.4 <i>Controllo delle emissioni in aria</i>	45
2.2.5 <i>Attività nella ricezione dei rifiuti</i>	48
2.2.6 <i>Servizi ausiliari e di supporto</i>	55
2.3 IMPIANTI DI PRODUZIONE DI PRINCIPI ATTIVI	59
2.3.1 <i>Trattamento nei reattori</i>	61
2.3.2 <i>Asciugatura</i>	64
2.3.3 <i>Separazione</i>	71
2.3.4 <i>Purificazione</i>	73
2.3.5 <i>Macinazione</i>	74
2.3.6 <i>Miscelazione</i>	76
2.3.7 <i>Sistemi sottovuoto</i>	80
2.3.8 <i>Abbattimento o recupero dei gas esausti</i>	81
2.3.9 <i>Trattamento acque esauste</i>	83
2.3.10 <i>Cristallizzazione</i>	85
2.3.11 <i>Trasporto dei materiali all'interno dell'impianto</i>	86
2.3.12 <i>Sterilizzazione</i>	86
2.3.13 <i>Servizi ausiliari e di supporto</i>	87
2.4 IMPIANTI DI PRODUZIONE DI FARMACI	89
2.4.1 <i>Produzione di compresse</i>	93
2.4.1.1 <i>Produzione di compresse – Miscelazione</i>	94
2.4.1.2 <i>Produzione di compresse - Granulazione</i>	94
2.4.1.3 <i>Produzione di compresse – Macinazione</i>	106
2.4.1.4 <i>Produzione di compresse - Asciugatura</i>	106
2.4.1.5 <i>Produzione di compresse - Compressione</i>	106
2.4.1.6 <i>Produzione di compresse - Copertura</i>	108
2.4.1.7 <i>Produzione di compresse - Miglioramento della solubilità</i>	111
2.4.1.8 <i>Produzione di compresse - Additive Manufacturing</i>	113
2.4.2 <i>Produzione di capsule</i>	114
2.4.3 <i>Produzione di medicinali liquidi</i>	115
2.4.4 <i>Produzione di creme</i>	115
2.4.5 <i>Produzione di wound dressing</i>	115
2.4.6 <i>Servizi ausiliari e di supporto</i>	119
3 ELENCO E MAPPATURA DEGLI INTERVENTI TECNOLOGICI APPLICATI E PROPOSTI DALLE AZIENDE COINVOLTE .	122
3.1 FONDERIE	123

3.2	IMPIANTI DI SMALTIMENTO DEI RIFIUTI	125
3.3	IMPIANTI DI PRODUZIONE DI PRINCIPI ATTIVI	127
3.4	IMPIANTI DI PRODUZIONE DI FARMACI	129
4	RISULTATI DELLO STUDIO DI FATTIBILITÀ TECNICO-ECONOMICA TRAMITE CONSULTAZIONE DI ESPERTI DELLE ASSOCIAZIONI DI CATEGORIA	133
5	STRUMENTO PER LA STIMA DEL LORO LIVELLO DI MATURITÀ ENERGETICA E DI VALUTAZIONE DEL GAP ESISTENTE TRA IL LORO LIVELLO DI MATURITÀ E QUELLO COMPETENTE ALLA RELATIVA BAT	135
5.1	INTRODUZIONE AL MODELLO PROPOSTO	136
5.2	MODELLO PROPOSTO: PASSAGGI ANALITICI.....	138
5.3	CASO STUDIO	142
5.3.1	<i>Selezione ed inserimento: parametri v e β</i>	143
5.3.2	<i>Generazione ed inserimento: livello di esperienza</i>	144
5.3.3	<i>Generazione ed inserimento: pesi sui criteri</i>	146
5.3.4	<i>Generazione ed inserimento: performance delle soluzioni</i>	147
5.3.5	<i>Risultati caso studio</i>	152
6	CONCLUSIONI.....	154
7	APPENDICE A.....	156
7.1	FONDERIE	156
7.1.1	<i>Fusione</i>	156
7.1.2	<i>Formatura</i>	158
7.1.3	<i>Colata</i>	160
7.1.4	<i>Finitura</i>	162
7.1.5	<i>Recupero calore</i>	163
7.1.6	<i>Combustibili alternativi</i>	164
7.1.7	<i>Servizi ausiliari</i>	164
7.2	IMPIANTI DI TRATTAMENTO RIFIUTI	169
7.2.1	<i>Trattamento meccanico – Triturazione</i>	169
7.2.2	<i>Trattamento biologico – Trattamenti aerobici</i>	169
7.2.3	<i>Trattamento biologico – Trattamenti anaerobici</i>	170
7.2.4	<i>Incenerimento</i>	170
7.2.5	<i>Controllo delle emissioni in aria</i>	172
7.2.6	<i>Attività nella ricezione dei rifiuti</i>	173
7.2.7	<i>Recupero energetico</i>	175
7.2.8	<i>Incremento efficienza impianto e servizi ausiliari</i>	176
7.3	IMPIANTI DI PRODUZIONE DI PRINCIPI ATTIVI	177
7.3.1	<i>Trattamento nei reattori</i>	177
7.3.2	<i>Asciugatura</i>	178
7.3.3	<i>Separazione</i>	179
7.3.4	<i>Purificazione</i>	180
7.3.5	<i>Macinazione</i>	180
7.3.6	<i>Miscelazione</i>	180
7.3.7	<i>Trattamenti sottovuoto</i>	181
7.3.8	<i>Trattamento gas esausti</i>	181
7.3.9	<i>Trattamento acque esauste</i>	182
7.3.10	<i>Cristallizzazione</i>	183
7.3.11	<i>Trasporto e stoccaggio</i>	183
7.3.12	<i>Sterilizzazione</i>	184
7.3.13	<i>Incremento efficienza impianto e servizi ausiliari</i>	184
7.3.14	<i>Recupero energetico</i>	186
7.3.15	<i>Produzione di energia tramite impianto solare</i>	187
7.4	IMPIANTI DI PRODUZIONE DI FARMACI	188
7.4.1	<i>Produzione di compresse - Miscelazione</i>	188
7.4.2	<i>Produzione di compresse – Granulazione</i>	188

7.4.3	<i>Produzione di compresse – Macinazione e macinazione a secco.....</i>	189
7.4.4	<i>Produzione di compresse – Asciugatura</i>	190
7.4.5	<i>Produzione di compresse – Compressione e compressione diretta.....</i>	191
7.4.6	<i>Produzione di compresse – Copertura</i>	191
7.4.7	<i>Miglioramento caratteristiche materiali.....</i>	191
7.4.8	<i>Additive manufacturing per le pasticche</i>	192
7.4.9	<i>Produzione di capsule</i>	192
7.4.10	<i>Produzione medicinali liquidi.....</i>	192
7.4.11	<i>Trasporto e stoccaggio</i>	193
7.4.12	<i>Produzione di creme</i>	194
7.4.13	<i>Produzione di wound dressing – medicazioni in fibre.....</i>	194
7.4.14	<i>Produzione di wound dressing – medicazioni in tessuti.....</i>	194
7.4.15	<i>Produzione di wound dressing – aggiunta delle sostanze medicinali.....</i>	194
7.4.16	<i>Produzione di wound dressing – sterilizzazione.....</i>	195
7.4.17	<i>Incremento efficienza impianto e servizi ausiliari.....</i>	196
7.4.18	<i>Produzione di energia tramite impianto solare</i>	201
8	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	204
9	CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO IMPEGNATO NELL'ATTIVITÀ	213
9.1	FILIPPO DE CARLO.....	213
9.2	MARIO TUCCI.....	213
9.3	ALESSANDRA CANTINI	214
9.4	LEONARDO LEONI.....	214

Indice delle figure

Figura 1. principali fasi del processo produttivo nelle fonderie.	15
Figura 2. Schema PRISMA che riepiloga il processo di analisi della letteratura a valle del quale sono stati collezionati gli interventi tecnologici <i>energy-saving</i> del settore delle fonderie.	16
Figura 3. Distribuzione temporale delle 54 fonti analizzate.	17
Figura 4. Suddivisione delle 54 fonti in base al tipo di documento.	17
Figura 5. Suddivisione delle fonti in base al tipo di metallo in esse trattato.	17
Figura 6. Distribuzione geografica delle 231 fonderie italiane che costituiscono il campione studiato.	17
Figura 7. Esempio di forno cubilotto [15].	18
Figura 8. Forno ad arco elettrico [16].	19
Figura 9. Schema PRISMA che riepiloga il processo di analisi della letteratura a valle del quale sono stati collezionati gli interventi tecnologici <i>energy-saving</i> del settore dello smaltimento rifiuti.	31
Figura 10. Ricerca bibliografica sistematica ristretta sul trattamento dei rifiuti.	32
Figura 11. Ricerca bibliografica sistematica sull'incenerimento dei rifiuti.	32
Figura 12. Distribuzione degli articoli secondo la fase di processo di smaltimento rifiuti.	32
Figura 13: Distribuzione geografica dei 49 stabilimenti di smaltimenti di rifiuti italiani analizzati.	33
Figura 14 - Roller crusher [58].	34
Figura 15 - Shear cutter [58].	34
Figura 16 - Jaw crusher [58].	35
Figura 17 - Cascade ball mill [58].	35
Figura 18 - Four shaft rotor shear [56].	36
Figura 19. Rotor shredder [56].	36
Figura 20 - Areated static pile [59].	38
Figura 21 - Compostaggio al chiuso [59].	38
Figura 22 - Andane con un macchinario apposito per il rimescolamento [59].	39
Figura 23 - Schema di un sistema di digestione anaerobica in due fasi [63].	41
Figura 24 - Schema di impianto di incenerimento con produzione di energia elettrica [68].	44
Figura 25 - Schema di un inceneritore con CHP [68].	44
Figura 26 - Tipologie di griglie [73].	46
Figura 27 - Differenti tipologie di fornace a seconda del flusso d'aria [74].	46
Figura 28 - Schema di un inceneritore a grate [75].	47
Figura 29 - Schema di un forno rotativo [74].	47
Figura 30 - Stationary fluidised bed [74].	48
Figura 31. Schema del metodo di biofiltrazione [56].	51
Figura 32 - Schema di funzionamento di un overband magnetic separator [56].	55
Figura 33 - Schema di funzionamento di un eddy current separator [56].	55
Figura 34 - Schema di un optical separator [56].	56
Figura 35 - Schema di un setacciatore a tamburo [56].	57
Figura 36 - Separatore a tamburo a sezioni multiple [56].	57
Figura 37 - Setacci oscillanti [58].	57
Figura 38 - Disk screen [58].	57

Figura 39 - Sistemi di circolazione in un boiler [56].	60
Figura 40. Schema ricerca bibliografica sistematica complessiva.	65
Figura 41 - Distribuzione degli articoli secondo la fase di processo – Produzione di principi attivi.	65
Figura 42 - Distribuzione geografica delle aziende di produzione di principi attivi in Italia.	66
Figura 43 - Stirred tank reactor [95].	66
Figura 44. Fluidized bed dryer a lotti [102].	70
Figura 45 - Essiccatore semicontinuo [102].	70
Figura 46 - Essiccatore in continuo a camera cilindrica [102].	70
Figura 47 - Essiccatore <i>plug flow</i> [102].	70
Figura 48 - Miscelatore a doppio cono modificato (A); miscelatore conico a vite modificato (B); miscelatore a pale modificato (C) [102].	71
Figura 49 - Sistemi a ciclo aperto (A), chiuso (B), semichiuso (C) [105].	72
Figura 50 - Camera d'essiccazione di un essiccatore a ciclone [103].	72
Figura 51 - Essiccatore flash-spin [103].	73
Figura 52 - Schema della sezione di una <i>toothed rotor-stator mill</i> [113].	78
Figura 53 - Miscelatore twin-shell [115].	81
Figura 54 - Miscelatore double-cone [115].	81
Figura 55 - Miscelatore Tote [115].	81
Figura 56 - Schema di un vertical ribbon blender [115].	82
Figura 57 - Interno di un paddle blender [115].	82
Figura 58 - Interno di un ploughshare blender [115].	82
Figura 59 - Schema di un miscelatore orbiting screw [115].	82
Figura 60. Layout di una pompa ad anello liquido che usa propano come mezzo [95].	84
Figura 61. Sistema di pigging per applicazioni industriali [95].	89
Figura 62. Schema ricerca bibliografica sistematica complessiva.	92
Figura 63 – Schema ricerca bibliografica sistematica sulle compresse	93
Figura 64 - Schema ricerca bibliografica sistematica sulle capsule	93
Figura 65 - Schema ricerca bibliografica sistematica sulle creme	93
Figura 66 - Schema ricerca bibliografica sistematica su garze, bende e cerotti	94
Figura 67 - Schema ricerca bibliografica sistematica sui vaccini.	94
Figura 68 - Distribuzione degli articoli secondo la fase di processo – Produzione farmaci	94
Figura 69 - Distribuzione geografica delle aziende di produzione di farmaci in Italia.	95
Figura 70 - Stati del conglomerato durante la wet granulation [125].	97
Figura 71 - High shear mixer [125].	97
Figura 72 - Ribbon blender [129].	98
Figura 73 - Planetaria [107].	98
Figura 74 - Sigma blade granulator [107].	98
Figura 75 - Rotating shape granulator [129].	99
Figura 76 - Schema di un FBG e il Glat WSG Pro 200 [107]	99
Figura 77 - Tipologie di estrusori [129].	100
Figura 78 - Pattern delle scanalature [129].	101

Figura 79 - Distribuzione e immersione [107].	102
Figura 80 - Schema del processo di freeze drying granulation [133].	103
Figura 81 - Le differenti zone nella Roll Compaction [129].	104
Figura 82 - Schema di un immersion-sword system [142].	110
Figura 83 - Schema di un Accela-Coata [142].	110
Figura 84 - Schema di un driacoater [142].	110
Figura 85 - Tipologie di ugelli [147].	113
Figura 86 - Distribuzione di un TFN (l,m,r).	138
Figura 87 - Sistema dei punteggi per la definizione del peso degli esperti [166].	139
Figura 88 - Scala linguistica con relativi TFN proposta da [168].	140
Figura 89 - Scala linguistica con relativi TFN proposta da [168].	140
Figura 90 - Maschera di inserimento parametri v e β .	143
Figura 91 - Maschera di inserimento livello di esperienza complessiva degli intervistati.	144
Figura 92 - Tabella con valore associato per ogni possibile risposta.	145
Figura 93 - Tabella riassuntiva dei valori generati casualmente sull' esperienza complessiva degli intervistati.	145
Figura 94 - Maschera di inserimento dei pesi dei criteri.	146
Figura 95 - Tabella riassuntiva dei dati generati casualmente sull'importanza dei criteri secondo i diversi DM.	146
Figura 96 - Maschera di inserimento delle performance delle soluzioni.	146
Figura 97 - Ranking delle migliori 30 soluzioni individuate per entrambe le aziende.	151
Figura 98 - Classifica delle soluzioni ottenuta per la variante dell'azienda A a β modificato.	152

Sommario

Le industrie manifatturiere sono responsabili di una quota significativa dei consumi energetici mondiali. Tra tutti i fattori che determinano il consumo energetico di un'azienda, uno dei principali è lo stato di avanzamento tecnologico dei macchinari di processo. I dispositivi e gli apparati usati per svolgere un processo produttivo, infatti, possono determinare un maggiore o minore impatto energetico in base alle loro prestazioni energetiche.

Uno sviluppo energetico accettabile, allora, passa anche attraverso un miglioramento dell'efficienza e della qualità dei processi produttivi mediante il ricorso a nuove tecnologie, che però devono essere compatibili con la sicurezza e la salvaguardia dell'ambiente, le disponibilità di budget e il posizionamento strategico aziendale.

La presente relazione ha come primo obiettivo quello di individuare e descrivere i possibili interventi tecnologici che possono essere attuati al fine di ridurre i consumi energetici nazionali in fonderie, aziende di trattamento rifiuti e aziende di produzione di farmaci e principi attivi. Gli interventi qui riportati sono stati ricavati e validati consultando la letteratura tecnico-scientifica internazionale ed esperti del settore provenienti dalle associazioni di categoria dei settori industriali analizzati.

Come secondo obiettivo, a valle di una profonda consultazione delle diagnosi energetiche collezionate da ENEA nell'anno 2019 (<https://audit102.enea.it/>), nel presente documento viene valutato il grado di applicazione degli interventi *energy-saving* reperiti e vengono fornite indicazioni sui loro possibili trend di implementazione futura nel territorio italiano. Di conseguenza, per ciascun intervento migliorativo proposto, il presente report fornisce le seguenti informazioni: una breve descrizione del suo funzionamento e una sintesi dei principali vantaggi a livello energetico, eventuali commenti di esperti di settore per confermare la bontà dei risultati di letteratura ottenuti, le frequenze di applicazione di tale intervento negli scorsi anni nelle aziende che hanno compilato le diagnosi energetiche, e, infine, le frequenze con cui le aziende hanno preso in considerazione la possibilità di applicare tale intervento nel futuro prossimo.

Le analisi statistiche delle frequenze di applicazione degli interventi (ricavate dalle diagnosi energetiche) assieme alla consultazione di esperti di settore ottenuta mediante il confronto ripetuto con le associazioni di categoria dei settori industriali analizzati hanno consentito a UNIFI (in collaborazione con ENEA e gli altri partner di progetto) di raggiungere un ulteriore obiettivo, ovvero: studiare la fattibilità tecnico-economica degli interventi di efficientamento energetico delle tecnologie e giustificare ulteriormente i trend di sviluppo identificati.

Oltre a questo, UNIFI ha anche sviluppato un nuovo modello di *assessment* delle tecnologie, ponendosi come ultimo obiettivo quello di fornire uno strumento di classificazione multi-criterio degli interventi tecnologici *energy-saving*, che consenta a ogni specifica azienda di individuare una soluzione di risparmio energetico ottimale, che costituisca un *trade-off* tra le proprie strategie manageriali, i vincoli di budget e la volontà di migliorare i consumi energetici di specifiche fasi di processo.

I risultati dell'analisi qui proposta potranno essere utilizzati dalle aziende italiane dei settori considerati per determinare i possibili interventi migliorativi attuabili nei loro impianti, suddivisi per fase e macchina di processo, esaminare la situazione delle loro tecnologie e stabilire il loro livello di maturità energetica rispetto a quello di altri interventi disponibili, e, infine, identificare un intervento migliorativo che costituisca il compromesso ottimale tra la loro volontà di ridurre i consumi energetici e l'impatto ambientale e la necessità di mantenere ottimizzate le performance d'impianto e le strategie aziendali.

1 Introduzione

Nell'ambito del progetto "Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali", ENEA ha affidato al Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIEF) dell'Università degli Studi di Firenze (UNIFI), che riveste il ruolo di Istituto Universitario nazionale competente nel settore, la seguente attività di ricerca: "analisi del gap tecnologico nella gestione energetica nelle aziende soggette all'obbligo di diagnosi".

Tale attività è stata definita dopo che è stato delineato l'obiettivo che UNIFI dovrà raggiungere nel triennio dal 2019 al 2021, ovvero lo sviluppo di un modello di *assessment* tecnologico per la valutazione del gap tra stato attuale della tecnologia e stato dell'arte delle *Best Available Technologies* (BAT) per l'efficienza energetica di prodotti e processi industriali. Per raggiungere l'obiettivo appena descritto ed espletare i propri compiti nei modi e nei tempi prestabiliti, UNIFI ha declinato l'attività principale in varie sotto-attività da svolgere anno dopo anno. Dopo aver svolto le attività previste per il 2021, UNIFI ha redatto il presente documento per centrare uno degli output attesi per il 2021, ovvero la stesura di un report di fine attività annuale. Nel presente documento sono riassunti i risultati operativi e gli output conseguiti nell'anno 2021 e le modalità con cui tali risultati sono stati ottenuti. Di seguito, si riportano in ordine gli **output** che verranno presentati:

- Elenco e breve descrizione delle BAT afferenti ai settori produttivi analizzati e conseguente elenco degli interventi migliorativi da effettuare per ridurre il gap tecnologico e i consumi energetici delle tecnologie produttive costituenti l'impianto (Capitolo 2).
- Elenco e mappatura degli interventi tecnologici applicati e proposti dalle aziende coinvolte (Capitolo 3).
- Risultati dello studio di fattibilità tecnico-economica tramite consultazione di esperti delle associazioni di categoria (Capitolo 4).
- Strumento per la stima del loro livello di maturità energetica e di valutazione del gap esistente tra il loro livello di maturità e quello competente alla relativa BAT (Capitolo 5).
- Breve paragrafo di spiegazione sulle attività condotte per la disseminazione dei risultati (Capitolo 6).
- Conclusioni sui risultati dell'anno 2021 (Capitolo 7).

Gli output di cui sopra sono stati raggiunti dopo aver condotto le attività di progetto relativamente ai settori produttivi (che estendono l'elenco degli altri due settori già trattati nel 2020). In particolare, assieme ai partner di progetto ENEA, è stato stabilito per l'anno 2021 di concentrarsi sulle seguenti aziende: fonderie, aziende di smaltimento dei rifiuti e aziende produttrici di farmaci e di principi attivi. In quest'ottica, il proseguo del presente report farà riferimento solo a tali tipologie di aziende.

Si ricorda, inoltre, che, le attività condotte da UNIFI prendono in considerazione i macchinari e le tecnologie afferenti agli impianti produttivi, escludendo dal volume di controllo in analisi le attività a valle del processo produttivo (quali l'ispezione dei prodotti finiti, il loro imballaggio e le attività di manutenzione), le tecnologie che afferiscono ai servizi generali (relativi ad aree aziendali non strettamente correlate al processo produttivo, ad esempio i sistemi d'illuminazione o i sistemi di riscaldamento) e, infine, tutte le soluzioni di carattere gestionale più che tecnologico (quali l'implementazione di sensori o di sistemi di controllo avanzati).

2 Descrizione delle BAT e degli interventi tecnologici per ridurre i consumi energetici nei settori analizzati

In questa sezione, si raccolgono le BAT e gli interventi tecnologici per ridurre i consumi energetici nei vari settori industriali analizzati. Nello specifico, il presente capitolo è strutturato in modo tale che per ognuno dei settori, dapprima si descrive il processo produttivo che avviene e il procedimento di consultazione sistematica della letteratura che è stato seguito per individuare gli interventi tecnologici energy-saving. Successivamente, per ogni singola fase di processo si illustrano le informazioni su:

- funzionamento della fase di processo e tecnologie che caratterizzano tale fase produttiva
- interventi tecnologici che la letteratura scientifica di riferimento propone per ridurre i consumi energetici dei macchinari presenti in tale fase di processo
- eventuali altre soluzioni tecnologiche energy-saving emerse relativamente a tale fase di processo consultando le diagnosi energetiche compilate dalle aziende italiane e raccolte da ENEA nel 2019 (<https://audit102.enea.it/>).

Nell'ottobre 2012, la direttiva sull'efficienza energetica (EED) è stata pubblicata dal Parlamento e dal Consiglio Europeo con lo scopo di raggiungere un risparmio energetico del 20% entro il 2020 [1]. L'EED riporta diversi obblighi legali che le grandi aziende (tutte le aziende che non sono considerate come piccole e medie imprese) devono seguire per soddisfare l'aumento di efficienza energetica richiesto. All'interno del quadro sviluppato, l'articolo 8 obbliga le imprese interessate a produrre diagnosi energetiche, ovvero documenti sistematici richiesti alle aziende per valutare il loro attuale profilo di consumo energetico e i futuri investimenti per il risparmio energetico [2]. In Italia, le diagnosi sono raccolte dall'agenzia ENEA (Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile), che ha il compito di gestire e controllare l'applicazione del frame-work dell'EED sul territorio italiano. Le diagnosi sono caricate dalle aziende sul portale ENEA Audit 102 (<https://audit102.enea.it/>). In Italia, non solo le grandi aziende, ma anche le imprese ad alta intensità energetica sono soggette all'obbligo delle diagnosi. Le imprese energivore sono quelle che consumano più di 1 GWh di energia elettrica all'anno, che hanno sgravi fiscali sulla bolletta elettrica e che sono iscritte negli elenchi del Fondo Servizi Energetici Ambientali (CSEA). Le diagnosi, ricevute dall'ENEA nel dicembre 2019 (prima scadenza del secondo ciclo di diagnosi obbligatorie dopo il 2015), contengono molte informazioni interessanti come l'ubicazione dell'impianto, il tipo di impianto, il tipo di materia prima adottata e il tipo di prodotti finiti fabbricati dalle aziende. Tuttavia, per il lavoro attuale, le informazioni più utili hanno riguardato gli interventi attuati dalle aziende italiane tra il 2015 e il 2019, e gli interventi che le aziende hanno pianificato di realizzare tra il 2019 e il 2022. Infatti, le soluzioni di risparmio energetico elencate sono risultate essenziale (oltre all'analisi della letteratura scientifica) per definire una panoramica delle opportunità e degli investimenti più comuni in Italia per limitare il consumo di energia nei settori analizzati.

L'analisi integrata di letteratura scientifica internazionale e diagnosi energetiche è stata ritenuta di primaria importanza per definire una lista completa di possibili soluzioni di risparmio energetico attraverso l'integrazione di informazioni aziendali reali e studi accademici.

2.1 Fonderie

Il processo produttivo che avviene nelle fonderie può essere schematizzato come riportato in Figura 1, dove sono rappresentate le principali fasi di lavorazione.

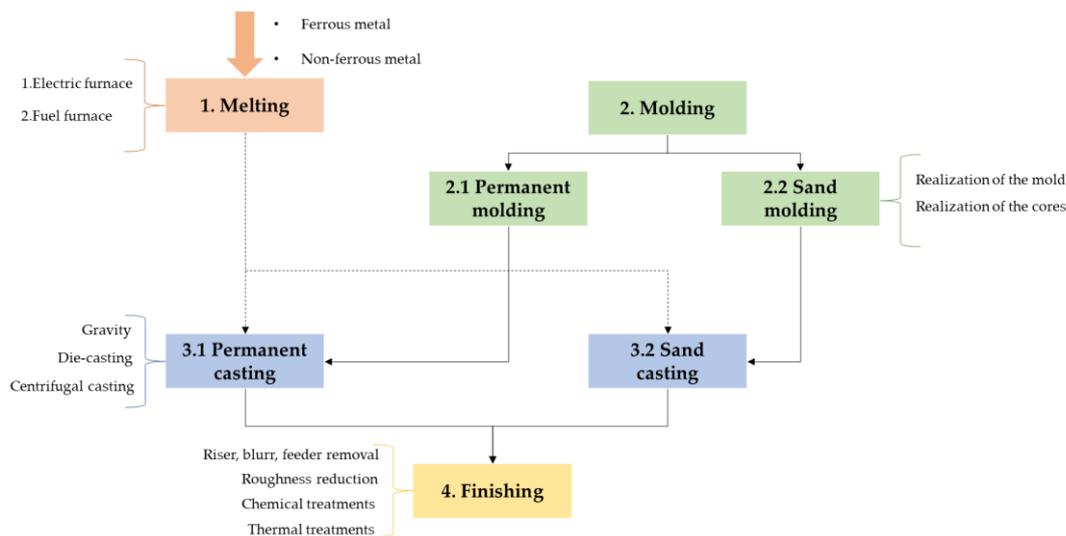


Figura 1. principali fasi del processo produttivo nelle fonderie.

Le fonderie realizzano prodotti in metallo (detti “getti”) lavorando il metallo per fusione. La fonderia di getti viene anche chiamata fonderia di seconda fusione, in quanto la sua lavorazione inizia con la rifusione di semilavorati (oltre che di rottami) provenienti da altre industrie metallurgiche primarie [3].

Sebbene il processo di fonderia possa variare in base al tipo di metallo trattato, che può essere ferroso o non ferroso, e in base alle politiche aziendali, le fasi che accomunano tutti i processi sono le seguenti. Innanzitutto, il metallo viene fuso in un forno, che può essere elettrico o a combustibile. La fase di fusione è la fase più energivora del processo di fonderia poiché rappresenta il 70% del consumo totale di energia [4]. In particolare, il consumo di energia di un forno elettrico è compreso tra 500 e 700 kWh/tonnellata di metallo fuso, mentre il consumo di energia relativo a un forno alimentato a coke è nell'ordine di 90-1 kg/tonnellata di metallo fuso [5]. Per quanto riguarda il forno a combustibile, il combustibile adottato potrebbe essere coke o metano (più comune per i metalli non ferrosi). Parallelamente alla fase di fusione, il processo di fonderia è caratterizzato dalla fase di stampaggio, che consiste nella preparazione delle forme. Uno stampo è il negativo dei pezzi realizzati e può includere anime per creare cavità. Inoltre, uno stampo può essere fatto con la sabbia (stampo a perdere) o può essere permanente. Nel caso in cui venga adottato lo stampaggio a sabbia, deve essere creato uno stampo distinto per ogni pezzo prodotto. I materiali che compongono uno stampo di sabbia sono di solito silice, sabbia olivina e silice di sodio, insieme ad altre sostanze come fango rosso e scorie d'altoforno [6]. Al contrario, uno stampo permanente potrebbe essere usato per più pezzi. Infatti, in questo caso, lo stampo è fatto di metallo e può essere rivestito con grafite o rivestimenti a base di TO_2 [7]. A valle della fase di fusione e stampaggio, avviene la fase di colata. Il metallo fuso viene, dunque, versato nello stampo dove si solidifica attraverso lo scambio di calore con le pareti dello stampo (più fredde). Per uno stampo a sabbia, il metallo fuso viene versato per gravità, mentre per uno stampo permanente si può adottare anche una pressofusione o una colata centrifuga per far diffondere il metallo all'interno dello stampo. Durante questa fase, il metallo fuso deve riempire tutta la cavità dello stampo senza creare buchi che comprometterebbero le proprietà meccaniche e la qualità del prodotto finale. Infine, il metallo solidificato viene estratto dallo stampo, e viene inviato alla fase di finitura, che ha il compito di rimuovere le creste, le bave e le inclusioni superficiali di sabbia, oltre a migliorare la rugosità della superficie. La fase di finitura potrebbe anche includere trattamenti termici o chimici.

Il processo produttivo può essere diviso secondo due criteri: la divisione per tipo di lega (ferrosa o non ferrosa) e la divisione per tipo di formatura (a perdere o permanente). Con il termine “leghe ferrose” si fa riferimento alla produzione di getti in ghisa ed acciaio, mentre il termine “leghe non ferrose” è usato principalmente per riferirsi a produzioni di oggetti in Alluminio, Magnesio, Rame, Zinco e Piombo. La divisione per tipo di lega ha delle conseguenze sul tipo di forni che si utilizzano. Infatti, il forno fusorio per la ghisa ha tipicamente caratteristiche diverse dal forno fusorio per l'alluminio. Inoltre, le leghe trattate condizionano le scelte impiantistiche nonché le tecnologie di processo che possono essere adoperate [3]. La divisione per

tipo di formatura, invece, impatta principalmente sulla fase di stampaggio, diversificando le tecnologie e i processi adibiti alla creazione e lavorazione degli stampi.

L'industria della fonderia è tra i settori industriali più energivori [8], infatti i suoi consumi di energia possono raggiungere i 9 MWh per ogni tonnellata di metallo prodotto [9]. In questo contesto, è stata ampiamente sottolineata l'importanza di implementare soluzioni più sostenibili ed efficienti che riducano i consumi energetici negli impianti di fonderia [10], [11]. In particolare, è stata evidenziata l'efficacia nell'intervenire sulle tecnologie costituenti l'impianto, rinnovandole, modificandole o sostituendole con asset più nuovi e performanti [12], [13]. Considerando il processo di fonderia, è possibile agire a livello tecnologico in una o più delle quattro fasi produttive: fusione, stampaggio, colata e finitura [3], [14]. In aggiunta, tra le possibili opzioni c'è anche quella di effettuare miglioramenti tecnologici sui sistemi ausiliari (ad esempio, agendo su compressori o motori) e sui sistemi di recupero del calore (un esempio è l'installazione di una turbina Rankine).

Di seguito, si riportano le informazioni di dettaglio relative agli interventi possibili in ogni fase. Tali interventi sono stati collezionati dopo aver effettuato un'analisi sistematica della letteratura, il cui processo di ricerca è descritto in dettaglio in Figura 2, e dopo aver analizzato le diagnosi energetiche.

Consultando i database Scopus e Google Scholar e introducendo le parole chiave riportate in Figura 2, dopo aver definito dei criteri di esclusione ed inclusione delle fonti, sono stati identificati 54 documenti d'interesse che sono stati letti interamente e usati per determinare gli interventi tecnologici di miglioramento dei consumi energetici riportati nei sotto-paragrafi successivi. Le Figure 3-5 riportano una rapida clusterizzazione delle fonti in base alla loro distribuzione temporale, al tipo di documento analizzato e al tipo di metallo trattato.

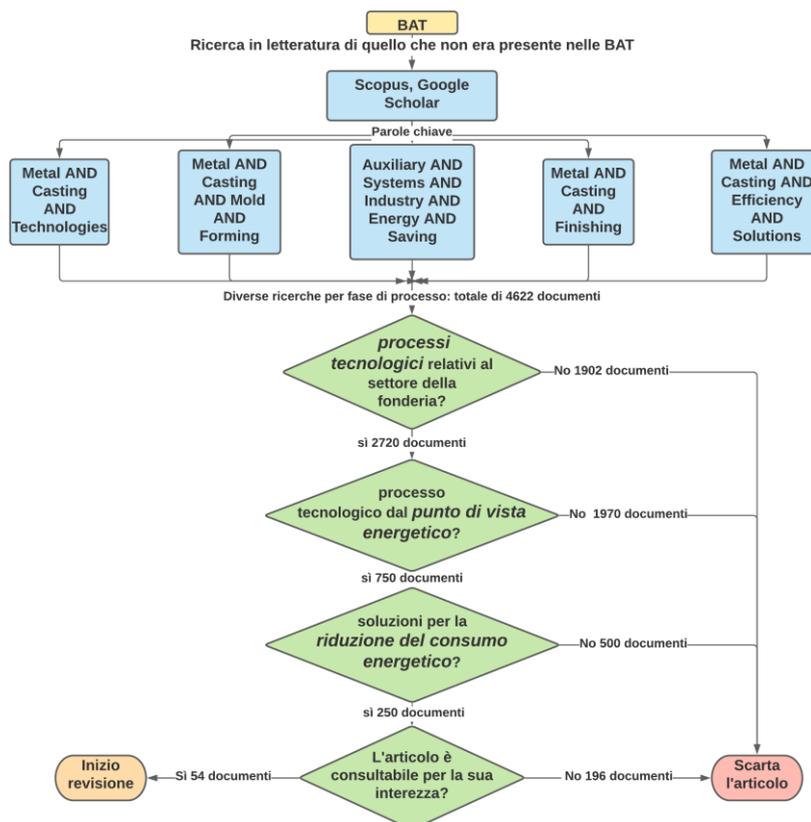


Figura 2. Schema PRISMA che riepiloga il processo di analisi della letteratura a valle del quale sono stati collezionati gli interventi tecnologici *energy-saving* del settore delle fonderie.



Figura 3. Distribuzione temporale delle 54 fonti analizzate.

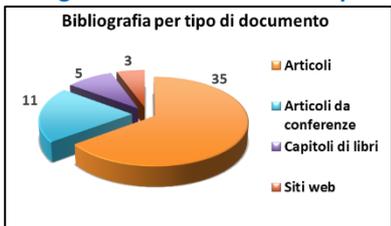


Figura 4. Suddivisione delle 54 fonti in base al tipo di documento.



Figura 5. Suddivisione delle fonti in base al tipo di metallo in esse trattato.

Oltre alla consultazione della letteratura, sono state analizzate in dettaglio anche le diagnosi energetiche. Nel caso del settore della fonderia, sono state esaminate le diagnosi compilate da 231 diversi siti produttivi, sparsi in tutta l'Italia, con una maggiore densità nella regione Lombardia con un totale di 104 impianti (Figura 6). Le regioni settentrionali hanno fornito diagnosi relative a 204 siti, 22 siti sono stati analizzati relativamente alle regioni centrali e, infine, solo 5 impianti sono stati esaminati relativamente al Sud Italia. Analizzando le 231 diagnosi, è emerso che 89 siti produttivi lavorano con metalli ferrosi (principalmente ghisa), mentre 134 impianti sono dedicati alla fusione di metalli non ferrosi (principalmente alluminio). Infine, 7 impianti realizzano manufatti sia con metallo ferroso che non ferroso. Una sintesi della suddetta classificazione è riportata dalla Tabella 1.

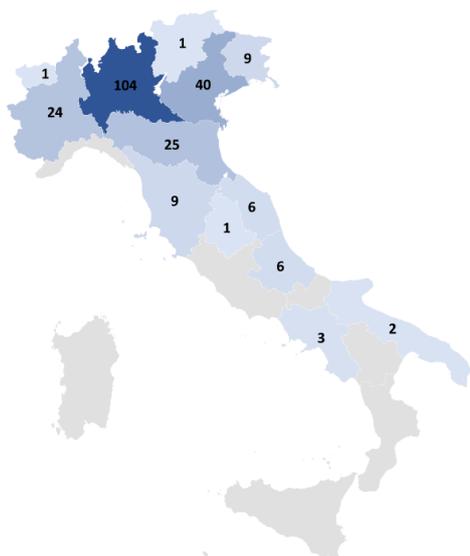


Figura 6. Distribuzione geografica delle 231 fonderie italiane che costituiscono il campione studiato.

Tabella 1. Tipi di metallo lavorati dai 231 siti produttivi esaminati.

Type of casted metal	# manufacturing sites	Percentage of the sample
Ferrous	89	39%
Non-ferrous	134	58%
Both	7	3%

Poiché gli interventi tecnologici disponibili nel settore delle fonderie sono stati reperiti sia consultando la letteratura, che le diagnosi energetiche, di conseguenza, gli interventi di seguito elencati possono ricadere in uno dei seguenti casi:

1. Interventi tecnologici riportati sia in letteratura che nelle diagnosi energetiche. Questi interventi sono colorati in rosso per indicare che sono stati individuati nelle diagnosi e sono corredati da citazione bibliografica per ricordare l'articolo scientifico dal quale sono stati derivati.
2. Interventi tecnologici reperiti solo in letteratura. Tali interventi sono riportati in nero perché non provengono dalle diagnosi, ma sono accompagnati dalla citazione di letteratura dai quali sono stati reperiti.
3. Interventi tecnologici reperiti solo nelle diagnosi. Tali interventi sono colorati in rosso in quanto estratti dalle diagnosi energetiche, ma non riportano citazioni bibliografiche perché non sono stati reperiti in letteratura scientifica.

2.1.1 Fusione

Durante la fusione si ha il passaggio di stato del metallo dalla fase solida delle materie prime a quella liquida. Le materie prime vengono caricate all'interno di forni fusori, dove vengono portate alla temperatura di fusione e poi successivamente surriscaldate. Il metallo liquido viene poi spillato per essere trasportato all'interno di apposite siviere all'impianto di colata. La fase di fusione è la più energivora del processo (data l'enorme quantità di calore utilizzata), ma anche quella su cui sono possibili più interventi di recupero. In base al tipo di metallo si hanno diversi tipi di forni fusori, che possono essere suddivisi in due categorie in base al tipo di energia in input: i forni a combustione e i forni elettrici. I forni a combustione sono quei forni in cui l'energia termica necessaria a far raggiungere al metallo la propria temperatura di fusione è fornita appunto dalla combustione. Per la produzione di ghisa si utilizzano principalmente i forni cubilotto (Figura 7), dove si utilizza carbon coke come combustibile. Quest'ultimo è un derivato del carbone e viene prodotto riscaldando il carbone in assenza di aria. Il carbon coke viene utilizzato in molti tipi di forni (principalmente negli altoforni per la produzione di acciaio) ed il carbonio al suo interno è l'agente riducente nella reazione chimica che avviene all'interno del forno. Il forno cubilotto può essere a vento caldo, dove l'aria di combustione viene preriscaldata per risparmiare energia, o a vento freddo, dove l'aria di combustione viene immessa a temperatura ambiente. All'interno dei forni sono presenti dei bruciatori, che innescano la combustione, e che sono alimentati a metano.

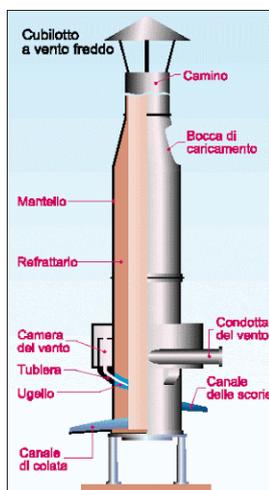


Figura 7. Esempio di forno cubilotto [15].

Un altro tipo di forno a combustione sono i forni a gas, dove l'energia termica necessaria alla fusione del metallo viene fornita dalla combustione di gas naturali. In questi forni sono presenti dei bruciatori all'interno dei quali avviene la combustione. La miscela di aria-gas in uscita dai bruciatori viene fatta venire in contatto con il metallo da fondere. Tra questi tipi di forni si annoverano il forno rotativo ossi-combustibile, il forno a riverbero, il forno a tino, il forno a volta radiante ed altri.

I forni elettrici, invece, usano l'energia elettrica per la generazione dell'energia termica necessaria. Fanno parte di questa categoria i forni elettrici a induzione, a resistenza o ad arco elettrico. I forni ad arco elettrico (Figura 8) sono tipicamente utilizzati per la fusione dei rottami di acciaio. L'elemento riducente è sempre il carbonio, in questo caso sotto forma di elettrodi in grafite. Vi sono 3 elettrodi, tra i quali viene fatto scoccare un arco elettrico che genera calore. Durante il processo, il carbonio presente negli elettrodi reagisce con l'ossigeno nel metallo, consumando gli elettrodi stessi, che fanno da veri e propri fusibili.

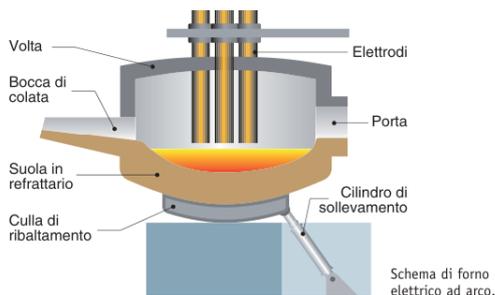


Figura 8. Forno ad arco elettrico [16].

In tutti i tipi di forni viene spillato dal fondo il metallo fuso nella sua forma pura, che non è però l'unico risultato della fusione. Si genera infatti anche della cosiddetta "loppa" (in inglese "slag"), che contiene tutte le impurità e le scorie. La loppa galleggia sul metallo fuso rendendo semplice la separazione dal restante metallo. Una volta separata, la loppa viene scartata o in alcuni casi recuperata. Successivamente, il metallo fuso non viene sempre inviato direttamente al reparto di colata, ma può essere mandato a dei forni di mantenimento (quasi sempre alimentati da energia elettrica), nei quali si mantiene il metallo allo stato liquido fino a quando non viene colato.

Di seguito si riepilogano gli interventi tecnologici reperiti per ridurre i consumi energetici relativi alla fase di fusione.

- **Interventi che agiscono sugli impianti di caricamento nei forni fusori:**
 - Preriscaldare la carica di ingresso ai forni fusori soffiando direttamente fumi su tale materia (essiccatore). In questo modo, la carica in ingresso al forno risulta più calda e meno umida, generando un risparmio energetico grazie alla minor quantità di energia che successivamente servirà per raggiungere il punto di fusione e consentendo di recuperare l'energia termica proveniente dai fumi di scarto del forno stesso. Per questa soluzione la letteratura non indica limiti applicativi [17].
- **Interventi che agiscono sui bruciatori nel forno fusorio:**
 - Utilizzare bruciatori recuperativi nel forno fusorio. Questi sono in grado di sfruttare il calore dei fumi di scarico per preriscaldare l'aria comburente attraverso uno scambiatore di calore. Rispetto a un bruciatore tradizionale, un bruciatore recuperativo fa risparmiare circa il 30% di energia. Questo intervento è applicabile soltanto nei forni a combustibile [18].
 - Utilizzare bruciatori "LOW NOx" per minimizzare le emissioni di NOx e conseguentemente i consumi energetici atti ad eliminare o trattare tali gli agenti inquinanti emessi dal processo di combustione. Questo intervento è applicabile soltanto nei forni a combustibile [17].
 - Utilizzare bruciatori ad elevata efficienza. Il risparmio energetico è dovuto alla maggiore efficienza di questi bruciatori rispetto a quelli già in uso. Questo intervento è applicabile soltanto nei forni a combustibile [17].

- Utilizzare bruciatori rigenerativi nel forno fusorio. Questi bruciatori operano a coppie e sono in grado di recuperare l'85-90% del calore contenuto nei fumi, andando a preriscaldare l'aria comburente a temperature molto elevate. Permettono un risparmio di combustibile superiore al 60% [17].
- Utilizzare bruciatori *oxy-fuel* nel forno fusorio. Questi bruciatori sostituiscono l'aria di combustione con ossigeno puro. Così facendo si riduce non solo il consumo di combustibile, ma anche la quantità di emissioni data la assenza di azoto nella combustione. Questo intervento è applicabile soltanto a forni a combustibile [17], [19].
- Utilizzare un combustore per una combustione senza fiamma. In questo modo non si ha un fronte di fiamma e, di conseguenza, si evitano tutti i problemi ad esso associati, tra cui la zona di stabilità all'interno della camera di combustione. Questo intervento è applicabile soltanto nei forni a combustibile [17].
- **Interventi che agiscono sul forno fusorio:**
 - Sostituire il vecchio forno fusorio con uno nuovo. Questo intervento è molto costoso, dato che consiste nella completa sostituzione del forno. Il risparmio energetico è dovuto alla superiore efficienza dei forni moderni rispetto ai più vecchi che si vanno a sostituire. La letteratura scientifica non ne riporta limiti applicativi [17].
 - Adottare la tecnologia IGBT sui forni elettrici. La tecnologia IGBT (*insulated-gate bipolar transistor*) è un dispositivo a semiconduttore usato come interruttore elettronico in applicazioni ad alta potenza, cioè è in grado di commutare alte tensioni e alte correnti. La applicazione di questa tecnologia è limitata ad i forni alimentati da corrente elettrica [20].
 - Utilizzare trasformatori *Ultra High Power* per aumentare il voltaggio di lavoro nel forno ad arco elettrico. L'utilizzo di questi trasformatori permette di lavorare a voltaggi maggiori e, quindi, di ridurre i tempi di fusione nel forno. Questo intervento è applicabile nei forni ad arco elettrico [12].
 - Adottare la *Oxy-oil technology* per inserire olio come parziale sostituto del coke. Questo intervento porta benefici dal punto di vista delle emissioni; dunque, comporta un risparmio energetico in fase del loro smaltimento/trattamento. La letteratura riporta che tale intervento è applicabile nei forni a combustibile, ma non è una tecnica molto diffusa [12].
 - Utilizzare fornaci raffreddate ad acqua. I forni fusori hanno pareti in refrattario per evitare perdite di calore verso l'esterno, ma il raffreddamento delle pareti ad acqua garantisce di recuperare il calore che riesce a passare lo strato di refrattario. L'acqua riscaldata può essere poi usata in svariate applicazioni. La letteratura non riferisce limiti applicativi per questo intervento [21].
 - Installare impianti per il recupero di metallo dalle scorie. Il processo di fusione non ha come unico risultato il metallo puro fuso. Si hanno, infatti, anche delle scorie che galleggiano sul metallo fuso e devono essere asportate prima di caricare il metallo nelle siviere. Queste scorie contengono una piccola percentuale di metallo che può essere recuperato. Fino al 5% delle scorie è metallo recuperabile al 90%. Questo intervento non ha limiti di applicabilità, ma la piccola percentuale di metallo recuperabile non giustifica i costi necessari, e per questo la letteratura riferisce che tale pratica non è diffusa [22].
 - Effettuare un rifacimento dei refrattari dei forni per evitare perdite di calore verso l'esterno. Le perdite di calore verso l'esterno sono le principali perdite energetiche dei forni fusori e possono essere limitate rifacendo le pareti dei forni stessi o inspessendole. Tale intervento è applicabile a tutti i tipi di forni, ma è costoso e comporta il blocco dell'intero impianto per essere effettuato [21], [23].

- Installare un sistema per la re-iniezione delle polveri catturate dagli impianti di aspirazione all'interno del forno fusorio. I fumi di scarico dei forni fusori contengono molte polveri che vengono sollevate durante il processo. La cattura e successiva reiniezione di tali polveri garantisce che non ci siano perdite di materiale. Questo intervento è applicabile a tutti i tipi di forni [24].
- Introdurre un dispositivo pneumatico dotato di lancia per soffiare i materiali che formano una schiuma di scorie nella zona della reazione. Questo intervento è applicabile in tutti i tipi di forni e consente di rendere la reazione più controllabile, ottimizzandone i consumi energetici [24].

2.1.2 Stampaggio

La fase di stampaggio riguarda la preparazione delle forme all'interno delle quali viene colato il metallo fuso. Lo stampo riproduce in negativo la forma dell'oggetto da produrre e può essere realizzato per un'unica colata (forma a perdere) o in materiale refrattario per più colate (forma permanente). Se il pezzo da produrre presenta cavità, queste vengono ottenute utilizzando le cosiddette "anime", che sono parti di forma a perdere. La realizzazione delle anime rientra nel processo di formatura.

La formatura a perdere è così detta perché il processo di estrazione del getto solidificato prevede la distruzione dello stampo. Questo tipo di formatura permette geometrie molto complesse ad un basso costo, andando però a penalizzare la capacità produttiva dell'impianto. Negli impianti in cui la formatura è del tipo a perdere infatti, la maggior parte del tempo si impiega nella realizzazione delle forme. Inoltre, la finitura superficiale con questo tipo di formatura è inferiore a quella con formatura permanente, in quanto la sabbia introduce porosità sul getto in metallo. La forma viene realizzata con sabbie opportunamente miscelate con materiali leganti e utilizzando un modello in legno o in metallo del pezzo da realizzare. Nella formatura a perdere possiamo individuare due categorie in base al tipo dei leganti utilizzati: la formatura a verde e la formatura in sabbia-resina. Nella prima la sabbia è miscelata con bentonite, acqua e polvere di carbone, mentre nella seconda si utilizzano speciali resine come additivi.

Nella formatura permanente invece, lo stampo è fatto in materiale refrattario in grado di resistere alle elevate temperature di colata. Questo tipo di formatura permette di realizzare più pezzi con lo stesso stampo, risparmiando il tempo necessario alla formatura, aumentando però il costo dello stampo stesso. Essendo infatti fatto di un materiale estremamente performante, lo stampo avrà costi elevati e, per questo motivo, la formatura permanente risulta adatta a impianti con elevati volumi produttivi. L'elevata qualità del materiale di cui è fatto lo stampo permette di ottenere ottime finiture superficiali.

I vettori energetici utilizzati nella fase di formatura sono l'energia elettrica ed il gas naturale, necessario ad alimentare i bruciatori nei forni per gli stampi in terra.

Si riepilogano gli interventi tecnologici reperiti per ridurre i consumi energetici nella fase di stampaggio.

- **Interventi che sugli impianti di trasporto delle terre:**
 - Installare un impianto per l'utilizzo delle scorie provenienti dalla fornace come terra. Questa tecnica consiste nel riutilizzo delle scorie di fusione come materiale da aggiungere alla terra nella fase di formatura. La letteratura riporta che tale intervento è applicabile soltanto nel caso di formatura a perdere, che tuttavia non è molto diffusa [25].
- **Interventi che sugli impianti di formatura:**
 - Sostituire l'impianto elettrico di recupero della sabbia con nuovo impianto a gas. Nella formatura a perdere si riesce a recuperare parte della sabbia usata per gli stampi, la quale viene rimandata al reparto di formatura per essere riutilizzata. In generale, la sostituzione di un vecchio impianto di recupero con uno nuovo permette il risparmio energetico dovuto alla superiore efficienza del nuovo impianto. Nelle diagnosi energetiche, è stata proposta la sostituzione dell'attuale impianto elettrico di recupero sabbia (che consuma 100 kW di

- potenza elettrica) con un nuovo impianto a gas (che impiega solo 20 kW), apportando un notevole risparmio energetico al sistema esistente.
- Installare un recuperatore di sabbia dal forno per riutilizzare tale sabbia per la formatura.
 - Sostituzione le isole di stampaggio con delle isole nuove. I benefici dal punto di vista energetico sono dovuti alla superiore efficienza dei macchinari più moderni.
 - Sostituzione di mescolatori con nuovi. I benefici dal punto di vista energetico sono dovuti alla superiore efficienza dei macchinari più moderni.
 - Utilizzo di preriscaldamento dell'aria e di bruciatori rigenerativi o di recupero per gli impianti di produzione delle forme in sabbia o in resina termoindurente. Questo intervento è del tutto assimilabile all'intervento che viene effettuato sui forni fusori e porta gli stessi benefici dal punto di vista energetico. La letteratura riporta come tale intervento permetta un recupero di calore fino al 50%. Tuttavia, tale intervento è applicabile soltanto a formatura "hot box" e di tipo a perdere [26].
 - Installare un filtro efficiente nell'impianto terre. Questo intervento permette la rimozione di sostanze contaminanti all'interno delle terre che potrebbero rendere difettosa la forma in sabbia e implicare consumi energetici per il suo trattamento. Questo intervento risulta applicabile soltanto nelle formature di tipo a perdere.
 - Utilizzo della stampa 3D (*Jet Binding*) per la creazione delle forme. La stampa 3D si sta diffondendo molto nelle fonderie negli ultimi anni, dato l'infinito numero di forme creabili. Oltre ad essere energeticamente conveniente, si ha un minor numero di errori nella creazione degli stampi e, quindi, meno stampi scartati. Inoltre, il processo risulta più rapido. Questo tipo di intervento è facilmente integrabile nella catena produttiva, anche se al momento non è diffuso in Italia. Risulta applicabile negli impianti di formatura del tipo a perdere in sabbia o resina termoindurente [27], [28].
 - Utilizzare impianti di riscaldamento a infrarossi per l'asciugatura del rivestimento delle forme (stampi). Questa tecnologia viene utilizzata negli impianti di formatura di tipo permanente. Il metallo colato, infatti, non viene a diretto contatto con lo stampo, bensì con un materiale distaccante che viene applicato sullo stampo prima della colata. L'asciugatura del distaccante mediante riscaldamento a infrarossi riduce il tempo di asciugatura dell'85%, ottimizzando i consumi energetici di tale fase di processo [8], [29].
 - Utilizzare un processo in forma permanente con metodo di colata a bassa pressione con utilizzo di anime inorganiche. La differenza rispetto al processo "tipico" di formatura in forma permanente con metodo di colata a bassa pressione sta esclusivamente nell'utilizzo di anime inorganiche. Si tratta di una nuova tecnologia che impiega un sistema legante inorganico, a base di silicato, per la formatura delle anime e, quindi, senza emissioni su base di silicato. I suoi benefici sono la riduzione di emissioni nocive e, pertanto, dei consumi energetici associati ai sistemi di ventilazione e trattamento aria.
 - Sostituzione di vecchi impianti di formatura con impianti nuovi. Il beneficio energetico è dovuto alla maggior efficienza degli impianti più moderni. Non ha limiti applicativi.
 - Creazione di anime usando stampa 3D (*Binder Jetting* o altri tipi di tecnologia *Additive Manufacturing*). Questa tecnologia permette la realizzazione delle anime usando la stampa 3D. Unendo le polveri utilizzando un legante si ottiene un materiale impiegabile dalla stampante 3D per realizzare le anime. Queste tecnologie si stanno diffondendo rapidamente vista la loro infinita applicabilità (è possibile realizzare oggetti di qualunque forma in poco tempo) e la loro facilità di integrazione nel processo produttivo. Non ci sono limiti applicativi dato che le anime sono necessarie in tutti i tipi di formatura [30].

2.1.3 Colata

Nella fase di colata avviene l'incontro tra il metallo fuso (fusione) e lo stampo (formatura). Infatti, il metallo viene colato all'interno degli stampi. Il processo di colata si distingue in colata in forma a perdere e colata in forma permanente. Nella colata in forma a perdere il metallo fuso viene colato per gravità dalle siviere all'interno degli stampi. Le siviere sono movimentate attraverso carrelli elevatori e, inclinandosi, versano il metallo fuso nelle forme. Per piccoli getti questa operazione può essere fatta a mano. Il metallo viene lasciato raffreddare e, una volta solidificato, estratto dalla sabbia. La forma viene distrutta nella fase di "distaffatura" e la sabbia parzialmente recuperata e inviata all'impianto di formatura. Le macchine distaffatrici sono delle piattaforme vibranti che permettono il distacco della sabbia dal metallo. L'operazione viene completata a mano o eventualmente con l'aiuto di martelli pneumatici. La colata in forma permanente, invece, ha più varianti in base alla metodologia con la quale il metallo viene colato negli stampi. In particolare, si può avere: una colata per gravità (come nella colata in forma a perdere), una colata centrifuga (per stampi assialsimmetrici, che vengono messi in rotazione in modo che il metallo si depositi in modo uniforme sulle pareti dello stampo per l'effetto della forza centrifuga), una pressocolata (il metallo fuso viene iniettato nello stampo ad alta pressione), oppure una colata a bassa pressione (il metallo fuso è trasferito da una fornace sigillata allo stampo attraverso un tubo e alla pressione di un gas).

Di seguito si riepilogano gli interventi tecnologici reperiti per ridurre i consumi energetici nella fase di colata.

- **Interventi che agiscono sugli impianti di colata:**

- Utilizzare la tecnica "*Vacuum Suction Casting*" per migliorare la finitura superficiale evitando la formazione di difetti causati dall'evaporazione del legante. Questa tecnica permette di ridurre la porosità finale del getto, dunque comportando una riduzione dei consumi energetici in fase di rifinitura. Questo intervento non mostra limiti applicativi [27].
- Utilizzare della tecnica "*Quench Casting*" per il raffreddamento del getto. Questa pratica consiste nel raffreddamento in acqua del getto ancora racchiuso nella sabbia, conferisce al getto proprietà meccaniche migliori rispetto al tradizionale raffreddamento in aria, soprattutto la durezza, ancora diminuendo i consumi energetici in fase di finitura. L'applicazione di questo intervento è limitata al caso di colata in forma a perdere [31].
- Utilizzo della tecnica "*Splash Casting*" per il raffreddamento del getto. Questa pratica consiste nel versare dell'acqua sopra il getto ancora racchiuso nello stampo. Analoghi i benefici rispetto al *quench casting* (punto dell'elenco soprastante). L'applicazione di questo intervento è limitata al caso di colata in forma a perdere [31].
- **Sostituzione del forno di colata.** Questo intervento porta benefici energetici dovuti alla superiore efficienza degli impianti più moderni, tuttavia questo intervento è molto costoso. Si stima che in Europa il 30% degli impianti di colata delle industrie siano stati installati 25 o più anni fa, e sono ora obsoleti. Non ci sono limiti applicativi [12], [32].

- **Interventi che agiscono sugli impianti di colata:**

- **Sostituire il forno di attesa alla colata con un forno nuovo.** Questo intervento porta benefici energetici dovuti alla superiore efficienza dei forni più moderni. Limitato agli impianti di pressocolata con formatura permanente.
- **Sostituire il forno di colata con un forno nuovo.** Questo intervento porta benefici energetici dovuti alla superiore efficienza dei forni più moderni. Non ci sono limiti applicativi.
- **Sostituzione gli impianti di colata con impianti nuovi.** Questo intervento porta benefici energetici dovuti alla superiore efficienza degli impianti più moderni. Non ci sono limiti applicativi [33].
- **Sostituire la linea di pressofusione con una più nuova ad elevata efficienza.** Questo intervento porta benefici energetici dovuti alla superiore efficienza degli impianti più moderni. Questo intervento ha applicabilità limitata agli impianti di pressocolata.

- **Sostituzione di macchine sterratrici con nuove.** Questo intervento porta benefici energetici dovuti alla superiore efficienza degli impianti più moderni. L'applicazione di questo intervento è limitata al caso di colata in forma a perdere [12].

- **Interventi che agiscono sulle siviere:**

- Installare impianti per il preriscaldamento programmato ed efficiente delle siviere. Questo intervento permette di minimizzare le perdite di calore dovute al contatto tra il metallo caldo in uscita dal forno fusorio e le pareti della siviera. Non ci sono limiti applicativi [12].
- Utilizzare coperchi per le siviere per evitare perdite termiche. Analogamente all'intervento precedente, si vuole minimizzare lo scambio termico tra il metallo fuso e l'ambiente, per evitare che esso solidifichi. Inoltre, siviere dotate di coperchio necessitano del 30% di tempo in meno per il preriscaldamento. Non ci sono limiti applicativi [12].
- Utilizzare materiali di rivestimento per le siviere per evitare perdite di calore per convezione. Le siviere scambiano calore con l'esterno per convezione. È stato studiato che in media si ha una perdita di circa 20kW per siviera in calore a causa dello scarso isolamento termico. Non ci sono limiti applicativi [8].
- Utilizzare siviere di forma diversa (con becco più pronunciato) per ridurre la porosità del getto finito. Questo intervento garantisce un miglior mantenimento della temperatura grazie alla minor dispersione termica [34].

2.1.4 Finitura

Una volta rimosso dallo stampo, il getto non è ancora pronto per essere consegnato al cliente. Sono infatti necessarie ulteriori operazioni di finitura. La solidificazione successiva alla colata non riguarda solo il getto, ma anche i canali di colata e le materozze. I primi sono i canali attraverso i quali si cola il metallo fuso, mentre le seconde sono delle riserve di metallo liquido fondamentali per il processo per due motivi: fungono da dispensa nel caso in cui venga colato poco metallo e, soprattutto, raccolgono al loro interno le impurità del metallo fuso. La rimozione quindi di materozze e canali di colata rientra nei processi di finitura, e si chiama "smaterozzatura". Successivamente si vanno a rimuovere i pezzi di sabbia ancora presenti sul pezzo (granigliatura) e le eventuali bave metalliche presenti (sbavatura). Come ultima cosa, si effettuano i trattamenti termici, che sono necessari a conferire migliori proprietà meccaniche al getto e vengono effettuati in appositi forni. La lavorazione dei metalli per fusione ha, infatti, il difetto di conferire al metallo caratteristiche meccaniche peggiori rispetto a lavorazioni di deformazione plastica. Tuttavia, la necessità di ricorrere a trattamenti termici per migliorare le caratteristiche meccaniche del prodotto è compensata dal beneficio ottenibile grazie alla possibilità di produrre forme di elevata complessità di geometrica.

Si riepilogano gli interventi tecnologici reperiti per ridurre i consumi energetici nella fase di finitura.

- **Interventi che agiscono sulle stazioni di finitura:**

- Utilizzare robot per effettuare le fasi di finitura. Questo intervento permette l'automatizzazione del reparto di finitura, aumentando la produttività. Inoltre, questi robot sono alimentati da motori elettrici ad elevata efficienza, riducendo l'energia elettrica necessaria. La letteratura non indica limiti applicativi per questo intervento [35].
- **Sostituire la linea di finitura con una nuova.** Questo intervento porta benefici energetici dovuti alla superiore efficienza degli impianti più moderni. Non ci sono limiti applicativi.
- Eliminare macchinari di basso livello e introdurre nuovi più efficienti. Questo intervento porta benefici energetici dovuti alla superiore efficienza degli impianti più moderni. Non ci sono limiti applicativi [12], [36].

- Sostituire il forno per il trattamento termico con uno più nuovo. Questo intervento porta benefici energetici dovuti alla superiore efficienza degli impianti più moderni. Non ci sono limiti applicativi.
- Installare ugelli di soffiaggio ad alta efficienza.

2.1.5 Servizi ausiliari e di supporto

Oltre ad agire sulle tecnologie che costituiscono le principali fasi del processo produttivo, è possibile ridurre i consumi energetici d'impianto effettuando interventi migliorativi sugli apparati ausiliari quali, quali turbomacchine, sistemi di trasporto e sui sistemi di recupero di calore. Di seguito, si riportano gli interventi individuati per tali tecnologie. Oltre alla descrizione fornita di seguito, una spiegazione dettagliata degli interventi *energy-saving* che riguardando i sistemi ausiliari e dei benefici ottenibili da essi è già stata fornita da UNIFI nel report 2020 (sia per il settore del cemento che per le fonderie). Pertanto, si rimanda alla lettura di tale documento per ulteriori approfondimenti.

- **Interventi che agiscono sui compressori:**
 - Sostituire i compressori esistenti con nuovi e più efficienti. Questo intervento porta benefici energetici dovuti alla superiore efficienza degli impianti più moderni. Non ci sono limiti applicativi, ma la letteratura sottolinea che tale intervento di efficientamento energetico può risultare costoso a causa dell'elevato costo dei compressori industriali [37].
 - Aumentare la qualità dell'aria compressa introducendo uno scambiatore di calore all'uscita del compressore per raffreddare l'aria e rimuovere vapore acqueo dall'aria compressa. L'aria compressa in uscita dal compressore, infatti, è inutilmente calda e quel calore può essere recuperato. Inoltre, il vapore acqueo potrebbe causare danni ed è meglio rimuoverlo. Non ci sono limiti applicativi [38].
 - Introdurre una pompa di iniezione per il miglioramento delle proprietà di lubrificazione. La lubrificazione degli ingranaggi del compressore è importante per evitare che ci siano guasti e consumi energetici superflui. Non ci sono limiti applicativi [38].
 - Isolare sezioni del sistema che richiedono specifici valori di pressione dell'aria compressa. Anche questo intervento è molto semplice e porta benefici energetici importanti, dato che sarebbe inutile produrre tutta l'aria compressa ad alti valori di pressione per poi usarla a quei valori elevati solo in piccola parte. Non ci sono limiti applicativi, a meno che tutta l'aria compressa sia richiesta allo stesso valore di pressione [39].
 - Ottimizzare le dimensioni dei compressori in base alla domanda di aria compressa per evitare di avere compressori inutilmente grossi. Questo intervento dovrebbe essere fatto a monte della progettazione dell'impianto, o comunque nel momento in cui ci si rendesse conto che i compressori utilizzati sono inutilmente grossi per l'utilizzo necessario. Non ci sono limiti applicativi [39].
 - Utilizzare un intercooler nel compressore. Questo intervento può presentare un elevato costo di investimento iniziale, ma può portare a riduzioni dei costi legati ai consumi energetici fino al 20%. Consiste nel mettere uno scambiatore tra due stadi intermedi del compressore, in modo da abbassare la temperatura dell'aria e ridurre il lavoro necessario nella seconda metà del processo di compressione. Non è un intervento molto diffuso a causa della difficoltà a livello impiantistico [37], [40].
 - Installare compressori a numero di giri variabili (compressori già dotati di inverter). Questo intervento è molto costoso e consiste nella completa sostituzione del vecchio compressore con uno nuovo e a giri variabili. Il numero di giri variabili permette una regolazione efficace del compressore evitando sprechi energetici. Non è molto diffuso visti gli elevati costi. Più comune è la pratica di applicare un inverter su un compressore a numero di giri fisso [39].
 - Installare motori elettrici ad induzione ad elevata efficienza. L'utilizzo di motori ad elevata efficienza per far lavorare i compressori porta benefici dal punto di vista energetico grazie al

superiore rendimento dei motori. Questo aspetto viene ulteriormente chiarito di seguito, nella sezione riguardante i motori elettrici. Non ci sono limiti applicativi [39].

- Sostituire i compressori per creare il vuoto con pompe a vuoto. La differenza sta nel fatto che un compressore lavora a pressione di aspirazione costante, mentre la pompa a vuoto lavora a pressione di aspirazione variabile (decescente) e a pressione di mandata costante. Inoltre, il costo di una pompa è sostanzialmente inferiore a quello di un compressore (la letteratura riporta un risparmio in termini di domanda mensile di kilowatt e utilizzo annuale di kilowatt/ora). Non ci sono limiti applicativi [39].
- **Interventi che agiscono sui macchinari ad aria compressa**
 - Sostituire le movimentazioni ad aria compressa con sistemi motorizzati ad azionamento elettronico o sistemi idraulici. Questo intervento è limitato appunto dalla fattibilità di tale scelta, che dipende dal macchinario in questione. I benefici energetici sono dovuti al minor consumo dei motori elettrici rispetto ai compressori. Inoltre, l'aria compressa deve essere distribuita in tutto l'impianto, andando incontro ad eventuali perdite e quindi sprechi energetici. È un intervento sempre più diffuso [39].
 - Sostituire l'aria compressa con alternative, per evitare sprechi di energia nella compressione dell'aria stessa. Come l'intervento precedente, si punta ad evitare dove possibile di dover comprimere l'aria, in quanto i macchinari necessari sono costosi e si va incontro a possibili perdite nel circuito di distribuzione dell'aria compressa. L'applicabilità dipende dai macchinari sui cui si vuole effettuare l'intervento [41].
- **Interventi che agiscono sugli impianti di aspirazione:**
 - Posizionare gli aspiratori il più vicino possibile alla sorgente. Questo intervento permette una più efficiente aspirazione dell'aria e delle polveri, evitando che ci siano zone lontane dagli aspiratori in cui non si ha una buona aspirazione dell'aria. È un intervento semplice e non ci sono limiti applicativi [17].
 - Effettuare una lubrificazione elettrostatica per diminuire le polveri di olio nell'aria. Le polveri di olio in aria possono essere nocive, per cui si ricorre ad una lubrificazione elettrostatica di tutti i macchinari dell'impianto, in modo da non disperdere particelle di lubrificante. Questo intervento non riguarda direttamente gli impianti di aspirazione, ma è stato inserito in questa sezione data la sua diretta influenza sulla qualità dell'aria. Una miglior qualità dell'aria comporta minori consumi energetici in fase di trattamento/smaltimento delle emissioni inquinanti. L'intervento risulta applicabile solo dove possibile una lubrificazione elettrostatica [17].
 - Utilizzare sbrinatori per rimuovere le gocce di condensa dal flusso. La formazione di condensa dentro ai condotti di aspirazione può essere dannosa; per questo motivo, installare uno scambiatore di calore può evitare la formazione di condensa dentro ai condotti e, dunque, il suo successivo processo di rimozione/gestione. È un intervento diffuso e non ha limiti di applicazione [17].
 - Utilizzare precipitatori elettrostatici per rimuovere polvere di residui. Questo intervento è molto diffuso, data l'elevata concentrazione di polveri nell'aria aspirata all'interno dell'impianto. È uno dei sistemi attualmente più usati per l'abbattimento del particolato dai fumi, e consiste nell'applicazione di un campo elettrico per rimuovere la polvere dall'aria aspirata. Minori polveri nell'aria implicano un minor consumo energetico nelle fasi di trattamento dell'aria e delle emissioni d'impianto. Non ci sono limiti applicativi [17].
 - Trattare le emissioni in specifici sistemi di abbattimento. Questo intervento riassume, in generale, quelle che sono le *Best Practices* per l'abbattimento delle polveri negli impianti industriali. Come riportato in letteratura, esso comporta sia una riduzione della spesa elettrica per i sistemi di aspirazione, che una notevole riduzione delle emissioni [18].

- Utilizzare ventilatori delle corrette dimensioni. La scelta del ventilatore e la forma delle sue palettature sono fondamentali. L'intervento punta a far lavorare il ventilatore sempre nelle condizioni di massima efficienza. La dimensione dei ventilatori è importante dato che, spesso, tali macchine sono inutilmente grandi e portano perdite in efficienza del 1-5%. Questo tipo di intervento è poco diffuso dato che risulta più semplice controllare la velocità piuttosto che sostituire l'intero sistema di aspirazione. Non ci sono limiti applicativi [12].
- Installare azionamenti a velocità regolabile (*Adjustable Speed Drive - ASD*) sui ventilatori. L'installazione di ASD sui ventilatori può portare significanti risparmi energetici, tra il 15% e il 50%. La possibilità di regolare la velocità di rotazione sui ventilatori permette il funzionamento sempre nelle migliori condizioni a livello di efficienza. È un intervento semplice e molto diffuso. Non ci sono limiti applicativi [12].
- Installare una linea di aspirazione forzata per i forni. Questo intervento permette una migliore aspirazione dell'aria dal reparto di fusione, che è quello dove si vengono a generare la maggior parte delle polveri. Non ci sono limiti applicativi.
- Utilizzo di cinghie ad alta efficienza e sostituzione delle cinghie trapezoidali con cinghie dentate. Le cinghie fanno parte dei sistemi di aspirazione e spesso sono di tipo trapezoidale. Queste tendono ad allungarsi, slittare e deformarsi, comportando perdite di efficienza energetica. Le cinghie dentate possono, invece, portare benefici dal punto di vista energetico, dato che durano più a lungo, non si surriscaldano e hanno un'efficienza del 2% superiore alle cinghie trapezoidali. Non ci sono limiti applicativi [12].
- **Interventi che agiscono sui sistemi di trasporto:**
 - Sostituire i carrelli elevatori. Questo intervento porta benefici in quanto i nuovi muletti saranno più efficienti dei vecchi e sarà quindi meno costoso operarli. Non ci sono limiti applicativi, ma il risparmio energetico dato da questo intervento è limitato [42].
 - Sostituire i carica batteria dei carrelli elevatori. Questo intervento porta benefici in quanto i nuovi carrelli elevatori saranno più efficienti dei vecchi, consumando meno energia e determinando risparmi economici nel loro utilizzo. Non ci sono limiti applicativi, ma la letteratura sottolinea come il risparmio energetico dato da questo intervento sia limitato [42].
 - Sostituire i nastri trasportatori con nastri nuovi. Questo intervento porta benefici energetici dovuti alla superiore efficienza degli impianti più moderni. Non ci sono limiti applicativi.
 - Utilizzare delle coperture durante il trasporto di materiali per minimizzare le perdite di materiale sotto forma di polvere, aumentare la qualità dell'aria e il lavoro degli abbattitori e minimizzare la quantità di polvere emessa, dunque riducendo il consumo energetico nelle fasi di trattamento delle emissioni. Non ci sono limiti applicativi [18].
 - Utilizzare convertitori di frequenza a velocità controllata per ridurre i consumi energetici sugli apparati trasportatori [43].
 - Sostituire sistemi di trasporto pneumatici, a vite o a catene con sistemi di tipo a nastro. Questo intervento porta migliorie all'efficienza energetica del trasportatore, dato il maggiore rendimento dei sistemi a nastro rispetto a quelli pneumatici, vite o catena. Non ci sono limiti applicativi [43].
 - Sostituire le cinghie con cinghie poly-v nuove e più efficienti. Le cinghie poly-v sono più efficienti delle normali cinghie ad attrito. Inoltre, con comportano una diminuzione dell'usura, che normalmente riduce l'efficienza determinando slittamenti e deformazioni delle cinghie. Non ci sono limiti applicativi [44].
 - Sostituire cinghie trapezoidali con cinghie bi-elicoidali. Tale intervento comporta vantaggi affini a quelli descritti al punto precedente.

- Sostituire i carrelli elevatori a gasolio con carrelli più nuovi ed efficienti. Questo intervento porta benefici a livello energetico dato che i carrelli elevatori più moderni saranno più efficienti. Non ci sono limiti applicativi.
- Sostituire i carroporti. Questo intervento porta benefici a livello energetico dato che le gru a ponte più moderne saranno più efficienti. Non ci sono limiti applicativi.
- **Interventi che agiscono sui trasformatori:**
 - Sostituire i trasformatori con nuovi e più potenti e/o efficienti. Questo intervento permette di ottenere i benefici energetici dovuti ai superiori rendimenti dei trasformatori più moderni. Non ci sono limiti applicativi.
- **Interventi che agiscono su inverter e altri apparati elettrici:**
 - Sostituire gli inverter con nuovi e più efficienti o installare nuovi inverter sui motori che non ce li hanno. Gli inverter portano molti benefici, uno su tutti la soluzione ai problemi che si hanno all'accensione dei motori dovuti all'assenza di spunto da parte del motore. L'energia in fase di avvio viene fornita al motore in modo progressivo e il raggiungimento dei giri massimi avviene gradualmente, ottimizzandone il consumo. Inoltre, si riesce a sfruttare un miglior rendimento del motore grazie alla possibilità di regolarne il numero di giri. Questi benefici, oltre che il basso costo d'installazione e la semplicità della macchina finale, rendono questo intervento una pratica ampiamente diffusa [8].
 - Utilizzare filtri passivi. Rappresentano un intervento molto semplice e diffuso. Sono chiamati "filtri passivi", perché il loro funzionamento è dipendente dalla presenza di un segnale variabile in Ingresso, e non introducono alcuna amplificazione del livello del segnale di ingresso. I filtri passivi permettono l'attenuazione del segnale. Non ci sono limiti applicativi [17].
- **Interventi che agiscono sui motori elettrici:**
 - Utilizzare motori elettrici ad alta efficienza (IE2 IE3 IE4). La Norma internazionale IEC 60034-30:2008 definisce le seguenti classi di rendimento per motori trifase: IE1) Efficienza Standard; IE2) Alta Efficienza; IE3) Efficienza Premium; e IE4) Efficienza Super Premium. L'aumento di efficienza dei motori si traduce in una minore spesa energetica. La letteratura riporta che questo intervento è molto diffuso e in determinati casi risulta obbligatorio per legge. Non ci sono limiti applicativi [37], [44].
 - Utilizzare motori elettrici delle corrette dimensioni per assicurare che i motori siano proporzionati al carico. Spesso i motori elettrici sono sovradimensionati, comportando inutili sprechi energetici. Non ci sono limiti applicativi [44].
 - Utilizzare motori rigenerativi, che recuperino l'energia frenante in fase di discesa di apparecchi di sollevamento e la sfruttino per produrre energia elettrica con un inverter.
 - Utilizzare motori con bassa corrente di avviamento. L'utilizzo di questo tipo di motori permette un risparmio energetico dovuto alla minor corrente necessaria per l'avviamento. È un intervento poco diffuso, in quanto si preferisce ovviare ai problemi all'avviamento utilizzando inverter. Non ci sono limiti applicativi [45].
 - Rifasare i motori. Questo intervento è necessario dopo un determinato numero di ore di utilizzo per riportare il motore alle condizioni di funzionamento iniziali. In alcuni casi, infatti, è conveniente riavvolgere il motore elettrico piuttosto che comprarlo nuovo. Solitamente conviene riavvolgere i motori quando i costi di riavvolgimento non superano il 60% dei costi dell'acquisto di un nuovo motore. [12], [45].
 - Installare motori a velocità variabile (ASD). Come già visto per gli impianti di aspirazione, l'installazione di ASD è molto diffusa e porta risparmi energetici importanti fino al 60%. Non ci sono limiti applicativi [45].

- **Interventi che agiscono sugli impianti di distribuzione dei fluidi:**
 - Utilizzare un sistema di raffreddamento a circuito chiuso. Questa pratica permette di riutilizzare sempre la stessa acqua per il raffreddamento, eliminando i consumi energetici legati al trattamento dell'acqua, che altrimenti dovrebbero essere effettuati prima di rimettere essa in circolo. Non ci sono limiti applicativi [18]
 - Ottimizzare il design dei condotti per minimizzare le perdite di aria compressa e installare guarnizioni e sigilli per contenere le perdite rilevate o sostituire tratti di condotto danneggiati in modo da effettuare una bonifica delle perdite rilevate (*leak management*). Queste perdite sono facilmente individuabili e riparabili, e sono fonte di consumi energetici recuperabili. Questo intervento è molto diffuso data la sua economicità e l'importanza in termini di perdite che si possono risolvere. Non ci sono limiti applicativi [39].
 - Isolare l'impianto di distribuzione dei fluidi per evitare perdite di calore. Analogamente all'intervento precedente, la ricerca di perdite per convezione è molto semplice e altrettanto importante. La sostituzione dell'isolante dei condotti è economica e riduce notevolmente le perdite. Non ci sono limiti applicativi [12].
- **Interventi che agiscono sulle pompe**
 - Sostituire le pompe obsolete e/o usurate con nuove pompe ad elevata efficienza. Questo intervento porta miglioramenti di efficienza del 5-10%, diminuendo la spesa energetica necessaria per le pompe. È un intervento più diffuso rispetto alla sostituzione dei compressori, dato il minor costo delle pompe. Non ci sono limiti applicativi [12].
 - Ottimizzare le dimensioni delle pompe in base alla domanda di energia per evitare di avere macchine inutilmente grosse, che abbiano elevati consumi energetici [12].
 - Effettuare la rifilatura della girante per abbassare i consumi energetici della macchina. La rifilatura diminuisce la potenza della pompa, ma ne aumenta l'efficienza. Questa soluzione può essere usata nelle applicazioni dove l'attuale girante produce troppo calore e permette di risparmiare fino al 75% di energia elettrica [12].
 - Installare azionamenti a velocità regolabile (ASD) per far lavorare le pompe nelle condizioni di maggior efficienza. La massima efficienza della pompa dipende dal numero di giri a cui essa lavora. Pertanto, installando una pompa di tipo ASD si riesce a avere sempre la pompa nelle condizioni di massima efficienza. Questo intervento è molto diffuso e porta risparmi energetici tra 20-50%. Non ci sono limiti applicativi [12].
- **Interventi che agiscono sugli impianti di raffreddamento:**
 - Sostituire ed efficientare le torri evaporative. Questo intervento porta benefici energetici dovuti alla superiore efficienza degli impianti più moderni. Non ci sono limiti applicativi. È un intervento poco diffuso a causa dell'elevata complessità a livello impiantistico.
 - Riutilizzare le condense delle torri evaporative. Questa pratica permette di recuperare acqua dalle condense per poi utilizzarla per svariate applicazioni. Non ci sono limiti applicativi [12].
- **Interventi che agiscono sugli impianti di recupero di calore:**
 - Recuperare calore dalle scorie metalliche. Come già accennato in precedenza, dal forno fusorio si estraggono scorie ad elevate temperature che vengono poi scartate. Queste scorie possono essere utilizzate per recuperare calore da utilizzare poi in più modi, a seconda delle esigenze dell'impianto. Non ci sono limiti applicativi [46].
 - Pre-riscaldare l'aria di combustione in modo da ridurre il consumo energetico in fase di combustione stessa. Il pre-riscaldamento può essere effettuato sfruttando il calore recuperato in altre fasi di processo/impianto [46].
 - Effettuare la tecnica del CCU (*Carbon Capture and Utilization*) per catturare la CO₂ dai fumi e utilizzarla per altri scopi. Utilizzando la CO₂ per altri processi si evita di doverla immettere in

ambiente e, dunque, di doverla precedentemente trattare consumando energia. Tale intervento è applicabile nel caso di forni a gas [47].

- Usare il calore di recupero per produrre vapore in un boiler e alimentare un ciclo a vapore (Rankine). Come abbiamo visto c'è grande abbondanza di calore di recupero all'interno degli impianti di fonderia; perciò, è pratica comune utilizzare parte di questo calore per operare un ciclo a vapore per generare corrente elettrica. Non ci sono limiti applicativi [17].
- Utilizzare i gas esausti per operare un ciclo combinato per generare energia elettrica [48].
- Utilizzare i gas esausti per operare un ciclo ORC per generare energia elettrica. Come per il ciclo a vapore, si utilizza il calore recuperato nell'impianto per operare un ciclo ORC (*Organic Rankine Cycle*) e generare corrente elettrica. Non ci sono limiti applicativi [12].
- Catturare le sostanze volatili COV (composti organici volatili) per bruciarle e produrre calore. Questo calore generato potrà essere usato poi in numerose applicazioni. Non ci sono limiti di applicabilità, ma non è una soluzione molto diffusa attualmente [11].
- Installare un sistema di cogenerazione (o trigenerazione) per il recupero di calore. Anche questo intervento punta all'installazione di un ciclo termodinamico per il recupero di calore. È un intervento molto diffuso e la letteratura non ne sottolinea limiti applicativi [12].
- Usare i fumi per operare un ciclo frigorifero ad assorbimento. Un altro modo in cui è possibile sfruttare il calore dei fumi di scarico del forno fusorio è facendoli passare attraverso uno scambiatore di un ciclo frigorifero. Diminuendo la temperatura di scarico dei fumi si ha un aumento di efficienza dell'impianto di circa il 17%. Non ci sono limiti applicativi [49].
- Sostituire la batteria di recupero calore. Dopo un determinato tempo è necessario sostituire la batteria di recupero calore con una nuova per rendere il sistema nuovamente efficiente. Non ci sono limiti applicativi [50].
- Installare un evaporatore per il recupero di calore dalle acque emulsionate. Non ci sono limiti applicativi.
- Recuperare calore ed utilizzarlo per l'essiccazione delle terre. Questo intervento è applicabile solo nel caso di impianti con formatura a perdere.
- Installare uno scambiatore per generare acqua calda dai fumi del forno ed alimentare l'evaporatore sottovuoto.
- Introdurre una turbina di recupero dell'alta pressione generata nel forno fusorio. Nei forni fusori si genera una pressione sulla cima del forno, pressione che può essere sfruttata installando una turbina. Da questa si può recuperare il 30% di energia. Inoltre, se si rimuove la polvere, si può guadagnare fino al 30% di energia in più. Questo intervento è installabile soltanto dove effettivamente si viene a creare una pressione sufficiente e che giustifichi la presenza della turbina [36], [47].
- Installare un sistema di recupero di calore dal processo di compressione dell'aria [39].
- Usare scambiatori di recupero per il pre-riscaldamento efficiente delle siviere (forno scaldia siviera) [41].
- Installare un sistema di recupero di calore nel circuito di raffreddamento stampi. Questo intervento è applicabile solo nel caso di impianti con formatura permanente.

Per quanto concerne il settore della fonderia sono state reperite anche delle soluzioni interessanti riguardo all'utilizzo di combustibili alternativi. **Tali soluzioni non sono di natura tecnologica**, ma poiché interessano i combustibili utilizzati nelle tecnologie e hanno grande potenziale di risparmio energetico, vengono di seguito elencate per completezza della trattazione. Poiché tali interventi *energy-saving* non riguardano le tecnologie, nel presente report ci si limita ad elencarle, senza descriverle in dettaglio. Tuttavia, per ciascuna di esse si indicano opportuni riferimenti bibliografici che il lettore potrà utilizzare per ulteriori approfondimenti.

- **Interventi che implicano l'uso di combustibili alternativi:**
 - Iniezione di carbone polverizzato (PCI) come parziale sostituto del coke [19], [51].
 - Utilizzo del CO e H2 prodotti nella reazione come combustibile per il forno stesso [18].
 - Sostituzione del coke con biomasse [47].
 - Utilizzo di coke generato con la tecnica CDQ (Coke Dry Quenching) [51], [52].
 - Utilizzo di idrogeno come parziale sostituto del coke come agente riducente [53], [54].
 - Aggiunta di plastica di scarto come agente riducente [53].
 - Utilizzo di pellet auto-riducente nel forno fusorio [55].

2.2 Impianti di smaltimento dei rifiuti

L'industria dello smaltimento rifiuti viene studiata nei suoi tre rami: il trattamento meccanico dei rifiuti, quello biologico e quello termico. Il trattamento meccanico e quello biologico possono essere raggruppati nella categoria dei processi di trattamento dei rifiuti. Invece, il trattamento termico è spesso conosciuto con il nome di "processo di incenerimento". Questi tre rami rappresentano tre approcci con risultati, vantaggi e svantaggi differenti, ma la cui finalità principale è sempre la stessa: ridurre il volume dei rifiuti. Tali rami non si escludono vicendevolmente. Poiché ciascuno dei tre rami presenta fasi di processo differenti, si rimanda alla lettura dei paragrafi seguenti per comprenderne il funzionamento delle fasi di processo e gli interventi di efficientamento tecnologico emersi dalla consultazione della letteratura e delle diagnosi. Oltre ai tre rami suddetti, ci sono fasi di processo che accomunano i diversi impianti di smaltimento rifiuti. Tra queste si annoverano le attività di controllo delle emissioni dell'impianto e le attività di ricezione dei rifiuti che entrano nell'impianto. Anche tali fasi sono descritte in dettaglio nei paragrafi seguenti, riportandone gli interventi tecnologici *energy-saving*.

