



Ricerca di Sistema elettrico

# Assessment tecnologico per la caratterizzazione energetica dei macchinari e della maturità tecnologica di alcuni settori manifatturieri

Analisi della letteratura tecnico-scientifica di riferimento

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



ASSESSMENT TECNOLOGICO PER LA CARATTERIZZAZIONE ENERGETICA DEI MACCHINARI E DELLA  
MATURITÀ TECNOLOGICA DI ALCUNI SETTORI MANIFATTURIERI:  
Analisi della letteratura tecnico-scientifica di riferimento

Alessandra Cantini, Filippo De Carlo, Leonardo Leoni, Andrea Navicelli, Mario Tucci  
(Università degli Studi di Firenze - UNIFI)

Aprile 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 - II 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: LA4.14 - 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.....	8
1 INTRODUZIONE.....	9
2 ELENCO DEI SETTORI MANIFATTURIERI DA CONSIDERARE NELL'ANALISI E DEI CRITERI ADOPERATI PER EFFETTUARE LA SELEZIONE DEI SETTORI DA ANALIZZARE.....	10
3 LISTA DELLE PUBBLICAZIONI UTILI ALL'ANALISI, CLASSIFICATE IN BASE AL LORO ANNO DI PUBBLICAZIONE, AL LORO AUTORE E ALLA RIVISTA DI RIFERIMENTO.....	12
4 ELENCO E BREVE DESCRIZIONE DELLE TECNOLOGIE PIÙ CRITICHE PER I SETTORI CONSIDERATI NELL'ANALISI.....	13
4.1 VETRERIE.....	15
4.1.1 <i>Principali processi di trasformazione del vetro</i> .....	15
4.1.2 <i>Ridurre i consumi energetici</i> .....	16
4.1.2.1 Macchine ad alte prestazioni.....	17
4.1.2.2 Caldaie a condensazione.....	18
4.1.2.3 Bruciatori tecnologicamente avanzati.....	19
4.1.2.4 Inverter.....	19
4.1.2.5 Motori ad alta efficienza.....	19
4.1.2.6 Ottimizzatori di tensione ed energia elettrica.....	20
4.1.2.7 Regolatori di pressione.....	20
4.1.2.8 Coibentazione delle linee di estrusione/iniezione.....	20
4.1.3 <i>Ridurre le emissioni di polvere</i> .....	20
4.1.3.1 Precipitatori elettrostatici.....	21
4.1.3.2 Filtri a maniche.....	22
4.1.3.3 Forni a fusione elettrica.....	22
4.1.4 <i>Ridurre le emissioni di NO<sub>x</sub></i> .....	22
4.1.4.1 Sistema di ricircolo dei fumi e bruciatori Low-NO <sub>x</sub> .....	22
4.1.4.2 Forni dal design modificato.....	23
4.1.4.3 Forni a fusione elettrica.....	23
4.1.4.4 Dispositivi per l'iniezione di combustibili fossili nei gas di scarico.....	23
4.1.4.5 Dispositivi per la riduzione catalitica selettiva (Selective Catalytic Reduction - SCR).....	23
4.1.4.6 Sistemi di controllo della combustione.....	23
4.1.5 <i>Ridurre le emissioni di SO<sub>x</sub>, HCl e HF</i> .....	23
4.1.5.1 Sistema di lavaggio a secco (o semi-secco) adoperato in combinazione con un sistema di rimozione delle polveri.....	24
4.1.6 <i>Ridurre le emissioni di metallo</i> .....	25
4.1.6.1 Sistema di filtraggio.....	25
4.1.6.2 Sistema di lavaggio a secco (o a semi-secco) adoperato in combinazione con un sistema di rimozione delle polveri.....	25
4.1.7 <i>Ridurre le emissioni di gas combinati quali SO<sub>x</sub>, HCl, HF e composti del boro</i> .....	25
4.1.7.1 Sistemi di lavaggio a umido (wet scrubbers).....	25
4.1.8 <i>Ridurre le emissioni di sostanze gassose e liquide combinate</i> .....	26
4.1.8.1 Sistemi di lavaggio a umido (wet scrubbers).....	26
4.1.8.2 Precipitatori elettrostatici a umido.....	26
4.1.8.3 Sistemi di filtraggio a maniche.....	26
4.1.9 <i>Ridurre le emissioni di H<sub>2</sub>S e di composti organici volatili (VOC)</i> .....	26
4.1.9.1 Sistema di incenerimento dei gas di scarico.....	27
4.2 CEMENTIFICI.....	28
4.2.1 <i>Processo di produzione del cemento</i> .....	28
4.2.2 <i>Ridurre il consumo energetico</i> .....	30
4.2.2.1 Dosatori gravimetrici ed alimentatori di combustibili solidi.....	30
4.2.2.2 Sistemi di preriscaldamento e precalcinazione.....	30
4.2.2.3 Sistemi di recupero del calore in eccesso dai forni.....	30
4.2.2.4 Sistemi di bypass.....	30
4.2.3 <i>Ridurre le emissioni di polvere</i> .....	30
4.2.3.1 Precipitatori elettrostatici.....	30