In generale, tutte le informazioni sul processo e sugli interventi tecnologici di miglioramento dei consumi energetici relativamente al settore dello smaltimento rifiuti sono state collezionate dopo aver effettuato un'analisi sistematica della letteratura, il cui processo di ricerca è descritto in dettaglio in Figura 9, e dopo aver analizzato le diagnosi energetiche. Per quanto riguarda l'analisi della letteratura, è stato consultato il database Scopus, introducendo le parole chiave e i criteri di esclusione ed inclusione delle fonti riportati in Figura 9.

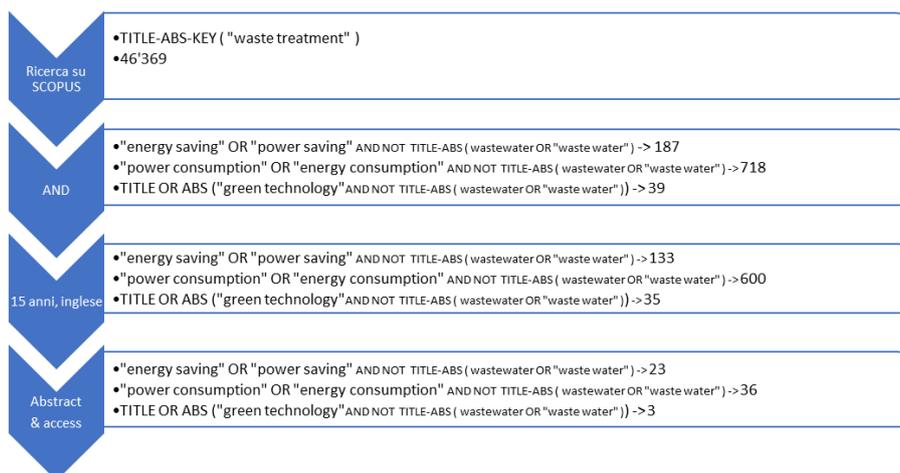


Figura 9. Schema PRISMA che riepiloga il processo di analisi della letteratura a valle del quale sono stati collezionati gli interventi tecnologici energy-saving del settore dello smaltimento rifiuti.

La mole di pubblicazioni riscontrate su Scopus è stata tale da richiedere, per le successive interrogazioni del database, una riduzione progressiva del campo della ricerca. Per questo motivo, è stato deciso di consultare il solo database Scopus (già ampio) senza aggiungere Google Scholar. Le successive interrogazioni sono state fatte come riportato in Figure 10-11 e hanno consentito di individuare 24 documenti d'interesse che sono

stati letti interamente. La consultazione di tali documenti ha permesso di individuare gli interventi tecnologici di miglioramento dei consumi energetici relativamente al settore dello smaltimento rifiuti. La Figura 12 riporta una rapida clusterizzazione delle fonti in base alla fase di processo di smaltimento rifiuti presa in analisi all'interno dei documenti reperiti.

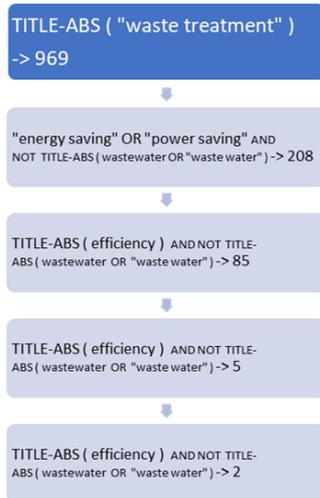


Figura 10. Ricerca bibliografica sistematica ristretta sul trattamento dei rifiuti.



Figura 11. Ricerca bibliografica sistematica sull'incenerimento dei rifiuti.

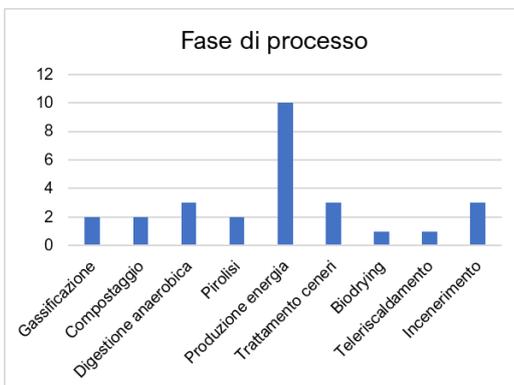


Figura 12. Distribuzione degli articoli secondo la fase di processo di smaltimento rifiuti.

Oltre alla consultazione della letteratura, sono state analizzate anche le diagnosi energetiche. Nel caso dello smaltimento rifiuti, sono state esaminate le diagnosi compilate da 49 diversi siti produttivi, in maggior parte situati nel nord d'Italia (Figura 13), con eccezione della Val d'Aosta che, probabilmente a causa della limitata estensione territoriale e della conformazione geografica, invia i propri rifiuti nelle regioni vicine.



Figura 13: Distribuzione geografica dei 49 stabilimenti di smaltimenti di rifiuti italiani analizzati.

Poiché gli interventi tecnologici disponibili nel settore dello smaltimento rifiuti sono stati reperiti sia consultando la letteratura, che le diagnosi energetiche, di conseguenza, gli interventi di seguito elencati possono ricadere in uno dei seguenti casi:

1. Interventi tecnologici riportati sia in letteratura che nelle diagnosi energetiche. Questi interventi sono colorati in rosso per indicare che sono stati individuati nelle diagnosi e sono corredati da citazione bibliografica per ricordare l'articolo scientifico dal quale sono stati derivati.
2. Interventi tecnologici reperiti solo in letteratura. Tali interventi sono riportati in nero perché non provengono dalle diagnosi, ma sono accompagnati dalla citazione di letteratura dai quali sono stati reperiti.
3. Interventi tecnologici reperiti solo nelle diagnosi. Tali interventi sono colorati in rosso in quanto estratti dalle diagnosi energetiche, ma non riportano citazioni bibliografiche perché non sono stati reperiti in letteratura scientifica.

2.2.1 Trattamento meccanico dei rifiuti

Punto centrale all'interno degli impianti di trattamento dei rifiuti è il trattamento meccanico in cui rifiuti generici e macchinari elettrici ed elettronici vengono processati all'interno di trituratori (shredders). La riduzione delle dimensioni, infatti, permette una più facile separazione dei materiali tra metallici e non metallici. L'acciaio che si è in grado di recuperare tramite questo processo può essere direttamente reinserito in fornace nelle industrie del settore delle fonderie.

Mediante il trattamento meccanico, i rifiuti in ingresso sono ridotti di dimensioni attraverso fenomeni di frammentazione ed attrito. I macchinari che possono essere utilizzati sono mulini a martelli o a catene, o ancora possono essere sfruttate forze di taglio generate da alberi dentati in rotazione.

Innanzitutto, a monte del processo di trattamento può essere presente anche un pretrattamento dei rifiuti, ovvero una fase di *pre-shredding*. Installato a monte del trituratore, un *pre-shredder* riduce le dimensioni dei rifiuti tramite due o più alberi dentati in rotazione. Questa fase può essere svolta anche da *slow motion shredders* e martelli (*hammers*) che, nel caso di rifiuti domestici, svolgono anche l'unica triturazione. Infine, un'ulteriore alternativa è il *criogenic grinding*, in cui il materiale subisce una riduzione delle dimensioni a causa della fragilità che il materiale acquisisce alle basse temperature. Questo processo comincia con la separazione della parte liquida da quella solida. Quest'ultima subisce poi una macinatura, un setacciamento e un'estrazione dei metalli (*metal separation*) a basse temperature (tra i -100° C ed i -196° C) tramite l'utilizzo di azoto liquido.

La fase successiva è la **triturazione** vera e propria, che avviene all'interno dello *shredder*. Il materiale (generalmente rifiuti contenenti metalli) viene spinto nella camera di triturazione, dove viene per prima cosa lacerato tra dei martelli rotanti e l'incudine principale. I martelli sono collegati ad un rotore, mentre l'incudine rimane fissata alle pareti della camera. I pezzi ottenuti continuano ad essere processati dal macchinario nella parte inferiore della camera fino a che non hanno dimensioni tali da passare dai setacci d'uscita (vaghi) situati in basso o in alto [56].

Alcuni *shredder* sono caratterizzati da dai meccanismi di chiusura dei setacci di uscita al fine di aumentare il materiale interno alla camera e migliorare l'efficienza del macchinario. Dei sistemi di areazione, nel

frattempo, si occupano di rimuovere la polvere dal processo. Esistono differenti varianti di triturator, per i quali di seguito si riporta una breve descrizione e (dove disponibile) una figura schematica [56]:

- *Mixed scrap shredder*. Opera con una potenza massima di 7000 kW e ha un triplice scopo: separare i materiali in ingresso in differenti frammenti, assicurarsi che i metalli in uscita siano abbastanza puliti da poter essere ri-fusi e attribuire loro delle dimensioni adatte alla fornace.
- *Zerdirators*. Con una potenza tra i 500 ed i 4000 kW, questi *shredders* sono adatti al processamento di rifiuti leggeri.
- *Kondirators*. Con una potenza tra i 750 ed i 3000 kW, sono studiati per poter lavorare rifiuti che risulterebbero troppo pesanti per gli *shredder* convenzionali. Tali triturator sfruttano una rotazione del rotore in direzione opposta rispetto a quella degli *shredder* convenzionali.
- Triturator LSHT (*Low Speed High Torque*). Sono caratterizzati da un numero di alberi che varia tra 1 e 4, i quali ruotano a basse velocità (10-50 rpm) ma con coppie molto alte [57].
- *Roll crusher*. Un nastro trasporta il materiale nella zona in cui un albero dotato di denti procede a macinarlo [58], come visibile in Figura 14.

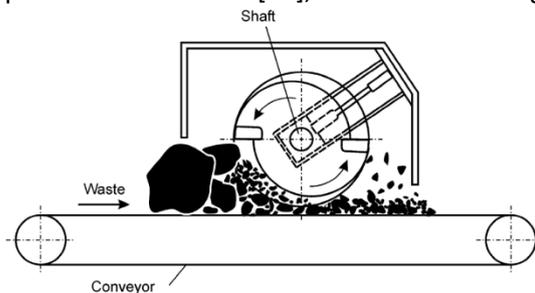


Figura 14 - Roller crusher [58].

- *Semi-wet shredders*. Sono corredati da un sistema controllato elettronicamente di soppressione polveri tramite spray di acqua. Questa ha anche la funzione di ridurre gli eventi di deflagrazione e raffreddare l'intero sistema. Il vapore che si genera viene recuperato.
- *Shear cutter*. Sono dei triturator in cui degli alberi corredati di lame ruotano a bassa velocità (20-60 rpm), ottenendo la frammentazione dei rifiuti che si schiacciano tra le lame e gli angoli vivi presenti nella camera [58] (Figura 15).

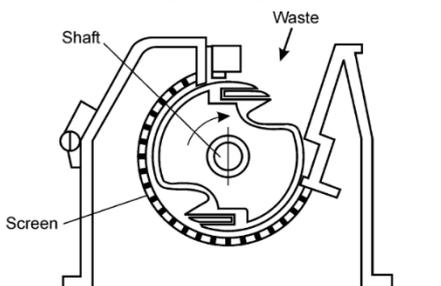


Figura 15 - Shear cutter [58].

- *Wet shredders*. Macchinari che processano del materiale bagnato già passato da un *pre-shredder*.
- *Jaw crusher*. Il materiale viene fatto scivolare attraverso due pareti oscillanti: la riduzione dello spazio che le separa porta alla frammentazione dei rifiuti [58] (Figura 16).

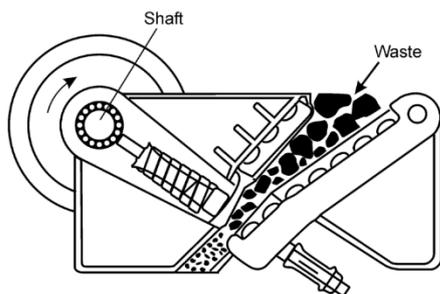


Figura 16 - Jaw crusher [58].

- *Cascade ball mill*. Una camera cilindrica con le estremità a cono viene messa in rotazione: al suo interno, oltre al materiale da processare, vi sono delle sfere d'acciaio che servono per aumentare il più possibile gli urti e le rotture. Un setaccio in uscita impedisce alle sfere di allontanarsi dalla camera [58] (Figura 17).

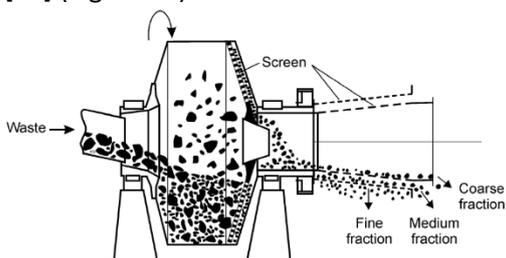


Figura 17 - Cascade ball mill [58].

- *Shredders* per cavi [56].

Una volta triturati, i rifiuti che permettono un successivo utilizzo come combustibile subiscono un processo di pelletizzazione, ottenibile tramite *flatbed presses*, *ring die presses* o *disc agglomerators*. Il combustibile solido che si ottiene è simile al carbone, ma ha una maggiore concentrazione di cloro e una minore percentuale di solfuri. I metalli pesanti, invece, sono presenti nelle stesse proporzioni del carbone [56].

Nel caso di **macchinari ed elettrodomestici (detti *Waste Electrical and Electronic Equipment – WEEE*)** che contengono al loro interno fluidi refrigeranti volatili altamente dannosi per l'ambiente come gli idrofluorocarburi (VFC) o gli idrocarburi (VHC), per essi il processo di trattamento meccanico in modo diverso dagli altri rifiuti. Esempi di WEEE sono frigoriferi, freezer, impianti d'aria condizionata, deumidificatori e tutti quei dispositivi dotati di circuiti refrigeranti. Il processo di trattamento meccanico avviene in due fasi [56]: innanzitutto, olio e refrigerante vengono rimossi. Per la rimozione del gas si fa affidamento a specifiche pinze foranti o punte di trapano dotate di valvole e sistemi di sottovuoto in grado di recuperare il contenuto senza farlo entrare a contatto con l'aria. L'olio presente nel compressore contiene alte concentrazioni di refrigerante dissolto, per cui gli viene somministrato calore o viene agitato o viene lasciato in sottovuoto (o un mix di queste opzioni) per poter separare i due componenti. Successivamente, VFC e VHC vengono estratti dai materiali isolanti attraverso la triturazione. In particolare, un nastro trasportatore conduce i pezzi fino alla camera chiusa dello *shredder*, dove i gas vengono recuperati durante la triturazione. Esistono delle tipologie di *shredder* usate per questo scopo [56]:

- *Pre-shredder*. Utilizzato per i dispositivi più grandi, è azionato da motori idraulici e ha i rotori che possono essere azionati al contrario in caso si blocchino.
- *Twin-shaft rotor shear*. Caratterizzato da basse velocità di rotazione ma alta coppia, ha due rotori che operano indipendentemente. Ha alti livelli di *throughput*.
- *Four shaft rotor shear*. Ha il vantaggio di essere standardizzato e di avere un design modulare, per cui si ha un'alta intercambiabilità dei componenti. Opera a basse velocità, grande coppia e rimane a bassi livelli di rumore (Figura 18).



Figura 18 - Four shaft rotor shear [56].

- **Rotor shredder.** Dei martelli o delle catene sono fissati con dei giunti mobili ad un rotore verticale ad alta velocità. Quando la rotazione è in atto, le forze centrifughe dispongono orizzontalmente gli elementi battenti che, con urti significativi, frammentano il materiale immesso. Il dispositivo da tritare viene processato in tempi molto limitati e senza interruzioni, portando quindi ad un alto livello di efficienza energetica (Figura 19).

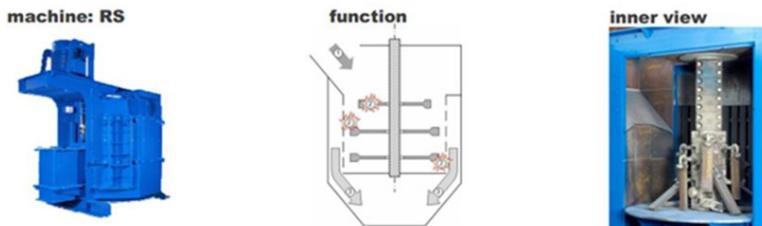


Figura 19. Rotor shredder [56].

Si riepilogano gli interventi tecnologici atti a ridurre i consumi energetici nel processo di trattamento meccanico dei rifiuti. La descrizione delle tecnologie elencate negli interventi qui riportati è stata fornita sopra. La spiegazione sul perché questi interventi dovrebbero consentire un risparmio energetico è, invece, comune a tutti gli interventi ed è la seguente: installare tecnologie atte a ridurre le dimensioni dei rifiuti permette una miglior separazione dei materiali tra metallici e non metallici. Ciò, oltre a consentire il recupero dell'acciaio (come già anticipato), garantisce un più rapido ed efficiente smaltimento dei rifiuti, diminuendo l'energia consumata dalle fasi successive di trattamento biologico o incenerimento.

- **Interventi *energy-saving* riguardanti i triturator:**
 - Installare un pre-tritratore (*pre-shredder*) [56].
 - Installare uno *shear cutter* [58].
 - Installare un *mixed scrap shredder* [56].
 - Installare un *zerdirator* [56].
 - Installare un *roll crusher* [58].
 - Installare un *jaw crusher* [58].
 - Installare un *kondirator* [56].
 - Installare un *semi-wet shredder* [56].
 - Installare un *wet shredder* [56].
 - Installare un tritratore (*shredder*) per cavi [56].
 - Installare un *cascade ball mill* [58].

- Regolare i setacci in uscita per aumentare il materiale in camera di triturazione e, quindi, l'efficienza del trattamento meccanico [56].
- Installare un trituratore a bassa velocità e alta coppia [57] [56].
- Installare un trituratore a martelli [57] [56].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti i macinatori:**
 - Installare un dispositivo per la macinazione criogenica [56].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti i trituratori di WEEE:**
 - Installare un *twin shaft rotor shear* [58] [56].
 - Installare un *four shaft rotor shear* [58] [56].
 - Installare un *rotor shredder* a martelli [56].
 - Installare un *rotor shredder* a catene [56].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti i pellettizzatori:**
 - Installare un *disc agglomerator* [56].
 - Installare un *ring die press* [56].

2.2.2 Trattamento biologico dei rifiuti

I *Municipal Solid Waste* (MSW) sono in larga parte formati da componenti organiche, come avanzi di cibo e residui vegetali. Una delle tecniche più diffuse per trattare i rifiuti di questa tipologia è il compostaggio che, oltre ad avere un ridotto impatto ambientale, genera un prodotto dotato di valore. I trattamenti biologici dei MSW consistono nello sfruttare dei microorganismi che decompongono i rifiuti organici in acqua, CO₂ e semplici materiali organici. Esistono differenti tipologie di trattamenti che possono essere attuati a seconda dei requisiti richiesti al prodotto in uscita. In particolare, ci sono i trattamenti aerobici e quelli anaerobici (accompagnati anche dal trattamento del biogas generato).

Per quanto concerne la prima categoria, un **trattamento aerobico** è basato sulla decomposizione biologica in ambienti ricchi di ossigeno dei rifiuti organici, che vengono trasformati in una sostanza simile all'humus. Il processo è esotermico e l'innalzamento della temperatura aiuta la distruzione di agenti patogeni. In particolare, avviene un processo di digestione dei rifiuti organici che porta alla formazione di CO₂, acqua, nitrati e solfati. Affinché questo avvenga, va garantito un corretto tasso di umidità: troppo basso porta all'inattività dei microorganismi; troppo alto riduce la porosità dei materiali facendo innescare processi anaerobici [56]. La decomposizione dei componenti organici, fulcro di questa tipologia di processo, consiste in differenti fasi:

- **Lag phase.** Questa fase inizia non appena vengono garantite le condizioni di compostaggio. Essa ha una durata pari al periodo di adattamento dei microbi presenti nei rifiuti alle nuove condizioni. Questi cominciano a proliferare usando zuccheri, amido, cellulosa e amminoacidi che tipicamente caratterizzano i materiali organici da processare. Comincia, quindi, la fase di disfacimento dei rifiuti e, come conseguenza dell'attività microbica, si ha un iniziale aumento della temperatura.
- **Active phase.** L'incremento esponenziale del numero di microbi segna l'inizio di questa fase. Si nota un ininterrotto aumento della temperatura della massa fino a che la parte di rifiuti facilmente compostabili rimane in una percentuale sufficientemente alta. A seconda dei casi, si può arrivare fino ad una temperatura massima di 70°C [59]. È fondamentale mantenere alto il livello di ossigeno al fine di mantenere la decomposizione aerobica. L'aria può essere introdotta nel materiale tramite dei sistemi d'areazione che dal suolo spingono un flusso d'aria. Questo metodo, però, porta ad una notevole diffusione di odori. Per questo sono molto diffusi sistemi d'areazione a flusso inverso, ovvero che ispirano l'aria circostante facendola passare attraverso il materiale da areare [56].

- *Maturation o Curing phase.* Infine, il materiale di facile decomposizione cala a tal punto da non incrementare ulteriormente la temperatura: inizia la fase di maturazione. La temperatura comincia a calare inesorabilmente fino a raggiungere la temperatura ambiente e, di pari passo, la proliferazione batterica diminuisce. La durata di questa fase dipende dalla tipologia dei materiali processati e dalle caratteristiche ambientali [59].

Esistono differenti sistemi per portare avanti il processamento aerobico:

- *Aerated static-pile system.* Questo sistema prevede la formazione di pile di rifiuti organici triturati ricoperti da materiali in grado di tenere sotto controllo la temperatura e l'emanazione di odori. Al di sotto della pila sono presenti dei sistemi d'aerazione che diffondono aria fresca, così da fornire la necessaria quantità di ossigeno. La mancanza di rimescolamento dei rifiuti porta a tempi di processamento più lunghi rispetto agli altri metodi [60]. Questa tipologia di compostaggio è applicabile per rifiuti omogenei, cioè non formati da differenti tipologie di materiale [59] (Figura 20).

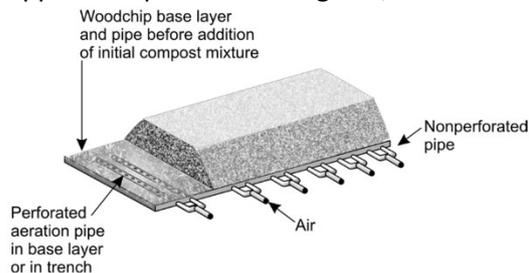


Figura 20 - Aerated static pile [59].

- *Enclosed system.* Questo sistema può consistere in due varianti, quella a silos e quella a letto agitato. Il materiale triturato viene inserito in un contenitore chiuso che garantisce il controllo della temperatura, della concentrazione di ossigeno e degli odori. Se viene utilizzata la variante a silos, allora il materiale da compostare si muove attraverso il contenitore tramite gravità; altrimenti se si utilizza la variante a letto agitato, lo spostamento è ottenuto da dei dispositivi di miscelazione [59]. Altre soluzioni prevedono l'utilizzo di stanze in cui sono presenti dispositivi di mescolamento e trasporto. Una variante di questo metodo, detta *tunnel composting*, prevede anche l'eventuale aggiunta di liquidi nel caso in cui la percentuale di umidità cali troppo [60] (Figura 21).

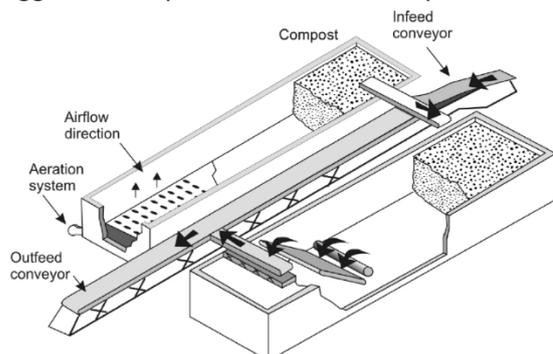


Figura 21 - Compostaggio al chiuso [59].

- Un altro sistema chiuso è dato dal compostaggio nei tamburi rotanti: enormi cilindri vengono riempiti del materiale da processare e messi in rotazione. Il risultato è un compost molto omogeneo [60]. Il *container composting* è un metodo di compostaggio che avviene in contenitori chiusi, areati per vie naturali. Avvenendo in sistemi chiusi, sono limitate le emanazioni odorose ed anche gli ingressi d'acqua piovana involontari. Viene aggiunta una coltura batterica per accelerare il processo biologico: l'aggiunta dei batteri velocizza molto il processo di compostaggio rispetto al metodo *aerated static pile*, portando anche ad una riduzione di energia utilizzata da 30 kWh per tonnellata di rifiuti a 25 kWh [56]. Durante il *container composting*, il materiale da smaltire viene inserito in un container equipaggiato di un sistema di ventilazione e di una base piramidale traforata che permette

la naturale areazione dei rifiuti. Il materiale raggiunge i 60° C dopo un paio di giorni e il processo termina dopo circa 30 giorni, uscendo dal container sanitizzato (deve aver passato 1 ora alla temperatura di 70° C). Per altri 30 giorni, infine, il materiale viene lasciato in delle andane (accumuli di materiale da compostare dalle dimensioni contenute), per poi essere analizzato e dichiarato pronto per la vendita come bio-compost.

- *Windrow system* (Figura 22). Questo sistema è basato sulla costituzione di una serie di andane, ovvero di accumuli di materiale da compostare dalle dimensioni contenute. È il sistema di compostaggio più diffuso in quanto il capitale investito in attrezzature e strutture è minimo. Il processo è basato su una prima fase di costruzione delle andane (tramite macchine movimento terra come bulldozer o dei particolari nastri trasportatori), le cui dimensioni variano a seconda delle caratteristiche del materiale da processare. Per garantire l'areazione, periodicamente si ha un rimescolamento delle andane tramite macchine movimento terra. Il momento in cui viene fatto il rimescolamento può essere deciso anche in base alla temperatura interna del cumulo [59]. Esistono altrimenti dei sistemi chiamati *dynamic windrows*, in cui il materiale è tenuto costantemente in movimento tramite dei meccanismi rotanti [60]. Tra questi sistemi, esistono impianti che ricoprono le andane con delle membrane semipermeabili che permettono il passaggio di gas e vapori [56].

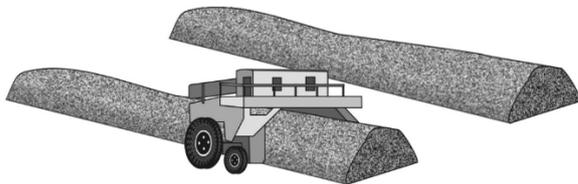


Figura 22 - Andane con un macchinario apposito per il rimescolamento [59].

- *Linear composting*. Il materiale da trattare viene disposto lungo delle linee separate da muri, ognuna delle quali viene areata indipendentemente. Un macchinario apposito si occupa di rimescolare i rifiuti linea per linea [56].
- Compostaggio ipertermofilo. Il compostaggio ipertermofilo si basa sull'aggiunta ai rifiuti organici di microbi ipertermofili, che portano a una temperatura massima di 80° C. Gli effetti sono una migliore efficienza in termini di biodegradazione organica, di compostaggio ed una migliore sanitizzazione. Il processo inizia con la regolazione del quantitativo iniziale di acqua nei rifiuti e con l'aggiunta degli additivi ipertermofili. Poi, il materiale viene introdotto in un contenitore, in cui si ha un sistema d'areazione e delle pale che miscelano in continuo. Durante il processo, i gas che si vengono a generare (CO₂, NH₃, ecc.) vengono raccolti e trattati. Allo scadere del processo, il materiale viene estratto: la maggior parte viene utilizzata come fertilizzante, mentre una piccola parte viene riciclata per essere usata come additivo al processo stesso. I vantaggi di questo approccio sono in una ridotta emissione di gas inquinanti (NO₂) e dei gas serra e una migliore efficienza nel degradare le microplastiche [61].

Per quanto concerne la seconda categoria, invece, la famiglia di **trattamenti anaerobici** permette la trasformazione dei rifiuti organici in biogas e digestato. Le condizioni necessarie affinché questo avvenga sono una ridotta concentrazione di ossigeno e la somministrazione di calore. Il complesso processo biochimico che si instaura può essere riassunto in 4 fasi [56].

- Idrolisi: i polimeri contenuti nel materiale in ingresso vengono scomposti in molecole organiche meno complesse.
- Acidogenesi: i composti intermedi sono ridotti ad acidi grassi, CO₂ e idrogeno.
- Acetogenesi: si ottiene la formazione di acido acetico, idrogeno e CO₂.
- Metanogenesi: si ha la formazione di metano e CO₂.

A seconda delle caratteristiche dell'impianto e dalla tipologia di materiale in ingresso, da una tonnellata di rifiuti si possono ottenere dagli 80 ai 120 Nm³ di biogas. Quest'ultimo può essere utilizzato per produrre

elettricità o come combustibile alternativo per veicoli. Gli utilizzi più comuni sono la combustione all'interno di boiler per generare calore o dentro ai motori per generare energia meccanica/elettrica (spesso questo avviene in contemporanea tramite la generazione combinata di calore ed energia, meglio noto come *Combined Heat and Power* - CHP). In alternativa, il biogas può essere processato tramite una fase di rimozione del diossido di carbonio e minori gas contaminanti al fine di ottenere biometano. Allo scopo di arrivare al valore calorifico necessario per l'attivazione del processo, in genere, si aggiunge del propano. Il biometano può essere così inserito nella rete del gas naturale, ma spesso non è la strada principale, in quanto il margine di contribuzione è ridotto e non conviene per i piccoli impianti [56].

I rifiuti smaltiti con trattamento anaerobico subiscono una fase di pretrattamento, che consiste in una decomposizione aerobica preliminare dalla durata compresa tra i 2 e i 4 giorni. Ciò avviene all'interno di fermentatori che, grazie all'aumento di temperatura autonomo del materiale, utilizzano meno energia per apportare calore e mandare avanti il processo. Il trattamento anaerobico avviene all'interno di macchinari detti digestori, nei quali dei liquidi sono aggiunti in modo da controllare la percentuale di materia asciutta. Le tipologie di digestori esistenti sono [56]:

- Digestori verticali con agitatore.
- Digestori orizzontali con un agitatore in grado di trasportare il materiale (tecnologia *plug-flow*).
- Digestori verticali.

I sistemi di mescolamento presenti all'interno dei digestori possono funzionare per vie:

- Meccaniche, tramite gli agitatori.
- Idrauliche, tramite delle pompe che ricircolano il substrato.
- Pneumatiche, facendo ricircolare il biogas.

La letteratura [62], inoltre, propone l'utilizzo di un sistema di pannelli solari per mantenere costante la temperatura in un reattore in cui avviene la digestione anaerobica mesofila. L'impianto prevede due circuiti idraulici separati. Il primo consiste nel collettore solare (che riscalda l'acqua) e in un contenitore d'acqua (che funge da magazzino energetico). Il secondo, invece, è dotato di un ulteriore contenitore d'acqua, connesso al primo per lo scambio termico, collegato al digestore al fine di controllarne la temperatura e mantenerla costante intorno ai 35° C. In entrambi i circuiti sono presenti dei controllori che, a seconda delle temperature, fanno passare l'acqua. Mentre il primo contenitore funziona esclusivamente come magazzino energetico, il secondo è adibito al mantenimento della temperatura del digestore, per cui è dotato di un termostato che, in caso di necessità, attiva un metodo di riscaldamento secondario per far tornare alla giusta temperatura l'acqua al suo interno. A seconda delle dimensioni dei contenitori e delle condizioni atmosferiche, il sistema si può rendere facilmente autosufficiente dal punto di vista energetico.

In [63], invece, viene proposto un processo di digestione anaerobica in due fasi: l'acidogenesi e la metanogenesi. Questo avviene in una struttura circolare (Figura 23), formata da due stanze concentriche, tali che dalla stanza centrale esce il biogas prodotto. In questo sistema si stima che la produzione di biogas a parità di quantità di rifiuti aumenti di oltre il 10%, recuperando energia dai rifiuti smaltiti.

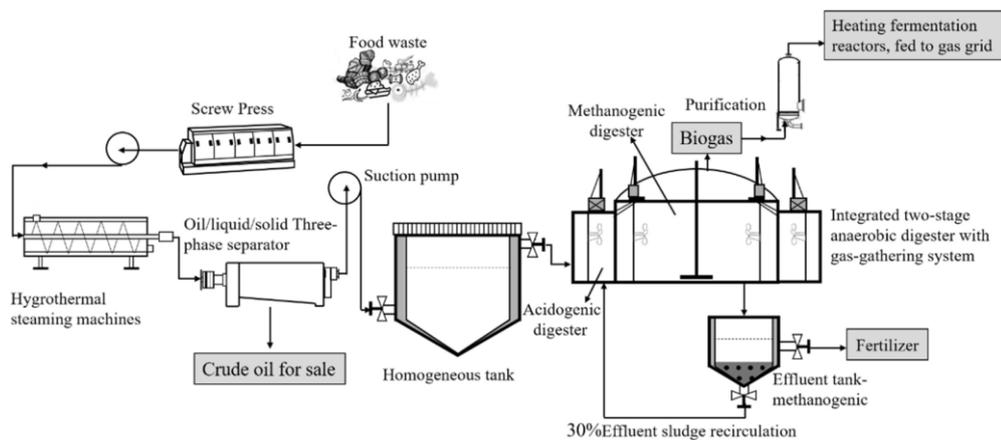


Figura 23 - Schema di un sistema di digestione anaerobica in due fasi [63].

La fase di **trattamento del biogas** prevede di deumidificare e pulire il biogas generato dal trattamento anaerobico prima di utilizzarlo come combustibile. La rimozione dell'acqua avviene tramite raffreddamento/condensa, assorbimento dell'acqua sulla superficie di un agente essiccante (*drying agent*) o tramite assorbimento dell'acqua grazie a glicole o sale igroscopico. L'acido solfidrico (H_2S) si rimuove per precipitazione aggiungendo ioni ferrici nel digestore, aggiungendo ossigeno o tramite un processo di biogas scrubbing. La rimozione della CO_2 , invece, può essere ottenuta tramite la *Pressur Swing Adsorption* (PSA, ovvero assorbimento tramite carbone attivo), tramite *water scrubbing*, *organic solvent scrubbing*, *chemical scrubbing*, separazione tramite membrana, o condensazione criogenica [56].

È possibile migliorare le prestazioni di un impianto di produzione di biogas facendo ricircolare la materia solida. La parte solida dei rifiuti durante le fasi avanzate del processo di digestione anaerobica viene separata dalla parte liquida tramite un sistema di ugelli. Questi rilasciano delle microbolle di gas (metano e CO_2) che aderiscono alle particelle solide portandole in superficie, dove possono essere facilmente raccolte. Questo materiale parzialmente fermentato può essere ricircolato, ovvero reinserito all'interno del reattore per la produzione del biogas al fine di migliorarne l'utilizzo e ridurre l'impatto ambientale.

Esiste anche un processo per la produzione di bioetanolo. Esso consiste in un pretrattamento dei rifiuti organici tramite sminuzzamento e separazione dai materiali di imballaggio, nell'aggiunta di acqua ed enzimi mentre viene alzata la temperatura, in una fase di fermentazione seguita poi dalla separazione ed asciugatura della parte solida. Il passaggio finale è la distillazione di fino all'85% di etanolo. Questo è un processo autosufficiente in termini energetici. Combinare la produzione di biogas e quella di etanolo porta ad un alto tasso di utilizzo dell'energia presente nei rifiuti di partenza. Gli output principali di questo processo sono il bioetanolo (concentrato al 99.7%), fertilizzanti liquidi, calore ed elettricità [56].

Spesso, a seconda delle caratteristiche dei rifiuti, al processamento biologico (aerobico/anaerobico) può essere unito il processamento meccanico. Questo nuovo processo si chiama **Trattamento Meccanico-Biologico (MBT)**, ma non differisce dalle tecniche già viste se non per la sequenza delle operazioni.

Si riepilogano gli interventi tecnologici reperiti per ridurre i consumi energetici nel processo di trattamento biologico dei rifiuti. La descrizione delle tecnologie elencate negli interventi qui riportati è già stata fornita sopra. La spiegazione sul perché questi interventi dovrebbero consentire un risparmio energetico è, invece, fornita di seguito per le due macro-famiglie di trattamento biologico (aerobico o anaerobico).

- **Interventi *energy-saving* riguardanti il trattamento aerobico:**

In generale, poiché il processo di trattamento aerobico dei rifiuti è esotermico, installare tecnologie che effettuino tale tipo di smaltimento dei materiali di estrarre recuperare l'energia chimica e termica contenuta nei rifiuti stessi, prima che essi vengano eliminati. Alcuni trattamenti, inoltre, come sopra riportato, comportano la distruzione di agenti patogeni dato che avvengono ad elevate temperature. Questo fattore elimina la necessità di trattare ulteriormente i rifiuti (che altrimenti potrebbero essere pericolosi), dunque riducendo i consumi energetici associati a tali attività.

Poiché i rifiuti in input agli impianti di smaltimento rifiuti andrebbero comunque smaltiti, farlo recuperando energia da essi o minimizzando i consumi energetici rappresenta di per sé un intervento di efficientamento energetico.

○ **Interventi *energy-saving* riguardanti i locali di digestione:**

- Installare un sistema a pile statiche [60] [56].
- Installare un sistema chiuso a letto agitato [59].
- Installare un sistema chiuso a silos [59].
- Installare un sistema chiuso “*tunnel composting*” [60].
- Installare un sistema ad andane [60] [56].
- Installare un sistema di compostaggio lineare [56].

○ **Interventi *energy-saving* riguardanti i digestori:**

- Installare un dispositivo per il compostaggio in tamburi rotanti [60].
- Installare un container per il compostaggio [60] [56].
- Installare un sistema di compostaggio ipertermofilo [61].

● **Interventi *energy-saving* riguardanti il trattamento anaerobico:**

Per quanto concerne i trattamenti anaerobici, come già riportato, essi trasformano i rifiuti organici in biogas e digestato. Installare tecnologie per il trattamento anaerobico dei rifiuti corrisponde ad attuare interventi di risparmio energetico perché consente di recuperare energia presente nei rifiuti sottoforma di biogas, che può essere successivamente riutilizzato come combustibile in altre fasi di processo o in altri impianti. Il recupero del biogas impedisce anche l'immissione in atmosfera del metano, che va a costituire il biogas stesso. Poiché il metano non viene rilasciato in ambiente, questa attività rende non necessari i trattamenti degli agenti inquinanti (e il conseguente consumo energetico) che sarebbero altrimenti necessari per evitare che il processo di smaltimento rifiuti impatti negativamente sull'effetto serra e sull'ambiente.

Poiché i rifiuti in input agli impianti di smaltimento rifiuti andrebbero comunque smaltiti, farlo recuperando energia da essi o minimizzando i consumi energetici rappresenta di per sé un intervento di efficientamento energetico.

○ **Interventi *energy-saving* riguardanti i digestori:**

- Installare un digestore verticale [56].
- Installare un digestore orizzontale [56].
- Installare un digestore orizzontale con tecnologia *plug flow* [56].
- Installare un gassificatore per alimentare termicamente il digestore [64].
- Installare un digestore alimentato ad energia solare [62].
- Installare un digestore a due stadi (acidogenesi e metanogenesi) [63].

○ **Interventi *energy-saving* riguardanti gli agitatori:**

- Installare pale per il mescolamento [56].
- Installare pompe di ricircolo per il mescolamento [56].
- Installare ugelli di ricircolo biogas [56].
- Installare un sistema di ugelli per il ricircolo della materia asciutta [56].

○ **Interventi *energy-saving* riguardanti i produttori di bioetanolo:**

- Installare un distillatore per la produzione di bioetanolo [56].

- **Interventi *energy-saving* riguardanti il trattamento del biogas:**

Per quanto concerne le attività sui biogas, installare tecnologie per la pulizia e il trattamento di tale gas consente un duplice risparmio energetico. Da un lato, infatti, consente di rendere il biogas un combustibile più efficiente, massimizzandone il potere calorifico e, dunque, efficientando il recupero energetico dai rifiuti. Dall'altro lato, consente di minimizzare gli impatti ambientali delle sostanze rilasciate in ambiente dal processo di smaltimento rifiuti, così riducendo l'energia che sarebbe necessaria per effettuare successive attività di rimozione o trattamento delle sostanze inquinanti.

Poiché i rifiuti in input agli impianti di smaltimento rifiuti andrebbero comunque smaltiti, farlo recuperando il biogas (e dunque energia da essi) e riducendo l'energia che verrebbe consumata se fossero necessarie attività di trattamento o eliminazione di agenti inquinanti rappresenta di per sé un intervento di efficientamento energetico.

- **Interventi *energy-saving* riguardanti i condensatori:**
 - Installare un condensatore [56].
 - Installare un condensatore criogenico [56].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti gli assorbitori:**
 - Installare un assorbitore a glicole [56].
 - Installare un assorbitore a sale [56].
 - Installare un sistema per la *pressure swing adsorption* [56].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti i dispositivi per la precipitazione:**
 - Installare un dispositivo per la precipitazione [56].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti gli scrubber:**
 - Installare un biogas scrubber [56].
 - Installare un scrubber ad acqua [56].
 - Installare un scrubber a solvente organico [56].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti i separatori assorbitori:**
 - Installare un separatore a membrana [56].

2.2.3 Trattamento termico dei rifiuti

Il processo di incenerimento ha come principale obiettivo trattare i rifiuti in modo da ridurne il loro volume e la loro pericolosità, catturando o distruggendo sostanze potenzialmente dannose. Inoltre, è un metodo per il recupero dell'energia contenuta all'interno dei materiali processati sotto forma di energia termica che può essere convertita in elettricità. Esistono impianti che producono solo elettricità e altri che portano alla produzione combinata di calore ed elettricità (impianti *Combined Heat and Power*). In termini di efficienza ed utilizzo del calore sviluppato dai rifiuti, si ha una convenienza negli impianti CHP [65]. Infatti, se l'obiettivo fosse solo quello di produrre elettricità, allora converrebbe piuttosto ricorrere alla digestione anaerobica [66]. Gli impianti di questa tipologia vengono chiamati *Waste-to-Energy* [67]. In letteratura [68], Figure 24-25 mostrano lo schema di funzionamento di un impianto sia nel caso di produzione esclusiva di energia elettrica sia combinata con il calore.

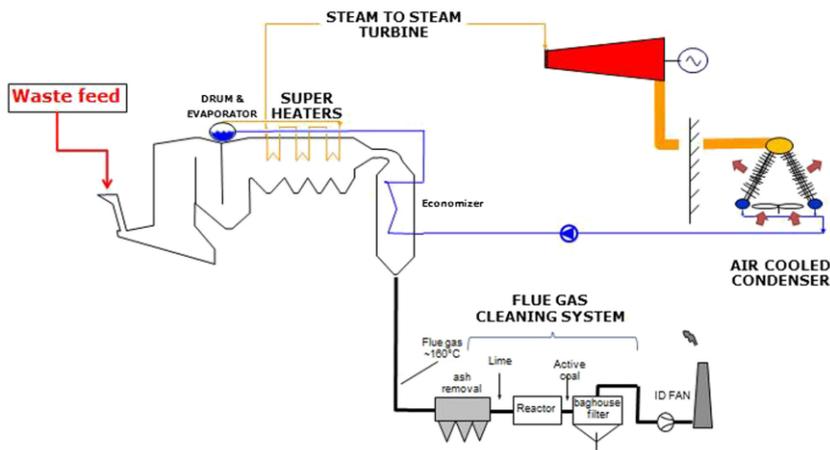


Figura 24 - Schema di impianto di incenerimento con produzione di energia elettrica [68].

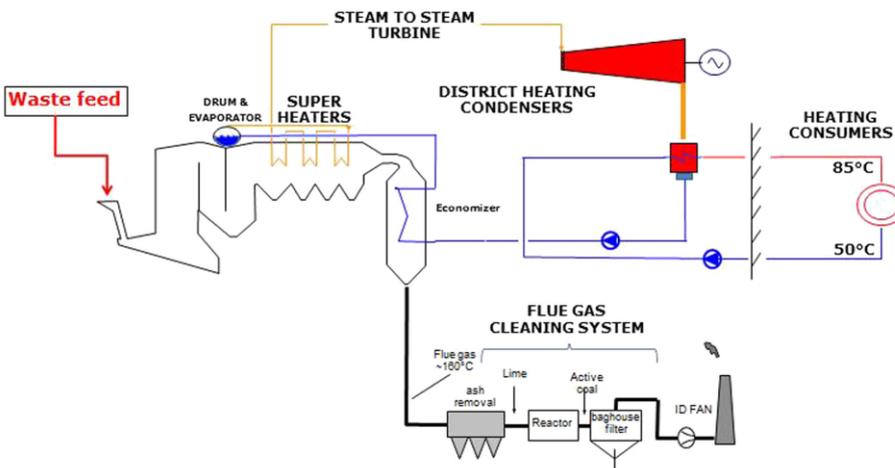


Figura 25 - Schema di un inceneritore con CHP [68].

L'incenerimento è l'ossidazione dei materiali combustibili presenti all'interno dei rifiuti, che generalmente sono composti da sostanze organiche, minerali, metalli ed acqua. Durante il processo si creano gas di combustione che contengono la quasi totalità dell'energia sotto forma di calore. I rifiuti processati vengono portati al di sopra della temperatura di auto-ignizione (temperatura al di sopra della quale il materiale comincia a bruciare in presenza di ossigeno). Il calore che si sviluppa durante la combustione è generalmente sufficiente ad innescare una reazione a catena in grado di auto-alimentare termicamente il processo, limitando o addirittura eliminando la necessità di combustibili aggiuntivi [69]. Le fasi principali del processo di incenerimento sono:

- *Drying e degassing* - un primo riscaldamento del materiale alla temperatura di 100-300° C utile ad asciugare i rifiuti e rimuoverne i componenti gassosi.
- *Pyrolysis e gasification* - la pirolisi è la decomposizione delle sostanze organiche in assenza di ossigeno a temperature di 250-700° C. La gassificazione è la reazione in cui residui solidi di carbonio reagiscono con vapore d'acqua e CO₂ ad una temperatura di 500-1000° C, diventando gassosi.
- *Oxidation* - i gas combustibili creati nella fase precedente sono ossidati, portando a dei gas di combustione a 800-1450° C.

In uscita dall'incenerimento si hanno ceneri leggere (trasportate dai fumi) e ceneri pesanti (accumulate sul fondo degli inceneritori). Le ceneri in uscita dalla camera di combustione possono essere **trattate meccanicamente** al fine di prepararle per gli utilizzi successivi, ovvero come materiale da costruzione o di riempimento per la costruzione di strade. Principalmente le operazioni meccaniche svolte sono:

- Setacciamento. Per questa fase possono essere usati *rotary screens*, *flat screens* (vibranti o meno), *finger screens*, *star screens* (in essi il materiale viene inserito in una camera dove uno o più alberi, corredati da bracci disposti a stella, ruotano).

- Riduzione delle dimensioni tramite frantumazione. Permette di migliorare le caratteristiche geotecniche del materiale.
- Rimozioni delle frazioni incombuste a bassa densità tramite *air separation* basata su densità, dimensioni delle particelle o forma.

I metalli ferrosi vengono rimossi tramite separatori magnetici, mentre quelli non ferrosi si estraggono con separatori a correnti parassite [69]. Un trattamento innovativo per le ceneri pesanti, emerso in [70], consiste nella vetrificazione tramite microonde. A causa della varia composizione delle ceneri, solo alcune particelle saranno affette dalle microonde: in questi punti ci sarà un rapido scioglimento del materiale fino alla formazione del plasma, seguito poi da un rapido raffreddamento che porterà alla produzione di un solido amorfo. Le ceneri leggere, invece, possono essere trattate in vari modi. Anche in [71] viene proposto un sistema che fa leva sulle microonde (*microwave assisted hydrothermal treatment*). Le ceneri leggere vengono miscelate insieme ad alcuni additivi (appositi per la solidificazione delle ceneri, come NaOH e Na₂HPO₄) in dell'acqua deionizzata per poi essere scaldate tramite delle microonde. Dopo il raffreddamento, la frazione solida può essere estratta e fatta asciugare. Il risultato è la solidificazione dei metalli pesanti, che così potranno essere raccolti evitando la dispersione in ambiente. Questo processo dura meno di 20 min e richiede temperature minori di un processo tradizionale, per cui porta a consumi e costi inferiori. Un'altra strada emerge in [72], in cui la vetrificazione viene ottenuta utilizzando il plasma. Il sistema comprende tre elementi: la fornace al plasma (alimentata elettricamente), un elemento per il controllo degli inquinanti nell'aria ed uno per l'acqua. La fornace basa il suo funzionamento su elettrodi di grafite. In media, la percentuale di vetrificazione è intorno al 77% del peso della cenere. Questo comporta una decisa riduzione del volume e del peso degli scarti, oltre a renderli inerti. Il trattamento termico dei rifiuti può essere svolto tramite differenti tecnologie di inceneritori [69]:

- *Grate incinerators.*
- *Rotary kilns.*
- *Fluidised bed.*
- *Pyrolysis and gasification system.*

I **grate incinerators** sono formati da una serie di componenti [69]:

- **Incineration grate.** Questo dispositivo mobile ha il compito di trasportare il materiale dentro la fornace, alimentandola. L'obiettivo è di ottenere una buona distribuzione d'aria all'interno della fornace, in accordo con i requisiti di combustione (temperatura e quantità di ossigeno). È comune che alcuni materiali di piccole dimensioni caschino attraverso la griglia e si depositino nella cenere pesante. Da qui vengono recuperati e reimmessi nel processo. Il tempo di residenza dei rifiuti all'interno della camera di combustione, in genere, non è superiore ai 60 min. È possibile distinguere differenti tipi di griglie: quelle in continuo (*roller grates* e *chain grates*) e quelle in discontinuo (*push grates*). Il raffreddamento, necessario per tenere sotto controllo la temperatura della griglia ed allungarne la vita, avviene tramite acqua o olii che gli scorrono all'interno. Il flusso del vettore di raffreddamento è dalle zone più fredde a quelle più calde, così da massimizzare lo scambio di calore. Il calore recuperato può essere riutilizzato. Se il raffreddamento è fatto ad aria, allora il flusso che fornisce ossigeno alla camera di combustione ha anche il ruolo di raffreddare le griglie. Questo metodo non è adatto per processare materiali ad alto valore calorifico. Esistono differenti tipologie di griglie, necessarie per trasportare, miscelare i rifiuti, fornendo combustibile per l'incenerimento [73] (Figura 26):
 - *Rocking grates:* righe alterne delle griglie vengono ruotate o scosse al fine di produrre un moto di avanzamento ed un lieve rimescolamento dei materiali.
 - *Reciprocating grates:* una serie di scalini si allungano e si restringono provocando la discesa e un lieve rimescolamento del materiale. Esistono due varianti di questa tipologia di griglia: *push forward grate* (quanto appena illustrato) e *reverse reciprocating grate* (il movimento delle barre è opposto al senso del flusso di materiale).

- Travelling grates: un nastro trasportatore ruota in continuo, muovendo così il materiale da incenerire. La mancanza di mescolamento rende questo metodo inutilizzato.
- Roller grates: una serie di cilindri rotanti sono installati in serie in modo tale da trasportare e rimescolare il materiale.

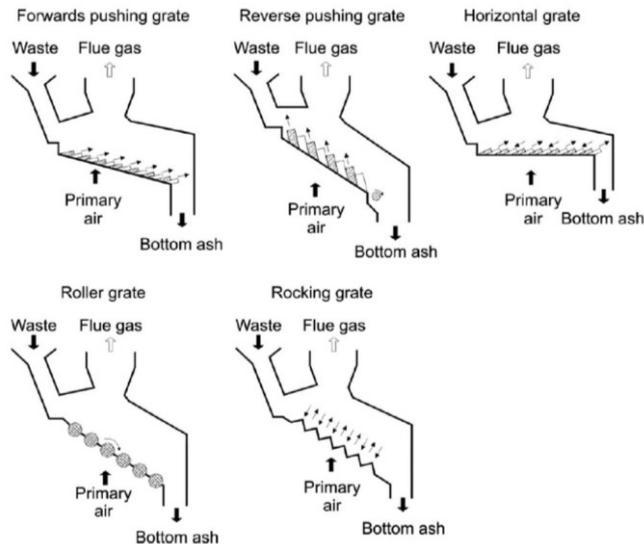


Figura 26 - Tipologie di griglie [73].

- Incineration chamber. La camera di combustione, dove avviene l'incenerimento dei rifiuti. È formata dalla griglia alla base, da pareti e da un soffitto formato dalla superficie di un boiler. Le pareti della camera di combustione sono raffreddate tramite delle intercapedini in cui viene fatta circolare dell'acqua o dell'aria e hanno un rivestimento refrattario interno [74]. Mentre i componenti solidi vengono ossidati per combustione sulla griglia, quelli gassosi bruciano in alto nella camera. È presente un secondo flusso d'aria nella parte alta della camera, necessario per impedire alle ceneri leggere (volatili) di liquefarsi. Esistono differenti sistemi a seconda della direzione dei flussi d'aria all'interno della camera [74] (Figura 27):
 - *Co-current furnace*. Il flusso d'aria principale e quello dei rifiuti si muovono nella stessa direzione.
 - *Counter-current furnace*. Il flusso d'aria principale e quello dei rifiuti si muovono nella direzione opposta.
 - *Medium current furnace*. Questo metodo è il risultato della somma di più flussi d'aria che provengono dalle estremità della griglia.

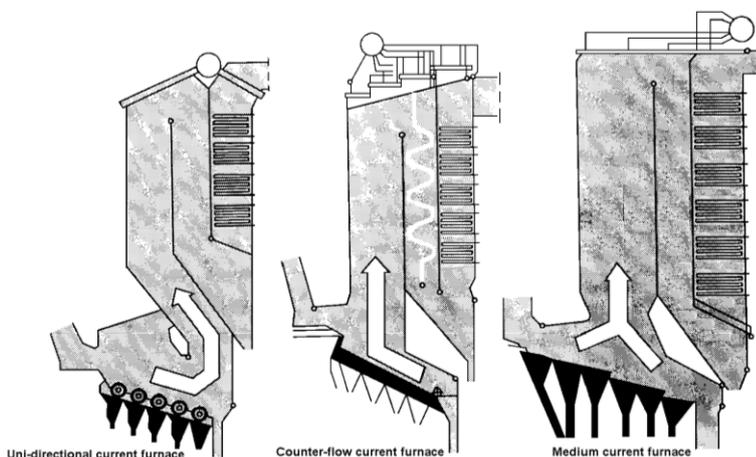


Figura 27 - Differenti tipologie di fornice a seconda del flusso d'aria [74].

I *grate incinerators* (Figura 28) sono un tipo di inceneritori aventi come grande vantaggio quello di prendere in input rifiuti che non necessitano di essere eccessivamente pre-processati. Infatti, oltre ad un necessario processo di smistamento ed estrazione dei metalli, non è richiesta una fase di sminuzzamento: la forma e i movimenti delle griglie sono studiati in modo tale da permettere il processamento di pezzi di varie dimensioni. Inoltre, essi sono in grado di processare rifiuti ad alta variabilità sia di composizione che di valore calorifico. Sono infatti la tipologia di inceneritori che più si adatta a processi in larga scala: possono arrivare a processare fino a 50 t/h [75].

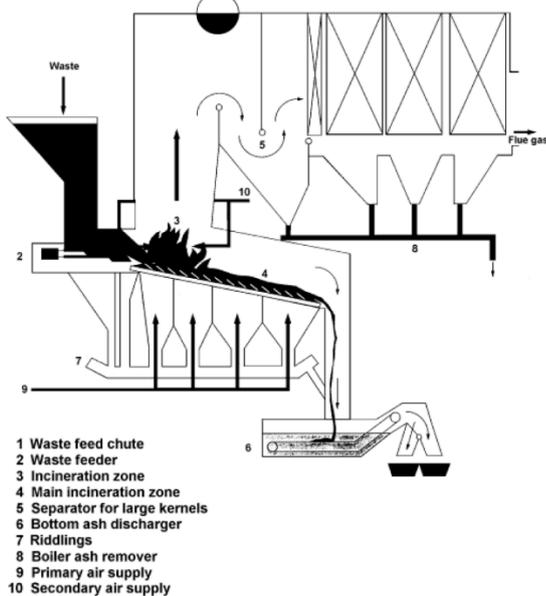


Figura 28 - Schema di un inceneritore a grate [75].

I *forni rotativi (rotary kilns)* sono strutture molto robuste e permettono l'incenerimento di ogni sorta di rifiuto. Sono in grado di lavorare in un range di temperatura molto ampio, ovvero tra i 500 ed i 1450° C. Più è alta la temperatura più velocemente invecchia il forno, nonostante sia ricoperto internamente di materiale refrattario e che spesso sia dotato di intercapedini in cui far circolare acqua o aria di raffreddamento [76]. Il sistema di raffreddamento ad aria consiste in due circuiti: quello primario rifornisce d'acqua fresca il forno, garantendo un raffreddamento simile su tutta la superficie, e poi la scarica in un sistema di scambiatori di calore dove può tornare fresca e ricominciare il ciclo; il circuito secondario si occupa di raffreddare l'acqua del circuito primario (Figura 29).

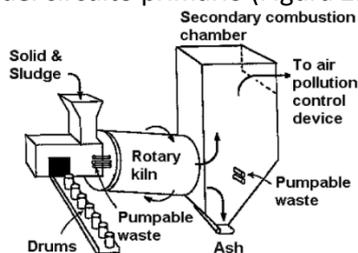


Figura 29 - Schema di un forno rotativo [74].

Il sistema è formato dal forno rotativo leggermente inclinato così da facilitare lo scorrimento del materiale al suo interno. Il contenitore che lo forma è disposto su una serie di cilindri rotanti che lo tengono in rotazione. Per aumentare la distruzione di composti tossici, è generalmente utilizzata una camera di post-combustione [69].

Gli *inceneritori a letto fluido (fluidised bed)* sono solitamente formati da un cilindro verticale alla cui base, su una griglia, è disposto del materiale inerte (sabbia o cenere) che viene fluidizzato da un flusso d'aria preriscaldato. Nel letto fluidizzato vengono attuate l'asciugatura, la volatizzazione, l'accensione e la combustione del materiale. Grazie alla buona miscelazione che si ha all'interno della camera, la temperatura e la concentrazione dell'ossigeno sono uniformi. In [77] viene suggerita l'installazione di un

turbocompressore alimentato dai gas di scarico della combustione: questo andrebbe a sostituire i compressori necessari per fornire alla camera di combustione il flusso d'aria necessario per rendere fluido il letto. La riduzione dei consumi elettrici dovuti a questa tecnologia possono aggirarsi fino al 50%. Le ceneri in eccesso vengono rimosse dal fondo della fornace. Il calore generato dalla combustione viene recuperato tramite sistemi presenti all'uscita dei gas o all'interno del letto fluidizzato. A seconda della griglia e della velocità del gas fluidizzante si hanno differenti tipologie di inceneritori:

- *Stationary fluidised bed* (Figura 30): nel letto fluidizzato il materiale in ingresso viene frantumato e miscelato, asciugato ed incenerito. Dei processi di asciugatura del materiale possono essere necessari al fine di evitare l'utilizzo di combustibili ausiliari per l'incenerimento. La camera di combustione è un cilindro verticale in cui si affacciano bocchettoni per l'ingresso di aria ed eventuale combustibile.

Il principale svantaggio di questo metodo è l'alta quantità di polveri nei gas di scarico [73]. Per avviare il macchinario è necessario preriscaldare la camera di combustione. Per questa motivazione, è prevista una camera di *start-up* al di sotto della camera principale in grado di introdurre direttamente il calore nel letto fluidizzato.

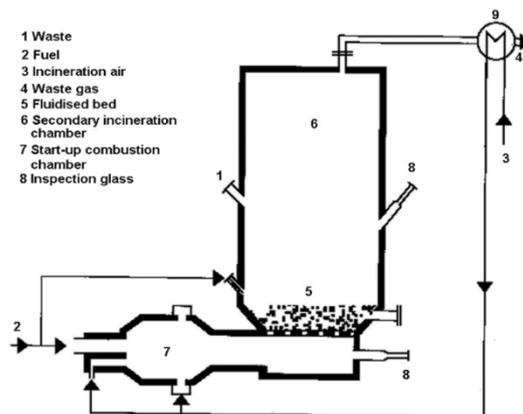


Figura 30 - Stationary fluidised bed [74].

- *Rotating fluidised bed*: il gas è a basse velocità, ma il letto viene fatto ruotare facendo così aumentare il tempo di residenza. L'eliminazione del materiale incenerito dal letto fluidizzato è assegnata a delle viti d'estrazione.
- *Sperader-stroker furnace*: è una via di mezzo tra un sistema a griglie ed uno a letto fluidizzato. I rifiuti (RDF) vengono sparati pneumaticamente all'interno della camera di combustione ad altezze anche di diversi metri. Le particelle più fini si inceneriscono all'istante, mentre quelle più spesse precipitano verso una grata mobile disposta sul fondo e che permette un processamento prolungato nel tempo.
- *Circulating fluidised bed*: forti flussi di gas portano a far girare vorticosamente il materiale inerte. È particolarmente adatto al processamento di fanghi di depurazione ad alto contenuto calorifico o a rifiuti solidi urbani pretrattati. Questa tipologia di macchinari consente una distribuzione uniforme di calore in tutta la camera di combustione. Il calore in eccesso viene rimosso tramite intercapedini raffreddate nelle pareti dell'inceneritore e tramite degli scambiatori di calore.

Gli inceneritori a letto fluido richiedono un investimento iniziale e dei costi operativi maggiori di circa il 70% di un inceneritore a grate [75].

Di seguito si riepilogano gli interventi tecnologici reperiti per ridurre i consumi energetici relativi al processo di trattamento termico dei rifiuti. La descrizione delle tecnologie elencate negli interventi qui riportati è stata fornita in precedenza. La spiegazione sul perché questi interventi dovrebbero consentire un risparmio energetico è, invece, comune a tutti gli interventi ed è la seguente: installare nell'impianto tecnologie atte a incenerire i rifiuti permette di recuperare l'energia chimica e termica in essi contenuta, trasformandola in energia termica e/o elettrica (processo *Waste-to-Energy*). Poiché i rifiuti in input agli impianti di smaltimento rifiuti andrebbero comunque smaltiti, installare tecnologie che effettuino il trattamento termico e, dunque,

recuperino energia da essi (minimizzandone lo spreco) rappresenta di per sé un intervento di efficientamento energetico.

- **Interventi *energy-saving* riguardanti gli inceneritori a grate:**
 - Installare un inceneritore con griglia a rulli (*roller grates*) [73] [69].
 - Installare un inceneritore con griglia a catena (*chain grates*) [69].
 - Installare un inceneritore con griglia a spinta (*push grates*) [69].
 - Installare un inceneritore con griglia a dondolo (*rocking grates*) [74] [69].
 - Installare un inceneritore con griglia a gradini mobili (*reciprocating grates*) [73] [69].
 - Installare un inceneritore con griglia itinerante (*travelling grate*) [73] [69].
 - Installare un inceneritore con flusso d'aria controcorrente [74] [69].
 - Installare un inceneritore con flusso d'aria secondo corrente [74] [69].
 - Installare un inceneritore con flusso d'aria multiplo [74] [69].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti i forni rotativi:**
 - Installare un forno rotativo [74] [69].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti gli inceneritori a letto fluido:**
 - Installare un inceneritore a letto fluido stazionario (*stationary fluidised bed*) [73] [69].
 - Installare un inceneritore a letto fluido rotante (*rotating fluidised bed*) [69].
 - Installare una *fornace spreader-stroker* [69].
 - Installare un inceneritore a letto fluido circolante (*circulating fluidised bed*) [69].
 - Installare un turbocompressore nel sistema d'areazione di un inceneritore a letto fluido [77].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti i dispositivi a microonde:**
 - Installare un sistema a microonde per la solidificazione delle ceneri leggere [71].
 - Installare un sistema a microonde per la vetrificazione delle ceneri pesanti [70].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti i dispositivi al plasma:**
 - Installare un sistema al plasma per la vetrificazione delle ceneri [72].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti i gassificatori:**
 - Installare un gassificatore a letto fluido [78] [69].
 - Installare un gassificatore a letto fisso a corrente discendente (*fixed bed downdraft gasifier*) [78] [69].
 - Installare un gassificatore a letto fisso a corrente ascendente (*fixed bed updraft gasifier*) [78].
 - Installare un gassificatore a forno rotativo [78].
 - Installare un gassificatore a grate mobili [78].
 - Installare un gassificatore al plasma [78].
 - Installare un gassificatore a sistema ciclonico [69].
 - Installare un *entrained flow gasifier* [78].
 - Installare un gassificatore in atmosfera d'idrogeno [79].
 - Installare un gassificatore al plasma d'idrogeno [79].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti i dispositivi per la pirolisi:**

- Installare un dispositivo per la pirolisi [69].
- Installare un dispositivo per la pirolisi al plasma [80].
- Installare un dispositivo per la torrefazione [81].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti i dispositivi per la pirolisi e i combustori:**
 - Installare un forno rotativo [69].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti i dispositivi per la pirolisi e i gassificatori:**
 - Installare un sistema di pirolisi e gassificazione a processo disconnesso (di conversione) [69].
 - Installare un sistema di pirolisi e gassificazione a processo connesso [69].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti i dispositivi per i gassificatori e i combustori:**
 - Installare un gassificatore a letto fluido e della fornace per lo scioglimento delle ceneri [69].
 - Installare un forno a pozzo [69].

2.2.4 Controllo delle emissioni in aria

I gas di scarico in uscita dall'inceneritore sono generalmente pieni di polveri e ceneri, essendo inadatti allo scarico in atmosfera. Allo stesso modo, anche i processi di triturazione (trattamento meccanico) e processamento biologico (trattamento biologico) portano alla diffusione di agenti inquinanti. Qualunque trattamento dei rifiuti si adotti, dunque, sono necessari alcuni passaggi di pulizia e controllo delle emissioni in aria.

Per la rimozione di polveri e particelle esistono differenti sistemi:

- **Sistemi ciclonici e multiciclonici.** Utilizzando una tecnologia ciclonica, le particelle solide o liquide disperse nell'aria possono essere separate dall'aria [56]. Il funzionamento è basato sul mettere in rotazione l'aria, così da generare delle forze centrifughe nei materiali dispersi al suo interno che, quindi, verranno espulsi dal flusso [82]. I sistemi multiciclonici utilizzano differenti unità cicloniche in serie [69]. L'efficienza di rimozione di questi sistemi può arrivare fino al 90% (per le particelle più grandi di 10 micrometri) [83].
- **Precipitatori elettrostatici.** Chiamati anche filtri elettrostatici, la loro capacità di trattenere le polveri è data dalla resistività elettrica della polvere processata. Se la polvere ha una resistività superiore ai 10^{11} Ohm*cm, l'efficienza di rimozione è ridotta. Il funzionamento prevede di sottoporre i fumi a un intenso campo elettrico che ionizzerà alcune particelle che andranno poi ad aderire ai poli positivo e negativo del filtro. Durante lo spostamento, gli ioni possono essere in grado di raccogliere particelle che non vengono influenzate dal campo elettrico. Entrate a contatto con i poli, le particelle perdono la loro carica e cadono lungo le pareti del filtro [69]. Esistono alcune varianti:
 - Precipitatori elettrostatici umidi. Il funzionamento è identico al precedente, con la sola differenza che la polvere accumulata sui poli viene lavata via con un liquido, solitamente acqua. Questo processo può essere fatto in continuo. [69]
 - Precipitatore elettrostatico a condensazione. Questa tipologia di dispositivi è formata da una serie di tubi plastici impacchettati che sono raffreddati ad acqua. I gas di scarico pieni di polvere vengono prima raffreddati fino al punto di rugiada tramite l'iniezione diretta di acqua e poi saturati con del vapore. Si crea una condensa sul lato interno dei tubi di plastica che funzionerà come elettrodo passivo. Le particelle vengono depositate tramite l'influenza di un campo elettrico generato tra degli elettrodi ed il velo di condensa [69].

- **Filtri a maniche (*fabric filter*)**, filtri in tessuto che fungono da barriera fisica per le particelle disperse nell'aria [56]. Tali filtri sono soggetti a usura a seconda delle condizioni termiche, fisiche e chimiche del gas. Inoltre, il continuo deposito di particelle provoca una graduale perdita di pressione a valle del filtro. Il differenziale della pressione monte-valle viene utilizzato per monitorare la necessità di pulizia o sostituzione del filtro [69]. La pulizia avviene generalmente con un getto d'aria in direzione opposta ai gas di scarico. Per evitare che il tessuto possa bruciare, questa tipologia di filtri viene utilizzata a valle del boiler o dei differenti scambiatori di calore [83].
- **Filtri assoluti (*absolute filter*)**, come gli HEPA (*High-Efficiency Particle Air filter*) o gli ULPA (*Ultra-Low Penetration Air filter*), sono formati da carta o fibra di vetro. Col passare del tempo il filtro si riempie formando un letto di polvere che aumenta ancora l'efficienza di raccolta [56].
- **Thermal oxidation**. Questo metodo si basa sullo scaldare l'aria al di sopra della temperatura di autoignizione degli agenti contaminanti. Questo implica la combustione delle componenti da eliminare, ottenendo CO₂ e acqua [56].
- **Biofiltration**. Questo metodo prevede di far passare l'aria da processare attraverso un letto di materiale organico o inerte, dove viene ossidata naturalmente da microorganismi in CO₂, acqua, sali e biomassa. La biofiltrazione è adatta per flussi d'aria con basse concentrazioni di agenti inquinanti facilmente solubili in acqua [56].
- **Condensation and cryogenic condensation**. Abbassando la temperatura del flusso d'aria al di sotto della temperatura di rugiada si ottiene la separazione dei composti organici volatili (VOC) [56].
- **Adsorption** (Figura 31). L'assorbimento è una reazione eterogenea in cui molecole di gas sono trattenute nella superficie di un solido o di un liquido. Il materiale assorbente può saturarsi e, o viene sostituito, o viene rigenerato eliminando tutte le particelle assorbite. Per la pulizia dell'aria in genere viene utilizzato il *Granular Activated Carbon* (GAC), gli zeoliti o altri silicati [56].

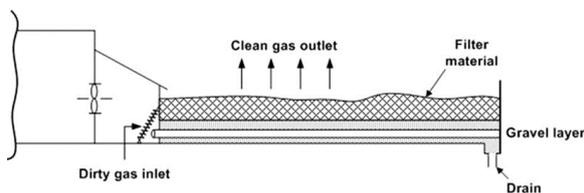


Figura 31. Schema del metodo di biofiltrazione [56].

- L'adsorbimento viene unito alla **ionizzazione** in una tecnica per l'abbattimento dei VOC. In una camera di ionizzazione, degli elettrodi generano un forte campo elettrico che ionizza dall'aria esterna filtrata. Questa aria viene messa in contatto, in una camera di mixaggio, con l'aria da processare e poi insieme vengono fatte passare attraverso un filtro di carbone attivo. Questo viene rigenerato tramite il passaggio di sola aria ionizzata [56].
- **Wet scrubbing** è un trasferimento di massa tra un gas solubile e un solvente che entrano in contatto. I liquidi utilizzati possono essere acqua, soluzioni alcaline, soluzioni di ossidazione, soluzioni acide, ecc. Ne esistono molteplici tipologie [56]:
 - **Ionisation wet scrubbers (IWS)**. I sistemi IWS sono una combinazione di un filtro elettrostatico ed uno scrubber. Una piccola quantità di energia porta ad un'alta pulizia del gas da particelle di dimensioni intorno al micron. È presente una zona ad alto voltaggio, il cui compito è la ionizzazione delle particelle contenute nel gas: le particelle caricate negativamente inducono cariche opposte sulla superficie bagnata del filtro a cui vengono attratte. Il filtro viene tenuto umido, così da avere una condensa superficiale che fa cadere in gocce la polvere raccolta [69].
 - **Venturi scrubber**. Un sistema di questo tipo consiste in tre sezioni: una zona convergente, una zona a gola ed una zona divergente. Il gas entra nella zona convergente e, di conseguenza,

la sua velocità aumenta. Del liquido viene introdotto, sia nella zona a gola sia nella zona divergente, ed entrando in contatto con il gas ad alta velocità viene ridotto a numerose goccioline a cui le particelle di polvere aderiranno per poi essere raccolte [69].

Per la rimozione degli acidi dai gas di scarico si ricorre generalmente alla tecnologia degli **scrubbers**. Alcuni esempi sono i *jet scrubbers*, *rotation scrubbers*, *venturi scrubbers*, *dry tower scrubbers*, *spray scrubbers* e i *packed tower scrubbers* [83].

- **Processo di riduzione selettiva catalitica (SCR)**. Si ha il passaggio del gas, pretrattato con ammoniaca, all'interno di un catalizzatore (generalmente in leghe metalliche come il platino), che fa reagire l'ammoniaca producendo azoto e vapore acqueo [69]. Questa tecnica viene utilizzata per abbattere i VOC e i NO_x.

I gas contenenti tracce di VFC/VHC (derivanti dal processamento di frigo, impianti di condizionamento, o altro) sono trattati in differenti modi [56]:

- **Cryogenic technique**: tramite un abbassamento delle temperature avviene la liquefazione dei due gas e il loro recupero.
- **Catalytic conversion technique**: il gas viene trattato in due convertitori catalitici in serie dove, prima vengono ossidati termicamente gli idrocarburi (formando acqua e CO₂), poi i VFC vengono convertiti in cloruro di idrogeno e fluoruro di idrogeno (e CO₂). Il primo passaggio è esotermico, quindi funziona come preriscaldatore per la seconda fase. Il calore dei gas in uscita dalla seconda fase viene usato per preriscaldare i nuovi gas in ingresso da processare. È un processo autosufficiente in termini energetici.
- **adsorption technique**: i gas vengono pompati attraverso dei filtri ad assorbimento. È possibile che i gas vengano raffreddati prima di essere pompati, al fine di ridurre la quantità d'acqua che viene assorbita dai filtri. I filtri possono essere disposti in serie e periodicamente invertiti, in modo che il primo assorba ed il secondo si rigeneri (il carbone attivo è rigenerato tramite aria calda, che viene pompata nel filtro).

Si riepilogano gli interventi tecnologici atti a ridurre i consumi energetici nel controllo delle emissioni. La descrizione delle tecnologie negli interventi qui riportati è stata fornita in precedenza. La spiegazione sul perché questi interventi dovrebbero consentire un risparmio energetico è, invece, comune a tutti gli interventi ed è la seguente: l'eliminazione di polveri, particelle e agenti inquinanti dalle sostanze in gioco nei processi riduce l'impatto ambientale dello smaltimento rifiuti, efficientando il processo di controllo delle emissioni di questi ultimi e, dunque, ottimizzandone i consumi energetici. Inoltre, una migliore pulizia delle sostanze in output dal processo di smaltimento di rifiuti, rende queste ultime più efficienti dal punto di vista energetico nel caso in cui esse siano riutilizzate in altre applicazioni (ad esempio il biogas).

- **Interventi energy-saving riguardanti i separatori:**
 - Installare un sistema ciclonico [82] [56].
 - Installare un sistema multi-ciclonico [69].
 - Installare un filtro in tessuto [83] [56].
 - **Aumentare il numero di filtri a manica per ottimizzarne la qualità del filtraggio.**
 - Installare un *absolute filter* [56].
 - Installare un ossidatore termico [56].
 - Installare un biofiltro [56].
- **Interventi energy-saving riguardanti i precipitatori elettrostatici:**
 - Installare un precipitatore elettrostatico [83] [56].

- Installare un precipitatore elettrostatico umido [69].
- Installare un precipitatore elettrostatico a condensazione [69].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti i sistemi di rimozione NO_x:**
 - Installare un sistema DeNO_x con recuperatore di calore.
 - Installare un sistema di preriscaldamento a scambiatori usando i fumi (sostituendo i bruciatori a metano).
- **Interventi *energy-saving* riguardanti gli assorbitori:**
 - Installare un filtro al carbone attivo [56].
 - Installare un filtro a zeoliti [56].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti gli scrubber:**
 - Installare un *jet scrubber* [69].
 - Installare un *packed column scrubber* [83].
 - Installare un *rotation scrubber* [69].
 - Installare un *Venturi scrubber* [83] [69].
 - Installare un *scrubber* a ionizzazione [69].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti i recuperatori di VFC/VHC:**
 - Installare un dispositivo per la tecnica criogenica [56].
 - Installare un dispositivo per la tecnica di conversione catalitica [56].
 - Installare un dispositivo per la tecnica di assorbimento [56].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti i condensatori:**
 - Installare un condensatore [56].
 - Installare un condensatore criogenico [56].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti i dispositivi di trattamento dei VOC:**
 - Installare un sistema SCR [83] [69].
 - Installare un sistema formato da ionizzatore e assorbitore [56].

2.2.5 Attività nella ricezione dei rifiuti

Si può identificare una serie di attività generalmente presenti per la ricezione dei rifiuti, esterne al processamento centrale dell'impianto [73], tra cui:

- Rimozione dei liquidi
- Miscelazione
- Trasporto e controllo
- *Sorting*

La **rimozione dei liquidi** è necessaria perché, per poter essere processati termicamente (incenerimento, pirolisi o gassificazione), i rifiuti devono avere un tasso di umidità ridotto. Per questa motivazione, esistono differenti tecniche per la riduzione dei liquidi contenuti. Esistono metodi di asciugatura tramite mezzi meccanici, come decantatori, centrifughe, *belt filter presses* e *chamber filter presses*. Altri metodi fanno uso del calore, ovvero essiccazione, come i *disk dryer*, *drum dryer*, *fluidised bed dryer*, *belt dryer*, *thin film dryer* e il *centrifugal dryer*. Da citare sono anche gli essiccatori a letto statico, in cui dell'aria calda viene fatta circolare attraverso il materiale disposto su di una grata [84], e gli essiccatori rotanti, che consistono nel di rimescolamento continuo all'interno di un contenitore ruotante tramite flussi di aria riscaldata. Gli essiccatori a tunnel consistono in nastri trasportatori (generalmente forati), che movimentano il materiale attraverso un tunnel in cui dei flussi d'aria calda (controcorrente, secondo corrente o dal basso attraversando il nastro) lo

asciugano [84]. L'essiccatore pneumatico consiste nell'immettere i rifiuti all'interno di un tubo cilindrico verticale o orizzontale in cui scorre un potente flusso d'aria calda, che trasporta il materiale e lo asciuga molto rapidamente. A valle di questo tubo è presente un sistema ciclonico per l'estrazione dal flusso dei componenti solidi [84]. Alle volte è presente un passaggio di digestione anaerobica di questi fanghi, che va a ridurre la percentuale organica e ne facilita l'asciugatura: questo approccio è chiamato *biodrying*. Nello specifico, il *biodrying* è un metodo di essiccazione che si basa sull'aerazione forzata accompagnata al calore che si sviluppa naturalmente durante la digestione aerobica della materia organica [85]. È stato evidenziato come questo metodo non porti ad un aumento dell'energia recuperata (in quanto si ha una riduzione della componente organica che, quindi, non potrà produrre calore durante l'incenerimento) e ad una riduzione dei gas serra emessi, però non è collegata a consumi durante la fase di asciugatura [86]. Esiste il *biodrying* in serra, dove il calore viene fornito anche dal sole a cui il materiale è esposto. Se, invece, l'energia solare viene convogliata ma non usata direttamente, si parla di essiccazione solare [87]. Una particolare tecnica di asciugatura è la *immersion frying*, in cui l'umidità contenuta nei rifiuti viene fatta evaporare facendola entrare in contatto con dell'olio caldo (al di sopra della temperatura di ebollizione dell'acqua), in cui viene immerso. Il contatto diretto tra il materiale e il vettore di calore porta ad alte velocità di asciugatura. Il materiale così trattato ha un valore calorifico più alto [84].

La **miscelazione** è necessaria perché un materiale omogeneo è più facile da smaltire e richiede meno tempo per essere trattato. Per la miscelazione possono essere utilizzate differenti tipologie di miscelatori, tra cui i *propeller mixers*, i *turbo mixers*, i *blade mixers*, *auger mixers*, *tumble mixers*, *drum mixers* e *rotary mixers*. Per i rifiuti solidi o pastosi può essere persino utilizzato un impastatore, un *forced aeration mixer* o un *plough-share mixer*. Per i rifiuti liquidi si utilizzano degli agitatori o delle pompe.

I rifiuti in ingresso all'impianto devono anche essere **pesati** (tramite bilance per camion o misuratori di flusso) e **controllati**, per evitare il processamento di materiali radioattivi. Questo può avvenire in una sorta di *drive through* sotto a delle apparecchiature di rilevazione o possono essere presenti dei sensori attaccati ai macchinari adibiti allo scarico. Inoltre, i rifiuti devono essere trasportati e l'attività di trasporto dei rifiuti all'interno degli impianti può avvenire con macchine movimento terra, nastri trasportatori o sistemi automatici in grado di prelevare dai camion i contenitori dei rifiuti, svuotarli, pulirli ed immagazzinarli.

Infine, i rifiuti vanno sottoposti ad un **processo di cernita (sorting)**, che risulta un elemento centrale negli impianti di trattamento dei rifiuti in quanto permette di svolgere al meglio le fasi di recupero e smaltimento. Esistono molte differenti tipologie di *sorting*, tra cui [56]:

- *Manual separation*. La separazione manuale dei materiali viene svolta tramite un'esaminazione visiva del materiale, che viene fatto scorrere su un nastro trasportatore o che è depositato al suolo. In particolare, degli operatori hanno il compito di estrarre i materiali riciclabili, quelli contaminanti e quelli pericolosi [56].
- *Automatic separation*. Il materiale viene depositato su un nastro trasportatore, dove viene scansionato da un *metal detector* e una telecamera a colori. Le informazioni che questi strumenti recepiscono vengono processate da un computer che in output manda dei segnali a degli ugelli disposti alla fine del nastro. Gli ugelli, tramite un improvviso rilascio di aria compressa, allontanano gli elementi da espellere [56].
- *Metals separation*. Essa può essere di due tipi:
 - *Magnetic separation of ferrous metals*. Questo processo si basa sull'utilizzo di magneti che attirano, dal flusso di materiale fatto scorrere su un nastro, tutte le parti ferromagnetiche. Ovviamente, questo processo ignora tutti i metalli non magnetizzabili [56].
 - *Overband magnetic separator* (Figura 32). Questo processo utilizza lo stesso principio del precedente, variando però il metodo di raccolta. Al di sopra del nastro trasportatore è presente un secondo nastro, che è, però, caratterizzato da magneti. Il primo sistema di trasporto scarica tutti i materiali in un contenitore, tranne quelli che sono stati attirati dal secondo nastro, che li scarica in un contenitore separato [56].

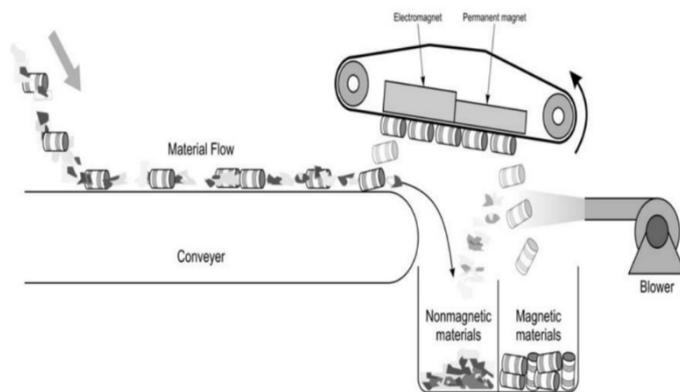


Figura 32 - Schema di funzionamento di un overband magnetic separator [56].

- *Magnetic drum.* Il materiale da processare viene fatto cascare all'interno di un cilindro magnetico, che attira tutte le componenti ferromagnetiche. Quando il campo elettromagnetico è saturato dalla quantità di materiale estratto, questo viene rilasciato in appositi contenitori [56].
- *Electromagnetic separation of non-ferrous metals* (Figura 33). Chiamati anche separatori a correnti parassite, questi separatori si basano sull'utilizzo di forti magneti a base di terre rare che, disposti in un rotore, generano delle forze magnetiche temporanee in grado di spingere via i materiali non ferrosi della stessa polarità del rotore. Per avere, quindi, un buon risultato è necessario avere un campo magnetico che cambia polarità ad alta frequenza [56]. Questo metodo rende possibile estrarre metalli non ferrosi come l'alluminio [82].

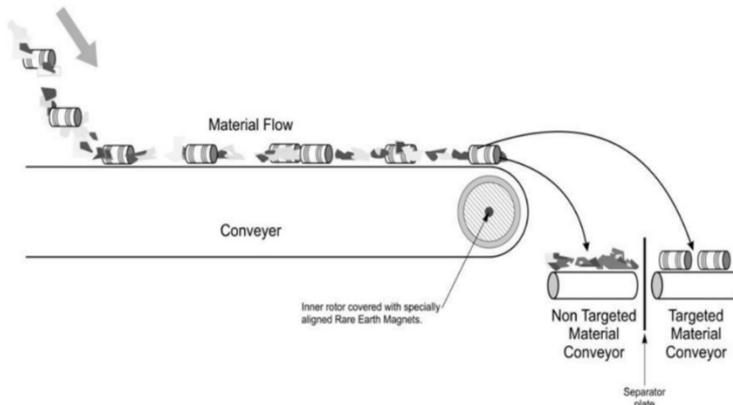


Figura 33 - Schema di funzionamento di un eddy current separator [56].

- *All metal separators.* Questo processo permette di estrarre dal flusso di materiali tutte le tipologie di metallo. Delle bobine di rilevamento, in grado di rilevare particelle metalliche fino ad 1 mm, sono disposte alla fine di un nastro trasportatore e, appena avvertono la presenza di un metallo, mandano un segnale ad un processore. Questo elabora il dato e aziona degli ugelli che, mediante getti di aria, allontanano il pezzo metallico dal resto dei materiali [56].
- *Optical sorting systems using near infrared spectroscopy* (Figura 34). Delle lampade alogene illuminano un tratto del nastro trasportatore su cui il sensore ad infrarossi (*Near Infrared Spectroscopy* - NIRS) agisce. Dopo esser stati riconosciuti i materiali da estrarre, questi vengono allontanati dal flusso principale tramite dei getti d'aria emessi da ugelli [56].

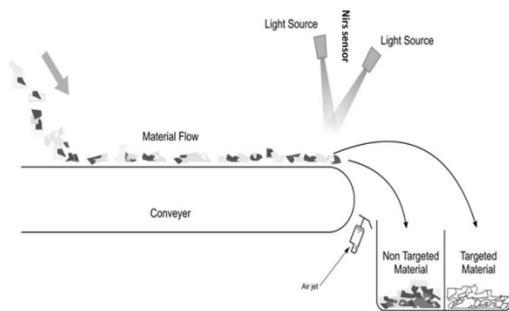


Figura 34 - Schema di un optical separator [56].

- *X-ray systems*. Un processo analogo al precedente, ma con un sensore a raggi X integrato. È in grado di distinguere materiali compositi [56].
- *Density separation o centrifugal separation*:
 - *Air classification*. Il funzionamento è basato su un flusso d'aria che, attraverso 4 zone di separazione va a partizionare i rifiuti [82]. Si possono distinguere differenti tipologie di classificatori ad aria, tra cui [58]:
 - quello a zig-zag (colonna verticale costantemente attraversata da aria: il materiale entra a mezza altezza e si separa tra parte leggera e pesante).
 - quello rotante (un cono inclinato viene messo in rotazione con dentro il materiale ed un flusso d'aria assiale).
 - quello ad aspirazione (la parte leggera viene aspirata dal nastro trasportatore su cui si trova).
 - e quello a flusso incrociato (il materiale viene fatto cadere e un flusso d'aria trasversale allontana i soli materiali leggeri).
 - *Sink-float tank*. Questo metodo usa la differente densità dei materiali per separare i rifiuti solidi. Un serbatoio viene riempito con un liquido (generalmente acqua) e i rifiuti che vi vengono inseriti si distribuiscono a differenti altezze a seconda della loro densità [56].
 - *Balistic separation*. In questo processo viene utilizzato un macchinario dotato di una serie di pale rotanti o di una base formata da assi che traslano verticalmente. I rifiuti che arrivano nel macchinario subiscono forti urti con le pale e le vibrazioni che ne derivano vanno a dividere il flusso totale in due frazioni: quella leggera (che rimane in alto) e quella pesante (che si accumula sul fondo) [56].
 - *Vibration tables*. Conosciuti anche come *gravity separators* o *density separators*, basano il loro funzionamento sulla densità e le dimensioni delle particelle che compongono la fanghiglia umida di rifiuti. Il materiale viene depositato su un ripiano inclinato che vibra con oscillazioni direzionate sulla sua normale: queste provocano la separazione dei materiali [56].
 - *Air tables*. Variante del processo precedente, questo metodo lavora con materiali asciutti e anziché basarsi sulle vibrazioni, si basa sulla fluidizzazione. Un getto d'aria a bassa pressione viene fatto passare attraverso una tela inclinata. Le polveri e le particelle più piccole si muovono verso l'alto, mentre le più grandi cadono verso il basso [56].
 - *Aspiratori*. Il materiale, disposto su un nastro trasportatore o un letto vibrante, viene separato dalla sua parte leggera tramite degli aspiratori.
 - *Size separation* (Figura 35). La setacciatura può essere svolta all'interno di cilindri rotanti, o tele oscillanti. I setacci a tamburo sono cilindri di materiale traforato rotanti: il materiale al loro interno, a seconda della velocità, viene sollevato e fatto ricascare sul setaccio, in modo da aumentare il numero di contatti tra il materiale e la superficie separatrice [58].

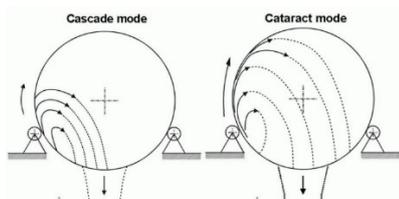


Figura 35 - Schema di un setacciatore a tamburo [56].

Esistono anche setacci a tamburo a sezioni multiple (Figura 36), caratterizzati da un lungo cilindro diviso in sezioni, ognuna avente fori di dimensioni diverse. Questo permette di ottenere più gruppi di rifiuti basandosi sulle loro dimensioni.

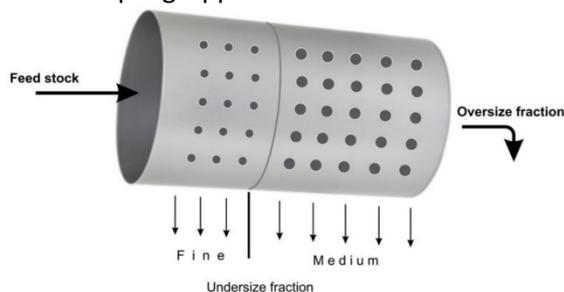


Figura 36 - Separatore a tamburo a sezioni multiple [56].

Un ulteriore metodo di setacciamento è l'uso di un tessuto plastico o gommoso che viene fatto oscillare da bracci rotanti (Figura 37). Il materiale disposto sopra viene fatto avanzare sul tessuto e, nel frattempo, i frammenti di dimensioni inferiori vengono setacciati [58].

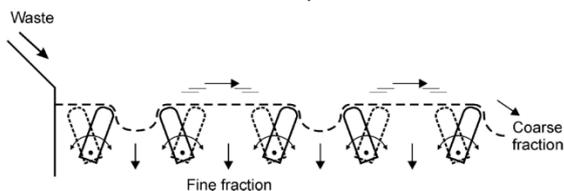


Figura 37 - Setacci oscillanti [58].

Un'altra tipologia di setaccio è quello a dischi (Figura 38), in cui si hanno file parallele di dischi montati su alberi. Le distanze reciproche determinano la grandezza delle particelle che vengono filtrate [58].

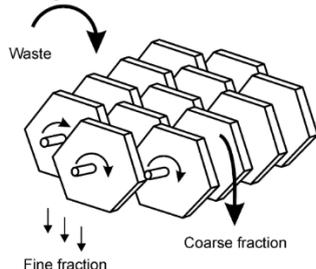


Figura 38 - Disk screen [58].

- *Analisi di fluorescenza a raggi X (X-ray Fluorescence - XRF) ad alta velocità.* Vi sono dei sensori a fluorescenza disposti al di sopra del nastro trasportatore. I materiali devono essere disposti su un solo livello, in modo che l'ispezione sia completa e che l'estrazione, ottenuta tramite rilascio di aria compressa da parte di ugelli, sia precisa [56].

Di seguito si riepilogano gli interventi tecnologici per ridurre i consumi energetici nel processo di ricezione merci. La descrizione delle tecnologie elencate negli interventi è stata fornita in precedenza. La spiegazione di come questi interventi consentono un risparmio energetico è, invece, comune a tutti gli interventi, ovvero: installare tecnologie atte a ottimizzare la ricezione dei rifiuti permette un miglior controllo dei materiali in input all'impianto, una loro separazione e, dunque, un loro trattamento più efficace dal punto di vista energetico (scegliendo per ogni categoria di materiale le modalità di smaltimento più consone). Attuare gli

interventi di seguito riportati, pertanto, favorisce un loro successivo smaltimento più rapido ed efficiente, diminuendo l'energia consumata dalle attività di trattamento successive.

- **Interventi *energy-saving* riguardanti gli estrattori di liquidi nel processo di rimozione dei liquidi:**
 - Installare un decantatore [69].
 - Installare una centrifuga [69].
 - Installare una pressa filtrante a nastro [69].
 - Installare una filtropressa [69].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti gli essiccatori nel processo di rimozione dei liquidi:**
 - Installare un dispositivo per l'*immersion frying* [84].
 - Installare un essiccatore a disco [69].
 - Installare un essiccatore rotante [84].
 - Installare un essiccatore a letto statico [84].
 - Installare un essiccatore a tamburo [69].
 - Installare un essiccatore a tunnel [84].
 - Installare un essiccatore a letto fluido [84] [69].
 - Installare un bioessiccatore [86] [87] [85].
 - Installare un bioessiccazione in serra [87].
 - Installare un essiccatore a nastro [69].
 - Installare un essiccatore pneumatico [84].
 - Installare un essiccatore a film sottile [69].
 - Installare un essiccatore centrifugo [69].
 - Installare un essiccatore solare [87] [69].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti i miscelatori ad albero orbitante nel processo di miscelazione:**
 - Installare un miscelatore ad elica [56].
 - Installare un mescolatore a coclea [56].
 - Installare un turbomiscelatore [56].
 - Installare un impastatore [56].
 - Installare un *forced aeration mixer* [56].
 - Installare un miscelatore a lama sigma [56].
 - Installare un *plough share mixer* [56].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti i miscelatori a contenitore orbitante nel processo di miscelazione:**
 - Installare un *tumble mixer* [56].
 - Installare un miscelatore a tamburo [56].
 - Installare un *rotary mixer* [56].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti i miscelatori per liquidi nel processo di miscelazione:**
 - Installare pompe per la miscelazione dei liquidi [56].
 - Installare un agitatore per la miscelazione dei liquidi [56].

- **Interventi *energy-saving* riguardanti le macchine da movimento terra nel processo di trasporto dei rifiuti:**
 - Utilizzare di macchine movimento terra [56].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti i trasportatori nel processo di trasporto dei rifiuti:**
 - Installare un sistema automatizzato di trasporto, apertura e pulizia contenitori [56].
 - Installare un nastro trasportatore [56].
 - **Sostituire il trasporto polveri ad aria con trasportatore a dischi.**
- **Interventi *energy-saving* riguardanti le bilance nel processo di accettazione dei rifiuti:**
 - Installare bilance interrate per camion [56].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti i misuratori di flusso nel processo di accettazione dei rifiuti:**
 - Installare un misuratore di flusso [56].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti i dispositivi per il controllo della radioattività nel processo di accettazione dei rifiuti:**
 - Installare dispositivi per il controllo della radioattività [56].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti i separatori nel processo di sorting:**
 - Installare un separatore automatico [56].
 - Installare un separatore con spettroscopia del vicino infrarosso [56].
 - Installare un separatore con sistema a raggi X [56].
 - Installare un separatore con sistema XRF ad alta velocità [56].
 - Installare un Installazione di un classificatore ad aria - zig zag [58].
 - Installare un classificatore ad aria – rotante [58].
 - Installare un classificatore ad aria – aspirante [58].
 - Installare un classificatore ad aria - a flusso incrociato [58].
 - Installare un serbatoio *sink-float* [58] [56].
 - Installare un dispositivo per la separazione balistica [56].
 - Installare un tavolo vibrante [56].
 - Installare un tavolo ad aria [56].
 - Installare un aspiratore (rimozione parte leggera) [56].
 - Installare un setaccio cilindrico rotante [58] [56].
 - Installare un setaccio vibrante piatto [56].
 - Installare un setaccio oscillante [58].
 - Installare un *finger screen* [56].
 - Installare un *disk screen* [58] [82].
 - Installare un setaccio a tamburo [56].
 - Installare un setaccio a stella [56].
 - Installare un separatore magnetico [58] [56].
 - Installare un separatore magnetico *overband* [56].
 - Installare un *magnetic drum* [56].

- Installare un separatore elettromagnetico a correnti parassite [58] [82] [56].
- Installare un separatore *all-metal* [56].

2.2.6 Servizi ausiliari e di supporto

Oltre ad agire sulle tecnologie che costituiscono le principali fasi del processo, è possibile ridurre i consumi energetici d'impianto effettuando interventi migliorativi sugli apparati ausiliari. In particolare, è possibile agire implementando sistemi di recupero energetico o migliorando l'efficienza energetica delle tecnologie già esistenti.

Per quanto riguarda il **recupero di energia**, nel retore dello smaltimento rifiuti la maggior parte dell'energia che viene prodotta durante il processo di incenerimento viene trasmessa ai gas di combustione. Di conseguenza, raffreddare tali gas permette di recuperare energia e pulirli meglio prima del rilascio in atmosfera. La maggior parte degli impianti attua il recupero termico tramite un boiler in grado di raffreddare i gas di scarico facendo evaporare un liquido al suo interno (spesso acqua). Alcune soluzioni prevedono il boiler direttamente a contatto con la camera di combustione, così da evitare perdite di calore lungo le tubature che lo collegherebbero agli scambiatori di calore. Inoltre, si evitano tutti i danni e le incrostazioni che questi pezzi subirebbero. Per la stessa motivazione è consigliato utilizzare un surriscaldatore di tipologia "platen" che, recuperando calore per radiazione anziché per convezione, riduce fenomeni di corrosione ed erosione. In alcune soluzioni, dopo un primo passaggio in turbina, il vapore viene processato nel surriscaldatore così da innalzarne i parametri legati alla produzione di elettricità. L'incremento di produzione di energia elettrica è da stimarsi intorno al 2-3% [69]. La zona di scambio di calore dovrebbe essere progettata in modo tale da far circolare i gas di scarico a bassa velocità, così da aumentare lo scambio. Esistono differenti sistemi di evaporazione (Figura 39) a seconda di come viene fatto circolare il fluido all'interno del boiler [69]:

- *Natural circulation*: il flusso interno all'evaporatore è mantenuto costante grazie alla differenza di densità che il fluido ha nelle tubature riscaldate rispetto a quelle non riscaldate.
- *Forced circulation*: viene utilizzata una pompa per aumentare la circolazione naturale.
- *Forced continuous flow*: il pompaggio viene svolto in modo continuo tra l'economizzatore, l'evaporatore e il surriscaldatore.

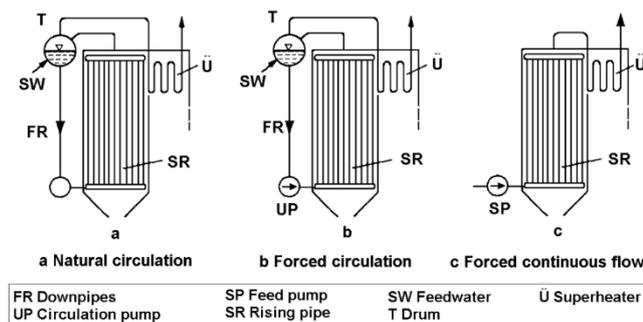


Figura 39 - Sistemi di circolazione in un boiler [56].

Oltre a questa distinzione, i boiler si differenziano anche per le loro caratteristiche geometriche [56]: ne esistono di orizzontali, verticali e una combinazione dei due. Oltre alla configurazione geometrica, però, possono essere individuate anche differenze sulla base del funzionamento del boiler: esistono i boiler "hot water" (il più economico e diffuso produce acqua alla temperatura di 110-160° C, con un'efficienza di recupero intorno al 90%), boiler "low pressure steam" (che produce vapore a 120-250° C e a 20 bar, con un'efficienza di recupero intorno al 90%), boiler "high pressure steam" (questo è il sistema più critico in quanto facilmente suscettibile a fenomeni di corrosione. Richiede molto spazio: fino a 40 m di altezza e 20 m di larghezza. L'efficienza del recupero però può essere superiore rispetto agli altri sistemi).

L'energia recuperata viene impiegata per il riutilizzo o la distribuzione di calore, elettricità o una combinazione di queste due. Sia per il calore che per l'elettricità, gli utilizzi possono essere sia interni (applicazioni interne all'impianto) che esterni (teleriscaldamento e allacciamento alla rete elettrica nazionale).

Nei sistemi CHP (*Combined Heat and Power*) si ottimizza il recupero di energia; infatti, quando la domanda di calore è ridotta (ad esempio in estate), si può comunque produrre energia elettrica. Tipicamente, però, l'efficienza di utilizzo del calore generato è decisamente maggiore nel caso CHP rispetto alla sola produzione di energia elettrica. Quindi, consigliata l'installazione di un sistema di teleriscaldamento per utilizzare al meglio il calore a disposizione, senza trasformarlo [88]. La trasformazione in energia elettrica viene attuata attraverso il passaggio di un gas ad alta temperatura in turbina. Esistono varie tipologie di turbina [69], che possono portare ad efficienze di utilizzo del calore per la produzione di energia oltre al 30% (un risultato notevole considerando la qualità del combustibile) [89]:

- *Turbine back-pressure*, ovvero turbine in contropressione. La pressione in uscita a queste turbine è alta per migliorare l'utilizzazione del calore [76].
- Turbine a condensazione.
- Turbine a condensazione con estrazione: si ha lo spillamento di una parte del vapore a metà dell'espansione in turbina.
- Turbine a condensazione in due fasi: due turbine in serie sono collegate tramite un circuito in cui il vapore viene nuovamente surriscaldato. Dal momento che il gas si è già parzialmente espanso, riscaldarlo nuovamente porta ad una maggiore produzione di energia a temperature di condensazione minori.

Possono essere utilizzati, anche cicli ORC (*Organic rankine cycle*) [90], in cui anziché utilizzare un ciclo a vapore, si adotta un ciclo in cui circola gas organico capace di performare anche a basse temperature. Un sistema di questo tipo è caratterizzato da vari elementi: generatore, boiler, turbina, condensatore, sistema di separazione dell'olio e sistema di raffreddamento. Nel boiler il fluido organico assorbe calore dalla sorgente (combustione dei rifiuti) ed evapora a temperature tra gli 80 ed i 120° C. Il vapore ad alta pressione che si genera viene fatto espandere in turbina per generare elettricità. Al fine di ridurre gli attriti, un olio lubrificante viene spruzzato in turbina e a valle recuperato tramite un separatore. Il vapore a bassa pressione che esce dalla turbina passa attraverso un condensatore e poi viene reimpresso nel boiler.

Un altro sistema per il recupero termico è dato dall'utilizzo di pompe calore, macchine termiche in grado di trasferire calore da una sorgente a bassa temperatura ad una ad alta temperatura utilizzando dell'energia (ad esempio, l'elettricità del compressore) [91]. Ne esistono differenti tipologie:

- Pompe calore con compressore: in un circuito chiuso, una sostanza refrigerante viene fatta circolare attraverso un condensatore, un expander, un evaporatore ed un compressore. Quest'ultimo comprime la sostanza, che condensa ad alte temperature e rilascia il calore al circuito di acqua calda (necessaria all'impianto). Successivamente, la sostanza è forzata ad espandersi ad una bassa pressione, provocando un'evaporazione ed un assorbimento di calore (dai gas di scarico) ad una bassa temperatura. Il risultato è che l'energia a bassa temperatura prelevata dal gas di combustione viene data al circuito d'acqua calda ad una temperatura maggiore.
- Pompe calore ad assorbimento: ha funzionamento simile al sistema alla precedente, ma non è però presente un compressore. La circolazione del fluido è garantita dall'assorbimento dell'acqua in una soluzione salina. Questo permette un consumo elettrico inferiore.
- Pompe calore aperte.

Per quanto riguarda, invece, **l'incremento di efficienza dell'impianto di smaltimento rifiuti**, tra i vari metodi emerge quello proposto da [92], in cui il biogas viene utilizzato in maniera differente dalle metodologie tradizionali. Anziché impiegare il biogas come combustibile in un motore a combustione interna, lo si usa in un boiler per la produzione di vapore ad alta temperatura. Questo vapore può essere incanalato ed utilizzato da un motore Stirling (motore a combustione esterna) per la generazione di energia elettrica. Il vapore a bassa temperatura che esce da questo sistema viene poi immesso in uno scambiatore di calore, dove viene surriscaldato grazie ai gas di combustione del biogas. Questo sistema permette, quindi, di generare sia

energia elettrica che calore, senza compromettere (a causa di corrosioni) il motore, che rimane esterno alla combustione.

Un altro approccio per aumentare la produzione di energia si ottiene integrando un impianto di incenerimento di rifiuti con un impianto di produzione dell'energia. Gli impianti *Waste-to-Energy* (WtE) sono caratterizzati da una mediocre qualità del combustibile, alte temperature dei gas in uscita e dalla produzione di un vapore con parametri contenuti: questi elementi portano l'efficienza della produzione di elettricità dal calore generato intorno al 20,50 %. Al contrario, negli impianti di produzione di energia elettrica alimentati a combustibili convenzionali (ad esempio, carbone) sono caratterizzati da temperature di esercizio maggiori e parametri del vapore più spinti, assicurando così un'efficienza di circa il 40%. In [67] viene proposto di unire queste due tipologie di impianti, al fine di aumentarne l'efficienza complessiva. Secondo questo approccio, l'impianto WtE verrebbe ridotto ad elemento di supporto per l'impianto di produzione di energia elettrica alimentato a combustibile tradizionale. I due sistemi condividerebbero la stessa turbina, mantenendo quindi bassi i costi fissi. Il calore generato dal WtE verrebbe usato per preriscaldare il vapore in ingresso al boiler alimentato a combustibile tradizionale. In questo modo, l'energia ottenuta dalla combustione dei rifiuti sarebbe impiegata per aumentare considerevolmente l'output energetico dell'intero impianto. Infatti, [67] dimostra che fissata la quantità di combustibile, la potenza dell'impianto integrato aumenta di oltre 3,5 MW, portando ad un incremento dell'efficienza di oltre il 9%. [67] mette in luce anche riduzioni nelle perdite energetiche ottenute condividendo una sola turbina di grandi dimensioni ad efficienze molto elevate. In [93], invece, l'integrazione tra i due sistemi avviene in maniera differente. Il gas che viene fatto espandere nella turbina di produzione di elettricità tramite combustibili tradizionali viene fatto passare attraverso alcuni scambiatori di calore. Questi, insieme agli scambiatori di calore presenti sul sistema WtE, surriscaldano del vapore che viene poi fatto passare in una seconda turbina. L'efficienza può aumentare di qualche punto percentuale.

Di seguito si riepilogano gli interventi tecnologici reperiti per ridurre i consumi energetici relativi ai sistemi ausiliari. La spiegazione di come tali interventi apportino un recupero energetico è, in parte, stata fornita nei capoversi soprastanti (descrivendo le tecnologie ausiliarie e di supporto e come funzionano) e, in parte, già stata data nel Capitolo 2.1.5 di tale report, visto che molti interventi sui sistemi ausiliari e di supporto sono analoghi a quelli riportati relativamente al settore delle fonderie. Si rimanda, pertanto, alla lettura di tale paragrafo per approfondimenti in tal senso. Oltre a ciò, la descrizione dettagliata degli interventi che riguardando i sistemi ausiliari è già stata fornita da UNIFI nel report 2020. Si rimanda, pertanto, alla lettura di tale documento per ulteriori approfondimenti.

- **Interventi *energy-saving* riguardanti nel processo di recupero energetico:**

- Installare uno scambiatore di calore a piastre [69].
- **Installare uno scambiatore di calore a bassa pressione (incremento del recupero).**
- **Installare uno scambiatore a tubi lisci.**
- **Installare uno scambiatore di calore.**
- Installare un boiler orizzontale [69].
- Installare un boiler verticale [69].
- Installare un *hot water boiler* [74].
- Installare un boiler a vapore a bassa pressione [74].
- Installare un boiler a vapore ad alta pressione [74].
- Installare un boiler a circolazione naturale [69].
- Installare un boiler a circolazione forzata [69].
- Installare un boiler a flusso continuo forzato [69].
- **Installare un circuito ORC per il recupero calore dei motori a combustione interna a biogas.**

- Installare una pompa di estrazione incondensabili nel condensatore.
- Installare un secondo condensatore ad acqua.
- Installare un sistema di accumulo termico per disaccoppiare produzione ed utilizzo (teleriscaldamento).
- Installare un sistema di teleriscaldamento [88].
- Installare un sistema di recupero termico dai compressori.
- Sostituire l'assorbitore con un *chiller* ad alta efficienza.
- Installare una turbina a condensazione [69].
- Installare una turbina a condensazione con spillamento [69].
- Installare una turbina a condensazione in due fasi [89] [69].
- Installare una turbina a contropressione [76] [69].
- Installare un circuito ORC per la produzione di energia elettrica [90].
- Installare una pompa di calore con compressore [69].
- Installare una pompa di calore ad assorbimento [69].
- Installare una pompa calore aperte [69].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti nel processo di efficientamento energetico:**
 - Sostituire i motori elettrici con motori ad alta efficienza [56].
 - Sostituire i motori elettrici con motori correttamente dimensionati.
 - Installare inverter sui motori elettrici [69].
 - Installare sistemi per la produzione combinata di calore ed energia elettrica [56].
 - Installare sistemi per la produzione combinata di elettricità e calore utilizzando il biogas ottenuto dai processi anaerobici [56].
 - Installare sistemi per la produzione di energia utilizzando una miscela di syngas derivato dalla gassificazione e di biogas derivante dalla digestione anaerobica [64].
 - Installare un motore Stirling per la produzione di elettricità alimentato da un boiler a biogas [92].
 - Installare sistemi per integrare un inceneritore con un impianto di generazione di energia elettrica [67] [93].
 - Installare un motore a syngas per la produzione di energia elettrica [94].
 - Sostituire una caldaia con un elemento a condensazione.
 - Installare un sistema di caldaie.
 - Installare un sistema di cogenerazione a metano.
 - Sostituire il generatore di vapore a GPL con uno a metano.
 - Sostituire le caldaie a gasolio con pompe di calore.
 - Installare un impianto fotovoltaico.
 - Installare un impianto solare termico.
 - Installare un impianto fotovoltaico per la produzione di idrogeno [79].
 - Installare un sistema automatico di stabilizzazione della tensione.
 - Installare un filtro passivo per il miglioramento della qualità dell'energia elettrica in ingresso.

- Utilizzare mezzi elettrici per la movimentazione carichi.
- Montare pneumatici di tipo "energy saving".
- Sostituire veicoli a gasolio con elementi a classe emissioni inferiori.
- Installare sistemi *Start&Stop* sui veicoli.
- Sostituire i compressori con nuovi compressori più efficienti.
- Sostituire i compressori con compressori dotati di inverter.
- Sostituire le pompe con un pompe dotate di inverter.
- Installare un inverter sulle pompe.
- Sostituire i ventilatori centrifughi con nuovi ventilatori più efficienti.

2.3 Impianti di produzione di principi attivi

I principi attivi (*Active Pharmaceutical Ingredients - APIs*) sono molecole organiche che vengono sintetizzate e modificate per poter essere utilizzate come base di partenza della produzione di farmaci. La grande varietà di materie prime e di prodotti finiti porta a uno studio del settore organizzato per fasi di processo, anziché sul processo stesso. Infatti, in base alla composizione e alle proprietà chimiche dei materiali si possono avere fasi di processo completamente diverse o disposte in ordine differente. Questo fa sì che, non sia possibile schematizzare in un'unica figura un solo processo lineare ed univoco (a differenza di quanto mostrato per le fonderie), ma si debba elencare una serie di attività che possono essere presenti nel processo di formazione di un generico API. L'ordine con cui queste fasi vengono di seguito presentate non è necessariamente coincidente con l'ordine in cui i materiali vengono processati [95].

In generale, tutte le informazioni sul processo e sugli interventi tecnologici di miglioramento dei consumi energetici relativamente al settore della produzione di principi attivi sono state collezionate dopo aver effettuato un'analisi sistematica della letteratura, il cui processo di ricerca è descritto in dettaglio in Figura 9, e dopo aver analizzato le diagnosi energetiche. Per quanto riguarda l'analisi della letteratura, è stato consultato il database Scopus, introducendo le parole chiave e i criteri di esclusione ed inclusione delle fonti riportati in Figura 9.

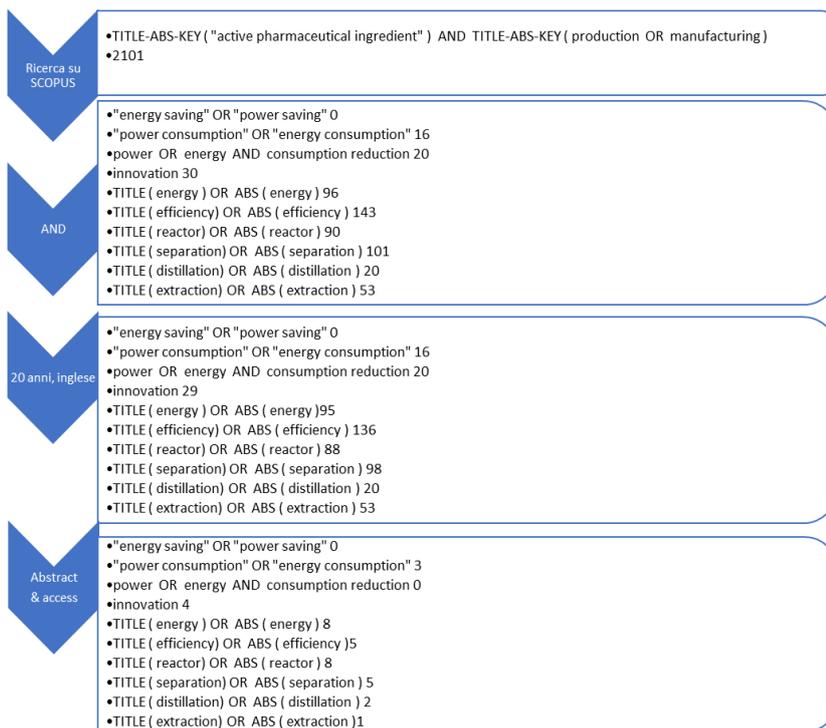


Figura 40. Schema ricerca bibliografica sistematica complessiva.

Il risultato di questa preliminare ricerca ha mostrato come la quasi totalità degli articoli relativi alle implicazioni energetiche nella produzione di principi attivi sia stata pubblicati negli ultimi 20 anni, fatta eccezione per alcuni *outliers*. È stato, quindi, scelto di analizzare la letteratura pubblicata in questo lasso temporale. A differenza del settore di produzione dei farmaci, qui non è stato necessario svolgere differenti tipologie di ricerca, ma si è rivelata sufficiente una ricerca unica.

Alla luce della ricerca di letteratura effettuata, sono stati identificati 12 documenti d’interesse che sono stati letti interamente e usati per determinare gli interventi tecnologici di miglioramento dei consumi energetici riportati nei sotto-paragrafi successivi. La Figura 41 riporta una rapida clusterizzazione delle fonti in base alla fase di processo di produzione di farmaci presa in analisi all’interno dei documenti reperiti.

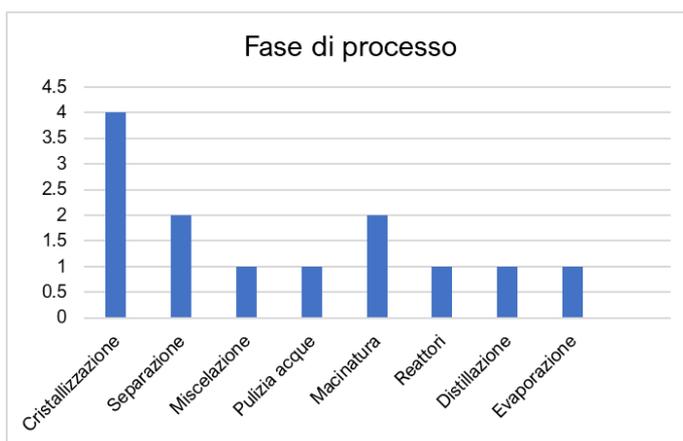


Figura 41 - Distribuzione degli articoli secondo la fase di processo – Produzione di principi attivi.

Dalla ricerca è emerso che una buona percentuale delle pubblicazioni individuate sono inerenti al processo di produzione di compresse. Le compresse risultano infatti la tipologia di farmaco più diffusa al mondo, in quanto la capacità di essere composte da quasi ogni tipologia di principio attivo, insieme alla facilità di trasporto e di assunzione, le rendono preferibili a qualsiasi altra tipologia. L’indubbia affermazione delle compresse sul mercato implica una gran quantità di pubblicazioni inerenti alla loro produzione. Oltre alla consultazione della letteratura, sono state analizzate in dettaglio anche le diagnosi energetiche. Nel caso del

settore della produzione di farmaci, sono state esaminate le diagnosi compilate da 71 diversi siti produttivi, sparsi in tutta l'Italia, con una maggiore densità nelle regioni del centro-nord (Figura 42).

Aziende produzione farmaci in Italia



Figura 42 - Distribuzione geografica delle aziende di produzione di principi attivi in Italia.

Poiché gli interventi tecnologici disponibili nel settore della produzione di principi attivi sono stati reperiti sia consultando la letteratura, che le diagnosi energetiche, di conseguenza, gli interventi di seguito elencati possono ricadere in uno dei seguenti casi:

1. Interventi tecnologici riportati sia in letteratura che nelle diagnosi energetiche. Questi interventi sono colorati in rosso per indicare che sono stati individuati nelle diagnosi e sono corredati da citazione bibliografica per ricordare l'articolo scientifico dal quale sono stati derivati.
2. Interventi tecnologici reperiti solo in letteratura. Tali interventi sono riportati in nero perché non provengono dalle diagnosi, ma sono accompagnati dalla citazione di letteratura dai quali sono stati reperiti.
3. Interventi tecnologici reperiti solo nelle diagnosi. Tali interventi sono colorati in rosso in quanto estratti dalle diagnosi energetiche, ma non riportano citazioni bibliografiche perché non sono stati reperiti in letteratura scientifica.

2.3.1 Trattamento nei reattori

Il macchinario tipicamente presente nelle industrie di produzione di API è lo *stirred tank reactor* (Figura 43), ovvero un reattore chimico a serbatoio agitato. Il suo scopo principale è far reagire chimicamente i materiali depositi al suo interno. In questo strumento, che è in grado di processare polveri, solidi umidi, paste, liquidi, emulsioni e gas, è possibile regolare alcune variabili come la temperatura, la pressione e la velocità di mescolamento.

Tipicamente, il contenitore in cui viene depositato il materiale è dotato di intercapedini al cui interno fluisce acqua o aria, che ha lo scopo di influenzare la temperatura della fase di processo [95]. Esistono varianti di reattori in cui sono presenti particolari tubazioni in grado di trasmettere all'interno del reattore della luce, così da consentire la fotocatalisi. O ancora possono essere presenti dei dispositivi per la sonicazione, atta ad ottenere la precipitazione dei solidi mediante onde acustiche [96]. In alcuni casi, come metodo di trasmissione dell'energia, si ricorre all'utilizzo delle microonde, che sono in grado di scaldare composti a distanza, senza necessità di alcun contatto diretto. La variazione di temperatura è spesso utilizzata per guidare le reazioni chimiche. Le microonde riescono a mettere in vibrazione alcune tipologie di molecole (ad esempio, l'acqua) che quindi, per frizione, cominciano a sviluppare calore. La temperatura aumenta più uniformemente nei composti ben miscelati. L'utilizzo di questa tecnologia nelle reazioni chimiche prende il nome di MAOS (*Microwave Assisted Organic Synthesis*) [95].

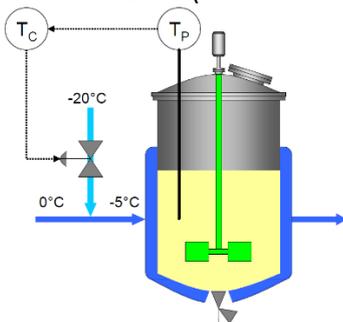


Figura 43 - Stirred tank reactor [95].

Sebbene i reattori possano essere di diversi tipi, il loro funzionamento è il medesimo per tutti. Le differenze risiedono nella metodologia di mescolamento e di riscaldamento/raffreddamento del contenuto. In particolare, si distinguono i reattori in due categorie: i reattori che processano i materiali in modo discontinuo e quelli che operano in continuo.

- **Reattori che processano il materiale in modo discontinuo, tra cui:**
 - *Constant flux stirred tank reactors.*
 - *Loop reactors* (reattori a circuito chiuso) [97].
 - *Bubble columns* [98].
 - *Fixed bed multi-tubes* [99].
 - *Inclined rotating fixed bed reactor* [100].
 - *Pipe reactor.*
 - *Tubular reactor.*
- **Reattori in grado di processare il materiale in continuo, tra cui:**
 - Reattori *static mixer.*
 - Reattori *spinning disk.*
 - Reattori *oscillatory flow.*

In genere, i reattori in continuo sono dotati di un sistema di pompe che li alimentano costantemente. Vi sono pompe in continuo e in semicontinuo (come le pompe a siringa che richiedono di essere riempite). Fondamentale, è la presenza di un regolatore in contropressione che mantiene il sistema pressurizzato (se ciò è richiesto dalla reazione che deve avvenire) [96].

Le materie prime possono essere aggiunte all'interno del reattore tramite trasferimenti di gas pressurizzato, trasferimenti sottovuoto, pompaggi o semplicemente possono essere versati per gravità [95]. Per migliorare l'efficienza energetica di tali macchinari si possono installare dei deflettori all'interno della camera (aumenta il rimescolamento) e installare sistemi a pale giranti multiple [99].

Si riepilogano gli interventi tecnologici atti a ridurre i consumi energetici relativi al trattamento nei reattori.

- **Interventi *energy-saving* riguardanti i reattori e il processamento chimico-fisico:**
 - Installare un reattore a serbatoio agitato [95]. Un reattore a letto statico è tipicamente caratterizzato da distribuzione non-uniforme di temperatura. Agitare il serbatoio favorisce le condizioni del processo all'interno del reattore grazie a caratteristiche fluidodinamiche (temperatura, pressione, ecc.) più uniformi, che possono migliorare la selettività di reazione, la sua durata e la sua efficienza. Una reazione efficiente è caratterizzata da una miglior resa e qualità, con conseguenti minori consumi energetici legati anche alla minor quantità di rifiuti e scarti.
 - Installare un reattore a serbatoio agitato con deflettori. I deflettori migliorano l'efficienza mescolamento migliorando le qualità e le tempistiche delle reazioni, dunque comportando risparmi energetici [99].
 - Installare un reattore a serbatoio agitato con pale multiple. Più pale migliorano l'efficienza mescolamento migliorando le qualità e le tempistiche delle reazioni, dunque comportando risparmi energetici (miglioramento efficienza mescolamento) [99].
 - Installare un reattore a serbatoio agitato a flusso termico continuo. Un flusso termico continuo assicura un maggior controllo sulla temperatura di reazione, dunque maggior efficacia di processo, tempistiche di reazione minori e un conseguente risparmio energetico [95].
 - Installare un reattore ad anello (*loop reactor*) [97] [95]. I reattori ad anello mostrano maggiori trasferimenti di calore e di massa e una migliore selettività di reazione, tempi di ciclo più brevi e rese di prodotto più elevate. Oltre ai risparmi energetici generati da tali aspetti, l'uso del catalizzatore è spesso inferiore. La sequenza di aggiunta del catalizzatore dipende dai

particolari reagenti. Al termine, la massa di reazione viene raffreddata e il catalizzatore viene rimosso per filtraggio.

- Installare un reattore a colonna [98] [95]. Il suo nome deriva dal fatto che la fase gassosa viene insufflata nella parte bassa della colonna e risale attraversando il liquido sotto forma di bolle. In corrispondenza della superficie di tali bolle si ha l'incontro della fase gassosa e della fase liquida, che si scambiano materia oppure reagiscono formando nuove sostanze. Questo tipo di reattore consente un buon controllo della reazione chimica tra gas e liquidi, che lo rende buono dal punto di vista energetico quando si effettuano queste reazioni.
- Installare un *pipe reactor* [95]. Questo tipo di reattore è caratterizzato da un design molto semplice e comporta vantaggi energetici perché è consente ha ampio campo operativo e non richiede complesse attività di manutenzione. Pertanto, comporta risparmi energetici in fase di manutenzione e consente reazioni efficienti e di buona qualità in diverse condizioni di lavoro.
- Installare un reattore tubolare [95]. È un reattore con flusso a pistone e idealmente può funzionare in continuo. La reazione chimica decorre all'interno del reattore mediante lo spostamento di un pistone in un tubo. La concentrazione di prodotti aumenta con la variabile spaziale. La condizione di flusso a pistone assicura che non ci siano effetti di retro-miscelazione, dunque buona qualità nei prodotti della reazione. Questa tipologia di reattore ha una filosofia del controllo della temperatura tale per cui ci sono una serie di elementi di scambio termico indipendenti, il cui numero viene regolato tramite l'avanzamento di un pistone [95]. Questo tipo di reattore può avere un design estremamente semplice e può essere usato in molte applicazioni (quali reazioni che implicano cambiamenti di temperatura di pressione o di densità del flusso) pur garantendo buona efficienza. Esso può, dunque, risultare energeticamente conveniente nel caso di aziende che effettuino molteplici reazioni chimiche con diverse caratteristiche.
- Installare un reattore a letto fisso con tubi multipli [99]. Più tubi rendono più efficiente il reattore, dunque comportando risparmi energetici.
- Installare un *inclined rotating fixed bed reactor* (IRFBR) [100]. Un miglioramento delle prestazioni fino al 20% rispetto alle prestazioni di un reattore stazionario verticale a letto a goccia è mostrato in letteratura mediante un caso studio sperimentale (variando le velocità di rotazione, l'angolo di inclinazione e la velocità del gas in ingresso). Migliori prestazioni si traducono in un più efficiente utilizzo degli analoghi consumi energetici.
- Installare un reattore supercritico a CO₂ [95]. La CO₂ supercritica sostituisce il solvente all'interno del reattore. In questa reazione, la reazione non è più controllata dal trasferimento di massa e l'idrogeno mostra una solubilità infinita. Le condizioni di reazione come la pressione, la temperatura, il tempo di residenza e la concentrazione di idrogeno possono essere manipolate indipendentemente, assicurando l'ottimizzazione dei consumi energetici. Al termine della reazione, la CO₂ viene fatta evaporare riducendo la pressione. Questo reattore assicura bassa produzione di composti organici volatili e altre sostanze inquinanti che, quindi, non devono essere rimosse e trattate, consumando energia. Inoltre, garantisce miglior selettività, meno spreco di fluidi e maggiori rendimenti.
- Installare un miscelatore statico (*static mixer reactor*) [95]. Questo tipo di reattore è caratterizzato da tempi di residenza ridotti, dunque aumentando la velocità di processo e comportando risparmi energetici.
- Installare un reattore a disco rotante [101] [95]. Questo dispositivo è composto da un cilindro esterno e da un disco interno rotante su cui ha luogo la reazione. Il prodotto del processo viene costantemente rimosso dalla parte bassa del cilindro [101]. Rispetto ad un sistema statico a supporto fisso, in un reattore a dischi sono in movimento sia i fluidi (della reazione)

sia i corpi di riempimento (dischi), determinando una maggior efficacia di reazione. Inoltre, la sedimentazione di materiali sui dischi consente una miglior separazione di diverse sostanze e una miglior eventuale rimozione di sostanze inquinanti.

- Installare un reattore a flusso oscillante [95]. I reattori in discontinuo, in generale, possono essere impiegati in aziende che vogliano realizzare un ampio intervallo di prodotti, che includono diversi reagenti e diverse condizioni di reazione. Consentono, infatti, di ottenere buone qualità dei prodotti e reazioni efficaci, pur usando le stesse apparecchiature.
- Installare un reattore con tubazioni trasparenti per il passaggio di luce che consenta la fotocatalisi [96]. Quest'ultima migliora lo svolgimento di particolari reazioni, rendendo più efficiente il processo.
- Installare un reattore con dispositivi per la sonicazione usata per la precipitazione dei solidi [96]. La sonicazione può migliorare lo svolgimento di particolari reazioni, rendendo più efficiente il processo.
- Installare un dispositivo per la *microwave assisted organic synthesis*. L'irradiazione a microonde riscalda efficacemente i materiali per effetto di un "riscaldamento dielettrico a microonde". Questo fenomeno dipende dalla capacità di un materiale specifico (solvente o reagente) di assorbire l'energia delle microonde e convertirla in calore. L'irradiazione produce un efficiente riscaldamento interno delle molecole, che guida le reazioni chimiche senza indurre delle nuove. Questa tecnologia permette di eseguire rapidamente e facilmente una vasta gamma di reazioni (ciclo-addizioni, attivazioni dei legami C-H, ecc.). La letteratura [95] sottolinea come a questa tecnologia siano associati alti tassi di reazione, alti rendimenti, e pochi sottoprodotti. Inoltre, questa tecnologia è in grado di controllare reazioni che coinvolgono solventi surriscaldati e ciò consente di utilizzare solventi da cui è facile isolare i prodotti (riducendo i consumi energetici in fase di isolamento). Infine, questa tecnologia non necessita di usare catalizzatori di metalli di transizione, per cui non comporta l'esecuzione di trattamenti successivi atti ad eliminare eventuali rifiuti tossici generati.

2.3.2 Asciugatura

La fase di asciugatura consiste nella rimozione del liquido presente in solidi umidi tramite un processo di evaporazione ottenuto grazie alla somministrazione di calore. In questa fase, il calore può essere trasmesso al materiale tramite convezione o conduzione e le tecniche esistenti sono molteplici, tra cui [102]:

- Asciugatura a letto fluido (*fluid bed drying*). In questa tecnica il calore viene trasmesso per convezione, ovvero tramite l'uso di un mezzo gassoso che entra in contatto con il materiale da essiccare. I granuli umidi sono inseriti all'interno del macchinario sopra ad un ripiano forato, una sorta di setaccio. L'aria calda viene fatta passare attraverso questa superficie e solleva e separa i vari granuli, mettendoli in moto. L'asciugatura deriva quindi dal contatto del materiale con l'aria calda che lo sostiene e lo rende fluidizzato. Esistono differenti tipologie di macchinari in grado di eseguire questo processo [102]:
 - Essiccatore a lotti (Figura 44): un macchinario semplice a camera singola, in cui il materiale viene inserito all'inizio e non esce niente fino alla fine della procedura. Il flusso d'aria parte dal basso e, dopo aver messo in moto e asciugato i granuli, sale fino ad uscire dalla parte superiore attraversando dei filtri a manica.

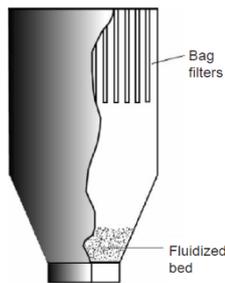


Figura 44. Fluidized bed dryer a lotti [102].

- Essiccatore semicontinuo (Figura 45): la camera di asciugatura è suddivisa in una serie di sotto-camere mobili, in cui il prodotto viene inserito a lotti. In ogni sotto-camera, il processo di asciugatura comincia con il carico del macchinario ed un primo passaggio di aria calda. Successivamente, ci saranno tante fasi di asciugatura quante sono le stazioni della giostra, fino ad arrivare alla stazione in cui si ha lo scarico del materiale asciutto.

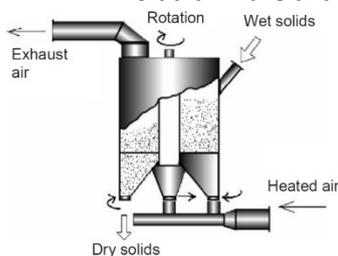


Figura 45 - Essiccatore semicontinuo [102].

- Essiccatore in continuo (Figura 46): il principio di funzionamento è il medesimo, l'elemento variante è la camera d'essiccazione in quanto, a seconda della sua geometria, si hanno differenti tempi di residenza del materiale da asciugare. Il metodo più diffuso consiste in una camera cilindrica, in cui il materiale in ingresso spinge fisicamente il materiale già dentro e lo fa uscire. Questo implica però dei tempi di processamento che variano da granulo a granulo, per cui si misura un'ampia distribuzione dell'umidità nei granuli in uscita.

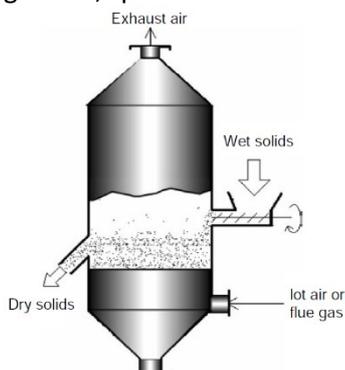


Figura 46 - Essiccatore in continuo a camera cilindrica [102].

- Essiccatore *plug flow* (Figura 47): per ridurre l'oscillazione dei tempi di processamento in base alle dimensioni dei grani viene usata una camera al cui interno sono presenti diaframmi, che rallentano il flusso di materiale da essiccare, così da aumentarne il tempo di residenza e migliorare l'essiccazione. Questi essiccatori vengono chiamati "*Plug flow*" [103].

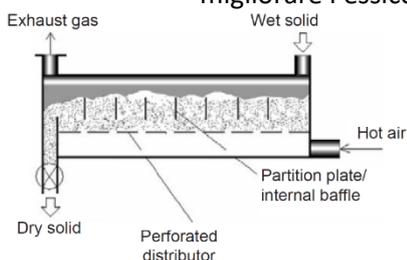


Figura 47 - Essiccatore *plug flow* [102].

- **Asciugatura sottovuoto (*vacuum drying*):** In questa tecnica, il materiale viene inserito in una camera capace di creare sottovuoto e trasmettere calore. In media la durata di questo processo è 1,5 volte la durata dell'asciugatura tramite *fluid bed*, ma l'espulsione dell'umidità, essendo più lenta e delicata e non modifica i granuli [102]. A seconda delle varianti, il calore in questo tipo di asciugatura può essere fornito tramite conduzione, tramite microonde o entrambi.
 - La trasmissione del calore per conduzione è ottenuta tramite la circolazione di gas o liquidi ad alta temperatura nelle intercapedini nelle pareti della camera d'asciugatura.
 - La trasmissione mediante microonde, invece, necessita di una specifica apparecchiatura. Le microonde sono radiazioni elettromagnetiche generate tramite dei magnetron sotto l'azione di forze elettriche e magnetiche. L'asciugatura tramite microonde è basata sull'assorbimento di radiazioni elettromagnetiche da parte dei materiali isolanti, che quindi, posti all'interno di un campo magnetico si polarizzano, accumulando così energia. Il livello di polarizzazione dipende dal materiale e dalla frequenza di variazione del campo magnetico applicato, che nel settore farmaceutico si aggira intorno ai 2450 MHz. Le microonde, più che una forma di calore, sono una forma di energia in grado di sviluppare calore attraverso l'interazione con differenti materiali [102].

Entrambi questi metodi (conduzione e microonde) possono essere presenti in soluzioni *single pot*, ovvero all'interno del macchinario che svolge anche la miscelazione e la granulazione.

 - In alcune varianti di asciugatura sottovuoto, dette *gas-assisted vacuum drying*, vengono aggiunte dal fondo del contenitore piccole quantità di gas secco che, filtrando attraverso l'impasto, facilitano e velocizzano il processo. In alternativa, questa fase viene svolta in dei miscelatori modificati in grado di mantenere il sottovuoto e di somministrare calore (Figura 48). Il processo consiste nell'inserimento della massa umida in questi macchinari e in dei cicli di asciugatura, la cui durata dipende dalle quantità e dai tipi di materiali immessi [104].

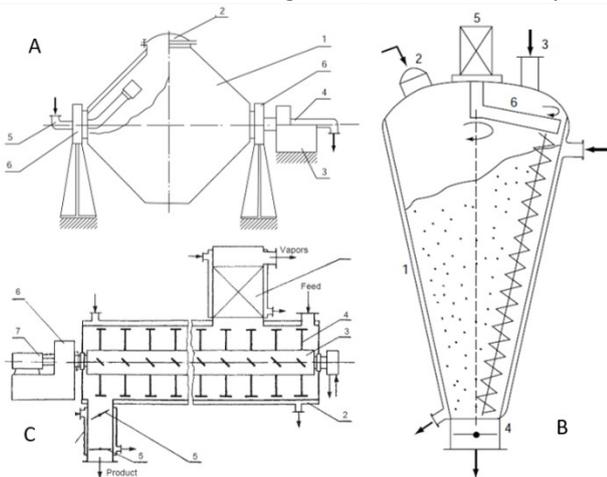


Figura 48 - Miscelatore a doppio cono modificato (A); miscelatore conico a vite modificato (B); miscelatore a pale modificato (C) [102].

- **Spray Drying:** questa tecnica consiste nella formazione delle polveri necessarie per il processo produttivo (ad esempio eccipienti e principi attivi), tramite l'evaporazione del solvente di una soluzione, sospensione o emulsione. Questo avviene atomizzando la materia prima tramite degli ugelli e facendola entrare a contatto con un flusso d'aria calda. Il processo, per come è strutturato, può lavorare in continuo. Esistono differenti sistemi di *spray drying* [105] (Figura 49):
 - I sistemi a ciclo aperto usano aria prelevata dall'ambiente esterno e, dopo averla utilizzata come mezzo di asciugatura, la reimmettono nell'ambiente. Ovviamente l'aria in uscita viene pulita tramite dei filtri a manica, separatori ciclonici e precipitatori elettrostatici.
 - I sistemi a ciclo chiuso sono utilizzati per trattare quelle materie prime altamente tossiche, sensibili all'ossigeno o il cui solvente è infiammabile. Sono basati sull'utilizzo in circolo dello

stesso fluido, in genere un gas inerte come l'azoto, che viene ripulito tramite filtri e tramite la condensazione del solvente evaporato.

- I sistemi a ciclo semichiuso prevedono un riciclo del gas utilizzato fino al 60%.

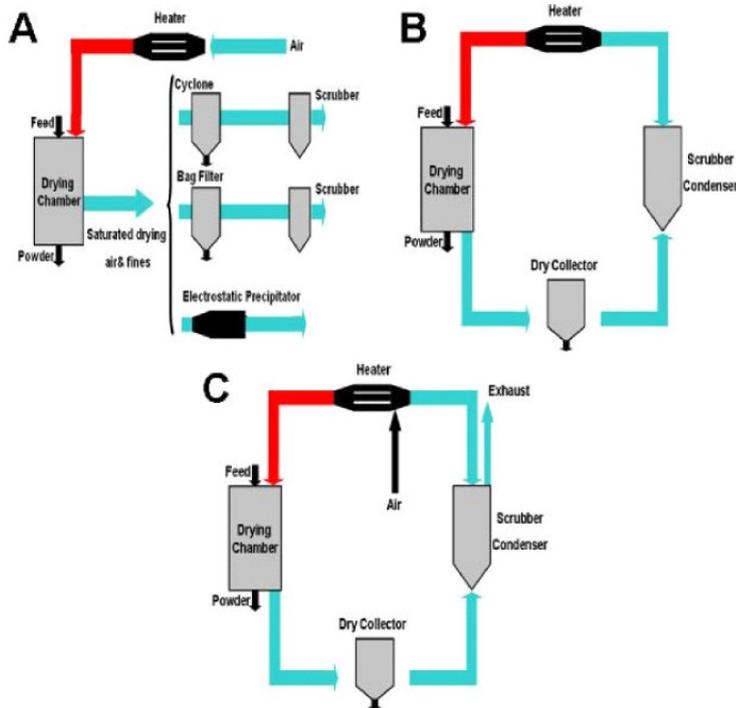


Figura 49 - Sistemi a ciclo aperto (A), chiuso (B), semichiuso (C) [105].

- Essiccatori a nastro: sono usati principalmente per l'essiccazione di materie prime come principi attivi ed eccipienti. Queste tecnologie sono formate da dei nastri di acciaio inossidabile di larghezza variabile tra i 0,5 ed i 2 metri, che si muovono a velocità massime di 0,5 m/min. Il materiale, una volta depositato su questi nastri, viene asciugato a temperature che variano a seconda delle sostanze e del solvente all'interno di camere a temperatura controllata. Questo è un processo di produzione continua [103].
- Essiccatori a ciclone (Figura 50): si basano sulla creazione di un flusso d'aria a vortice. Un getto di gas caldo viene immesso dal lato di una camera cilindrica, formando così un ciclone. Le forze centrifughe che si sviluppano sono in grado di mantenere le particelle più grosse e bagnate sulle pareti della camera d'essiccazione, mentre quelle asciutte e leggere sono trascinate dal flusso di gas e recuperate successivamente tramite filtraggi o separatori a ciclone. Questo fa sì che il tempo di residenza interno all'essiccatore sia dipendente dall'umidità della particella [103].

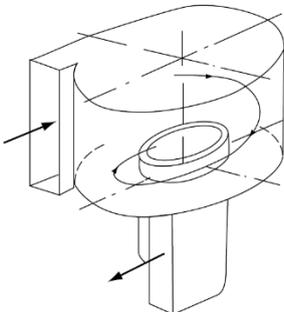


Figura 50 - Camera d'essiccazione di un essiccatore a ciclone [103].

- Essiccatori *spin-flash* (Figura 51): uniscono alla fase di asciugatura una breve fase di macinatura. La base della camera cilindrica è dotata di una rotante ad alta velocità, che disintegra il flusso di materia umida in ingresso. La materia umida frammentata, poi, entra in un flusso a vortice di gas riscaldato. Le particelle all'interno di questo flusso saranno quindi velocemente asciugate e successivamente recuperate. [103]

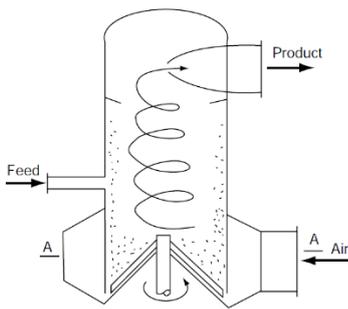


Figura 51 - Essiccatore flash-spin [103].

- Essiccatori a letto vibrante: utilizzato soprattutto per masse umide molto appiccicose e con lunghi tempi di essiccazione. Questo processo in continuo si basa sul far transitare il materiale su un letto vibrante, ottenendo così la separazione di particelle che si fossero unite tra loro ed una conseguente più uniforme essiccazione. Le vibrazioni sono fino ai 60Hz con una ampiezza di diversi millimetri: garantiscono il trasporto del materiale su un piano inclinato e una miscelazione aggiuntiva. Il processo di essiccazione può essere ottenuto tramite uno scambio di calore diretto, ovvero con l'aria riscaldata all'interno della camera, o indiretto, ovvero riscaldando le superfici della camera o tramite radiazioni infrarosse [103].
- Metodo delle cadute di pressione: il materiale viene istantaneamente messo sottovuoto, per poi essere messo in pressione e, ancora, nuovamente sottovuoto. Infine, il materiale viene riportato a pressione ambiente. Questi sbalzi di pressione portano all'evaporazione dei liquidi e all'ottenimento di un materiale ad alta porosità. È un metodo molto più veloce degli altri incontrati e, non richiedendo alte temperature, consuma anche meno energia. Risulta quindi adatto per quei materiali sensibili al calore [106].

Si riepilogano gli interventi tecnologici per ridurre i consumi energetici relativi al trattamento nei reattori.

- **Interventi *energy-saving* riguardanti l'asciugatura:**
 - Installare un essiccatore a lotti per l'asciugatura a letto fluido. Il contatto diretto tra materiale e aria calda (che caratterizza i processi di asciugatura a letto fluido) rende le reazioni in tali essiccatori rapide e, dunque, può apportare risparmi energetici [103].
 - Installare un essiccatore semicontinuo per l'asciugatura a letto fluido. Il contatto diretto tra materiale e aria calda (che caratterizza i processi di asciugatura a letto fluido) rende le reazioni in tali essiccatori rapide e, dunque, può apportare risparmi energetici [103]. Rispetto all'essiccatore a lotti, consente di controllare il numero di fasi di asciugatura in modo da rendere più efficace il processo e assicurare che il materiale scaricato dal macchinario sia completamente asciutto.
 - Installare un essiccatore in continuo per l'asciugatura a letto fluido. Il contatto diretto tra materiale e aria calda (che caratterizza i processi di asciugatura a letto fluido) rende le reazioni in tali essiccatori rapide e, dunque, può apportare risparmi energetici [103].
 - Installare un essiccatore *Plug flow*. Migliora la qualità dei prodotti aumentando il tempo di residenza di essi nell'essiccatore. È un intervento efficace nel caso in cui i gradi dei materiali da lavorare superino certe dimensioni che richiedono tempistiche più lunghe per il completamento dell'asciugatura. La miglior qualità del processo riduce i consumi energetici non necessitando di successive fasi di asciugatura (che sarebbero richieste nel caso di essiccazione non ben completata) [103].
 - Installare un dispositivo di *granulazione "single pot"* per l'asciugatura sottovuoto. Unire all'interno di un unico macchinario le fasi di asciugatura, miscelazione e granulazione può consentire un risparmio energetico [107].
 - Installazione di un miscelatore sottovuoto con pareti riscaldabili. Il processo di asciugatura a sottovuoto è indubbiamente più lungo rispetto agli altri metodi, però ha il vantaggio di necessitare temperature minori per ottenere gli stessi risultati, richiedendo dunque minori

energie per l'innalzamento della temperatura stessa. Per materiali sensibili alle alte temperature questo è l'unico metodo di asciugatura praticabile [103].

- Installare un miscelatore sottovuoto con dispositivo microonde. Il processo di asciugatura a sottovuoto è indubbiamente più lungo rispetto agli altri metodi, però ha il vantaggio di necessitare temperature minori per ottenere gli stessi risultati, richiedendo dunque minori energie per l'innalzamento della temperatura stessa. Per materiali sensibili alle alte temperature questo è l'unico metodo di asciugatura praticabile. I vantaggi dell'utilizzo delle microonde per l'asciugatura sono vari: l'efficienza, in quanto si ha trasmissione diretta del calore, la controllabilità del processo, minori consumi energetici in fasi di trattamento di emissioni perché non vengono sviluppate polveri e minori consumi energetici in fase di pulizia del macchinario (che risulta facile da pulire) [108] [102].
- Installare un miscelatore sottovuoto con fonte di calore mista. Il processo di asciugatura a sottovuoto è indubbiamente più lungo rispetto agli altri metodi, ma ha il vantaggio di necessitare temperature minori per ottenere gli stessi risultati, richiedendo dunque minori energie per l'innalzamento della temperatura stessa. Per materiali sensibili alle alte temperature questo è l'unico metodo di asciugatura praticabile [103]. La possibilità di usare sia pareti riscaldabili che microonde può rendere il processo particolarmente rapido ed efficace, consentendo di sfruttare i vantaggi di entrambe le tipologie di fonti di calore.
- Installare un sistema di asciugatura sottovuoto *gas-assisted* [103]. L'aggiunta di gas secco facilita e velocizza il processo di asciugatura, comportando risparmi energetici.
- Installare uno *spray drier* a ciclo aperto [105]. Questo dispositivo, utilizzando aria prelevata dall'ambiente anziché altri gas inerti, risulta caratterizzato da costi contenuti, design relativamente semplice e consumi energetici ridotti.
- Installare uno *spray drier* a ciclo chiuso [105]. Questi sistemi consentono risparmio energetico perché non prevedono lo scarico in ambiente di sostanze inquinanti, pericolose o tossiche, che altrimenti andrebbero sottoposte ad altri trattamenti di pulizia o smaltimento (con i rispettivi consumi energetici).
- Installare uno *spray drier* a ciclo semichiuso [105]. Questi sistemi consentono risparmio energetico grazie alla possibilità di recuperare almeno una certa percentuale di gas inerte del processo. Essi, dunque, riducono la quantità di sostanze inquinanti, pericolose o tossiche scaricate in ambiente, dunque riducendo i consumi energetici nelle successive fasi di loro trattamento o smaltimento.
- Installare un essiccatore a nastro [103]. Essendo sistemi che lavorano in continuo, a parità di energia utilizzata, consentono di asciugare molte quantità di materiali, risultando efficienti. La possibilità di controllare le temperature fa sì che si possa ottimizzare l'efficienza di asciugatura, dunque i consumi energetici.
- Installare un essiccatore a ciclone [103]. Come sopra spiegato, in questi dispositivi il tempo di residenza interno dei prodotti all'interno dell'essiccatore viene controllato dalle forze centrifughe in modo che anche le particelle caratterizzate da grandezze maggiori vengano correttamente asciugate. Così facendo si ottimizzano i consumi energetici utilizzando tempi di residenza alti solo per le particelle che li richiedono.
- Installare un essiccatore *spin-flash* [103]. La macinatura assicura un'uniformità di dimensione delle particelle da asciugare e consente di ridurre i tempi di residenza di esse nell'essiccatore, rendendo il processo veloce e riducendo i consumi energetici [10].
- Installare un essiccatore a letto vibrante [103]. Consente risparmi energetici più marcati nel caso in cui si vogliano asciugare sostanze umide molto appiccicose e con lunghi tempi di

essiccazione. Infatti, come anticipato, la vibrazione separa le particelle e determina una più uniforme ed efficiente essiccazione.

- Installare un essiccatore a cadute di pressione [106]. Questi sbalzi di pressione portano all'evaporazione dei liquidi e all'ottenimento di un materiale ad alta porosità. È un metodo molto più veloce degli altri incontrati e, non richiedendo alte temperature, consuma anche meno energia. Risulta quindi adatto per quei materiali sensibili al calore [106].
- Sostituire l'essiccatore alimentato ad energia elettrica con un elemento alimentato ad adsorbimento. Questo intervento consente recuperi energetici associati alla possibilità di utilizzare calore proveniente da altri recuperi termici nell'impianto, ad esempio dalla sala compressori.
- Installare un deumidificatore per l'aria in ingresso all'essiccatore. Una pre-asciugatura, infatti, migliora e rende più efficiente la successiva fase di asciugatura.

2.3.3 Separazione

Questa fase di processo, eseguibile secondo differenti approcci, ha come obiettivo la separazione dei vari componenti di una miscela. La separazione può avvenire con le tecniche seguenti:

- **Distillazione:** processo fondamentale per separare componenti volatili da componenti meno volatili. Questo risultato viene ottenuto scaldando il flusso di materiale in ingresso e facendone evaporare una parte. Il flusso d'aria in uscita da questo processo viene poi fatto condensare dentro a degli scambiatori di calore al fine di recuperare la parte evaporata [95]. In sistemi a colonna multipla è possibile mettere uno scambiatore di calore intermedio, che porta ad una riduzione del vapore utilizzato di circa il 50%, in quanto non ne viene generato di nuovo, ma viene utilizzato quello della colonna precedente [95]. Un'ulteriore possibilità è offerta dal *thin film evaporator*, ovvero un macchinario adatto sia alla distillazione che all'evaporazione. È composto da due componenti principali: un sistema di superfici rotanti e il cilindro riscaldato. Quando il fluido da processare entra dentro la camera, si distribuisce sulla superficie interna del cilindro. Le superfici rotanti spalmano il liquido creando un sottile film, che poi evapora rapidamente [109].
- **Separazione solido-liquido:** In molti processi può essere richiesta la separazione tra le due fasi, liquida e solida, di un determinato semilavorato. Questo risultato può essere ottenuto tramite, varie semplici tecniche largamente diffuse: decantatori, centrifughe, setacci, filtri a sabbia, setacci a tamburo rotante, filtropresse, filtro *nutsche* agitato, sistemi a membrane [95], o sedimentazione [99].
- **Evaporazione:** Le soluzioni formate da un soluto solido ed un solvente liquido possono subire un semplice processo di separazione chiamato evaporazione, ottenuto vaporizzando la parte liquida e quindi concentrando la parte solida. Può quindi sia essere visto sia come un metodo di aumento della concentrazione (o di estrazione) del soluto sia come un metodo di recupero del solvente [99]. Può essere utilizzato un sistema di evaporatori disposti in serie (evaporazione a cascata) che porta alla riduzione di vapore consumato (come mezzo di trasmissione del calore): i vapori del solvente che si generano nei primi evaporatori possono essere usati per scaldare i dispositivi a valle. Il secondo vantaggio è la riduzione della quantità di acqua di raffreddamento utilizzata nei condensatori, in quanto i vapori generati nei dispositivi a monte vengono condensati durante lo scambio termico a valle [99]. Un altro sistema è il *vapour recompression evaporation*, che si basa su una tecnica simile alle pompe di calore. Infatti, il calore trasmesso alla soluzione viene assorbito facendo evaporare il solvente che, a quel punto è ad alta temperatura. Questo gas viene quindi raccolto, separato da ogni rimasuglio di soluto e incanalato verso una pompa che ne aumenterà notevolmente la pressione. Il gas così ottenuto viene reimpresso in circolo e usato come mezzo di trasmissione del calore. L'efficienza che si ottiene in questo sistema è molto alta, pari all'utilizzo di 3/5 evaporatori a cascata. [99]
- **Separazione liquido-liquido:** L'estrazione di un liquido o di un solvente è un processo di separazione utilizzato quando la distillazione o la cristallizzazione non possono essere usate (materiali sensibili al

calore o poco volatili) o sono troppo costose. Si possono individuare varie tipologie di macchinari: *countercurrent columns*, *centrifugal extractors*, *mixer settlers*, *stirred tank* (usati raramente) [95]. In [110], viene proposto l'utilizzo di una membrana semipermeabile idrofobica, che permette la separazione tra miscela acquosa e miscela organica.

- Estrazione: le materie prime dei processi di produzione di principi attivi derivano principalmente da prodotti naturali. L'estrazione dei composti necessari può essere portata avanti in differenti maniere:
 - utilizzo di un solvente specifico
 - estrazione con CO₂ liquido. Il CO₂ supercritico (oltre ai 73,8 bar / 31° C) può sostituire il solvente in un processo di estrazione (che può avvenire in un reattore). Questa tecnica porta a prodotti di alta qualità e purezza senza le classiche difficoltà di rimozione del solvente che tipicamente si riscontrano: recuperare la CO₂ è un processo che richiede semplicemente variazioni di pressione. [95]
 - *Countercurrent band extraction*. Questo metodo permette di massimizzare il tasso di estrazione del composto desiderato dalla materia prima [95]

Poiché il processo di separazione implica separare elementi diversi all'interno di una miscela, in modo da poter, successivamente, trattare ciascuno di essi nel modo più appropriato, l'esecuzione di trattamenti di separazione può essere immaginata di per se stessa come un intervento *energy-saving*. Dunque, di seguito, si riepilogano gli interventi tecnologici reperiti per ridurre i consumi energetici relativi alla fase di separazione, ricordando le diverse tecnologie che possono essere adottate.

- **Interventi *energy-saving* riguardanti la distillazione:**
 - Installazione di un distillatore [95].
 - Installazione di un distillatore a colonna multipla [95].
 - Installazione di un distillatore in continuo [111].
 - Installazione di un distillatore a film [109].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti la separazione solido-liquido:**
 - Installazione di un decantatore [95].
 - Installazione di una centrifuga [95].
 - Installazione di un setaccio [95].
 - Installazione di un filtro a sabbia [95].
 - Installazione di un setaccio a tamburo rotante [95].
 - Installazione di una filtropressa [95].
 - Installazione di un filtro *nutsche* agitato [95].
 - Installazione di un dispositivo per la sedimentazione [99].
 - Installazione di un sistema di filtrazione in continuo [111].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti l'evaporazione:**
 - Installazione di un sistema di evaporatori a cascata [99].
 - Installazione di un sistema evaporativo *vapour recompression* [99].
 - Installazione di un evaporatore a film [109].
 - **Sostituzione di un evaporatore ad aria con uno ad acqua (più opportunità di recupero)**
- **Interventi *energy-saving* riguardanti la separazione liquido-liquido:**
 - Installazione di un estrattore a colonne controcorrente [95].

- Installazione di un *centrifugal extractor* [95].
- Installazione di un *mixer settler* [95].
- Installazione di un reattore *stirred tank* [95].
- Installazione di una membrana semipermeabile idrofobica [110].
- **Interventi *energy-saving* riguardanti l'estrazione:**
 - Installazione di un estrattore a solvente specifico [95].
 - Installazione di un estrattore a CO₂ supercritica [95].
 - Installazione di un dispositivo per la *countercurrent band extraction* [95].

2.3.4 Purificazione

Dopo l'ottenimento del principio attivo è, generalmente, prevista una fase di purificazione di esso. La purificazione può avvenire secondo vari metodi, tra cui la cromatografia e l'utilizzo di membrane.

- La cromatografia è una tecnica di separazione basata sulla distribuzione su due fasi (una stazionaria ed una mobile) dei componenti di una soluzione e sulla loro differente velocità di migrazione. Esistono diverse tipologie di dispositivi per la cromatografia:
 - Cromatografia rotante: il flusso in ingresso entra dall'alto in un dispositivo formato da due cilindri concentrici. Il cilindro esterno viene messo in rotazione, per cui il materiale che si trova tra i due cilindri viene messo in movimento e, a seconda delle caratteristiche del fluido, viene separato grazie alle forze centrifughe che si sviluppano.
 - Cromatografia con movimento simulato: il materiale viene inserito in diverse colonne, in cui il materiale stesso si deposita su vari livelli. Periodicamente, poi, queste colonne fanno fluire una fase mobile in controcorrente. La complessità del sistema rende questo metodo poco diffuso nella variante a più colonne, mentre viene utilizzata la variante ad una colonna singola [112].
- Per quanto riguarda le membrane, ne esistono differenti tipologie a seconda della composizione: ci sono quelle formate da polimeri organici, quelle composite (differenti strati sovrapposti, tra cui quelli che danno la selettività e quelli necessari per il sostegno), e quelle inorganiche (in cui vengono utilizzati anche materiali come vetri, metalli, ceramiche o grafite) [112].

Poiché il processo di purificazione migliora la qualità dei prodotti finiti, rendendo superflui successivi trattamenti e contenendo il numero di scarti, l'esecuzione di trattamenti di purificazione può essere immaginata di per se stessa come un intervento *energy-saving*. Dunque, di seguito, si riepilogano gli interventi tecnologici reperiti per ridurre i consumi energetici relativi alla fase di purificazione, ricordando le diverse tecnologie che possono essere adottate.

- **Interventi *energy-saving* riguardanti la purificazione:**
 - Installazione di un cromatografo rotante [112].
 - Installazione di un cromatografo a movimento simulato [112].
 - Installazione di membrane organiche [112].
 - Installazione di membrane composite [112].
 - Installazione di membrane inorganiche [112].

2.3.5 Macinazione

La fase di **macinazione** permette di ottenere particelle il cui contenuto di principio attivo sia uniforme tramite differenti tecniche di macinatura che vengono attuate sia per standardizzare i principi attivi e gli eccipienti

(che devono essere delle stesse dimensioni per evitare sproporzioni), sia i granuli con la formulazione già formata. Avere infatti materie prime delle giuste dimensioni non assicura un corretto comportamento dei granuli che, per assicurare i dosaggi necessari, devono essere nuovamente macinati e portati a dimensione. Quindi si ha che la macinatura può essere fatta sia su materiali asciutti (materie prime) che su materiali bagnati, portando così alla distinzione in *wet milling* e *dry milling*. Ridurre le dimensioni degli elementi che andranno poi a comporre le compresse permette inoltre di ottenere un incremento del rateo di dissoluzione [113].

- **Wet milling.** La massa umida viene tenuta all'interno di un recipiente dotato di un sistema di miscelazione, in modo tale da mantenere uniforme la distribuzione del liquido tra i vari componenti. Da questo miscelatore il materiale viene poi portato al macchinario di macinatura, viene processato e poi viene reinserto nel contenitore. Nella *wet milling* si ha l'assenza di polvere, per cui si riduce notevolmente il rischio per gli operatori e, inoltre, la presenza del liquido protegge il prodotto da una parte del calore che si genera durante il processamento. Esistono diverse tipologie di *wet milling* [113]:

- **Toothed Rotor-Stator Mill** (Figura 52). Consiste in un albero rotante (rotore) fissato dentro ad uno statore concentrico; tra i due rimane un piccolo spazio. Su entrambi questi elementi sono presenti numerose file di denti: il disegno dei denti e le dimensioni delle fessure sono variabili influenzando le dimensioni delle particelle in uscita ed i tempi di residenza. La differente velocità tra rotore e statore produce notevoli forze di taglio, generando un flusso turbolento all'interno della fessura che separa i due elementi. La riduzione delle dimensioni delle particelle è ottenuta sia dalle forze di taglio che dalle collisioni con i denti.

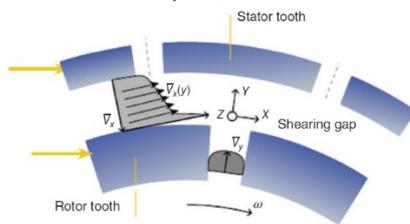


Figura 52 - Schema della sezione di una *toothed rotor-stator mill* [113].

- **High Pressure Homogenizer.** Questa tipologia di *wet milling* è un processo ad alto consumo di energia in cui il materiale viene fatto passare attraverso una fessura od un orifizio ad alte velocità (500 m/s) e pressioni (1000 – 1500 bar). Quando la poltiglia subisce il brusco abbassamento di pressione, al di sotto della sua pressione di vapore, si ha la formazione di bolle di gas che, quando collassano, portano alla generazione di forze di cavitazione. Queste, insieme agli alti stress di taglio, l'accelerazione, gli impatti e il flusso turbolento portano alla frammentazione delle particelle.
- **Media Mill.** Chiamata anche *pearl* o *bead mill*, questa tecnica sfrutta la presenza di un materiale ausiliario nella camera di macinatura come mezzo per trasmettere energia e frammentare le particelle della massa umida. Il macchinario è composto da una camera e un albero di macinatura che vi ruota dentro. Spesso la geometria dell'albero è arricchita con pale radiali o dischi al fine di aumentare la movimentazione del materiale con cui entra in contatto. L'interno della camera è riempito con delle sfere dal diametro inferiore ai 2 mm che vengono trattenute all'interno grazie a dei setacci presenti all'uscita della camera. La riduzione delle dimensioni si ha anche per gli urti tra le varie particelle o tra le particelle e le pareti della camera. Questo metodo porta alla generazione di attriti maggiori rispetto agli altri, quindi può comportare la necessità di raffreddare le pareti della camera.
- **Dry Milling.** Nella macinatura di materiale asciutto le tramogge che si occupano di rifornire in modo continuo i macchinari sono caratterizzate da meccanismi di ritenzione delle polveri, al fine di ridurre al minimo la perdita di materiale e i rischi per gli operatori. Possono essere utilizzate strumentazioni con intercapedini raffreddabili per i materiali sensibili alle temperature che si raggiungono durante la macinatura a causa degli attriti. Esistono diverse tipologie di *dry milling*.

- **Hammer Mill.** In questo tipo di macchinario il materiale è fatto passare attraverso una serie di martelli collegati a un albero rotante all'interno di una camera cilindrica. La rottura delle particelle è data dagli urti che si generano con i martelli e con le pareti della camera. Un setaccio permette l'uscita delle sole particelle con una dimensione massima scelta. Per materiali molto abrasivi non è consigliabile utilizzare questo metodo, in quanto si avrebbe un danneggiamento dei martelli rotanti ed una contaminazione del prodotto in uscita.
- **Pin Mill.** Questa tipologia di macchinari prevede l'utilizzo di due dischi, uno rotante (rotore, con una velocità periferica fino a 150 m/s) ed uno fissato in posizione (statore). Questi due dischi sono caratterizzati da un vario numero di denti disposti in modo tale da non scontrarsi durante la rotazione. Il materiale in ingresso viene inserito al centro di questi dischi e, a causa della forte rotazione, viene frammentato e spinto verso l'esterno dalle forze centrifughe che si sviluppano, per poi essere successivamente raccolto [114].
- **Spiral Jet Mill.** Metodo che prevede l'uso di un macchinario con una camera di macinatura a cilindro verticale di altezza ridotta, caratterizzata da una serie di ugelli lungo la circonferenza che accelerano il flusso di polvere interna creando un vortice. Il vortice spinge le particelle più grosse verso le pareti della camera dove, a causa degli urti, si frantumano. Le particelle più piccole e leggere poi vengono trascinate via dal gas in uscita e raccolte con separatori a ciclone (per le particelle più grandi) e filtri (per le polveri) [114].
- **Loop Jet Mill.** Una camera di macinazione ad anello ovale, disposta verticalmente, permette una classificazione basata sull'inerzia delle particelle: quelle più grandi e pesanti tenderanno a rimanere sul fondo nella zona di macinatura, quelle più leggere tenderanno a risalire per arrivare all'uscita, trascinate dal flusso di gas. Questo avviene nei macchinari loop jet in cui alla base dell'anello un flusso d'aria mette in moto le particelle che, a causa degli urti, cominciano a fratturarsi. Nella parte alta dell'anello invece vengono estratte le particelle sufficientemente frammentate [114].
- **Fluidised Bed Air Jet Mill.** La camera di questa tipologia di macchinari è un cilindro con una base a cono ribaltato alla cui estremità inferiore sono presenti differenti ugelli che emettono un forte getto di gas. Il materiale viene inserito all'interno della camera ed il flusso d'aria proveniente dal basso lo fluidifica. La riduzione delle dimensioni delle particelle avviene a causa degli urti che avvengono tra le differenti particelle e con le pareti. Le particelle sono trasportate in alto dove un filtro rotante permette a solo quelle di dimensioni adeguate di uscire dalla camera [114].

Si riepilogano gli interventi tecnologici atti a ridurre i consumi energetici nella macinazione di compresse.

- **Interventi *energy-saving* riguardanti la macinazione:**

- Installare un mulino a martelli [113]. La presenza di martelli rotanti facilita la rottura delle particelle tramite fenomeni di urto utilizzando anche il contributo dell'energia cinetica generata per efficientare il processo.
- Installare una *pin mill* [114].
- Installare una *spiral jet mill* [114]. La presenza di ugelli che accelerano il flusso di polveri facilita la rottura delle particelle tramite fenomeni di urto utilizzando anche il contributo dell'energia cinetica generata per efficientare il processo.
- Installare una *loop jet mill* [114]. L'azione congiunta di macinazione delle particelle di più grandi dimensioni e urto delle particelle di più piccole dimensioni spostate da flussi di gas permette di lavorare composti a dimensioni diverse in un unico processo.
- Installare una *air jet mill* a letto fluido [114]. La presenza di ugelli che accelerano il flusso di polveri facilita la rottura delle particelle tramite fenomeni di urto utilizzando anche il contributo dell'energia cinetica generata per efficientare il processo.
- Installare un macinatore con statore e rotori dentati [113]

- Installare una *media mill* [113]. La presenza di materiali ausiliari efficientia il processo di macinazione tramite la propagazione dell'energia da parte dell'elemento motore.
- Installare una *media mill* con geometria interna migliorata [113]. La presenza di materiali ausiliari con geometria specifica efficientia il processo di macinazione tramite la propagazione dell'energia da parte dell'elemento motore.

2.3.6 Miscelazione

La **miscelazione** è un processo fondamentale nel settore della produzione dei principi attivi, in quanto la distribuzione delle polveri ha diretta conseguenza sulla qualità del prodotto finito, ovvero del farmaco. La miscelazione è un processo che permette di distribuire uniformemente i principi attivi del farmaco. Il fenomeno che si cerca di evitare è la segregazione, ovvero una separazione dei componenti all'interno della miscela, una sorta di de-miscelamento, le cui cause possono essere varie. Quando si hanno particelle di dimensioni differenti, quelle più piccole tendono a spostarsi verso la superficie della miscela, questo fenomeno è chiamato *sifting* (setacciamento). Per alcuni macchinari, come i *fluidized bed dryers*, la causa del *sifting* può essere la fluidizzazione in cui, a causa del gas che mette in moto la polvere, si ha la segregazione delle particelle più piccole sulla superficie della miscela. Un'ulteriore causa è da individuare nei macchinari con superfici inclinate su cui le particelle più grandi tendono a scivolare più velocemente verso il basso rispetto alle altre. In ogni passaggio successivo alla miscelazione, a causa delle vibrazioni, si ha un certo grado di segregazione. Per evitare questo fenomeno si ricorre alla granulazione, ovvero alla formazione di granuli con già la corretta miscelazione che non potranno più incorrere nella segregazione. La miscelazione avviene grazie all'azione congiunta di tre differenti meccanismi: *convection*, ovvero lo spostamento della polvere; *shear*, lo spostamento relativo alle porzioni adiacenti di polvere; *diffusion*, il rimescolamento delle singole particelle. Questo è ottenuto tramite dei macchinari chiamati miscelatori. [115] Esistono diverse tipologie di miscelatori:

- **Tumble blenders.** Questa categoria di miscelatori è basata sulla rotazione di un contenitore al cui interno è presente della polvere. Si distinguono differenti tipologie di *tumble blenders* a seconda delle geometrie e della modalità di movimento del contenitore. Sono caratterizzati da un numero minimo di componenti interne, per cui la pulizia risulta facile. D'altra parte, la mancanza di elementi miscelatori interni porta al difficile processamento di polveri che tendono a sviluppare forze di coesione tra loro o con le superfici. La miscelazione ottenuta tramite questa famiglia di miscelatori è data dallo scivolamento delle particelle sulla superficie della miscela durante la rotazione del contenitore. Questo implica che il centro di tutta la miscela tende ad essere meno mescolato rispetto alle estremità. Per ottenere una miscelazione più uniforme è quindi necessario riempire i macchinari a metà: carichi maggiori portano a tempi di processamento più lunghi e risultati peggiori; carichi minori compromettono la produttività del processo. Un ulteriore problema di questi macchinari è la possibile formazione di cariche elettrostatiche sulle particelle: i materiali farmaceutici sono in larga parte isolanti, per cui le cariche formatesi non si dissipano facilmente. Quello che si ottiene è una segregazione causata dalle forze elettrostatiche che si formano tra le varie particelle. Elenchiamo di seguito i macchinari più diffusi di questa famiglia [115].
 - **Twin-Shell Blender** (Figura 53). Due cilindri uniti a V formano la camera di miscelazione. La rotazione avviene in modo tale da ottenere, ad ogni giro, la divisione e la successiva combinazione della polvere contenuta. Un albero interno può essere corredato di piccole pale o geometrie varie per aumentare il livello di miscelazione. Questo macchinario si presta bene anche per altre operazioni, come ad esempio l'asciugatura, grazie alla sua possibilità di esser messo sottovuoto e di poter essere riscaldato.

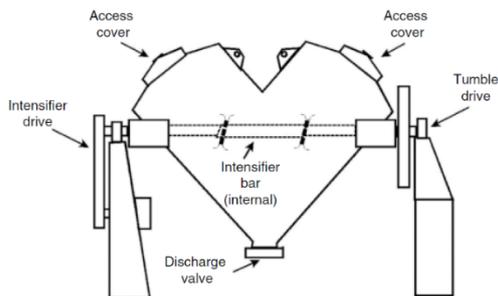


Figura 53 - Miscelatore twin-shell [115].

- **Double-Cone Blender** (Figura 54). La camera di miscelazione è formata da due tronchi di cono uniti lungo la base maggiore tramite una sezione cilindrica. La miscelazione che si ottiene non è uniforme come quella che tramite un twin-shell: la presenza di particelle di dimensioni differenti possono portare a segregazione.

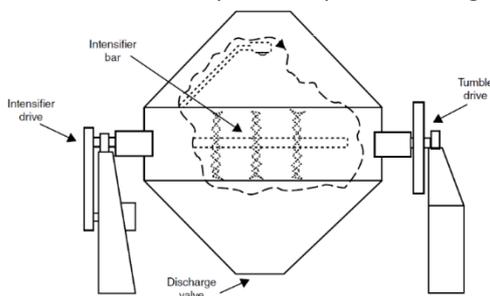


Figura 54 - Miscelatore double-cone [115].

- **Horizontal Rotary Blender**. Rappresentano la più semplice versione tra i *tumble blenders*, i miscelatori *horizontal rotary* hanno una camera cilindrica al cui interno sono presenti dei deflettori per velocizzare il processo. L'inclinazione di questi diaframmi interni permette la creazione di un flusso che muove orizzontalmente la miscela così da facilitare la fase di scarico del materiale.
- **Tote Blender** (Figura 55). In questa tipologia di macchinari è presente un contenitore a scatola cubica che viene raccolto da un sistema automatizzato e messo in rotazione. Come gli altri miscelatori di questa famiglia, il contenitore può essere riempito solo per metà, ma vista la sua geometria, la miscelazione che si ottiene è peggiore a causa degli angoli in cui il materiale rimane bloccato.



Figura 55 - Miscelatore Tote [115].

- **Rotating Element Blenders**. Questa famiglia di miscelatori è caratterizzata da un dispositivo rotante interno alla camera di miscelazione. Questo avviene anche per alcuni *tumble blenders*, ma la causa principale della loro miscelazione è sempre la rotazione del contenitore. In genere questi macchinari, per ottenere una buona miscelazione, possono essere riempiti solo fino all'altezza dell'albero interno, ma esistono eccezioni. Sono presenti numerose varianti:
 - **Ribbon Blender** (Figura 56). Il più diffuso miscelatore tra quelli ad elementi rotanti è formato da un albero centrale a cui sono collegate due set di lame elicoidali a nastro: uno interno ed uno esterno. Le lame esterne servono a far fluire la polvere dall'ingresso della camera all'uscita; le lame interne invece tendono a far muovere la polvere nel verso opposto, così da aumentarne la miscelazione. La problematica principale di questa tipologia di miscelatori

è la scarsa pulibilità causata dalle particolari geometrie interne. Può avere senso implementare un sistema di pulizia di tipologia *Cleaning In Place* (CIP), che però necessita di un gran numero di ugelli. Esistono anche varianti con la camera cilindrica disposta in verticale.

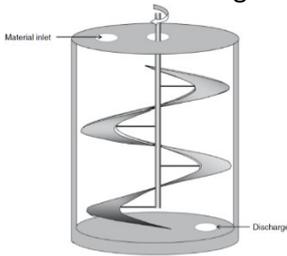


Figura 56 - Schema di un vertical ribbon blender [115].

- **Paddle Blender** (Figura 57). Questa tipologia di miscelatori consiste in una camera cilindrica dotata di un albero assiale rotante a cui sono collegate delle pale per la movimentazione della polvere. Queste pale possono essere disposte con geometrie e inclinazioni particolari che consentono di direzionare il flusso di polvere verso l'uscita dalla camera o, a seconda dei casi, di creare zone di rimescolamento intenso.

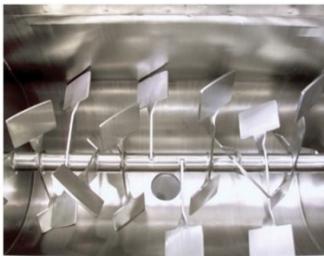


Figura 57 - Interno di un paddle blender [115].