4.2.3.2	Filtri a tessuto .....	31
4.2.3.3	Filtri ibridi.....	31
4.2.4	<b>Ridurre le emissioni di NO<sub>x</sub></b> .....	31
4.2.4.1	Sistemi di raffreddamento della fiamma .....	31
4.2.4.2	Brucciatori a basse emissioni di NO <sub>x</sub> .....	32
4.2.4.3	Impianti di tipo mid-klin firing .....	32
4.2.4.4	Combustione a stadi (combustibili convenzionali o di scarto), anche in combinazione con un precalcinatore e l'uso di un mix di combustibili ottimizzato.....	32
4.2.4.5	SNCR .....	33
4.2.4.6	SCR.....	33
4.2.5	<b>Ridurre le emissioni di SO<sub>x</sub></b> .....	33
4.2.5.1	Sistemi di abbattimento a umido .....	33
4.3	<b>CARTIERE</b> .....	34
4.3.1	<b>Processo di produzione della carta:</b> .....	34
4.3.2	<b>Ridurre il consumo energetico</b> .....	37
4.3.2.1	Sistema di gestione dell'energia .....	37
4.3.2.2	Inceneritori per recupero energia .....	37
4.3.2.3	Impianto di cogenerazione di calore ed energia.....	37
4.3.2.4	Sistema di riutilizzo del calore in eccesso .....	38
4.3.2.5	Termocompressori.....	38
4.3.2.6	Coibentazione condutture.....	38
4.3.2.7	Sistemi sottovuoto per la disidratazione efficiente .....	38
4.3.2.8	Motori, pompe e agitatori elettrici ad alta efficienza .....	38
4.3.2.9	Inverter .....	38
4.3.2.10	Valvole di riduzione della pressione .....	38
4.3.3	<b>Ridurre le emissioni di polveri</b> .....	38
4.3.3.1	Precipitatore elettrostatico (ESP) .....	38
4.3.3.2	Scrubber alcalini .....	38
4.3.4	<b>Ridurre le emissioni di No<sub>x</sub></b> .....	39
4.3.4.1	Sistemi di controllo della combustione.....	39
4.3.4.2	Incenerimento per fasi.....	39
4.3.4.3	Brucciatore a bassa emissione di NO <sub>x</sub> .....	39
4.3.4.4	Sistema di iniezione graduale di liquor esausto.....	39
4.3.4.5	Riduzione non catalitica selettiva (SNCR) .....	39
4.3.5	<b>Ridurre le emissioni di SO<sub>2</sub>/TRS</b> .....	39
4.3.5.1	Sistemi di ottimizzazione della combustione.....	39
4.3.5.2	Sistemi di controllo del tenore di Na <sub>2</sub> S nell'apporto di fango calcareo.....	40
4.3.5.3	Sistemi di raccolta e recupero delle emissioni di SO <sub>2</sub> .....	40
4.3.5.4	Sistemi per l'incenerimento dei gas odorigeni e dei TRS .....	40
4.3.5.5	Caldaia a recupero per l'incenerimento dei gas debolmente odorigeni.....	40
4.3.5.6	Sistema di abbattimento ad umido .....	40
4.3.5.7	ESP o multicicloni con scrubber Venturi multistadio o scrubber multistadio in equicorrente con doppia immissione 40	
4.3.6	<b>Ridurre l'uso di acqua fresca/flusso di acque reflue nonché il carico inquinante nelle acque reflue</b> .....	40
4.3.6.1	Tamburi rotanti per la scortecciatura a secco .....	40
4.3.6.2	Sistemi per lo sbiancamento senza utilizzo di cloro (TCF) .....	41
4.3.6.3	Sistemi per lo sbiancamento moderno senza utilizzo di cloro elementare (ECF) .....	41
4.3.6.4	Sistemi di delignificazione estesa .....	41
4.3.6.5	Sistemi per la cottura modificata estesa.....	41
4.3.6.6	Sistemi di delignificazione a ossigeno.....	41
4.3.6.7	Sistemi di vaglio e lavaggio efficienti in ciclo chiuso della pasta greggia .....	41
4.3.6.8	Sistemi di riciclo parziale delle acque di lavorazione nell'impianto di sbiancamento.....	41
4.3.6.9	Sistemi per il monitoraggio e contenimento delle perdite, anche con un recupero delle sostanze chimiche e dell'energia 42	
4.3.6.10	Sistemi per il mantenimento di una sufficiente evaporazione del liquor nero e capacità della caldaia di recupero di far fronte ai picchi di carico .....	42
4.3.6.11	Sistemi di estrazione dei condensati contaminati (incrostazioni) e loro riutilizzo nel processo .....	42
4.3.6.12	Sistemi di recupero degli effluenti destinati all'evaporazione e all'incenerimento provenienti dalla fase di estrazione alcalina a caldo .....	42
4.3.6.13	Sistemi di ricircolo dei liquidi di lavaggio provenienti dalle fasi comprese fra il pretrattamento sbiancante e il lavaggio della pasta greggia e l'evaporazione per ridurre le emissioni del pretrattamento sbiancante a base di MgO .....	42
4.3.6.14	Apparati per il flusso in controcorrente dell'acqua di processo .....	43