- **Ploughshare Blender** (Figura 58). Questa tipologia di miscelatori è simile ai *paddle blenders*, ma al posto delle pale presentano dei vomeri. Questi sono le lame che caratterizzano gli aratri, per cui hanno la capacità di creare due flussi di polvere in verso opposto.



Figura 58 - Interno di un ploughshare blender [115].

- **Orbiting Screw Blender** (Figura 59). In questa tipologia di miscelatori la camera è formata da un cono rovesciato al cui interno una vite senza fine ha due rotazioni: una lungo il proprio asse ed una che gli permette di passare radente a tutta la superficie del cono. Questi due movimenti rispettivamente alzano il materiale dal fondo della camera per poi farlo cadere nuovamente per gravità e lo mischiano con l'intero contenuto della camera.

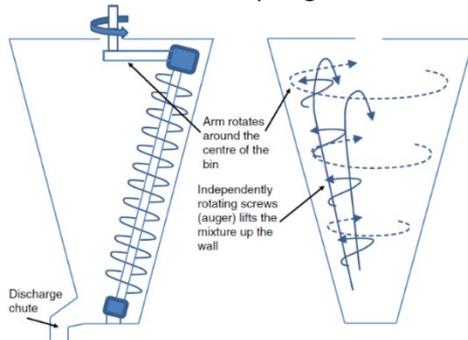


Figura 59 - Schema di un miscelatore orbiting screw [115].

- **Impact blender.** Paragonabili a frullatori industriali, sono caratterizzati da una camera a cilindro verticale in cui sono presenti delle lame rotanti che mettono in moto la polvere e la miscelano. A seconda delle dimensioni del macchinario e della miscela si possono avere dalle 2000 alle 3000 rotazioni per minuto. Possono essere presenti vari set di lame a differenti altezze; tuttavia, neanche la lama più bassa spazza adeguatamente la superficie di base, per cui si ha una potenziale segregazione della polvere.

Si riepilogano gli interventi tecnologici reperiti per ridurre i consumi energetici relativi alla miscelazione.

- **Interventi *energy-saving* riguardanti la miscelazione di compresse:**

- Installare un *twin-shell blender* per la possibilità di combinare l'operazione di miscelazione con quella di asciugatura [115].
- Installare un *double-cone blender* [115]
- Installare un *horizontal rotatory blender* che tramite la presenza di deflettori per velocizzare il processo produttivo e la fase di scarico [115].
- Installare un *tote blender* per il processo automatizzato che permette di regolare l'energia necessaria per la fase di miscelazione [115].
- Installare un *ribbon blender* orizzontale per permettere una maggiore miscelazione dei prodotti e ridurre la fase successiva di granulazione [115].
- Installare un *ribbon blender* verticale per permettere una maggiore miscelazione dei prodotti e ridurre la fase successiva di granulazione [115].
- Installare un dispositivo per la *Cleaning In Place* per facilitare la pulibilità dei miscelatori e ridurre i consumi dati da rilavorazioni di composti con grado di segregazione elevato [115].
- Installare un *paddle blender* per la disposizione delle pale che permette processi di mescolamento intenso [115].
- Installare un *ploughshare blender* per la disposizione dei vomeri che permette processi di mescolamento intenso creando flussi di polveri in direzioni opposte [115].
- Installare un *orbiting screw blender* per la presenza di una vite senza fine che facilita la miscelazione sfruttando l'energia gravitazionale dei corpi in caduta [115].
- Installare un *impact blender* per efficientare il processo di lavorazione e ridurre la fase successiva di granulazione [115].
- Installare un *impact blender* a lame multiple per efficientare il processo di lavorazione e ridurre la fase successiva di granulazione [116].

2.3.7 Sistemi sottovuoto

Molti principi attivi vengono prodotti tramite procedure sottovuoto, che possono essere svolte mediante diverse tipologie di pompe:

- Pompa ad anello liquido (*liquid ring vacuum pump*) che usi un solvente come mezzo (Figura 60) [95].

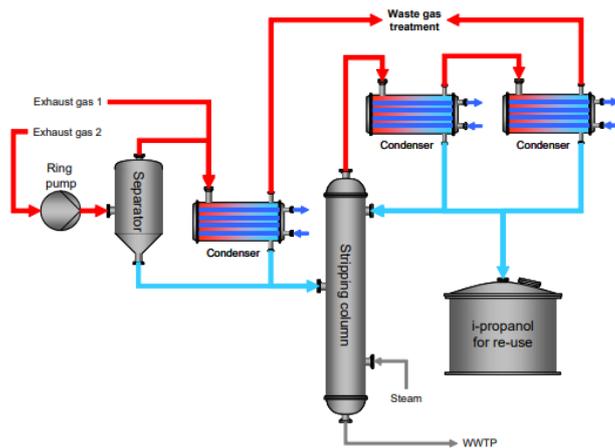


Figura 60. Layout di una pompa ad anello liquido che usa propano come mezzo [95].

- Pompa sottovuoto a secco (*dry vacuum pump*) - Non necessita di un mezzo liquido, ma richiede una lubrificazione.
- Espulsore sottovuoto (*team ject ejector*) - Strumenti semplici, affidabili ma molto rumorosi [99].

Si riepilogano gli interventi tecnologici reperiti per ridurre i consumi energetici nella produzione sottovuoto.

- **Interventi *energy-saving* riguardanti i sistemi di sottovuoto:**
 - Installare una pompa ad anello liquido [95]. Queste pompe potrebbero usare sia l'acqua che un solvente a bassa volatilità come mezzo. L'utilizzo di solventi a bassa volatilità, tuttavia, è preferibile rispetto all'acqua in quanto, generalmente, essi hanno punti di fusione più bassi, consentendo un processo energeticamente più efficiente dato che il vuoto è mantenuto dal raffreddamento (l'acqua limita l'abbassamento di temperature a valori al di sopra di 0°C). Inoltre, è consigliabile l'utilizzo di solventi con una pressione di vapore inferiore a quella dell'acqua [2]. Queste pompe, inoltre, possono essere progettate a ciclo chiuso o accoppiate ad un sistema di recupero dei solventi e, dunque, sono energeticamente efficienti perché consentono di riutilizzare le risorse in circolo, riducendo gli sprechi.
 - Installare una pompa sottovuoto a secco [95]. Sistemi di questo tipo permettono di non contaminare l'acqua con i gas provenienti dal sottovuoto generato nei contenitori/ambienti. Per recuperare i vapori che si estraggono, si ricorre a una serie di condensatori alternati alle pompe a secco. Il costo iniziale di questi sistemi è maggiore rispetto alle pompe ad anello liquido, però i costi di smaltimento/depurazione dell'acqua contaminata portano ad un costo complessivo minore [2]. Tuttavia, necessita di sistemi per la raccolta e il trattamento degli oli lubrificanti.
 - Installare un espulsore sottovuoto. La semplicità di design e di funzionamento di questi sistemi, ne può determinare un basso consumo energetico [99].

2.3.8 Abbattimento o recupero dei gas esausti

A seconda dei composti che vengono processati, si possono avere sostanze più o meno inquinanti che verrebbero rilasciate nei gas di scarico. Per ridurre l'impatto ambientale si ricorre ad una serie di metodi per abbattere la quantità di agenti inquinanti presenti nei gas. I principali metodi sono già stati introdotti nei settori delle fonderie e dello smaltimento rifiuti, pertanto di seguito si elencano, ma si rimanda alla lettura dei paragrafi precedenti per ulteriori informazioni.

- Trattamento in *wet scrubber*. Valido sia per la rimozione di gas che di polveri. Può essere di varie tipologie, tra cui scrubber a letto agitato (*moving bed scrubber*), *packed bed scrubber*, *plate scrubber*, *spray tower*, *Venturi scrubber*, oppure scrubber a cascata (disposti in serie).

- Assorbimento. I possibili sistemi per effettuare assorbimento sono: *fixed bed adsorption*, *fluidised bed adsorption*, *continuous bed adsorption*, *pressure swing adsorption* (PSA). I materiali generalmente utilizzati sono il carbone attivo, le zeoliti, le particelle di polimeri molto porosi, *silica gel*. Questi possono essere rigenerati con i processi di *vacuum regeneration*, PSA e *thermal swing regeneration* [99] e successivamente riusati.
- Riduzione dei NOx: può avvenire mediante dispositivi DeNO_x, oppure mediante due tipologie di sistemi: *selective non catalytic reduction* (SNCR) o *selective catalytic reduction* (SCR). SCR richiedono temperature molto più basse rispetto ai processi SNCR [99].
- Rimozione di polveri. Le tecniche per la rimozione delle polveri possono essere:
 - *Wet electrostatic precipitator*. Il gas in ingresso viene influenzato tramite degli ioni allo stato gassoso che si uniscono alle particelle solide. Un campo elettrico si occupa poi di influenzare la traiettoria di quest'ultime per estrarle dal flusso [99].
 - *Scrubbing*
 - Sistemi ciclonici
 - Filtri a manica in tessuto
 - Filtri ceramici
 - *Filtri High Efficiency Particulate Arrestation (HEPA)*
- Ossidatori termici. L'incenerimento è usato per la rimozione dei VOCs (*Volatile Organic Compounds*), bruciando gas naturale. L'energia che si produce viene recuperata [99].
- Ossidatori catalitici. Simile agli ossidatori termici. Dopo aver fatto passare il gas sulla fiamma, viene processato da un letto catalitico in grado di incrementare il tasso di ossidazione.
- Separatori a membrana. Adatti alla rimozione dei VOCs, sfruttano delle membrane semipermeabili per filtrare il gas [99].
- Condensatori. Esistono sistemi di condensazione diretti ed indiretti: in quelli diretti, il gas entra direttamente a contatto con il liquido refrigerante. Quelli indiretti, invece, sono da preferire in quanto non necessitano di una successiva fase di separazione '.
- Condensatori criogenici
- Induzione di un plasma non termico e passaggio in un catalizzatore. Il gas viene fatto passare in un campo di migliaia di volt che porta all'eccitazione delle molecole senza portare cambiamenti alla temperatura del gas. Successivamente, il gas viene fatto entrare a contatto con un catalizzatore dove le molecole, eccitate, sono completamente ossidate. Entrambi i passaggi avvengono a temperatura ambiente.
- Combinazioni dei metodi precedenti [95].

Si riepilogano gli interventi tecnologici atti a ridurre i consumi energetici nel trattamento di gas esausti. Come già detto, una descrizione di tali interventi è già stata data nei paragrafi precedenti.

- **Interventi *energy-saving* riguardanti i sistemi di trattamento delle sostanze inquinanti:**
 - Installare uno *scrubber* a letto fisso [95].
 - Installare uno *scrubber* a letto mobile [95].
 - Installare un *plate scrubber* [95].
 - Installare colonne di lavaggio (*spray*) [95].
 - Installare un Venturi *scrubber* [95].
 - Installare un assorbitore a letto fisso [95].
 - Installare un assorbitore a letto fluido [95].
 - Installare un assorbitore a letto continuo [95].

- Installare un dispositivo per la *pressure swing adsorption* [95].
- Installare un dispositivo DeNO_x [95].
- Installare un dispositivo per la *selective non catalytic reduction* (SNCR) [99].
- Installare un dispositivo per la *selective catalytic reduction* (SCR) [99].
- Installare un precipitatore elettrostatico [99].
- Sostituire i filtri a tasche con filtri elettrostatici attivi.
- Installare un sistema ciclonico [95].
- Installare un filtro a manica [95].
- Installare un filtro ceramico [95].
- Installare un filtro HEPA [95].
- Installare un ossidatore termico
- Sostituire il combustore dell'ossidatore con un elemento più efficiente.
- Installare un ossidatore catalitico [99].
- Installare un condensatore diretto [99].
- Installare un condensatore indiretto [99].
- Installare un condensatore criogenico [95].
- Installare un separatore a membrana [95].
- Sostituire o installare guarnizioni lungo le tubature per evitare trafileamenti. I gas esausti o contaminati non escono però esclusivamente dagli scarichi. Può accadere, infatti, che ci siano perdite lungo le tubature o nei macchinari. Per questo, è importante periodicamente controllare la tenuta dei dispositivi utilizzati [95].

2.3.9 Trattamento acque esauste

Come per i gas di scarico, è importante ripulire anche le acque esauste. I metodi utilizzati sono:

- Precipitazione - Processo chimico in grado di portare alla formazione di particelle, raccogliendo ed agglomerando le sostanze disperse nell'acqua. Generalmente è seguito da pratiche di sedimentazione o *air flotation*.
- Cristallizzazione – Processo simile alla precipitazione. Tramite dei nuclei di aggregazione si ha la formazione di solidi.
- Sedimentazione - Chiamata anche chiarificazione, permette la separazione delle particelle in sospensione nel liquido, che, per gravità (o per l'aiuto di reagenti chimici), si depositano sul fondo, dove verranno raccolte [99].
- *Air flotation* – Metodo che prevede l'inserimento nel liquido di piccole bolle d'aria che, nella loro risalita, vanno ad intercettare e a raccogliere le particelle in sospensione. Dei dispositivi rimuoveranno quindi i depositi accumulatisi in superficie. Alcuni additivi vengono utilizzati al fine di agglomerare le sostanze in particelle intercettabili dalle bolle d'aria [99].
- Filtrazione - È possibile utilizzare filtri granulari (*sand filter*), filtri a tamburo (*gravity drum filter*), *rotary vacuum filter*, *belt filter press*.
- Microfiltrazione/ultrafiltrazione - Questi processi vengono ottenuti tramite delle membrane attraverso le quali viene fatto passare il liquido. Le membrane utilizzate sono semipermeabili, per farvi passare attraverso il liquido è necessario esercitare una pressione. Particolari membrane permettono di ottenere anche una nanofiltrazione [99].

- Estrazione.
- Assorbimento - Trasferimento di una sostanza solubile dall'acqua inquinata alla superficie di particelle di un materiale solido molto poroso, chiamato assorbente. Questo, dopo aver depurato una certa quantità di acqua, sono saturi e devono essere rigenerati o smaltiti (generalmente inceneriti). Il materiale più frequentemente utilizzato è il carbone attivo [99].
- Distillazione.
- Evaporazione.
- Ossidazione chimica - Consiste nella conversione degli agenti inquinanti tramite agenti chimici. Si usa quando le sostanze disperse non sono immediatamente biodegradabili.
- Incenerimento - Le acque inquinate vengono ossidate termicamente: la parte acquosa evapora in un processo che avviene a pressione ambiente e a temperature tra i 730° C ed i 1200° C [99].
- *Stripping* - Consiste nell'eliminazione di componenti volatili o gassosi da un liquido tramite un'abbondante corrente d'aria o di vapore. Dal gas utilizzato vengono poi separati questi componenti inquinanti, al fine di riciclarlo ed utilizzarlo nuovamente [99].
- Coagulazione. Questo metodo prevede l'aggiunta di prodotti chimici (solfato d'alluminio, calce, soda caustica o particolari sali del ferro) all'interno delle acque di scarico. Questi coagulano le sostanze inquinanti e le trasformano in aggregati la cui rimozione è semplificata [117].
- Elettrocoagulazione. È un metodo eco-friendly in grado di eliminare grandi quantità di elementi contaminanti in un solo passaggio. Il funzionamento è garantito da una sorgente di energia esterna: è necessaria dell'elettricità che instaura all'interno dell'acqua delle dinamiche di precipitazione. Alcuni elettrodi sono immersi nell'acqua e possono essere messi in serie o in parallelo: un anodo sacrificale si consumerà per ossidazione, mentre il catodo rimane passivo [117].
- Combinazioni di questi metodi [95].

Si riepilogano gli interventi tecnologici atti a ridurre i consumi energetici nel trattamento delle acque. Il motivo per cui interventi elencati di seguito generano risparmio energetico è comune a tutti: trattare le acque consente di riutilizzarle all'interno dell'impianto. Ciò determina non soltanto minori sprechi e un utilizzo più efficiente delle risorse, ma anche un miglior consumo energetico visto che non è necessario effettuare nuovamente le attività di reperimento, trasporto e stoccaggio di altri liquidi nell'impianto.

- **Interventi *energy-saving* riguardanti i sistemi di trattamento delle acque esauste:**
 - Installare un precipitatore chimico [99].
 - Installare un cristallizzatore [99].
 - Installare un sedimentatore per gravità [99].
 - Installare un sedimentatore chimico [99].
 - Installare un air floater [99].
 - Installare un filtro granulare [99].
 - Installare un filtro a tamburo [99].
 - Installare un filtro a tamburo sottovuoto [99].
 - Installare membrane semipermeabili [99].
 - Installare un separatore liquido-liquido (vedi sopra) [99].
 - Installare un distillatore (vedi sopra)
 - Installare un evaporatore (vedi sopra)
 - Installare un dispositivo per l'ossidazione chimica [99].
 - Installare un inceneritore [99].

- Installare un dispositivo per lo stripping [99].
- Installare un dispositivo per la coagulazione chimica [117].
- Installare un dispositivo per l'elettrocoagulazione [117].
- **Installare un depuratore anaerobico-aerobico.**
- **Sostituire le soffianti del depuratore con elementi ad alta efficienza.**
- **Installare essiccatori per i fanghi da smaltire usando calore recuperato.**

2.3.10 Cristallizzazione

Con questo termine si intende la formazione di cristalli partendo da una soluzione. Questo processo è, in realtà, l'unione di diverse fasi già viste. Infatti, tipicamente, il processo di cristallizzazione viene così svolto:

- Concentrazione della soluzione tramite distillazione.
- Creazione dei cristalli di origine da una soluzione supersatura.
- Raffreddamento.
- Filtrazione.

Come illustrato in [111], queste fasi possono essere svolte in continuo, portando ad una accelerazione della produzione. Esistono altri metodi per cristallizzare, come quello proposto da [118], in cui si utilizzano delle nanocellulose. La cellulosa è un biopolimero abbondante in natura, il cui costo e impatto ambientale è molto basso. Le nano-cellulose che ne derivano hanno una particolare abilità a formare degli idrogel: utilizzando una superficie formata da questo idrogel è possibile ottenere una cristallizzazione dei principi attivi. Una strada ulteriore è quella data dalla cristallizzazione ad ultrasuoni: numerose pubblicazioni parlano del processo di cristallizzazione che può essere velocizzato dall'energia trasmessa tramite ultrasuoni. A livello industriale il macchinario utilizzato per questo processo è un reattore (o un semplice contenitore) dotato di un elemento (generalmente delle sonde) in grado di trasmettere ultrasuoni [119]. Esistono anche dispositivi che fanno esclusivamente la cristallizzazione in continuo. Tra questi, in particolare si hanno il cristallizzatore *Mixed-suspension-mixed-product removal* e il cristallizzatore *Near plug flow*. Il cristallizzatore *Mixed-suspension-mixed-product removal* è un metodo che prevede l'inserimento e la rimozione del materiale all'interno di un contenitore (o più), dove viene mescolato continuamente. Il tempo di residenza del materiale all'interno del macchinario è molto variabile. Il cristallizzatore *Near plug flow*, invece, è un reattore a tubo, il cui contenuto scorre ad una velocità costante.

Si riepilogano gli interventi tecnologici atti a ridurre i consumi energetici nella fase di cristallizzazione.

- **Interventi *energy-saving* riguardanti la cristallizzazione:**
 - Installare un cristallizzatore a matrice nanocellulare [118]. L'abbondanza delle matrici nanocellulose e la semplicità di processo implicano bassi costi e da bassi consumi energetici per questo sistema. Inoltre, le sostanze in gioco hanno origine naturale, dunque non implicano la formazione di agenti inquinanti, evitando un loro necessario trattamento.
 - Installare un cristallizzatore ad ultrasuoni [119]. Questo sistema rende il processo particolarmente rapido, dunque può comportare minori consumi energetici dovuti alla minor durata di processo.
 - Installare un cristallizzatore in continuo *Mixed Suspension Mixed Product Removal* [120]. Questo sistema processa il fluido a velocità variabile. Una velocità di processo elevata determina un elevato *throughput* e, dunque, un ottimo utilizzo dell'energia che alimenta il sistema. Il miscelamento delle sostanze, inoltre, determina una miglior qualità dei prodotti di processo, dunque riducendo la necessità di successivi trattamenti.
 - Installare un cristallizzatore in continuo *Near Plug Flow* [120]. Vista la velocità costante del fluido processato nel reattore, questo sistema è caratterizzato da un tempo di residenza pressoché fisso, che comporta maggior trasmissione del calore, un maggior quantitativo di materiale processato [120] e dunque benefici legati ad un efficientamento energetico.

2.3.11 Trasporto dei materiali all'interno dell'impianto

Il trasporto dei semilavorati nell'impianto può avvenire mediante tubature con sistemi di pompaggio o di sottovuoto, ma i sistemi a caduta (per gravità) permettono una notevole riduzione dei consumi. Alcuni metodi di trasporto prevedono delle tubature dotate di sistemi *pigging*, in cui un cilindro viene posizionato all'interno delle tubature e utilizzato per spingere il materiale (Figura 61). Questo cilindro, chiamato *pig*, viene spinto per mezzo di gas (ad esempio, aria compressa) [95].

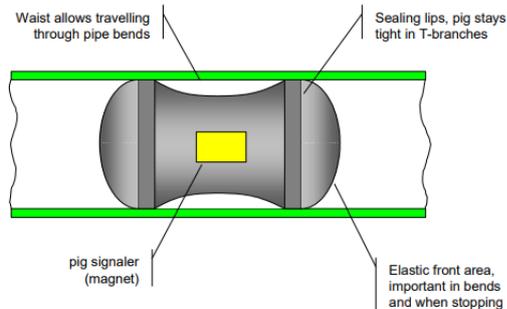


Figura 61. Sistema di pigging per applicazioni industriali [95].

Oltre a ciò, una vasta gamma di farmaci liquidi può essere stoccata e trasportata solo a basse temperature per poter mantenere le caratteristiche farmaceutiche richieste. In letteratura, una metodologie di stoccaggio a basse temperature spicca rispetto alle altre per la sua efficienza energetica: il contenitore refrigerato per il trasporto (alimentato ad energia solare) proposto da [121]. Tale sistema è costituito da una scatola chiusa dotata di un modulo di Peltier (uno strumento che, se alimentato con energia elettrica, è in grado di trasferire calore da uno dei suoi lati all'altro). Lavora installato tra una piastra di alluminio e un dissipatore. La piastra d'alluminio all'interno del contenitore agisce come scambiatore di calore e preleva calore che, tramite il modulo di Peltier, viene portato al dissipatore di calore che lo disperde nell'ambiente esterno. Il refrigeratore è alimentato da un pannello solare disposto sul coperchio del contenitore [121].

Si riepilogano gli interventi tecnologici atti a ridurre i consumi energetici nella fase di trasporto.

- **Interventi *energy-saving* riguardanti il trasporto dei semilavorati:**
 - Installare tubature per gravità. Sfruttare la forza di gravità non richiede dispendi di energia per attività di pompaggio o spostamento. Pertanto, questo sistema risulta *energy-saving*.
 - Installare un sistema di *pigging*. Questo sistema è caratterizzato da ridotte perdite, dunque ottimizzando il trasporto di semilavorati ed efficientando il consumo energetico.
 - Utilizzare i contenitori dotati di un modulo di Peltier alimentato da pannello fotovoltaico
 - **Sostituire i carrelli elevatori a gasolio con elementi elettrici.**
 - **Facilitare il trasporto di fanghi installando un sistema che li agiti.**

2.3.12 Sterilizzazione

Esistono molteplici approcci per la sterilizzazione:

- Uso dell'autoclave, sterilizzando tramite alte temperature e umidità. Il prodotto da sterilizzare è investito da vapore saturo a una temperatura adeguata a non comprometterne le caratteristiche.
- Utilizzo di dispositivi a calore secco. Spesso ci si riferisce a questo processo come deprogenazione e consiste nell'esporre ad alte temperature il prodotto in assenza di umidità.
- Trattamenti chimici, alzando la temperatura in presenza di agenti battericidi. Utilizzato per sterilizzare soluzioni acquose o materiali instabili a temperature maggiore.
- Trattamenti chimici con esposizione del prodotto a ossido di etilene gassoso (può avvenire a temperatura ambiente).
- Irradiazione. Esposizione del prodotto a elettroni ad alta energia (generati da un acceleratore di particelle) o a radiazioni gamma (generate da sorgenti come il cobalto 60).
- Luce ad alta intensità. Esposizione del prodotto a luce ad alta intensità. Generalmente, si usa luce ultravioletta. Possono essere utilizzati anche dispositivi a luce pulsata.

- Filtrazione, utilizzata esclusivamente per la sterilizzazione di fluidi. I fluidi vengono fatti passare attraverso filtri che trattengono i batteri. Non è richiesto un aumento della temperatura [122].

Si riepilogano gli interventi tecnologici atti a ridurre i consumi energetici nella fase di sterilizzazione. Tutti gli interventi riportati di seguito sono da reputarsi *energy-saving* perché assicurano l'efficacia dei principi attivi e la loro sicurezza, evitando scarti di materiali. Ciò implica che il consumo energetico adottato per realizzare i principi attivi non venga sprecato. Inoltre, alcuni degli interventi menzionati avvengono a temperature ambiente, determinando bassi consumi energetici.

- **Interventi *energy-saving* riguardanti la sterilizzazione:**
 - Installare un dispositivo per la depirogenazione [122].
 - Installare uno sterilizzatore ad autoclave [122].
 - Installare uno sterilizzatore a esposizione (a ossido di etilene gassoso) [122]. I benefici energetici di questo processo dipendono dal fatto che non sono richiesti incrementi di temperatura.
 - Installare uno sterilizzatore a aumento di temperatura in presenza di agenti battericidi [122].
 - Installare uno sterilizzatore ad irradiazione ad elettroni [122].
 - Installare uno sterilizzatore a radiazioni gamma [122].
 - Installare uno sterilizzatore a luce ultravioletta [122].
 - Installare uno sterilizzatore a luce pulsata ad alta intensità [122].
 - Installare uno sterilizzatore per filtrazione con membrana [122]. I benefici energetici di questo processo nascono dal fatto che non sono necessari incrementi di temperatura.

2.3.13 Servizi ausiliari e di supporto

Oltre ad agire sulle tecnologie che costituiscono le principali fasi del processo, è possibile ridurre i consumi energetici d'impianto effettuando interventi migliorativi sugli apparati ausiliari. Anche in questo caso è possibile sia efficientare i sistemi ausiliari esistenti sia effettuare interventi di recupero energetico o produzione sostenibile di energia. Di seguito si riepilogano gli interventi tecnologici reperiti per ridurre i consumi energetici relativi ai sistemi ausiliari e di supporto. La spiegazione di come tali interventi apportino un recupero energetico è già stata fornita nei Capitoli 1-2 visto che molti interventi sui sistemi ausiliari e di supporto sono analoghi a quelli riportati per il settore delle fonderie e dello smaltimento rifiuti. Oltre a ciò, la descrizione dettagliata degli interventi che riguardando i sistemi ausiliari è già stata fornita nel report che UNIFI ha redatto nel 2020. Si rimanda, alla lettura di tale materiale per approfondimenti in tal senso.

- **Interventi *energy-saving* riguardanti nel processo di efficientamento dei sistemi di supporto:**
 - Sostituire un chiller con un elemento più efficiente.
 - Installare un chiller con temperature apposite a uno specifico circuito.
 - Installare un serbatoio di accumulo acqua in uscita, separato da quello in ingresso al chiller.
 - Sostituire un refrigeratore a glicole con uno ad ammoniaca.
 - Sostituire un impianto idronico con impianto espansione diretta.
 - Installare un sistema di condensazione flottante.
 - Installare chiller dotati di inverter.
 - Sostituire raffreddamento ad aria del chiller con raffreddamento ad acqua.
 - Installare un gruppo frigo di taglia ridotta per i periodi di domanda inferiore.
 - Installare inverter sui gruppi frigo,
 - Sostituire motori elettrici con elementi più efficienti.
 - Sostituire un generatore di vapore con uno più efficiente.
 - Sostituire una caldaia ad olio diatermico con una a tubi di fumo.

- Installare una caldaia ad olio diatermico.
- Sostituire la caldaia con un elemento più efficiente.
- Sostituire i bruciatori della caldaia con un elemento più efficiente.
- Installare pompe con inverter.
- Sostituire le pompe con elementi ad alta efficienza.
- Installare pompe automodulanti.
- Sostituire un compressore con uno più efficiente.
- Installare un compressore a vite con inverter.
- Installare un compressore a vite.
- Sostituire un compressore con uno dotato di inverter.
- Installare valvole nel circuito aria compressa per chiudere ogni volta le sezioni non usate.
- Sostituire un compressore fisso con un elemento bistadio.
- Sostituire un compressore a vite con uno a palette e inverter.
- Coibentare le tubature dei sistemi con fluidi termovettori.
- Coibentare le valvole interagenti su fluidi termovettori.
- Installare un quadro elettrico per la riduzione delle armoniche.
- Installare quadri di rifasamento
- Installare un filtro passivo per la riduzione delle armoniche.
- Installare uno stabilizzatore di tensione.
- Sostituire il trasformatore con un elemento più efficiente.
- Sostituire elementi di condizionamento con alcuni dotati di inverter.
- Installare cinghie ad alta efficienza sui ventilatori.
- Installare UTA con recupero calore termodinamico attivo.
- Sostituire una batteria a vapore con una batteria ad acqua
- Sostituire UTA con elementi più efficienti.
- Installare una pompa calore acqua - acqua tra i circuiti acqua fredda e acqua calda.
- Sostituire riscaldatori ceramici con elementi più efficienti.
- Sostituire diffusori per ottenere bolle più piccole.
- **Interventi *energy-saving* riguardanti nel processo di produzione o recupero di energia:**
 - Installare un impianto di assorbimento del calore dei condensatori.
 - Installare un impianto di assorbimento del calore recuperabile dal cogeneratore.
 - Installare un economizzatore sul generatore di vapore.
 - Installare uno scambiatore di calore fumi-acqua in ingresso caldaia/inceneritore.
 - Installare un recuperatore di calore nel circuito di raffreddamento dei compressori.
 - Sostituire una turbina alimentata col calore recuperato con un elemento correttamente dimensionato.
 - Installare recuperatori di calore nei sistemi di dissipazione.
 - Installare recuperatore di calore dai sistemi d'areazione.

- Installare un post-combustore.
- Installare sistemi per il preriscaldamento dell'acqua in ingresso al generatore di vapore usando acqua di scarto.
- Installare una camicia di coibentazione sugli scambiatori di calore.
- Installare sistemi per usare il calore in eccesso del cogeneratore in estate per fare il flash dei solventi.
- Installare una turbina che sfrutti un salto di pressione tra caldaia e circuito.
- Installare un cogeneratore (MCI + recupero calore).
- Potenziare il sistema di cogenerazione.
- Installare un impianto di trigenerazione.
- Sostituire una turbina a vapore con un impianto di trigenerazione.
- Installare un impianto fotovoltaico.
- Installare un impianto solare termico per la produzione diretta di vapore.

2.4 Impianti di produzione di farmaci

La produzione di farmaci è realizzata da tutte quelle aziende appartenenti all'industria farmaceutica studia i processi di realizzazione, distribuzione e sviluppi di farmaci. La famiglia dei farmaci comprende diverse tipologie di prodotti che si distinguono per dimensioni, consistenza ed uso. All'interno di questa sezione si presentano i processi produttivi per la realizzazione di compresse, capsule, medicinali liquidi, creme e tessuti per le medicazioni.

In generale, tutte le informazioni sul processo e sugli interventi tecnologici di miglioramento dei consumi energetici relativamente al settore della produzione di farmaci sono state collezionate dopo aver effettuato un'analisi sistematica della letteratura, il cui processo di ricerca è descritto in dettaglio in Figura 62, e dopo aver analizzato le diagnosi energetiche. Per quanto riguarda l'analisi della letteratura, è stato consultato il database Scopus, introducendo le parole chiave e i criteri di esclusione ed inclusione delle fonti riportati in Figura 62.

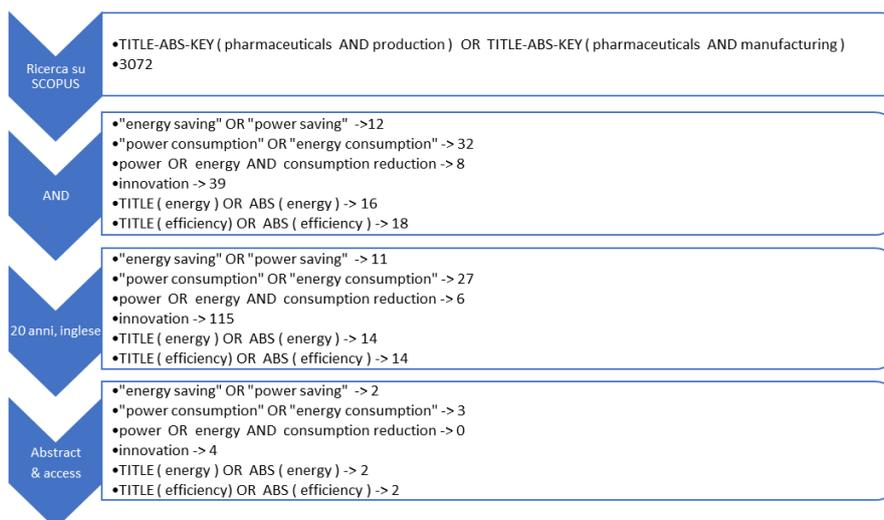


Figura 62. Schema ricerca bibliografica sistematica complessiva.

Una ricerca generica estesa all'intero settore produttivo di farmaci non ha portato all'individuazione di un numero sufficiente di articoli. Per migliorare la ricerca si è, quindi, reso necessario costruire nuove query basate sulle differenti tipologie di farmaco (Figure 63-67). Si noti che alcune ricerche hanno richiesto l'aggiunta della formula "pharm*", necessaria per ricercare documenti al cui interno sono presenti termini

con radice *pharm*. Infatti, in alcuni casi, senza questa accortezza, l'esito della ricerca risulta completamente fuori tema. L'esempio più calzante è la ricerca relativa alle compresse, in inglese *tablet*, che porta ad articoli inerenti a dispositivi elettronici multimediali touch.

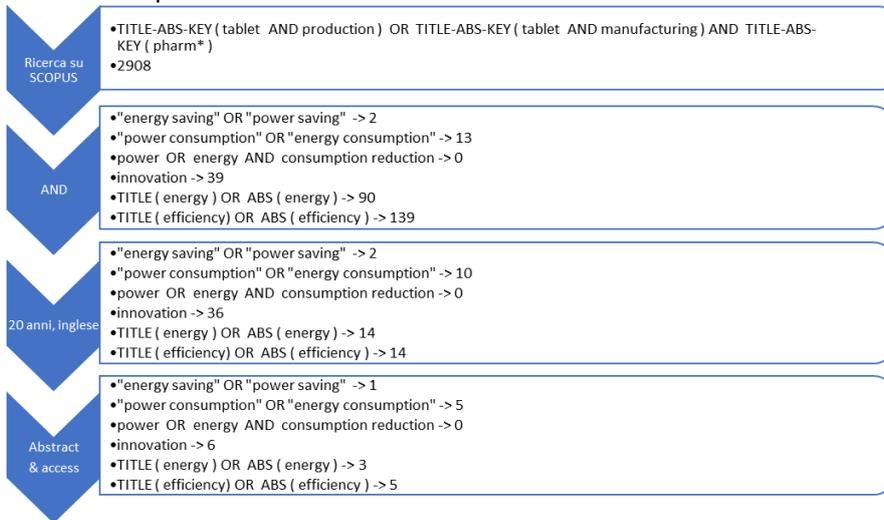


Figura 63 – Schema ricerca bibliografica sistematica sulle compresse

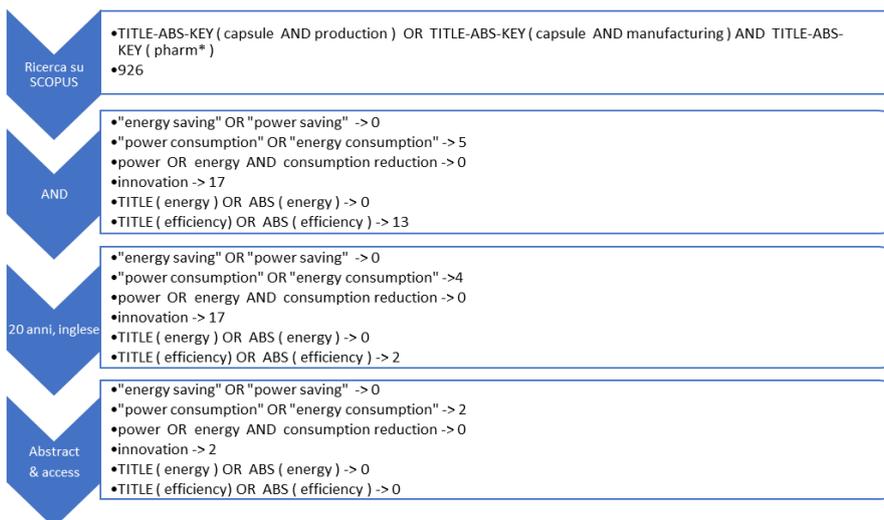


Figura 64 - Schema ricerca bibliografica sistematica sulle capsule

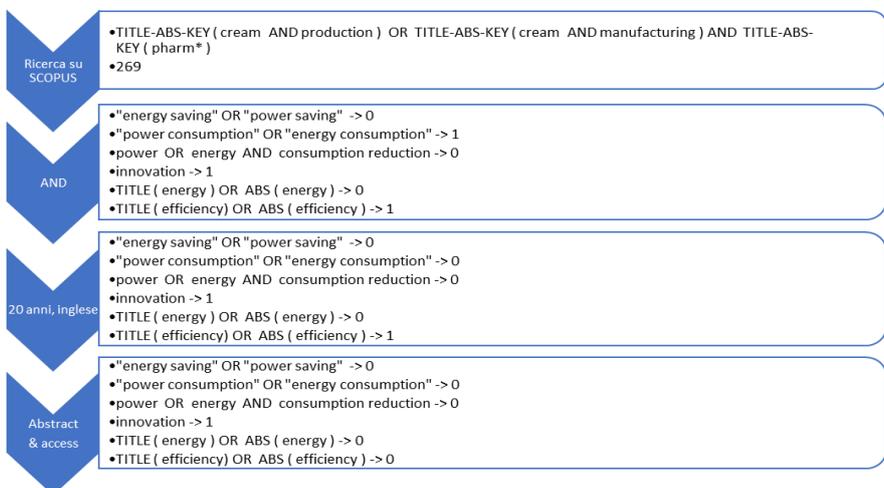


Figura 65 - Schema ricerca bibliografica sistematica sulle creme

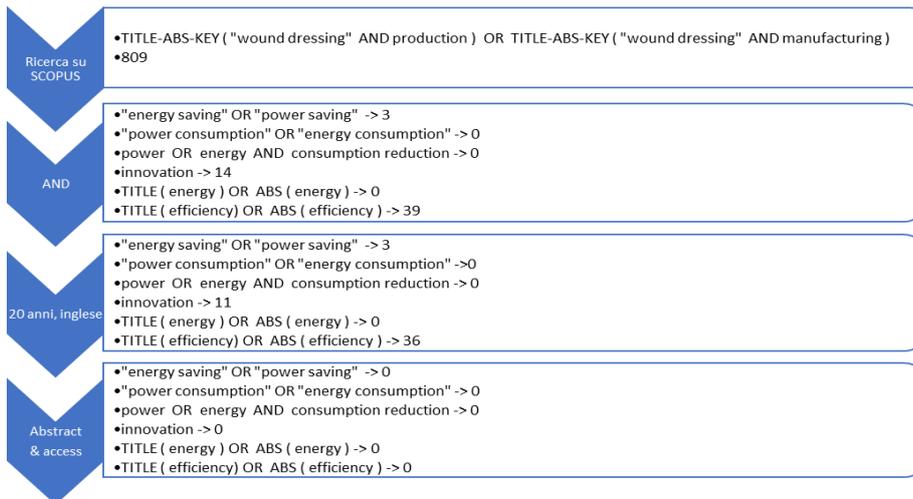


Figura 66 - Schema ricerca bibliografica sistematica su garze, bende e cerotti

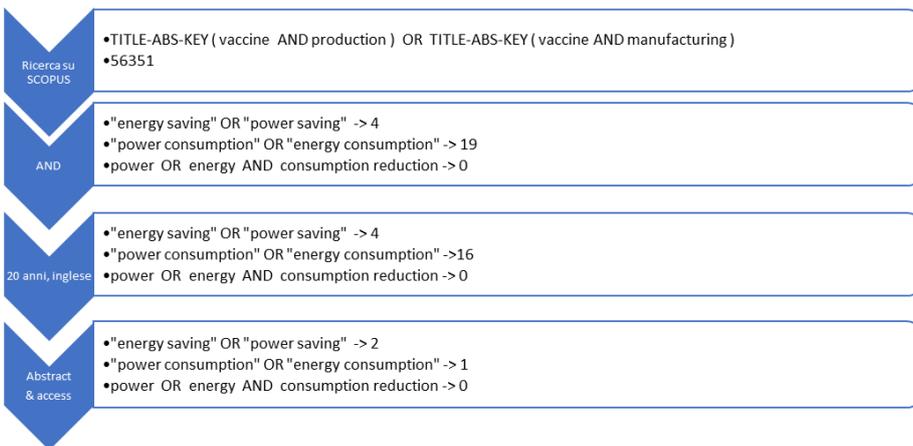


Figura 67 - Schema ricerca bibliografica sistematica sui vaccini.

Consultando lo Figura 67 si nota che quella ricerca si è basata sui vaccini e non su generici farmaci liquidi. L'utilizzo di *keywords* relative ai generici "farmaci liquidi", infatti, non porta ad un consistente numero di articoli da poter analizzare. Al contrario, l'utilizzo del termine "vaccino", restituisce oltre 56'000 articoli, nati a causa dell'epidemia Covid19. Data questa mole di pubblicazioni, è stato deciso di restringere il campo di ricerca: le query con i termini "*innovation*", "*efficiency*" ed "*energy*" sono state rimosse, in quanto la quasi totalità dei risultati si basava su innovazioni a livello farmaceutico e non produttivo o energetico. Alla luce della ricerca di letteratura effettuata, sono stati identificati 17 documenti d'interesse che sono stati letti interamente e usati per determinare gli interventi tecnologici di miglioramento dei consumi energetici riportati nei sotto-paragrafi successivi. La Figura 68 riporta una rapida clusterizzazione delle fonti in base alla fase di processo di produzione di farmaci presa in analisi all'interno dei documenti reperiti.

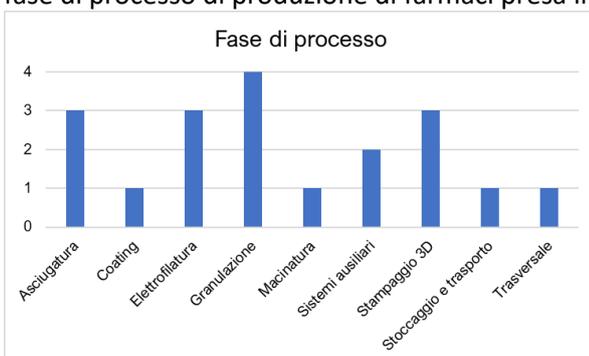


Figura 68 - Distribuzione degli articoli secondo la fase di processo – Produzione farmaci

Dalla ricerca è emerso che una buona percentuale delle pubblicazioni individuate sono inerenti al processo di produzione di compresse. Le compresse risultano infatti la tipologia di farmaco più diffusa al mondo, in quanto la capacità di essere composte da quasi ogni tipologia di principio attivo, insieme alla facilità di trasporto e di assunzione, le rendono preferibili a qualsiasi altra tipologia. L'indubbia affermazione delle compresse sul mercato implica una gran quantità di pubblicazioni inerenti alla loro produzione. Oltre alla consultazione della letteratura, sono state analizzate in dettaglio anche le diagnosi energetiche. Nel caso del settore della produzione di farmaci, sono state esaminate le diagnosi compilate da 94 diversi siti produttivi, sparsi in tutta l'Italia, con una maggiore densità nelle regioni del centro-nord (Figura 69).

Aziende produzione farmaci in Italia



Figura 69 - Distribuzione geografica delle aziende di produzione di farmaci in Italia.

Poiché gli interventi tecnologici disponibili nel settore della produzione di farmaci sono stati reperiti sia consultando la letteratura, che le diagnosi energetiche, di conseguenza, gli interventi di seguito elencati possono ricadere in uno dei seguenti casi:

1. Interventi tecnologici riportati sia in letteratura che nelle diagnosi energetiche. Questi interventi sono colorati in rosso per indicare che sono stati individuati nelle diagnosi e sono corredati da citazione bibliografica per ricordare l'articolo scientifico dal quale sono stati derivati.
2. Interventi tecnologici reperiti solo in letteratura. Tali interventi sono riportati in nero perché non provengono dalle diagnosi, ma sono accompagnati dalla citazione di letteratura dai quali sono stati reperiti.
3. Interventi tecnologici reperiti solo nelle diagnosi. Tali interventi sono colorati in rosso in quanto estratti dalle diagnosi energetiche, ma non riportano citazioni bibliografiche perché non sono stati reperiti in letteratura scientifica.

2.4.1 Produzione di compresse

L'80% circa dei medicinali consumati al mondo sono sotto forma di pasticca: la facilità di trasporto, di conservazione e di consumo sono i fattori che hanno contribuito ad una sua così larga diffusione. La produzione delle compresse parte con la ricezione delle materie prime come: principi attivi, eccipienti, liquidi per la granulazione, leganti e lubrificanti in polvere. Le fasi che seguono vengono attuate a livelli di sterilità crescenti per evitare contaminazioni del prodotto finito. Queste consistono in un processo che si differenzia a seconda delle caratteristiche delle materie prime lavorate. La moltitudine di farmaci che esistono e le rispettive caratteristiche, prime tra tutti la sensibilità al calore e all'umidità, fanno sì che vi siano processi produttivi che si basano sull'umidità, altri che adoperano solo condizioni di umidità nulla, alcuni che possono sfruttare alte temperature, altri ancora che cercano di mantenere le temperature al minimo possibile. In generale le possibili fasi del processo di produzione delle compresse sono:

- Controllo in accettazione delle materie prime
- Miscelazione delle materie prime
- Granulazione
- Macinazione
- Asciugatura
- Compressione

Esistono però anche varianti che prevedono la compressione immediata della miscela, senza la necessità di passare per la fase di granulazione.

L'insieme di queste fasi forma un processo che può essere svolto in continuo o per lotti. Tradizionalmente la produzione dei farmaci avviene per lotti, ma è evidente la recente spinta verso la produzione in continuo volta a ridurre i tempi di produzione, i costi complessivi e l'impatto ambientale. Alcuni autori suggeriscono persino di far lavorare in continuo nello stesso impianto macchinari per la produzione di principi attivi seguiti da quelli per la produzione del farmaco [123]. Esistono approcci in cui, oltre a lavorare in continuo, i macchinari sono messi in linea, consentendo un miglioramento del *throughput* e un'eccellente omogeneità del materiale in uscita. Un esempio è [124], in cui vengono messi in linea i dispositivi per la granulazione, l'asciugatura e la macinazione. Di seguito si analizzano in dettaglio le fasi della produzione di compresse.

2.4.1.1 Produzione di compresse – Miscelazione

La fase di **miscelazione** avviene in modo analogo a quanto già descritto nel settore della produzione di principi attivi. Pertanto, si rimanda alla lettura del paragrafo 2.3.6 per lo studio di questa fase di processo e degli interventi tecnologici reperiti per ridurre i consumi energetici nella miscelazione.

2.4.1.2 Produzione di compresse - Granulazione

Il processo di **granulazione** è ampiamente usato nel settore farmaceutico per la preparazione del materiale che formerà poi le compresse. La granulazione può essere definita come un processo di aumento di dimensioni che trasforma particelle fini o grossolane in agglomerati più grandi e resistenti, con buone caratteristiche di flusso, di compressione ed ottima uniformità. Inoltre, fornisce molteplici vantaggi:

1. Rende uniforme la quantità di principi attivi nelle compresse
2. Semplifica la misurazione e rende la miscela più facile da dosare in termini di volume
3. Aumenta la densità del prodotto finito
4. Riduce la creazione di polvere, riducendo anche l'esposizione degli operatori al farmaco
5. Migliora l'aspetto del prodotto [125].

La scienza dietro a questo processo viene chiamata *Granulation Technology* e identifica due principali tipologie di processo per la granulazione: la *dry granulation* e la *wet granulation*. La prima non utilizza soluzioni liquide per la formazione dei granuli. La motivazione è da ricercarsi in una sensibilità del prodotto all'umidità o al calore, necessario poi per asciugare la miscela. In questo caso il processo è meccanico e tramite compressioni di vario genere si ottiene il risultato desiderato. La seconda utilizza invece una soluzione liquida che può o meno contenere un agente agglomerante. È il processo più diffuso per eseguire la granulazione; avviene unendo la soluzione alle polveri del prodotto e ottenendo una massa umida che poi dovrà essere asciugata e dimensionata per ottenere i granuli desiderati. Le varianti di questi processi possono essere svolte sia con politiche produttive a lotti che in continuo. Il processo continuo di granulazione umida può portare, da solo, ad un consumo di risorse ridotto del 10% rispetto al processo a lotti [126]. In accordo con [127], ci sono 3 passaggi fondamentali, i quali determinano le caratteristiche della massa umida in uscita:

1. Aggiunta del liquido e nucleazione: la soluzione legante, spruzzata o versata sulla polvere, comincia a formare dei primi nuclei
2. Consolidazione e crescita: le collisioni tra le varie particelle durante il processo fanno sì che si uniscano e si comprimano, aumentandone le dimensioni. Questa fase attribuisce ai granuli finali la porosità e le caratteristiche meccaniche come la durezza e la velocità di scioglimento.
3. Rottura e attriti: i granuli, a seguito di urti reciproci o di attriti si riducono in dimensioni [128].

Questi fenomeni accadono spesso in contemporanea nei macchinari di granulazione, rendendo difficile lo studio delle singole fasi. La nucleazione, ovvero la formazione degli agglomerati iniziali, necessita un alto tasso di umidità e dipende dal livello di penetrazione del liquido nelle polveri, dalla capacità dell'eventuale legante di disperdersi e dalla termodinamica del processo di bagnatura. Il conglomerato che si forma è un sistema a tre fasi: il solido disperso, il liquido di granulazione e l'aria. Le forze di adesione sono principalmente da ricondurre ai ponti di liquido che si formano tra le particelle solide ma anche alle forze intermolecolari, come quelle di Van Der Waals e forze elettrostatiche. L'aggiunta del liquido, che può essere spruzzato o versato sulla polvere, è descritta come una serie di 4 stati, chiamati "*pendular*", "*funicular*", "*capillary*", "*droplet*" [125] (Figura 70).

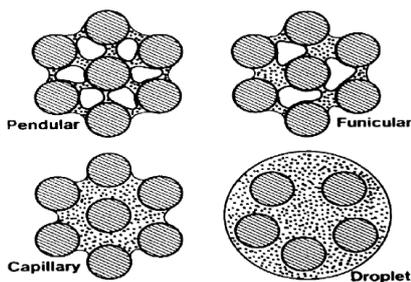


Figura 70 - Stati del conglomerato durante la wet granulation [125].

Aggiungendo il liquido si crea un sottile film sulla superficie della polvere. Nei punti di contatto tra due granelli di polvere viene creato un ponte liquido (stato *pendular*), tra i quali è presente aria. Con l'aumentare del liquido l'aria comincia un processo di coalescenza, ovvero si raggruppa in "bolle" di dimensioni maggiori, ottenendo come risultato una maggior forza della miscela (stato *funicular*). Con l'aumentare del liquido vengono riempiti tutti gli spazi intermedi rimasti (stato *capillary*) e il granulo ottiene in questo momento la massima resistenza. Un ulteriore aumento di liquido forma particelle solide completamente ricoperte dalla soluzione (stato *droplet*), per cui siamo in un sistema a 2 sole fasi. Quando il processo di granulazione è terminato, il liquido viene rimosso tramite asciugatura ma il granulo rimane solido per differenti meccanismi di legame [125]. Sono riportate di seguito le tecniche più diffuse per il processo di *wet granulation*.

- High Shear Wet Granulations (HSWG)** (Figura 71). In questo processo i componenti sono inseriti in una vasca dotata di un accesso dall'alto e due giranti, una di grandi dimensioni necessaria per mettere in moto il prodotto ed una di piccole dimensioni chiamata chopper necessaria per frantumare i grumi di dimensioni eccessive. La velocità della girante porta ad una suddivisione in HSWG (tipicamente più di 200 rpm) e *low shear wet granulation* LSWG (meno di 150 rpm e fino a 1500 rpm). Nella variante più lenta si hanno anche forze di taglio e pressioni inferiori: questo implica direttamente un maggior tempo di processamento, il che rende la LSWG poco utilizzata, se non quando i componenti sono fragili e rischiano di essere danneggiati/degradarsi a velocità superiori [128]. Questi macchinari sono in grado di svolgere tutti i passaggi della granulazione al loro interno e, in alcuni casi, provvedono anche all'asciugatura. Questi particolari macchinari possono avere anche alcune variazioni al fine di poter lavorare in continuo, sebbene la tipologia di produzione d'elezione sia quella a lotti. Esistono due tipologie di macchinari HSWG che si distinguono a seconda della loro orientazione: HSWG orizzontali e HSWG verticali (che si distinguono in bottom e top a seconda di dove sia montata la camera di granulazione sul macchinario). La quantità di liquido aggiunta è un elemento critico, perché il processo potrebbe rischiare dinamiche di *over-wetting* in cui i granuli crescono in maniera incontrollata. La coppia della girante e il consumo energetico sono usati per monitorare le proprietà della massa umida (compattezza). Infatti, indicano direttamente la resistenza che la massa umida oppone al moto.

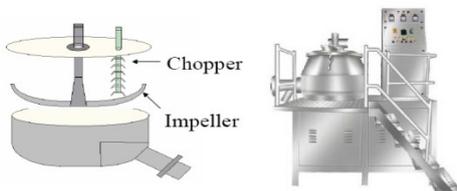


Figura 71 - High shear mixer [125].

- Low Shear Wet Granulations (LSWG)**. Oltre ad avere diverse velocità, LSWG e HSWG si distinguono per le geometrie e la tipologia di moto delle giranti. Si identificano diverse varianti:
 - Ribbon Blender** (Figura 72). Generalmente utilizzato come miscelatore, se si aggiungono piccole quantità di liquido il *ribbon blender* diventa un granulatore. I macchinari che svolgono questa funzione sono però più resistenti e imprimono forze maggiori rispetto a quelli che fungono da semplici miscelatori di polveri. La variante di questi macchinari più utilizzata per granulare è il topo *granulator*, ovvero un *ribbon blender* con la capacità di comprimere il contenuto. Comprimere la miscela umida durante il processo permette di controllare la dimensione dei granuli che si vengono a formare. Un'altra possibilità che fornisce il topo

granulator è di operare in sottovuoto, che permette la rimozione delle microscopiche bolle d'aria che possono rimanere dentro al granulo [129].

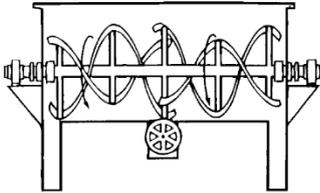


Figura 72 - Ribbon blender [129].

- **Planetary Mixer** (Figura 73). La planetaria consiste in un contenitore che viene riempito con la miscela di polvere ed un albero rotante a cui è attaccata la lama (o insieme di lame) che entra a contatto con il composto. La lama e l'albero ruotano in contemporanea, permettendo un impastamento più uniforme. Alle basse velocità si possono miscelare le polveri, alle alte velocità si impasta la massa umida. Lo svantaggio principale di questo metodo è la limitata dimensione dei lotti che possono essere processati [107].

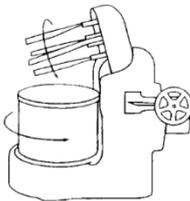


Figura 73 - Planetaria [107].

- **Screw Type Mixer**. Il miscelatore a vite senza fine, come visto nella sezione precedente, consiste in un contenitore a cono ribaltato, una o più viti che ruotano lungo il proprio asse e un albero che le sposta lungo il perimetro del cono [107].
- **Sigma Blade Mixer** (Figura 74). Il processo di granulazione può avvenire anche nei miscelatori con lame sigma, dove si ha una forma di compressione delle polveri. Proprio questa compressione permette un'equa distribuzione dell'umidità e quindi del legante. Siccome viene ridistribuita l'umidità già presente, per evitare che ce ne sia in eccesso, generalmente questo macchinario è preceduto da una fase di asciugatura.

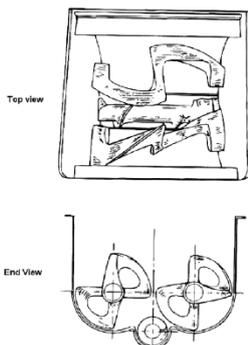


Figura 74 - Sigma blade granulator [107].

- **Rotating Shape Granulator** (Figura 75). I contenitori utilizzati in questi macchinari sono generalmente dei cilindri incrociati a V e sono gli elementi che mettono in moto la miscela. In questa tecnica a ruotare è infatti il contenitore, con una velocità periferica che varia tra i 72,2 ed i 106,7 m/min. Sullo stesso asse di rotazione del contenitore è presente un secondo dispositivo rotante, ovvero un albero con delle pale disposte in maniera tale da muovere la parte centrale della miscela e aumentare il livello di miscelazione e quindi di uniformità nella granulazione. L'albero centrale serve anche per l'aggiunta del liquido legante, mentre il contenitore può avere un sistema di riscaldamento o raffreddamento a seconda delle necessità della granulazione. Dal momento che questi macchinari possono operare

sottovuoto, si prestano alla *single pot granulation*, in quanto può essere eseguita anche l'asciugatura [129].

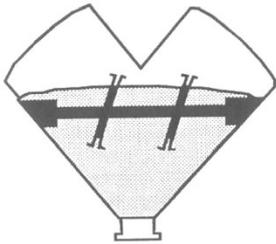


Figura 75 - Rotating shape granulator [129].

- **Fluid Bed Granulation** (Figura 76). Questa tecnica, conosciuta anche come *Top-Spray Granulation* [107], permette la creazione dei grani in un unico macchinario dove la soluzione legante viene spruzzata sopra un letto di polvere fluidificato. Esiste anche una variante, chiamata Wurser granulator in cui il liquido viene spruzzato dal basso. In generale il macchinario è formato da un ventilatore il cui flusso attraversa un contenitore cilindrico con una base che va a chiudersi a cono. Nel contenitore viene inserito il materiale da granulare che viene fluidificato dal getto d'aria proveniente dal fondo; dei filtri a manica in cima al cilindro impediscono la fuoriuscita di particelle nello scarico dell'aria. Le particelle così messe in moto vengono irrorate con la soluzione legante spruzzata da un ugello e cominciano il processo di granulazione. Una volta aggiunto il liquido necessario, il flusso d'aria non viene interrotto, così da permettere un'asciugatura in loco dei granuli [130]. Questa metodologia può essere utilizzata per produzioni a lotti ma anche per la produzione in continuo, con dei macchinari leggermente differenti: due valvole, corredate di appositi filtri, permettono l'ingresso e l'uscita in simultanea dalla camera di granulazione [107]. I granuli che vengono formati con questa tecnica sono più fini, omogenei (la distribuzione delle dimensioni è stretta), più porosi e meno densi, per cui risultano più facilmente comprimibili rispetto ai granuli ottenuti con HSWG [128].

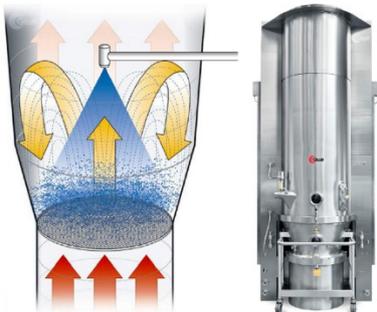


Figura 76 - Schema di un FBG e il Glat WSG Pro 200 [107].

- **Extrusion-Spheronization**. Questo processo porta alla formazione di pellet, ovvero di piccole sfere con ottime caratteristiche di flusso e di rilascio immediato o controllato. Questo è dato proprio dalla forma sferica che ha un rapporto area/volume molto basso rispetto alle polveri/granuli ottenuti con metodi alternativi: sono molto più facili ed economicamente convenienti da ricoprire con i materiali necessari per uno scioglimento programmato all'interno dell'apparato digerente. Dal momento che i pellet vengono tipicamente inseriti nelle capsule, si prestano alla formazione di medicinali con diversi componenti incompatibili tra loro. Infatti, anziché formare un unico granulo con tutti i principi attivi e gli eccipienti necessari, si possono creare differenti pellet e unirli nella capsula con il rapporto desiderato [129]. Ottenuta la massa umida (utilizzando dispositivi precedentemente visti), rimangono due sole fasi:
 - **Extrusion**. Questa fase consiste nel trasformare la massa umida in unità a forma di bacchetta tramite estrusione. Esistono differenti tipologie di estrusori, tutti però caratterizzati dal formare in uscita una serie di particelle cilindriche dallo stesso diametro. Si possono identificare tre macrocategorie di estrusori: quelli a vite, quelli a gravità e quelli a pistone. Gli estrusori a vite possono avere 1 o 2 viti senza fine che trasportano e comprimono il materiale umido fino ad una zona di estrusione. Generalmente quelli a 2 viti hanno un

throughput più alto rispetto a quelli ad 1 vite, che però comprimono e compattano di più la massa umida, aumentandone quindi la densità. A causa delle forti pressioni che entrano in gioco, l'utilizzo degli estrusori a vite porta ad un riscaldamento del prodotto che, a seconda dei casi, può compromettere il farmaco. Questo problema non esiste negli estrusori a gravità in cui lo spostamento della massa umida fino alla zona di estrusione non avviene tramite spinte meccaniche. Questa tipologia di estrusore, infatti, consiste in un contenitore che per gravità fa scivolare la miscela su dei componenti rotanti che solo in quel punto la comprimono e la estrudono. Questi componenti possono essere cilindri, di cui uno forato sulla superficie e cavo al cui interno si raccoglie il prodotto, oppure delle ruote dentate forate alla base del dente, in modo che il dente della ruota dentata opposta comprima il prodotto attraverso il foro. Una terza via è la presenza di un insieme di pale rotanti che spingono il prodotto verso una superficie forata. Infine, gli estrusori a pistone comprimono ed estrudono il prodotto in una sola camera, ma causa dell'andamento discontinuo hanno una bassa produttività. Vengono utilizzati solo durante le fasi di sviluppo di nuove formule (Figura 77).

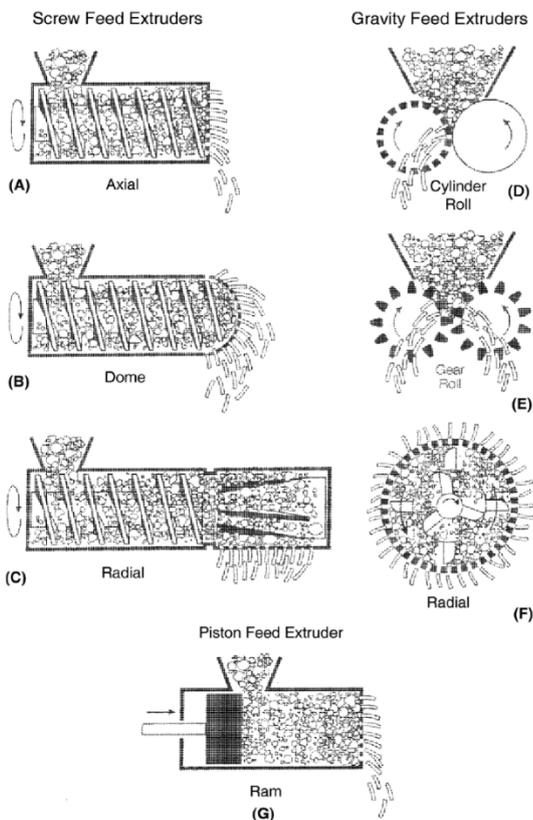


Figura 77 - Tipologie di estrusori [129].

- **Spheronization.** La quarta fase di formazione dei pellet è proprio la sferonizzazione, ovvero la trasformazione degli estrusi in piccole sfere. Il macchinario consiste in un contenitore cilindrico alla cui base si ha un piatto rotante. Gli estrusi che vengono inseriti all'interno del macchinario entrano a contatto con il piatto e, quando questo comincia a ruotare, vengono messi in moto. Le forze centrifughe che si sviluppano portano le varie particelle a scontrarsi tra di sé e con le pareti del contenitore facendole frammentare fino ad ottenere una forma sferica. Il piatto rotante ha una superficie scanalata che permette un moto migliorato delle particelle (Figura 78). Mentre il processo di estrusione è svolto in continuo, il processo di sferonizzazione avviene solitamente a lotti. Per superare questa incongruenza nel ritmo di produzione esistono 2 sistemi: shuttle e a cascata. Il sistema a shuttle utilizza due sferonizzatori in parallelo: uno viene riempito mentre l'altro è a metà processamento, così da averne sempre uno che lavora. Il sistema a cascata invece utilizza uno sferonizzatore

modificato con dei fori di scarico sul contenitore, al di sopra del disco rotante. Il materiale non ancora trasformato in sfera, e quindi più pesante, tende a rimanere sul fondo; le sfere già formate invece risalgono le pareti del contenitore fino ad uscire dagli scarichi. Ovviamente l'uscita dipende dal volume di materiale presente, per cui a regolare il tasso d'uscita è direttamente il tasso di ingresso di miscela nel contenitore [129].

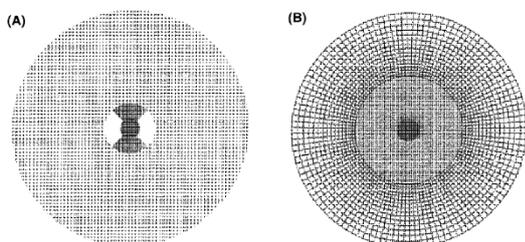


Figura 78 - Pattern delle scanalature [129].

- **Twin screw granulation.** Questo processo è in grado di lavorare in continuo e consiste nell'utilizzo di due viti particolari che ruotano in parallelo dentro ad un cilindro. Il funzionamento consiste nel trasporto della miscela di farmaco e legante (liquido o solido) grazie alla rotazione delle viti che impartiscono anche le forze di compressione necessarie per la granulazione. Le viti sono prodotte con tolleranze molto strette e lo spazio che intercorre tra le due è il minimo necessario per permettere il movimento. Questo fa sì che una vite pulisca l'altra sfiorandone la superficie in continuo. A causa delle forze di attrito che si generano si ha un innalzamento della temperatura che deve essere controllato. Per questa motivazione il cilindro può essere raffreddato o riscaldato a seconda delle necessità. In alcune varianti è possibile che si debba somministrare ulteriore calore al fine di sciogliere un legante solido, ottenendo per cui una sorta di *melt granulation* [131].
- **Steam granulation.** In questa tecnica al posto dell'acqua è utilizzato come legante il vapore che, avendo un volume specifico maggiore rispetto quello dell'acqua, riesce a diffondersi meglio nelle polveri [132]. Simile alla tecnica di *fluid bed granulation*, un getto di vapore (intorno ai 150°C [133]) viene proiettato sulle polveri fluidificate della miscela [134]. Un'alternativa è l'utilizzo del vapore nei processi di HSWG e LSWG: i meccanismi rimangono invariati, per cui sono sempre presenti le giranti; l'unica differenza è che la soluzione legante è stata sostituita da acqua allo stato gassoso.
- **Melt granulation.** Questa tecnica è una variante della *High shear wet granulations* in cui, al posto di solventi liquidi, vengono aggiunti solventi solidi. Per questa motivazione è molto utilizzato per i composti poco solubili in acqua e che quindi formerebbero un solido disperso in un liquido anziché grani [125]. Questa tecnica viene chiamata anche granulazione termoplastica, in quanto il processo è ottenuto aggiungendo al composto un legante che a temperatura ambiente è solido, ma che fonde a temperature relativamente basse (dai 50°C ai 100°C). Durante la miscelazione il legante viene riscaldato sia dall'azione dell'attrito con la polvere circostante, sia dal calore che viene somministrato attraverso la superficie del contenitore di miscelazione. Una volta scaldato, questo legante diventa un fluido adatto alla granulazione ed il granulo viene formato con la stessa procedura della HSWG, con l'aggiunta però di una fase di raffreddamento necessaria per la solidificazione delle componenti fuse [107]. La formazione del granulo è differente rispetto a quanto visto per solventi liquidi a temperatura ambiente. Le possibilità, a seconda delle caratteristiche e le quantità dei materiali, sono due: distribuzione ed immersione (Figura 79).

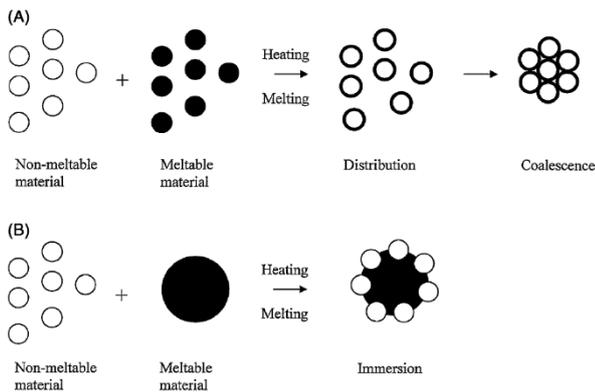


Figura 79 - Distribuzione e immersione [107].

- Moisture Activated Dry Granulation (MADG).** La MADG è un processo che permette di creare dei granuli senza la necessità di asciugarli e di macinarli. È diviso in due principali fasi, quella di agglomerazione e quella di distribuzione/assorbimento dell'umidità. Durante la prima fase il farmaco è miscelato insieme al legante (50-80% del volume), anch'esso in polvere, uniformando il tutto. Mentre il composto viene mescolato, viene spruzzata da alcuni ugelli una piccola quantità d'acqua (1-4% del peso) che inumidisce il legante rendendolo viscoso. Il prodotto continua ad essere mescolato al fine di formare i granuli, ma siccome l'ammontare d'acqua immessa è bassa, non si vengono a formare grumi di dimensioni eccessive: le dimensioni delle particelle che si formano sono tra i 150 ed i 500 micrometri [107]. Nella fase di distribuzione/assorbimento dell'umidità vengono aggiunti alla miscela alcuni agenti assorbenti, come cellulosa microcristallina o silice (diossido di silicio). Questi elementi permettono una più omogenea distribuzione dell'umidità all'interno del composto, in quanto entrando a contatto con i grumi più umidi, gli assorbenti estraggono l'acqua, che però viene ceduta in percentuale ai granuli più secchi a causa del gradiente. Il risultato è una miscela più uniforme e più asciutta [125]. Grazie a questa distribuzione di umidità le dimensioni dei granuli tendono ad essere simili: non è quindi necessaria la fase di macinazione per ridurre i granuli eccessivi e, ovviamente, non è necessaria nemmeno la fase di asciugatura [135].
- Thermal Adhesion Granulation Process (TAGP).** Questa tecnica prevede l'aggiunta di una piccolissima quantità d'acqua rispetto agli altri metodi di *wet granulation*. Con questa tecnica il legante viene inumidito con acqua o etanolo in minima quantità e viene aggiunto ai principi attivi e agli eccipienti. Successivamente vengono messi in un ambiente chiuso dove vengono riscaldati con una temperatura che va tra i 90°C ed i 105°C nel caso dell'acqua o tra i 70°C ed i 90°C nel caso dell'etanolo [132]. Questo processo avviene mentre la miscela sta venendo mescolata (tra i 3 ed i 20 minuti a seconda dei componenti) all'interno di un contenitore rotante, ottenendo così la formazione dei granuli. A causa della ridotta quantità di liquido introdotta non sono necessarie né la fase di asciugatura, né la fase di macinazione in quanto i granuli non tendono a crescere eccessivamente, ma deve essere presente la fase di raffreddamento [133].
- Foam Granulation.** Questa tecnica prevede l'aggiunta di leganti sotto forma di una schiuma acquosa. Questa, ottenuta mescolando con un getto d'aria un particolare legante polimerico, ha la consistenza di una schiuma da barba ed ha il vantaggio di avere una maggiore superficie di contatto rispetto al semplice liquido, occupando infatti più volume. La diffusione e la distribuzione del legante risultano quindi più efficienti, in quanto le particelle vengono ricoperte velocemente dalla schiuma. Questo processo non richiede strumentazioni particolari, infatti basta modificare lo stato della soluzione nelle metodologie di *wet granulation* più diffuse, come la HSWG, la LSWG o la FBG [133]. Siccome non si ha un liquido che viene spruzzato sulla miscela, non sono necessari degli ugelli, elementi critici che spesso si otturano a causa della polvere [132].
- Freeze Granulation** (Figura 80). Questo processo prevede di spruzzare su una vasca di azoto liquido la massa umida o una sospensione formata dalle polveri del farmaco e dal solvente. Le gocce vengono istantaneamente congelate, formando così i granuli al cui interno è ancora presente il solvente. Una fase di liofilizzazione (crioessiccamento) procede quindi a far sublimare il solvente, ottenendo così i

granuli definitivi [134]. Il vantaggio è nella totale assenza di segregazione del solvente nel granulo, cosa che invece avviene nei metodi tradizionali. Inoltre, controllando la quantità di solidi nella soluzione iniziale, è possibile regolare la densità dei granuli. I solventi utilizzati possono essere recuperati sotto forma di condensa, riducendo al minimo gli sprechi. La dimensione dei granuli viene gestita regolando la dimensione delle gocce che vengono fatte cadere nel bagno di azoto liquido [133].

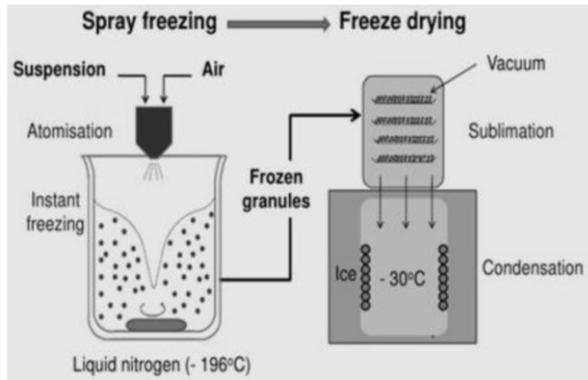


Figura 80 - Schema del processo di freeze drying granulation [133].

- **Dry Granulation.** Il processo di *dry granulation*, a differenza della *wet granulation*, non usa l'umidità o il calore per ottenere i granuli. Si individuano due metodi nel settore farmaceutico, lo *slugging* e la *roller compaction*, entrambi basati sull'applicazione di notevoli pressioni (30-70 bar) alla miscela di principi attivi ed eccipienti che alle volte può necessitare anche di materiali leganti allo stato solido [129]. La caratteristica principale di questo processo è la possibilità di granulare quelle sostanze sensibili all'umidità e al calore che nei processi di *wet granulation* si danneggerebbero. Inoltre, dal momento che le fasi di asciugatura non sono necessarie, questi processi risultano meno energivori.
 - **Slugging.** Lo *slugging* è un processo ormai caduto in disuso. Si tratta della compressione della polvere in alcuni stampi: le pressioni raggiunte sono in genere intorno alle 4-6 tonnellate, con un ritmo di 10-30 battute al minuto. Ovviamente queste grandezze dipendono dalle proprietà fisiche richieste al prodotto e dalle caratteristiche dei macchinari. Si possono identificare differenti svantaggi: a causa delle componenti meccaniche mobili, l'usura porta a frequenti manutenzioni e sostituzioni; si ha poco controllo sul processo; poche economie di scala; basso throughput; inquinamento acustico e dell'aria; energivoro in confronto all'RCDG [129].
 - **Roll Compaction Dry Granulation** (Figura 81). Questo processo di granulazione è migliore rispetto allo *slugging* in quanto è legato ad una maggiore capacità produttiva, ad un maggior controllo dei parametri operativi e ad una quantità minima di lubrificante in polvere usato. È un processo in continuo che consiste nell'utilizzo di due rulli rotanti che si occupano di comprimere la miscela. I rulli possono avere una superficie liscia, che porta alla formazione di fiocchi o fogli di polvere compressa, o con delle particolari tasche, che portano alla formazione di mattoncini. Il prodotto generato in questo modo deve poi essere macinato al fine di raggiungere le dimensioni desiderate.

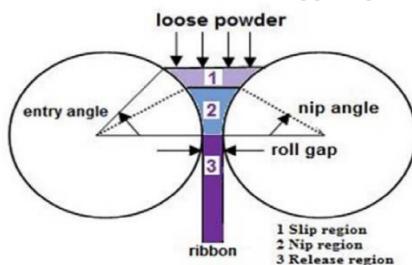


Figura 81 - Le differenti zone nella Roll Compaction [129].

Affinché il processo abbia successo è necessario che venga sempre fornita polvere nella giusta quantità e che la forza di compressione sia distribuita uniformemente su tutta la massa che viene processata.

Esistono differenti varianti dei macchinari utilizzati per questo processo, a seconda delle necessità e dei requisiti del prodotto finale. Se i rulli sono fissi, la miscela subirà una forza di compressione dipendente dalla quantità che viene processata in quel momento. Se uno dei due rulli può muoversi allora le forze in gioco tengono a rimanere più costanti nel tempo, anche al variare della quantità di miscela inserita.

Inoltre, le dimensioni dei rulli sono variabili, il che ha diretta conseguenza sull'angolo di contatto α : la *compaction zone* aumenta e con essa l'aumento di densità del prodotto finito. Anche l'inclinazione del flusso in ingresso del materiale può variare.

Questo processo porta però alla formazione di grandi quantitativi di polveri residue. Alcuni produttori hanno superato questo problema utilizzando dei rulli concavi con le estremità a contatto, in modo da sigillare la zona ed evitare fuoriuscite di materiale. Altrimenti si utilizzano sistemi di areazione che recuperano le polveri disperse (*Pneumatic Dry Granulation* [136]). Il riciclo di quest'ultime è spesso evitato, in quanto le proporzioni dei principi attivi ed eccipienti potrebbero non essere corrette. Inoltre, procedere nuovamente con la compressione potrebbe portare a compresse fragili, ottenendo quindi il fenomeno di *capping*: la compressa si spezza perdendo la superficie superiore [137].

Si riepilogano gli interventi tecnologici reperiti per ridurre i consumi energetici relativi alla granulazione.

- **Interventi *energy-saving* riguardanti la granulazione di compresse:**

- Installazione di un macchinario per l'HSWG verticale [107], che permette di svolgere all'interno del macchinario anche la fase di asciugatura riducendo il consumo energetico annesso.
- Installazione di un macchinario per l'HSWG orizzontale [107]. La posizione orizzontale della camera di granulazione richiede minori consumi energetici necessari per permettere la granulazione omogenea lungo la macchina.
- Installazione di una soluzione *single pot* per la granulazione [107].
- Installazione di un macchinario per l'HSWG per il processamento in continuo [107]. La produzione in continuo permette di ridurre il consumo di risorse ed energia rispetto alla produzione a lotti.
- Installazione di un *ribbon blender* [129]. L'aggiunta di piccole quantità di liquido permette di processare sia la fase di miscelazione che quella di granulazione riducendo i consumi energetici che si avrebbero dall'applicazione separata delle due lavorazioni.
- Installazione di un *topo-granulator* [129]. Simile ai vantaggi dovuti all'installazione di un *ribbon blender* con la possibilità di eseguire anche la fase di compressione riducendo i consumi energetici che si avrebbero dall'applicazione separata delle lavorazioni.
- Installazione di un *planetary mixer* [107]. La rotazione della lama permette di processare i composti in maniera più uniforme in modo da limitare lavorazioni aggiuntive per granuli fuori specifiche risparmiando i consumi annessi.
- Installazione di un miscelatore a vite [107]. Tramite l'installazione di più viti rotanti in modo assiale è possibile efficientare il processo di granulazione in termini di produzione e consumi energetici, rispetto all'uso di una singola vite.
- Installazione di un miscelatore a lame sigma [129]. Il processo permette di effettuare sia la fase di granulazione che quella di compressione riducendo i consumi energetici che si avrebbero dall'applicazione separata delle due lavorazioni.

- Installazione di un granulatore "*rotating shape*" [129]. Il duplice movimento di rotazione da parte del contenitore e dell'albero aumenta il livello di miscelazione e l'uniformità nella granulazione. In questo modo è possibile ridurre le rilavorazioni e quindi i consumi energetici non necessari per processare composti difettosi e fuori dalle specifiche.
- Installazione di un granulatore "*rotating shape*" in modalità *single pot* [129]. La possibilità di operare sottovuoto permette di eseguire oltre alla fase di granulazione anche quella di asciugatura riducendo i consumi energetici che si avrebbero dall'applicazione separata delle due lavorazioni.
- Installazione di un granulatore a letto fluido [128] [130]. Permette di creare granuli di composto tramite l'utilizzo di leganti e non per azione meccanica. In questo modo viene ridotto il consumo energetico dovuto alla movimentazione o rotazione degli elementi.
- Installazione di un granulatore Wurser [107]. Il processo permette di eseguire sia la fase di granulazione che quella di asciugatura riducendo i consumi energetici che si avrebbero dall'applicazione separata delle due lavorazioni.
- Installazione di un granulatore a letto fluido continuo [107]. Oltre a migliorare la produttività rispetto al processo per lotti è possibile ottenere dei composti più facilmente comprimibili, riducendone i consumi energetici.
- Installazione di un estrusore assiale ad 1 vite [129]. Generalmente quelli a 1 vite hanno un *throughput* più basso rispetto a quelli ad 2 vite, ma compattano meno la massa umida, mantenendo contenuta la sua densità e, dunque, implicando minori pressioni che entrano in gioco nel processo. Le minori pressioni e forze possono implicare minori consumi energetici, inoltre evitano riscaldamenti del prodotto che, a seconda dei casi, potrebbero compromettere il farmaco, implicando scarti energetici relativi alla produzione di pezzi che poi devono essere scartati.
- Installazione di un estrusore assiale a 2 viti [129]. Gli estrusori a 2 viti hanno un *throughput* più alto rispetto a quelli ad 1 vite; dunque, a parità di tempo di accensione dell'impianto producono di più, ottimizzando i consumi energetici.
- Installazione di un estrusore radiale ad 1 vite [129]. Generalmente quelli a 1 vite hanno un *throughput* più basso rispetto a quelli ad 2 vite, ma compattano meno la massa umida, mantenendo contenuta la sua densità e, dunque, implicando minori pressioni che entrano in gioco nel processo. Le minori pressioni e forze possono implicare minori consumi energetici, inoltre evitano riscaldamenti del prodotto che, a seconda dei casi, potrebbero compromettere il farmaco, implicando scarti energetici relativi alla produzione di pezzi che poi devono essere scartati.
- Installazione di un estrusore radiale a 2 viti [129]. Gli estrusori a 2 viti hanno un *throughput* più alto rispetto a quelli ad 1 vite; dunque, a parità di tempo di accensione dell'impianto producono di più, ottimizzando i consumi energetici.
- Installazione di un estrusore a gravità a cilindri [129]. Il processo grazie all'azione della gravità non necessita l'utilizzo di forze meccaniche da imprimere al composto, riducendo i consumi energetici annessi.
- Installazione di un estrusore a gravità a ruote dentate [129]. Come per l'estrusore a gravità a cilindri, ma con il vantaggio che la combinazione di ruote dentate permette di precomprimere il composto riducendo il consumo energetico nella fase successiva di compressione.
- Installazione di un estrusore a gravità radiale [129]. Il processo grazie all'azione della gravità non necessita l'utilizzo di forze meccaniche da imprimere al composto, riducendo i consumi energetici annessi.

- Installazione di un estrusore a pistone [129].
- Installazione di uno sferonizzatore a lotti [129].
- Installazione di un sferonizzatore in continuo [129].
- Installazione di un granulatore a viti gemelle [131]. Il movimento di rotazione delle viti permette di eseguire sia il processo di granulazione e che quello di pulizia relativa di residui tramite strofinio, riducendo l'attività di pulizia e i consumi annessi.
- Installazione di un granulatore a letto fluido con vapore [132] [133] [134]. L'utilizzo di vapore invece che di acqua garantisce una maggiore diffusione migliorando il processo di granulazione. In questo modo è possibile ridurre le rilavorazioni e quindi i consumi energetici non necessari per processare composti difettosi e fuori dalle specifiche.
- Installazione di un macchinario per l'HSWG con vapore [132] [133] [134].
- Installazione di un macchinario per la LSWG con vapore [132] [133] [134]
- Installazione di un macchinario per l'HSWG con pareti riscaldabili [107]. La creazione dei granuli avviene senza il processo di asciugatura e di macinazione, riducendo notevolmente i consumi energetici.
- Installazione di un macchinario per l'HSWG adibito al MADG [107] [135]. La creazione dei granuli avviene senza il processo di asciugatura e di macinazione, riducendo notevolmente i consumi energetici.
- Installazione di un macchinario per la LSWG adibito al MADG [107] [135]. La creazione dei granuli avviene senza il processo di asciugatura e di macinazione, riducendo notevolmente i consumi energetici.
- Installazione di un macchinario per svolgere il TAGP [132] [133]. Il processo permette di creare granuli di composto e di evitare la fase di asciugatura e di macinazione riducendo il consumo energetico annesso a tali lavorazioni.
- Installazione di un granulatore a letto fluido con schiuma [132] [133]. L'utilizzo di schiuma invece che di acqua permette di migliorare la diffusione e distribuzione del legante. In questo modo è possibile ridurre le rilavorazioni e quindi i consumi energetici non necessari per processare composti difettosi e fuori dalle specifiche.
- Installazione di un macchinario per l'HSWG con schiuma [132] [133]. L'utilizzo di schiuma invece che di acqua permette di migliorare la diffusione e distribuzione del legante. In questo modo è possibile ridurre le rilavorazioni e quindi i consumi energetici non necessari per processare composti difettosi e fuori dalle specifiche.
- Installazione di un macchinario per la LSWG con schiuma [132] [133]. L'utilizzo di schiuma invece che di acqua permette di migliorare la diffusione e distribuzione del legante. In questo modo è possibile ridurre le rilavorazioni e quindi i consumi energetici non necessari per processare composti difettosi e fuori dalle specifiche.
- Installazione di una vasca per bagno in azoto liquido ed una camera di condensazione [133] [134]. Il processo permette di evitare totalmente la segregazione dei componenti riducendo la produzione di prodotti non conformi e i consumi annessi a tali rilavorazioni.
- Installazione di una pressa RCDG a rulli fissi [138].
- Installazione di una pressa RCDG a rulli mobili [138].
- Installazione di una pressa RCDG a rulli concavi [138].
- Installazione di una pressa RCDG a rulli a tasche [138].
- Installazione di un macchinario per la *Pneumatic dry granulation* [138].

2.4.1.3 Produzione di compresse – Macinazione

La fase di **macinazione** è analoga a quella già descritta nel settore di produzione di principi attivi. Pertanto, si rimanda alla lettura del paragrafo 2.3.5 per lo studio di questa fase di processo e degli interventi tecnologici reperiti per ridurre i consumi energetici nella macinazione di compresse.

2.4.1.4 Produzione di compresse - Asciugatura

La fase di **asciugatura** è analoga a quella già descritta nel settore di produzione di principi attivi. Pertanto, si rimanda alla lettura del paragrafo 2.3.2 per lo studio di questa fase di processo e degli interventi tecnologici reperiti per ridurre i consumi energetici relativi all'asciugatura di compresse.

2.4.1.5 Produzione di compresse - Compressione

La fase di **compressione** per la produzione di compresse è rimasta la stessa dal momento della loro invenzione: compressione del composto all'interno dello stampo grazie alla pressione di un pistone. Le variazioni che esistono nei macchinari che svolgono questa fase di processo sono inerenti alla quantità e alle dimensioni delle compresse che entrano nello stampo, alle pressioni esercitate ed alla pulibilità. I macchinari per le compresse sono divisi in due principali categorie in base all'allestimento: macchinari a un singolo set di pistoni e stampo (chiamato stazione) e macchinari con differenti stazioni. I primi sono utilizzati principalmente per produzioni in piccola scala, come quelle necessarie nelle fasi di sviluppo; i secondi sono utilizzati invece nei veri e propri impianti produttivi. Si possono identificare due tipologie di allestimenti:

- Tipo B, adatto per la produzione di compresse fino ai 16/18 mm di diametro. Possono essere utilizzati due tipi di stampo: il B piccolo che esegue compresse fino ai 9/11 mm ed il B grande che porta fino al limite massimo. I macchinari che possono utilizzare questi allestimenti sviluppano una pressione massima di 6,5 tonnellate.
- Tipo D, adatto per la produzione di compresse fino a 25,4mm. I macchinari che possono utilizzare questo allestimento sviluppano una pressione massima di 10 tonnellate.

Ottenuti quindi i granuli delle giuste dimensioni dalle fasi precedenti, è possibile imprimerli delle forti pressioni all'interno di uno stampo per formare la compressa. La compattazione è definibile come la compressione e la consolidazione di un solido in particelle come risultato dell'applicazione di una forza [139]. La fase di compressione viene svolta su un macchinario dotato di una ruota con vari fori (stampo) e due pistoni. L'intera sequenza è caratterizzata in realtà da una serie di sottofasi necessarie per ottenere un prodotto finito di qualità accettabile:

- **Filling.** Il pistone inferiore è inserito nella parte inferiore del foro presente sulla ruota, formando quindi un incavo in cui viene immessa la miscela granulata. La polvere viene versata dall'alto riempiendo interamente la cavità e creando un cumulo nella parte superiore del disco. Il volume della cavità, e quindi l'altezza del pistone inferiore, deve essere adeguatamente studiato al fine di garantire un corretto dosaggio del medicinale.
- **Metering.** Uno strumento liscio viene passato sulla superficie superiore del disco per rimuovere la polvere in eccesso. Questo permette di ottenere una quantità di polvere pari al volume della cavità.
- **Compression.** Il pistone superiore viene fatto calare all'interno dello stampo per comprimere la polvere al suo interno. La pressione che viene esercitata dipende dalla tipologia e dalla quantità di polvere, mentre la distanza che rimane tra il pistone inferiore ed il fondo corsa del pistone superiore dipende dalle dimensioni e la durezza della pasticca che si vuole ottenere [140]. Internamente a questa fase è compresa la decompressione della miscela, che, a seconda dei componenti, può portare ad un ritorno elastico che fa riacquisire volume. A seconda della velocità di decompressione si può riscontrare un'eventuale rottura della compressa per piani orizzontali, causata dalle forze di adesione della miscela al pistone superiore [139].

- **Ejection.** Il pistone superiore, dopo aver esercitato la dovuta pressione, viene ritirato, mentre il pistone inferiore viene spinto dal basso in modo da sollevare ed estrarre la pasticca appena formata dallo stampo. Le forze impresse al pistone devono essere superiori alle forze di adesione che si sviluppano tra la miscela compressa e le pareti dello stampo [139]. Una volta estratta la pasticca, uno strumento apposta spinge lateralmente la compressa facendola cadere in un raccogliatore apposito. Il pistone, così liberato, può tornare in posizione nello stampo formando nuovamente la cavità di raccolta della miscela.

La pulizia di questo macchinario è complessa e deve assicurarsi che gli accumuli indesiderati di polvere siano minimi al fine di ridurre abrasioni sulle parti meccaniche mobili e limitare i rischi di esposizione degli operatori ai farmaci. I macchinari moderni riescono, tramite sistemi di controllori, a comprendere in tempo reale la qualità del materiale processato. Ad esempio, fissata la forza di compressione da applicare e la distanza tra i due punzoni, se viene registrata una variazione di queste due grandezze allora si ha che la quantità di polvere presente nella cavità è differente da quella richiesta, portando così allo scarto immediato della compressa difettata. Esistono anche numerosi componenti il cui funzionamento è successivo alla fase di compressione:

- **Tablet Deduster:** sistema che tramite una vibrazione ed il sottovuoto rimuove residui di polvere dalle compresse.
- **Metal Detector:** evita la presenza di residui metallici dovuti all'abrasione degli stampi o dei pistoni.
- **Tablet Weight Checker:** un sistema di pesatura automatica delle compresse in uscita e di scarto di quelle che non rientrano nelle specifiche [140].

Una variante della compressione è la **Direct Compression**. Con il termine *direct compression* si indica il processo di compressione di una miscela direttamente in pasticca, senza passare per le fasi di granulazione. Non si deve pensare però che questa tecnica sia semplicemente l'omissione di un passaggio alle differenti operazioni da svolgere. Necessita infatti di un'attenta analisi delle materie prime, in quanto devono possedere determinate caratteristiche per poter essere processate. La fase di granulazione, infatti, permette di trasformare le materie in ingresso in un prodotto di più facile manipolazione, così da rendere meno complessa la fase di compressione, in quanto potranno essere processati anche i granuli di quei materiali che sarebbero altrimenti non adatti alla *direct compression* [140]. Le fasi del processo di *direct compression* sono in numero ridotto e accorciano notevolmente il tempo di lavorazione complessivo. In sostanza i materiali in ingresso vengono inseriti con le giuste proporzioni all'interno di un mixer e qui vengono miscelati insieme ad un lubrificante. La durata di questa fase dipende dai principi attivi e dagli eccipienti. Successivamente, tramite una tramoggia, la miscela viene inserita in una pressa. Questa, a seconda che il processo sia discreto o continuo, ha differenti forme. Nel caso in cui sia in continuo si ha un disco rotante con degli incavi in grado di ricevere la miscela nella giusta quantità e un pistone che applica la forza necessaria a compattarla [122]. Di seguito, si riepilogano gli interventi tecnologici reperiti per ridurre i consumi energetici relativi alla compressione di compresse.

- **Interventi energy-saving riguardanti la compressione:**
 - Installare una pressa con allestimento B [122].
 - Installare una pressa con allestimento D [122].
 - Installare un *tablet deduster* [140]. L'azione congiunta di vibrazioni e sottovuoto permette di eliminare accumuli indesiderati di polveri e quindi scartare compresse difettate prima di ulteriori processi di lavorazione e consumi energetici annessi.
 - Installare un *metal detector* [140]. Il controllo e la rimozione di residui metallici dovuta all'abrasione dei macchinari permette di limitare la produzione di compresse difettate che necessitano ulteriori processi di rilavorazione e consumi energetici annessi.

- Installare un sistema di controllo del peso delle compresse [140]. Il controllo permette di scartare le compresse che non rispettano specifiche tecniche a monte di ulteriori processi di lavorazione e consumi energetici annessi.
- Installare una pressa (produzione a lotti) [141]. La distribuzione di pressione su produzione a lotti permette di realizzare un numero di compresse più alto e efficientare la produzione.
- Installare una pressa su disco forato rotante (produzione in continuo) [141]. La produzione in continuo permette di ridurre il consumo di energia rispetto alla produzione a lotti.

2.4.1.6 Produzione di compresse - Copertura

Per molte compresse è necessaria anche la fase di **coating**. Infatti, molte compresse contengono dei principi attivi il cui sapore deve necessariamente essere mascherato, oppure che richiedono specifici coefficienti di rilascio. Di seguito le procedure utilizzate.

- **Sugar Coating.** Un metodo tradizionale e ormai quasi completamente abbandonato prevede di applicare una copertura in zucchero intorno alla compressa. Questo procedimento prevede l'aggiunta di uno sciroppo di zucchero (in genere colorato) in dei contenitori sferoidali di rame o acciaio messi in rotazione, al cui interno vi sono le compresse. Lo sciroppo viene fissato sulle compresse grazie ad un getto d'aria calda che insiste all'interno della contenitore. Le compresse che escono da questo processo sono formate da zucchero per il 60% del peso [122].
- **Film Coating.** Anziché lo zucchero, il cui volume comporta un aumento delle dimensioni delle compresse non necessario, possono essere utilizzati delle soluzioni in cui sono disciolti polimeri in grado di formare dei film protettivi. La tipologia di polimero viene scelta a seconda del tasso di dissoluzione desiderato. Esistono differenti tipologie di macchinari per portare a termine questo processo.
 - **Pellegrini System.** Un contenitore cilindrico rotante, tradizionalmente utilizzato per il sugar coating, dotato di deflettori interni che distribuiscono maggiormente il flusso di soluzione coprente. Inoltre, il macchinario può essere chiuso, da cui deriva un minore rischio di contaminazione delle compresse e per gli operatori [142]. La capacità di questi macchinari varia tra i 10 kg (per gli utilizzi in laboratorio) ai 1000 kg.
 - **Immersion-Sword System** (Figura 82). Al contenitore cilindrico tradizionale viene aggiunta una spessa lama forata che va ad immergersi nel letto di compresse e da cui esce sotto forma di spray la soluzione coprente e successivamente anche l'aria riscaldata per l'asciugatura. Questo sistema permette una migliore distribuzione della soluzione coprente [142].

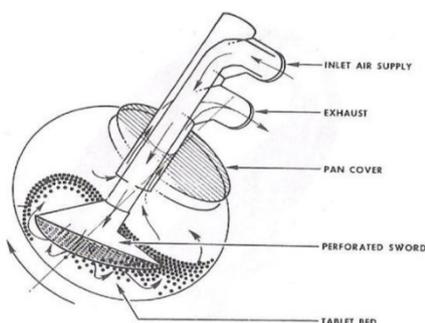


Figura 82 - Schema di un immersion-sword system [142].

- **Immersion-Tube System.** Variante dell'immersion sword system, in cui la lama perforata viene sostituita da un tubo cilindrico [142].
- **Accela-Coata** (Figura 83). Questo macchinario è un'innovazione proposta da Eli Lilly dei classici contenitori circolari rotanti. Il letto del contenitore rotante è forato, il che permette di ottenere un flusso continuo d'aria riscaldata che attraversa l'insieme di compresse, per

velocizzare l'asciugatura [142] e che non ha contatti con l'ambiente esterno, garantendo quindi una maggiore sicurezza [143].

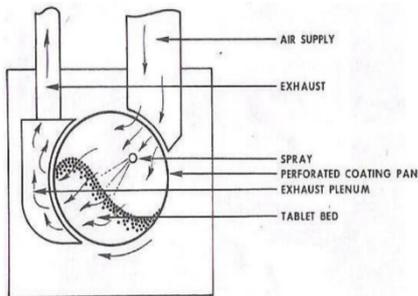


Figura 83 - Schema di un Accela-Coata [142].

- **Driacoater** (Figura 84). Un tamburo in rotazione ha al proprio interno delle alette forate da cui passa il flusso di aria calda. L'ugello spray della soluzione coprente è vicino all'asse di rotazione del tamburo, luogo in cui si ha l'uscita del flusso d'aria [142].

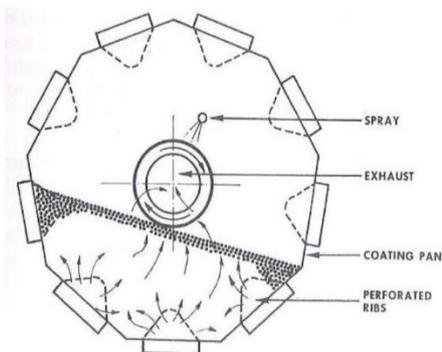


Figura 84 - Schema di un driacoater [142].

- **Glatt Coater**. Macchinario in cui il fondo della camera è traforato e consente il passaggio del flusso d'aria riscaldato in direzione opposta a quella tradizionale, ovvero dal basso verso l'alto [142].
- **Fluidized Bed Coating**. Utilizzando il principio di fluidizzazione delle polveri già visto nella fase di granulazione, il letto di compresse viene fluidizzato con un getto d'aria proveniente dal fondo di una camera cilindrica ad asse verticale. Dall'alto viene continuamente spruzzata tramite alcuni ugelli la soluzione coprente che, grazie al flusso fluidizzante, si asciugherà velocemente sulle compresse. È un processo molto efficiente [142].
- **Vacuum Film Coating (VFC)**. Le compresse vengono immerse in un contenitore con delle intercapedini nelle pareti al fine di permettere il riscaldamento del contenuto. Inoltre, il contenitore è dotato di un sistema di sottovuoto. La soluzione coprente viene quindi spruzzata tramite un airless spray system e viene distribuita sulle varie compresse tramite la rotazione del contenitore. L'asciugatura avviene all'interno dello stesso macchinario. Questo metodo è adatto per tutte quelle sostanze sensibili all'ossidazione [144].
- **Electrostatic Coating**. Questo metodo prevede di sfruttare delle forze elettrostatiche per far aderire il materiale coprente alla compressa in modo uniforme. Ci sono due varianti di questa metodologia:
 - **Corona charging**. Il materiale coprente viene spruzzato sulle compresse tramite un sistema sulla cui punta è presente un elettrodo a forma di ago. Le particelle in uscita quindi si caricano negativamente e si depositano sulle compresse collegate alla terra.
 - **Tribo charging**. Il materiale coprente viene caricato per attrito e non con campo elettrico. Nel depositarsi sulle compresse, le particelle cariche si respingono a vicenda, evitando quindi un ispessimento eccessivo del film protettivo [144]. A seconda delle caratteristiche della compressa può

essere necessario preparare le compresse spruzzandoci sopra un liquido plasticizzante per aumentarne la conduttività [145]. Sarà necessario poi un aumento della temperatura al fine di fissare la polvere depositata sulla compressa [142].

- **Magnetically Assisted Impaction Coating (MAIC).** In questa tipologia di macchinari si ha la camera immersa in un campo magnetico. Questa viene riempita con le compresse, la polvere coprente ed anche delle sfere ausiliarie di materiale ferromagnetico. All'interno del campo magnetico le sfere si muoveranno ad alta velocità, rendendo quasi fluido il letto. Gli urti che le sfere avranno con gli agglomerati di polvere coprente li frammenteranno, e gli urti che questi frammenti avranno con le compresse porteranno al coating. Gli urti che possono avvenire sono molteplici e possono insistere anche con le pareti della camera. Questa è una metodologia di dry coating, ovvero che non richiede l'uso di solventi liquidi: è adatta per le sostanze sensibili all'umidità [144].

- **Compression Coating.** La polvere coprente, anziché venir fatta aderire sulla superficie della pasticca, può anche esserle compressa intorno. Questo procedimento richiede dei macchinari di compressione specifici e molto complessi in grado di svolgere sia la compressione della pasticca sia del coating. In pratica il macchinario deve avere stampi di due dimensioni differenti: in quelli più piccoli viene depositata la miscela granulata di eccipienti e principi attivi, in quelli più grandi viene depositato un primo strato di polvere coprente, poi inserita la compressa che viene successivamente ricoperta di polvere coprente. La pressione che viene quindi applicata comprime la polvere intorno alla compressa formando una sorta di guscio [142].

- **Dip Coating.** Le compresse vengono depositate in dei contenitori particolari, simili a ceste, e poi immersi nella soluzione coprente. La soluzione in eccesso viene fatta colare tramite i fori presenti nel contenitore e la successiva asciugatura prosegue facendo attenzione ad evitare situazioni in cui le compresse aderiscano tra loro [142].

Si riepilogano gli interventi tecnologici atti a ridurre i consumi energetici nel rivestimento di compresse.

- **Interventi energy-saving riguardanti il rivestimento:**
 - Installazione di un macchinario per il coating a zucchero [122].
 - Installare un macchinario dotato di un sistema Pellegrini [142]. Il contenitore cilindrico rotante dotato di deflettori interni permette di distribuire in maniera più uniforme il flusso coprente rendendo il processo più conforme alle specifiche e limitando il consumo di energia per la produzione di compresse difettose.
 - Installare un macchinario dotato di un sistema *immersion-sword* [142]. La presenza di una lama forata immersa nel letto di compresse permette di distribuire in maniera più uniforme il flusso coprente rendendo il processo più conforme alle specifiche e limitando il consumo di energia per la produzione di compresse difettose.
 - Installare un macchinario dotato di un sistema *immersion-tube* [142]. La presenza di tubo forato immerso nel letto di compresse permette di distribuire in maniera più uniforme il flusso coprente rendendo il processo più conforme alle specifiche e limitando il consumo di energia per la produzione di compresse difettose.
 - Installare un Accela coata [142]. La presenza di fori sul contenitore rotante permette tramite un flusso continuo di aria riscaldata di ridurre le fasi di lavorazione per il processo di asciugatura e i relativi consumi energetici.
 - Installare un *driacoater* [142]. La presenza di alette forate sul tamburo rotante permette tramite un flusso continuo di aria riscaldata di ridurre le fasi di lavorazione per il processo di asciugatura e i relativi consumi energetici.

- Installare un *Glatt coater* [142]. La presenza di trafori sul fondo della camera permette il passaggio di aria riscaldata che riduce le fasi di lavorazione per il processo di asciugatura e i relativi consumi energetici.
- Installare un macchinario a letto fluido per il *coating* [142]. Il processo permette in modo molto efficiente sia di rivestire la compressa che di asciugarla tramite il principio di fluidizzazione delle polveri.
- Installare un macchinario per il VFC [144]. Il processo permette tramite un sistema sottovuoto di compiere la duplice azione di rivestimento ed asciugatura della compressa.
- Installare un macchinario per il *coating* elettrostatico “*corona charging*” [144]. L’utilizzo di forze elettrostatiche comporta meno sprechi energetici rispetto al riscaldamento di flussi di aria.
- Installare un macchinario per il coating elettrostatico “*tribo charging*” [144]. L’utilizzo di forze elettrostatiche tramite attrito comporta meno sprechi energetici rispetto al riscaldamento di flussi di aria.
- Installare un macchinario per il MAIC [144]. Il processo rende non necessario l’utilizzo di solventi liquidi e del loro trattamento termico per il processo di rivestimento delle compresse.
- Installare una pressa per il *compression coating* [142]. Il processo permette di eseguire in maniera congiunta sia la compressione che il rivestimento, eliminando i consumi energetici di una delle due fasi.
- Installare un macchinario per il *dip coating* [142]. Il processo non richiede l’utilizzo di flussi di aria riscaldata rendendo quindi energeticamente più efficiente.

2.4.1.7 Produzione di compresse - Miglioramento della solubilità

Un altro processo comunemente applicato è quello relativo al **miglioramento della solubilità**. Molti materiali utilizzati nel settore farmaceutico, in particolare i principi attivi, non sono caratterizzati da una buona solubilità in acqua. Per ovviare a questo problema in genere si utilizzano tecniche di dispersione solida amorfa che in genere prevedono di partire da un liquido di partenza (soluzione o un solido fuso) per poi applicarvi energia per la solidificazione. La tecnologia però innovativa ed efficiente è l’elettrofilatura, che porta anche a prodotti di una qualità maggiore [146].

- L’**elettrofilatura** (o electrospinning) è basato sulla presenza di due elettrodi, uno collegato ad un sistema ad alto voltaggio, l’altro messo a terra. La forte differenza di potenziale che si sviluppa incanala e guida il flusso di soluzione che viene fatto uscire da un ago/ugello tramite un sistema a siringa o un circuito con pompa aria come fluido di supporto. L’ago corrisponde all’elettrodo carico, mentre l’elettrodo a terra è un raccoglitore delle fibre che si generano, generalmente un cilindro ruotante (un rocchetto). La soluzione usata è formata dalla concentrazione desiderata di principio attivo, un polimero di supporto ed un particolare solvente in grado di sciogliere gli altri elementi e di rendere possibile l’elettrofilatura [146]. Le fibre che vengono così formate possono essere macinate, così da far acquisire al materiale migliori caratteristiche di flusso [147]. Vengono poi miscelate con altri materiali, uniformate e infine compresse per formare le pasticche.

Per aumentare la produttività di questa tecnologia sono state avanzate alcune proposte [148]:

- La forma e la tipologia dell’ago/ugello (Figura 85). Avere un ago con un solo punto di uscita del materiale porta ad una produttività minore rispetto a quelli a più uscite. Le tipologie di ugelli che possono essere usate sono differenti, tutte basate sull’aumento del flusso di materiale in uscita.

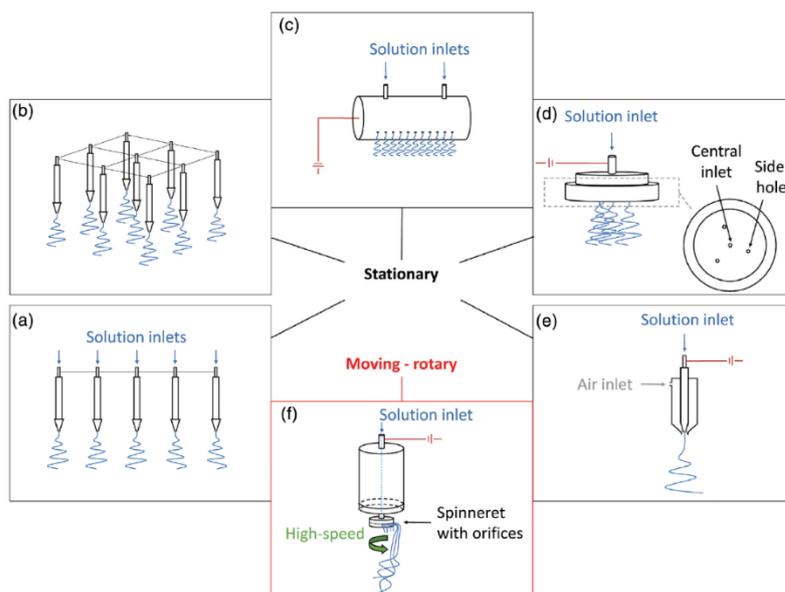


Figura 85 - Tipologie di ugelli [147].

- **Emanazione da superficie libera.** Ottenendo anche di evitare ostruzioni sugli ugelli, il materiale viene posto su un elettrodo a varie forme, tutte caratterizzate dal mettere la soluzione su una ampia superficie. Il voltaggio all'elettrodo è sufficiente per far emergere filamenti, senza bisogno di aghi o ugelli.
- **Melt Electrospinning.** Anziché identificare il solvente giusto, addizionarlo e poi rimuoverlo tramite asciugatura, con questo metodo si scioglie direttamente il materiale di partenza e lo si fa filare. I problemi derivano però dalla sensibilità al calore di alcuni principi attivi e dalla loro degradabilità.
- **Elettrofilatura a corrente alternata.** Utilizzare corrente alternata sull'elettrodo porta allo sviluppo di una moltitudine di coni di Taylor, per cui alla generazione in contemporanea di un ampio numero di fibre.

Di seguito, si riepilogano gli interventi tecnologici reperiti per ridurre i consumi energetici relativi al miglioramento di solubilità di compresse.

- **Interventi energy-saving riguardanti il miglioramento di solubilità:**
 - Installare un macchinario per l'elettrofilatura con ugelli migliorati [148]. Il miglioramento degli ugelli permette di incrementare la produttività e ridurre i consumi energetici.
 - Installare un macchinario per l'elettrofilatura a superficie libera [148]. L'emanazione libera rende non necessario la fase di estrazione di filamenti e i consumi energetici annessi.
 - Installare un macchinario per l'elettrofilatura di materiali fusi [148]. Il processo rende non necessaria la fase di asciugatura riducendo i consumi energetici annessi.
 - Installare un macchinario per l'elettrofilatura a corrente alternata [148]. Il processo permette di produrre un numero maggiore di fibre a parità di consumo energetico.

2.4.1.8 Produzione di compresse - Additive Manufacturing

La produzione di medicinali solidi come le pasticche può essere realizzata anche con modalità diverse da quanto visto. Esiste infatti la tecnologia di **stampa 3D** che permette il fissaggio di polveri tramite vari metodi, così da formare la compressa. Questa tecnologia è unica in termini di complessità e flessibilità, sacrificando però la produttività e gli alti volumi di produzione. Un aspetto positivo è l'aumento di personalizzazione: è possibile produrre pasticche molto diverse di volta in volta senza dover cambiare o modificare il macchinario. Questo permette di dosare al meglio i principi attivi in base alla massa ed al metabolismo del paziente (in particolare per i farmaci molto potenti). Inoltre, esiste la possibilità di creare delle "polipillole", ovvero

pastiglie singole al cui interno è contenuta tutta la terapia del paziente. Infatti, le compresse formate con questa tecnologia sono di due tipologie: ad un singolo principio attivo o a più principi attivi [149]. Devono essere preparate le materie prime, che, a seconda della tipologia di macchina, possono essere portate in granuli, filamenti o soluzioni con un legante. Si ha poi la fase di produzione, in cui il materiale viene “stampato” livello per livello, seguita da una eventuale fase finale di pulizia del prodotto finito. Esistono molte varianti di questa tecnologia [150]:

- **Binder deposition.** La stampante spruzza, a velocità e quantità controllata, un legante o una soluzione medicinale su di un letto di polvere medicinale che viene innalzato dopo ogni livello di stampa.
 - **Material jetting.** Questo metodo non fa uso di un letto di polvere, bensì si basa sulla rapida solidificazione delle goccioline di soluzione che vengono spruzzate ad alta velocità sul ripiano di stampa. La geometria della compressa che si vuole ottenere dipende dalla traiettoria delle gocce e dall’impatto che hanno con il materiale già solidificato.
 - **Extrusion.** È la forma di stampa 3D più diffusa: il materiale viene estruso attraverso un ugello dotato di un sistema di spostamento robotizzato. Vista la mancanza di un letto di polvere, la stampa tramite estrusione richiede la creazione di “colonne” per il sostegno del materiale. Generalmente il processo di stampa 3D tramite estrusione prevede l’uso di un filamento polimerico che viene riscaldato e fuso dall’ugello [150]: viene quindi utilizzato per materiali termoplastici. Esiste altrimenti l’estrusione semisolida, in grado di lavorare in un range di temperature e materiali molto ampio (inclusi i materiali viventi: bioprinting). Questo metodo non utilizza solo il calore per estrarre, bensì anche forze meccaniche o pneumatiche [151].
 - **Power bed fusion.** Questo metodo può essere portato a termine o tramite la sinterizzazione di porzioni di un letto di polvere o sciogliendoci sopra un legante basso fondente. In entrambi i casi è richiesto calore che viene generalmente fornito da un laser.
 - **Fotopolimerizzazione.** Questo metodo prevede l’uso di materiali che polimerizzano quando esposti a radiazioni ultraviolette. Dal momento che i materiali farmaceutici che soddisfano questa condizione sono pochi, non è una metodologia diffusa. In generale, i possibili risparmi energetici ottenibili all’uso di tecnologie di stampa 3D sono legati alla possibilità di effettuare il processo “on-demand”, dunque consumando energia solo quando effettivamente è necessario e nella quantità necessaria.
- Di seguito, si riepilogano gli interventi tecnologici reperiti per ridurre i consumi energetici relativi alla produzione con additive manufacturing compresse.

- **Interventi energy-saving riguardanti l’additive manufacturing:**
 - Installare una stampante 3D “*binder deposition*” [150]. Il controllo del getto di soluzione medicinale permette di ridurre il consumo di risorse e di energia di lavorazione.
 - Installazione di una stampante 3D “*material jetting*” [150]. La rapida solidificazione di goccioline di soluzione permette di ridurre la fase di asciugatura e i consumi energetici annessi.
 - Installare una stampante 3D ad estrusione [150].
 - Installare una stampante 3D a fotopolimerizzazione [150].
 - Installare una stampante 3D “*power bed fusion*” [150].

2.4.2 Produzione di capsule

Le capsule sono un’alternativa alle compresse ed hanno il vantaggio di non necessitare ulteriori coperture esterne, in quanto la capsula è studiata per coprire i sapori e regolare la velocità di dissoluzione all’interno del nostro apparato digerente. Il contenuto delle capsule possono essere polveri miscelate, granulate o sferonizzate. Le capsule si raggruppano in due tipologie in base al materiale utilizzato per l’involucro: a gelatina dura e a gelatina morbida.

Le capsule a gelatina dura sono generalmente composte da gelatina d'osso e sono vendute vuote all'azienda farmaceutica sotto forma di due gusci separati. Le due parti, prodotte con degli stampi che vengono immersi nella gelatina liquida e poi fatti asciugare, necessitano di un elevato controllo delle tolleranze al fine di evitare fuoriuscite di farmaco. Esistono differenti metodi di **riempimento** delle capsule:

- **Metodo Zanasi.** Un tubo viene immerso in un contenitore in cui è disposto, ad altezza uniforme, il composto in polvere/granuli del farmaco. La quantità di miscela che rimane dentro al tubo viene compressa grazie ad un pistone all'interno dello stesso. Il cilindro che si è appena formato viene poi sollevato insieme al tubo grazie ad un sottovuoto e spostato all'interno della parte inferiore della capsula, su cui poi verrà pressata la parte superiore a chiusura. La dose che viene formata può essere controllata modificando la profondità della polvere/granuli nel contenitore di partenza. Versioni più moderne di questi macchinari possono lavorare in continuo grazie alla disposizione dei dosatori su componenti ruotanti.
- **Macchinari GKF.** Questi dispositivi utilizzano invece la capacità stessa della capsula come dosatore. La parte inferiore delle capsule, inserita in buchi appositi su dei dischi rotanti, viene fatta passare sotto un contenitore aperto che rilascia la miscela del farmaco al suo interno per poi essere successivamente chiusa. Grazie alla rapidità di questi macchinari, si possono riempire fino a 2500 capsule al minuto. Risulta ovviamente fondamentale avere un buon flusso di una miscela, che quindi in genere subisce precedentemente un processo di granulazione [122].

Le capsule a gelatina morbida hanno la caratteristica che la gelatina viene mantenuta flessibile tramite degli elementi plasticizzanti. Vengono generalmente utilizzate per contenere principi attivi liquidi o semisolidi. Sono indubbiamente meno diffuse delle capsule rigide, ma hanno comunque una loro fetta di mercato. La tecnica base consiste nell'estrusione di gelatina grazie a due rulli che la comprimono; in contemporanea all'interno della gelatina viene iniettato il farmaco, ottenendo così la capsula. Di seguito, si riepilogano gli interventi tecnologici reperiti per ridurre i consumi energetici relativi alla produzione di capsule.

- **Interventi *energy-saving* riguardanti la produzione:**
 - Installare un macchinario per l'immersione degli stampi nel bagno di gelatina riscaldata [122].
 - Installare un macchinario per il riempimento a "metodo Zanasi" [122]. Il processo permette di dosare la giusta quantità di materiale riducendo ulteriori operazioni di riempimento o rimozione e i consumi energetici annessi.
 - Installare un macchinario per il riempimento a "metodo Zanasi" a dischi rotanti per il processamento in continuo [122]. La produzione in continuo permette di ridurre il consumo di risorse ed energia rispetto alla produzione discontinua o a lotti.
 - Installare un macchinario GKF per il riempimento [122]. L'utilizzo delle capsule come dosatori permette controllare la giusta quantità di materiale riducendo ulteriori operazioni di riempimento o rimozione e i consumi energetici annessi.
 - Installare un estrusore a rulli con dispositivo per l'iniezione del liquido medicinale [122].

2.4.3 Produzione di medicinali liquidi

La produzione di medicinali liquidi non è universale: a seconda della tipologia di preparato sono richieste fasi di processo e reazioni chimiche differenti. In generale si possono identificare due differenti approcci per la produzione di farmaci liquidi: la dissoluzione di un farmaco in polvere dentro ad un solvente (sciroppi e soluzioni) e la formazione diretta del farmaco liquido (iniettabili). La dissoluzione permette di dissolvere un principio attivo o una miscela di questi all'interno di un solvente, generalmente acqua purificata, arricchita con coloranti, aromi e agenti stabilizzanti. La produzione di questa tipologia di medicinali inizia con il riscaldamento dell'acqua purificata a cui segue l'aggiunta dei farmaci in polvere. Questo processo avviene in contenitori a temperatura controllata e dotati di sistemi di mescolamento tramite l'utilizzo ad esempio di omogeneizzatori [122]. La produzione di farmaci tramite formazione diretta coinvolge 2 fasi: la formazione

del preparato tramite processi di trattamento in reattori e la purificazione. Entrambe le fasi sono del tutto analoghe a quelle già visto per i principi attivi. Pertanto, si rimanda alla lettura dei paragrafi 2.3.1 e 2.3.4.

2.4.4 Produzione di creme

Le creme sono simili alle emulsioni dal momento che sono sistemi bifasici di liquidi, ma hanno una maggiore stabilità a temperature normali, per cui si prestano bene per utilizzi topici. La fase esterna delle creme è generalmente acqua, mentre quella interna è un materiale oleoso ad alta viscosità. La produzione delle creme (come anche quella degli unguenti, delle paste e dei gel) è un processo relativamente semplice: consiste nello scaldare e mescolare insieme le due fasi, in presenza di agenti emulsionanti, coloranti, stabilizzanti e aromi. In genere questo processo avviene in un miscelatore ad alta velocità (*colloid mill*, *homogenizer*, *ultrasonic mixer*). La temperatura viene alzata per poter migliorare la dispersione dei materiali [122]. In studi come [152] emergono processi di produzione in continuo di creme e simili. Un'ulteriore tecnica per la produzione delle creme è quella della *hot melt extrusion*. In un macchinario a tubo disposto in orizzontale vengono inserite le varie componenti del prodotto: una vite procede a miscelare e a spingere il materiale uniformandolo [153]. A seconda delle esigenze, la fase acquosa può essere aggiunta a metà macchinario, eventualmente anche preriscaldata, così da interagire con gli altri componenti solo quando questi saranno ben miscelati [154]. Di seguito si riepilogano gli interventi tecnologici reperiti per ridurre i consumi energetici relativi alla produzione di creme.

- **Interventi *energy-saving* riguardanti la produzione di creme:**
 - Installazione di una *colloid mill* [122].
 - Installazione di un omogeneizzatore [122].
 - Installazione di un miscelatore ad ultrasuoni [122].
 - Installazione di un *hot melt extruder* [153].

2.4.5 Produzione di wound dressing

Con il termine wound dressing si vanno ad intendere tutte quelle medicazioni che vengono applicate sopra ferite cutanee, come bende o cerotti impregnati di sostanze medicinali [69]. È possibile riscontrare differenti categorie di tessuti utilizzati per questa tipologia di medicazioni: le fibre e molteplici varianti di tessuti. I metodi di produzione per le medicazioni formate da fibre sono [155]:

- ***Melt Spinning*.** Il polimero scelto viene scaldato dentro un estrusore per fargli raggiungere la temperatura di fusione. Una volta fuso, viene estruso attraverso una testa rotante che può avere più fori (ottenendo fibre singole o formate da più filamenti). Queste fibre vengono poi raffreddate e fatte solidificare all'aria. Il metodo viene utilizzato per polimeri termoplastici con alte temperature di deterioramento.
- ***Wet/Gel Spinning*.** La soluzione polimerica viene estrusa attraverso una testina in un bagno di fluido coagulante antisolvente, che porta alla precipitazione del polimero. Successivamente il materiale così ottenuto viene asciugato e infine avvolto. Una variante di questo processo è il dry-jet wet spinning, in cui la testina non è immersa nel bagno di antisolvente coagulante.
- ***Elettrospinning***

Un caso particolare delle medicazioni formate da fibre sono le membrane asimmetriche, ovvero delle membrane che, a seconda del lato, permettono il passaggio di sostanze differenti: il lato a contatto con la pelle permette di mantenere una certa umidità facendo però uscire il materiale che la ferita secerne; il lato esterno invece protegga ed evita l'ingresso di agenti patogeni. La produzione di queste membrane asimmetriche può essere portata a termine adottando differenti tecniche:

- ***Wet Method*.** Una soluzione polimerica viene immersa in un bagno di coagulante (non solvente), portando così alla formazione di un lato più poroso e di uno più compatto.
- ***Dry/Wet Method*.** È identico al metodo precedente, con l'unica differenza in una pre-evaporazione della soluzione polimerica prima di cominciare. Migliora la qualità del lato compatto.

- **Metodo a CO₂ Supercritica.** L'utilizzo del gas permette di estrarre il solvente utilizzato nella soluzione polimerica e allo stesso tempo provoca la precipitazione del polimero, formando così i due livelli della membrana. Questo metodo è generalmente riconosciuto come ecosostenibile, in quanto non porta all'emissione di alcun gas serra e produce la membrana pronta all'uso, senza necessità di ulteriori step di asciugatura o pulizia.
- **Elettrofilatura 3D.** Utilizzando il principio dell'elettrofilatura viene composto uno strato di materiale partendo dalla soluzione polimerica. Anche questo metodo non necessita di successive rilavorazioni [156].

Di seguito si riepilogano gli interventi tecnologici reperiti per ridurre i consumi energetici relativi alla produzione di materiali in fibre polimeriche.

- **Interventi *energy-saving* riguardanti la produzione:**
 - Installazione di un dispositivo per il melt spinning [155].
 - Installazione di un dispositivo per il wet/gel spinning [155].
 - Installazione di un dispositivo per il dry-jet wet spinning [155].
 - Installazione di un dispositivo per l'elettrofilatura [155].
 - Installazione di una vasca di coagulante per l'immersione di una soluzione polimerica [156].
 - Installazione di una vasca di coagulante per l'immersione di una soluzione polimerica pre-evaporata [156].
 - Installazione di un dispositivo che adotta CO₂ in condizioni supercritiche [156].
 - Elettrofilatura 3D [156].

I metodi per la produzione di tessuti comportano anche differenze sulle caratteristiche e l'utilizzo:

- ***Knitted fabric:*** il tessuto viene formato tramite una serie di asole che si intrecciano tra di loro, rendendolo molto elastico. Per questa motivazione questa tipologia di tessuti viene utilizzata per bendaggi e fasce adesive. A seconda del nodo che si viene a formare si identificano due tipologie di tessuti: *warp knitting* e *weft knitting*.
- **Tessuti:** sono ottenuti intrecciando ortogonalmente (con una trama definita) i fili. È un processo che richiede tecnologie mediamente economiche e che permette alti throughput.
- **Tessuti non tessuti (TNT):** sono largamente utilizzati nel settore delle medicazioni, ma per mascherine e tute/grembiuli da sala operatoria. I metodi di produzione sono vari [155]:
 - *Melt Blowing*
 - *Solution Blowing*
 - *Needle Punching*
 - *Immersion Elettrospinning*
 - *Air Laying*
 - *Wet Laying*
 - *Thermal Bonding*
 - *Chemical Bonding*

Si riepilogano gli interventi tecnologici atti a ridurre i consumi energetici relativi alla produzione di tessuti.

- **Interventi *energy-saving* riguardanti la produzione:**
 - Installazione di un dispositivo per il *warp knitting* [155]. Il filato nei tessuti segue la sequenza di formazione di anelli simmetrici sopra e sotto il percorso medio del filato. Questi anelli a maglia sono estensibili nelle direzioni orizzontali e verticali, dando ai tessuti molta più elasticità. In questo modo è possibile ridurre le rilavorazioni e quindi i consumi energetici non necessari per processare tessuti fuori dalle specifiche in termini di elasticità.
 - Installazione di un dispositivo per il *weft knitting* [155].
 - Installazione di un telaio [155].

- Installazione di un dispositivo per il *melt blowing* [155].
- Installazione di un dispositivo per il *solution blowing* [155].
- Installazione di un dispositivo per il *needle punching* [155].
- Installazione di un dispositivo per l'immersione *electrospinning* [155].
- Installazione di un dispositivo per l'*air laying* [155].
- Installazione di un dispositivo per il *thermal bonding* [155].
- Installazione di un dispositivo per il *coating* ad immersione [155].

A seconda degli utilizzi è richiesto che alcuni di questi materiali siano impregnati di sostanze medicinali. I metodi per aggiungere ai "wound dressing" i medicinali sono vari:

- **Coating.** La fibra viene immersa in una soluzione del medicinale oppure viene ricoperta da microparticelle. I metodi per svolgere questo sono molteplici, come la deposizione elettrochimica, l'immersione e la dispersione.
- **Encapsulation.** Questo metodo può essere applicato prima della produzione della fibra, tramite una miscelazione omogenea del medicinale con la soluzione polimerica.
- **Bioconjugation.** Unire il medicinale con i gruppi funzionali presenti sulla fibra. Ovviamente quest'ultima deve essere preliminarmente trattata: esistono trattamenti al plasma o chimici. Altrimenti l'unione tra polimero e medicinale avviene prima della filatura.
- **Inclusion complexes.** Un composto d'inclusione è l'adesione di una piccola molecola (ospite) ad una cavità in un secondo materiale (ospitante). Il materiale ospitante, in questo caso il polimero, deve essere anticipatamente trattato chimicamente per avere le asperità in grado di mantenere il medicinale.
- **Ion complexes.** I farmaci possono unirsi alle fibre grazie a cariche di segno opposto formando composti ionici.
- **Supercritical CO₂ impregnation.** Il medicinale è dissolto nel CO₂ in condizioni supercritiche, che viene quindi messo a contatto con il polimero, in cui si diffonde. La fase finale è la depressurizzazione, in cui il gas e il medicinale non impregnato vengono rimossi [155].

Si riepilogano gli interventi atti a ridurre i consumi energetici nell'aggiunta di sostanze medicinali.

- **Interventi energy-saving riguardanti l'aggiunta di medicinali:**
 - Installazione di un dispositivo per il coating a dispersione [155]. Il rivestimento in dispersione permette di applicare in modo efficiente polimeri sulla superficie del tessuto.
 - Installazione di un dispositivo per il coating a deposizione elettrochimica [155].
 - Installazione di un dispositivo per il pretrattamento al plasma per la bioconiugazione [155]. Il processo permette di migliorare l'adesione e la proliferazione cellulare riducendo i consumi energetici.
 - Installazione di un dispositivo per il pretrattamento chimico per la bioconiugazione [155].
 - Installazione di un dispositivo per il pretrattamento chimico per la formazione di un composto d'inclusione [155].
 - Installazione di un dispositivo per la formazione di composti ionici [155].
 - Installazione di un dispositivo per svolgere la *supercritical CO₂ impregnation* [155]

Una fase importante per i tessuti medicali è quella della **sterilizzazione** al fine di non causare contaminazioni. Esistono molteplici approcci per la sterilizzazione [122]:

- Utilizzo dell'autoclave, sterilizzando tramite alte temperature ed umidità. Il prodotto da sterilizzare viene investito da vapore saturo ad una temperatura adeguata, al fine di non comprometterne le caratteristiche. Le tempistiche possono essere in un range tra i 30 min a 115° C ai 3 min a 134° C. Anche la pressione utilizzata è un parametro controllabile.

- Utilizzo di dispositivi a calore secco. Spesso ci si riferisce a questo processo come deprogenazione e consiste nell'espore ad alte temperature il prodotto in assenza di umidità, tipicamente 15 min a 200° C.
- Trattamenti chimici, alzando la temperatura in presenza di agenti battericidi. Utilizzato per sterilizzare soluzioni acquose o materiali instabili a temperature maggiore. La durata è di 30 min a temperature intorno ai 100° C. Un'altra opzione è l'esposizione del prodotto a dell'ossido di etilene gassoso, che può essere svolta a temperatura ambiente.
- Irradiazione. Gli elettroni ad alta energia generati da un acceleratore di particelle o le radiazioni gamma generate da sorgenti come il cobalto 60 permettono una completa sterilizzazione.
- Luce ad alta intensità, generalmente luce ultravioletta. Altrimenti possono essere utilizzati dispositivi a luce pulsata ad alta intensità.
- Filtrazione, utilizzato esclusivamente per la sterilizzazione di fluidi: questi vengono fatti passare attraverso filtri che trattengono i batteri. In questa tipologia di processo non è richiesto un aumento della temperatura.

Si riepilogano gli interventi tecnologici reperiti per ridurre i consumi energetici relativi alla sterilizzazione. In generale, tutte le tecnologie abilitanti per il processo di sterilizzazione sono da ritenersi *energy-saving* perché evitano scarti di lavorazione ed evitano di dover effettuare ulteriori trattamenti dei farmaci a valle del processo produttivo, per renderli sicuri ed efficaci.

- **Interventi *energy-saving* riguardanti la sterilizzazione:**
 - Installazione di un tunnel di deprogenazione o di forni statici per la sterilizzazione di flaconi vuoti [122].
 - Installazione di uno sterilizzatore ad autoclave [122]. L'utilizzo dell'autoclave può essere fatto per la sterilizzazione di *equipment* e tappi e per il ciclo di pastorizzazione dell'albumina e l'inattivazione virale dei fattori della coagulazione.
 - Installazione di uno sterilizzatore ad esposizione (a ossido di etilene gassoso) [122].
 - Installazione di uno sterilizzatore ad aumento della temperatura in presenza di agenti battericidi [122].
 - Installazione di uno sterilizzatore ad irradiazione ad elettroni [122].
 - Installazione di uno sterilizzatore a radiazioni gamma [122].
 - Installazione di uno sterilizzatore a luce ultravioletta [122].
 - Installazione di uno sterilizzatore a luce pulsata ad alta intensità [122].
 - Installazione di uno sterilizzatore per filtrazione con membrana [122].
 - **Installazione di uno sterilizzatore ad ozono.**
 - **Pre-riscaldamento dell'acqua in ingresso al processo.**

2.4.6 Servizi ausiliari e di supporto

Oltre ad agire sulle tecnologie che costituiscono le principali fasi del processo, è possibile ridurre i consumi energetici d'impianto effettuando interventi migliorativi sugli apparati ausiliari. Anche in questo caso è possibile sia efficientare i sistemi ausiliari esistenti sia effettuare interventi di recupero energetico o produzione sostenibile di energia. Di seguito si riepilogano gli interventi tecnologici reperiti per ridurre i consumi energetici relativi ai sistemi ausiliari e di supporto. La spiegazione di come tali interventi apportino un recupero energetico è già stata fornita nei Capitoli 1-2 visto che molti interventi sui sistemi ausiliari e di supporto sono analoghi a quelli riportati per il settore delle fonderie e dello smaltimento rifiuti. Oltre a ciò, la descrizione dettagliata degli interventi che riguardando i sistemi ausiliari è già stata fornita nel report che UNIFI ha redatto nel 2020. Si rimanda, alla lettura di tale materiale per approfondimenti in tal senso.

- **Interventi *energy-saving* riguardanti nel processo di efficientamento dei sistemi di supporto:**

- Sostituire il gruppo frigo con elemento più efficiente
- Installare sistemi per effettuare il *pre-cooling* sul *chiller* per la refrigerazione
- Installare un gruppo frigo ad assorbimento usando acqua calda da raffreddare
- Formare un sistema frigo centralizzato
- Sostituire le torri di raffreddamento ad aria con raffreddamento ad acqua
- Sostituire i pacchi batterie dei *chiller*
- Sostituire il gruppo frigo con un elemento dotato di doppio inverter
- Installare un gruppo frigo per basse temperature di taglia ridotta
- Installare una torre evaporativa per il raffreddamento di serbatoi
- Sostituire motori elettrici con versioni più efficienti [157]
- Sostituire motori elettrici con motori EC
- Installare un inverter sui motori elettrici [158]
- Sostituire il generatore di vapore con elemento più efficiente
- Sostituire i bruciatori del generatore di vapore con elementi più efficienti
- Installare un recuperatore di calore dai fumi del generatore di vapore
- Sostituire il generatore di vapore con una caldaia a vaporizzazione istantanea
- Installare un rievaporatore degasatore termico
- Installare sistemi per la combustione del fango secco prodotto dall'impianto
- Installare un degasatore nel circuito a vapore per il recupero del *flash steam*
- Installare un economizzatore sul generatore di vapore
- Sostituire caldaie per il vapore con nuovi elementi dotati di economizzatore
- Installare sistemi per il preriscaldamento dell'acqua in ingresso tramite cascami termici
- Sostituire una pompa con un elemento più efficiente
- Sostituire un compressore con uno più efficiente
- Sostituire un compressore con una vite
- Installare compressori centrifughi
- Sostituire un compressore con uno dotato di inverter
- Sostituire un compressore con uno dotato di inverter e di kit di recupero termico
- Installare valvole di tenuta nel circuito aria compressa
- Installare sistemi di recupero aria compressa dai cilindri pneumatici
- Installare un compressore di piccola taglia per i momenti di richiesta ridotta
- Collegare più strumenti al sistema centralizzato di sottovuoto
- Sostituire la trasmissione multi-cinghia con mono-cinghia
- Sostituire le cinghie di trasmissione con elementi ad alto rendimento
- Installare filtri sulla presa d'aria esterna per la riduzione di perdite di carico
- Installare un sistema *free cooling*
- Installare recuperatori di calore sulle UTA

- Installare scambiatori a tubo di calore sulle batterie di raffreddamento delle UTA
- Sostituire filtri a tasche con filtri elettrostatici attivi
- Sostituire l'impianto UTA con uno più efficiente
- Sostituire le UTA con nuovi sistemi di recupero ed inverter
- Eliminare il doppio stadio di filtrazione
- Installare sistemi di recupero *run around loop*
- Adottare sistemi di ricircolo di aria in uscita
- Sostituire i condizionatori con elementi più efficienti
- Installare una pompa calore acqua - acqua tra i circuiti acqua fredda e acqua calda
- Sostituire la pompa con un elemento più efficiente
- Coibentare i serbatoi d'acqua
- Installare pellicole antisolari
- Coibentare le valvole sulle utenze ad alta temperatura
- Coibentare i sistemi di raccolta condense
- Installare valvole di regolazione per i fluidi termovettori
- Installare sistemi a portata variabile
- Installare attrezzature per la filtrazione passiva per il miglioramento della corrente elettrica
- Installare un ottimizzatore di tensione
- Installare trasformatori eco a basse perdite nella cabina elettrica
- Installare un sistema di rifasamento della corrente
- Sostituire il trasformatore a bagno d'olio con uno a resina
- Effettuare un allacciamento ad un impianto di teleriscaldamento
- **Interventi *energy-saving* riguardanti nel processo di produzione o recupero di energia:**
 - Installare un cogeneratore - Energia elettrica ed assorbitore per la produzione di freddo
 - Installare un cogeneratore - Energia elettrica e termica
 - Installare un economizzatore sul cogeneratore
 - Installare un sistema di recupero calore sul degasatore del cogeneratore
 - Sostituire il cogeneratore con uno dotato di assorbitore
 - Sostituire il cogeneratore con uno di taglia maggiore
 - Installare un impianto di generazione contemporanea di energia elettrica, frigorifera e termica
 - Aumentare il numero di aree di impianto che usufruiranno dell'energia ottenuta tramite trigenerazione
 - Installare un impianto fotovoltaico
 - Effettuare un ampliamento dell'impianto fotovoltaico
 - Installare un impianto solare termico per la produzione di acqua calda
 - Installare un impianto solare termico per la produzione diretta di vapore [159]
 - Installare un gruppo elettrogeno più efficiente

- Sostituire la caldaia con una più efficiente
- Sostituire i sistemi di generazione calore con un impianto centralizzato
- Sostituire caldaie ad olio diatermico con caldaie a vapore ad alta efficienza
- Installare caldaie a vapore
- Installare sistemi per la preconcentrazione e combustione termica rigenerativa
- Installare un dispositivo per l'osmosi inversa per la produzione di acqua distillata
- Recuperare calore dal raffreddamento dell'acqua distillata

3 Elenco e mappatura degli interventi tecnologici applicati e proposti dalle aziende coinvolte

Con l'obiettivo di fornire alle aziende strumenti da consultare per identificare rapidamente tutti gli interventi energy-saving attualmente disponibili nel loro settore, si sono sintetizzati all'interno di tabelle tutti gli interventi identificati nel Capitolo 2, suddividendo le soluzioni di risparmio energetico in base al loro settore di competenza (fonderia, smaltimento rifiuti, farmaceutico o di produzione di principi attivi), ma anche in base alla specifica macchina e alla specifica fase d'impianto su cui agiscono. Le liste di interventi ottenute sono riportate in Allegato A.

In aggiunta, per valutare le tendenze recenti e future delle opportunità e degli investimenti in tecnologie per il risparmio energetico nell'industria italiana dei settori analizzati, dopo aver stilato le tabelle degli interventi disponibili, si sono esaminati quali interventi tra quelli identificati sono stati attuati dalle aziende negli ultimi cinque anni e quali, invece, sono stati presi in considerazione come possibili sviluppi futuri. A tale scopo, sono state stimate le frequenze di attuazione o di pianificazione (come sviluppo futuro) delle tecnologie di risparmio energetico identificate. Per effettuare tale analisi, sono stati adottati i seguenti parametri statistici, che hanno consentito di evidenziare gli interventi più diffusi in Italia nei diversi settori.

Indicando con SD il numero totale di siti di produzione che hanno prodotto le diagnosi, le frequenze degli interventi attuati e pianificati sono state calcolate attraverso le equazioni (1) e (2).

$$f_{i,i} = \frac{n_{i,i}}{SD}, \quad (1)$$

$$f_{p,i} = \frac{n_{p,i}}{SD}, \quad (2)$$

dove $n_{i,i}$ identifica il numero di aziende che hanno implementato l'i-esimo intervento tra il 2015 e il 2019, mentre $n_{p,i}$ indica il numero di aziende che hanno proposto l'i-esimo intervento come sviluppo futuro. Infine, $f_{i,i}$ e $f_{p,i}$ rappresentano la frequenza di implementazione e pianificazione associata all'i-esimo intervento. Vale la pena menzionare che, nel caso delle fonderie, è stato possibile effettuare un'ulteriore analisi. Infatti, in tale settore, tutte le aziende italiane risultavano caratterizzate dall'applicazione delle stesse fasi principali e il processo produttivo risultava descrivibile da una serie consecutiva di step. Allo stesso modo, alcune varianti dei processi industriali potevano essere facilmente identificate. Ad esempio, il processo di fonderia poteva essere caratterizzato da un forno elettrico o a combustibile, mentre la fase di colata poteva avvenire attraverso l'adozione di uno stampo permanente o in sabbia. Di conseguenza, l'analisi delle aziende ci ha consentito di individuare facilmente eventuali limitazioni di applicabilità degli interventi di efficientamento energetico. Ad esempio, alcune tecnologie potevano essere legate alla colata in forma permanente, quindi non potevano essere adottate da un impianto che sfrutta la colata in sabbia. Alla luce di ciò, laddove si rilevavano interventi inapplicabili in determinate condizioni, sono state definite nuove frequenze per ottenere una descrizione più veritiera e accurata delle fonderie italiane analizzate. In particolare, dato uno specifico intervento *energy-saving*, le nuove frequenze hanno considerato come campione il numero di impianti in cui il suddetto intervento è risultato implementabile (cioè solo una parte del campione originale). Di conseguenza, le frequenze più veritiere degli interventi implementati e pianificati sono state stimate attraverso le equazioni (3) e (4) rispettivamente.

$$f_{relevant_i,i} = \frac{n_{i,i}}{reference_SD}, \quad (3)$$

$$f_{relevant_p,i} = \frac{n_{p,i}}{reference_SD}, \quad (4)$$

dove $n_{i,i}$ e $n_{p,i}$ identificano ancora il numero di aziende che hanno rispettivamente implementato e pianificato l'intervento i-esimo, mentre $reference_SD$ è la dimensione ridotta del campione che rappresenta tutte le aziende che potrebbero adottare l'intervento i-esimo. Infine, $f_{relevant_i,i}$ e $f_{relevant_p,i}$ indicano le nuove frequenze relative all'implementazione e alla pianificazione.

Purtroppo, un'analoga analisi non è risultata fattibile per gli altri settori analizzati. Infatti, essi non sono risultati descrivibili da una sequenza ordinata di step di processo, ma, al contrario, sono risultati caratterizzati da numerose varianti, che rendevano ogni azienda diversa dall'altra e impedivano di identificare limiti di applicabilità dalla sola consultazione della letteratura e delle diagnosi. Pertanto, per i settori farmaceutico e dei rifiuti, sono state calcolate esclusivamente le frequenze riportate nelle equazioni (1) e (2). Le tabelle e le frequenze ottenute sono mostrate di seguito, ripartendole in base ai settori analizzati ed elencando i soli interventi che presentassero almeno 1 tra la frequenza di applicazione e quella di proposta come sviluppo futuro non nulla. I risultati mettono in luce le tendenze riportate di seguito.

3.1 Fonderie

Tra gli interventi maggiormente proposti/implementati dalle aziende si annoverano:

1. Ottimizzazione nel design dei condotti per minimizzare le perdite di aria compressa e installazione di guarnizioni e sigilli per il contenimento delle perdite rilevate o sostituzione dei tratti di condotto danneggiati (leak management).
2. Utilizzo di motori elettrici ad alta efficienza IE2 IE3 IE4.
3. Sostituzione di inverter con nuovi e più efficienti o installazione di nuovi se non presenti.

Si nota che questi interventi riguardano principalmente i sistemi ausiliari. Relativamente agli interventi non inerenti a sistemi ausiliari, invece, i seguenti sono risultati i più comuni:

1. Sostituzione vecchio forno fusorio con nuovo.
2. Recupero di calore dal processo di compressione dell'aria.
3. Installazione di cogenerazione (o tri-generazione) per il recupero di calore.

Tabella 2: Soluzioni tecnologiche relative alla fase di fusione.

Oggetto della soluzione	Soluzione	$n_{i,j}$	$n_{p,j}$	$f_{i,j}$	$f_{p,j}$	$f_{relevant,i}$	$f_{relevant,p}$
Impianti di caricamento nei forni	Pre-riscaldamento della materia soffiando direttamente fumisulla materia (essiccatore)	2	2	0.0087	0.0087	0.0087	0.0087
	Utilizzo di bruciatori recuperativi nel forno fusorio	0	7	0	0.0303	0	0.046
Bruciatore	Sostituire i bruciatori con bruciatori nuovi ad elevata efficienza	0	1	0	0.0043	0	0.0065
	Utilizzo di un bruciatore rigenerativo nel forno fusorio	0	1	0	0.0043	0	0.0065
Forno Fusorio	Sostituzione vecchio forno fusorio con nuovo	6	11	0.026	0.048	0.026	0.048
	Tecnologia IGBT sui forni elettrici	0	1	0	0.0043	0	0.01
	Rifacimento refrattari forni per evitare perdite di calore verso l'esterno (ispessimento del refrattario)	2	1	0.0087	0.0043	0.013	0.0065
Dispositivo pneumatico con lance	Introduzione di un dispositivo pneumatico dotato di lancia per soffiare i materiali che formano una schiuma discorde nella zona della reazione per renderla più controllabile	0	1	0	0.0043	0	0.0043
Recuperatore	Sostituzione dell'impianto elettrico di recupero sabbia con nuovo impianto a gas	0	1	0	0.0043	0	0.0043
	Installazione di un recuperatore di sabbia	1	0	0.0043	0	0.0099	0
Isole di stampaggio	Sostituzione isole di stampaggio con nuove	1	0	0.0043	0	0.0099	0
Mescolatori	Sostituzione mescolatori	2	0	0.0087	0	0.02	0
Formatura "hot box"	Utilizzo di preriscaldamento dell'aria e di bruciatori rigenerativi o di recupero per i forni di produzione delle forme in	1	0	0.0043	0	0.0099	0

	sabbia/resina termoindurente						
	Installazione di un filtro efficiente nell'impianto terre	0	1	0	0,0043	0	0,0099
Impianto di formatura	Utilizzo di un processo in forma permanente con metodo di colata a bassa pressione con utilizzo di anime inorganiche	0	1	0	0,0043	0	0,0099
	Sostituzione di vecchi impianti con impianti nuovi e più efficienti	1	0	0,0043	0	0,0099	0
Siviera	Installazione impianti per il preriscaldamento efficiente delle siviere	1	0	0,0043	0	0,0043	0
Forno	Sostituzione del forno di colata con uno più nuovo ed efficiente	1	0	0,0043	0	0,0043	0
Impianti di colata	Sostituzione degli impianti di colata vecchi con nuovi	4	2	0,017	0,0087	0,029	0,014
	Nuova linea di pressofusione ad elevata efficienza	0	3	0	0,0043	0	0,0099
Impianti di pressocolata	Sostituzione forno di attesa alla colata con uno più nuovo ed efficiente	2	3	0,0087	0,013	0,014	0,021
Steratrice	Sostituzione di macchine steratrici con nuove e più efficienti	1	0	0,0043	0	0,0043	0
	Installazione nuova linea di finitura	2	0	0,0087	0	0,0087	0
Stazioni di finitura	Eliminare macchinari di "basso livello" e introdurre nuovi più efficienti	2	1	0,0087	0,0043	0,0087	0,0043
Forno trattamento termico	Sostituzione del forno per il trattamento termico con uno più nuovo ed efficiente	0	1	0	0,0043	0	0,0043
Macchine utensili	Ugelli di soffiaggio ad alta efficienza	0	1	0	0,0043	0	0,0043
	Installazione ciclo di Rankine per l'utilizzo del calore di recupero per produrre vapore in un boiler e alimentare un ciclo a vapore	0	1	0	0,0043	0	0,0043
	Installazione ciclo ORC per utilizzare i gas esausti per generare energia elettrica	0	3	0	0,013	0	0,013
	Installazione cogenerazione (o trigenerazione) per il recupero di calore	1	13	0,0043	0,0562	0,0043	0,0562
	Installazione tecnologie per usare i fumi per operare un ciclo frigorifero ad assorbimento	0	1	0	0,0043	0	0,0043
	Sostituzione batteria di recupero calore	1	0	0,0043	0	0,0043	0
	Installazione evaporatore per il recupero di calore dalle acque emulsionate	1	0	0,0043	0	0,0043	0
	Installazione tecnologie per il recupero calore dall'essiccazione terre	1	0	0,0043	0	0,0043	0
	Installazione di uno scambiatore per generare acqua calda dai fumi del forno ed alimentare l'evaporatore sottovuoto	0	1	0	0,0043	0	0,0043
Scambiatore	Recupero di calore dal processo di compressione dell'aria	1	13	0,0043	0,056	0,0043	0,056
Siviera	Utilizzo di scambiatori di recupero per il preriscaldamento efficiente delle siviere (forno scaldia siviera)	0	4	0	0,017	0	0,017
Impianto di raffreddamento	Recuperatore di calore nel circuito di raffreddamento stampi	0	1	0	0,0043	0	0,0071
Compressore	Sostituzione di compressori vecchi con nuovi	21	33	0,091	0,14	0,091	0,14

ed efficienti							
	Installare compressoria numero di giri variabili (compressori già dotati di inverter)	0	3	0	0.013	0	0.013
Macchine ad aria compressa	Sostituzione di tutti i macchinari con movimentazione ad aria compressa con macchinari elettronici dove possibile	1	0	0.0043	0	0.0043	0
	Installazione di ventilatori ad alta efficienza	1	6	0.0043	0.026	0.0043	0.026
	Installazione di ventilatori a velocità regolabile (ASD), ovvero ventilatori già dotati di inverter	1	3	0.0043	0.013	0.0043	0.013
	Installazione linea di aspirazione forzata per i forni	1	0	0.0043	0	1	0.0043
Muletti	Sostituzione dei muletti	0	1	0	0.0043	0	0.0043
	Sostituzione della carica batteria dei muletti	0	2	0	0.0087	0	0.0087
Trasportatori	Sostituzione nastri trasportatori con nuovi	1	0	0.0043	0	0.0043	0
	Sostituzione cinghie trapezoidali con cinghie bieloidali	0	1	0	0.0043	0	0.0043
Carrello elevatore	Sostituzione carrello elevatore a gasolio con uno più moderno e efficiente	0	1	0	0.0043	0	0.0043
Gru a ponte	Sostituzione carro ponte	2	1	0.0087	0.0043	0.0087	0.0043
Trasformatori	Sostituzione trasformatori con più efficienti e/o più potenti	1	5	0.0043	0.022	0.0043	0.022
Inverter	Sostituzione di inverter con nuovi e più efficienti installazione di nuovi inverter sui motori che non ce li hanno	11	56	0.048	0.24	0.048	0.24
Impianto elettrico	Utilizzo di filtri passivi	0	10	0	0.043	0	0.043
	Utilizzo di motori elettrici ad alta efficienza IE2 IE3 IE4	3	56	0.013	0.24	0.013	0.24
	Utilizzo di motori regenerativi	0	2	0	0.0087	0	0.0087
	Rifasamento dei motori	0	1	0	0.0043	0	0.0043
	Installare motori a velocità variabile (ASD VSD), ovvero motori già dotati di inverter	0	2	0	0.0087	0	0.0087
Motori	Ottimizzazione nel design dei condotti per minimizzare le perdite di aria compressa e installazione di guarnizioni e sigilli per il contenimento delle perdite rilevate o sostituzione dei tratti di condotto danneggiati (leak management)	3	66	0.013	0.29	0.013	0.29
	Sostituzione delle pompe obsolete o usurate con pompe più nuove e ad alta elevata efficienza	2	3	0.0087	0.013	0.0087	0.013
Impianto di raffreddamento	Sostituzione ed efficientamento delle torri evaporative	2	2	0.0087	0.0087	0.0087	0.0087

3.2 Impianti di smaltimento dei rifiuti

Tra gli interventi maggiormente proposti/implementati dalle aziende si annoverano:

1. Sostituzione dei motori elettrici con motori elettrici più efficienti.
2. Installazione di un impianto fotovoltaico.
3. Installazione di inverter sui motori elettrici.

Anche in questo caso si nota che gli interventi caratterizzati da frequenze di implementazione/proposta maggiore riguardano tutti i sistemi ausiliari, che nel caso degli impianti di smaltimento rifiuti. Non si sottolineano, invece, considerazioni particolari su altri interventi non afferenti ai sistemi ausiliari.

In generale, l'analisi delle diagnosi e della letteratura suggerisce come, nel settore dello smaltimento dei rifiuti, la ricerca sia indirizzata verso l'ottimizzazione ed il miglioramento della produzione di energia elettrica e/o termica. Gli impianti che provvedono al recupero energetico dei rifiuti, infatti, tendono a non necessitare di input esterni di elettricità. Pertanto, in questo settore il focus è sull'aumento del recupero dell'energia (chimica o termica) contenuta nei rifiuti piuttosto che sulla riduzione del consumo dei dispositivi tecnologici.

Oggetto della soluzione	Soluzione	$n_{i,i}$	$n_{p,i}$	$f_{i,i}$	$f_{p,i}$
Trasportatore a dischi	Sostituzione trasporto polveri ad aria con trasportatore a dischi	1	0	0.022	0
Scambiatore di calore	Installazione di uno scambiatore di calore a bassa pressione (incremento del recupero - fornace)	1	0	0.022	0
Scambiatore di calore	Installazione di uno scambiatore a tubi lisci (fornace)	1	0	0.022	0
Scambiatore di calore	Installazione di uno scambiatore di calore generico	0	1	0	0.022
Recupero calore	Installazione di un circuito ORC per il recupero calore degli MCI a biogas (usati per produrre elettricità)	0	1	0	0.022
Pompa estrazione incondensabili	Installazione di una pompa di estrazione incondensabili nel condensatore	1	0	0.022	0
Condensatore	Installazione di un secondo condensatore ad acqua	1	0	0.022	0
Accumulatore termico	Installazione di un sistema di accumulo termico per disaccoppiare produzione ed utilizzo (teleriscaldamento)	0	1	0	0.022
Recupero calore	Installazione di un sistema di recupero termico dai compressori	0	1	0	0.022
Gruppo frigo	Sostituzione dell'assorbitore con un chiller ad alta efficienza	0	1	0	0.022
Turbina	Installazione di una turbina a contropressione	1	0	0.022	0
Filtro a manica	Aumento del numero di filtri a manica	1	0	0.022	0
Recuperatore di calore	Installazione di un sistema DeNOx con recuperatore di calore	2	0	0.043	0
Sistema di preriscaldamento	Installazione di un sistema di preriscaldamento a scambiatori usando i fumi (sostituendo i bruciatori a metano)	0	1	0	0.022
Motori elettrici	Sostituzione dei motori elettrici con elementi ad alta efficienza	4	8	0.087	0.174
Motori elettrici	Sostituzione di motori elettrici con elementi correttamente dimensionati	0	1	0	0.022
Motori elettrici	Installazione di inverter sui motori elettrici	4	4	0.087	0.087
Impianto CHP	Produzione combinata di elettricità e calore utilizzando il biogas ottenuto dai processi anaerobici	2	0	0.043	0
Caldaia	Sostituzione di una caldaia con un elemento a condensazione	1	0	0.022	0
Caldaia	Installazione di un sistema di caldaie	1	0	0.022	0
Impianto CHP	Installazione di un sistema di cogenerazione a metano	0	1	0	0.022
Generatore di vapore	Sostituzione del generatore di vapore a GPL con uno a metano	0	1	0	0.022
Caldaia	Sostituzione delle caldaie a gasolio con pompe di calore	1	0	0.022	0
Coibentazione	Coibentazione di edifici soggetti a condizionamento (cappotto termico)	0	2	0	0.043
Impianto fotovoltaico	Installazione di un impianto fotovoltaico	2	9	0.043	0.196
Impianto solare termico	Installazione di un impianto solare termico	0	1	0	0.022
Sistema automatico di stabilizzazione	Installazione di un sistema automatico di stabilizzazione della tensione	0	1	0	0.022
Filtro passivo	Installazione di un filtro passivo per il miglioramento della qualità dell'energia elettrica in ingresso allo stabilimento	1	0	0.022	0
Macchinari movimentazione interna	Utilizzo di mezzi elettrici per la movimentazione carichi	0	2	0	0.043
Pneumatici	Montaggio pneumatici "energy saving"	0	3	0	0.065
Macchinari movimentazione interna	Sostituzione veicoli a gasolio con elementi a classe emissioni inferiori	0	3	0	0.065
Macchinari movimentazione interna	Installazione sistemi Start&Stop sui veicoli	0	3	0	0.065
Compressore	Sostituzione di un compressore con un elemento più performante	1	1	0.022	0.022
Compressore	Sostituzione di un compressore con un elemento dotato di inverter	1	1	0.022	0.022
Pompa	Sostituzione di una pompa con un elemento dotato di inverter	1	0	0.022	0
Pompa	Installazione di un inverter sulle pompe	1	4	0.022	0.087
Ventilatore	Sostituzione dei ventilatori centrifughi con elementi più efficienti	0	1	0	0.022

3.3 Impianti di produzione di principi attivi

Tra gli interventi maggiormente proposti/implementati dalle aziende si annoverano:

1. Installazione di inverter sui motori elettrici.
2. Sostituzione dei motori elettrici con motori elettrici più efficienti.
3. Installazione di un impianto fotovoltaico.

Si ritiene utile sottolineare anche i seguenti interventi:

1. Sostituzione di un *chiller* con uno più efficiente.
2. Installazione di un cogeneratore (motore a combustione interna + recupero calore).

Anche per questo settore grande importanza è assunta dagli interventi relativi alla riduzione dei consumi energetici dei sistemi ausiliari, dove elevato interesse è mostrato verso azioni di efficientamento degli apparati esistenti, azioni di recupero energetico e, soprattutto, verso la possibilità di produrre energia tramite fonti rinnovabili (in particolare l'energia solare). Confrontando l'Allegato A con la tabella sottostante, si nota come gli interventi maggiormente proposti/implementati siano stati estratti dalle diagnosi energetiche e non siano stati rilevati in letteratura scientifica. In questo caso, dunque, si sottolinea come l'analisi delle diagnosi energetiche sia risultata particolarmente utile, mentre la letteratura scientifica non abbia fornito una descrizione al passo coi tempi, che costituisca il corretto stato dell'arte degli interventi *energy-saving* applicabili nel settore farmaceutico.

Oggetto della soluzione	Soluzione	$n_{i,i}$	$n_{p,i}$	$f_{i,i}$	$f_{p,i}$
Essiccatore	Installazione di soffianti ad alta efficienza negli essiccatori	1	0	0.014	0
Essiccatore	Installazione di un essiccatore alimentato ad acqua anziché a vapore	0	1	0	0.014
Essiccatore	Installazione di essiccatori con scambiatori di calore ad alta efficienza	1	0	0.014	0
Evaporatore	Sostituzione di un evaporatore ad aria con uno ad acqua (più opportunità di recupero)	1	0	0.014	0
Miscelatore	Installazione di un accoppiamento diretto anziché trasmissione tramite cinghia	0	2	0	0.029
Wet scrubber	Installazione di colonne di lavaggio (spray)	0	1	0	0.014
Separatore elettrostatico	Sostituzione dei filtri a tasche con filtri elettrostatici attivi	0	1	0	0.014
Ossidatore	Sostituzione del combustore dell'ossidatore con un elemento più efficiente	0	1	0	0.014
Depuratore	Installazione di un depuratore anaerobico-aerobico	0	1	0	0.014
Soffianti del depuratore	Sostituzione delle soffianti (del depuratore) con elementi ad alta efficienza	0	1	0	0.014
Essiccatore	Installazione di essiccatori per i fanghi da smaltire usando calore recuperato	0	1	0	0.014
Agitatore per fanghi	Facilitare il trasporto di fanghi tramite un sistema che li agiti	0	1	0	0.014
Bassine	Sostituzione dei riscaldatori ceramici con elementi più efficienti	0	1	0	0.014
Diffusori	Sostituzione dei diffusori per ottenere bolle più piccole	0	1	0	0.014
Gruppo frigo	Sostituzione di un chiller con un elemento più efficiente	7	8	0.100	0.114
Gruppo frigo	Installazione di un chiller con temperature apposite a uno specifico circuito	0	1	0	0.014
Gruppo frigo	Installazione di un serbatoio di accumulo acqua in uscita, separato da quello in ingresso al chiller	0	2	0	0.029
Gruppo frigo	Sostituzione di un refrigeratore a glicole con uno ad ammoniaca	1	0	0.014	0
Gruppo frigo	Sostituzione impianto idronico con impianto espansione diretta	1	0	0.014	0
Condensatore	Installazione di un sistema di condensazione flottante	0	1	0	0.014
Gruppo frigo	Installazione di chiller dotati di inverter	1	0	0.014	0
Gruppo frigo	Sostituzione raffreddamento ad aria del chiller con raffreddamento ad acqua	0	3	0	0.043
Gruppo frigo	Installazione di un gruppo frigo di taglia ridotta per i periodi di domanda inferiore	1	0	0.014	0
Motori elettrici	Installazione di inverter sui motori elettrici	8	24	0.114	0.343
Motori elettrici	Sostituzione dei motori elettrici con elementi più efficienti	5	17	0.071	0.236
Generatore di vapore	Sostituzione di un generatore di vapore con uno più efficiente	4	1	0.057	0.014
Caldaia	Sostituzione di una caldaia ad olio diatermico con una a tubi di fumo	0	2	0	0.028
Caldaia	Installazione di una caldaia ad olio diatermico	1	0	0.014	0
Caldaia	Sostituzione della caldaia con un elemento più efficiente	1	3	0.014	0.043
Caldaia	Sostituzione dei bruciatori della caldaia con un elemento più efficiente	1	0	0.014	0
Pompe	Installazione di pompe con inverter	1	0	0.014	0
Pompe	Sostituzione delle pompe con elementi ad alta efficienza	0	1	0	0.014

Pompe	Installazione di pompe automodulanti	1	0	0.014	0
Compressori	Sostituzione di un compressore con uno più efficiente	5	3	0.071	0.043
Compressori	Installazione di un compressore a vite con inverter	1	1	0.014	0.014
Compressori	Installazione di un compressore a vite	2	0	0.029	0
Compressori	Sostituzione di un compressore con uno dotato di inverter	3	3	0.043	0.043
Valvole	Installazione di valvole nel circuito aria compressa per chiudere ogni volta le sezioni non usate	0	1	0	0.014
Compressori	Sostituzione di un compressore fisso con un elemento bistadio	1	0	0.014	0
Compressori	Sostituzione di un compressore a vite con uno a palette e inverter	0	1	0	0.014
Coibentazione tubature	Coibentazione delle tubature con fluidi termovettori	0	3	0	0.043
Coibentazione valvole	Coibentazione delle valvole interagenti su fluidi termovettori	1	0	0.014	0
Quadri elettrici	Installazione di un quadro elettrico per la riduzione delle armoniche	0	1	0	0.014
Quadri elettrici	Installazione di quadri di rifasamento	2	0	0.029	0
Filtro passivo	Installazione di un filtro passivo per la riduzione delle armoniche	0	3	0	0.043
Stabilizzatore di tensione	Installazione di uno stabilizzatore di tensione	1	0	0.014	0
UTA	Sostituzione di elementi di condizionamento con alcuni dotati di inverter	1	0	0.014	0
Cinghie	Installazione di cinghie ad alta efficienza sui ventilatori	0	1	0	0.014
UTA	Installazione di UTA con recupero calore termodinamico attivo	0	1	0	0.014
Batterie di raffreddamento	Sostituzione di una batteria a vapore con una batteria ad acqua	0	1	0	0.014
UTA	Sostituzione delle UTA con elementi più efficienti	1	1	0.014	0.014
Trasformatore	Sostituzione del trasformatore con un elemento più efficiente	1	2	0.014	0.029
Cogeneratore	Installazione di un cogeneratore (MCI + recupero calore)	5	5	0.071	0.071
Cogeneratore	Potenziamento del sistema di cogenerazione	0	1	0	0.014
Trigeneratore	Installazione di un impianto di trigenerazione	2	7	0.029	0.099
Trigeneratore	Sostituzione di una turbina a vapore con un impianto di trigenerazione	1	0	0.014	0
Impianto fotovoltaico	Installazione di un impianto fotovoltaico	2	24	0.029	0.343
Scambiatori di calore	Installazione di un impianto di assorbimento del calore dei condensatori	1	1	0.014	0.014
Scambiatori di calore	Installazione di un impianto di assorbimento del calore recuperabile dal cogeneratore	0	2	0	0.029
Economizzatore	Installazione di un economizzatore sul generatore di vapore	1	3	0.014	0.043
Scambiatori di calore	Installazione di uno scambiatore di calore fumi-acqua in ingresso caldaia/inceneritore	0	2	0	0.029
Scambiatori di calore	Installazione recuperatore di calore nel circuito di raffreddamento dei compressori	0	2	0	0.029
Turbine	Sostituzione della turbina alimentata col calore recuperato con un elemento correttamente dimensionato	0	1	0	0.014
Scambiatori di calore	Installazione recuperatori di calore nei sistemi di dissipazione	0	1	0	0.014
Scambiatori di calore	Installazione di recuperatore di calore dai sistemi d'areazione	0	1	0	0.014
Post-combustore	Installazione di un post-combustore in caldaia	1	0	0.014	0
Recupero termico e preriscaldamento	Installazione di sistemi per il preriscaldamento dell'acqua in ingresso al generatore di vapore usando acqua di scarto	0	1	0	0.014
Scambiatori di calore	Installazione di camicia di coibentazione sugli scambiatori di calore	0	1	0	0.014
Cogeneratore	Installazione di sistemi per utilizzare il calore in eccesso del cogeneratore in estate per fare il flash dei solventi	0	1	0	0.014
Turbine	Installazione di una turbina che sfrutti un salto di pressione tra caldaia e circuito	0	2	0	0.029

3.4 Impianti di produzione di farmaci

Tra gli interventi maggiormente proposti/implementati dalle aziende si annoverano:

1. Installazione di un impianto fotovoltaico.
2. Installazione di un impianto di generazione contemporanea di energia elettrica, frigorifera e termica.
3. Installazione di un cogeneratore (energia elettrica e termica).
4. Sostituzione del gruppo frigo con elemento più efficiente (intervento più implementato in passato).

Anche per questo settore grande importanza è assunta dagli interventi relativi alla riduzione dei consumi energetici dei sistemi ausiliari. In particolare, è possibile agire implementando sistemi efficientamento

energetico degli impianti o riducendo i consumi energetici tramite fonti rinnovabili. Ad esempio, è possibile installare impianti solari termici per la generazione diretta di vapore saturo che viene poi utilizzato per l'asciugatura delle pillole [159][160]. Confrontando l'Allegato A con la tabella sottostante, si nota come gli interventi maggiormente proposti/implementati siano stati estratti dalle diagnosi energetiche e non siano stati rilevati in letteratura scientifica. In questo caso, dunque, si sottolinea come l'analisi delle diagnosi energetiche sia risultata particolarmente utile, mentre la letteratura scientifica non abbia fornito una descrizione al passo coi tempi, che costituisca il corretto stato dell'arte degli interventi *energy-saving* applicabili nel settore farmaceutico.

Oggetto della soluzione	Soluzione	$n_{i,i}$	$n_{p,i}$	$f_{i,i}$	$f_{p,i}$
Essiccatore	Sostituzione dell'essiccatore alimentato ad energia elettrica con un elemento alimentato ad adsorbimento (recupero termico sala compressori)	0	1	0	0.01
Deumidificatore	Installazione di un deumidificatore per l'aria in ingresso all'essiccatore	0	1	0	0.01
Sterilizzatore	Installazione di uno sterilizzatore ad ozono	1	0	0.01	0
Sistema di supporto	Installazione di sistemi per il preriscaldamento dell'acqua in ingresso al processo	0	1	0	0.01
Sistemi di recupero calore	Installazione di sistemi per la preconcentrazione e combustione termica rigenerativa	0	1	0	0.01
Dispositivo per l'osmosi inversa	Installazione di un dispositivo per l'osmosi inversa	2	0	0.02	0
Sistemi di recupero calore	Installazione sistemi di recupero di calore dal raffreddamento dell'acqua distillata	1	0	0.01	0
Gruppo frigo	Sostituzione del gruppo frigo con elemento più efficiente	13	11	0.15	0.13
Pre-cooler	Installazione di sistemi di pre-cooling sul chiller per la refrigerazione	0	1	0	0.01
Gruppo frigo	Installazione di un gruppo frigo ad assorbimento usando acqua calda da raffreddare	0	3	0	0.04
Gruppo frigo	Formazione di un sistema frigo centralizzato	1	2	0.01	0.02
Torri di raffreddamento	Sostituzione di torri di raffreddamento ad aria con raffreddamento ad acqua	0	2	0	0.02
Batterie di raffreddamento	Sostituzione dei pacchi batterie dei chiller	0	1	0	0.01
Gruppo frigo	Sostituzione del gruppo frigo con un elemento dotato di doppio inverter	1	1	0.01	0.01
Gruppo frigo	Installazione di un gruppo frigo per basse temperature di taglia ridotta	1	0	0.01	0
Torri evaporative	Installazione di una torre evaporativa per il raffreddamento dei serbatoi	1	0	0.01	0
Motori elettrici	Sostituzione motori elettrici con versioni di classi più efficienti	7	17	0.08	0.20
Motori elettrici	Sostituzione dei motori elettrici con motori EC	0	1	0	0.01
Motori elettrici	Installazione di un inverter sui motori elettrici già presenti in impianto	11	14	0.13	0.17
Generatore di vapore	Sostituzione del generatore di vapore con elemento più efficiente	4	5	0.05	0.06
Generatore di vapore	Sostituzione dei bruciatori del generatore di vapore con elementi più efficienti	0	1	0	0.01
Generatore di vapore	Installazione di un recuperatore di calore dai fumi del generatore di vapore	1	2	0.01	0.02
Generatore di vapore	Sostituzione del generatore di vapore con una caldaia a vaporizzazione istantanea	1	0	0.01	0
Rievaporatore	Installazione di un rievaporatore degasatore termico	0	1	0	0.01
Generatore di vapore	Installazione di sistemi per la combustione del fango secco prodotto dall'impianto	0	1	0	0.01

Degasatore	Installazione di un degasatore nel circuito a vapore per il recupero del flash steam	1	0	0.01	0
Generatore di vapore	Installazione di un economizzatore sul generatore di vapore	2	4	0.02	0.05
Caldaie	Sostituzione delle caldaie per il vapore con nuovi elementi dotati dieconomizzatore	1	0	0.01	0
Sistemi di preriscaldamento	Installazione di sistemi di preriscaldamento dell'acqua in ingresso tramite cascami termici	0	1	0	0.01
Pompe	Sostituzione pompa con una più efficiente	0	1	0	0.01
Compressori	Sostituzione compressore con uno più efficiente	1	1	0.01	0.01
Compressori	Sostituzione di un compressore con uno a vite	2	0	0.02	0
Compressori	Installazione di compressori centrifughi	1	0	0.01	0
Compressori	Sostituzione di un compressore con uno dotato di inverter	6	11	0.07	0.13
Compressori	Sostituzione di un compressore con uno dotato di inverter e di kit di recupero termico	1	0	0.01	0
Circuito aria compressa	Installazione di valvole di tenuta nel circuito aria compressa	1	0	0.01	0
Circuito aria compressa	Installazione di sistemi per il recupero dell'aria compressa dai cilindri pneumatici	0	1	0	0.01
Compressori	Installazione di un compressore di piccola taglia per i momenti di richiesta ridotta	0	1	0	0.01
Circuito aria sottovuoto	Collegare più strumenti al sistema centralizzato di sottovuoto	0	1	0	0.01
Unità Trattamento Aria (UTA)	Sostituzione trasmissione multi-cinghia con mono-cinghia	1	0	0.01	0
UTA	Sostituzione delle cinghie di trasmissione con elementi ad alto rendimento	0	4	0	0.05
UTA	Installazione filtri sulla presa d'aria esterna per la riduzione di perdite di carico	1	0	0.01	0
UTA	Installazione sistema free cooling	1	1	0.01	0.01
	Installazione recuperatori di calore sulle UTA	0	7	0	0.08
UTA	Installazione di scambiatori a tubo di calore sulle batterie di raffreddamento delle UTA	0	1	0	0.01
UTA	Sostituzione filtri a tasche con filtri elettrostatici attivi	0	4	0	0.05
UTA	Sostituzione dell'impianto UTA con uno più efficiente	1	2	0.01	0.02
UTA	Sostituzione delle UTA con nuovi sistemi di recupero ed inverter	1	1	0.01	0.01
UTA	Eliminazione del doppio stadio di filtrazione	0	1	0	0.01
UTA	Installazione di sistemi di recupero run around loop	0	1	0	0.01
UTA	Adozione di sistemi di ricircolo di aria in uscita	0	1	0	0.01
UTA	Sostituzione dei condizionatori con elementi più efficienti	1	0	0.01	0
Gruppo di continuità	Sostituzione del gruppo di continuità con un elemento più efficiente	0	1	0	0.01
Gruppo di continuità	Sostituzione gruppo di continuità con un elemento più efficiente	1	0	0.01	0
Coibentazione	Coibentazione dei serbatoi d'acqua	0	1	0	0.01
Coibentazione	Installazione di pellicole antisolari	1	1	0.01	0.01
Coibentazione	Coibentazione delle valvole sulle utenze ad alta temperatura	1	0	0.01	0
Coibentazione	Coibentazione dei sistemi di raccolta condense	0	1	0	0.01
Tubature	Installazione valvole di regolazione per i fluidi termovettori	1	2	0.01	0.02
Tubature	Installazione di sistemi a portata variabile	1	3	0.01	0.04
Power quality	Installazione di attrezzature per la filtrazione passiva	0	3	0	0.04
Power quality	Installazione di un ottimizzatore di tensione	0	7	0	0.08
Trasformatori	Installazione di trasformatori eco a basse perdite nella cabina elettrica	1	0	0.01	0
Rifasatore	Installazione di un sistema di rifasamento della corrente	0	4	0	0.05

Trasformatori	Sostituzione del trasformatore a bagno d'olio con uno a resina	1	0	0.01	0
Caricabatterie dei veicoli di movimentazione materiali	Sostituzione dei caricabatterie dei veicoli con elementi adattivi alle condizioni di carica	0	4	0	0.05
Teleriscaldamento	Effettuare un allacciamento ad un impianto di teleriscaldamento	0	1	0	0.01
Cogeneratore	Installazione di un cogeneratore - Energia elettrica e assorbitore per la produzione di freddo	0	1	0	0.01
Cogeneratore	Installazione di un cogeneratore - Energia elettrica e termica	2	20	0.02	0.24
Cogeneratore	Installazione di un economizzatore sul cogeneratore	1	0	0.01	0
Degasatore	Installazione di un sistema di recupero calore sul degasatore del cogeneratore	0	1	0	0.01
Cogeneratore	Sostituzione del cogeneratore con uno dotato di assorbitore	0	1	0	0.01
Cogeneratore	Sostituzione del cogeneratore con uno di taglia maggiore	0	2	0	0.02
Trigeneratore	Installazione di un impianto di generazione contemporanea di energia elettrica, frigorifera e termica	2	24	0.02	0.29
Trigeneratore	Aumentare il numero di aree di impianto che usufruiranno dell'energia ottenuta tramite trigenerazione	0	1	0	0.01
Impianto fotovoltaico	Installazione di un impianto fotovoltaico	4	33	0.05	0.39
Impianto fotovoltaico	Effettuare un ampliamento dell'impianto fotovoltaico	0	1	0	0.01
Impianto solare termico	Installazione di un impianto solare termico per la produzione di acqua calda	1	2	0.01	0.02
Gruppo elettrogeno	Installazione di un gruppo elettrogeno più efficiente	1	0	0.01	0
Caldaia	Sostituzione della caldaia con una più efficiente	2	1	0.02	0.01
Caldaia	Sostituzione dei sistemi di generazione calore con un impianto centralizzato	1	0	0.01	0
Caldaia	Sostituzione di caldaie ad olio diatermico con caldaie a vapore ad alta efficienza	1	0	0.01	0
Caldaia	Installazione di caldaie a vapore	1	0	0.01	0

Complessivamente, i risultati mostrano l'interesse delle aziende a migliorare i consumi energetici dei loro impianti agendo sui sistemi ausiliari. In particolare, i trend rilevati hanno messo in luce che, per tre dei quattro settori analizzati, gli interventi di installazione di inverter e sostituzione dei motori elettrici con motori più efficienti sono stati considerati gli interventi di maggior spicco. Inoltre, i risultati mostrano l'importanza di aver consultato le diagnosi energetiche, dalle quali sono stati dedotti molti degli interventi con le prospettive di implementazione più rilevanti (che, invece, non sono stati riscontrati in letteratura).