4.3.6.15	Sistemi per la separazione dei cicli .....	43
4.3.6.16	Sistemi di sbiancamento ad alta consistenza (perossido).....	43
4.3.6.17	Sistemi di recupero di fibre e cariche e trattamento delle acque bianche .....	43
4.3.6.18	Sistemi di chiarificazione delle acque bianche.....	43
4.3.6.19	Sistemi di ricircolo dell'acqua .....	43
4.3.6.20	Ottimizzazione della progettazione e della costruzione di serbatoi e tine (fabbricazione della carta) .....	44
4.3.6.21	Fase di lavaggio prima di raffinare la pasta meccanica di conifere .....	44
4.3.6.22	Sistemi per lo sbiancamento in ciclo chiuso .....	44
4.3.6.23	Dispositivi per l'adeguamento del pH nel liquor diluito prima/all'interno dell'impianto di evaporazione .....	44
4.3.6.24	Sistemi di trattamento anaerobico dei condensati provenienti dagli evaporatori .....	44
4.3.6.25	Sistemi di estrazione e recupero di SO <sub>2</sub> dai condensati provenienti dagli evaporatori. ....	44
4.3.6.26	Sistemi di prevenzione ed eliminazione dei biofilm con metodi che minimizzano le emissioni di biocidi.....	44
4.3.6.27	Sistemi di rimozione del calcio dall'acqua di processo con precipitazione controllata del carbonato di calcio ..	44
4.3.6.28	Apparati per il trattamento delle acque reflue.....	45
4.3.6.29	Apparati per il trattamento primario.....	45
4.3.6.30	Apparati per il trattamento secondario (biologico) .....	45
4.3.6.31	Apparati per il trattamento aerobico .....	45
4.3.6.32	Apparati per il trattamento combinato anaerobico/aerobico .....	45
4.3.6.33	Apparati per il trattamento terziario .....	45
4.3.6.34	Impianto di trattamento biologico ottimizzato .....	45
4.3.7	<i>Prevenire la generazione di rifiuti e gestione degli stessi</i> .....	45
4.3.7.1	Sistemi di disidratazione dei rifiuti .....	46
4.3.7.2	Sistemi di frantumazione degli scarti.....	46
4.3.7.3	Inceneritori o in impianti a biomassa .....	46
4.4	INDUSTRIE DI LAVORAZIONE DELLA PLASTICA .....	47
4.4.1	<i>Principali processi di trasformazione della plastica</i> .....	47
4.4.2	<i>Ridurre i consumi energetici</i> .....	48
4.4.2.1	Caldaie a condensazione.....	49
4.4.2.2	Cinghie dentate .....	49
4.4.2.3	Coibentazione delle linee di estrusione/iniezione .....	49
4.4.2.4	Inverter .....	50
4.4.2.5	Motori ad alta efficienza.....	50
4.4.2.6	Motori a corrente alternata (CA) con inverter.....	50
4.4.2.7	Ottimizzatori di tensione ed energia elettrica .....	50
4.4.2.8	Sistemi di recupero termico dai compressori .....	50
4.4.2.9	Sistemi di cogenerazione .....	51
4.4.2.10	Presse elettriche .....	51
4.4.2.11	Presse ibride .....	51
4.4.3	<i>Ridurre le emissioni di gas inquinanti (NO<sub>x</sub>, CO, VOC ecc.)</i> .....	52
4.4.3.1	Sistemi di aspirazione e sistemi di post-trattamento dei gas di scarico.....	52
4.4.3.2	Caldaie a condensazione.....	52
4.4.3.3	Valvole di sicurezza con tenuta a soffiutto o a doppia tenuta .....	52
4.4.3.4	Dischi di rottura .....	53
4.4.4	<i>Ridurre l'inquinamento dell'ambiente causato da acque reflue</i> .....	53
4.4.4.1	Sistemi di drenaggio e fognatura per l'asportazione dei liquami seguiti da sistemi per lo smaltimento dei liquami .....	53
4.4.4.2	Caldaie a condensazione.....	53
4.4.5	<i>Ridurre le emissioni di polvere</i> .....	53
4.4.5.1	Cycloni .....	54
4.4.5.2	Filtri.....	54
4.4.5.3	Sistemi di lavaggio a umido .....	54
4.5	FONDERIE E ACCIAIERIE .....	55
4.5.1	<i>Principali processi di estrazione del ferro</i> .....	55
4.5.2	<i>Principali processi di trasformazione della ghisa in acciaio</i> .....	56
4.5.3	<i>Ridurre i consumi energetici</i> .....	59
4.5.3.1	Macchine ad alte prestazioni.....	60
4.5.3.2	Sistemi di recupero termico ed eventuali sistemi di preriscaldamento.....	61
4.5.3.3	Sistemi di ottimizzazione e controllo dei processi .....	61
4.5.3.4	Sistemi di coibentazione nelle condutture di vapore e di acqua calda .....	62
4.5.3.5	Pompe di calore e pannelli solari.....	62
4.5.3.6	Turbine per lo sfruttamento della pressione dei gas di scarico dell'altoforno .....	62