A valle dello studio dei trend effettuato, sono stati programmati e svolti dei sopralluoghi in specifici stabilimenti italiani (relativi rispettivamente al settore delle fonderie e dello smaltimento dei rifiuti). Tali sopralluoghi sono stati effettuati in aziende reputate dalle rispettive associazioni di categoria all'avanguardia dal punto di vista delle tecnologie e dei consumi energetici. I sopralluoghi sono, dunque, risultati utili ad analizzare la maturità energetica delle tecnologie presenti in tali impianti e a confermare l'interesse delle aziende ad agire verso gli interventi di cui sopra. Infatti, durante i sopralluoghi UNIFI ha intervistato il personale aziendale, che ha confermato l'interesse ad agire sulla riduzione dei consumi energetici dei sistemi ausiliari che (secondo la loro esperienza) consentono di ottenere grandi margini di miglioramento sostenendo costi contenuti. Di seguito si riporta una descrizione sintetica di quanto osservato da UNIFI durante i sopralluoghi.

In data 26/10/2021 è stata effettuata la visita all'impianto **Foderia Palmieri**, situato a Calenzano (FI). L'impianto si occupa di processi di fusione tramite colata in stampo a perdere per la produzione di commesse appartenenti a diversi settori, tra cui *l'automotive* e il ferroviario. L'impianto risulta essere all'avanguardia nel settore per il processo fortemente automatizzato. Nello specifico, la linea degli stampi da produrre ed il macchinario per la colata hanno la possibilità di muoversi su rotaie in direzioni opposte per permettere un maggior grado di libertà. Inoltre, la macchina per la colata opera in maniera automatica limitando sprechi di materiale e tempo. Il processo produttivo parte dalla preparazione degli stampi in sabbia a cui vengono aggiunti opportuni leganti. Gli stampi vengono poi indirizzati verso il processo di colata. Simultaneamente, il materiale metallico viene

pesato per raggiungere le quantità richieste da progetto e successivamente fuso. Il fuso è poi utilizzato per il processo di colata. Il materiale colato segue un ciclo di raffreddamento ad aria. Successivamente, un processo di rimozione delle sabbie viene fatto tramite vibrazione su di un nastro trasportatore e l'impatto per caduta (tramite un artiglio meccanico che prende il prodotto e da una certa altezza lo lascia cadere). Le attività successive sono quelle di controllo qualità per l'identificazione di scarti, finitura superficiale ed eventuali trattamenti termici.

Durante la visita, UNIFI ha avuto la possibilità di vedere l'intero processo produttivo (dall'arrivo della materia prima all'imballaggio del prodotto finito). Inoltre, sono stati visionati i locali per il monitoraggio e controllo dei macchinari, per la progettazione e design dei prodotti, per il testing tramite prove normate.

In data 25/11/2021 è stata effettuata la visita dell'impianto **HERAmbiente** appartenente al gruppo Hera, situato a Granarolo dell'Emilia (BO). L'impianto si occupa di produzione di energia tramite termovalorizzazione di rifiuti per la maggior parte da fonti cittadine. Lo smaltimento dei rifiuti viene fatto tramite incenerimento dei prodotti. Più nel dettaglio i materiali da smaltire vengono stoccati momentaneamente in un edificio dell'altezza di circa 30 metri, al cui interno un artiglio meccanico raccoglie quantità di rifiuti per poi inserirli all'interno del forno di combustione.

Durante la visita, UNIFI ha avuto l'occasione di vedere la sala controllo dell'artiglio meccanico e la sala comandi per il controllo e il monitoraggio dell'intero impianto.

Per quanto concerne gli impianti di produzione di farmaci e principi attivi, nessuno stabilimento si è mostrato disponibile a consentire sopralluoghi. In ogni caso, questo fattore non ha apportato limiti al lavoro di UNIFI, in quanto un'ulteriore validazione dei risultati relativi ai trend tecnologici in tutti i settori analizzati è stata effettuata secondo le modalità riportate nel capitolo successivo.

4 Risultati dello studio di fattibilità tecnico-economica tramite consultazione di esperti delle associazioni di categoria

Le frequenze stimate nel Capitolo 3 sono state utili per individuare un trend e sottolineare gli interventi più popolari nelle industrie esaminate, ma non sono sufficienti a giustificare se un intervento è migliore di un altro, né validano il contenuto delle tabelle realizzate. Per questo motivo, le liste di interventi tecnologici *energy-saving* inerenti ai diversi settori industriali sono state condivise con esperti delle associazioni di categoria delle rispettive industrie considerate. Questa attività è stata svolta al fine di ottenere preziosi commenti sull'applicabilità delle soluzioni tecnologiche elencate, validando così il contenuto delle tabelle prodotte ed evitando di inserire nelle tabelle soluzioni tecnologiche che nel 2021 risultano obsolete e superate, soluzioni già obbligatorie a seguito di leggi e normative, e/o soluzioni inapplicabili in contesti reali.

Nello specifico, è stata consultata l'associazione Assofond relativamente all'analisi delle fonderie italiane, Utilitalia per lo studio delle industrie di trattamento rifiuti e, infine, Farmindustria relativamente al settore farmaceutico e di produzione di principi attivi. Per tenere conto delle osservazioni degli esperti, le liste delle tecnologie individuate sono state presentate a panel di esperti delle associazioni durante molteplici sessioni di *brainstorming*. Le soluzioni tecnologiche sono state esaminate una per una e, quando un esperto ha ritenuto necessario aggiungere un'osservazione, si è avviata una discussione fino a raggiungere un'opinione comune di tutti gli esperti. In generale, le osservazioni degli esperti hanno confermato le tendenze rilevate ed espone nel Capitolo 3.

Le liste di opportunità tecnologiche e investimenti *energy-saving* (generate e validate con l'ausilio degli esperti) rappresentano uno strumento sintetico, ma utile, per facilitare le aziende nella scelta di soluzioni appropriate per il risparmio energetico. I commenti degli esperti raccolti durante questa fase sono riportati in dettaglio in Appendice A.

I risultati in Appendice A mostrano come, l'interlocuzione con esperti di settore abbia portato a numerosi commenti utili riguardanti tutte le fasi di processo e le tecnologie, che i lettori potranno utilizzare per valutare gli interventi proposti alla luce di considerazioni di esperti di settore. Nello specifico, i commenti hanno messo gli interventi già molto utilizzati negli stabilimenti italiani, indicando una diffusione notevole e uno sviluppo consolidato di tali tecnologie nelle aziende italiane, e anche gli interventi che, al contrario, risultano non utilizzati ad oggi (per una non convenienza o non conoscenza delle tecnologie nominate).

Oltre ai commenti degli esperti, poiché alcune diagnosi energetiche includevano dati riguardanti il costo, il risparmio energetico, e il periodo di recupero relativi agli interventi più rilevanti, all'interno del progetto si è pensato di raccogliere questi dati e analizzarli per determinare le ragioni che hanno portato le aziende ad adottare una specifica soluzione di risparmio energetico piuttosto che altre. Questa attività è stata svolta dal partner di progetto ENEA, che ha stimato il tempo di ritorno delle tecnologie e altri indicatori di prestazione economica degli interventi di efficientamento. Si rimanda, dunque, alla lettura del report di ENEA per la consultazione di tale analisi, non riportandole anche qui per evitare duplicati. Tuttavia, i risultati di ENEA sono stati consultati da UNIFI per confermare le analisi effettuate.

Nello specifico, ENEA ha stimato un indicatore di costo-efficacia visibile nell'equazione (5), che è stato calcolato prendendo in considerazione **interventi già effettuati** dalle aziende campione negli ultimi anni. Tale indicatore è stato, in seconda battuta, esaminato da UNIFI, che ha potuto studiare gli interventi *energy-saving* da un punto di vista economico, considerando sia il costo di investimento, che il risparmio energetico atteso associato ad ogni intervento effettuato.

$$\begin{aligned} & \text{cost - effectiveness indicator} & (5) \\ & \frac{\text{Euro invested [€]}}{\text{Ton of Oil Equivalent (toe) of energy saved [ton]}} \end{aligned}$$

Dall'analisi costo-efficacia delle soluzioni è emersa una volontà generale delle aziende nei diversi settori a investire nelle soluzioni di risparmio afferenti al miglioramento dei sistemi ausiliari e di recupero termico.

Questo risultato è stato giustificato dal valore del rapporto costo-efficacia di tali soluzioni, che ha mostrato come con ridotti investimenti economici (quali l'installazione di inverter o la sostituzione di motori) è possibile ottenere notevoli benefici a livello di consumi energetici.

L'interesse delle aziende e i risultati di costo-efficacia emersi sono risultati del tutto in linea con i trend di sviluppo sottolineati da UNIFI nel Capitolo 3, dunque confermando e validando tali analisi. Inoltre, tale interesse è risultato in linea anche con quanto già specificato da UNIFI nel report 2020 relativamente ai settori del vetro e del cemento, confermando una convenienza generale nell'applicazione di soluzioni *energy-saving* relative ai sistemi ausiliari in tutti i settori energivori analizzati. Come già anticipato, si rimanda alla lettura del report di ENEA per informazioni più dettagliate sull'analisi degli indicatori-costo efficacia.

Complessivamente, l'analisi del costo-efficacia delle soluzioni (eseguita in collaborazione con il partner di progetto ENEA) e l'interlocuzione con gli esperti delle associazioni di categoria in merito a tutti gli interventi *energy-saving* identificati, hanno consentito di individuare per ciascuna soluzione di soluzione efficientamento energetico la sua fattibilità tecnico-economica.

5 Strumento per la stima del loro livello di maturità energetica e di valutazione del gap esistente tra il loro livello di maturità e quello competente alla relativa BAT

L'individuazione delle soluzioni proposte in letteratura e di quelle emerse dallo studio delle diagnosi porta ad un'ampia lista di interventi tecnologici afferenti a diversi settori. Per ogni settore e fase di processo, infatti, si individuano fino a decine di dispositivi e tecniche, ognuna caratterizzata da specifiche performance sia in termini energetici che di produzione. L'impatto ambientale (misurato ad esempio in Kg di CO₂ emessa), il consumo elettrico, l'investimento iniziale richiesto, il costo di processo, l'accesso ad eventuali sgravi fiscali, la facilità di utilizzo, e altri fattori sono solo alcuni esempi degli elementi (d'ora in poi verranno chiamati "criteri") che devono essere presi in considerazione per poter valutare quali siano le soluzioni più adatte per ridurre i consumi energetici e migliorare le prestazioni di una specifica azienda in un determinato momento. L'individuazione dell'importanza del criterio viene definita dal *decision maker (DM)*, che deve saper selezionare l'intervento tecnologico più conveniente ed appropriato basandosi non solo su considerazioni di carattere energetico, ma anche considerando le politiche e le strategie aziendali (ovvero gli obiettivi che l'azienda si è prefissata di raggiungere tramite investimenti in produzione).

In questo contesto, il problema che emerge è quello di aiutare il DM nella sua attività di selezione degli investimenti tra le liste messe a disposizione. L'individuazione di una lista di soluzioni migliori risulta tuttavia essere complessa. Le motivazioni sono molteplici:

- Il peso attribuito ai vari criteri non è univoco: più figure all'interno della stessa azienda possono identificare importanze differenti a seconda della propria interpretazione della *vision* o del proprio ruolo.
- Le performance sulle singole soluzioni in relazione ai vari criteri possono non essere definite in maniera univoca (ad esempio, il prezzo per un macchinario varia a seconda del fornitore).
- I criteri possono essere sia quantitativi che qualitativi, ma devono essere in grado di definire un valore numerico per ogni singola soluzione.
- Il numero di soluzioni può essere molto elevato. La valutazione basata sulla comparazione uno-ad-uno non è efficiente.
- I criteri utilizzati per valutare le soluzioni possono essere tra di loro in conflitto (ad esempio, i motori elettrici delle classi energetiche più alte portano ad alti risparmi energetici, ma sono anche i più costosi)

Questa tipologia di problemi viene chiamata multicriterio, come già illustrato nel precedente report (UNIFI, anno 2020). Nello specifico, i metodi che tentano di identificare una soluzione sub-ottima a problemi multicriterio sono detti *Multi Criteria Decision Making (MCDM) Methods*. Come già trattato nel 2020, dalla letteratura emergono numerosi metodi per risolvere i problemi MCDM, caratterizzati da complessità computazionali e funzionamenti differenti. Anche gli obiettivi possono essere diversi, in quanto, a seconda del problema, si può desiderare in output [161]:

- Un ranking di tutte le soluzioni, a cui è stato attribuito un punteggio. Tra i molti metodi in grado di ottenere questo vi sono il TOPSIS, VIKOR, SMART, MACBETH, MAUT, UTA, MAVT, MARE, Multimoora.
- Un ranking delle soluzioni senza punteggio associato, ricavabile tramite i metodi ELECTRE III e IV, PROMETHEE e PROMETHEE II, il *Robust Ordinal Regression method*, UTAGMS, GRIP, Extreme Ranking Analysis, RUTA.
- Un sottoinsieme di dimensione minima delle migliori soluzioni. Questo risultato richiede metodi generalmente più complessi, come l'ELECTRE I e IS [162], PROMETHEE V [163] e Rubis [164].

Al fine di permettere alle aziende di:

1. ottenere una chiara visione dei punti di forza e debolezza del proprio apparato impiantistico relativamente al problema dei consumi energetici e della sostenibilità;
2. conoscere le possibili azioni di “self-improvement” da attuare per efficientare i macchinari dal punto di vista energetico nei loro impianti (allo stato dell’arte);
3. stimare il “gap” tra le migliori tecnologie disponibili e quelle attualmente installate nell’impianto di ogni specifica azienda

Nel 2020 UNIFI aveva già proposto un nuovo strumento basato sull’analisi AHP, che era stato illustrato in dettaglio nel report 2020, riportando anche un prototipo Excel editabile e funzionante.

Oltre al modello basato su AHP proposto nel 2020, nel 2021 UNIFI ha sviluppato un nuovo modello di classificazione, che consente di raggiungere gli stessi obiettivi sopra elencati e si affianca al modello già proposto come ulteriore strumento di classificazione degli interventi. Anche il nuovo modello consente di classificare le tecnologie non fornendo una classifica generale (sempre valida), ma personalizzando il ranking in funzione degli obiettivi e delle strategie della specifica azienda in analisi.

Il nuovo modello viene presentato nei paragrafi a seguire e, pur essendo più complesso rispetto al modello AHP, presenta due vantaggi: una maggior accuratezza delle soluzioni (principalmente dovuta a una miglior capacità di gestire l’incertezza sui dati e sui giudizi derivanti da un gruppo eterogeneo di esperti) e la possibilità di fornire in output più soluzioni valide all’utente, trovando anche più tipologie di interventi *energy-saving* in base ad alcune scelte sui parametri di input (differenza tra ottimo globale e ottimo locale).

5.1 Introduzione al modello proposto

L’approccio proposto in questo elaborato è formato dalla combinazione di due modelli classici: uno di questi prenderà in input tutte le soluzioni proposte e estrarrà un sottoinsieme di quelle più convenienti. Quest’ultime verranno successivamente prese dal secondo metodo per identificare, se individuabile, un intervento specifico da consigliare. Questo approccio è stato scelto principalmente per due motivazioni:

- Generare due liste in parallelo può confondere il DM in quanto le soluzioni che saranno riportate non combaceranno: la migliore per un metodo può essere in posizione n-esima per un altro metodo.
- Il metodo scelto può essere interpretato come un metodo per identificare una lista delle 30 migliori soluzioni individuate e, eventualmente, una soluzione specifica consigliata. Questo rappresenta uno strumento chiaro e comprensibile per il supporto decisionale al DM.

Tra i vari metodi disponibili per redigere una lista si possono identificare, come anticipato, due sottogruppi: quelli che ad ogni soluzione associano un punteggio e quelli che stilano semplicemente una lista [161]. Per aumentare la leggibilità del modello e facilitarne la comprensione al DM, è stato scelto un modello del primo sottogruppo. In particolare, abbiamo fatto ricorso al **TOPSIS** per le seguenti motivazioni:

- Metodo ampiamente utilizzato in letteratura e pertanto approvato e validato da numerosi autori;
- Metodo semplice e quindi facilmente comprensibile da parte del DM;
- Valuta le soluzioni in base ad una doppia distanza: vicinanza al risultato migliore e lontananza dal risultato peggiore;
- Permette l’utilizzo sia di dati qualitativi che quantitativi

In particolare, è stata scelta la sua variante **fuzzy** a numeri triangolari (*Triangular Fuzzy Number TFN*), così da tener conto della “sfocatura” delle informazioni sia sulle performance delle soluzioni, sia sugli interessi del DM. Un numero fuzzy triangolare è dato da una terna di valori che ne rappresentano la distribuzione triangolare corrispondente. Nello specifico un TFN $N = (l, m, r)$ è caratterizzato da una distribuzione che parte da zero e che, in corrispondenza del valore l , comincia a crescere linearmente fino ad arrivare ad 1 in m , dove poi torna linearmente a zero fino ad arrivare al punto r .

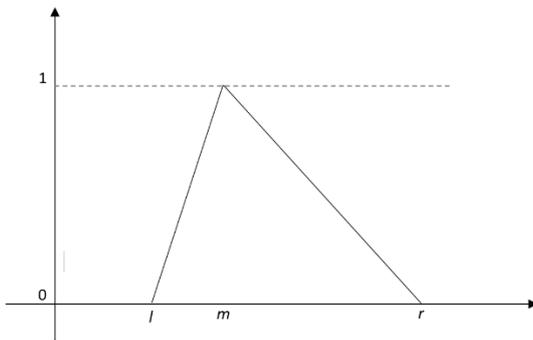


Figura 86 - Distribuzione di un TFN (l,m,r).

Utilizzando il TOPSIS si stila, quindi, una classifica delle soluzioni ordinata secondo i pesi definiti dal DM. Il modello proposto prende le **migliori 30 soluzioni come sottogruppo** e le processa con il secondo metodo utilizzato, il **VIKOR**. Il numero 30 è emerso da un'analisi delle soluzioni tecnologiche in forma tabellare, come un buon compromesso tra scelta e ridotta dispersione.

VIKOR ha, infatti, la capacità, oltre che di stilare un nuovo ranking, anche di individuare, se presente, una soluzione di compromesso fortemente consigliata, che generalmente differisce dal vertice della lista precedentemente definita [165]. Anche in questo caso, per coerenza con la fase precedente, è stata scelta la variante fuzzy.

Questo metodo permette, inoltre, di definire l'approccio desiderato per l'identificazione delle soluzioni, riconducibile **all'attitudine del DM davanti ad una scelta**. Il modello proposto, infatti, permette al DM di definire, in base alle proprie caratteristiche, che tipologia di soluzione è portato a preferire: una soluzione di compromesso che cerchi di soddisfare tutti i criteri o, piuttosto, una soluzione che si impegna a soddisfarne uno al massimo? Questa maggior personalizzazione, la facilità sia di implementazione che di comprensione per il DM e la capacità di consigliare specifiche soluzioni hanno portato alla scelta del metodo VIKOR.

VIKOR non sempre individua la soluzione di compromesso. Quando tale soluzione non viene trovata, in questo caso il modello si limiterà a restituire la lista ordinata delle migliori 30 soluzioni.

Inoltre, dal momento che sono stati scelti approcci fuzzy, è stato implementato un nuovo metodo di aggregazione delle informazioni raccolte: il **Similarity Aggregation Method (SAM) migliorato**, proposto in *Guo et al. (2021)* [166]. Infatti, in condizioni reali non esistono dati univoci, in quanto possono essere identificate due differenti tipologie di sfocatura:

- **Verticale:** la singola informazione non ha un valore preciso bensì distribuito in un range. Per fare un esempio, se durante un'intervista chiedessimo al DM quale sia il prezzo che sarebbe disposto a pagare per un intervento tecnologico, la risposta che riceveremmo sarebbe nella forma $(a; b)$.
- **Orizzontale:** la singola informazione, se prelevata da più fonti, può avere valori differenti. Riprendendo l'esempio precedente, se all'interno della stessa azienda ponessimo lo stesso quesito ad un secondo DM, la risposta sarebbe certamente $(c; d) \neq (a; b)$. Questo fenomeno è dato dalla soggettività di alcune tipologie di informazioni, dalla differente partecipazione alla cultura aziendale e da approcci al rischio diversi.

Per tenere traccia della sfocatura verticale si può adottare un approccio a numeri fuzzy, mentre per la sfocatura orizzontale è necessario reperire le informazioni da più fonti per poi aggregarle. Classicamente l'aggregazione per i TFN avviene tramite un approccio semplice, ma che non applica alcuna considerazione sulla qualità del dato, ovvero:

$$l = \min_k(l^k), \quad m = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K m^k, \quad r = \max_k(r^k)$$

Dove (l, m, r) è la terna di valori che identifica il TFN aggregato, mentre varie misurazioni che lo compongono sono (l^k, m^k, r^k) con $k = 1, 2, \dots, K$ [167]. Come è evidente, questo metodo considera tutte le varianti dell'informazione allo stesso modo, ignorando le differenze qualitative tra i contributi individuali dei singoli esperti interrogati.

Il SAM migliorato si basa, invece, sull'importanza di una corretta aggregazione dei dati fuzzy a disposizione, in modo tale che il processo di unione tenga conto di fenomeni di sfocatura causati da fonti di informazioni differentemente affidabili. In sostanza, l'approccio SAM fonda il proprio funzionamento su due principali considerazioni:

- Non tutti gli esperti interrogati sono paragonabili in termini di esperienza e conoscenze sul tema. È fondamentale quindi prevedere un sistema di pesi che differenzi le informazioni ottenute.
- È fondamentale considerare il livello di consenso degli esperti.

Sorge però un dilemma: è più importante il consenso o il livello di esperienza? Per fare un esempio pratico, consideriamo di aver bisogno di un'informazione e che questa ci venga fornita da cinque esperti. Quattro di questi hanno un peso di 0,6, ovvero non possono essere considerati una fonte completamente affidabile, mentre il quinto ha un peso pari ad 1. Nell'ipotesi che i quattro concordino su una risposta specifica, mentre il quinto offra una risposta differente, quale delle due consideriamo valida? Per ovviare a questo problema, il SAM migliorato introduce il fattore di rilassamento β , un parametro il cui valore sposta l'esito dell'aggregazione. Il DM potrà infatti decidere come considerare le informazioni raccolte in funzione delle proprie caratteristiche ed esperienze, permettendo quindi di attribuire più peso al consenso o all'esperienza complessiva dell'intervistato. Questa ulteriore possibilità di configurazione rende il modello proposto ancora più personalizzabile, in modo da restituire al DM soluzioni più coerenti con i suoi bisogni e le sue aspettative.

5.2 Modello proposto: passaggi analitici

In questa sezione verrà analizzato nel dettaglio il modello proposto, spiegando i passaggi e le decisioni prese. I dati necessari in input sono i seguenti:

- Informazioni relative agli esperti interrogati:
 - La posizione professionale
 - Il tempo di servizio in quel settore
 - Il livello di formazione
 - L'età

Queste informazioni, capaci di rappresentare l'esperienza complessiva degli intervistati, servono per attribuire i pesi necessari per il SAM. Di seguito lo schema dei possibili valori che possono essere assegnati [166].

Constitution	Classification	Score
Professional position	Senior manager	10
	Junior academic/Professor	8
	Engineer/Vice-professor	6
	Technician	4
	Worker	2
Service time	≥30 years	10
	20-29	8
	10-19	6
	6-9	4
	≤5	2
Education level	PhD (Doctor of Philosophy)	10
	Master	8
	Bachelor	6
	HND (Higher National Diploma)	4
	School level	2
Age	≥50	8
	40-49	6
	30-39	4
	<30	2

Figura 87 - Sistema dei punteggi per la definizione del peso degli esperti [166].

- I pesi che i DM attribuiscono ai differenti criteri. Questi sono scelti tramite una scala linguistica proposta da [168], in cui ad ogni livello è associato un TFN.

	L	M	R
Indispensable	0,8	0,9	1
Extremely important	0,7	0,8	0,9
Very important	0,6	0,7	0,8
Important	0,5	0,6	0,7
Medium	0,4	0,5	0,6
Negligible	0,3	0,4	0,5
Very negligible	0,2	0,3	0,4
Extremely negligible	0,1	0,2	0,3
Irrelevant	0	0,1	0,2

Figura 88 - Scala linguistica con relativi TFN proposta da [168].

- I DM possono essere molteplici, per cui si possono ottenere pesi differenti per lo stesso criterio.
- Questa informazione verrà aggregata tramite il metodo SAM migliorato.
- Performance delle soluzioni tecnologiche individuate relative ad ogni criterio. I criteri possono essere sia qualitativi, per i quali si fa riferimento ad un'ulteriore scala linguistica proposta in Xian (2012), che quantitativi, sempre riportati come TFN.

	L	M	R
Perfect	0,8	0,9	1
Extremely high	0,7	0,8	0,9
Very high	0,6	0,7	0,8
High	0,5	0,6	0,7
Medium	0,4	0,5	0,6
Low	0,3	0,4	0,5
Very low	0,2	0,3	0,4
Extremely low	0,1	0,2	0,3
None	0	0,1	0,2

Figura 89 Scala linguistica con relativi TFN proposta da [168].

- Il fattore di rilassamento β necessario per il SAM. Questo parametro non può essere inserito liberamente dai DM, bensì è definito un sistema a risposta multipla a cui sono associati i differenti valori di β . Questo garantisce maggior facilità d'uso ed immediatezza. È prevista quindi la seguente domanda:

Per utilizzare al meglio le informazioni raccolte, quale approccio si preferisce?

- Le informazioni reperite saranno unite dando importanza al consenso degli esperti, a cui corrisponde $\beta=0,2$
- Le informazioni reperite saranno unite dando importanza all'esperienza complessiva dell'intervistato, a cui corrisponde $\beta=0,7$
- Una via di mezzo tra le precedenti, a cui corrisponde $\beta=0,5$
- Il parametro ν , ovvero quel fattore necessario al metodo VIKOR per individuare la tipologia di soluzione desiderata. Il parametro ν prevede la stessa modalità di inserimento del fattore di rilassamento. Il modello prevede quindi il seguente quesito con le seguenti risposte:

Per le eventuali soluzioni specifiche consigliate, quale approccio si preferisce?

 - Individuare soluzioni di compromesso che soddisfino tutti i criteri, a cui corrisponde $\nu=0,8$
 - Individuare soluzioni che cercano il massimo, seppur di un solo criterio, a cui corrisponde $\nu=0,2$
 - Una via di mezzo tra le precedenti, a cui corrisponde $\nu=0,5$

Reperite queste informazioni è possibile procedere con l'applicazione del modello proposto, partendo dall'aggregazione secondo l'approccio SAM migliorato:

- Calcolare il Livello di Consenso $S(x_{ij}^k, x_{ij}^h)$ per ogni coppia di esperti, dove $x_{ij}^k = (l_{ij}^k, m_{ij}^k, r_{ij}^k)$ è la performance della soluzione i-esima rispetto al criterio j-esimo secondo il k-esimo esperto intervistato.

$$S(x_{ij}^k, x_{ij}^h) = 1 - \frac{1}{3} |x_{ij}^k - x_{ij}^h|$$

Dove la differenza tra due TFN è a sua volta un TFN dalla forma $(l_{ij}^k - l_{ij}^h, m_{ij}^k - m_{ij}^h, r_{ij}^k - r_{ij}^h)$, con $k \neq h$, essendo k e $h = 1, 2, \dots, K$, ovvero il numero totale di esperti intervistati. i va da 1 a I , ovvero il numero totale di soluzioni; j va da 1 a C , ovvero il numero totale di criteri. Le performance dei criteri quantitativi devono essere standardizzate prima di poter essere processate: la singola misura deve essere divisa per il massimo tra i valori presenti per quell'informazione. Il Livello di Consenso risulta quindi una sorta di distanza tra tutte le possibili coppie di esperti: se è uguale ad 1 allora due esperti sono in completo accordo, se è uguale a 0 è vero il contrario.

- Calcolare il Grado di Consenso Assoluto Pesato $WA(E_k)$ relativo al k -esimo esperto rispetto ad ogni altra misurazione, utilizzando la formula

$$WA(E_k) = \frac{\sum_{h=1; h \neq k}^K W(E_h) \times S(x_{ij}^k, x_{ij}^h)}{\sum_{h=1; h \neq k}^K W(E_h)}$$

dove $W(E_k)$ è il peso associato al k -esimo esperto. Va specificato che il peso che viene attribuito è la somma dei differenti valori che emergono dalla tabella per uno specifico esperto diviso il totale dei punti di tutti gli esperti interpellati.

Questo passaggio è la caratteristica principale del miglioramento al SAM proposta da Guo et al. (2021) [167], ovvero la pesatura del consenso degli intervistati rispetto al loro livello di esperienza.

- Calcolare il Consenso Relativo $RA(E_k)$ inerente al k -esimo esperto rispetto ad ogni altra misurazione tramite la formula:

$$RA(E_k) = \frac{WA(E_k)}{\sum_{k=1}^K WA(E_k)}$$

Identifica una sorta di peso relativo per ogni esperto che tiene conto sia del consenso che della loro esperienza.

- È quindi adesso possibile calcolare il Coefficiente del Consenso $CC(E_k)$ relativo al k -esimo esperto rispetto ad ogni altra misurazione:

$$CC(E_k) = \beta \times W(E_k) + (1 - \beta) \times RA(E_k)$$

Come è possibile notare dalla formula, più è basso il β più verrà dato peso al consenso degli esperti.

- Infine, si arriva al valore aggregato, usando come peso $CC(E_k)$:

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^K CC(E_k) \times x_{ij}^k$$

Questo è il valore che il modello proposto prende in input e che al suo interno contiene tutte le informazioni relative alla preparazione degli intervistati e al loro consenso.

Questa serie di operazioni viene svolta sia per le performance di tutte le soluzioni rispetto ad ogni criterio che per ogni peso \tilde{w}_j dato ai differenti criteri.

È possibile procedere adesso con la prima fase del modello proposto, ovvero la ricerca delle migliori 30 soluzioni tramite modello TOPSIS:

- Costruire una matrice con il valore standardizzato pesato delle varie performance di ogni soluzione [167].

$$v_{ij} = w_j \times \left(\frac{l_{ij}}{r_j^*}; \frac{m_{ij}}{r_j^*}; \frac{r_{ij}}{r_j^*} \right) \quad \text{con } r_j^* = \text{Max}_j(r_{ij}) \forall \text{ benefit}$$

$$v_{ij} = w_j \times \left(\frac{l_j^-}{r_{ij}}; \frac{l_j^-}{m_{ij}}; \frac{l_j^-}{l_{ij}} \right) \quad \text{con } l_j^- = \text{Min}_j(l_{ij}) \forall \text{ costo}$$

- Calcolare la Fuzzy Positive Ideal Solution (FPIS) e la Fuzzy Negative Ideal Solution (FNIS) usando la formula seguente [167]:

$$FPIS = (v_1^*; v_2^*; \dots; v_c^*) \quad \text{con } v_j^* = \text{Max}_j(v_{ijr})$$

$$FNIS = (v_1^-; v_2^-; \dots; v_c^-) \quad \text{con } v_j^- = \text{Min}_j(v_{ijl})$$

- Calcolare la distanza di ogni soluzione dalla FPIS e dalla FNIS [167]

$$d_i^* = \sum_{j=1}^c d(v_{ij}; v_j^*) \quad d_i^- = \sum_{j=1}^c d(v_{ij}; v_j^-)$$

Usando:

$$d(a; b) = \sqrt{\frac{1}{3}[(l_a - l_b)^2 + (m_a - m_b)^2 + (r_a - r_b)^2]}$$

- Calcolare il coefficiente di vicinanza (*Closeness Coefficient* CC_i) per ogni soluzione usando [167]:

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^*}$$

- Ordinare le alternative in base al CC_i decrescente ed estrarre le prime 30 soluzioni.

Questa è la lista che viene sempre restituita in output al DM e che viene presa in input dal modello VIKOR, i cui passaggi sono elencati di seguito:

- Utilizzando i dati fuzzy relativi alle soluzioni ora individuate, calcolare per tutti i criteri il valore della soluzione ideale (*ideal*) e della soluzione peggiore (*nadir*) [165]

$$\begin{aligned} x_j^* &= \text{Max}_j(x_{ij}) & x_j^- &= \text{Min}_j(x_{ij}) & \forall \text{ benefit} \\ x_j^* &= \text{Min}_j(x_{ij}) & x_j^- &= \text{Max}_j(x_{ij}) & \forall \text{ costi} \end{aligned}$$

- Calcolare per ogni criterio di ogni soluzione la distanza normalizzata dall'ideale e dal *nadir*, a seconda che siano benefit o costi [165]:

$$\begin{aligned} D_{ij} &= \frac{x_j^* - x_{ij}}{r_j^* - l_j^-} & \forall \text{ benefit} \\ D_{ij} &= \frac{x_{ij} - x_j^*}{r_j^- - l_j^*} & \forall \text{ costi} \end{aligned}$$

- Calcolare i parametri S e R per ogni soluzione [165]:

$$S_i = \sum_{j=1}^c w_j \times D_{ij} \quad R_i = \text{Max}_j(w_j \times D_{ij})$$

- Calcolare il valore Q utilizzando il parametro v immesso dall'utente. Come si vede un v alto attribuisce più importanza al parametro S, ovvero cerca una soluzione di compromesso tra i vari parametri, mentre un v basso ricerca la soluzione che massimizza ogni volta un singolo criterio [165].

$$Q_i = v \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + (1 - v) \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*}$$

- Individua il valore *crisp* per S, R e Q per ogni soluzione, utilizzando la formula [165]:

$$\text{Crisp}(x) = \frac{2m + l + r}{4}$$

- Stilare tre differenti classifiche basate sul valore *crisp* di S, R e Q in ordine decrescente, chiamate rispettivamente $\{A\}_S$, $\{A\}_R$ e $\{A\}_Q$. Successivamente utilizzare le seguenti regole per individuare la soluzione consigliata [165]:

- *Vantaggio accettabile*. Valutare la seguente relazione:

$$\frac{Q(A^{(2)}) - Q(A^{(1)})}{Q(A^{(30)}) - Q(A^{(1)})} \geq \frac{1}{30 - 1}$$

Dove con $Q(A^{(l)})$ viene inteso il valore Q della soluzione in l -esima posizione nella lista $\{A\}_Q$. Il valore 30 presente nella formula è dato dal numero di soluzioni che sono state messe in input.

- *Stabilità accettabile.* Se $A^{(1)}$, oltre a soddisfare la condizione precedente, risulta essere anche la prima della lista $\{A\}_S$ o della lista $\{A\}_R$, allora la soluzione $A^{(1)}$ può essere individuata come soluzione al problema [165].

5.3 Caso studio

In questa sezione viene applicato il modello proposto ad un caso studio fittizio, ovvero con dati generati casualmente. Questo passaggio risulta fondamentale per la comprensione del funzionamento del modello e la verifica delle sue potenzialità. L'idea iniziale era quella di applicare il modello ad un'azienda italiana, ma nessuna delle aziende consultate durante le numerose riunioni virtuali e in presenza si è mostrata disponibile a condividere informazioni e giudizi.

Il caso studio simulato considera la presenza di due aziende, appartenenti allo stesso settore, che hanno interesse ad applicare il modello di supporto decisionale alle stesse fasi di processo. Si prevede la presenza di più DM per ogni azienda, considerando quindi che la decisione finale non sia presa da un individuo unico ma da un team che d'ora in avanti sarà chiamato *Decision Making Team* (DMT). Le informazioni che verranno generate e che il modello prenderà in input avranno le seguenti caratteristiche:

- Parametri v e β . Per evidenziare le differenze tra gli approcci questi valori sono stati scelti in modo da risultare opposti tra le due aziende, simulando la scelta di approcci diversi tra i due DMT.
- Il numero di soluzioni individuate per le fasi di processo. Viene scelto un numero di soluzioni tecnologiche pari a 50 che, oltre ad essere un numero effettivamente riscontrabile, permette di apprezzare eventuali differenze. Non vengono specificate le tecnologie applicate in quanto la generazione casuale di valori potrebbe portare a grandezze che non riflettono la realtà.
- Livello di esperienza complessiva dei DM e degli esperti interrogati. Queste grandezze saranno generate casualmente con il rispetto di un vincolo di coerenza.
- Pesi dei criteri. Vengono considerati dei DMT di numerosità differente tra le aziende, al cui interno ogni DM potrà definire dei propri pesi. I criteri non vengono esplicitati, in quanto potrebbero essere frutto di uno specifico percorso di analisi o essere dipendenti dalle fasi in analisi.
- Performance delle soluzioni. È stato considerato di ottenere informazioni da alcuni esperti presenti all'interno di entrambe le aziende.

Queste ultime due tipologie di informazioni sono, come anticipato, generate casualmente. Per spiegare come questa generazione avviene è prima necessario mostrare in che forma i dati sono richiesti. Il modello proposto è stato implementato su un prototipo Excel (allegato al report) su cui è possibile inserire i differenti dati e da cui è possibile ricevere in output le soluzioni. Nelle seguenti sezioni si mostra, quindi, come il modello richiede i dati, come questi vengono generati e quali essi siano nel caso studio presentato. Questo avviene per tutti i dati in input.

5.3.1 Selezione ed inserimento: parametri v e β

La maschera di inserimento di questi dati si presenta nel prototipo Excel nella seguente forma:

Informazioni sull'approccio desiderato	
Per le eventuali soluzioni consigliate nello specifico, quale approccio si preferisce?	Individuare soluzioni di compromesso che soddisfino tutti i criteri ▼
Per utilizzare al meglio le informazioni raccolte, quale approccio si preferisce?	Le informazioni reperite saranno unite dando importanza alla "expert agreement" ▼

Figura 09 - Maschera di inserimento parametri v e β .

Entrambe le domande permettono di selezionare una risposta tra quelle disponibili, precedentemente esposte. Prendendo in considerazione quindi le due aziende, che chiameremo A e B , sono stati attribuiti i seguenti valori:

- Azienda A: $\beta=0,7$ e $\nu=0,2$. Questo implica che verrà attribuito un peso maggiore all'esperienza del singolo esperto intervistato e si prediligeranno soluzioni che soddisfano il più possibile il singolo criterio.
- Azienda B: $\beta=0,2$ e $\nu=0,4$, che implica tendenze completamente opposte: verrà attribuita maggior importanza al consenso degli esperti e si cercheranno soluzioni di compromesso che provino a soddisfare tutti i criteri.

Scegliendo questi valori sarà possibile evidenziare il livello di personalizzazione che l'approccio proposto permette.

5.3.2 Generazione ed inserimento: livello di esperienza

Per poter applicare il SAM migliorato è necessario definire il livello di preparazione complessiva dei singoli intervistati. Questo passaggio deve essere fatto sia per i DM, necessario per definire le tendenze del DMT sui criteri, che per gli esperti, necessario per attribuire un valore più corretto alle performance delle soluzioni. Per l'inserimento delle informazioni è stata prevista la seguente maschera nel prototipo Excel:

Informazioni sugli intervistati		
Inserire una "x" nella casella corrispondente alla propria classe		
ATTENZIONE: inserire una sola "x" per tipologia		
Tipologia di informazione	Classificazione	k- esimo intervistato
Posizione professionale	Senior manager	
	Junior academic/Professor	
	Engineer/Vice-professor	
	Technician	
	Worker	
Tempo di servizio	>= 30	
	20-29	
	10-19	
	6-9	
	<= 5	
Livello di educazione	PhD	
	Master	
	Bachelor	
	HND (Higher National Diploma)	
	School level	
Età	>= 50	
	40-49	
	30-39	
	<= 30	

Figura 91 - Maschera di inserimento livello di esperienza complessiva degli intervistati.

Come precedentemente mostrato, ad ognuna delle possibili risposte è associato un valore necessario poi per attribuire un peso all'esperto. Per generare casualmente questo valore è stata adottata la seguente procedura:

- Per ogni tipologia di informazione è stato associato un numero ad ogni possibile risposta. Questo numero è un progressivo che parte, per ogni tipologia, da 1. Nello specifico:

	Numero associato	Classificazione
Posizione professionale	1	Senior manager
	2	Junior academic/Professor
	3	Engineer/Vice-professor
	4	Technician
	5	Worker
Tempo di servizio	1	>= 30
	2	20-29
	3	10-19
	4	6-9
	5	<= 5
Livello di istruzione	1	PhD
	2	Master
	3	Bachelor
	4	HND (Higher National Diploma)
	5	School level
Età	1	>= 50
	2	40-49
	3	30-39
	4	<= 30

Figura 92 - Tabella con valore associato per ogni possibile risposta.

- Generazione di un numero casuale intero tra 1 ed il massimo numero X associato per quella categoria. X è uguale a 5 per le prime tipologie di informazione, mentre per l'ultima è 4. Il numero casuale viene generato utilizzando la formula Excel = CASUALE.TRA(1;X). È stato implementato anche un controllo di coerenza che impedisce di avere un'età minore degli anni di servizio: nel caso in cui il numero casuale relativo al tempo di servizio sia 1 o 2, la generazione casuale del numero associato all'età è ottenuta tramite la formula = CASUALE.TRA(1;2).
- Selezione della risposta in base al numero casuale generato.

È stato scelto di considerare un DMT formato da 3 soggetti per l'azienda A e uno formato da 2 soggetti per l'azienda B, mentre il numero di esperti considerati per la valutazione delle tecnologie è pari a 3. Di seguito si riportano i dati generati nel prototipo Excel:

Tipologia di informazione	Classificazione	Intervistati							
		Expert 1	Expert 2	Expert 3	DM A1	DM A2	DM A3	DM B1	DM B2
Posizione professionale	Senior manager			X	X				
	Junior academic/Professor								
	Engineer/Vice-professor		X			X	X	X	
	Technician								X
	Worker	X							
Tempo di servizio	>= 30							X	
	20-29		X						
	10-19	X		X	X		X		
	6-9					X			
	<= 5								X
Livello di educazione	PhD			X					
	Master		X				X	X	X
	Bachelor								
	HND (Higher National Diploma)								
	School level	X			X	X			
Età	>= 50					X	X	X	X
	40-49		X						
	30-39	X			X				
	<= 30			X					

Figura 93 - Tabella riassuntiva dei valori generati casualmente sull' esperienza complessiva degli intervistati.

5.3.3 Generazione ed inserimento: pesi sui criteri

Fondamentali per la personalizzazione sono anche i pesi relativi all'importanza che ogni DM attribuisce ai criteri. Come anticipato, è previsto che DMT delle due aziende siano caratterizzati da una numerosità differente. Per mostrare la versatilità del modello è stato scelto di utilizzare 4 criteri, in modo che vengano coperte tutte le combinazioni tra criteri benefit/costi e criteri qualitativi/quantitativi. Si è realizzata la seguente maschera per l'inserimento dati nel prototipo Excel:

Valore		Lettere da inserire
Indispensable		IN
Extremely important		EI
Very important		VI
Important		I
Medium		M
Negligible		N
Very negligible		VN
Extremely negligible		EN
Irrelevant		IR

	k-esimo intervistato
Criterio 1	
Criterio 2	
Criterio 3	
Criterio 4	

Figura 14 - Maschera di inserimento dei pesi dei criteri.

Come si può notare dall'immagine, è stato previsto di non rendere visibile l'importanza dei criteri definita dagli altri intervistati così da evitare dinamiche di condizionamento. La procedura per la generazione casuale di questi valori è la medesima utilizzata per definire le informazioni sugli intervistati. Nella seguente tabella sono riportati i dati generati:

Criteri	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4
DM A1	I	VN	EN	IN
DM A2	IR	EN	EI	I
DM A3	EN	I	EI	EI
DM B1	IR	I	EI	M
DM B2	VN	M	I	VI

Figura 95- Tabella riassuntiva dei dati generati casualmente sull'importanza dei criteri secondo i diversi DM.

5.3.4 Generazione ed inserimento: performance delle soluzioni

Per le 50 soluzioni tecnologiche selezionate è necessario individuare le performance relative ai 4 criteri selezionati. Per i criteri quantitativi è stata predisposta la presenza di un range che vada a rendere più elastica la valutazione degli esperti. Per l'inserimento di questi dati è stata predisposta la seguente maschera nel prototipo Excel:

Performance delle soluzioni						
Ogni intervistato può inserire le performance di ogni soluzione rispetto ad ogni criterio						
Nel caso di criteri qualitativi, inserire la lettera corrispondente al parametro desiderato (vedi tabella)						
Nel caso di criteri quantitativi, inserire un valore medio nella colonna M ed un margine nella casella +-d.						
Il range che ne uscirà sarà (M-d; M+d)						
		Valore		Lettere da inserire		
		Perfect		P		
		Extremely high		EH		
		Very high		VH		
		High		H		
		Medium		M		
		Low		L		
		Very low		VL		
		Extremely low		EL		
		None		N		
		Criteri				
		Benefits		Costi		
		Qualitativi		Qualitativi		Quantitativi
		Criterio 1		Criterio 3		Criterio 4
		Criterio 2		Criterio 3		Criterio 4
Soluzioni		Lettera	M	+d	Lettera	M +-d
Soluzione 1	Expert 1					
	Expert 2					
	Expert 3					
Soluzione 2	Expert 1					
	Expert 2					
	Expert 3					
Soluzione 3	Expert 1					
	Expert 2					

Figura 96- Maschera di inserimento delle performance delle soluzioni.

Prima di spiegare come queste informazioni siano state generate casualmente, è necessario fare considerazioni sulle caratteristiche che i dati devono avere. Individuata una soluzione specifica, questa avrà delle performance oggettive che verranno valutate soggettivamente dall'esperto intervistato: per questa motivazione viene scelto di considerare il parere di più esperti. A seconda del criterio di valutazione della performance è però possibile che ci sia più o meno consenso: per criteri qualitativi come "impatto estetico" o "facilità di utilizzo" non è difficile immaginare pareri molto discordanti a seconda del soggetto interrogato, mentre per criteri quantitativi come il "costo dell'investimento" o la "kg di CO₂ rimossa" è immediato supporre che il consenso sia maggiore su una specifica misura. Eventuali deviazioni in quest'ultimo caso sono causate da differenti fornitori della stessa tecnologia o da differenti modelli dello stesso dispositivo, il che però non modifica l'ordine di grandezza dei valori. Per questa motivazione è stato deciso che, al fine di simulare al meglio i casi reali, per i criteri qualitativi il parere degli esperti tenda ad essere più unito. Per la generazione casuale delle performance relative ai criteri qualitativi è stata adottata la stessa procedura usata per il livello di esperienza degli intervistati. Per quanto riguarda i criteri quantitativi invece si identificano i seguenti passaggi:

- Creazione di un numero casuale tra X e Y , dove questi ultimi sono dei valori che descrivono l'ordine di grandezza della performance. Per fare un esempio, i "kg di CO₂ rimossa" possono andare da poche centinaia fino a decine di migliaia. Nel dettaglio è stato scelto:
 - Criterio 2: $X = 100$ e $Y = 1100$
 - Criterio 4: $X = 1000$ e $Y = 11000$
- Creazione di un secondo numero casuale, necessario per definire l'intervallo entro cui gli esperti andranno a definire il valore centrale della performance. Il numero che verrà restituito in output è casuale tra M e N , dove il primo è il minimo dissenso che può essere presente tra due esperti, mentre il secondo è il massimo dissenso. Nel dettaglio è stato scelto:
 - Criterio 2: $M = 50$ e $N = 500$
 - Criterio 4: $M = 500$ e $N = 5000$

Nel caso il limite inferiore del range individuato sia negativo, questo viene automaticamente impostato ad 1, così da mantenere coerenza con il dato.

- Creazione di un range, necessario per individuare poi il valore definito dal singolo esperto. Questo ha come limite superiore il primo numero casuale generato e come limite inferiore la differenza tra il primo ed il secondo numero casuale generato.
- Creazione del valore medio del range, definito come numero casuale tra i limiti dell'intervallo precedentemente definito.
- Creazione di un numero casuale tra J e K , necessario per definire l'intervallo che l'esperto definisce. Nel dettaglio è stato scelto:
 - Criterio 2: $J = 50$ e $K = 100$
 - Criterio 4: $J = 100$ e $K = 500$

Si ha nuovamente la regola che impedisce un valore negativo. Questo comporta la modifica della larghezza dell'intervallo.

Di seguito si riportano i valori generati, dove L, M e R indicano i 3 valori che definiscono ogni singolo TFN:

Soluzioni		L1	M1	R1	L2	M2	R2	L3	M3	R3	L4	M4	R4
Soluzione 1	Exp. 1	0,8	0,9	1	815	910	1005	0	0,1	0,2	8413	8853	9293
	Exp. 2	0,8	0,9	1	823	901	979	0,2	0,3	0,4	8688	8864	9040
	Exp. 3	0	0,1	0,2	613	705	797	0,5	0,6	0,7	8054	8288	8522
Soluzione 2	Exp. 1	0,7	0,8	0,9	772	850	928	0,8	0,9	1	194	496	798
	Exp. 2	0,7	0,8	0,9	768	851	934	0,3	0,4	0,5	1610	1738	1866
	Exp. 3	0,2	0,3	0,4	784	880	976	0	0,1	0,2	431	689	947
Soluzione 3	Exp. 1	0,2	0,3	0,4	1	29	57	0,3	0,4	0,5	7924	8101	8278
	Exp. 2	0,8	0,9	1	42	130	218	0,5	0,6	0,7	9865	10001	10137

	Exp. 3	0,2	0,3	0,4	1	90	179	0,3	0,4	0,5	7181	7507	7833
Saluzione 4	Exp. 1	0,4	0,5	0,6	935	1020	1105	0,6	0,7	0,8	7977	8368	8759
	Exp. 2	0	0,1	0,2	782	875	968	0,7	0,8	0,9	8174	8619	9064
	Exp. 3	0,3	0,4	0,5	812	889	966	0,8	0,9	1	8402	8521	8640
Saluzione 5	Exp. 1	0,5	0,6	0,7	347	443	539	0,1	0,2	0,3	6528	6754	6980
	Exp. 2	0,1	0,2	0,3	370	431	492	0	0,1	0,2	6565	6957	7349
	Exp. 3	0,5	0,6	0,7	34	134	234	0,7	0,8	0,9	7045	7525	8005
Saluzione 6	Exp. 1	0,1	0,2	0,3	852	944	1036	0,4	0,5	0,6	2667	2880	3093
	Exp. 2	0,5	0,6	0,7	882	959	1036	0	0,1	0,2	1475	1929	2383
	Exp. 3	0,2	0,3	0,4	774	842	910	0,3	0,4	0,5	481	646	811
Saluzione 7	Exp. 1	0,3	0,4	0,5	1	29	57	0,2	0,3	0,4	1549	1947	2345
	Exp. 2	0,4	0,5	0,6	4	65	126	0,7	0,8	0,9	787	1188	1589
	Exp. 3	0,8	0,9	1	1	29	57	0,7	0,8	0,9	995	1464	1933
Saluzione 8	Exp. 1	0	0,1	0,2	771	866	961	0,4	0,5	0,6	7550	7830	8110
	Exp. 2	0,7	0,8	0,9	852	904	956	0,4	0,5	0,6	7323	7577	7831
	Exp. 3	0,1	0,2	0,3	893	966	1039	0,8	0,9	1	7101	7595	8089
Saluzione 9	Exp. 1	0,8	0,9	1	246	320	394	0	0,1	0,2	8342	8636	8930
	Exp. 2	0,8	0,9	1	3	100	197	0,5	0,6	0,7	7270	7408	7546
	Exp. 3	0,5	0,6	0,7	218	283	348	0,7	0,8	0,9	7283	7637	7991
Saluzione 10	Exp. 1	0,2	0,3	0,4	709	800	891	0,4	0,5	0,6	3728	3841	3954
	Exp. 2	0,6	0,7	0,8	792	884	976	0,2	0,3	0,4	1959	2370	2781
	Exp. 3	0,8	0,9	1	814	913	1012	0,4	0,5	0,6	4268	4633	4998
Saluzione 11	Exp. 1	0,6	0,7	0,8	61	157	253	0,3	0,4	0,5	7079	7191	7303
	Exp. 2	0,8	0,9	1	123	206	289	0,3	0,4	0,5	6531	6920	7309
	Exp. 3	0,4	0,5	0,6	178	231	284	0	0,1	0,2	8765	9046	9327
Saluzione 12	Exp. 1	0,2	0,3	0,4	835	918	1001	0,3	0,4	0,5	2508	2940	3372
	Exp. 2	0	0,1	0,2	976	1048	1120	0,1	0,2	0,3	2192	2455	2718
	Exp. 3	0,7	0,8	0,9	826	916	1006	0,3	0,4	0,5	3432	3863	4294
Saluzione 13	Exp. 1	0,3	0,4	0,5	796	847	898	0,7	0,8	0,9	3164	3301	3438
	Exp. 2	0	0,1	0,2	781	848	915	0,5	0,6	0,7	3123	3241	3359
	Exp. 3	0,7	0,8	0,9	804	861	918	0,2	0,3	0,4	2025	2519	3013
Saluzione 14	Exp. 1	0,2	0,3	0,4	305	392	479	0,4	0,5	0,6	2688	2812	2936
	Exp. 2	0	0,1	0,2	353	435	517	0,6	0,7	0,8	321	603	885
	Exp. 3	0,8	0,9	1	327	389	451	0,3	0,4	0,5	1	245	489
Saluzione 15	Exp. 1	0,2	0,3	0,4	248	326	404	0,3	0,4	0,5	1	55	109
	Exp. 2	0,8	0,9	1	258	313	368	0,5	0,6	0,7	121	328	535
	Exp. 3	0,7	0,8	0,9	294	356	418	0,4	0,5	0,6	1978	2104	2230
Saluzione 16	Exp. 1	0	0,1	0,2	694	760	826	0,3	0,4	0,5	162	577	992
	Exp. 2	0,3	0,4	0,5	716	810	904	0,2	0,3	0,4	1	41	81
	Exp. 3	0	0,1	0,2	717	784	851	0,1	0,2	0,3	1	163	325
Saluzione 17	Exp. 1	0	0,1	0,2	682	748	814	0,8	0,9	1	3133	3392	3651
	Exp. 2	0,5	0,6	0,7	597	652	707	0,5	0,6	0,7	987	1317	1647
	Exp. 3	0	0,1	0,2	726	791	856	0,3	0,4	0,5	3493	3878	4263
Saluzione 18	Exp. 1	0	0,1	0,2	10	108	206	0,5	0,6	0,7	1772	2070	2368
	Exp. 2	0,3	0,4	0,5	94	184	274	0,1	0,2	0,3	457	933	1409
	Exp. 3	0,4	0,5	0,6	1	39	77	0,3	0,4	0,5	1569	1705	1841

Saluzione 19	Exp. 1	0,4	0,5	0,6	187	249	311	0,1	0,2	0,3	3000	3443	3886
	Exp. 2	0,6	0,7	0,8	225	298	371	0,4	0,5	0,6	1269	1726	2183
	Exp. 3	0,3	0,4	0,5	230	293	356	0,3	0,4	0,5	1172	1275	1378
Saluzione 20	Exp. 1	0,4	0,5	0,6	323	407	491	0,1	0,2	0,3	237	534	831
	Exp. 2	0,6	0,7	0,8	317	372	427	0,8	0,9	1	862	1102	1342
	Exp. 3	0,4	0,5	0,6	300	354	408	0	0,1	0,2	1505	1982	2459
Saluzione 21	Exp. 1	0,6	0,7	0,8	1	30	59	0,3	0,4	0,5	1	12	23
	Exp. 2	0,7	0,8	0,9	34	95	156	0,3	0,4	0,5	625	1005	1385
	Exp. 3	0,1	0,2	0,3	1	65	129	0,6	0,7	0,8	1396	1649	1902
Saluzione 22	Exp. 1	0,6	0,7	0,8	716	814	912	0,8	0,9	1	4945	5185	5425
	Exp. 2	0	0,1	0,2	821	912	1003	0,6	0,7	0,8	4693	5174	5655
	Exp. 3	0,7	0,8	0,9	483	572	661	0,8	0,9	1	4829	5282	5735
Saluzione 23	Exp. 1	0,5	0,6	0,7	1	35	69	0	0,1	0,2	1404	1639	1874
	Exp. 2	0,8	0,9	1	1	29	57	0,4	0,5	0,6	1036	1322	1608
	Exp. 3	0,4	0,5	0,6	1	67	133	0,1	0,2	0,3	1741	2154	2567
Saluzione 24	Exp. 1	0,8	0,9	1	184	252	320	0,8	0,9	1	8281	8586	8891
	Exp. 2	0,1	0,2	0,3	1	55	109	0,4	0,5	0,6	8377	8639	8901
	Exp. 3	0,7	0,8	0,9	183	239	295	0	0,1	0,2	8999	9291	9583
Saluzione 25	Exp. 1	0,3	0,4	0,5	1	40	79	0,6	0,7	0,8	1	326	651
	Exp. 2	0,1	0,2	0,3	1	19	37	0,7	0,8	0,9	1605	1839	2073
	Exp. 3	0,5	0,6	0,7	24	80	136	0	0,1	0,2	1062	1328	1594
Saluzione 26	Exp. 1	0,3	0,4	0,5	932	1007	1082	0,8	0,9	1	6285	6512	6739
	Exp. 2	0,5	0,6	0,7	861	924	987	0,2	0,3	0,4	5947	6325	6703
	Exp. 3	0,5	0,6	0,7	877	949	1021	0,6	0,7	0,8	4437	4624	4811
Saluzione 27	Exp. 1	0	0,1	0,2	371	430	489	0,8	0,9	1	2993	3217	3441
	Exp. 2	0,5	0,6	0,7	250	338	426	0,4	0,5	0,6	4355	4817	5279
	Exp. 3	0,5	0,6	0,7	548	642	736	0	0,1	0,2	3172	3535	3898
Saluzione 28	Exp. 1	0,2	0,3	0,4	284	382	480	0,8	0,9	1	889	1343	1797
	Exp. 2	0,8	0,9	1	522	616	710	0,7	0,8	0,9	1558	1859	2160
	Exp. 3	0,4	0,5	0,6	253	348	443	0,2	0,3	0,4	1319	1807	2295
Saluzione 29	Exp. 1	0,5	0,6	0,7	396	471	546	0	0,1	0,2	418	637	856
	Exp. 2	0,4	0,5	0,6	412	475	538	0,6	0,7	0,8	157	502	847
	Exp. 3	0,2	0,3	0,4	362	429	496	0,4	0,5	0,6	1697	1825	1953
Saluzione 30	Exp. 1	0,8	0,9	1	520	595	670	0,6	0,7	0,8	4970	5279	5588
	Exp. 2	0,3	0,4	0,5	593	654	715	0,6	0,7	0,8	5307	5804	6301
	Exp. 3	0,7	0,8	0,9	419	508	597	0,3	0,4	0,5	6046	6246	6446
Saluzione 31	Exp. 1	0,5	0,6	0,7	99	193	287	0,7	0,8	0,9	2782	2926	3070
	Exp. 2	0,4	0,5	0,6	222	289	356	0,4	0,5	0,6	2398	2553	2708
	Exp. 3	0	0,1	0,2	202	280	358	0,7	0,8	0,9	634	1092	1550
Saluzione 32	Exp. 1	0,6	0,7	0,8	1	37	73	0,7	0,8	0,9	2999	3115	3231
	Exp. 2	0,3	0,4	0,5	72	167	262	0,8	0,9	1	3276	3653	4030
	Exp. 3	0,5	0,6	0,7	50	123	196	0	0,1	0,2	2843	2969	3095
Saluzione 33	Exp. 1	0,6	0,7	0,8	1	66	131	0,8	0,9	1	6339	6627	6915
	Exp. 2	0,4	0,5	0,6	220	280	340	0,5	0,6	0,7	5206	5505	5804
	Exp. 3	0,3	0,4	0,5	151	222	293	0,5	0,6	0,7	5427	5811	6195
Saluzione 34	Exp. 1	0,5	0,6	0,7	43	134	225	0,4	0,5	0,6	8629	8900	9171

	Exp. 2	0,5	0,6	0,7	1	3	5	0,7	0,8	0,9	8462	8667	8872
	Exp. 3	0,2	0,3	0,4	95	166	237	0,6	0,7	0,8	8488	8882	9276
Soluzione 35	Exp. 1	0,1	0,2	0,3	11	87	163	0,4	0,5	0,6	3465	3655	3845
	Exp. 2	0,3	0,4	0,5	1	32	63	0,5	0,6	0,7	4275	4514	4753
	Exp. 3	0,8	0,9	1	1	7	13	0,1	0,2	0,3	4209	4370	4531
Soluzione 36	Exp. 1	0,4	0,5	0,6	811	866	921	0	0,1	0,2	3574	3954	4334
	Exp. 2	0	0,1	0,2	897	964	1031	0,4	0,5	0,6	3178	3289	3400
	Exp. 3	0,6	0,7	0,8	815	865	915	0	0,1	0,2	3850	3951	4052
Soluzione 37	Exp. 1	0,1	0,2	0,3	221	300	379	0,2	0,3	0,4	9136	9438	9740
	Exp. 2	0,1	0,2	0,3	290	390	490	0,1	0,2	0,3	8578	8868	9158
	Exp. 3	0,3	0,4	0,5	596	658	720	0,4	0,5	0,6	8451	8850	9249
Soluzione 38	Exp. 1	0	0,1	0,2	777	828	879	0,6	0,7	0,8	6783	7033	7283
	Exp. 2	0	0,1	0,2	807	883	959	0,7	0,8	0,9	5594	5867	6140
	Exp. 3	0,8	0,9	1	820	915	1010	0,1	0,2	0,3	7250	7431	7612
Soluzione 39	Exp. 1	0,3	0,4	0,5	43	110	177	0,2	0,3	0,4	1020	1258	1496
	Exp. 2	0,4	0,5	0,6	48	110	172	0,5	0,6	0,7	95	284	473
	Exp. 3	0,6	0,7	0,8	92	190	288	0,5	0,6	0,7	828	1284	1740
Soluzione 40	Exp. 1	0,4	0,5	0,6	21	72	123	0,1	0,2	0,3	4562	4873	5184
	Exp. 2	0,4	0,5	0,6	1	26	51	0,2	0,3	0,4	8799	8911	9023
	Exp. 3	0,2	0,3	0,4	1	47	93	0,4	0,5	0,6	6045	6165	6285
Soluzione 41	Exp. 1	0,2	0,3	0,4	487	578	669	0,6	0,7	0,8	1512	1980	2448
	Exp. 2	0,6	0,7	0,8	543	603	663	0,4	0,5	0,6	480	809	1138
	Exp. 3	0,4	0,5	0,6	593	676	759	0	0,1	0,2	360	498	636
Soluzione 42	Exp. 1	0,4	0,5	0,6	577	675	773	0,1	0,2	0,3	6114	6521	6928
	Exp. 2	0,6	0,7	0,8	608	695	782	0	0,1	0,2	3860	4284	4708
	Exp. 3	0,1	0,2	0,3	487	587	687	0,8	0,9	1	6267	6622	6977
Soluzione 43	Exp. 1	0,4	0,5	0,6	89	172	255	0,5	0,6	0,7	9893	10360	10827
	Exp. 2	0	0,1	0,2	124	177	230	0,2	0,3	0,4	9658	10070	10482
	Exp. 3	0,7	0,8	0,9	142	204	266	0,2	0,3	0,4	9251	9479	9707
Soluzione 44	Exp. 1	0,4	0,5	0,6	76	159	242	0	0,1	0,2	1	269	537
	Exp. 2	0	0,1	0,2	79	149	219	0,1	0,2	0,3	1701	1909	2117
	Exp. 3	0,2	0,3	0,4	126	190	254	0,6	0,7	0,8	923	1235	1547
Soluzione 45	Exp. 1	0,1	0,2	0,3	282	379	476	0,8	0,9	1	5335	5807	6279
	Exp. 2	0,1	0,2	0,3	1	67	133	0,3	0,4	0,5	5963	6459	6955
	Exp. 3	0,5	0,6	0,7	58	112	166	0,8	0,9	1	3757	4252	4747
Soluzione 46	Exp. 1	0,5	0,6	0,7	1	59	117	0,8	0,9	1	825	1121	1417
	Exp. 2	0,4	0,5	0,6	12	64	116	0,3	0,4	0,5	1084	1456	1828
	Exp. 3	0,4	0,5	0,6	1	43	85	0,4	0,5	0,6	1218	1323	1428
Soluzione 47	Exp. 1	0	0,1	0,2	139	201	263	0,3	0,4	0,5	2745	2852	2959
	Exp. 2	0,1	0,2	0,3	308	399	490	0,8	0,9	1	3988	4327	4666
	Exp. 3	0,2	0,3	0,4	244	334	424	0,4	0,5	0,6	4035	4141	4247
Soluzione 48	Exp. 1	0,8	0,9	1	913	1001	1089	0	0,1	0,2	8718	9009	9300
	Exp. 2	0,1	0,2	0,3	943	1001	1059	0,5	0,6	0,7	8987	9228	9469
	Exp. 3	0,1	0,2	0,3	905	993	1081	0,8	0,9	1	8529	8734	8939
Soluzione 49	Exp. 1	0,8	0,9	1	715	780	845	0,8	0,9	1	9602	9833	10064
	Exp. 2	0	0,1	0,2	694	785	876	0,5	0,6	0,7	10082	10529	10976

	Exp. 3	0,5	0,6	0,7	695	774	853	0	0,1	0,2	9163	9272	9381
Soluzione 50	Exp. 1	0	0,1	0,2	544	611	678	0,3	0,4	0,5	5190	5627	6064
	Exp. 2	0,7	0,8	0,9	547	623	699	0,6	0,7	0,8	8662	8815	8968
	Exp. 3	0,2	0,3	0,4	520	598	676	0,2	0,3	0,4	7638	7908	8178

5.3.5 Risultati caso studio

Non appena inseriti i dati, il prototipo Excel elabora istantaneamente il modello e restituisce la risposta, ovvero la lista delle migliori 30 soluzioni secondo il metodo TOPSIS e la soluzione identificata come prioritaria dal metodo VIKOR.

Lista delle migliori 30 soluzioni - AZIENDA A		Lista delle migliori 30 soluzioni - AZIENDA B	
Posizione	Soluzione	Posizione	Soluzione
1	Soluzione 16	1	Soluzione 16
2	Soluzione 36	2	Soluzione 36
3	Soluzione 12	3	Soluzione 1
4	Soluzione 6	4	Soluzione 2
5	Soluzione 2	5	Soluzione 10
6	Soluzione 1	6	Soluzione 12
7	Soluzione 10	7	Soluzione 6
8	Soluzione 26	8	Soluzione 42
9	Soluzione 41	9	Soluzione 11
10	Soluzione 11	10	Soluzione 23
11	Soluzione 42	11	Soluzione 20
12	Soluzione 49	12	Soluzione 26
13	Soluzione 13	13	Soluzione 30
14	Soluzione 48	14	Soluzione 15
15	Soluzione 23	15	Soluzione 41
16	Soluzione 38	16	Soluzione 49
17	Soluzione 8	17	Soluzione 5
18	Soluzione 20	18	Soluzione 22
19	Soluzione 30	19	Soluzione 9
20	Soluzione 37	20	Soluzione 13
21	Soluzione 50	21	Soluzione 48
22	Soluzione 27	22	Soluzione 19
23	Soluzione 15	23	Soluzione 24
24	Soluzione 22	24	Soluzione 8
25	Soluzione 4	25	Soluzione 29
26	Soluzione 5	26	Soluzione 27
27	Soluzione 19	27	Soluzione 50
28	Soluzione 29	28	Soluzione 28
29	Soluzione 17	29	Soluzione 4
30	Soluzione 28	30	Soluzione 37

Figura 97 - Ranking delle migliori 30 soluzioni individuate per entrambe le aziende.

Oltre a ciò, le soluzioni prioritarie individuate dal modello sono:

- La Soluzione 49 per l'azienda A;
- La Soluzione 4 per l'azienda B.

È immediato notare come le soluzioni individuate tramite il metodo VIKOR non coincidano con le migliori dei ranking individuati dal TOPSIS. Questo accade perché i due metodi hanno criteri di valutazione della singola soluzione differenti, per cui identificano classifiche differenti.

I pesi attribuiti ai criteri sono casualmente tendenti a definire più importanti i criteri 3 e 4, ovvero i costi da minimizzare. Questo comporta che soluzioni le cui performance per Criterio 3 e Criterio 4 sono più basse della media, come Soluzione 16 e Soluzione 36, vengono consigliate ad entrambe le aziende dalle liste TOPSIS. Le soluzioni nelle posizioni successive in queste classifiche, ovvero quelle dal terzo posto in poi, sono differenti tra le due aziende, sebbene ognuna mantenga la stessa zona per entrambe le soluzioni: una soluzione che è nella parte alta di una classifica è alta anche nell'altra. Questo comportamento può essere riconducibile ai pesi attribuiti ai differenti criteri, che presentano casualmente la stessa tendenza ma sono comunque differenti.

Una considerazione necessaria è relativa all'impatto che il parametro β ha avuto sul caso studio: probabilmente le potenzialità di questa personalizzazione sono apprezzabili solo con un numero di intervistati maggiore di quelli scelti. Per verificare questa ipotesi viene svolto un test in cui, a parità di tutte le altre informazioni, viene modificato unicamente il β al caso studio dell'azienda A da 0,7 a 0,2, ovvero dando adesso più importanza al consenso degli esperti. Di seguito il risultato ottenuto:

Lista delle migliori 30 soluzioni	
Posizione	Soluzione
1	Soluzione 16
2	Soluzione 36
3	Soluzione 1
4	Soluzione 2
5	Soluzione 12
6	Soluzione 6
7	Soluzione 10
8	Soluzione 42
9	Soluzione 26
10	Soluzione 20
11	Soluzione 11
12	Soluzione 23
13	Soluzione 49
14	Soluzione 41
15	Soluzione 48
16	Soluzione 13
17	Soluzione 5
18	Soluzione 30
19	Soluzione 8
20	Soluzione 22
21	Soluzione 15
22	Soluzione 38
23	Soluzione 4
24	Soluzione 50
25	Soluzione 37
26	Soluzione 19
27	Soluzione 29
28	Soluzione 27
29	Soluzione 9
30	Soluzione 17

Figura 98- Classifica delle soluzioni ottenuta per la variante dell'azienda A a β modificato.

La soluzione consigliata dal VIKOR rimane sempre la 49. È evidente come, nonostante il basso numero di intervistati, il metodo SAM migliorato stila comunque una classifica differente, più adatta al soddisfacimento dei bisogni del DMT. La personalizzazione dell'approccio di valutazione dei valori è quindi efficace anche con un limitato campione di intervistati.

In merito alle soluzioni prioritarie è immediato notare come il parametro v riesca esattamente nel suo scopo di differenziare il risultato. Osservando infatti le performance delle soluzioni 4 e 49 è evidente che la prima offre buone performance su entrambi i criteri considerati più importanti, mentre la seconda è caratterizzata da valori eccezionali solo per il Parametro 4: questo comportamento è esattamente quello atteso. La caratteristica dei risultati di avere un ranking ed una soluzione consigliata non coincidente con il vertice della classifica non deve turbare i DM, in quanto la soluzione specifica individuata risulta quella che più rispecchia le esigenze dell'azienda all'interno delle migliori 30. **Il ranking, infatti, non tiene conto della tipologia di soluzione richiesta dall'azienda**, ma offre comunque un ottimo strumento di supporto decisionale. Complessivamente, il caso studio proposto mostra come il modello proposto consenta di adempiere a tutti gli obiettivi elencati a inizio Capitolo.

6 Attività di disseminazione dei risultati

Durante lo sviluppo delle attività 2021, UNIFI (in collaborazione con ENEA e gli altri partner di progetto) ha condotto molteplici attività per disseminare i risultati ottenuti e le conoscenze raggiunte.

A questo scopo, in primo luogo, UNIFI ha partecipato al seminario “Efficienza Energetica dei Prodotti e dei Processi Industriali” organizzato da ENEA presso il Centro Congressi Frentani di Roma in data 02/12/2021. Durante l’evento, UNIFI ha esposto lo studio effettuato e tutti i risultati ottenuti di fronte a un pubblico di esperti industriali (provenienti dai diversi settori analizzati), universitari e ricercatori da tutta Italia, rappresentanti delle associazioni di categoria e manager d’azienda.

In secondo luogo, UNIFI ha condiviso le conoscenze raggiunte nei vari settori industriali organizzando numerosi colloqui e momenti di confronto con le associazioni di categoria ed esperti di settore. In particolare, durante sopralluoghi effettuati presso le aziende e incontri telematici, UNIFI ha potuto illustrare in dettaglio il lavoro svolto e discutere di essi con gli esperti rispondendo a loro dubbi e collezionando commenti utili a validare e migliorare lo studio proposto.

Infine, un’ulteriore attività di disseminazione è stata rappresentata dall’articolo scientifico che UNIFI ha scritto in collaborazione con ENEA e Assofond, riepilogando i risultati relativi al settore delle fonderie. Tale articolo è stato pubblicato sulla rivista scientifica internazionale “Sustainability”, dove è reperibile con il riferimento seguente:

Leoni, L., Cantini, A., De Carlo, F., Salvio, M., Martini, C., Toro, C., Martini, F. (2021). “Energy-Saving Technology Opportunities and Investments of the Italian Foundry Industry”. *Energies* 2021, 14(24), 8470; <https://doi.org/10.3390/en14248470>.

7 Conclusioni

Nel presente report sono state analizzate in dettaglio le opportunità tecnologiche di efficientamento dei consumi energetici nei settori dello smaltimento rifiuti, produzione di farmaci e principi attivi e nelle fonderie. Dall'analisi di letteratura e delle diagnosi energetiche sono state ottenute in output delle liste riepilogative di tali interventi (per ogni specifico settore industriale), suddividendo questi ultimi per fase di processo e per tipologia di *asset* produttivo considerato. La lista ottenuta in ogni settore è stata validata sia mediante la consultazione di esperti del settore, che attraverso la consultazione di *plant manager* (durante sopralluoghi presso aziende italiane). Inoltre, in collaborazione con il partner di progetto ENEA è stata fornita anche una sintetica analisi economica degli interventi reperiti, che è stata fondata sui risultati di studio delle diagnosi sintetizzati da ENEA.

Oltre a ciò, in output è stata fornita anche un'analisi dei trend di sviluppo delle tecnologie, investigando le frequenze di applicazione e di installazione futura degli interventi tecnologici reperiti e analizzando la tendenza delle aziende a investire nelle tecnologie emerse. La lista di tecnologie in ogni settore qui proposta, essendo corredata dai riferimenti bibliografici usati per realizzarla, dall'analisi statistica sull'applicazione degli interventi (e dunque sul loro trend di sviluppo) e dai commenti di esperti, può essere considerata a tutti gli effetti uno strumento di supporto alle aziende nella scelta della soluzione di miglioramento da implementare. Una generica azienda, infatti, può consultarla per conoscere lo stato dell'arte degli interventi di efficientamento energetici esistenti nel proprio settore, in una specifica fase di impianto e afferenti a ogni specifico macchinario. L'azienda può anche impiegare tale lista per allinearsi alle tendenze di sviluppo attuali, consultando le frequenze riportate e i commenti degli esperti di settore.

Oltre a tali output, UNIFI ha anche proposto un ulteriore modello di classificazione degli interventi tecnologici *energy-saving*, che costituisce un secondo strumento di supporto alle aziende nella scelta della soluzione di risparmio energetico per loro ottimale (oltre a quello già proposto da UNIFI nel 2020). Infatti, il modello descritto (e qui fornito anche sotto forma di prototipo Excel editabile) può essere adottato dalle aziende per classificare in ordine di appropriatezza e convenienza le soluzioni tecnologiche. La classificazione proposta non considera soltanto i risparmi energetici che i diversi interventi generano, ma anche la loro congruità rispetto alle strategie competitive aziendali, così fornendo un risultato che costituisca una soluzione cucita su misura per la specifica azienda che utilizza il modello.

L'applicazione del modello ad un caso studio ha messo in luce le modalità di utilizzo e i vantaggi dello stesso. Nello specifico, il modello proposto può essere applicato a qualunque dei settori di interesse trattati (facendo riferimento per ciascuno di essi alla relativa lista di interventi – Appendice A), pertanto si è completato l'obiettivo di realizzazione del modello di analisi delle tecnologie che era stato prefissato. Il nuovo modello di classificazione proposto, inoltre, si affianca al modello AHP già proposto nello scorso anno di progetto (2020), proponendo un'alternativa più complessa, ma caratterizzata da elevata accuratezza e affidabilità delle soluzioni e maggiori possibilità di utilizzo.

Un ultimo output ottenuto durante la realizzazione di questo progetto è costituito dall'articolo scientifico che UNIFI ha scritto in collaborazione con ENEA e Assofond, riepilogando i risultati relativi al settore delle fonderie e pubblicandoli sulla rivista scientifica internazionale "Sustainability". Alla luce delle considerazioni soprastanti, oltre al presente report, alleghiamo come documenti relativi al lavoro svolto anche i seguenti file:

- File Excel contenente il modello di classificazione delle soluzioni tecnologiche *energy-saving*;
- Articolo scientifico sul settore delle fonderie.

Tra i possibili sviluppi futuri del progetto si annoverano: la pubblicazione su riviste scientifiche dei risultati ottenuti nei settori del trattamento rifiuti, della produzione dei farmaci e della produzione di principi attivi e, infine, l'applicazione del modello di classificazione degli interventi ad un caso studio (se le aziende si renderanno disponibili), così da fornirne un'ulteriore validazione.

8 Appendice A

Le tabelle contenenti gli interventi tecnologici di efficientamento energetico relativi ai settori analizzati sono riportate di seguito, ripartendole in base ai settori analizzati. In ogni tabella, l'intestazione fa riferimento alla fase di processo su cui la soluzione di efficientamento energetico agisce. Inoltre, in ogni tabella, come prima cosa si specifica l'oggetto della soluzione di efficientamento energetico, indicando il macchinario e/o lo specifico oggetto su cui tale soluzione tecnologica impatta. In secondo luogo, si riporta la descrizione della soluzione, ovvero dell'intervento di efficientamento tecnologico che è possibile applicare per ottenere risparmi energetici. A seguito, se necessario per quello specifico settore analizzato, si evidenziano eventuali limiti nell'applicabilità di tale intervento di efficientamento energetico. Infine, si indicano le fonti (letteratura o diagnosi energetiche) consultate per individuare l'intervento descritto e i commenti su tale intervento ricevuti dagli esperti delle associazioni di categoria.

Si ricorda che ciascun intervento può essere stato individuato nella letteratura scientifica, nelle diagnosi energetiche o in entrambe le fonti. Pertanto, le tabelle sottostanti potrebbero contenere tre diversi tipi di interventi di efficientamento energetico delle tecnologie:

1. Interventi riportati in rosso e caratterizzati da uno o più riferimenti bibliografici. Questi interventi si trovano sia in letteratura che nelle diagnosi.
2. Interventi riportati in nero. Questi interventi si trovano solo in letteratura.
3. Interventi riportati in rosso e caratterizzati da nessun riferimento bibliografico. Questi interventi si trovano solo nelle diagnosi energetiche.

8.1 Fonderie

8.1.1 Fusione

Tabella 3: Soluzioni tecnologiche relative alla fase di fusione.

Fusione				
Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osse nezioni
Impianti di caricamento nei forni	Pre-riscaldamento della materia soffiando direttamente fumi sulla materia (essiccatore)		[17]	Assofond riferisce che tale pratica era diffusa in passato, ma ora è stata abbandonata per gli elevati costi. Tuttavia, dal punto di vista dei consumi energetici, potrebbe essere ancora interessante nel caso in cui si utilizzino i fumi per riscaldare la carica o effettuare l'essiccazione del rottame.
Bruciatore	Utilizzo di bruciatori recuperativi nel forno fusorio	Fornia combustibile	[18]	Assofond riferisce che questa tecnica è una BAT ed è già presente nelle BREF. Pertanto, è obbligatoria per gli impianti in AIA ed è già usata in tutte le fonderie di ghisa con forni rotanti. Tecnica riportata tra le BAT. Non sono state riscontrate applicazioni pratiche di tale intervento in Italia
	Utilizzo di bruciatori 'LOW NOx' per minimizzare le emissioni di NOx	Fornia combustibile	[17]	
	Sostituire i bruciatori con bruciatori nuovi ad elevata efficienza	Fornia combustibile	[17]	
	Utilizzo di un bruciatore rigenerativo nel forno fusorio	Fornia combustibile	[17]	
	Utilizzo di bruciatori oxy-fuel nel forno fusorio	Fornia combustibile	[17], [19]	
	Utilizzo di un combustore per una combustione senza fiamma	Fornia combustibile	[17]	
Forno Fusorio	Sostituzione vecchio forno fusorio con nuovo		[17]	Di seguito la lista dettagliata degli interventi reperiti: Sostituzione forno da BT a MT. Installazione forno P5 da 55 tonnellate a media frequenza. Sostituzione di tre forni con un unico forno centralizzato e sfruttamento dei 3 forni come fornidi manutenzione. Sostituzione con un nuovo forno con torretta di fusione la quale sfrutta il calore proveniente dal bacino di contenimento alluminio liquido per preriscaldare il materiale caricato all'interno della camera di fusione risparmiando in questo modo energia termica. Il forno è equipaggiato di

ACCORDO DI PROGRAMMA MISE (OGGI MITE)-ENEA

Fusione				
Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
				<p>laser per misurare il livello del materiale all'interno della torretta di carico.</p> <p>Introduzione di un nuovo forno fusorio a torre di potenza pari a 4.000 kg/h, in sostituzione a 3 forni fusori a crogiolo. Il nuovo forno è accompagnato da un forno di attesa avente la medesima potenza.</p> <p>Dismissione di un forno e disattivazione di un altro forno, con contestuale installazione di un nuovo forno (potenza termica nominale di 3,4 MW), energeticamente più performante e in grado di garantire con continuità la fusione anche con carichi di lavoro variabili.</p>
	Tecnologia IGBT sui forni elettrici	Forno elettrico	[20]	<p>Assofond suggerisce di tenere presente che poche aziende utilizzano questo tipo di forni (produzione di acciaio) ed eventualmente sono forni piccoli rispetto a quelli usati in siderurgia. Pertanto, occorre valutare se tale intervento può essere economicamente rilevante in considerazione della dimensione dei forni e della frequenza di utilizzo rispetto al settore siderurgico.</p> <p>Assofond riferisce di non avere riscontro di applicazione di tale intervento in aziende italiane.</p>
	Utilizzo di trasformatori Ultra High Power per aumentare il voltaggio di lavoro nel Forno ad Arco Elettrico	Forno ad arco elettrico	[12]	<p>L'intervento è stato estratto da Linee Guida pubblicate in letteratura scientifica e suggerite per l'applicazione nel territorio a merano. Si riferisce, però, che tali linee guida non ne mostrano un'applicazione pratica.</p> <p>Documento del 2009 riguardante un caso studio di un'azienda Taiwan che intende ridurre i consumi elettrici di forni ad arco. L'uso della copertura e della parete del forno</p>
	Oxy-oil technology per inserire olio come parziale sostituto del coke e ridurre le emissioni	Forna a combustibile	[12]	<p>raffreddati ad acqua possono massimizzare la produzione di elettricità durante la fusione e aumentare significativamente la vita della copertura e della parete del forno.</p> <p>Assofond riferisce che, allo stato di fatto, un sistema di raffreddamento ad acqua è già presente in molte delle fornaci italiane.</p>
	Utilizzare fornaci raffreddate ad acqua	Forna a combustibile	[21]	<p>Un'applicazione di tale intervento è stata reperita nei forni</p>
	Installare impianto per recupero di metallo dalle	Forna a combustibile	[22]	

Fusione				
Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Ossevrazioni
	scorie			per la fusione di rame Assofond riferisce che normalmente le scorie su certi tipi di forni sono già selezionate e con composizione nota Intervento per cui si è reperito l'utilizzo per un forno elettrico di mantenimento
	Rifacimento refrattari forni per evitare perdite di calore verso l'esterno (ispessimento del refrattario)	Spesso nei forni a combustibile	[21], [23]	Assofond riferisce che un aumento dello spessore del refrattario, sebbene possa aumentare l'isolamento termico, potrebbe portare ad una riduzione della capacità produttiva. Più aumenta lo spessore di strato isolante e meno spazio si ha a disposizione per le materie prime.
Iniettore pneumatico	Re-iniezione delle polveri catturate dagli impianti di aspirazione all'interno del forno fusorio		[24]	Assofond riferisce che tale intervento è già indicato nel SF BREF, in cui tra le BAT è indicato che il recupero delle polveri è correlato all'arricchimento della componente metallica, ma c'è maggiore consumo energetico e maggiore produzione di scorie (SF BREF pag. 298 capitolo 4.9.4.2). Attenzione: questo intervento comporta un miglioramento dell'impatto ambientale della società, ma a discapito dei consumi energetici.
Dispositivo pneumatico con lance	Introduzione di un dispositivo pneumatico dotato di lancia per soffiare i materiali che formano una schiuma di scorie nella zona della reazione per renderla più controllabile		[24]	Assofond riferisce che tale intervento comporta un beneficio ambientale perché si inertizzano le scorie. Tuttavia, occorre valutare bene se tale beneficio compenserà un eventuale aumento dei consumi energetici. La letteratura scientifica riporta che tale intervento implica: benefici di costi energetici (decremento costi produzione 20%) benefici di sostenibilità ambientale (decremento consumo di carbone 10%) benefici di impianto (aumento efficienza della cupola del 50%)

8.1.2 Formatura

Tabella 2: Soluzioni tecnologiche relative alla fase di formatura

Formatura				
Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Ossevrazioni

ACCORDO DI PROGRAMMA MISE (OGGI MITE)-ENEA

Formatura				
Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Approvvigionamento	Installare impianto per utilizzo delle scorie provenienti dalle fornace come terra	Formatura a perdere	[25]	
Recuperatore	Sostituzione dell'impianto elettrico di recupero sabbia con nuovo impianto a gas		Dalle diagnosi energetiche	La tecnica va nella direzione opposta alle esigenze di decarbonizzazione. <ul style="list-style-type: none"> È stata proposta la sostituzione dell'attuale impianto elettrico di recupero sabbia con un nuovo impianto a gas, che impieghi una potenza elettrica di 20 kW (80 kW di differenza rispetto al sistema esistente). Assofond riferisce che, tuttavia, questo intervento va nella direzione opposta rispetto alle attuali esigenze di decarbonizzazione.
	Installazione di un recuperatore di sabbia		Dalle diagnosi energetiche	Assofond riferisce che questo intervento implica un aumento dei consumi energetici, che va valutato rispetto ai benefici ambientali complessivi.
Isola di stampaggio	Sostituzione isole di stampaggio con nuove		Dalle diagnosi energetiche	
Mescolatori	Sostituzione mescolatori		Dalle diagnosi energetiche	
Formatura "hot box"	Utilizzo di pre-riscaldamento dell'aria e di bruciatori rigenerativi o di recupero per i forni di produzione delle forme in sabbia/resina termoidurente	Formatura a perdere	[37]	
	Installazione di un filtro efficiente nell'impianto terre	Formatura a perdere	Dalle diagnosi energetiche	Assofond suggerisce di valutare la bontà di questo intervento in relazione ai risparmi energetici ottenibili (ad es. consumi per aria compressa per pulire il filtro)
	Utilizzo della stampa 3D (Jet Binding) per la creazione delle forme	Formatura a perdere	[27], [28]	
Impianto di formatura	Utilizzo di riscaldamento a infrarossi per l'asciugatura del rivestimento delle forme		[8], [30]	Assofond riferisce che questo intervento è già in uso in qualche fonderia. Si usa sia per il rivestimento della forma in sabbia, sia per il refrattario sullo stampo permanente
	Utilizzo di un processo in forma permanente con metodo di colata a bassa pressione con utilizzo di anime inorganiche		Dalle diagnosi energetiche	<ul style="list-style-type: none"> La differenza rispetto al processo "tipico" di formatura in forma permanente con metodo di colata a bassa pressione sta esclusivamente nell'utilizzo di anime inorganiche.