4.5.3.7	Gasometri .....	62
4.5.4	<i>Ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub></i> .....	62
4.5.4.1	Sistemi di aspirazione dei fumi di scarico uniti a sistemi di filtraggio .....	63
4.5.4.2	Sistemi di recupero termico.....	63
4.5.4.3	Sistemi per il CDQ .....	63
4.5.5	<i>Ridurre i residui di lavorazione</i> .....	64
4.5.5.1	Sistemi di recupero dei residui .....	64
4.5.5.2	Sistemi di raccolta e stoccaggio dei residui .....	64
4.5.6	<i>Ridurre le emissioni di SO<sub>x</sub></i> .....	64
4.5.6.1	Sistemi di iniezione di adsorbenti nelle linee di sinterizzazione .....	64
4.5.6.2	Sistemi di lavaggio a umido o a secco .....	64
4.5.7	<i>Ridurre le emissioni di polvere</i> .....	65
4.5.7.1	Sistemi di aspirazione dei gas e sistemi di filtraggio .....	65
4.5.7.2	Sistemi di iniezione di acqua nebulizzata seguiti da sistemi di filtraggio .....	65
4.5.7.3	Sistemi di trasporto, macinatori e tramogge che possono essere coperti.....	65
4.5.7.4	Sistemi per il CDQ .....	65
4.5.8	<i>Ridurre le emissioni di NO<sub>x</sub></i> .....	65
4.5.8.1	Sistemi di ricircolo dei gas di scarico.....	65
4.5.8.2	Brucciatori Low-NO <sub>x</sub> .....	66
4.5.8.3	Sistemi di lavaggio a secco.....	66
4.5.8.4	Dispositivi per la SCR.....	66
4.5.9	<i>Ridurre l'inquinamento dell'ambiente causato da acque reflue</i> .....	66
4.5.9.1	Dispositivi di intercettazione, filtraggio o sedimentazione dell'olio .....	66
4.5.9.2	Sistemi di ricircolo delle acque reflue .....	66
4.5.9.3	Sistemi di trattamento delle acque reflue .....	66
4.5.10	<i>Ridurre le emissioni di rumore</i> .....	66
4.5.10.1	Materiali fonoassorbenti .....	67
4.5.10.2	Sistemi di sollevamento e trasporto della carica di materia prima nei forni atti a prevenire urti meccanici .....	67
4.5.10.3	Silenziatori ai camini di scarico dei forni.....	67
5	MODELLO DI ASSESSMENT PER LA RACCOLTA DI DATI E INFORMAZIONI E PER LA VALUTAZIONE DEL LIVELLO DI MATURITÀ .....	68
6	CONCLUSIONI.....	69
	APPENDICE A: COMPLETAMENTO OBIETTIVI ANNO 2019 .....	69
	PREMESSA .....	69
	MODELLO DI ASSESSMENT PER LA RACCOLTA DI DATI E INFORMAZIONI E PER LA VALUTAZIONE DEL LIVELLO DI MATURITÀ .....	69
	IL METODO AHP – DESCRIZIONE DEL METODO DI APPLICAZIONE E UTILIZZO .....	71
	INDIVIDUAZIONE DELLE TECNOLOGIE DISPONIBILI .....	73
	DEFINIZIONE DIMENSIONI DI VALUTAZIONE .....	80
	VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI.....	81
	DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DECISIONALI .....	82
	APPLICAZIONE DEL METODO E VALUTAZIONE DEI RISULTATI .....	83
	SCELTA DELL'ALTERNATIVA MIGLIORE .....	84
	SINTESI DEL FUNZIONAMENTO DEL MODELLO DI ASSESSMENT .....	84
7	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	85
8	ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	90
9	CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO IMPEGNATO NELL'ATTIVITÀ.....	91
9.1	FILIPPO DE CARLO .....	91
9.2	MARIO TUCCI .....	91
9.3	ALESSANDRA CANTINI .....	92
9.4	ANDREA NAVICELLI .....	92
9.5	LEONARDO LEONI.....	93



## Sommario

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Analisi del gap tecnologico nella gestione energetica nelle aziende soggetto all'obbligo di diagnosi".

Il presente documento unisce due documenti: il report che UNIFI ha inviato nell'anno 2019 e il documento di completamento delle attività 2019 che UNIFI ha inviato nel 2020.

Al fine di modificare meno possibile i documenti originali inviati, i due report sono stati qui uniti come segue: prima è stato inserito il report 2019 (Capitoli 1-6). Dopo, è stato accodato il documento di completamento delle attività 2019 (Appendice A). L'appendice A è il completamento delle attività che nel presente documento sono descritte nel Capitolo 5).

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. 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 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.

La presente relazione ha come obiettivo quello di selezionare alcune tipologie di aziende manifatturiere italiane (le più "energy consuming") e di individuare e descrivere le "Best Available Technologies" proposte dalla letteratura tecnico-scientifica di riferimento, da installare nelle aziende analizzate al fine di ridurre i consumi energetici nazionali, pur rispettando i concetti di sostenibilità.

L'analisi bibliografica svolta è stata utile per stabilire lo stato dell'arte circa le migliori tecnologie disponibili. Essa è stata svolta analizzando un cospicuo numero di articoli tecnico-scientifici ed ha consentito di elencare, per ogni settore industriale analizzato, i dispositivi da installare per ridurre i consumi energetici e i dispositivi da installare per limitare l'impatto ambientale. Per ciascun dispositivo sono stati forniti una breve descrizione del funzionamento e una sintesi dei principali vantaggi e svantaggi.

I risultati dell'analisi potranno essere utilizzati, in un secondo momento, come termine di riferimento per esaminare il quadro italiano e stabilire il livello di maturità energetica delle aziende manifatturiere del territorio nazionale. Essi, inoltre, potranno essere utilizzati per consigliare alle aziende sottoposte ad assessment quali attività migliorative implementare per trovare un buon compromesso tra i consumi energetici e l'impatto ambientale e ottimizzare le performance dell'intero impianto.



## 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: "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 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 vari obiettivi e sotto-attività da svolgere anno dopo anno. Relativamente all'anno 2019, gli obiettivi da centrare sono:

- Definire lo stato dell'arte circa le Best Available Technologies nei settori manifatturieri selezionati, mediante la consultazione della bibliografia tecnico-scientifica di riferimento;
- Sviluppare un modello di assessment da sottoporre alle aziende italiane.

Le sotto-attività da svolgere per raggiungere gli obiettivi del 2019 possono essere riassunte come segue:

- Selezione dei settori produttivi manifatturieri da considerare nell'analisi (attività da svolgere in collaborazione con ENEA);
- Studio della letteratura tecnico-scientifica circa i macchinari e le tecnologie più "energy consuming" e le metodologie di mappatura e analisi degli usi energetici associati a ciascun asset industriale;
- Individuazione delle tecnologie più critiche (dispositivi e macchinari più "energy consuming" e/o ad elevato impatto ambientale);
- Definizione della struttura del modello di assessment destinato alla caratterizzazione energetica dei macchinari e all'analisi della maturità delle tecnologie aziendali.

Alla luce di tali attività, gli output attesi per il 2019 sono:

- Elenco dei settori manifatturieri da considerare nell'analisi e dei criteri adoperati per effettuare la selezione di tali settori;
- Lista delle pubblicazioni utili all'analisi, classificate in base al loro anno di pubblicazione, al loro autore e alla rivista di riferimento;
- Elenco e breve descrizione delle tecnologie più critiche per i settori considerati nell'analisi;
- Modello di assessment per la raccolta di dati e informazioni e per la valutazione del livello di maturità energetica delle aziende analizzate;
- Report delle attività svolte e dei risultati conseguiti.

Il presente documento corrisponde al report di fine attività 2019 ed è a tutti gli effetti uno degli output attesi. Nel presente documento sono riassunti i risultati operativi conseguiti nell'anno 2019 e le modalità con cui tali risultati sono stati ottenuti.

Di seguito, per chiarezza, nel presentare i risultati delle attività di ricerca svolte si segue l'ordine degli output precedentemente elencati.

## 2 Elenco dei settori manifatturieri da considerare nell'analisi e dei criteri adoperati per effettuare la selezione dei settori da analizzare

Il progetto in questione riguarda l'analisi del livello di maturità energetica dei principali settori manifatturieri italiani.

Per selezionare i settori manifatturieri su cui concentrare le analisi, UNIFI ha, innanzitutto, preso in considerazione soltanto aziende aventi codice ATECO afferente al settore manifatturiero. Per questa ragione, in un primo momento UNIFI ha considerato le sole aziende di processo, cioè le aziende a ciclo tecnologico obbligato (codici ATECO da 10 a 32 riepilogati in Tabella 1). Tutti i restanti settori sono stati scartati e non considerati nelle analisi.

**Tabella 1: aziende manifatturiere prese in considerazione all'inizio dell'analisi.**

<b>Codice ATECO</b>	<b>Tipologia di azienda manifatturiera</b>
10	Industria alimentare
11	Industria delle bevande
12	Industria del tabacco
13	Industria tessile
14	Confezione di articoli di abbigliamento; confezione di articoli in pelle e pelliccia
15	Fabbricazione di articoli in pelle e simili
16	Industria del legno e dei prodotti in legno e sughero (esclusi i mobili); fabbricazione di articoli in paglia e materiali da intreccio
17	Fabbricazione di carta e di prodotti di carta
18	Stampa e riproduzione di supporti registrati
19	Fabbricazione di coke e prodotti derivanti dalla raffinazione del petrolio
20	Fabbricazione di prodotti chimici
21	Fabbricazione di prodotti farmaceutici di base e di preparati farmaceutici
22	Fabbricazione di articoli in gomma e materie plastiche
23	Fabbricazione di altri prodotti della lavorazione di minerali non metalliferi
24	Metallurgia
25	Fabbricazione di prodotti in metallo (esclusi macchinari e attrezzature)
26	Fabbricazione di computer e prodotti di elettronica e ottica; apparecchi elettromedicali, apparecchi di misurazione e di orologi
27	Fabbricazione di apparecchiature elettriche ed apparecchiature per uso domestico non elettriche
28	Fabbricazione di macchinari ed apparecchiature NCA
29	Fabbricazione di autoveicoli, rimorchi e semirimorchi
30	Fabbricazione di altri mezzi di trasporto
31	Fabbricazione di mobili
32	Altre industrie manifatturiere

Dovendo, poi, svolgere una ricerca afferente alle industrie ad alto consumo energivoro maggiormente presenti sul territorio italiano (mirata a individuare i macchinari "energy consuming" e ad elevato impatto sull'ambiente e a costruire un modello di auto-valutazione del livello di maturità energetica), UNIFI ha operato un'ulteriore scrematura e ha ridotto il numero di settori da analizzare.