Formatura				
Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
				<ul style="list-style-type: none"> Si tratta di una nuova tecnologia che impiega un sistema legante inorganico per la formatura delle anime e, quindi, senza emissioni su base di silicato. I suoi benefici ecologici sono derivati dal fatto che i leganti inorganici utilizzati non emettono praticamente emissioni nocive. Pertanto, consentono di rinunciare ai sistemi di ventilazione e trattamento aria (generalmente utilizzati nella catena di processo con altre tipologie di anime quali cold box e/o hot box). Il vantaggio consiste in una significativa riduzione del fumo e nella riduzione del 98% delle sostanze inquinanti. Pertanto si avranno: un'ottima protezione dell'ambiente indoor ed outdoor, la riduzione dell'inquinamento acustico dovuto al minor numero di processi di granigliatura e, infine, la riduzione della pulizia degli stampi con conseguente riduzione dei consumi energetici
	Sostituzione di vecchi impianti con impianti nuovi e più efficienti		[12]	
Stampante 3D	Introduzione della tecnologia Binder Jetting per la creazione di anime (Additive Manufacturing), che unisce le polveri utilizzando un legante		[30]	Assofond riferisce che tali tecnologie sono innovative, pertanto mancano elementi per valutare se apportano miglioramenti energetici. Tuttavia, tali tecnologie dovrebbero apportare maggiori benefici per bassi volumi produttivi
	Introduzione di stampanti 3D per la creazione di anime (Additive Manufacturing)		[30]	Assofond riferisce che tali tecnologie sono innovative, pertanto mancano elementi per valutare se apportano miglioramenti energetici. Tuttavia, tali tecnologie dovrebbero apportare maggiori benefici per bassi volumi produttivi

8.1.3 Colata

Tabella 3: Soluzioni tecnologiche relative alla fase di colata

Colata				
Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni

ACCORDO DI PROGRAMMA MISE (OGGI MITE)-ENEA

Colata				
Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osse rvazioni
Raffreddamento	Utilizzo della tecnica "quench casting" per il raffreddamento del getto		[17]	Questa tecnica permette di migliorare le proprietà microstrutturali in termini di finitura e durezza. Ciò fa sì da ridurre il tempo necessario per le attività di finitura, con conseguente risparmio energetico. Lo studio proposto in letteratura è preliminare, dunque è da approfondire l'efficiamento energetico.
	Utilizzo della tecnica "splash casting" per il raffreddamento del getto		[31]	Questa tecnica permette di migliorare le proprietà microstrutturali in termini di finitura e durezza. Ciò fa sì da ridurre il tempo necessario per le attività di finitura, con conseguente risparmio energetico. Lo studio proposto in letteratura è preliminare, dunque è da approfondire l'efficiamento energetico.
Siviera	Installazione impianti per il preriscaldamento efficiente delle siviere		[12]	Assofond riferisce che solitamente questa operazione non viene svolta cercando di ottimizzare i consumi energetici, sebbene questo intervento abbia un'utilità elevata, oltre a essere un'attività con grossi margini di razionalizzazione.
	Utilizzo di copercchi per le siviere per evitare perdite termiche		[12]	Assofond riferisce che tale soluzione è molto utile e con grossi margini di razionalizzazione.
	Utilizzo di materiali di rivestimento per le siviere per evitare perdite di calore per convezione		[8]	Assofond riferisce che tale soluzione è molto utile e con grossi margini di razionalizzazione.
	Utilizzo di siviere di forma diversa (becco più pronunciato) per ridurre la porosità del getto finito. Garantisce un miglior mantenimento della temperatura grazie alla minor dispersione termica.		[34]	Assofond riferisce che tale tecnica è poco diffusa.
Forno	Sostituzione del forno di colata con uno più nuovo ed efficiente		Delle diagnosi energetiche	
Impianti di colata	Sostituzione degli impianti di colata vecchi con nuovi		[32]	In Italia sono state reperite le seguenti applicazioni di tale intervento <ul style="list-style-type: none"> In azienda di pressocolatura di leghe di alluminio, sostituzione di presse di pressocolatura dotate di motori a giri fessi, con presse di pressocolatura di ultima generazione dotate di motori a inverter. In aziende di fusione di metalli leggeri, sono state installate nuove isole di colata a bassa pressione.
	Utilizzo della tecnica Vacuum Suction Casting		[27]	<ul style="list-style-type: none"> Questa è una tecnologia già pponese sottovuoto testata qualche anno fa. E' stata presa da una fonte scientifica [13] del 2020.

Colata				
Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
				<ul style="list-style-type: none"> Comporta il seguente effetto benefico sui consumi energetici: migliora la finitura superficiale dei componenti prodotti, evitando la formazione di difetti causati dall'evaporazione del legante e, pertanto, riducendo il consumo energetico associato alle fasi di finitura. <p>Visto il recente sviluppo di tale tecnica e la possibilità che essa comporti elevati consumi energetici (necessità di tenere il vuoto lungo tutto il processo di formatura e colata), prima di implementare questo intervento, si raccomanda di approfondire lo studio comparando i benefici di risparmio energetico ottenibili in fase di finitura rispetto agli aumenti di consumo che potrebbero essere causati dal vuoto prolungato.</p>
Impianti di pressocolata	Nuova linea di pressofusione ad elevata efficienza	Formatura permanente	Dalle diagnosi energetiche	
	Sostituzione forno di attesa alla colata con uno più nuovo ed efficiente	Formatura permanente	Dalle diagnosi energetiche	
Sterratriche	Sostituzione di macchine steratriche con nuove e più efficienti	Formatura a perdere	[12]	

8.1.4 Finitura

Tabella 4: Soluzioni tecnologiche relative alla fase di finitura

Finitura			
Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte	Osservazioni
Robot	Utilizzo di robot per le fasi di finitura	[36]	<p>Attività con grandi consumi energetici.</p> <p>Le operazioni automatizzate riducono la necessità del fattore umano, ovvero di un operatore che presidi il processo produttivo. Inoltre, implicano un risparmio di tempi e costi di produzione, con conseguente riduzione dei consumi energetici legati ad un più lungo processo produttivo.</p> <p>In base alla tipologia di prodotto e alla linea vengono svolte lavorazioni meccaniche di finitura e proposte relative operazioni di efficientamento energetico.</p>
Stazioni di finitura	Installazione nuova linea di finitura	Dalle diagnosi energetiche	<ul style="list-style-type: none"> Installazione di una scarotatrice posta sotto aspirazione con convogliamento degli effluenti gassosi al punto di emissione in atmosfera esistente senza incrementare portata massima. <p>Installazione di isola automatizzata per lavorazioni di finitura dei particolari prodotti dalle medesime macchine di colata. Le operazioni di sbavatura e scarotatura sono effettuate con macchine utensili che lavorano con la cosiddetta "lubrificazione minimale", con limitate emissioni di nebbie oleose; l'isola è servita da un impianto di aspirazione, con invio degli effluenti gassosi al nuovo punto di emissione in atmosfera E108, dotato di impianto di abbattimento a cartucce in fibra di vetro, specifico per le nebbie oleose, e caratterizzato da portata massima</p>

Finitura			
Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte	Osse rvazioni
	Eliminare macchinari di "basso livello" e introdurre nuovi più efficienti	[12], [37]	<p>di 6.000 Nm³/h, durata di funzionamento di 24 h/giorno ed emissione di "materiale particolare (nebbie oleose)".</p> <ul style="list-style-type: none"> La letteratura [24] riporta che una sostituzione di macchinari datati con macchinari più recenti, tipicamente implica un risparmio energetico. Infatti, la tecnologia può svilupparsi in pochi anni e determinare un notevole abbattimento dei consumi. A riprova di ciò, l'articolo mostra che nel 2007 in Cina il numero di forni a capacità di 2000 m³ è aumentato rispetto al 2005, così come il numero di converters con una capacità di 100 tonnellate e l'installazione di altre macchine da finitura innovative. Come conseguenza del rinnovamento di tali tecnologie, non solo è aumentata la capacità produttiva degli impianti, ma è migliorata la qualità dei processi, ottenendo come conseguenza una riduzione dei consumi energetici (8%), del consumo di acqua (24%), delle emissioni di SO₂ (4.5%), della produzione di fuliggine (3%) e della produzione di polveri da fresatura per tonnellata di acciaio (4.5%). Tra gli interventi di sostituzione reperiti dalle diagnosi si annoverano rinnovamenti di tecnologie per le attività di sterratura, taglio, fresatura, radiocopia, martellatura, scarotatura, taglio e controllo sbavature, marcatura laser, ecc.
Forno trattamento termico	Sostituzione del forno per il trattamento termico con uno più nuovo ed efficiente	Dalle diagnostiche energetiche	Sostituzione del forno di trattamento termico Vampa di portata massima di 10 ton con un forno a carro per trattamenti termici di portata massima di 8 ton. La sostituzione comporta la riduzione del 30% del consumo di metano rispetto alla soluzione precedente.
Macchine utensili	Ugelli di soffiaggio ad alta efficienza	Dalle diagnostiche energetiche	

8.1.5 Recupero calore

Tabella 5: Soluzioni tecnologiche relative al recupero calore

Recupero calore				
Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osse rvazioni
	Recupero di calore dalle scorie metalliche		[46]	
	Pre-riscaldamento dell'aria di combustione	Fornia combustibile	[18]	Intervento applicato nel caso di forno a gas
	Tecnica del CCU (Carbon Capture and Utilization) per catturare la CO ₂ dai fumi e utilizzarla per altri scopi	Fornia combustibile	[47]	Assofond riferisce che tale tecnologia non è ancora "matura" ed è difficilmente adattabile nelle PMI
	Installare un ciclo di Rankine per l'utilizzo del calore di recupero per produrre vapore in un boiler e alimentare un ciclo a vapore		[17]	Turbina a vapore a contropressione per il recupero da un forno a cubilotto
Recupero di calore	Utilizzo dei gas esausti per operare un ciclo combinato per generare energia elettrica		[48]	Assofond riferisce che tale soluzione è attualmente impiegato nei cubilotti a gas (ad esempio in aziende Russe)
	Installare un ciclo ORC per utilizzare i gas esausti per generare energia elettrica		[12]	Assofond riferisce che tale intervento è applicabile in forni cubilotti di media potenzialità funzionanti almeno su due turni.
	Cattura delle sostanze volatili COV (composti organici volatili) per bruciarle e produrre calore		[11]	Assofond riferisce che tale tecnologia è interessante se il post-combustore si autosostiene con i contaminanti (COV). In caso contrario, bisogna utilizzare

Recupero calore				
Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
	Installare cogenerazione (o trigenerazione) per il recupero di calore		[12]	metano per alimentare il tutto e la tecnologia diventa anti-economica. Assofond riferisce che tale intervento è difficilmente applicabile nel settore delle fonderie.
	Installare tecnologie per usare i fumi per operare un ciclo frigorifero ad assorbimento		[48]	
	Sostituzione batteria di recupero calore		[50]	
	Installazione evaporatore per il recupero di calore dalle acque emulsionate		Dalle diagnostiche energetiche	Assofond ne riferisce l'applicazione nelle fonderie di metalli non ferrosi con pressocolata
	Installazione tecnologie per il recupero calore dall'essiccazione terre	Formatura a perdere	Dalle diagnostiche energetiche	
	Installazione di uno scambiatore per generare acqua calda dai fumi del forno ed alimentare l'evaporatore sottovuoto		Dalle diagnostiche energetiche	
	Introduzione di una turbina di recupero dell'alta pressione generata nel forno fusorio		[38], [46]	
Scambiatore	Recupero di calore dal processo di compressione dell'aria		[39]	<ul style="list-style-type: none"> Soluzione emergente Recupero dal raffreddamento dei compressori Introduzione del modulo per il raffreddamento tramite scambiatore a pila Compressori per spezzolatura Pre-riscaldare acqua o aria Compressore del reparto lavorazioni meccaniche Compressore a giri variabili
Siviera	Utilizzo di scambiatori di recupero per il pre-riscaldamento efficiente delle siviere (forno scaldia siviera)		[41]	Assofond riferisce che tale intervento non è in uso in fonderia. Tuttavia, è una soluzione con grossi margini di razionalizzazione.
Impianto di raffreddamento	Recuperatore di calore nel circuito di raffreddamento stampi	Formatura permanente	Dalle diagnostiche energetiche	

8.1.6 Combustibili alternativi

Tabella 6: Soluzioni tecnologiche relative ai combustibili alternativi

Combustibili alternativi			
Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte	Reference
Combustibili alternativi	Iniezione di carbone polverizzato (PCI) come parziale sostituto del coke	Forni a combustibile	[19], [51]
	Utilizzo del CO e H2 prodotti nella reazione come combustibile per il forno stesso	Forni a combustibile	[18]
	Sostituzione del coke con biomasse	Forni a combustibile	[47]
	Utilizzo di coke generato con la tecnica CDQ (Coke Dry Quenching)	Forni a combustibile	[51], [52]
Combustibili alternativi			
Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte	Reference
	Utilizzo di idrogeno come parziale sostituto del coke come agente riducente	Forni a combustibile	[53], [54]
	Aggiunta di plastica di scarto come agente riducente	Forni a combustibile	[53]
	Utilizzo di pellet auto-riducente nel forno fusorio	Forni a combustibile	[55]

8.1.7 Servizi ausiliari

Tabella 7: Soluzioni tecnologiche relative ai servizi ausiliari

Servizi ausiliari			
Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte	Osservazioni
Scambiatore	Aumentare la qualità dell'aria introducendo uno scambiatore di calore all'uscita del compressore per raffreddare l'aria e rimuovere vapore acqueo dall'aria compressa	[38]	
Pompa di iniezione	Introduzione di una pompa di iniezione per il miglioramento delle proprietà di lubrificazione e il risparmio di lubrificante	[38]	La letteratura suggerisce tale intervento di inefficientamento, ma non ne mostra nessuna applicazione pratica
Compressore	Sostituzione di compressori vecchi con nuovi ed efficienti	[37]	<ul style="list-style-type: none"> • Assofond riferisce che tale intervento è ottimo dal punto di vista del risparmio di consumi energetici • Miglioramento legato al motore elettrico che guida il compressore: passaggio da <i>traditional induction motor</i> a <i>modern permanent magnet motor</i>. • Miglioramento legato al processo di compressione. Per compressori tradizionali, circa il 70 delle 100 unità di energia originale in ingresso si trasforma in calore, cioè l'efficienza di conversione dell'energia meccanica meccanica offerta dall'albero del motore elettrico all'energia potenziale dell'aria compressa è solo qualcosa >20%. <p>Compressori moderni, come per esempio, <i>modern installed screw compressors</i> lavorano in due stadi con un sistema di raffreddamento ad acqua. Nella parte superiore, l'aria viene aspirata dall'esterno e dopo il filtraggio viene compressa nel primo stadio da un compressore a vite. L'aria ad una pressione intermedia viene refrigerata facendo circolare l'acqua necessaria anche per raffreddare l'olio lubrificante. Un po' di vapore acqueo nell'aria si condensa e viene scaricato da un sifone. L'aria viene poi compressa nel secondo stadio alla pressione finale e di nuovo viene refrigerata prima di essere fornita alle linee di distribuzione. Un'altra trappola scarica la condensa che si separa dall'aria perché alla pressione più alta l'aria diventa saturata a temperature ben al di sopra dell'ambiente. Un ulteriore raffreddamento è previsto sull'involucro del compressore a vite, così come così come un certo raffreddamento è consentito dall'olio lubrificante.</p> <p>Non sono presenti indicazioni pratiche sui valori della pressione in base all'esigenza dell'utenza. Viene solo riportato la possibilità di intervento per il miglioramento energetico.</p>
	Isolare sezioni del sistema che richiedono specifici valori di pressione dell'aria compressa	[39]	
	Ottimizzare le dimensioni dei compressori in base alla domanda di aria compressa per evitare di avere compressori inutilmente grossi	[39]	La letteratura suggerisce tale intervento di inefficientamento, ma non ne mostra nessuna applicazione pratica
	Utilizzo di intercooler nel compressore	[37], [40]	<ul style="list-style-type: none"> • Questo intervento consiste nel mettere uno scambiatore tra due stadi intermedi del compressore, in

Servizi ausiliari			
Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte	Osservazioni
			<p>modo da abbassare la temperatura dell'aria e ridurre il lavoro necessario nella seconda metà del compressore. Non è un intervento molto diffuso a causa della difficoltà a livello impiantistico e dell'alto costo di installazione iniziale.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nel caso di compressori centrifughi utilizzati per applicazioni in pompe di calore, laddove siano necessari grandi salti di temperatura corrispondenti ad alti rapporti di compressioni, dovrebbero essere usati compressori centrifughi multi-stadio. In tale situazione, degli intercooler dovrebbero essere installati tra i vari stadi di compressione per ridurre la potenza consumata dal compressore stesso, evitare un grosso surriscaldamento allo scarico del compressore e, dunque, minimizzare i consumi energetici. <p>Si possono utilizzare "direct flash intercoolers" oppure intercooler costituiti da scambiatori di calore a parete, che sfruttano l'acqua del circuito del condensatore.</p>
	Installare compressori a numero di giri variabili (compressori già dotati di inverter)	[39]	<ul style="list-style-type: none"> • Sostituzione del compressore a palette con uno equivalente, ma a giri variabili lubrificato • Sostituzione di compressore a giri fissi con compressori equivalenti a giri variabili • Riduzione del numero di ore di funzionamento a vuoto e miglior consumo specifico • minor costo per operare (risparmio in termini di domanda mensile di kilowatt e utilizzo annuale di kilowattora)
	Utilizzo di motori ad induzione ad alta efficienza	[39]	<ul style="list-style-type: none"> • maggiore efficienza energetica
	Sostituire compressori per creare il vuoto con pompe a vuoto	[39]	<ul style="list-style-type: none"> • La letteratura suggerisce tale intervento di efficientamento, ma non ne mostra nessuna applicazione pratica
Macchine ad aria compressa	Sostituzione di tutti i macchinari con movimentazione ad aria compressa con macchinari elettronici dove possibile	[39]	<ul style="list-style-type: none"> • Assofond riferisce che tale soluzione è particolarmente valida in termini di risparmi energetici ottenibili • Diseguito si riporta un'applicazione di tale intervento in un'azienda italiana: sostituzione della formatrice esistente a vibro compressione, con una innovativa a comando elettroidraulico e con pestelli a pressione differenziali. La formatrice a vibro compressione utilizzava grandi quantità di aria compressa e comportava la necessità di protrarre il tempo di formatura per svariati secondi. Al contrario, la nuova formatrice ad alta efficienza e a comando elettroidraulico ha permesso di effettuare la formatura della piacca in tempi più brevi (comportando minori consumi energetici), mentre l'adozione di pestelli a pressione differenziale ha consentito di ottenere un miglior grado di finitura e di aumentare la ripetibilità dei getti prodotti, così riducendo gli scarti ed il relativo consumo energetico specifico.
	Sostituzione dell'aria compressa con alternative per evitare sprechi di energia nella compressione dell'aria stessa	[41]	
Aspiratori	Posizionare gli aspiratori il più vicino possibile alla sorgente	[17]	<ul style="list-style-type: none"> • Assofond riferisce che tale soluzione è particolarmente valida in termini di risparmi energetici perché riduce le perdite di carico • La letteratura suggerisce tale intervento di efficientamento, ma non ne mostra nessuna applicazione pratica
Lubrificazione	Effettuare una lubrificazione elettrostatica per diminuire le polveri di olio nell'aria	[17]	<ul style="list-style-type: none"> • La letteratura suggerisce tale intervento di efficientamento, ma non ne mostra nessuna applicazione pratica
Impianto di aspirazione	Utilizzo di sbrinatori per rimuovere le gocce di condensa dal flusso	[17]	<ul style="list-style-type: none"> • La formazione di condensa dentro ai condotti di aspirazione può essere dannosa. Per questo, installare uno scambiatore di calore atto ad evitare la formazione di condensa dentro ai condotti può ridurre i consumi energetici d'impianto associati agli eventuali sforzi di rimozione delle particelle di acqua condensata. • Assofond riferisce che l'efficacia di tale intervento dovrebbe essere verificata in un'applicazione relativa al settore delle fonderie • La letteratura, però, sebbene suggerisca tale intervento di efficientamento, non ne mostra nessuna

Servizi ausiliari				
Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte	Osservazioni	
				applicazione pratica.
	Utilizzo di precipitatori elettrostatici per rimuovere polvere di residui	[17]		<ul style="list-style-type: none"> La letteratura suggerisce tale intervento di efficientamento, ma non ne mostra nessuna applicazione pratica
	Trattamento delle emissioni in sistemi di abbattimento adeguati	[18]		
	Installazione di ventilatori ad alta efficienza	[12]		<ul style="list-style-type: none"> I ventilatori rientrano nell'ambito della direttiva ErP sulla progettazione ecocompatibile dei prodotti che utilizzano l'energia. Il regolamento attuativo n. 237/2011/UE definisce gli standard minimi dei ventilatori immessi nel mercato a partire dal 1° gennaio 2013 e, in uno step successivo, dal 1° gennaio 2015. Rientrano nel campo di applicazione del regolamento i ventilatori assiali, centrifughi a pale avanti e rovesce (con e senza coclea) ed i ventilatori a flusso misto tangenziale, qualora la potenza elettrica assorbita sia compresa tra 0.125 kW e 500 kW. Il regolamento non prevede l'adeguamento dei ventilatori installati. La letteratura riporta che la maggior parte dei ventilatori nelle applicazioni industriali sono sovradimensionati rispetto alle esigenze del loro contesto di applicazione. Un non corretto dimensionamento dei ventilatori può implicare perdite energetiche comprese tra l'1% e il 5% delle perdite totali d'impianto. Le affermazioni precedenti sono relative allo studio delle industrie americane e sono state dimostrate mediante un caso studio condotto da Xenergy Inc. nel 1998. Impianti di degassaggio Per ventilatori attivi h24 Ventilatore del filtro dell'aria Impianto di aspirazione
	Utilizzo di ventilatori delle corrette dimensioni	[12]		
	Installazione di ventilatori a velocità regolabile (ASD), ovvero di ventilatori già dotati di inverter	[12]		<ul style="list-style-type: none"> Non ci sono ulteriori informazioni
	Installazione linea di aspirazione forzata per i forni	Dalle diagnosi energetiche		
	Utilizzo di cinghie ad alta efficienza e sostituzione delle cinghie trapezoidali con cinghie dentate	[12]		<ul style="list-style-type: none"> La letteratura suggerisce tale intervento di efficientamento, ma non ne mostra nessuna applicazione pratica
	Sostituzione dei muletti	[42]		<ul style="list-style-type: none"> Non ci sono ulteriori informazioni Passaggio da batteria al piombo ad un sistema di potenza ibrido attivo basato su batterie Li, ultracapacitori e celle a combustibile PEM Miglioramenti: rifornimento più veloce, prestazioni costanti, maggiore disponibilità e tempi di funzionamento prolungati. Passaggio da carica batteria tradizionali a carica batteria elettrici ad alta frequenza dotati di inverter. Miglioramenti: risparmio energetico in consumo di kWh/anno
Muletti	Sostituzione dei carica batteria dei muletti	[42]		
	Sostituzione nastri trasportatori con nuovi	Dalle diagnosi energetiche		
	Utilizzare delle coperture durante il trasporto di materiali	[18]		
Trasportatori	Utilizzo di convertitori di frequenza a velocità controllata per ridurre i consumi sui trasportatori	[43]		<ul style="list-style-type: none"> La letteratura suggerisce tale intervento di efficientamento, ma non ne mostra nessuna applicazione pratica
	Sostituire sistemi di trasporto pneumatici, a vite o a catene con sistemi di tipo a nastro	[43]		<ul style="list-style-type: none"> La letteratura suggerisce tale intervento di efficientamento, ma non ne mostra nessuna applicazione pratica
	Sostituzione delle cinghie con cinghie poly-v nuove	[44]		

Servizi ausiliari			
Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte	Osservazioni
	e più efficienti		
	Sostituzione cinghie trapezoidali con cinghie bielicoidali	Dalle diagnosi energetiche	<ul style="list-style-type: none"> • Segnalato un risparmio energetico di circa il 5% • Utilizzato per i compressori
Carrello elevatore	Sostituzione carrello elevatore a gasolio con uno più moderno e efficiente	Dalle diagnosi energetiche	<ul style="list-style-type: none"> • Il gasolio per l'alimentazione degli autoveicoli aziendali può rappresentare una non trascurabile quota parte dei consumi energetici aziendali. Ad esempio, un'applicazione nel territorio italiano ha mostrato un consumo energetico maggiore di 27 TEP e determinato dall'utilizzo di gasolio. Sostituire veicolo a gasolio con altri tipi di veicoli può ridurre il consumo energetico.
Gru a ponte	Sostituzione carro ponte	Dalle diagnosi energetiche	<ul style="list-style-type: none"> • Sostituzione con carroporti più performanti da un punto di vista energetico • Modificati motori di traslazione sotto inverter
Trasformatori	Sostituzione trasformatori con più efficienti e/o più potenti	Dalle diagnosi energetiche	<ul style="list-style-type: none"> • Riduzione delle perdite • Sostituzione di un trasformatore ad olio con uno in resina • Sostituzione del vecchio compressore con uno equivalente, ma di minori perdite • Trasformatori MT/BT
Inverter	Sostituzione di inverter con nuovi e più efficienti o installazione di nuovi inverter sui motori che non ce li hanno	[8]	<p>L'applicazione di tale intervento coinvolge tutti i motori che alimentano il processo produttivo e i sistemi ausiliari. Infatti, l'installazione di inverter sui motori consente di ottimizzare i consumi energetici in ogni momento, adattando la produzione di energia all'effettivo fabbisogno di quel momento. I tre esempi principali di applicazione di tale intervento nel territorio italiano sono i seguenti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Installazione di un inverter sul motore di azionamento di un compressore che non mostrava un funzionamento ottimale, bensì alternava cicli di funzionamento a pieno carico, con cicli a vuoto. L'azienda riporta che un compressore quando lavora a vuoto non produce aria compressa, ma consuma comunque un'energia pari al 25-30% del consumo a pieno carico. • Installazione di un inverter sui motori che azionano gli aspiratori. Ad esempio, si può installare un inverter, collegato ad una sonda di pressione posta nel collettore principale, sui motori che azionano i ventilatori. In questo modo, si permette ai ventilatori di adattarsi alla variazione della richiesta di aspirazione rilevata dalla sonda di pressione. • Installazione di inverter sui motori che azionano le pompe
Impianto elettrico	Utilizzo di filtri passivi	[17]	
Motori	Utilizzo di motori elettrici ad alta efficienza IE2 IE3 IE4	[37], [44]	<ul style="list-style-type: none"> • Attività con grandi consumi energetici • A parità di potenza offrono rendimento superiori e più costanti • Consigliata la sostituzione di tutti i motori elettrici che hanno un sufficiente numero di ore di funzionamento annue • Perdite di potenza ridotte grazie all'uso di materiali più opportuni per statore e rotore • Motori di aspirazione, ventilazione e pompe. In particolare, la sostituzione dei motori di aspirazione con motori più efficienti risulta l'intervento più comune afferente a questa categoria. • Sostituzione di motori IE1 e IE2 con motori IE3 • Sostituzione di motori precedenti alla classe IE1 con motori IE3 per la linea di formatura e fusione • Sostituzione di motori con oltre 20 anni di vita • Sostituzione di motori 4 poli di classe IE2 con motori 4 poli di classe IE4 (Super-Premium Efficiency) per l'aspirazione. • Sostituzione dei motori IE1 delle pompe dell'impianto oleodinamico con motori IE4
	Utilizzo di motori elettrici delle corrette dimensioni per evitare che i motori siano proporzionati al carico	[44]	<ul style="list-style-type: none"> • La letteratura suggerisce tale intervento di efficientamento, ma non ne mostra nessuna applicazione pratica
	Utilizzo di motori rigenerativi	Dalle diagnosi energetiche	<ul style="list-style-type: none"> • Sfruttano l'energia frenante in fase di discesa per produrre mediante un inverter energia elettrica • Le fonti di letteratura indicano un risparmio compreso tra il 15% e il 25% con picchi massimi del 40% • Motori del carro ponte che sostiene il magnete responsabile di caricare e scaricare il materiale. • Garantisce minori consumi, oltre a una minor dipendenza dalle fluttuazioni della rete elettrica.
	Utilizzo di motori con bassa corrente di avviamento	[45]	

Servizi ausiliari			
Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte	Osseervazioni
	Rifasamento dei motori	[12], [45]	<ul style="list-style-type: none"> Lo sfasamento tra la tensione e la corrente genera un consumo della potenza reattiva. Introducendo in parallelo ai motori dei condensatori si riduce l'effetto dei carichi induttivi, riducendo lo sfasamento tra tensione e corrente.
	Riavvolgimento dei motori	[12]	<ul style="list-style-type: none"> Il riavvolgimento consiste in una serie di operazioni necessarie a ripristinare le condizioni di funzionamento iniziali. Spesso può essere fatto in sostituzione all'acquisto di un nuovo motore in quanto meno impattante in termini di costo.
	Installare motori a velocità variabile (ASD VSD), ovvero motori già dotati di inverter	[45]	<ul style="list-style-type: none"> sostituzione da <i>classical induction motors</i> a <i>linear induction motors</i> alta efficienza energetica alto grado di affidabilità alta coppia di avviamento bassa corrente di avviamento bassa dipendenza dell'avviamento dalle fluttuazioni della tensione di rete
Trattamento acque	Installare un efficiente impianto di drenaggio acque	[17]	-
	Installazione di sistemi efficienti per il trattamento delle acque di scarto	[17]	-
Impianti di distribuzione fluidi	Utilizzo di un sistema di raffreddamento a circuito chiuso	[18]	-
	Ottimizzazione nel design dei condotti per minimizzare le perdite di aria compressa e installazione di guarnizioni e sigilli per il contenimento delle perdite rilevate o sostituzione dei tratti di condotto danneggiati (leak management)	[39]	<p>Le perdite di aria compressa possono essere minimizzate in due modi principali:</p> <ul style="list-style-type: none"> in fase di progettazione dell'impianto, studiando un'opportuna forma dei condotti nei circuiti dell'aria compressa, che non preveda bruschi restringimenti (colli di bottiglia) che implicino grandi salti di pressione. in fase di attività dell'impianto, ricercando eventuali perdite e, successivamente, sanandole attraverso l'installazione di appositi sigilli e guarnizioni o la sostituzione dei tratti di condotto danneggiati. <p>Una riduzione delle perdite sulla rete di aria compressa consente di valutare la possibilità di ridurre la pressione di esercizio del circuito, con una conseguente riduzione dei consumi energetici. Dagli audit eseguiti nelle aziende italiane emerge che ogni bar in più della pressione prodotta si traduce in un maggiore consumo di energia elettrica di circa il 6-7%.</p>
	Isolare gli impianti di distribuzione dei fluidi per evitare perdite di calore	[12]	La letteratura suggerisce tale intervento di inefficientamento, ma non ne mostra nessuna applicazione pratica
Pompa	Sostituzione delle pompe obsolete o usurate con pompe più nuove e ad alta elevata efficienza	[12]	<ul style="list-style-type: none"> La sostituzione può ridurre l'uso energetico dal 2% al 10% e aumentare l'efficienza della pompa dal 2% al 5%. [6] Sostituzione pompe a portata fissa con pompe a portata variabile per regolare calore necessario Sostituzione di 6 circolanti esistenti con modelli di ultima generazione con caratteristiche simili e sistema di controllo elettronico della velocità
	Ottimizzazione delle dimensioni delle pompe in base alla domanda di energia per evitare di avere macchine inutilmente grosse	[12]	<p>Sostituzione con motori IE4 e pompe verticali di nuova generazione con massimizzazione dell'efficienza idraulica</p> <ul style="list-style-type: none"> La letteratura suggerisce tale intervento di efficientamento, ma non ne mostra nessuna applicazione pratica
	Rifilatura della girante per abbassare i consumi della pompa	[12]	<ul style="list-style-type: none"> La letteratura suggerisce tale intervento di efficientamento, ma non ne mostra nessuna applicazione pratica
	Installazione di pompe a velocità regolabile (ASD), ovvero pompe già dotate di inverter	[12]	<ul style="list-style-type: none"> Risparmio energetico tra il 20% e 50% in base a applicazione, dimensione della pompa, carico e variazione di carico
Impianto di raffreddamento	Sostituzione ed efficientamento delle torri	Dalle diagnosi	

Servizi ausiliari				
Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte	Osservazioni	
	evaporative	energetiche	<ul style="list-style-type: none"> Sostituzione torri evaporative per raffreddamento acqua con le relative pompe. Al momento della sostituzione era presente una torre obsoleta con potenza elettrica di 5 kW. Sostituzione delle Torri Evaporative sia per il raffreddamento dei forni e anche la torre per il raffreddamento dei compressori d'aria e dei compressori delle unità interne di climatizzazione dei vari uffici interni. Revamping del sistema di raffreddamento con consumo invernale pari a 50 kW ed estivo pari a 65 kW Sostituzione torre evaporativa per raffreddamento dell'olio idraulico di presse con potenza termica 570 kW, ventilatore 5,5 kW e pompa di carico 18,5 kW. Sostituzione del ventilatore e del motore con sistema portata d'aria variabili ed alta efficienza. 	
	Riutilizzo delle condense delle torri evaporative	[12]	La letteratura suggerisce tale intervento di efficientamento, ma non ne mostra nessuna applicazione pratica	

8.2 Impianti di trattamento rifiuti

8.2.1 Trattamento meccanico – Triturazione

Tabella 1. Soluzioni tecnologiche relative alla triturazione

Trattamento meccanico				
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte	Osservazioni
Trituratore	Pre-shredder	Installazione di un pre-shredder	[56]	
Trituratore	Shear cutter	Installazione di un shear cutter	[58]	
Trituratore	Mixed scrap shredder	Installazione di un mixed scrap shredder	[56]	
Trituratore	Zerdirator	Installazione di un zerdirator	[56]	
Trituratore	Roll crusher	Installazione di un roll crusher	[58]	
Trituratore	Jaw crusher	Installazione di un jaw crusher	[58]	
Trituratore	Kondirato	Installazione di un kondirato	[56]	
Trituratore	Semi-wet shredder	Installazione di un semi-wet shredder	[56]	
Trituratore	Wet shredder	Installazione di un wet shredder	[56]	
Trituratore	Shredder per cavi	Installazione di un shredder per cavi	[56]	
Trituratore	Cascade ball mill	Installazione di un cascade ball mill	[58]	
Trituratore	Trituratore	Regolazione dei setacci in uscita per aumentare il materiale in camera e quindi l'efficienza	[56]	
Trituratore	Trituratore a bassa velocità ed alta coppia	Installazione di un trituratore a bassa velocità ed alta coppia	[57] [56]	
Trituratore	Trituratore a martelli	Installazione di un trituratore a martelli	[57] [56]	
Macinatore	Dispositivo per la macinazione criogenica	Installazione di un dispositivo per la macinazione criogenica	[56]	
Trituratore di WEE	Twin shaft rotor shear	Installazione di un twin shaft rotor shear	[58] [56]	

Trituratore di WEE	Four shaft rotor shear	Installazione di un four shaft rotor shear	[58] [56]
Trituratore di WEE	Rotor shredder a martelli	Installazione di un rotor shredder a martelli	[56]
Trituratore di WEE	Rotor shredder a catene	Installazione di un rotor shredder a catene	[56]
Pelletizzatore	Disc agglomerator	Installazione di un disc agglomerator	[56]
Pelletizzatore	Ring die press	Installazione di un ring die press	[56]

8.2.2 Trattamento biologico – Trattamenti aerobici

Trattamento aerobico

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Locali di digestione	Sistema a pile statiche	Installazione di un sistema a pile statiche		[60] [56]	
Locali di digestione	Sistema chiuso	Installazione di un sistema chiuso a letto agitato		[59]	
Locali di digestione	Sistema chiuso	Installazione di un sistema chiuso a silos		[59]	
Locali di digestione	Sistema chiuso	Installazione di un sistema chiuso "tunnel composting"		[60]	
Locali di digestione	Sistema ad andane	Installazione di un sistema ad andane		[60] [56]	
Locali di digestione	Sistema di compostaggio lineare	Installazione di un sistema di compostaggio lineare		[56]	
Digestore	Tamburi rotanti	Installazione di un dispositivo per il compostaggio in tamburi rotanti		[60]	
Digestore	Container	Installazione di un container per il compostaggio		[60] [56]	
Digestore	Sistema di compostaggio ipertermofilo	Installazione di un sistema di compostaggio ipertermofilo		[61]	

8.2.3 Trattamento biologico – Trattamenti anaerobici

Trattamento anaerobico

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Digestore	Digestore orizzontale	Installazione di un digestore orizzontale con tecnologia plug flow		[56]	
Digestore	Gassificatore	Installazione di un gassificatore per alimentare termicamente il digestore		[64]	
Digestore	Alimentazione	Installazione di un digestore alimentato ad energia solare		[62]	
Digestore	Digestore a due stadi	Installazione di un digestore a due stadi (acidogenesi e metanogenesi)		[63]	
Agitatore	Pale	Installazione di pale per il mescolamento		[56]	
Agitatore	Pompe di ricircolo	Installazione di pompe di ricircolo per il mescolamento		[56]	
Agitatore	Ugelli di ricircolo biogas	Installazione di ugelli di ricircolo biogas		[56]	
Agitatore	Ugelli	Installazione di un sistema di ugelli per il ricircolo della materia asciutta		[56]	

Trattamento anaerobico

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Produttore di bioetanolo	Distillatore	Installazione di un distillatore per la produzione di bioetanolo		[56]	

Trattamento del biogas

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Condensatore	Condensatore	Installazione di un condensatore		[56]	
Assorbitore	Assorbitore a glicole	Installazione di un assorbitore a glicole		[56]	
Assorbitore	Assorbitore a sale	Installazione di un assorbitore a sale		[56]	
Dispositivo per la precipitazione	Dispositivo per la precipitazione	Installazione di un dispositivo per la precipitazione		[56]	
Scrubber	Scrubber	Installazione di un biogas scrubber		[56]	
Assorbitore	Assorbitore	Installazione di un sistema per la pressure swing adsorption		[56]	
Scrubber	Scrubber ad acqua	Installazione di un scrubber ad acqua		[56]	
Scrubber	Scrubber a solvente	Installazione di un scrubber a solvente organico		[56]	
Separatore	Separatore a membrana	Installazione di un separatore a membrana		[56]	
Condensatore	Condensatore criogenico	Installazione di un condensatore criogenico		[56]	

8.2.4 Incenerimento

Incenerimento in camera di combustione

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte	Osservazioni
Inceneritore grate	a Inceneritore con roller grates	Installazione di un inceneritore con roller grates	[73] [69]	
Inceneritore grate	a Inceneritore con chain grates	Installazione di un inceneritore con chain grates	[69]	
Inceneritore grate	a Inceneritore con push grates	Installazione di un inceneritore con push grates	[69]	
Inceneritore grate	a Inceneritore con rocking grates	Installazione di un inceneritore con rocking grates	[74] [69]	
Inceneritore grate	a Inceneritore con reciprocating grates	Installazione di un inceneritore con reciprocating grates	[73] [69]	
Inceneritore grate	a Inceneritore con travelling grate	Installazione di un inceneritore con travelling grate	[73] [69]	
Inceneritore grate	a Areazione	Installazione di un inceneritore con flusso d'aria controcorrente	[74] [69]	
Inceneritore grate	a Areazione	Installazione di un inceneritore con flusso d'aria secondo corrente	[74] [69]	

Non sempre si ha la possibilità di fare upgrade o passare a una tecnologia indicata come migliore dallo stato dell'arte poiché impattanti in modo significativo su spazi e/o parametri di lavoro dei sistemi confinanti.

Incenerimento in camera di combustione					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Fonte	Osservazioni	
Inceneritore grate	a Areeazione	Installazione di un inceneritore con flusso d'aria multiplo	[74] [69]		
Forno rotativo	Forno rotativo	Installazione di un forno rotativo	[74] [69]		
Inceneritore letto fluido	a Stationary fluidised bed	Installazione di uno stationary fluidised bed	[73] [69]		
Inceneritore letto fluido	a Rotating fluidised bed	Installazione di un rotating fluidised bed	[69]		
Inceneritore letto fluido	a Fornace spreader-stroker	Installazione di una fornace spreader-stroker	[69]		
Inceneritore letto fluido	a Circuulating fluidised bed	Installazione di un circuulating fluidised bed	[69]		
Inceneritore letto fluido	a Turbocompressore	Installazione di un turbocompressore nel sistema d'areazione di un inceneritore a letto fluido	[77]		
Dispositivo microonde	Dispositivo microonde	Installazione di un sistema a microonde per la solidificazione delle ceneri leggere	[71]		
Dispositivo microonde	Dispositivo microonde	Installazione di un sistema a microonde per la vetrificazione delle ceneri pesanti	[70]		
Dispositivo plasma	al Dispositivo al plasma	Installazione di un sistema al plasma per la vetrificazione delle ceneri	[72]		
Pirolisi e gassificazione					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Gassificatore	Gassificatore a letto fluido	Installazione di un gassificatore a letto fluido		[78] [69]	
Gassificatore	Fixed bed downdraft gasifier	Installazione di un fixed bed downdraft gasifier		[78] [69]	
Gassificatore	Fixed bed updraft gasifier	Installazione di un fixed bed updraft gasifier		[78]	
Gassificatore	Gassificatore a forno rotativo	Installazione di un gassificatore a forno rotativo		[78]	
Gassificatore	Gassificatore a grate mobili	Installazione di un gassificatore a grate mobili		[78]	
Gassificatore	Gassificatore al plasma	Installazione di un gassificatore al plasma		[78]	
Gassificatore	Gassificatore a sistema ciclonico	Installazione di un gassificatore a sistema ciclonico		[69]	
Gassificatore	Entrained flow gasifier	Installazione di un entrained flow gasifier		[78]	
Gassificatore	Gassificatore in atmosfera d'idrogeno	Installazione di un gassificatore in atmosfera d'idrogeno		[79]	
Gassificatore	Gassificatore al plasma d'idrogeno	Installazione di un gassificatore al plasma d'idrogeno		[79]	

Pirolisi e gassificazione

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Dispositivo per la pirolisi	Dispositivo per la pirolisi	Installazione di un dispositivo per la pirolisi		[69]	
Dispositivo per la pirolisi	Dispositivo per la pirolisi al plasma	Installazione di un dispositivo per la pirolisi al plasma		[80]	
Dispositivo per la pirolisi	Dispositivo per la torrefazione	Installazione di un dispositivo per la torrefazione		[81]	
Dispositivo per pirolisi e combustione	Dispositivo per pirolisi e combustione	Installazione di un forno rotativo		[69]	
Dispositivo per la pirolisi e gassificatore	Dispositivo per la pirolisi e gassificatore	Installazione di un sistema di pirolisi e gassificazione a processo disconnesso (di conversione)		[69]	
Dispositivo per la pirolisi e gassificatore	Processo connesso	Installazione di un sistema di pirolisi e gassificazione a processo connesso		[69]	
Gassificatore e combustore	Gassificatore a letto fluido e fornace	Installazione di un gassificatore a letto fluido + fornace per lo scioglimento delle ceneri		[69]	
Gassificatore e combustore	Forno a pozzo	Installazione di un forno a pozzo		[69]	

8.2.5 Controllo delle emissioni in aria

Controllo emissioni in aria

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Separatore	Sistema ciclonico	Installazione di un sistema ciclonico		[82] [56]	
Separatore	Sistema multi-ciclonico	Installazione di un sistema multi-ciclonico		[69]	
Separatore	Filtro in tessuto	Installazione di un filtro in tessuto		[83] [56]	
Separatore	Filtro a manica	Aumento del numero di filtri a manica		Dalle diagnosi energetiche	
Separatore	Absolute filter	Installazione di un absolute filter		[56]	
Separatore	Ossidatore termico	Installazione di un ossidatore termico		[56]	
Separatore	Biofiltro	Installazione di un biofiltro		[56]	
Precipitatore	Precipitatore elettrostatico	Installazione di un precipitatore elettrostatico		[83] [56]	
Precipitatore	Precipitatore elettrostatico umido	Installazione di un precipitatore elettrostatico umido		[69]	
Precipitatore	Precipitatore elettrostatico a condensazione	Installazione di un precipitatore elettrostatico a condensazione		[69]	
DeNOx	Recuperatore di calore	Installazione di un sistema DeNOx con recuperatore di calore		Dalle diagnosi energetiche	
DeNOx	Preriscaldamento	Installazione di un sistema di preriscaldamento a scambiatori usando i fumi (sostituendo i bruciatori a metano)		Dalle diagnosi energetiche	
Assorbitore	Filtro al carbone attivo	Installazione di un filtro al carbone attivo		[56]	

Controllo emissioni in aria					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Assorbitore	Filtro a zeoliti	Installazione di un filtro a zeoliti		[56]	
Scrubber	Jet scrubber	Installazione di un jet scrubber		[69]	
Scrubber	Packed column scrubber	Installazione di un packed column scrubber		[83]	
Scrubber	Rotation scrubber	Installazione di un rotation scrubber		[69]	
Scrubber	Venturi scrubber	Installazione di un Venturi scrubber		[83] [69]	
Scrubber	Scrubber a ionizzazione	Installazione di un scrubber a ionizzazione		[69]	
Recuperatore VFC/VHC	di Dispositivo per la tecnica criogenica	Installazione di un dispositivo per la tecnica criogenica		[56]	
Recuperatore VFC/VHC	di Dispositivo per la tecnica di conversione catalitica	Installazione di un dispositivo per la tecnica di conversione catalitica		[56]	
Recuperatore VFC/VHC	di Dispositivo per la tecnica di assorbimento	Installazione di un dispositivo per la tecnica di assorbimento		[56]	
Condensatore	Condensatore	Installazione di un condensatore		[56]	
Condensatore	Condensatore criogenico	Installazione di un condensatore criogenico		[56]	
Dispositivo trattamento VOC	Sistema di riduzione selettiva catalitica (SCR)	Installazione di un sistema SCR		[83] [69]	
Dispositivo trattamento VOC	Ionizzatore e assorbitore	Installazione di un sistema formato da ionizzatore e assorbitore		[56]	

8.2.6 Attività nella ricezione dei rifiuti

Rimozione liquidi					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Estrattore di liquidi	Decantatore	Installazione di un decantatore		[69]	
Estrattore di liquidi	Centrifuga	Installazione di una centrifuga		[69]	
Estrattore di liquidi	Pressa filtrante a nastro	Installazione di una pressa filtrante a nastro		[69]	
Estrattore di liquidi	Filtropressa	Installazione di una filtropressa		[69]	
Essiccatore	Immersion frying	Installazione di un dispositivo per l'immersion frying		[84]	
Essiccatore	Essiccatore a disco	Installazione di un essiccatore a disco		[69]	
Essiccatore	Essiccatore rotante	Installazione di un essiccatore rotante		[84]	
Essiccatore	Essiccatore a letto statico	Installazione di un essiccatore a letto statico		[84]	
Essiccatore	Essiccatore a tamburo	Installazione di un essiccatore a tamburo		[69]	
Essiccatore	Essiccatore a tunnel	Installazione di un essiccatore a tunnel		[84]	
Essiccatore	Essiccatore a letto fluido	Installazione di un essiccatore a letto fluido		[84] [69]	

Rimozione liquidi

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Essiccatore	Bioessiccatore	Installazione di un bioessiccatore		[86] [87] [85]	
Essiccatore	bioessiccatore in serra	Installazione di un bioessiccazione in serra		[87]	
Essiccatore	Essiccatore a nastro	Installazione di un essiccatore a nastro		[69]	
Essiccatore	Essiccatore pneumatio	Installazione di un essiccatore pneumatio		[84]	
Essiccatore	Essiccatore a film sottile	Installazione di un essiccatore a film sottile		[69]	
Essiccatore	Essiccatore centrifugo	Installazione di un essiccatore centrifugo		[69]	
Essiccatore	Essiccatore solare	Installazione di un essiccatore solare		[87] [69]	

Miscelazione

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Miscelatore ad albero rotante	Miscelatore ad elica	Installazione di un miscelatore ad elica		[56]	
Miscelatore ad albero rotante	Mescolatore a coclea	Installazione di un mescolatore a coclea		[56]	
Miscelatore ad albero rotante	Turbomiscelatore	Installazione di un turbomiscelatore		[56]	
Miscelatore ad albero rotante	Impastatore	Installazione di un impastatore		[56]	
Miscelatore ad albero rotante	Forced areation mixer	Installazione di un forced areation mixer		[56]	
Miscelatore ad albero rotante	Miscelatore a lama sigma	Installazione di un miscelatore a lama sigma		[56]	
Miscelatore ad albero rotante	Plough share mixer	Installazione di un plough share mixer		[56]	
Miscelatore a contenitore rotante	Tumble mixer	Installazione di un tumble mixer		[56]	
Miscelatore a contenitore rotante	Miscelatore a tamburo	Installazione di un miscelatore a tamburo		[56]	
Miscelatore a contenitore rotante	Rotary mixer	Installazione di un rotary mixer		[56]	
Miscelatore per liquidi	Pompe	Installazione di pompe per la miscelazione dei liquidi		[56]	
Miscelatore per liquidi	Agitatore	Installazione di un agitatore per la miscelazione dei liquidi		[56]	

Trasporto rifiuti

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Macchina movimento terra	Macchine movimento terra	Utilizzo di macchine movimento terra		[56]	
Trasportatore	Trasportatore automatica	Installazione di un sistema automatizzato di trasporto, apertura e pulizia contenitori		[56]	
Trasportatore	Nastro trasportatore	Installazione di un nastro trasportatore		[56]	
Trasportatore	Trasportatore a dischi	Sostituzione trasporto polveri ad aria con trasportatore a dischi		Dalle diagnosi energetiche	

Accettazione rifiuti					
Macchina	 Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Bilancia	Bilance interrate per camion	Installazione di bilance interrate per camion		[56]	
Misuratore di flusso	Misuratore di flusso	Installazione di un misuratore di flusso		[56]	
Dispositivi per il controllo della radioattività	Dispositivi per il controllo della radioattività	Installazione di dispositivi per il controllo della radioattività		[56]	
Sorting					
Macchina	 Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Separatore	Separatore automatico	Installazione di un separatore automatico		[56]	
Separatore	Separatore con spettroscopia del vicino infrarosso	Installazione di un separatore con spettroscopia del vicino infrarosso		[56]	
Separatore	Separatore con sistema a raggi X	Installazione di un separatore con sistema a raggi X		[56]	
Separatore	Separatore con sistema XRF ad alta velocità	Installazione di un separatore con sistema XRF ad alta velocità		[56]	
Separatore	Classificatore ad aria - zig-zag	Installazione di un Installazione di un classificatore ad aria - zig-zag		[58]	
Separatore	Classificatore ad aria - rotante	Installazione di un classificatore ad aria - rotante		[58]	
Separatore	Classificatore ad aria - aspirante	Installazione di un classificatore ad aria - aspirante		[58]	
Separatore	Classificatore ad aria - a flusso incrociato	Installazione di un classificatore ad aria - a flusso incrociato		[58]	
Separatore	Serbatoio sink-float	Installazione di un serbatoio sink-float		[58] [56]	
Separatore	Separazione balistica	Installazione di un dispositivo per la separazione balistica		[56]	
Separatore	Tavolo vibrante	Installazione di un tavolo vibrante		[56]	
Separatore	Tavolo ad aria	Installazione di un tavolo ad aria		[56]	
Separatore	Aspiratore	Installazione di un aspiratore (rimozione parte leggera)		[56]	
Separatore	Setaccio cilindrico rotante	Installazione di un setaccio cilindrico rotante		[58] [56]	
Separatore	Setaccio vibrante piatto	Installazione di un setaccio vibrante piatto		[56]	
Separatore	Setaccio oscillante	Installazione di un setaccio oscillante		[58]	
Separatore	Finger screen	Installazione di un finger screen			[56]
Separatore	Disk screen	Installazione di un disk screen			[58] [82]
Separatore	Setaccio a tamburo	Installazione di un setaccio a tamburo			[56]
Separatore	Setaccio a stella	Installazione di un setaccio a stella			[56]
Separatore	Separatore magnetico	Installazione di un separatore magnetico			[58] [56]
Separatore	Separatore magnetico overband	Installazione di un separatore magnetico overband			[56]
Separatore	Magnetic drum	Installazione di un magnetic drum			[56]
Separatore	Separatore elettromagnetico a correnti parassite	Installazione di un separatore elettromagnetico a correnti parassite			[58] [82] [56]

Sorting

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Separatore	Separatore all-metal	Installazione di un separatore all-metal		[56]	

8.2.7 Recupero energetico

Recupero energetico

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Inceneritore	Scambiatore di calore	Installazione di uno scambiatore di calore a piastre		[69]	
Inceneritore	Scambiatore di calore	Installazione di uno scambiatore di calore a bassa pressione (incremento del recupero)			
Inceneritore	Scambiatore di calore	Installazione di uno scambiatore a tubi lisci			
Inceneritore	Scambiatore di calore	Installazione di uno scambiatore di calore			
Boiler	Boiler	Installazione di un boiler orizzontale		[69]	
Boiler	Boiler	Installazione di un boiler verticale		[69]	
Boiler	Boiler	Installazione di un hot water boiler		[74]	
Boiler	Boiler	Installazione di un boiler a vapore a bassa pressione		[74]	
Boiler	Boiler	Installazione di un boiler a vapore ad alta pressione		[74]	
Boiler	Boiler	Installazione di un boiler a circolazione naturale		[69]	
Boiler	Boiler	Installazione di un boiler a circolazione forzata		[69]	
Boiler	Boiler	Installazione di un boiler a flusso continuo forzato		[69]	
MCI a Biogas	Recupero calore	Installazione di un circuito ORC per il recupero calore degli MCI a biogas			
Condensatore	Pompa di estrazione incondensabili	Installazione di una pompa di estrazione incondensabili nel condensatore			
Condensatore	Condensatore	Installazione di un secondo condensatore ad acqua			
Accumulatore termico	Accumulatore termico	Installazione di un sistema di accumulo termico per disaccoppiare produzione ed utilizzo (tele riscaldamento)			
Rete di tele riscaldamento	Rete di tele riscaldamento	Installazione di un sistema di tele riscaldamento		[88]	
Compressori	Recupero calore	Installazione di un sistema di recupero termico dai compressori			
Gruppo frigo	Gruppo frigo	Sostituzione dell'assorbitore con un chiller ad alta efficienza			
Turbina	Turbina	Installazione di una turbina a condensazione		[69]	
Turbina	Turbina	Installazione di una turbina a condensazione con spillamento		[69]	
Turbina	Turbina	Installazione di una turbina a condensazione in due fasi		[89]	
Turbina	Turbina	Installazione di una turbina a contropressione		[69]	
Turbina	Turbina	Installazione di una turbina a contropressione		[76]	
Turbina	Turbina	Installazione di una turbina a contropressione		[69]	

Recupero energetico					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Turbina	Turbina	Installazione di un circuito ORC per la produzione di energia elettrica		[90]	
Pompa calore	Pompa calore	Installazione di una pompa di calore con compressore		[69]	
Pompa calore	Pompa calore	Installazione di una pompa di calore ad assorbimento		[69]	
Pompa calore	Pompa calore	Installazione di una pompa calore aperte		[69]	

8.2.8 Incremento efficienza impianto e servizi ausiliari

Incremento efficienza dell'impianto					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Motori elettrici	Motori elettrici	Sostituzione dei motori elettrici con elementi ad alta efficienza		[56]	
Motori elettrici	Motori elettrici	Sostituzione di motori elettrici con elementi correttamente dimensionati			
Motori elettrici	Motori elettrici	Installazione di inverter sui motori elettrici		[69]	
Impianto CHP	Impianto CHP	Produzione combinata di calore e energia elettrica		[56]	
Impianto CHP	Impianto CHP	Produzione combinata di elettricità e calore utilizzando il biogas ottenuto dai processi anaerobici		[56]	
Impianto CHP	Impianto CHP	Produzione di energia utilizzando una miscela di syngas derivato dalla gassificazione e di biogas derivante dalla digestione anaerobica		[64]	
Motore Stirling	Motore Stirling	Installazione di un motore Stirling per la produzione di elettricità alimentato da un boiler a biogas		[92]	
Sistema di turbine	Integrazione	Integrazione di un inceneritore con un impianto di generazione di energia elettrica		[67] [93]	
MCI	MCI	Installazione di un motore a syngas per la produzione di energia elettrica		[94]	
Caldaia	Caldaia	Sostituzione di una caldaia con un elemento a condensazione			
Caldaia	Caldaia	Installazione di un sistema di caldaie			
Impianto CHP	Impianto CHP	Installazione di un sistema di cogenerazione a metano			
Generatore di vapore	Generatore di vapore	Sostituzione del generatore di vapore a GPL con uno a metano			
Caldaia	Caldaia	Sostituzione delle caldaie a gasolio con pompe di calore			
Coibentazione	Coibentazione	Coibentazione di edifici soggetti a condizionamento (cappotto termico)		[56]	
Impianto fotovoltaico	Impianto fotovoltaico	Installazione di un impianto fotovoltaico			
Impianto solare termico	Impianto solare termico	Installazione di un impianto solare termico			
Impianto fotovoltaico	Impianto fotovoltaico	Installazione di un impianto fotovoltaico per la produzione di idrogeno		[79]	
Power quality	Sistema automatico di stabilizzazione	Installazione di un sistema automatico di stabilizzazione della tensione			
Power quality	Filtro passivo	Installazione di un filtro passivo per il miglioramento della qualità dell'energia elettrica in ingresso			

Incremento efficienza dell'impianto

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Macchinari movimentazione interna	Macchinari movimentazione interna	Utilizzo di mezzi elettrici per la movimentazione carichi			
Macchinari movimentazione interna	Pneumatici	Montaggio pneumatici "energy saving"			
Macchinari movimentazione interna	Macchinari movimentazione interna	Sostituzione veicoli a gasolio con elementi a classe emissioni inferiori			
Macchinari movimentazione interna	Macchinari movimentazione interna	Installazione sistemi Start&Stop sui veicoli			
Compressore	Compressore	Sostituzione di un compressore con un elemento più performante			
Compressore	Compressore	Sostituzione di un compressore con un elemento dotato di inverter			
Pompa	Pompa	Sostituzione di una pompa con un elemento dotato di inverter			
Pompa	Pompa	Installazione di un inverter sulle pompe			
Sistema d'aerazione	Ventilatore	Sostituzione dei ventilatori centrifughi con elementi più efficienti			

8.3 Impianti di produzione di principi attivi

8.3.1 Trattamento nei reattori

Processamento chimico-fisico

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Reattore a lotti	Reattore a serbatoio agitato	Installazione di un reattore a serbatoio agitato		[95]	
Reattore a lotti	Reattore a serbatoio agitato con deflettori	Installazione di un reattore a serbatoio agitato con deflettori (miglioramento efficienza mescolamento)		[99]	
Reattore a lotti	Reattore a serbatoio agitato con pale multiple	Installazione di un reattore a serbatoio agitato con pale multiple (miglioramento efficienza mescolamento)		[99]	
Reattore a lotti	Reattore a serbatoio agitato a flusso termico continuo	Installazione di un reattore a serbatoio agitato a flusso termico continuo		[95]	
Reattore a lotti	Reattore ad anello	Installazione di un reattore ad anello		[97] [95]	
Reattore a lotti	Colonna a bolle	Installazione di un reattore a colonna		[98] [95]	
Reattore a lotti	Pipe reactor	Installazione di un pipe reactor		[95]	
Reattore a lotti	Reattore tubolare	Installazione di un reattore tubolare		[95]	
Reattore a lotti	Reattore a letto fisso con tubi multipli	Installazione di un reattore a letto fisso con tubi multipli		[99]	
Reattore a lotti	Inclined rotating fixed bed reactor (IRFBR)	Installazione di un IRFBR		[100]	

Processamento chimico-fisico					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Reattore a lotti	Reattore supercritico a CO2	Installazione di un reattore supercritico a CO2		[95]	
Reattore continuo	in Miscelatori statici	Installazione di un miscelatore statici		[95]	
Reattore continuo	in Reattori a disco rotante	Installazione di un reattore a disco rotante		[101] [95]	
Reattore continuo	in Reattori a flusso oscillante	Installazione di un reattore a flusso oscillante		[95]	
Reattore	Dispositivo per la fotocatalisi	Installazione di un reattore con tubazioni trasparenti per il passaggio di luce e consentire la fotocatalisi		[96]	
Reattore	Dispositivo per la sonicazione	Installazione di un reattore con dispositivi per la sonicazione usata per la precipitazione dei solidi		[96]	
Reattore	Dispositivo microonde	Installazione di un dispositivo per la Microwave assisted organic synthesis (MAOS)		[95]	

8.3.2 Asciugatura

Essiccazione					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Fluid bed dryer	Essiccatore a lotti	Installazione di un essiccatore a lotti		[103]	
Fluid bed dryer	Essiccatore semicontinuo	Installazione di un essiccatore semicontinuo		[103]	
Fluid bed dryer	Essiccatore in continuo	Installazione di un essiccatore in continuo		[103]	
Fluid bed dryer	Essiccatore Plug Flow	Installazione di un essiccatore Plug flow		[103]	
Vacuum dryer	Miscelatore sottovuoto jacketed	Installazione di un miscelatore sottovuoto con pareti riscaldabili		[103]	
Vacuum dryer	Miscelatore sottovuoto con microonde	Installazione di un miscelatore sottovuoto con dispositivo microonde		[102]	
Vacuum dryer	Miscelatore sottovuoto con fonte mista	Installazione di un miscelatore sottovuoto con fonte di calore mista		[103]	
Vacuum dryer	Miscelatore sottovuoto gas assisted	Installazione di un sistema di asciugatura sottovuoto gas-assisted		[103]	
Spray drier	Spray drier	Installazione di uno spray dryer a ciclo aperto		[105]	
Spray drier	Spray drier	Installazione di uno spray dryer a ciclo chiuso		[105]	
Spray drier	Spray drier	Installazione di uno spray dryer a ciclo semichiuso		[105]	
Essiccatore	Essiccatore a nastro	Installazione di un essiccatore a nastro		[103]	
Essiccatore	Essiccatore a ciclone	Installazione di un essiccatore a ciclone		[103]	
Essiccatore	Essiccatore spin-flash	Installazione di un essiccatore spin-flash		[103]	
Essiccatore	Essiccatore a letto vibrante	Installazione di un essiccatore a letto vibrante		[103]	
Essiccatore	Essiccatore a cadute di pressione	Installazione di un essiccatore a cadute di pressione			

Essiccatura

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Essiccatore	Essiccatore static tray	Installazione di un essiccatore static tray			
Essiccatore	Soffianti	Installazione di soffianti ad alta efficienza			Dalle diagnosi energetiche
Essiccatore	Alimentazione	Installazione di un essiccatore alimentato ad acqua anziché vapore			Dalle diagnosi energetiche
Essiccatore	Scambiatori di calore	Installazione di essiccatori con scambiatori di calore ad alta efficienza			Dalle diagnosi energetiche

8.3.3 Separazione

Distillazione

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Distillatore	Distillatore	Installazione di un distillatore		[95]	
Distillatore	Distillatore a colonna multipla	Installazione di un distillatore a colonna multipla		[95]	
Distillatore	Distillatore in continuo	Installazione di un distillatore in continuo		[111]	
Distillatore	Distillatore a film	Installazione di un distillatore a film		[109]	

Separazione liquido-solido

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Separatore	Decantatore	Installazione di un decantatore		[95]	
Separatore	Centrifuga	Installazione di una centrifuga		[95]	
Separatore	Setaccio	Installazione di un setaccio		[95]	
Separatore	Filtro a sabbia	Installazione di un filtro a sabbia		[95]	
Separatore	Setaccio a tamburo rotante	Installazione di un setaccio a tamburo rotante		[95]	
Separatore	Filtropressa	Installazione di una filtropressa		[95]	
Separatore	Filtro nutsche agitato	Installazione di un filtro nutsche agitato		[95]	
Separatore	Sedimentatore	Installazione di un dispositivo per la sedimentazione		[99]	
Separatore	Filtro	Installazione di un sistema di filtrazione in continuo		[111]	

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Evaporatore	Evaporatore	Installazione di un sistema di evaporatori a cascata		[99]	
Evaporatore	Sistema evaporativo vapour re compression	Installazione di un sistema evaporativo vapour re compression		[99]	
Evaporatore	Evaporatore a film	Installazione di un evaporatore a film		[109]	
Evaporatore	Evaporatore ad acqua	Sostituzione di un evaporatore ad aria con uno ad acqua (più opportunità di recupero)		Dalle energetiche	diagnosi

Separazione liquido-liquido

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Estrattore	Estrattore a colonne controcorrente	Installazione di un estrattore a colonne controcorrente		[95]	
Estrattore	Centrifugal extractor	Installazione di un centrifugal extractor		[95]	
Mixer settler	Mixer settler	Installazione di un mixer settler		[95]	
Reattore	Stirred tank	Installazione di un reattore stirred tank		[95]	
Separatore a membrana	Separatore a membrana idrofoba	Installazione di una membrana semipermeabile idrofoba		[110]	

Estrazione

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Estrattore	Estrattore a solvente	Installazione di un estrattore a solvente specifico		[95]	
Estrattore	Estrattore a CO2	Installazione di un estrattore a CO2 supercritica		[95]	
Estrattore	Countercurrent extractor	Installazione di un dispositivo per la countercurrent band extraction		[95]	

8.3.4 Purificazione

Purificazione

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Cromatografo	Cromatografo rotante	Installazione di un cromatografo rotante		[112]	
Cromatografo	Cromatografo a movimento simulato	Installazione di un cromatografo a movimento simulato		[112]	
Separatore a membrana	Separatore a membrana organica	Installazione di membrane organiche		[112]	
Separatore a membrana	Separatore a membrana composita	Installazione di membrane composite		[112]	
Separatore a membrana	Separatore a membrana inorganica	Installazione di membrane inorganiche		[112]	

8.3.5 Macinazione

Riduzione delle dimensioni

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Dispositivo per il dry milling	Mulino a martelli	Installazione di un mulino a martelli		[113]	
Dispositivo per il dry milling	Pin mill	Installazione di una pin mill		[169][114]	
Dispositivo per il dry milling	Spiral jet mill	Installazione di una spiral jet mill		[170][114]	
Dispositivo per il dry milling	Loop jet mill	Installazione di una loop jet mill		[114]	
Dispositivo per il dry milling	FB air jet mill	Installazione di una air jet mill a letto fluido		[114]	
Dispositivo per il wet milling	Sistema rotore-statore	Installazione di un macinatore con statore e rotori dentati		[113]	
Dispositivo per il wet milling	Media mill	Installazione di una media mill		[169][113]	
Dispositivo per il wet milling	Media mill	Installazione di una media mill con geometria interna migliorata		[113]	
Setacciatore	Setacciatore a gravità	Installazione di un setacciatore a gravità		[99]	
Setacciatore	Setacciatore meccanico	Installazione di un setacciatore meccanico		[99]	
Setacciatore	Setacciatore sottovuoto	Installazione di un setacciatore sottovuoto		[99]	
Classificatore ad aria	Classificatore ad aria	Installazione di un classificatore ad aria		[99]	

8.3.6 Miscelazione

Miscelazione

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Tumble blender	Twin-shell blender	Installazione di un twin-shell blender		[115]	
Tumble blender	Double-cone blender	Installazione di un double-cone blender		[115]	
Tumble blender	Horizontal rotary blender	Installazione di un horizontal rotary blender		[115]	
Tumble blender	Tote blender	Installazione di un tote blender		[115]	
Rotatin element blenders	Ribbon blender orizzontale	Installazione di un ribbon blender orizzontale		[115]	
Rotatin element blenders	Ribbon blender verticale	Installazione di un ribbon blender verticale		[115]	
Rotatin element blenders	Dispositivo Cleaning In Place	Installazione di un dispositivo per la Cleaning In Place		[115]	
Rotatin element blenders	Paddle blender	Installazione di un paddle blender		[115]	
Rotatin element blenders	Ploughshare blender	Installazione di un ploughshare blender		[115]	
Rotatin element blenders	Orbiting screw blender	Installazione di un orbiting screw blender		[115]	
Rotatin element blenders	Impact blender	Installazione di un impact blender		[116]	

Miscelazione					
Macchina	 Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Rotatin element blenders	Impact blender	Installazione di un impact blender a lame multiple		[116]	
Miscelatore pneumatico	Miscelatore pneumatico	Installazione di un miscelatore pneumatico		[99]	
Miscelatore	Miscelatore liquido-solido	Installazione di un miscelatore liquido-solido a letto fluido		[171]	
Miscelatore	Cinghia di trasmissione	Installazione di un accoppiamento diretto anziché trasmissione tramite cinghia		Dalle energetiche	diagnosi

8.3.7 Trattamenti sottovuoto

Sistemi per il sottovuoto					
Macchina	 Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Pompa sottovuoto	Pompa ad anello liquido	Installazione di una pompa ad anello liquido		[95]	Gli esperti riferiscono che questo intervento è utilizzato entro i liofilizzatori
Pompa sottovuoto	Pompa sottovuoto a secco	Installazione di una pompa sottovuoto a secco		[95]	
Pompa sottovuoto	Espulsore sottovuoto	Installazione di un espulsore sottovuoto		[99]	

8.3.8 Trattamento gas esausti

Trattamento gas di scarico					
Macchina	 Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Wet scrubber	Scrubber a letto fisso	Installazione di uno scrubber a letto fisso		[95]	
Wet scrubber	Scrubber a letto mobile	Installazione di uno scrubber a letto mobile		[95]	
Wet scrubber	Plate scrubber	Installazione di un plate scrubber		[95]	
Wet scrubber	Colonne di lavaggio (spray)	Installazione di colonne di lavaggio (spray)		[95]	
Wet scrubber	Venturi scrubber	Installazione di un Venturi scrubber		[95]	
Assorbitore	Assorbitore a letto fisso	Installazione di un assorbitore a letto fisso		[95]	
Assorbitore	Assorbitore a letto fluido	Installazione di un assorbitore a letto fluido		[95]	
Assorbitore	Assorbitore a letto continuo	Installazione di un assorbitore a letto continuo		[95]	
Assorbitore	Pressure swing adsorption	Installazione di un dispositivo per la pressure swing adsorption		[95]	
Dispositivo per l'eliminazione dei NOx	DeNOx	Installazione di un dispositivo DeNOx		[95]	
Dispositivo per l'eliminazione dei	Selective non catalytic reduction (SNCR)	Installazione di un dispositivo per la selective non catalytic		[99]	

Trattamento gas di scarico

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Nox		reduction (SNCR)			
Dispositivo per l'eliminazione dei NOx	Selective catalytic reduction (SCR)	Installazione di un dispositivo per la selective catalytic reduction (SCR)		[99]	
Separatore elettrostatico	Precipitatore elettrostatico	Installazione di un precipitatore elettrostatico		[99]	
Separatore elettrostatico	Sostituzione dei filtri a tasche con filtri elettrostatici attivi	Sostituzione dei filtri a tasche con filtri elettrostatici attivi		Dalle	diagnosi energetiche
Separatore meccanico	Sistema ciclonico	Installazione di un sistema ciclonico		[95]	
Separatore meccanico	Filtro a manica	Installazione di un filtro a manica		[95]	
Separatore meccanico	Filtro ceramici	Installazione di un filtro ceramici		[95]	
Separatore meccanico	Filtro HEPA	Installazione di un filtro HEPA		[95]	
Ossidatore	Ossidatore termico (inceneritori)	Installazione di un ossidatore termico		[99]	
Ossidatore	Sostituzione del combustore con elemento più efficiente	Sostituzione del combustore dell'ossidatore con un elemento più efficiente		Dalle	diagnosi energetiche
Ossidatore	Ossidatore catalitico	Installazione di un ossidatore catalitico		[99]	
Condensatore	Condensatore diretto	Installazione di un condensatore diretto		[99]	
Condensatore	Condensatore indiretto	Installazione di un condensatore indiretto		[99]	
Condensatore	Condensatore criogenico	Installazione di un condensatore criogenico		[95]	
Separatore a membrana	Separatore a membrana	Installazione di un separatore a membrana		[99]	
Tubature di sistemi trattamento gas e sausti	Tubature	Sostituire o installare guarnizioni lungo le tubature per evitare trafilamenti		[95]	

8.3.9 Trattamento acque esauste

Trattamento acque

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Dispositivo precipitazione	per la Precipitatore chimico	Installazione di un precipitatore chimico		[99]	
Dispositivo precipitazione	per la Cristallizzatore	Installazione di un cristallizzatore		[99]	
Dispositivo sedimentazione	per la Sedimentatore per gravità	Installazione di un sedimentatore per gravità		[99]	
Dispositivo sedimentazione	per la Sedimentatore chimico	Installazione di un sedimentatore chimico		[99]	
[99]Air floater	[99]Air floater	[99]Installazione di un air floater		[99]	

Trattamento acque					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Filtro	Filtro granulare	Installazione di un filtro granulare		[99]	
Filtro	Filtro a tamburo	Installazione di un filtro a tamburo		[99]	
Filtro	Filtro a tamburo sottovuoto	Installazione di un filtro a tamburo sottovuoto		[99]	
Filtro	Membrane	Installazione di membrane semipermeabili		[99]	
Separatore liquido-liquido	Separatore liquido-liquido	Installazione di un separatore liquido-liquido (vedi sopra)			
Distillatore	Distillatore	Installazione di un distillatore (vedi sopra)			
Evaporatore	Evaporatore	Installazione di un evaporatore (vedi sopra)			
Ossidatore	Dispositivo per l'ossidazione chimica	Installazione di un dispositivo per l'ossidazione chimica		[99]	
Ossidatore	Inceneritore	Installazione di un inceneritore		[99]	
Stripper	Dispositivo per lo stripping	Installazione di un dispositivo per lo stripping		[99]	
Dispositivo coagulazione	per la Coagulatore termico	Installazione di un dispositivo per la coagulazione chimica		[117]	
Dispositivo coagulazione	per la Elettrocoagulatore	Installazione di un dispositivo per l'elettrocoagulazione		[117]	
Depuratore	Depuratore	Installazione di un depuratore anaerobico-aerobico		Dalle energetiche	diagnosi
Depuratore	Soffianti	Sostituzione delle soffianti (del depuratore) con elementi ad alta efficienza		Dalle energetiche	diagnosi
Essiccatore	Essiccatore fanghi	Installazione di essiccatori per i fanghi da smaltire usando calore recuperato		Dalle energetiche	diagnosi

8.3.10 Cristallizzazione

Cristallizzazione					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Cristallizzatore	Cristallizzatore a matrice nanocellulare	Installazione di un cristallizzatore a matrice nanocellulare		[118]	
Cristallizzatore	Cristallizzatore ad ultrasuoni	Installazione di un cristallizzatore ad ultrasuoni		[119]	
Cristallizzatore	Cristallizzatore in continuo	Installazione di un cristallizzatore in continuo Mixed Suspension Mixed Product Removal		[120]	
Cristallizzatore	Cristallizzatore in continuo	Installazione di un cristallizzatore in continuo Near Plug Flow		[120]	

8.3.11 Trasporto e stoccaggio

Trasporti					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni

Trasporti

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Tubature	Tubature per gravità	Installazione di tubature per gravità		[95]	
Tubature	Sistemi di pigging	Installazione di un sistema di pigging		[95]	
Contenitore di trasporto	Refrigerazione tramite modulo di Peltier	Utilizzo di contenitori dotati di un modulo di Peltier alimentato da un pannello fotovoltaico		[121]	
Agitatore	Agitatore per fanghi	Facilitare il trasporto di fanghi installando un sistema che li agiti		Dalle energetiche	diagnosi

8.3.12 Sterilizzazione

Sterilizzazione

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Sterilizzatore	Depirogenatore	Installazione di un dispositivo per la depirogenazione		[122]	
Sterilizzatore	Autoclave	Installazione di uno sterilizzatore ad autoclave		[122]	
Sterilizzatore	Sterilizzatore a gas	Installazione di uno sterilizzatore ad esposizione (a ossido di etilene gassoso)		[122]	
Sterilizzatore	Sterilizzatore chimico a gas	Installazione di uno sterilizzatore ad aumento della temperatura in presenza di agenti battericidi		[122]	
Sterilizzatore	Sterilizzatore ad irradiazione ad elettroni	Installazione di uno sterilizzatore ad irradiazione ad elettroni		[122]	
Sterilizzatore	Sterilizzatore a radiazioni gamma	Installazione di uno sterilizzatore a radiazioni gamma		[122]	
Sterilizzatore	Sterilizzatore a luce ultravioletta	Installazione di uno sterilizzatore a luce ultravioletta		[122]	
Sterilizzatore	Sterilizzatore a luce pulsata ad alta intensità	Installazione di uno sterilizzatore a luce pulsata ad alta intensità		[122]	
Sterilizzatore	Sterilizzatore a filtrazione con membrana	Installazione di uno sterilizzatore per filtrazione con membrana		[122]	

8.3.13 Incremento efficienza impianto e servizi ausiliari

Incremento efficienza sistemi di supporto

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Gruppo frigo	Gruppi frigo	Sostituzione di un chiller con un elemento più efficiente		Dalle energetiche	diagnosi
Gruppo frigo	Gruppi frigo	Installazione di un chiller con temperature apposite ad uno specifico circuito		Dalle energetiche	diagnosi

Incremento efficienza sistemi di supporto						
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni	
Gruppo frigo	Serbatoio di accumulo	Installazione di un serbatoio di accumulo acqua in uscita, separato da quello in ingresso al chiller		<i>energetiche</i> Dalle <i>energetiche</i>	<i>diagnosi</i>	
Gruppo frigo	Gruppi frigo	Sostituzione di un refrigeratore a glicole con uno ad ammoniaca		Dalle <i>energetiche</i>	<i>diagnosi</i>	
Gruppo frigo	Impianto idronico	Sostituzione impianto idronico con impianto espansione diretta		Dalle <i>energetiche</i>	<i>diagnosi</i>	
Gruppo frigo	Condensatore	Installazione di un sistema di condensazione flottante		Dalle <i>energetiche</i>	<i>diagnosi</i>	
Gruppo frigo	Inverter	Installazione di chiller dotati di inverter		Dalle <i>energetiche</i>	<i>diagnosi</i>	
Gruppo frigo	Gruppi frigo	Sostituzione raffreddamento ad aria del chiller con raffreddamento ad acqua				Gli esperti riferiscono che questo intervento risulta già superato in molti impianti
Gruppo frigo	Gruppi frigo	Installazione di un gruppo frigo di taglia ridotta per i periodi di domanda inferiore		Dalle <i>energetiche</i>	<i>diagnosi</i>	Gli esperti riferiscono che questo intervento è molto utilizzato vista la modularità
Gruppo frigo	Gruppi frigo	Installazione di inverter sui motori elettrici				Gli esperti riferiscono la convenienza nel considerare questo intervento in occasione di un rinnovo o di
Motore elettrico	Inverter				[172]	

Incremento efficienza sistemi di supporto

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
					sostituzioni pianificate
		Sostituzione dei motori elettrici con elementi più efficienti			Gli esperti riferiscono la convenienza nel considerare questo intervento in occasione di un rinnovo o di sostituzioni pianificate
Motore elettrico	Motore elettrico			[158]	
Generatore di vapore	Generatore di vapore	Sostituzione del generatore di vapore con un elemento più efficiente		Dalle energetiche	diagnosi
Generatore di vapore	Caldaia	Sostituzione di una caldaia ad olio diatermico con una a tubi di fumo		Dalle energetiche	diagnosi
Generatore di vapore	Caldaia	Installazione di una caldaia ad olio diatermico		Dalle energetiche	diagnosi
Generatore di vapore	Caldaia	Sostituzione della caldaia con un elemento più efficiente		Dalle energetiche	diagnosi
Generatore di vapore	Brucciatori	Sostituzione dei bruciatori della caldaia con un elemento più efficiente		Dalle energetiche	diagnosi
Pompa	Inverter	Installazione di pompe con inverter		Dalle energetiche	diagnosi
Pompa	Pompa	Sostituzione delle pompe con elementi ad alta efficienza		Dalle energetiche	diagnosi
Pompa	Pompa	Installazione di pompe automodulanti		Dalle energetiche	diagnosi
Compressore	Compressore	Sostituzione di un compressore con uno più efficiente		Dalle energetiche	diagnosi Gli esperti riferiscono la

Incremento efficienza sistemi di supporto						
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni	
					convenienza nel considerare questo intervento in occasione di un rinnovo o di sostituzioni pianificate	
Compressore	Compressore a vite con inverter	Installazione di un compressore a vite con inverter			Dalle diagnosi energetiche	
Compressore	Compressore a vite	Installazione di un compressore a vite			Dalle diagnosi energetiche	
Compressore	Inverter	Sostituzione di un compressore con uno dotato di inverter			Dalle diagnosi energetiche	
Compressore	Valvole	Installazione di valvole nel circuito aria compressa per chiudere ogni volta le sezioni non usate			Dalle diagnosi energetiche	
Compressore	Compressore bistadio	Sostituzione di un compressore fisso con un elemento bistadio			Dalle diagnosi energetiche	
Compressore	Compressore a palette e inverter	Sostituzione di un compressore a vite con uno a palette e inverter			Dalle diagnosi energetiche	
Coibentazione	Coibentazione tubature	Coibentazione delle tubature con fluidi termovetтори			Dalle diagnosi energetiche	
Coibentazione	Coibentazione valvole	Coibentazione delle valvole interagenti su fluidi termovetтори			Dalle diagnosi energetiche	
Power quality	Quadri elettrici	Installazione di un quadro elettrico per la riduzione delle armoniche			Dalle diagnosi energetiche	
Power quality	Quadri elettrici	Installazione di quadri di rifasamento			Dalle diagnosi energetiche	
Power quality	Filtro passivo	Installazione di un filtro passivo per la riduzione delle armoniche			Dalle diagnosi energetiche	
Power quality	Stabilizzatore di tensione	Installazione di uno stabilizzatore di tensione			Dalle diagnosi energetiche	
Power quality	Trasformatore	Sostituzione del trasformatore con un elemento più efficiente			Dalle diagnosi energetiche	

Incremento efficienza sistemi di supporto

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
		Sostituzione di elementi di condizionamento con alcuni dotati di inverter			Gli esperti riferiscono la convenienza nel considerare e questo intervento in occasione di un rinnovo o di sostituzioni pianificate
Unità Trattamento Aria (UTA)	Inverter			Dalle energetiche	diagnosi
UTA	Cinghie	Installazione di cinghie ad alta efficienza sui ventilatori		Dalle energetiche	diagnosi
UTA	Recuperatore di calore	Installazione di UTA con recupero calore termodinamico attivo		Dalle energetiche	diagnosi
UTA	Batteria di raffreddamento	Sostituzione di una batteria a vapore con una batteria ad acqua		Dalle energetiche	diagnosi
		Sostituzione delle UTA con elementi più efficienti			Gli esperti riferiscono la convenienza nel considerare e questo intervento in occasione di un rinnovo o di sostituzioni pianificate
UTA	UTA			Dalle energetiche	diagnosi

Incremento efficienza sistemi di supporto					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
UTA	Pompa calore	Installazione di una pompa calore acqua - acqua tra i circuiti acqua fredda e acqua calda		[160]	

Produzione di energia					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Bassine	Bassine	Sostituzione dei riscaldatori ceramici con elementi più efficienti		Dalle diagnosi energetiche	
Ossigenatore acque	Diffusori	Sostituzione dei diffusori per ottenere bolle più piccole		Dalle diagnosi energetiche	

8.3.14 Recupero energetico

Recupero energetico					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Cogeneratore	Scambiatori di calore	Installazione di un impianto di assorbimento del calore dei condensatori		Dalle diagnosi energetiche	
Cogeneratore	Scambiatori di calore	Installazione di un impianto di assorbimento del calore recuperabile dal cogeneratore Installazione di un economizzatore sul generatore di vapore		Dalle diagnosi energetiche	
Generatori vapore	di Economizzatore			Dalle diagnosi energetiche	Gli esperti riferiscono la convenienza nel considerare questo intervento in occasione di un rinnovo o di sostituzioni pianificate.
Caldaia	Scambiatori di calore	Installazione di uno scambiatore di calore fumi-acqua in ingresso caldaia/inceneritore		Dalle diagnosi energetiche	
Compressori	Scambiatori di calore	Installazione recuperatore di calore nel circuito di raffreddamento dei compressori		Dalle diagnosi energetiche	
Turbina	Turbina	Sostituzione della turbina alimentata col calore recuperato con un elemento correttamente dimensionato		Dalle diagnosi energetiche	
Scambiatori	di Scambiatori di calore	Installazione recuperatori di calore nei sistemi di dissipazione		Dalle diagnosi energetiche	

Recupero energetico

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
calore				<i>energetiche</i>	
UTA	Scambiatori di calore	Installazione di recuperatore di calore dai sistemi d'areazione		[157]	
Caldaia	Post-combustore	Installazione di un post-combustore in caldaia Installare sistemi per il preriscaldamento dell'acqua in ingresso al generatore di vapore usando acqua di scarto		[160]	
Generatori vapore	di Recupero termico e preriscaldamento			<i>Dalle energetiche</i>	<i>diagnosi</i> Gli esperti riferiscono la convenienza nel considerare questo intervento in occasione di un rinnovo o di sostituzioni pianificate.
Scambiatori calore	di Coibentazione	Installazione di camicia di coibentazione sugli scambiatori di calore		<i>Dalle energetiche</i>	<i>diagnosi</i>
Cogenerazione	Flash solventi	Installare sistemi per usare il calore in eccesso del cogeneratore in estate per fare il flash dei solventi		<i>Dalle energetiche</i>	<i>diagnosi</i>
Turbina	Turbina	Installazione di una turbina che sfrutti un salto di pressione tra caldaia e circuito		<i>Dalle energetiche</i>	<i>diagnosi</i>