Confrontando le aziende di Tabella 2 con le aziende presenti sul territorio italiano, sono stati definiti i settori da considerare. Le aziende maggiormente presenti sul territorio italiano sono state definite prendendo a riferimento sia la letteratura scientifica, sia tutte le analisi svolte da ENEA negli ultimi anni (dal 2015 in poi), dalle quali è stato possibile esaminare la numerosità e la tipologia delle aziende presenti in Italia.

Si ricorda che ENEA da più di 30 anni ha svolto molteplici attività di ricerca e sviluppo nel settore energetico e delle aziende manifatturiere italiane, come riportato sul sito ufficiale:

[https://www.enea.it/it/Ricerca\\_sviluppo/energia/efficienza-energetica](https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/energia/efficienza-energetica).

Adottando come punto di partenza l'esperienza pluriennale di ENEA e i risultati delle analisi che fino ad ora ha condotto sul territorio italiano, prendendo spunto dalle considerazioni riportate in letteratura scientifica [1], UNIFI ha individuato i settori da considerare. L'elenco dei settori individuati al termine di questa attività è riportato di seguito:

1. **Vetriere;**
2. **Cementifici;**
3. **Cartiere;**
4. **Industrie siderurgiche (fonderie e acciaierie)**
  - Queste due tipologie di industrie si analizzano insieme perché prevedono processi di lavorazione simili e, dunque, dispongono di macchinari e di problematiche energetiche/ambientali simili;
5. **Industrie di lavorazione della plastica.**

A partire dai settori elencati e focalizzandosi su di essi, UNIFI ha svolto le attività di analisi della letteratura tecnico-scientifica e ricerca delle migliori tecnologie disponibili. I risultati di tali attività sono descritti nei Capitoli seguenti del presente documento.

### 3 Lista delle pubblicazioni utili all'analisi, classificate in base al loro anno di pubblicazione, al loro autore e alla rivista di riferimento

Al fine di definire le problematiche energetiche e ambientali che affliggono ognuno dei settori considerati (Capitolo 2) e per individuare le relative Best Available Technologies, UNIFI ha consultato approfonditamente la letteratura tecnico-scientifica esistente. Quest'ultima è stata reperita in parte nei principali database online (Google Scholar, IEEE, Scopus, Science Direct, ecc.), in parte sul sito ufficiale dell'Unione Europea:

<https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/reference-reports/best-available-techniques-bat-reference-documentformanufacture-glassindustrial-emissions-directive>.

Il sito indicato contiene le **“Best Available Techniques Reference Documents - (BREF)”**, ossia documenti redatti dall'Unione Europea (UE) al fine di consentire lo scambio di informazioni tecnico-scientifiche tra associazioni dei vari settori industriali, organizzazioni non governative (non-government organizations – NGOs) appartenenti a diversi stati membri e l'ente “European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau – (IPCC/EIPPCB)”, che si occupa di promuovere le BAT all'interno dell'Unione Europea, di ridurre l'inquinamento atmosferico e di incentivare un monitoraggio efficace della qualità dell'aria.

All'interno delle BREF sono illustrate le **“Best Available Techniques – (BAT)”**, ossia “the most effective and advanced stage in the development of an activity and its methods of operation, which indicate the practical suitability of particular techniques for providing, in principle, the basis for emission limit values, and in the case of an industrial emissions directive activity other additional licence conditions, designed to prevent or eliminate or, where that is not practicable, generally to reduce an emission and its impact on the environment as a whole”.

L'analisi della letteratura è stata utile per stabilire lo stato dell'arte circa le migliori tecnologie disponibili. Essa è stata effettuata reperendo un cospicuo numero di articoli tecnico-scientifici (circa 15000 fonti), che sono stati individuati inserendo nei database parole chiavi e frasi d'interesse. Vista la mole degli articoli, si sono stati esclusi dalle analisi tutti gli articoli non disponibili in modalità “full text” e tutti gli articoli il cui corpo principale non fosse scritto in lingua italiana o inglese. Inoltre, sono stati scartati tutti gli articoli non inerenti all'argomento di interesse (riduzione dei consumi energetici e dell'impatto ambientale dei settori selezionati) e sono stati rimossi i risultati duplicati.

Successivamente, sono stati consultati titolo e/o abstract degli articoli rimasti (circa 3000) e gli articoli più significativi sono stati letti interamente. La ricerca bibliografica così condotta ha fornito più di 90 articoli scientifici utili, il cui contenuto è stato analizzato e usato per definire le migliori tecnologie disponibili in ogni settore scelto.

La lista di tutte le pubblicazioni che sono state adoperate per definire le BAT e le tecnologie critiche di ogni settore è riportata nel Capitolo 7 contenente i riferimenti bibliografici (in calce al presente documento).

## 4 Elenco e breve descrizione delle tecnologie più critiche per i settori considerati nell'analisi

Nell'ultimo decennio il concetto di sostenibilità energetica, a livello industriale, ha assunto sempre maggior rilevanza, suscitando l'interesse della comunità e della ricerca [2]. Quest'argomento è strettamente legato alla sostenibilità ambientale ed economica, in rappresentanza del fatto che possibili migliorie energetiche nei processi industriali possono portare alla riduzione dei danni ambientali e a vantaggi economici [3].

Uno sviluppo energetico accettabile passa attraverso un miglioramento dell'efficienza e della qualità dei processi produttivi, mediante il ricorso a nuove tecnologie, nuovi materiali e nuovi sistemi operativi compatibili con la sicurezza e la salvaguardia dell'ambiente. Ottimizzare il consumo di energia è il primo passo per il raggiungimento degli obiettivi della politica energetica: sostenibilità ambientale ed economica. Per la realizzazione di questi concetti, strettamente legati fra loro, è doveroso intraprendere uno sviluppo ambientale ed energetico sostenibile, ricorrendo all'utilizzo delle migliori tecnologie disponibili. "To achieve low energy intensity and high production efficiency to thereby improve national economic competitiveness, the first step has to start from the industrial energy saving" [1].

Secondo "The International Energy Agency (IEA)" il consumo di energia industriale aumenterà passando da 105 EJ nel 2009 a circa 185 EJ nel 2050. Tuttavia, si stima che mediante l'adozione di tecnologie avanzate, la crescita del consumo energetico industriale nel 2050 potrà essere limitata a 140 EJ.

La direttiva comunitaria 96/61/CE sulla prevenzione e controllo integrati dell'inquinamento, comunemente denominata "Direttiva IPPC" (Integrated Pollution Prevention and Control) [4], è stata adottata nel 1996 dal Consiglio dei Ministri dell'Unione Europea, e trasposta nella legislazione nazionale con il decreto legislativo del 4 agosto 1999, n.372 relativo agli impianti esistenti [5]. Il suo scopo è quello di ottenere una prevenzione e un controllo integrati sull'inquinamento proveniente da diversi settori produttivi, con l'obiettivo di perseguire un elevato livello di protezione dell'ambiente e scaturendo un'esplicita diminuzione dei consumi energetici nei contesti considerati.

La direttiva rappresenta il mezzo normativo che l'Unione Europea si è data per attuare i principi esposti, questo sta a testimonianza del fatto che il concetto di sostenibilità energetica ha assunto e sta assumendo negli anni una crescente importanza a livello globale. Lo strumento messo a disposizione dalla direttiva IPPC per raggiungere lo scopo prefissato consiste nell'applicazione delle migliori tecniche disponibili (Best Available Techniques, BAT) che dovranno costituire il riferimento per fissare dei valori limite di emissione per ogni singolo impianto.

Secondo la definizione data dalla Comunità Europea (sito internet ufficiale), "best available techniques means the most effective and advanced stage in the development of activities and their methods of operation which indicates the practical suitability of particular techniques for providing the basis for emission limit values and other permit conditions designed to prevent and, where that is not practicable, to reduce emissions and the impact on the environment as a whole". Le BAT sono dunque il riferimento in base al quale si deve giudicare l'attuale prestazione ambientale di un impianto esistente oppure valutare la proposta di un nuovo progetto. I nuovi impianti devono essere progettati per avere prestazioni analoghe ai livelli ottenibili con le BAT o persino migliori.

Nella direttiva la Commissione Europea ha stabilito che per ogni settore industriale interessato viene istituito un gruppo di lavoro tecnico europeo, (Technical Working Group -TWG) formato da rappresentanti degli Stati Membri e delle industrie, coordinato dalla stessa Commissione. Il risultato finale di questa attività di scambio di informazioni è un rapporto chiamato BAT Reference Document (BREF), ossia un documento ufficiale che rappresenta un riferimento per le autorità competenti e le imprese che vogliono

agire nel rispetto delle politiche ambientali. Esso contiene informazioni sui processi produttivi dei settori industriali, gli impatti ambientali associati e le migliori tecniche disponibili per la prevenzione o la riduzione dell'inquinamento.

Come specificato sul sito ufficiale dell'UE, le BREF contengono la descrizione delle Best Available Techniques (BAT) che, a loro volta, suggeriscono sia le migliori soluzioni impiantistiche ("technologies") da usare per raggiungere le migliori prestazioni possibili dell'impianto produttivo, sia le procedure ("techniques") da seguire per installare, costruire, gestire, mantenere, controllare e disattivare i processi e le aziende in analisi. Poiché l'obiettivo primario di UNIFI è individuare le migliori tecnologie da consigliare alle aziende elencate nel Capitolo 2, per scrivere il report UNIFI si è focalizzata sulla descrizione delle tecnologie da adottare più che sulla descrizione delle tecniche di gestione e controllo del processo produttivo.

Nel presente Capitolo si riporta, per ciascun settore analizzato, una breve descrizione delle più comuni problematiche di natura energetica e/o ambientale, quindi si illustra come risolvere tali criticità intervenendo sulle tecnologie e seguendo i precetti illustrati nelle BREF (Best Available Techniques Reference documents) e negli articoli della letteratura scientifica.

## 4.1 Vetriere

Per limitare il consumo energetico e diverse problematiche di natura ambientale, negli impianti di produzione del vetro si possono adottare tecniche e tecnologie avanzate.