8.3.15 Produzione di energia tramite impianto solare

Produzione di energia

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Cogeneratore	Cogeneratore	Installazione di un cogeneratore (MCI + recupero calore)		<i>Dalle diagnosi energetiche</i>	Gli esperti riferiscono che questo intervento risulta superato in molte aziende
Cogeneratore	Cogeneratore	Potenziamento del sistema di cogenerazione		<i>Dalle diagnosi energetiche</i>	
Trigeneratore	Trigeneratore	Installazione di un impianto di trigenerazione		<i>Dalle diagnosi energetiche</i>	
Trigeneratore	Trigeneratore	Sostituzione di una turbina a vapore con un impianto di trigenerazione		<i>Dalle diagnosi energetiche</i>	
Solare	Fotovoltaico	Installazione di un impianto fotovoltaico		<i>Dalle diagnosi energetiche</i>	Gli esperti riferiscono che questo intervento

Produzione di energia

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Solare	Solare	Installazione di un impianto solare termico per la produzione diretta di vapore		[159]	non può applicato in mancanza di sp

8.4 Impianti di produzione di farmaci

8.4.1 Produzione di compresse – Miscelazione

Miscelazione

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Tumble blender	Twin-shell blender	Installazione di un twin-shell blender		[1]	
Tumble blender	Double-cone blender	Installazione di un double-cone blender		[1]	
Tumble blender	Horizontal rotary blender	Installazione di un horizontal rotary blender		[1]	
Tumble blender	Tote blender	Installazione di un tote blender		[1]	
Rotatin element blenders	Ribbon blender orizzontale	Installazione di un ribbon blender orizzontale		[1]	
Rotatin element blenders	Ribbon blender verticale	Installazione di un ribbon blender verticale		[1]	
Rotatin element blenders	Dispositivo Cleaning In Place	Installazione di un dispositivo per la Cleaning In Place		[1]	
Rotatin element blenders	Paddle blender	Installazione di un paddle blender		[1]	
Rotatin element blenders	Ploughshare blender	Installazione di un ploughshare blender		[1]	
Rotatin element blenders	Orbiting screw blender	Installazione di un orbiting screw blender		[1]	
Rotatin element blenders	Impact blender	Installazione di un impact blender		[2]	
Rotatin element blenders	Impact blender	Installazione di un impact blender a lame multiple		[2]	

8.4.2 Produzione di compresse – Granulazione

Wet Granulation

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
High shear granulations wet	High shear wet granulator verticale	Installazione di un macchinario per l'High shear wet granulations verticale		[6]	
High shear granulations wet	High shear wet granulator verticale orizzontale	Installazione di un macchinario per l'High shear wet granulations orizzontale		[6]	
High shear granulations wet	High shear wet granulator verticale single pot	Installazione di una soluzione "single pot" per la granulazione		[6]	
High shear granulations wet	High shear wet granulator verticale in continuo	Installazione di un macchinario per l'High shear wet granulations per il processamento in continuo		[6]	

Low Shear Wet Granulation	Ribbon blender	Installazione di un ribbon blender	[7]
Low Shear Wet Granulation	Topo-granulator	Installazione di un topo-granulator	[7]
Low Shear Wet Granulation	Planetary mixer	Installazione di un planetary mixer	[6]
Low Shear Wet Granulation	Miscelatore a vite	Installazione di uno miscelatore a vite	[6]
Low Shear Wet Granulation	Miscelatore a lame sigma	Installazione di un miscelatore a lame sigma	[7]
Low Shear Wet Granulation	Granulatore rotating shape	Installazione di un granulatore "rotating shape"	[7]
Low Shear Wet Granulation	Granulatore rotating shape	Installazione di un granulatore "rotating shape" in modalità single pot	[7]
Fluid bed granulation	Fluid bed granulator	Installazione di un granulatore a letto fluido	[5] [8]
Fluid bed granulation	Fluid bed granulator Wurser	Installazione di un granulatore Wurser	[6]
Fluid bed granulation	Fluid bed granulator continuo	Installazione di un granulatore FBG continuo	[6]
Extrusion-Spheronization	Estrusore assiale	Installazione di un estrusore assiale ad 1 vite	[7]
Extrusion-Spheronization	Estrusore assiale	Installazione di un estrusore assiale a 2 viti	[7]
Extrusion-Spheronization	Estrusore radiale	Installazione di un estrusore radiale ad 1 vite	[7]
Extrusion-Spheronization	Estrusore radiale	Installazione di un estrusore radiale a 2 viti	[7]
Extrusion-Spheronization	Estrusore a gravità	Installazione di un estrusore a gravità a cilindri	[7]
Extrusion-Spheronization	Estrusore a gravità	Installazione di un estrusore a gravità a ruote dentate	[7]
Extrusion-Spheronization	Estrusore a gravità	Installazione di un estrusore a gravità radiale	[7]
Extrusion-Spheronization	Estrusore a pistone	Installazione di un estrusore a pistone	[7]
Extrusion-Spheronization	Sferonizzatore a lotti	Installazione di uno sferonizzatore a lotti	[7]
Extrusion-Spheronization	Sferonizzatore in continuo	Installazione di un sferonizzatore in continuo	[7]
Twin screw granulation	Granulatore a viti gemelle	Installazione di un granulatore a viti gemelle	[9]
Steam granulation	Fluid bed granulator a vapore	Installazione di un granulatore a letto fluido con vapore	[11] [12] [13]
Melt granulation	High shear wet granulator jacketed	Installazione di un macchinario per l'High shear wet granulations con pareti riscaldabili	[6] [3]
Moisture Activated Dry Granulation	High shear wet granulator per la Moisture Activated Dry Granulation	Installazione di un macchinario per l'High shear wet granulations adibito al Moisture Activated Dry Granulation	[6] [3] [14]
Moisture Activated Dry Granulation	High shear wet granulator per la Moisture Activated Dry Granulation	Installazione di un macchinario per la Low Shear Wet Granulation adibito al	[6] [3]

ACCORDO DI PROGRAMMA MISE (OGGI MITE)-ENEA

Granulation	Activated Dry Granulation	Moisture Activated Dry Granulation	[14]
Thermal Adhesion Granulation Process	Thermal Adhesion Granulation Process	Installazione di un macchinario per svolgere il Thermal Adhesion Granulation Process	[11] [12]
Foam granulation	Fluid bed granulator a schiuma	Installazione di un granulatore a letto fluido con schiuma	[11] [12]
Foam granulation	High shear wet granulator a schiuma	Installazione di un macchinario per l'High shear wet granulations con schiuma	[11] [12]
Foam granulation	High shear wet granulator a schiuma	Installazione di un macchinario per la Low Shear Wet Granulation con schiuma	[11] [12]
Freeze granulation	Vasca ad azoto liquido	Installazione di una vasca per bagno in azoto liquido ed una camera di condensazione	[12] [13]

8.4.3 Produzione di compresse – Macinazione e macinazione a secco

Macinazione					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Dispositivo per il dry milling	Mulino a martelli	Installazione di un mulino a martelli		[113]	
Dispositivo per il dry milling	Pin mill	Installazione di una pin mill		[114]	
Dispositivo per il dry milling	Spiral jet mill	Installazione di una spiral jet mill		[114]	
Dispositivo per il dry milling	Loop jet mill	Installazione di una loop jet mill		[114]	
Dispositivo per il dry milling	Fluid bed air jet mill	Installazione di una air jet mill a letto fluido		[114]	
Dispositivo per il wet milling	Sistema rotore-statore	Installazione di un macinatore con statore e rotori dentati		[113]	
Dispositivo per il wet milling	Media mill	Installazione di una media mill		[113]	
Dispositivo per il wet milling	Media mill	Installazione di una media mill con geometria interna migliorata		[113]	

Dry Granulation					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Dispositivo per lo slugging	Pressa	Installazione di una pressa (4-6 ton.)		[7]	
Roll compaction granulation dry	Roll compaction dry granulator a rulli fissi	Installazione di una pressa roll compaction dry granulator a rulli fissi		[138]	
Roll compaction granulation dry	Roll compaction dry granulator a rulli mobili	Installazione di una pressa roll compaction dry granulator a rulli mobili		[138]	
Roll compaction granulation dry	Roll compaction dry granulator a rulli concavi	Installazione di una pressa roll compaction dry granulator a rulli concavi		[138]	
Roll compaction granulation dry	Roll compaction dry granulator a rulli a tasche	Installazione di una pressa roll compaction dry granulator a rulli a tasche		[138]	
Roll compaction granulation dry	Roll compaction dry granulator pneumatic dry	Installazione di un macchinario per la Pneumatic dry granulation		[138]	

8.4.4 Produzione di compresse – Asciugatura

Essiccatura					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Fluid bed dryer	Essiccatore a lotti	Installazione di un essiccatore a lotti		[103]	
Fluid bed dryer	Essiccatore semicontinuo	Installazione di un essiccatore semicontinuo		[103]	
Fluid bed dryer	Essiccatore in continuo	Installazione di un essiccatore in continuo		[103]	
Fluid bed dryer	Essiccatore Plug Flow	Installazione di un essiccatore Plug flow		[103]	
Fluid bed dryer	Granulatore single pot	Installazione di un dispositivo di granulazione "single pot"		[107]	
Vacuum dryer	Miscelatore sottovuoto jacketed	Installazione di un miscelatore sottovuoto con pareti riscaldabili		[103]	
Vacuum dryer	Miscelatore sottovuoto con microonde	Installazione di un miscelatore sottovuoto con dispositivo microonde		[102]	
Vacuum dryer	Miscelatore sottovuoto con fonte mista	Installazione di un miscelatore sottovuoto con fonte di calore mista		[103]	
Vacuum dryer	Miscelatore sottovuoto gas assiste d	Installazione di un sistema di asciugatura sottovuoto gas-assiste d		[103]	
Spray drier	Spray drier	Installazione di uno spry dryer a ciclo aperto		[105]	
Spray drier	Spray drier	Installazione di uno spry dryer a ciclo chiuso		[105]	
Spray drier	Spray drier	Installazione di uno spry dryer a ciclo semichiuso		[105]	
Essiccatore	Essiccatore a nastro	Installazione di un essiccatore a nastro		[103]	
Essiccatore	Essiccatore a ciclone	Installazione di un essiccatore a ciclone		[103]	
Essiccatore	Essiccatore spin-flash	Installazione di un essiccatore spin-flash		[103]	
Essiccatore	Essiccatore a letto vibrante	Installazione di un essiccatore a letto vibrante		[103]	
Essiccatore	Essiccatore a cadute di pressione	Installazione di un essiccatore a cadute di pressione		[106]	
Essiccatore con ciclo frigorifero ad adsorbimento	Essiccatore alimentato ad adsorbimento di calore dissipato	Sostituzione dell'essiccatore alimentato ad energia elettrica con un elemento alimentato ad adsorbimento (recupero termico sala compressori)			Dalle diagnosi energetiche
Essiccatore	Deumidificatore	Installazione di un deumidificatore per l'aria in ingresso all'essiccatore			Dalle diagnosi energetiche

8.4.5 Produzione di compresse – Compressione e compressione diretta

Compression					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Pressa per la compressione	Pressa	Installazione di una pressa con alle stimento B		[122]	
Pressa per la compressione	Pressa	Installazione di una pressa con alle stimento D		[122]	
Pressa per la compressione	Tablet de duster	Installazione di un tablet de duster		[140]	

Compression					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Pressa per la compressione	Metal detector	Installazione di un metal detector		[140]	
Pressa per la compressione	Sistema di pesatura	Installazione di un sistema di controllo del peso delle compresse		[140]	

Direct Compression					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Pressa direct compression	Pressa	Installazione di una pressa (produzione a lotti)		[141]	
Pressa direct compression	Pressa a dischi rotanti	Installazione di una pressa su disco forato rotante (produzione in continuo)		[141]	

8.4.6 Produzione di compresse – Copertura

Coating					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Sugar coater	Coater a zucchero	Installazione di un macchinario per il coating a zucchero		[122]	Questo processo è in disuso [122]
Film coater	Coater Pellegrini	Installazione di un macchinario dotato di un sistema Pellegrini		[142]	
Film coater	Coater con immersion sword	Installazione di un macchinario dotato di un sistema immersion-sword		[142]	
Film coater	Coater con immersione tube	Installazione di un macchinario dotato di un sistema immersion-tube		[142]	
Film coater	Accelacoata	Installazione di un Accelacoata		[142]	
Film coater	Driacoater	Installazione di un driacoater		[142]	
Film coater	Glatt coater	Installazione di un Glatt coater		[142]	
Film coater	FB coater	Installazione di un macchinario a letto fluido per il coating		[142]	
VFC	VFC	Installazione di un macchinario per il VFC		[144]	
Electrostatic coater	Coater elettrostatico	Installazione di un macchinario per il coating elettrostatico "corona charging"		[144]	
Electrostatic coater	Coater elettrostatico	Installazione di un macchinario per il coating elettrostatico "tribo charging"		[144]	
MAIC	MAIC	Installazione di un macchinario per il MAIC		[144]	
Compression coater	Pressa per il compression coater	Installazione di una pressa per il compression coating		[142]	
Dip coater	Dip coater	Installazione di un macchinario per il dip coating		[142]	

8.4.7 Miglioramento caratteristiche materiali

Miglioramento solubilità					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni

Miglioramento solubilità

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Dispositivo per l'elettrofilatura	Ugelli	Installazione di un macchinario per l'elettrofilatura con ugelli migliorati		[148]	
Dispositivo per l'elettrofilatura	Elettrofilatura a superficie libera	Installazione di un macchinario per l'elettrofilatura a superficie libera		[148]	
Dispositivo per l'elettrofilatura	Elettrofilatura di materiali fusi	Installazione di un macchinario per l'elettrofilatura di materiali fusi		[148]	
Dispositivo per l'elettrofilatura	Elettrofilatura a corrente alternata	Installazione di un macchinario per l'elettrofilatura a corrente alternata		[148]	

8.4.8 Additive manufacturing per le pasticche

Additive Manufacturing

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Stampante 3D	Stampante 3D a deposizione del legante	Installazione di una stampante 3D "binder deposition"		[150]	
Stampante 3D	Stampante 3D a material jetting	Installazione di una stampante 3D "material jetting"		[150]	
Stampante 3D	Stampante 3D ad estrusione	Installazione di una stampante 3D ad estrusione		[150]	
Stampante 3D	Stampante 3D a fotopolimerizzazione	Installazione di una stampante 3D a fotopolimerizzazione		[150]	
Stampante 3D	Stampante 3D a fusione del letto di polvere	Installazione di una stampante 3D "power bed fusion"		[150]	

8.4.9 Produzione di capsule

Produzione Capsule

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Dispositivo produzione capsule rigide	Stampi ad immersione	Installazione di un macchinario per l'immersione degli stampi nel bagno di gelatina riscaldata			[27]
Dispositivo riempimento capsule rigide	Macchinari a "metodo Zanasi"	Installazione di un macchinario per il riempimento a "metodo Zanasi"			[27]
Dispositivo riempimento capsule rigide	Macchinari a "metodo Zanasi"	Installazione di un macchinario per il riempimento a "metodo Zanasi" a dischi rotanti per il processamento in continuo			[27]
Dispositivo riempimento capsule rigide	Macchinari GKF	Installazione di un macchinario GKF per il riempimento			[27]
Macchinario per la produzione di capsule morbide	Estrusore a rulli	Installazione di un estrusore a rulli con dispositivo per l'iniezione del liquido medicinale			[27]

8.4.10 Produzione medicinali liquidi

Processamento chimico-fisico per produzione farmaci liquidi

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Reattore a lotti	Reattore a serbatoio agitato	Installazione di un reattore a serbatoio agitato		[95]	
Reattore a lotti	Reattore a serbatoio agitato con deflettori	Installazione di un reattore a serbatoio agitato con deflettori (miglioramento)		[99]	

Processamento chimico-fisico per produzione farmaci liquidi						
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni	
		efficienza mescolamento)				
Reattore a lotti	Reattore a serbatoio agitato con pale multiple	Installazione di un reattore a serbatoio agitato con pale multiple (miglioramento efficienza mescolamento)		[99]		
Reattore a lotti	Reattore a serbatoio agitato a flusso termico continuo	Installazione di un reattore a serbatoio agitato a flusso termico continuo		[95]		
Reattore a lotti	Reattore ad anello	Installazione di un reattore ad anello		[97]		
Reattore a lotti	Colonna a bolle	Installazione di un reattore a colonna		[98]		
Reattore a lotti	Pipe reactor	Installazione di un pipe reactor		[95]		
Reattore a lotti	Reattore tubolare	Installazione di un reattore tubolare		[95]		
Reattore a lotti	Reattore a letto fisso con tubi multipli	Installazione di un reattore a letto fisso con tubi multipli		[99]		
Reattore a lotti	Incline d rotating fixed bed reactor (IRFBR)	Installazione di un IRFBR		[100]		
Reattore a lotti	Reattore supercritico a CO2	Installazione di un reattore supercritico a CO2		[95]		
Reattore in continuo	Miscelatori statici	Installazione di un miscelatore statici		[95]		
Reattore in continuo	Reattori a disco rotante	Installazione di un reattore a disco rotante		[101]		
Reattore in continuo	Reattori a flusso oscillante	Installazione di un reattore a flusso oscillante		[95]		
Reattore	Dispositivo per la fotocatalisi	Installazione di un reattore con tubazioni trasparenti per il passaggio di luce e consentire la fotocatalisi		[96]		
Reattore	Dispositivo per la sonicazione	Installazione di un reattore con dispositivi per la sonicazione usata per la precipitazione dei solidi		[96]		
Reattore	Dispositivo microonde	Installazione di un dispositivo per la Microwave assisted organic synthesis (MAOS)		[95]		
Dispositivi per la dissoluzione	Omogeneizzatore	Installazione di un omogeneizzatore		[96]		
Dispositivi per la dissoluzione	Miscelatore	Installazione di un dispositivo di miscelazione (vedi sopra)		[96]		

8.4.11 Trasporto e stoccaggio

Sistemi di trasporto e stoccaggio						
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni	
Contenitore di trasporto	Refrigerazione tramite modulo di Peltier	Utilizzo di contenitori dotati di un modulo di Peltier alimentato da un pannello fotovoltaico		[121]		
Veicoli movimentazione materiali	Caricabatterie di movimentazione materiali	Sostituzione dei caricabatterie dei muletti con elementi adattivi alle condizioni di carica		Dalle diagnosi energetiche	Gli esperti riferiscono	

Sistemi di trasporto e stoccaggio

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
					o che questo intervento o risulta interessante e da approfondire mediante casi studio in aziende italiane per valutarne in modo più accurato i benefici energetici ottenibili

8.4.12 Produzione di creme

Produzione emulsioni

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Miscelatore	Colloid mill	Installazione di una colloid mill		[122]	
Miscelatore	Omogeneizzatore	Installazione di un omogeneizzatore		[122]	
Miscelatore	Miscelatore ad ultrasuoni	Installazione di un miscelatore ad ultrasuoni		[122]	
Miscelatore	Hot melt extruder	Installazione di un hot melt extruder		[153]	

8.4.13 Produzione di *wound dressing* – medicazioni in fibre

Produzione materiali in fibre polimeriche

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Filatore di fibre	Melt spinner	Installazione di un dispositivo per il melt spinning		[155]	

Produzione materiali in fibre polimeriche					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Filatore di fibre	Wet/gel spinner	Installazione di un dispositivo per il wet/gel spinning		[155]	
Filatore di fibre	Dry-jet wet spinner	Installazione di un dispositivo per il dry-jetwet spinning		[155]	
Filatore di fibre	Elettrofilatore	Installazione di un dispositivo per l'elettrofilatura		[155]	
Vasca per la produzione di membrane	Vasca per immersione di soluzioni polimeriche	Installazione di una vasca di coagulante per l'immersione di una soluzione polimerica		[156]	
Vasca per la produzione di membrane	Vasca per immersione di soluzioni polimeriche pre-evaporate	Installazione di una vasca di coagulante per l'immersione di una soluzione polimerica pre-evaporata		[156]	
Vasca per la produzione di membrane	Coagulazione della soluzione polimerica tramite CO2 supercritico	Installazione di un dispositivo che adotta CO2 in condizioni supercritiche		[156]	
Filatore di fibre per membrane	Elettrofilatore	Elettrofilatura 3D		[156]	

8.4.14 Produzione di wound dressing – medicazioni in tessuti

Produzione tessuti					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Telaio per maglie	Telaio per il warp knitting	Installazione di un dispositivo per il warp knitting		[155]	
Telaio per maglie	Telaio per il werf knitting	Installazione di un dispositivo per il werf knitting		[155]	
Telaio per tessuti	Telaio per tessuti	Installazione di un telaio		[155]	
Dispositivo per produrre TNT	Melt blower	Installazione di un dispositivo per il melt blowing		[155]	
Dispositivo per produrre TNT	Solution blower	Installazione di un dispositivo per il solution blowing		[155]	
Dispositivo per produrre TNT	Needle puncher	Installazione di un dispositivo per il needle punching		[155]	
Dispositivo per produrre TNT	Elettrofilatore ad immersione	Installazione di un dispositivo per l'immersion elettrospinning		[155]	
Dispositivo per produrre TNT	Air layer	Installazione di un dispositivo per l'air laying		[155]	
Dispositivo per produrre TNT	Dispositivo per il thermal bonding	Installazione di un dispositivo per il thermal bonding		[155]	
Dispositivo per produrre TNT	Coater ad immersione	Installazione di un dispositivo per il coating ad immersione		[155]	

8.4.15 Produzione di wound dressing – aggiunta delle sostanze medicinali

Aggiunta medicinali					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni

Coater	Coater a dispersione	Installazione di un dispositivo per il coating a dispersione	[15 5]
Coater	Coater a deposizione elettrochimica	Installazione di un dispositivo per il coating a deposizione elettrochimica	[15 5]
Dispositivo al plasma	Dispositivo al plasma per la bioconiugazione	Installazione di un dispositivo per il pretrattamento al plasma per la bioconiugazione	[15 5]
Reattore per trattamento chimico	Reattore per trattamento chimico per la bioconiugazione	Installazione di un dispositivo per il pretrattamento chimico per la bioconiugazione	[15 5]
Reattore per trattamento chimico	Reattore per trattamento chimico per la formazione di composti d'inclusione	Installazione di un dispositivo per il pretrattamento chimico per la formazione di un composto d'inclusione	[15 5]
Dispositivo a cariche elettriche	Dispositivo a cariche elettriche per la formazione di composti ionici	Installazione di un dispositivo per la formazione di composti ionici	[15 5]
Impregnante a CO ₂	Impregnante a CO ₂	Installazione di un dispositivo per svolgere la supercritical CO ₂ impregnation	[15 5]

8.4.16 Produzione di wound dressing – sterilizzazione

Sterilizzazione						
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni	
Sterilizzatore	Depirogenatore	Installazione di un dispositivo per la depirogenazione		[122]	Gli esperti riferiscono che tale intervento coinvolge anche l'uso di Tunnel di Depirogenazione, l'uso di Forni statici per sterilizzare i flaconi vuoti, l'uso di Autoclave per sterilizzare parti di equipment e tappi, oppure anche l'uso di Autoclavi modificate per il ciclo di pastorizzazione e albumina e	

Sterilizzazione					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Sterilizzatore	Autoclave	Installazione di uno sterilizzatore ad autoclave		[122]	inattivazione virale dei fattori di coagulazione.
Sterilizzatore	Sterilizzatore a gas	Installazione di uno sterilizzatore ad esposizione (a ossido di etilene gassoso)		[122]	
Sterilizzatore	Sterilizzatore chimico a gas	Installazione di uno sterilizzatore ad aumento della temperatura in presenza di agenti battericidi		[122]	
Sterilizzatore	Sterilizzatore ad irradiazione ad elettroni	Installazione di uno sterilizzatore ad irradiazione ad elettroni		[122]	
Sterilizzatore	Sterilizzatore a radiazioni gamma	Installazione di uno sterilizzatore a radiazioni gamma		[122]	
Sterilizzatore	Sterilizzatore a luce ultravioletta	Installazione di uno sterilizzatore a luce ultravioletta		[122]	
Sterilizzatore	Sterilizzatore a luce pulsata ad alta intensità	Installazione di uno sterilizzatore a luce pulsata ad alta intensità		[122]	
Sterilizzatore	Sterilizzatore a filtrazione con membrana	Installazione di uno sterilizzatore per filtrazione con membrana		[122]	
Sterilizzatore	Sterilizzatore ad ozono	Installazione di uno sterilizzatore ad ozono		Dalle energetiche	diagnosi
Sterilizzatore	Sistema di supporto	Installazione di sistemi per il preriscaldamento dell'acqua in ingresso al processo		Dalle energetiche	diagnosi

8.4.17 Incremento efficienza impianto e servizi ausiliari

Incremento efficienza sistemi di supporto					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
		Sostituzione del gruppo frigo con elemento più efficiente			
Gruppo frigo	Gruppo frigo			Dalle energetiche	diagnosi Gli esperti riferiscono che per questo intervento i risultati attesi sono buoni.
Gruppo frigo	Pre-cooler	Installazione di sistemi di pre-cooling sul chiller per la refrigerazione		Dalle energetiche	diagnosi Gli esperti riferiscono che questo intervento è di difficile

Incremento efficienza sistemi di supporto

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Gruppo frigo	Gruppo frigo ad assorbimento	Installazione di un gruppo frigo ad assorbimento usando acqua calda da raffreddare		Dalle diagnosi energetiche	intervento è di difficile implementazione pratica. Gli esperti riferiscono di prendere in considerazione e l'utilizzo da trigeneratore che ha buoni risultati attesi. Gli esperti riferiscono che questo intervento è molto utilizzato e ha buoni risultati attesi.
Gruppo frigo	Gruppo frigo centralizzato	Formazione di un sistema frigo centralizzato		Dalle diagnosi energetiche	Gli esperti riferiscono che questa tecnologia risulta ormai superata in molti impianti.
Torri di raffreddamento	Torri di raffreddamento	Sostituzione di torri di raffreddamento ad aria con raffreddamento ad acqua		Dalle diagnosi energetiche	Gli esperti riferiscono che questa tecnologia risulta ormai superata in molti impianti.
Gruppo frigo	Batterie di raffreddamento	Sostituzione dei pacchi batterie dei chiller		Dalle diagnosi energetiche	
Gruppo frigo	Gruppo frigo	Sostituzione del gruppo frigo con un elemento dotato di doppio inverter		Dalle diagnosi energetiche	
Gruppo frigo	Gruppo frigo	Installazione di un gruppo frigo per basse temperature di taglia ridotta		Dalle diagnosi energetiche	Gli esperti riferiscono che questo intervento è molto utilizzato vista la modularità.

Incremento efficienza sistemi di supporto

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Gruppo frigo	Torre evaporativa	Installazione di una torre evaporativa per il raffreddamento dei serbatoi Sostituzione motori elettrici con versioni di classi più efficienti		Dalle energetiche	diagnosi Gli esperti riferiscono la convenienza nel considerare questo intervento in occasione di un rinnovo o di sostituzioni pianificate. Gli esperti riferiscono che questo intervento è molto adattato negli interventi di rinnovamento e sostituzione.
Motori elettrici	Motori elettrici	Sostituzione dei motori elettrici con motori EC		[157]	
Motori elettrici	Motori elettrici			Dalle energetiche	diagnosi Gli esperti riferiscono che questo intervento è solitamente pianificato a medio termine.
Motori elettrici	Motori elettrici	Installazione di un inverter sui motori elettrici già presenti in impianto Sostituzione del generatore di vapore con elemento più efficiente		[158]	
Generatore di vapore	Generatore di vapore			Dalle energetiche	diagnosi
Generatore di vapore	Bruciatori	Sostituzione dei bruciatori del generatore di vapore con elementi più efficienti		Dalle energetiche	diagnosi
Generatore di vapore	Recuperatore di calore	Installazione di un recuperatore di calore dai fumi del generatore di vapore		Dalle energetiche	diagnosi Gli esperti riferiscono la convenienza nel considerare questo

Incremento efficienza sistemi di supporto

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Generatore di vapore	Generatore di vapore	Sostituzione del generatore di vapore con una caldaia a vaporizzazione istantanea		Dalle diagnosi energetiche	occasione di un rinnovo pianificato. Gli esperti riferiscono che questa tecnologia risulta ormai superata in molti impianti
Generatore di vapore	Ri-evaporatore	Installazione di un rievaporatore degasatore termico		Dalle diagnosi energetiche	
Generatore di vapore	Combustibile	Installazione di sistemi per la combustione del fango secco prodotta dall'impianto		Dalle diagnosi energetiche	
Generatore di vapore	Degasatore	Installazione di un degasatore nel circuito a vapore per il recupero del flash steam		Dalle diagnosi energetiche	Gli esperti riferiscono la convenienza nel considerare questo intervento in occasione di un rinnovo pianificato.
Generatore di vapore	Economizzatore	Installazione di un economizzatore sul generatore di vapore		Dalle diagnosi energetiche	Gli esperti riferiscono la convenienza nel considerare questo intervento in occasione di un rinnovo pianificato.
Generatore di vapore	Economizzatore	Sostituzione delle caldaie per il vapore con nuovi elementi dotati di economizzatore		Dalle diagnosi energetiche	Gli esperti riferiscono la convenienza nel considerare questo

Incremento efficienza sistemi di supporto						
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni	
Generatore di vapore	Preriscalda	Installazione di sistemi di preriscaldamento dell'acqua in ingresso tramite cascamì termici Sostituzione di una pompa con un elemento più efficiente		Dalle diagnosi energetiche		intervento in occasione di un rinnovo pianificato.
Pompa	Pompa	Sostituzione compressore con una più efficiente		Dalle diagnosi energetiche		Gli esperti riferiscono la convenienza nel considerare questo intervento in occasione di un rinnovo o di sostituzioni pianificate.
Compressore	Compressore	Sostituzione di un compressore con una a vite		Dalle diagnosi energetiche		Gli esperti riferiscono la convenienza nel considerare questo intervento in occasione di un rinnovo o di sostituzioni pianificate.
Compressore	Compressore a vite			Dalle diagnosi energetiche		Gli esperti riferiscono che questo intervento è molto adattato in impianti con NH ₃
Compressore	Compressore centrifuga	Installazione di compressori centrifughi		Dalle diagnosi energetiche		
Compressore	Compressore	Sostituzione di un compressore con uno dotato di inverter		Dalle diagnosi energetiche		Gli esperti riferiscono la

Incremento efficienza sistemi di supporto

Macchine	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
		Sostituzione di un compressore con uno dotato di inverter e di kit di recupero termico			convenienza nel considerare questo intervento in occasione di un rinnovo o di sostituzioni pianificate. Gli esperti riferiscono la convenienza nel considerare questo intervento in occasione di un rinnovo o di sostituzioni pianificate.
Compressore	Compressore			Dalle diagnosi energetiche	convenienza nel considerare questo intervento in occasione di un rinnovo o di sostituzioni pianificate.
Circuito aria compressa	Valvole di tenuta	Installazione di valvole di tenuta nel circuito aria compressa		Dalle diagnosi energetiche	
Circuito aria compressa	Recupero aria compressa	Installazione di sistemi per il recupero dell'aria compressa dai cilindri pneumatici		Dalle diagnosi energetiche	
Compressore	Compressore	Installazione di un compressore di piccola taglia per i momenti di richiesta ridotta		Dalle diagnosi energetiche	
Circuito aria sottovuoto	Circuito aria compressa	Collegare più strumenti al sistema centralizzato di sottovuoto		Dalle diagnosi energetiche	
Unità trattamento aria (UTA)	Cinghia di trasmissione	Sostituzione trasmissione multi-cinghia con mono-cinghia		Dalle diagnosi energetiche	
UTA	Cinghia di trasmissione	Sostituzione delle cinghie di trasmissione con elementi ad alto rendimento		Dalle diagnosi energetiche	
UTA	Filtri	Installazione filtri sulla presa d'aria esterna per la riduzione di perdite di carico		Dalle diagnosi energetiche	
UTA	Sistema di raffreddamento	Installazione sistema free cooling		Dalle diagnosi energetiche	Gli esperti riferiscono che questo intervento non è applicabile per

Incremento efficienza sistemi di supporto

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
UTA	Recuperatori di calore	Installazione recuperatori di calore sulle UTA		Dalle diagnosi energetiche	condizioni meteo medie. Gli esperti riferiscono che questo intervento è di possibile adozione.
UTA	Scambiatori di calore	Installazione di scambiatori a tubo di calore sulle batterie di raffreddamento delle UTA Sostituzione filtri a tasche con filtri elettrostatici attivi		Dalle diagnosi energetiche	Gli esperti riferiscono che questo intervento è di rara applicazione al momento, ma è interessante e vale la pena approfondirlo con studi pratici.
UTA	Filtri	Sostituzione dell'impianto UTA con uno più efficiente		Dalle diagnosi energetiche	Gli esperti riferiscono la convenienza nel considerare questo intervento in occasione di un rinnovo o di sostituzioni pianificate.
UTA	UTA	Sostituzione delle UTA con nuovi sistemi di recupero ed inverter		Dalle diagnosi energetiche	Gli esperti riferiscono la convenienza nel considerare questo intervento in

Incremento efficienza sistemi di supporto

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
					occasione di un rinnovo o di sostituzioni pianificate.
UTA	Filtri	Eliminazione del doppio stadio di filtrazione		Dalle diagnosi energetiche	
UTA	Recuperatori di calore	Installazione di sistemi di recupero run around loop		Dalle diagnosi energetiche	
UTA	UTA	Adozione di sistemi di ricircolo di aria in uscita		Dalle diagnosi energetiche	
		Sostituzione dei condizionatori con elementi più efficienti			Gli esperti riferiscono la convenienza nel considerare questo intervento in occasione di un rinnovo o di sostituzioni pianificate.
UTA	UTA			Dalle diagnosi energetiche	
UTA	Pompa calore	Installazione di una pompa calore acqua- acqua		[160]	
Gruppo di continuità	Gruppo di continuità	Sostituzione del gruppo di continuità con un elemento più efficiente		Dalle diagnosi energetiche	
Caibentazione	Caibentazione	Caibentazione dei serbatoi d'acqua		Dalle diagnosi energetiche	
Caibentazione	Caibentazione	Installazione di pellicole antisolari		Dalle diagnosi energetiche	
Caibentazione	Caibentazione	Caibentazione delle valvole sulle utenze ad alta temperatura		Dalle diagnosi energetiche	
Caibentazione	Caibentazione	Caibentazione dei sistemi di raccolta condense		Dalle diagnosi energetiche	
Tubature	Valvole	Installazione valvole di regolazione per i fluidi termovettori		Dalle diagnosi energetiche	
Tubature	Tubature	Installazione di sistemi a portata variabile		Dalle diagnosi energetiche	
Power quality	Filtro passivo	Installazione di attrezzature per la filtrazione passiva per il miglioramento della corrente elettrica		Dalle diagnosi energetiche	Gli esperti riferiscono che questo

Incremento efficienza sistemi di supporto

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
		Installazione di un ottimizzatore di tensione			intervento è di difficile applicabilità. Gli esperti riferiscono
Power quality	Power quality			<i>Dalle energetiche</i>	<i>diagnosi</i> che questo intervento è di difficile applicabilità. Gli esperti riferiscono la convenienza nel
		Installazione di trasformatori eco a basse perdite nella cabina elettrica			considerare questo intervento in occasione di un rinnovo o di sostituzioni pianificate.
Power quality	Trasformatori			<i>Dalle energetiche</i>	<i>diagnosi</i>
Power quality	Rifasatore	Installazione di un sistema di rifasamento della corrente		<i>Dalle energetiche</i>	<i>diagnosi</i>
		Sostituzione del trasformatore a bagno d'olio con uno a resina			Gli esperti riferiscono la convenienza nel
Power quality	Trasformatori			<i>Dalle energetiche</i>	<i>diagnosi</i> considerare questo intervento fa riferimenti ai Trafo in resina.
Teleriscaldamento	Teleriscaldamento	Effettuare un allacciamento ad un impianto di teleriscaldamento		<i>Dalle energetiche</i>	<i>diagnosi</i>
Varie					
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
Trattamento solventi	Recupero calore	Installare sistemi per la preconcentrazione e combustione termica		<i>Dalle</i>	<i>diagnosi</i> Gli esperti

rigenerativa		energetiche	
			riferiscano che questo intervento non è applicabile nel caso di filling. Gli esperti riferiscano che questo intervento non è applicabile nel caso di filling.
Installazione di un dispositivo per l'osmosi inversa per la produzione di acqua distillata		Dalle energetiche	diagnosi
Dispositivo per osmosi inversa	Dispositivo per osmosi inversa		Gli esperti riferiscano che questo intervento non è applicabile nel caso di filling.
Recupero di calore dal raffreddamento dell'acqua distillata		Dalle energetiche	diagnosi
Produzione acqua distillata	Recupero calore		Gli esperti riferiscano che questo intervento non è applicabile nel caso di filling.

8.4.18 Produzione di energia tramite impianto solare

Produzione di energia						
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni	
Cogeneratore	Cogeneratore	Installazione di un cogeneratore - Energia elettrica e assorbitore per la produzione di freddo	Dalle energetiche	diagnosi		
Cogeneratore	Cogeneratore	Installazione di un cogeneratore - Energia elettrica e termica	Dalle energetiche	diagnosi		
Cogeneratore	Economizzatore	Installazione di un economizzatore sul cogeneratore	Dalle energetiche	diagnosi		
Cogeneratore	Recupero calore	Installazione di un sistema di recupero calore sul degasatore del cogeneratore	Dalle energetiche	diagnosi		
Cogeneratore	Cogeneratore	Sostituzione del cogeneratore con uno dotato di assorbitore	Dalle energetiche	diagnosi		
Cogeneratore	Cogeneratore	Sostituzione del cogeneratore con uno di taglia maggiore	Dalle energetiche	diagnosi		
Trigeneratore	Trigeneratore	Installazione di un impianto di generazione contemporanea di energia elettrica, frigorifera e termica	Dalle energetiche	diagnosi	Gli esperti riferiscano	

Produzione di energia						
Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	diagnosi	Osservazioni
		Aumentare il numero di aree di impianto che usufruiranno dell'energia ottenuta tramite trigenerazione				che questo intervento è stato già adottato in Italia con buoni risultati. Gli esperti riferiscono che questo intervento è stato già inserito nei piani di miglioramento o di molte aziende italiane. Gli esperti riferiscono che questo intervento non viene adottato per problemi di spazio.
Trigeneratore	Ampiezza impianto			Dalle energetiche	diagnosi	
		Installazione di un impianto fotovoltaico				
Fotovoltaico	Fotovoltaico			Dalle energetiche	diagnosi	
		Effettuare un ampliamento dell'impianto fotovoltaico				
Fotovoltaico	Fotovoltaico			Dalle energetiche	diagnosi	
		Installazione di un impianto solare termico per la produzione di acqua calda				
Solare	Solare			Dalle energetiche	diagnosi	Gli esperti riferiscono che questo intervento non è applicabile nel caso di filling.
		Installazione di un impianto solare termico per la produzione diretta di vapore				
Solare	Solare			[159]		Gli esperti riferiscono che questo intervento

Produzione di energia

Macchina	Oggetto della soluzione	Soluzione	Applicabilità	Fonte	Osservazioni
		Installazione di un gruppo elettrogeno più efficiente			non è applicabile nel caso di filling. Gli esperti riferiscono che questo intervento non è applicabile nel caso di filling pianificata (in manutenzione).
Gruppo elettrogeno	Gruppo elettrogeno			<i>Dalle diagnosi energetiche</i>	
Caldaia	Caldaia	Sostituzione della caldaia con una più efficiente		<i>Dalle diagnosi energetiche</i>	
Caldaia	Caldaia	Sostituzione dei sistemi di generazione calore con un impianto centralizzato		<i>Dalle diagnosi energetiche</i>	
Caldaia	Caldaia	Sostituzione di caldaie ad olio diatermico con caldaie a vapore ad alta efficienza		<i>Dalle diagnosi energetiche</i>	
Caldaia	Caldaia	Installazione di caldaie a vapore		<i>Dalle diagnosi energetiche</i>	

9 Riferimenti bibliografici

- [1] E. P. a Council, 'Energy Efficiency Directive 2012/27/EU (EED)'. Oct. 25, 2012.
- [2] A. Cantini, L. Leoni, F. De Carlo, M. Salvio, C. Martini, and F. Martini, 'Technological Energy Efficiency Improvements in Cement Industries', *Sustainability*, vol. 13, no. 7, p. 3810, 2021.
- [3] Assofond, 'Il processo di fonderia', *Assofond.it*. <https://www.assofond.it/il-processo-di-fonderia> (accessed Apr. 19, 2021).
- [4] D. M. Arasu and L. R. Jeffrey, 'ENERGY CONSUMPTION STUDIES IN CAST IRON FOUNDRIES', p. 6, 2009.
- [5] European Commission. 363, 'Prevention, I.P Control Reference Document on Best Available Techniques in the Smitheries and Foundries Industry'. 2005.
- [6] N. K. Sinha, I. N. Choudhary, and J. K. Singh, 'Influence of Mold Material on the Mold Stability for Foundry Use', *Silicon*, pp. 1–10, 2021.
- [7] A. Hamasaid *et al.*, 'Effect of mold coating materials and thickness on heat transfer in permanent mold casting of aluminum alloys', *Metallurgical and materials Transactions A*, vol. 38, no. 6, pp. 1303–1316, 2007.
- [8] M. Noro and R. M. Lazzarin, 'Energy audit experiences in foundries', *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 409–423, 2016.
- [9] 'La Razionalizzazione dei processi di fonderia.' <https://www.castingitaly.com/> (accessed Apr. 22, 2021).
- [10] P. Thollander and M. Ottosson, 'Energy management practices in Swedish energy-intensive industries', *Journal of Cleaner Production*, vol. 18, no. 12, pp. 1125–1133, 2010.
- [11] A. Sa, S. Paramonova, P. Thollander, and E. Cagno, 'Classification of industrial energy management practices: a case study of a Swedish foundry', *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 2581–2588, 2015.
- [12] E. Worrell, P. Blinde, M. Neelis, E. Blomen, and E. Masanet, 'Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the US iron and steel industry an ENERGY STAR (R) guide for energy and plant managers', Lawrence Berkeley National Lab.(LBNL), Berkeley, CA (United States), 2010.
- [13] G. Vinci, F. D'Ascenzo, A. Esposito, M. Musarra, M. Rapa, and A. Rocchi, 'A sustainable innovation in the Italian glass production: LCA and Eco-Care matrix evaluation', *Journal of Cleaner Production*, vol. 223, pp. 587–595, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.124.
- [14] I. Pastor-López, I. Santos, A. Santamaría-Ibirika, M. Salazar, J. De-la-Peña-Sordo, and P. G. Bringas, 'Machine-learning-based surface defect detection and categorisation in high-precision foundry', in *2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2012, pp. 1359–1364.
- [15] 'LA FUSIONE.' <http://www.itisgalileiroma.it/fonderia/cubilotto.htm> (accessed Apr. 19, 2021).
- [16] Fabbrica Futuro, 'Sostenibilità produttiva dell'industria siderurgica', Oct. 17, 2017. <https://www.fabbricafuturo.it/sostenibilita-produttiva-dellindustria-siderurgica/> (accessed Apr. 19, 2021).
- [17] S. Roudier, L. D. Sancho, R. Remus, and M. Aguado-Monsonet, 'Best Available Techniques (BAT) reference document for iron and steel production: Industrial emissions directive 2010/75/EU: integrated pollution prevention and control.' Joint Research Centre (Seville site), 2013.
- [18] G. Cusano, M. Gonzalo, F. Farrell, R. Remus, and L. D. Sancho, 'Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Non-Ferrous Metals Industries-Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control).' Publications Office of the European Union, 2017.
- [19] N. Pardo and J. A. Moya, 'Prospective scenarios on energy efficiency and CO2 emissions in the European Iron & Steel industry', *Energy*, vol. 54, pp. 113–128, 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.03.015.
- [20] R. Grunbaum, 'Voltage source converters for maintaining of power quality and stability in power distribution', in *2005 European Conference on Power Electronics and Applications*, Sep. 2005, pp. 10-pp. doi: 10.1109/EPE.2005.219374.
- [21] D. Y.-L. Chan, K.-H. Yang, J.-D. Lee, and G.-B. Hong, 'The case study of furnace use and energy conservation in iron and steel industry', *Energy*, vol. 35, no. 4, pp. 1665–1670, 2010, doi: 10.1016/j.energy.2009.12.014.

- [22] V. Sibanda, E. Sipunga, G. Danha, and T. A. Mamvura, 'Enhancing the flotation recovery of copper minerals in smelter slags from Namibia prior to disposal', *Heliyon*, vol. 6, no. 1, p. e03135, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e03135.
- [23] E. Y. Sako *et al.*, 'Thermal ceramic coatings as energy saving alternatives for high temperature processes', *International Journal of Applied Ceramic Technology*, vol. 17, no. 6, pp. 2492–2508, 2020, doi: 10.1111/ijac.13606.
- [24] J. Jezierski and K. Janerka, 'Wastes utilisation in foundries and metallurgical plants with pneumatic conveying techniques—selected aspects', *Interdisciplinary Environmental Review*, vol. 12, no. 2, pp. 154–165, 2011.
- [25] N. Prabhushankar and N. Balaji, 'Various Alternative Sources for Silica Sand, Binders and Additives in Sand Casting and their Properties—A Review', in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Kancheepuram, India, Apr. 2020, vol. 993, no. 1, p. 012137.
- [26] R. M. Lazzarin and M. Noro, 'Energy efficiency opportunities in the production process of cast iron foundries: An experience in Italy', *Applied Thermal Engineering*, vol. 90, pp. 509–520, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.07.028.
- [27] P. Rodríguez-González, P. E. Robles Valero, A. I. Fernández-Abia, M. A. Castro-Sastre, and J. Barreiro García, 'Application of Vacuum Techniques in Shell Moulds Produced by Additive Manufacturing', *Metals*, vol. 10, no. 8, Art. no. 8, Aug. 2020, doi: 10.3390/met10081090.
- [28] S. R. Sama, T. Badamo, and G. Manogharan, 'Case Studies on Integrating 3D Sand-Printing Technology into the Production Portfolio of a Sand-Casting Foundry', *Inter Metalcast*, vol. 14, no. 1, pp. 12–24, Jan. 2020, doi: 10.1007/s40962-019-00340-1.
- [29] J. Wang, S. R. Sama, and G. Manogharan, 'Re-Thinking Design Methodology for Castings: 3D Sand-Printing and Topology Optimization.', *International Journal of Metalcasting*, vol. 13, no. 1, 2019.
- [30] P. Lynch, C. R. Hasbrouck, J. Wilck, M. Kay, and G. Manogharan, 'Challenges and opportunities to integrate the oldest and newest manufacturing processes: metal casting and additive manufacturing', *Rapid Prototyping Journal*, vol. 26, no. 6, pp. 1145–1154, Jan. 2020, doi: 10.1108/RPJ-10-2019-0277.
- [31] S. Acar and K. A. Guler, 'A Preliminary Study Upon the Applicability of the Direct Water Cooling with the Lost Foam Casting Process', *Inter Metalcast*, vol. 15, no. 1, pp. 88–97, Jan. 2021, doi: 10.1007/s40962-020-00420-7.
- [32] D. R. Gunasegaram and A. Tharumarajah, 'Impacts of high-pressure diecasting process parameters on greenhouse gas emissions', *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 40, no. 4, pp. 605–614, 2009.
- [33] F. Bonollo, N. Gramegna, and G. Timelli, 'High-pressure die-casting: contradictions and challenges', *Jom*, vol. 67, no. 5, pp. 901–908, 2015.
- [34] J. Choi, H. Hwang, and S. Kang, 'Effect of ladle outlet geometry on internal porosity in gravity casting automotive brackets: An experimental investigation.', *China Foundry*, vol. 17, no. 1, 2020.
- [35] V. M. Gruzman, 'Foundry production digitalization', in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 966, no. 1, p. 012127.
- [36] Z. C. Guo and Z. X. Fu, 'Current situation of energy consumption and measures taken for energy saving in the iron and steel industry in China', *Energy*, vol. 35, no. 11, pp. 4356–4360, 2010.
- [37] R. M. Lazzarin and M. Noro, 'Energy efficiency opportunities in the service plants of cast iron foundries in Italy', *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 12, no. 2, pp. 96–109, 2017.
- [38] R. Wrona, M. Brzeziński, E. Ziólkowski, and K. Smyksy, 'The quality of compressed air as the necessary condition the improving the process efficiency in foundry plants', *Archives of Foundry Engineering*, no. 4, 2013.
- [39] J. J. C. Eras, A. S. Gutiérrez, V. S. Santos, and M. J. C. Ulloa, 'Energy management of compressed air systems. Assessing the production and use of compressed air in industry', *Energy*, vol. 213, p. 118662, 2020.
- [40] M. N. Šarevski and V. N. Šarevski, 'Thermal characteristics of high-temperature R718 heat pumps with turbo compressor thermal vapor recompression', *Applied Thermal Engineering*, vol. 117, pp. 355–365, 2017.

- [41] Institute for Industrial Productivity, 'Explore energy efficiency technologies across the industrial sectors.', *iipinetwork.org*, 2016. <http://www.iipinetwork.org/> (accessed Jan. 11, 2021).
- [42] J. S. Artal-Sevil, J. L. Bernal-Agustín, R. Dufo-López, and J. A. Domínguez-Navarro, 'Forklifts, Automated Guided Vehicles and Horizontal Order Pickers in Industrial Environments. Energy Management of an Active Hybrid Power System based on Batteries, PEM Fuel Cells and Ultracapacitors.', in *Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ)*, Malaga, Spain, Apr. 2017, vol. 15.
- [43] Y. Pang and G. Lodewijks, 'Improving energy efficiency in material transport systems by fuzzy speed control', in *3rd IEEE International Symposium on Logistics and Industrial Informatics*, 2011, pp. 159–164.
- [44] A. Abdel-Hadi, A. R. Salem, A. I. Abbas, M. Qandil, and R. S. Amano, 'Study of Energy Saving Analysis for Different Industries', *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 143, no. 5, Sep. 2020, doi: 10.1115/1.4048249.
- [45] S. Kurilin, V. Denisov, M. Dli, and V. Bobkov, 'Scientific and technical directions of improvement of electric motors for non-ferrous metallurgy', *Automation*, vol. 47, pp. 53–58, 2019, doi: 10.17580/nfm.2019.02.09.
- [46] L. E. K. Holappa, 'Energy efficiency and sustainability in steel production', in *Energy and Environmental Technologies*, Online, Feb. 2017, vol. Part of the The Minerals, Metals&Materials Series book series (MMMS), pp. 401–410.
- [47] M. Hammerschmid, S. Müller, J. Fuchs, and H. Hofbauer, 'Evaluation of biomass-based production of below zero emission reducing gas for the iron and steel industry', *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 11, no. 1, pp. 169–187, 2021.
- [48] A. F. Ryzhkov, E. I. Levin, P. S. Filippov, N. A. Abaimov, and S. I. Gordeev, 'Making more efficient use of blast-furnace gas at Russian metallurgical plants', *Metallurgist*, vol. 60, no. 1, pp. 19–30, 2016.
- [49] L. Chen, B. Yang, X. Shen, Z. Xie, and F. Sun, 'Thermodynamic optimization opportunities for the recovery and utilization of residual energy and heat in China's iron and steel industry: a case study', *Applied Thermal Engineering*, vol. 86, pp. 151–160, 2015.
- [50] Y. Zhang *et al.*, 'A fluidized-bed reactor for enhanced mass transfer and increased performance in thermally regenerative batteries for low-grade waste heat recovery', *Journal of Power Sources*, vol. 495, p. 229815, 2021.
- [51] M. Arens and E. Worrell, 'Diffusion of energy efficient technologies in the German steel industry and their impact on energy consumption', *Energy*, vol. 73, pp. 968–977, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.06.112.
- [52] L. Holappa, 'A general vision for reduction of energy consumption and CO2 emissions from the steel industry', *Metals*, vol. 10, no. 9, p. 1117, 2020, doi: doi.org/10.3390/met10091117.
- [53] W. Liu, H. Zuo, J. Wang, Q. Xue, B. Ren, and F. Yang, 'The production and application of hydrogen in steel industry', *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.12.123.
- [54] J. Tang, M. Chu, F. Li, C. Feng, Z. Liu, and Y. Zhou, 'Development and progress on hydrogen metallurgy', *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 27, no. 6, pp. 713–723, 2020.
- [55] E. P. da Rocha, J. A. de Castro, L. Silva, and R. de S. Caldas, 'Computational Analysis of The Performance of Shaft Furnaces with Partial Replacement of The Burden with Self-Reducing Pellets Containing Biomass', *Materials Research*, vol. 22, 2020, doi: 10.1590/1980-5373-MR-2019-0533.
- [56] European Commission. Joint Research Centre., *Best available techniques (BAT) reference document for waste treatment: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (integrated pollution prevention and control)*. LU: Publications Office, 2018. Accessed: Jun. 10, 2021. [Online]. Available: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/407967>
- [57] G. C. Fitzgerald, 'SHREDDING MUNICIPAL SOLID WASTES PRIOR TO DISPOSAL'. 2009.
- [58] B. Bilitewski, 'Mechanical Treatment: Unit Processes', in *Solid Waste Technology & Management*, John Wiley & Sons, Ltd, 2010, pp. 319–348. doi: 10.1002/9780470666883.ch24.
- [59] S. Q. Aziz, I. Omar, and J. Mustafa, 'Design and Study for Composting Process Site', vol. 7, pp. 9–18, Nov. 2018.
- [60] U. Krogmann, I. Körner, and L. F. Diaz, 'Composting: Technology', in *Solid Waste Technology & Management*, John Wiley & Sons, Ltd, 2010, pp. 533–568. doi: 10.1002/9780470666883.ch35.

- [61] S. Wang and Y. Wu, 'Hyperthermophilic Composting Technology for Organic Solid Waste Treatment: Recent Research Advances and Trends', *Processes*, vol. 9, no. 4, Art. no. 4, Apr. 2021, doi: 10.3390/pr9040675.
- [62] B. Ouhammou, M. Aggour, Â. Frimane, M. Bakraoui, H. El Bari, and A. Essamri, 'A new system design and analysis of a solar bio-digester unit', *Energy Conversion and Management*, vol. 198, p. 111779, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.111779.
- [63] K. Li *et al.*, 'Performance assessment and metagenomic analysis of full-scale innovative two-stage anaerobic digestion biogas plant for food wastes treatment', *Journal of Cleaner Production*, vol. 264, p. 121646, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121646.
- [64] J. Zhang *et al.*, 'A hybrid biological and thermal waste-to-energy system with heat energy recovery and utilization for solid organic waste treatment', *Energy*, vol. 152, pp. 214–222, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.03.143.
- [65] C. Cimpan and H. Wenzel, 'Energy implications of mechanical and mechanical–biological treatment compared to direct waste-to-energy', *Waste Management*, vol. 33, no. 7, pp. 1648–1658, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.wasman.2013.03.026.
- [66] S. T. Tan, W. S. Ho, H. Hashim, C. T. Lee, M. R. Taib, and C. S. Ho, 'Energy, economic and environmental (3E) analysis of waste-to-energy (WTE) strategies for municipal solid waste (MSW) management in Malaysia', *Energy Conversion and Management*, vol. 102, pp. 111–120, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.02.010.
- [67] H. Chen *et al.*, 'An innovative waste-to-energy system integrated with a coal-fired power plant', *Energy*, vol. 194, p. 116893, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2019.116893.
- [68] L. Tobiasen, K. Kahle, C. Hindsgaul, and B. Kamuk, 'Waste to Energy – Energy Recovery of Green Bin Waste: Incineration/Biogas Comparison', *Curr Sustainable Renewable Energy Rep*, vol. 1, no. 4, pp. 136–149, Dec. 2014, doi: 10.1007/s40518-014-0018-1.
- [69] European Commission. Joint Research Centre., *Best Available Techniques (BAT) reference document for waste incineration: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)*. LU: Publications Office, 2019. Accessed: Jun. 10, 2021. [Online]. Available: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/761437>
- [70] G. Flesoura, N. Dilissen, G. Dimitrakis, J. Vleugels, and Y. Pontikes, 'A new approach for the vitrification of municipal solid waste incinerator bottom ash by microwave irradiation', *Journal of Cleaner Production*, vol. 284, p. 124787, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124787.
- [71] Q. Qiu, X. Jiang, Z. Chen, S. Lu, and M. Ni, 'Microwave-Assisted Hydrothermal Treatment with Soluble Phosphate Added for Heavy Metals Solidification in MSWI Fly Ash', *Energy Fuels*, vol. 31, no. 5, pp. 5222–5232, May 2017, doi: 10.1021/acs.energyfuels.6b02516.
- [72] S.-L. Pei, T.-L. Chen, S.-Y. Pan, Y.-L. Yang, Z.-H. Sun, and Y.-J. Li, 'Addressing environmental sustainability of plasma vitrification technology for stabilization of municipal solid waste incineration fly ash', *Journal of Hazardous Materials*, vol. 398, p. 122959, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122959.
- [73] A. Buekens, *Incineration Technologies*. New York, NY: Springer New York, 2013. doi: 10.1007/978-1-4614-5752-7.
- [74] T. Hulgaard and J. Vehlow, 'Incineration: Process and Technology', in *Solid Waste Technology & Management*, John Wiley & Sons, Ltd, 2010, pp. 363–392. doi: 10.1002/9780470666883.ch26.
- [75] L. Makarichi, W. Jutidamrongphan, and K. Techato, 'The evolution of waste-to-energy incineration: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp. 812–821, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.04.088.
- [76] L. Lombardi, E. Carnevale, and A. Corti, 'A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste', *Waste Management*, vol. 37, pp. 26–44, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.wasman.2014.11.010.
- [77] T. Murakami *et al.*, 'Combustion characteristics of sewage sludge in an incineration plant for energy recovery', *Fuel Processing Technology*, vol. 90, no. 6, pp. 778–783, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.fuproc.2009.03.003.

- [78] U. Arena, 'Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review', *Waste Management*, vol. 32, no. 4, pp. 625–639, Apr. 2012, doi: 10.1016/j.wasman.2011.09.025.
- [79] A. Perna, M. Minutillo, and E. Jannelli, 'Hydrogen from intermittent renewable energy sources as gasification medium in integrated waste gasification combined cycle power plants: A performance comparison', *Energy*, vol. 94, pp. 457–465, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2015.10.143.
- [80] M. Punčochář, B. Ruj, and P. K. Chatterj, 'Development of Process for Disposal of Plastic Waste Using Plasma Pyrolysis Technology and Option for Energy Recovery', *Procedia Engineering*, vol. 42, pp. 420–430, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.07.433.
- [81] J. Ali *et al.*, 'Modalities for conversion of waste to energy — Challenges and perspectives', *Science of The Total Environment*, vol. 727, p. 138610, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138610.
- [82] *The Solid Waste Handbook*, 1st ed. John Wiley & Sons, Ltd, 1986. doi: 10.1002/9780470172957.
- [83] J. Vehlow and S. Dalager, 'Incineration: Flue Gas Cleaning and Emissions', in *Solid Waste Technology & Management*, John Wiley & Sons, Ltd, 2010, pp. 393–420. doi: 10.1002/9780470666883.ch27.
- [84] H. Perazzini, F. Freire, F. Freire, and J. Freire, 'Thermal Treatment of Solid Wastes Using Drying Technologies: A Review', *Drying Technology*, vol. 34, p. 150130063944001, Jan. 2015, doi: 10.1080/07373937.2014.995803.
- [85] H. Chen, L. Zhang, Y. Yang, C. Wu, and W. Wei, 'Practice and Development of Municipal Solid Waste Rapid Composting in China', in *2011 International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring*, Feb. 2011, pp. 2140–2143. doi: 10.1109/CDCIEM.2011.464.
- [86] P. Psaltis and D. Komilis, 'Environmental and economic assessment of the use of biodrying before thermal treatment of municipal solid waste', *Waste Management*, vol. 83, pp. 95–103, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2018.11.007.
- [87] M. M. Tun and D. Juchelkova, 'Drying methods for municipal solid waste quality improvement in the developed and developing countries: A review', *Environmental Engineering Research*, vol. 24, no. 4, pp. 529–542, 2019, doi: 10.4491/eer.2018.327.
- [88] D. Panepinto and G. Genon, 'Environmental evaluation of the electric and cogenerative configurations for the energy recovery of the Turin municipal solid waste incineration plant', *Waste Manag Res*, vol. 32, no. 7, pp. 670–680, Jul. 2014, doi: 10.1177/0734242X14538304.
- [89] O. Gohlke, 'Efficiency of energy recovery from municipal solid waste and the resultant effect on the greenhouse gas balance', *Waste Manag Res*, vol. 27, no. 9, pp. 894–906, Nov. 2009, doi: 10.1177/0734242X09349857.
- [90] S. Sedpho, S. Sampattagul, N. Chaiyat, and S. H. Gheewala, 'Conventional and exergetic life cycle assessment of organic rankine cycle implementation to municipal waste management: the case study of Mae Hong Son (Thailand)', *Int J Life Cycle Assess*, vol. 22, no. 11, pp. 1773–1784, Nov. 2017, doi: 10.1007/s11367-016-1216-4.
- [91] F. Huang, J. Zheng, J. M. Baleyraud, and J. Lu, 'Heat recovery potentials and technologies in industrial zones', *Journal of the Energy Institute*, vol. 90, no. 6, pp. 951–961, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.joei.2016.07.012.
- [92] A. Colmenar-Santos, G. Zarzuelo-Puch, D. Borge-Diez, and C. García-Diéguez, 'Thermodynamic and exergoeconomic analysis of energy recovery system of biogas from a wastewater treatment plant and use in a Stirling engine', *Renewable Energy*, vol. 88, pp. 171–184, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.11.001.
- [93] M. Pavlas, M. Touš, P. Klimek, and L. Bébar, 'Waste incineration with production of clean and reliable energy', *Clean Techn Environ Policy*, vol. 13, no. 4, pp. 595–605, Aug. 2011, doi: 10.1007/s10098-011-0353-5.
- [94] S.-W. Park, Y.-C. Seo, S.-Y. Lee, W.-S. Yang, J.-H. Oh, and J.-H. Gu, 'Development of 8 ton/day gasification process to generate electricity using a gas engine for solid refuse fuel', *Waste Management*, vol. 113, pp. 186–196, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2020.06.004.
- [95] 'Reference Document on Best Available Techniques for the Manufacture of Organic Fine Chemicals', Aug. 2006.

- [96] J. Britton, S. Majumdar, and G. A. Weiss, 'Continuous flow biocatalysis', *Chem. Soc. Rev.*, vol. 47, no. 15, pp. 5891–5918, Jul. 2018, doi: 10.1039/C7CS00906B.
- [97] H. Warmeling, A. Behr, and A. J. Vorholt, 'Jet loop reactors as a versatile reactor set up - Intensifying catalytic reactions: A review', *Chemical Engineering Science*, vol. 149, pp. 229–248, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.ces.2016.04.032.
- [98] S. Shu, D. Vidal, F. Bertrand, and J. Chaouki, 'Multiscale multiphase phenomena in bubble column reactors: A review', *Renewable Energy*, vol. 141, pp. 613–631, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.04.020.
- [99] 'Best Available Techniques for the Production of Speciality Inorganic Chemicals', Aug. 2007.
- [100] R. Timaeus, U. Hampel, and M. Schubert, 'Inclined rotating fixed-bed reactor – Experimental characterization and model-based predictions', *Chemical Engineering Journal*, vol. 423, p. 130244, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.cej.2021.130244.
- [101] Benedetta De Caprariis, Marco Stoller, Angelo Chianese, and Nicola Verdone, 'Cfd model of a spinning disk reactor for nanoparticle production', *Chemical Engineering Transactions*, vol. 43, pp. 757–762, 2015, doi: 10.3303/CET1543127.
- [102] Á. Hegedűs and K. Pintye-Hódi, 'Comparison of the effects of different drying techniques on properties of granules and tablets made on a production scale', *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 330, no. 1, pp. 99–104, Feb. 2007, doi: 10.1016/j.ijpharm.2006.09.001.
- [103] A. S. Mujumdar, 'Handbook of Industrial Drying', p. 1279, 2006.
- [104] D. Parikh, 'Vacuum Drying: Basics and Application', *Chemical Engineering*, vol. 122, Apr. 2015.
- [105] Manu Jain, Lohare Ganesh, Bari Manoj, and Chavan Randhir, 'Spray Drying in Pharmaceutical Industry: A Review', *Research J. Pharma. Dosage Forms and Tech.*, vol. 4, no. 2, 2011.
- [106] D.-J. Lee, S. Jangam, and A. S. Mujumdar, 'Some Recent Advances in Drying Technologies to Produce Particulate Solids', *KONA*, vol. 30, no. 0, pp. 69–83, 2013, doi: 10.14356/kona.2013010.
- [107] R. Verma, M. Patil, and C. O. Paz, 'Chapter 7 - Current Practices in Wet Granulation-Based Generic Product Development', in *Handbook of Pharmaceutical Wet Granulation*, A. S. Narang and S. I. F. Badawy, Eds. Academic Press, 2019, pp. 203–259. doi: 10.1016/B978-0-12-810460-6.00007-5.
- [108] B. Mn, S. Ac, D. As, and S. Np, 'MICROWAVE: AN EMERGING TREND IN PHARMACEUTICAL PROCESSES AND FORMULATIONS', vol. 3, p. 22, Sep. 2011.
- [109] B. W. Lee, K. Yin, K. Splaine, and B. Roesch, 'Thin-Film Evaporator Model for Continuous Active Pharmaceutical Ingredient Manufacturing', *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 59, no. 7, pp. 3252–3260, Feb. 2020, doi: 10.1021/acs.iecr.9b03974.
- [110] A. E. Cervera-Padrell, S. T. Morthensen, D. J. Lewandowski, T. Skovby, S. Kiil, and K. V. Gernaey, 'Continuous Hydrolysis and Liquid–Liquid Phase Separation of an Active Pharmaceutical Ingredient Intermediate Using a Miniscale Hydrophobic Membrane Separator', *Org. Process Res. Dev.*, vol. 16, no. 5, pp. 888–900, May 2012, doi: 10.1021/op200242s.
- [111] M. D. Johnson *et al.*, 'API Continuous Cooling and Antisolvent Crystallization for Kinetic Impurity Rejection in cGMP Manufacturing', *Org. Process Res. Dev.*, vol. 25, no. 6, pp. 1284–1351, Jun. 2021, doi: 10.1021/acs.oprd.0c00345.
- [112] I. A. Narkevich, A. A. Semin, N. S. Kartashova, and A. A. Teslev, 'Pilot and Industrial Absorption-Chromatographic and Membrane Technologies for Isolation and Purification of Plant- and Animal-Based Active Pharmaceutical Ingredients', *Pharm Chem J*, vol. 50, no. 10, pp. 698–703, Jan. 2017, doi: 10.1007/s11094-017-1515-5.
- [113] K. D. Seibert, P. C. Collins, C. V. Luciani, and E. S. Fisher, 'Milling Operations in the Pharmaceutical Industry', in *Chemical Engineering in the Pharmaceutical Industry*, John Wiley & Sons, Ltd, 2019, pp. 861–879. doi: 10.1002/9781119600800.ch38.
- [114] M. Nakach, J.-R. Authelin, A. Chamayou, and J. Dodds, 'Comparison of various milling technologies for grinding pharmaceutical powders', *International Journal of Mineral Processing*, vol. 74, pp. S173–S181, Dec. 2004, doi: 10.1016/j.minpro.2004.07.039.
- [115] P. J. Cullen, Rodolfo J. Romañach, Nicolas Abatzoglou, and Chris D. Rielly, *Pharmaceutical Blending and Mixing*, 1st ed. John Wiley & Sons, Ltd, 2015. doi: 10.1002/9781118682692.

- [116] N. Harnby, 'An engineering view of pharmaceutical powder mixing', *Pharmaceutical Science & Technology Today*, vol. 3, no. 9, pp. 303–309, Sep. 2000, doi: 10.1016/S1461-5347(00)00283-2.
- [117] K. Padmaja, J. Cherukuri, and M. Anji Reddy, 'A comparative study of the efficiency of chemical coagulation and electrocoagulation methods in the treatment of pharmaceutical effluent', *Journal of Water Process Engineering*, vol. 34, p. 101153, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101153.
- [118] M. Banerjee, S. Saraswatula, L. G. Willows, H. Woods, and B. Brettmann, 'Pharmaceutical crystallization in surface-modified nanocellulose organogels', *J. Mater. Chem. B*, vol. 6, no. 44, pp. 7317–7328, Nov. 2018, doi: 10.1039/C8TB01554F.
- [119] L. de los S. Castillo-Peinado and M. D. Luque de Castro, 'The role of ultrasound in pharmaceutical production: sonocrystallization', *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, vol. 68, no. 10, pp. 1249–1267, Oct. 2016, doi: 10.1111/jphp.12614.
- [120] Y. C. Liu and Z. K. Nagy, 'Continuous Crystallization: Equipment and Operation', in *Continuous Pharmaceutical Processing*, Z. K. Nagy, A. El Hagrasy, and J. Litster, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 129–192. doi: 10.1007/978-3-030-41524-2_5.
- [121] H. Al-Madhhachi and M. Al-Najideen, 'Thermal, environmental, and cost analysis of effective solar portable vaccine refrigerator by COMSOL Multiphysics', *Heat Transfer*, vol. 50, no. 1, pp. 179–195, 2021, doi: 10.1002/htj.21870.
- [122] B. Bennett, G. Cole, and Institution of Chemical Engineers (Great Britain), Eds., *Pharmaceutical production: an engineering guide*. Rugby, Warwickshire: IChemE, 2003.
- [123] G. Van der Vorst *et al.*, 'Comparison of two pharmaceutical production processes using different eco-efficiency measuring methods', Antwerp, Belgium, Jul. 2011, pp. 11–19. doi: 10.2495/CHEM110021.
- [124] G. Fülöp *et al.*, 'Integrated twin-screw wet granulation, continuous vibrational fluid drying and milling: A fully continuous powder to granule line', *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 594, p. 120126, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.ijpharm.2020.120126.
- [125] R. Agrawal and Y. Naveen, 'Pharmaceutical Processing – A Review on Wet Granulation Technology', p. 19.
- [126] W. D. Soete *et al.*, 'Energetic sustainability assessment of batch versus continuous wet granulation based pharmaceutical tablet manufacturing: a cohesive analysis at three different levels', *Green Chemistry*, vol. 15, no. 11, pp. 3039–3048, 2013, doi: 10.1039/C3GC41185K.
- [127] S. M. Iveson, J. D. Litster, K. Hapgood, and B. J. Ennis, 'Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes: a review', *Powder Technology*, vol. 117, no. 1, pp. 3–39, Jun. 2001, doi: 10.1016/S0032-5910(01)00313-8.
- [128] P. Suresh, I. Sreedhar, R. Vaidhiswaran, and A. Venugopal, 'A comprehensive review on process and engineering aspects of pharmaceutical wet granulation', *Chemical Engineering Journal*, vol. 328, pp. 785–815, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.cej.2017.07.091.
- [129] Dilip M. Parikh, *Handbook of Pharmaceutical Granulation Technology*. 2005.
- [130] G. Morin and L. Briens, 'A Comparison of Granules Produced by High-Shear and Fluidized-Bed Granulation Methods', *AAPS PharmSciTech*, vol. 15, no. 4, pp. 1039–1048, Aug. 2014, doi: 10.1208/s12249-014-0134-7.
- [131] T. C. Seem *et al.*, 'Twin screw granulation — A literature review', *Powder Technology*, vol. 276, pp. 89–102, May 2015, doi: 10.1016/j.powtec.2015.01.075.
- [132] B. K. Verma, S. Pandey, and P. Arya, 'TABLET GRANULATION: CURRENT SCENARIO AND RECENT ADVANCES', p. 6.
- [133] M. Maniruzzaman, A. Nokhodchi, and R. O. Williams, 'Recent advances in granulation technology', *Drug Deliv. and Transl. Res.*, vol. 8, no. 6, pp. 1593–1594, Dec. 2018, doi: 10.1007/s13346-018-0559-8.
- [134] E. Jannat, A. A. Arif, M. Hasan, A. Bin, and H. A. Rashid, 'Granulation techniques & its updated modules', p. 8.
- [135] D. M. Sharma, S. B. Kosalge, and S. N. Lade, 'Review on Moisture activated Dry Granulation Process', vol. 5, no. 12, p. 10.

- [136] N. Sandler and R. F. Lammens, 'Pneumatic dry granulation: potential to improve roller compaction technology in drug manufacture', *Expert Opinion on Drug Delivery*, vol. 8, no. 2, pp. 225–236, Feb. 2011, doi: 10.1517/17425247.2011.548382.
- [137] P. Kleinebudde, 'Roll compaction/dry granulation: pharmaceutical applications', *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, vol. 58, no. 2, pp. 317–326, Sep. 2004, doi: 10.1016/j.ejpb.2004.04.014.
- [138] G. Kaur, M. Gera, P. Bassi, and A. K. Tiwary, 'Roll Compaction/Dry Granulation (Rcdg): Technologies and Their Applications In Drug Delivery and Development', *International Journal of Drug Delivery*, vol. 3, no. 3, Art. no. 3, Nov. 2011.
- [139] S. Mohan, 'COMPRESSION PHYSICS OF PHARMACEUTICAL POWDERS: A REVIEW', vol. 3, p. 13.
- [140] A. H. Gerhardt, 'Fundamentals of Tablet Compression', *Journal of GXP Compliance*, p. 10, 2010.
- [141] T. Ervasti *et al.*, 'Continuous manufacturing of extended release tablets via powder mixing and direct compression', *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 495, no. 1, pp. 290–301, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.ijpharm.2015.08.077.
- [142] B.VENKATESWARA REDDY, K. NAVANEETHA, and B.RASHMITHA REDDY, 'Tablet coating industry point view - A comprehensive review', *International Journal Of Pharmacy And Biological Science*, vol. 3, no. 1, pp. 248–261, Mar. 2013.
- [143] S. C. Porter, 'Chapter 27 - Coating of pharmaceutical dosage forms', in *Remington (Twenty-third Edition)*, A. Adejare, Ed. Academic Press, 2021, pp. 551–564. doi: 10.1016/B978-0-12-820007-0.00027-1.
- [144] K. Pundir and D. B. Parashar, 'The Innovations in Tablet Coating: A Review', vol. 03, no. 06, p. 6, 2019.
- [145] A. N. Zaid, 'A Comprehensive Review on Pharmaceutical Film Coating: Past, Present, and Future', *DDDT*, vol. 14, pp. 4613–4623, Oct. 2020, doi: 10.2147/DDDT.S277439.
- [146] D.-G. Yu, J.-J. Li, G. R. Williams, and M. Zhao, 'Electrospun amorphous solid dispersions of poorly water-soluble drugs: A review', *Journal of Controlled Release*, vol. 292, pp. 91–110, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.jconrel.2018.08.016.
- [147] E. Szabó *et al.*, 'Continuous downstream processing of milled electrospun fibers to tablets monitored by near-infrared and Raman spectroscopy', *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 164, p. 105907, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.ejps.2021.105907.
- [148] P. Vass *et al.*, 'Scale-up of electrospinning technology: Applications in the pharmaceutical industry', *WIREs Nanomedicine and Nanobiotechnology*, vol. 12, no. 4, p. e1611, 2020, doi: 10.1002/wnan.1611.
- [149] B. J. Park *et al.*, 'Pharmaceutical applications of 3D printing technology: current understanding and future perspectives', *J. Pharm. Investig.*, vol. 49, no. 6, pp. 575–585, Nov. 2019, doi: 10.1007/s40005-018-00414-y.
- [150] J. Norman, R. D. Madurawe, C. M. V. Moore, M. A. Khan, and A. Khairuzzaman, 'A new chapter in pharmaceutical manufacturing: 3D-printed drug products', *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 108, pp. 39–50, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.addr.2016.03.001.
- [151] A. Kjar and Y. Huang, 'Application of Micro-Scale 3D Printing in Pharmaceutics', *Pharmaceutics*, vol. 11, no. 8, Art. no. 8, Aug. 2019, doi: 10.3390/pharmaceutics11080390.
- [152] N. Bostijn, J. Van Renterghem, B. Vanbillemont, W. Dhondt, C. Vervaet, and T. De Beer, 'Continuous manufacturing of a pharmaceutical cream: Investigating continuous powder dispersing and residence time distribution (RTD)', *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 132, pp. 106–117, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.ejps.2019.02.036.
- [153] R. Thakkar *et al.*, 'A Comparison Between Lab-Scale and Hot-Melt-Extruder-Based Anti-inflammatory Ointment Manufacturing', *AAPS PharmSciTech*, vol. 21, no. 5, p. 200, Jul. 2020, doi: 10.1208/s12249-020-01738-5.
- [154] N. S. Mendonsa *et al.*, 'A quality by design approach to develop topical creams via hot-melt extrusion technology', *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 136, p. 104948, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.ejps.2019.06.002.
- [155] M. Rostamitabar, A. M. Abdelgawad, S. Jockenhoevel, and S. Ghazanfari, 'Drug-Eluting Medical Textiles: From Fiber Production and Textile Fabrication to Drug Loading and Delivery', *Macromolecular Bioscience*, vol. 21, no. 7, p. 2100021, 2021, doi: 10.1002/mabi.202100021.

- [156] P. I. Morgado, A. Aguiar-Ricardo, and I. J. Correia, 'Asymmetric membranes as ideal wound dressings: An overview on production methods, structure, properties and performance relationship', *Journal of Membrane Science*, vol. 490, pp. 139–151, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.memsci.2015.04.064.
- [157] A. Hasanbeigi, W. Morrow, E. Masanet, J. Sathaye, and T. Xu, 'Energy efficiency improvement and CO₂ emission reduction opportunities in the cement industry in China', *Energy Policy*, vol. 57, pp. 287–297, Jun. 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2013.01.053.
- [158] J. Wadibhasme, S. Zaday, and R. Somalwar, 'Review of various methods in improvement in speed, power amp; efficiency of induction motor', in *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*, Aug. 2017, pp. 3293–3296. doi: 10.1109/ICECDS.2017.8390068.
- [159] M. Berger, M. Meyer-Grünfeldt, D. Krüger, K. Hennecke, M. Mokhtar, and C. Zahler, 'First Year of Operational Experience with a Solar Process Steam system for a Pharmaceutical Company in Jordan', *Energy Procedia*, vol. 91, pp. 591–600, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.06.209.
- [160] J. Heemer, er M. Alex, and Michael Scheer, 'Increasing Central Plant Efficiency via a Water to Water Heat Pump', p. 9, 2011.
- [161] B. Roy and R. Słowiński, 'Questions guiding the choice of a multicriteria decision aiding method', *EURO J Decis Process*, vol. 1, no. 1, pp. 69–97, Jun. 2013, doi: 10.1007/s40070-013-0004-7.
- [162] J. R. Figueira, S. Greco, B. Roy, and R. Słowiński, 'An Overview of ELECTRE Methods and their Recent Extensions', *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, vol. 20, no. 1–2, pp. 61–85, 2013, doi: 10.1002/mcda.1482.
- [163] J. Figueira, S. Greco, and M. Ehrogott, *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, vol. 78. New York, NY: Springer New York, 2005. doi: 10.1007/b100605.
- [164] P. Meyer, R. Bisdorff, and M. Roubens, 'Rubis: a bipolar-valued outranking method for the best choice decision problem', *4OR: A Quarterly Journal of Operations Research*, vol. 6, no. 2, pp. 143–165, 2008, doi: 10.1007/s10288-007-0045-5.
- [165] S. Opricovic, 'Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning', *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 10, pp. 12983–12990, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.eswa.2011.04.097.
- [166] X. Guo, J. Ji, F. Khan, L. Ding, and Y. Yang, 'Fuzzy Bayesian network based on an improved similarity aggregation method for risk assessment of storage tank accident', *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 149, pp. 817–830, May 2021, doi: 10.1016/j.psep.2021.03.017.
- [167] S. Nădăban, S. Dzitac, and I. Dzitac, 'Fuzzy TOPSIS: A General View', *Procedia Computer Science*, vol. 91, pp. 823–831, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.procs.2016.07.088.
- [168] S. Xian, 'Fuzzy Linguistic Induced Ordered Weighted Averaging Operator and Its Application', *Journal of Applied Mathematics*, vol. 2012, pp. 1–10, 2012, doi: 10.1155/2012/210392.
- [169] J. Stein, T. Fuchs, and C. Mattern, 'Advanced Milling and Containment Technologies for Superfine Active Pharmaceutical Ingredients', *Chemical Engineering & Technology*, vol. 33, no. 9, pp. 1464–1470, 2010, doi: <https://doi.org/10.1002/ceat.200900590>.
- [170] N. Mostafa, Jean-rene Authelin, C. Corsini, and G. Gianola, 'Jet milling industrialization of sticky active pharmaceutical ingredient using quality by design approach', *Pharmaceutical Development and Technology*, vol. 24, pp. 1–55, Apr. 2019, doi: 10.1080/10837450.2019.1608449.
- [171] P. I. Grigorov, F. J. Muzzio, and B. J. Glasser, 'Modeling fluidized bed impregnation of active pharmaceutical ingredients onto porous excipients', *Chemical Engineering Science*, vol. 202, pp. 36–54, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.ces.2019.02.029.
- [172] A. Hasanbeigi, L. Price, H. Lu, and W. Lan, 'Analysis of energy-efficiency opportunities for the cement industry in Shandong Province, China: A case study of 16 cement plants', *Energy*, vol. 35, no. 8, pp. 3461–3473, Aug. 2010, doi: 10.1016/j.energy.2010.04.046.

10 Curriculum scientifico del gruppo di lavoro impegnato nell'attività

Il gruppo di ricerca impegnato nel progetto è composto da professori e ricercatori con competenze avanzate nell'ambito dell'ingegneria meccanica e, in particolare, degli impianti industriali. Di seguito si riporta il curriculum scientifico del gruppo di lavoro impegnato nell'attività.

10.1 Filippo De Carlo

Filippo De Carlo si è laureato con lode il 22 aprile 1998 in ingegneria meccanica presso l'Università degli Studi di Firenze, discutendo la tesi dal titolo: Valutazione tecnico economica di metodologie FMECA nella gestione della manutenzione degli impianti di servizio.

Dal 1998 è iscritto nell'albo professionale degli Ingegneri della provincia di Firenze al n.4006.

Nel 1999 è stato titolare di un assegno di ricerca in "Ingegneria dell'affidabilità, manutenzione e logistica".

Nel 2003 è stato nominato Dottore di Ricerca discutendo la tesi dal titolo: "un approccio integrato ai problemi affidabilistico-manutentivi: un caso di studio relativo all'etr500".

Dal 2006 a oggi è Professore Associato di Impianti Industriali presso il Dipartimento DIEF.

È autore di oltre 50 pubblicazioni scientifiche su congressi e riviste internazionali.

Le aree di interesse della attività di ricerca riguardano l'impiantistica industriale, la manutenzione, la sicurezza e il rischio industriale e la gestione dell'energia.

10.2 Mario Tucci

Nato a Firenze il 14 novembre 1958, Laureatosi con il massimo dei voti e lode nel 1985 presso l'Università di Firenze in Ingegneria meccanica, con un curriculum di studi indirizzato all'automazione e all'uso della simulazione di ricerca operativa per la progettazione e la gestione degli impianti industriali, ha successivamente conseguito il titolo di Dottore di Ricerca nel 1989. È stato prima ricercatore presso il Dipartimento di Energetica Sergio Stecco è dell'Università di Firenze per le discipline di impiantistica industriale, svolgendo seminari ed esercitazioni sui corsi corrispondenti e seguendo numerose tesi sulla gestione della produzione e della logistica. Dal 1992 è stato professore associato presso lo stesso Dipartimento. Dal 2000 è stato prima professore Straordinario, e dal 2003 Professore Ordinario. Ha la titolarità della cattedra di "Gestione degli impianti industriali" per i corsi di laurea in Ingegneria Gestionale. Attualmente insegna anche "Sicurezza degli impianti industriali", Gestione della Qualità e Sistemi di Gestione Ambientale.

È stato membro e componente del consiglio nazionale dell'ANIMP (Associazione Nazionale di Impiantistica Industriale) fino al 2007, membro del board del WG5.7 di IFIP (Internation Federation for Information Processing). È autore di numerosi lavori pubblicati su riviste nazionali ed internazionali per larga parte riguardanti tematiche di impiantistica, simulazione, gestione della produzione, logistica, affidabilità e manutenzione, ricerca operativa.

È docente del Master in Enginerring and Contracting, e del Master Executive in Gestione della Manutenzione Industriale presso il MIP del Politecnico di Milano.

È stato coordinatore del Dottorato in Ingegneria Industriale e dell'Affidabilità, all'interno della Scuola di Dottorato in Ingegneria Industriale dell'Università di Firenze, ed è ora coordinatore dell'indirizzo omonimo nel Dottorato in Ingegneria Industriale che è nato dalla scuola.

È stato direttore e docente del Master di primo livello in Project Management, che nel 2007-2008 si è svolto su progetto Mercurio.

Dal settembre 2007 è presidente dei Corsi di Laurea Triennale e Specialistica in Ingegneria Gestionale

È direttore del Progetto triennale di Formazione per Safety Manager, che raggruppa i tre atenei toscani, la Regione Toscana e l'INAIL.

È coordinatore del Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale nato dalla scuola di Ingegneria.

10.3 Alessandra Cantini

Alessandra Cantini ha conseguito la Laurea Magistrale Ingegneria Meccanica con voto 110/110, lode e menzione alla carriera scolastica il 9 aprile 2019, presso la Scuola di Ingegneria dell'Università degli Studi di

Firenze, discutendo la tesi dal titolo: “Spare parts management in the presence of multiple warehouses: proposal of a bi-criteria ABC model”.

Da novembre 2018 a ottobre 2021 ha lavorato come Ingegnere a prestazione occasionale presso l’azienda Smartoperations S.P.A, dove si è occupata di progetti afferenti alle tematiche di logistica e gestione dei magazzini, manutenzione e affidabilità, layout planning e data mining.

A ottobre 2019 ha ottenuto l’abilitazione all’esercizio della professione di ingegnere.

Da novembre 2019 è iscritta al Dottorato di ricerca in Cotutela e, pertanto, risulta dottoranda in Ingegneria Industriale presso l’Università di Firenze (curriculum “Ingegneria Industriale e dell’affidabilità”, ciclo XXXV, Dipartimento di ingegneria Industriale DIEF) e in Production Management presso l’Università Norvegese delle Scienze e delle Tecnologie (Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale). Nel suo corso di dottorato, approfondisce tematiche connesse alla configurazione di Supply Chain di parti di ricambio e allo sviluppo di modelli logistici di gestione degli inventari nei magazzini di ricambi.

È autrice di 8 pubblicazioni scientifiche su riviste internazionali.

10.4 Leonardo Leoni

Leonardo Leoni ha conseguito la Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica (curriculum gestionale produttivo) con voto 110/110, lode e menzione alla carriera il 29 ottobre 2017, presso la Scuola di Ingegneria dell’Università degli Studi di Firenze, discutendo la tesi dal titolo: “Application of Monte Carlo Approach and Bayesian network to a regulation and measuring plant of methane gas”.

Ha conseguito la Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica (curriculum gestionale e produttivo) con voto 110/110, lode ed encomio solenne il 26 febbraio 2020, presso la Scuola di Ingegneria dell’Università degli Studi di Firenze, discutendo la tesi dal titolo: “Comparison of risk-based maintenance approaches applied to a natural gas regulating and metering station”.

Da settembre 2019 a dicembre 2019 ha svolto un tirocinio curricolare presso la Norwegian University of Science and Technology (NTNU-Trondheim). Durante il tirocinio si è occupato di tecniche manutentive atte a ridurre il rischio derivante dai processi in cui vengono gestite sostanze pericolose.

A settembre 2020 ha ottenuto l’abilitazione all’esercizio della professione di ingegnere industriale con voto 58/60.

Da novembre 2020 è iscritto al Dottorato di ricerca denominato “Smart Industry” organizzato congiuntamente dall’Università degli Studi di Pisa, dall’Università degli Studi di Firenze e dall’Università degli studi di Siena. Nel percorso di dottorato approfondisce la seguente tematica: “Risk and reliability analysis of hazardous plant adopting a Smart Industry Approach”.

È autore di 9 pubblicazioni scientifiche su riviste internazionali.