Poiché l'obiettivo di UNIFI è individuare le migliori tecnologie disponibili, di seguito si illustrano (riportandone una breve descrizione) tutte le tecnologie da adottare per diminuire consumi energetici e limitare emissioni di sostanze inquinanti, di rumore e di altri effetti indesiderati.

Al contrario, invece, non si descrivono le metodologie di controllo dei processi che prescindono dall'utilizzo di dispositivi, macchinari e tecnologie specifiche, infatti ciò esula dallo scopo di UNIFI. Per questo motivo, non si prendono in considerazione attività di controllo delle reazioni chimiche (quali la riduzione del rapporto aria/combustibile o la riduzione della temperatura dell'aria in ingresso alla combustione o, addirittura, la sostituzione dell'aria di combustione con ossigeno puro per ridurre le emissioni di NOx) e non si considerano modalità di selezione delle materie prime da introdurre in ingresso al processo produttivo.

Prima di descrivere le tecnologie più avanzate da utilizzare per ridurre emissioni e consumi energetici, si riporta una breve descrizione del processo di lavorazione del vetro e delle principali tecnologie di lavorazione che lo caratterizzano. Una volta descritti i principali processi di lavorazione, si illustrano ad uno ad uno i problemi che caratterizzano la lavorazione del vetro e si suggeriscono i dispositivi da installare per risolverli.

### 4.1.1 Principali processi di trasformazione del vetro

Il processo di fabbricazione e lavorazione del vetro si articola tipicamente in quattro fasi: fusione, formatura, ricottura e finitura. Queste fasi accomunano i vari impianti di lavorazione del vetro possibili, che sono gli impianti per la produzione di: vetro piano, vetro per contenitori, vetro speciale e fibra di vetro [6].

1. La **fusione** è la prima fase del processo di lavorazione e implica diverse attività [7]:

- Si polverizza e si mescola la carica (formata da componenti diversi tra loro) con rottami di vetro che agiscono da fondente;
- Si elimina l'acqua presente nei componenti di partenza;
- Si dissociano i carbonati e i solfati trasformandoli in ossidi e in anidride carbonica o solforosa. In questa fase potrebbero nascere bolle di gas, che poi andranno rimosse successivamente;
- Si riscalda il materiale in forno, formando una massa fusa più omogenea possibile;
- Si esegue l'affinaggio (o affinazione), cioè si eliminano dalla massa fusa le bollicine di gas presenti, che potrebbero dare origine a difetti nei manufatti preparati. Aggiungendo alla massa fusa piccole percentuali di agenti affinati, si fa aumentare il volume delle bolle e se ne provoca l'espulsione, oppure si diminuisce la solubilità dei gas nel vetro. Durante l'affinaggio le parti della massa non fuse (particelle di polvere o altre sostanze solide) si depositano sul fondo del forno, mentre le bolle di gas salgono sulla superficie della massa. Conclusa questa fase, la massa di vetro fuso presenta composizione chimica e proprietà fisiche uguali in tutti i punti.
- Si opera una decolorazione del vetro mediante l'ossidazione di sali di ferro.
- Si fa riposare il materiale (operazione di riposo o condizionamento) e lo si lascia raffreddare gradualmente fino alla temperatura di formatura (o foggatura).

2. Dopo la fusione si ha la fase di **formatura**, che viene eseguita quando il vetro è ancora fluido e si trova in un campo di temperatura nel quale assume viscosità tale da poter essere lavorato e da conservare la forma impartita senza alterazioni.

3. Poi si ha la fase di **ricottura**, che consiste nel riscaldamento del vetro fino a una temperatura detta "temperatura superiore di ricottura" e nell'eliminazione di eventuali tensioni interne formatesi per

irregolarità di riscaldamento o raffreddamento e di eventuali torsioni generate durante la formatura. Tensioni interne e torsioni, infatti, se non rimosse, renderebbero difficili le successive operazioni di finitura (in particolare, il taglio). La temperatura e la velocità di raffreddamento vengono stabilite in funzione del tipo di vetro e del suo spessore. Dopo aver raggiunto la temperatura superiore di ricottura, il materiale viene mantenuto in tale stato per un periodo di tempo sufficiente ad assicurare il raggiungimento dell'uniformità termica in ogni suo punto. Poi l'oggetto viene raffreddato lentamente fino a una temperatura inferiore di 50 °C a quella di ricottura e, infine, viene portato rapidamente alla temperatura ambiente.

A valle della fase di ricottura vengono operati (se necessari) i trattamenti speciali di siliconatura e solforazione. La siliconatura avviene direttamente nel forno di ricottura, mentre la solforazione viene eseguita effettuando una seconda ricottura del vetro in un ambiente ad alta concentrazione di SO<sub>2</sub> (che serve per aumentare la resistenza chimica del materiale mediante la formazione di silicati alcalini solubili e un conseguente depauperamento superficiale di alcali).

4. Infine, di ha la fase di **finitura**. Le operazioni di finitura possibili sono molte e possono avere natura:
- Meccanica: pulitura, molatura, smerigliatura, intaglio.
  - Chimica: opacificazione (ottenuta tramite acido fluoridrico).
  - Termica: fusione locale per incollaggio di più parti, ricottura, tempra.

La Figura 1 schematizza le fasi principali del processo di produzione del vetro [6].

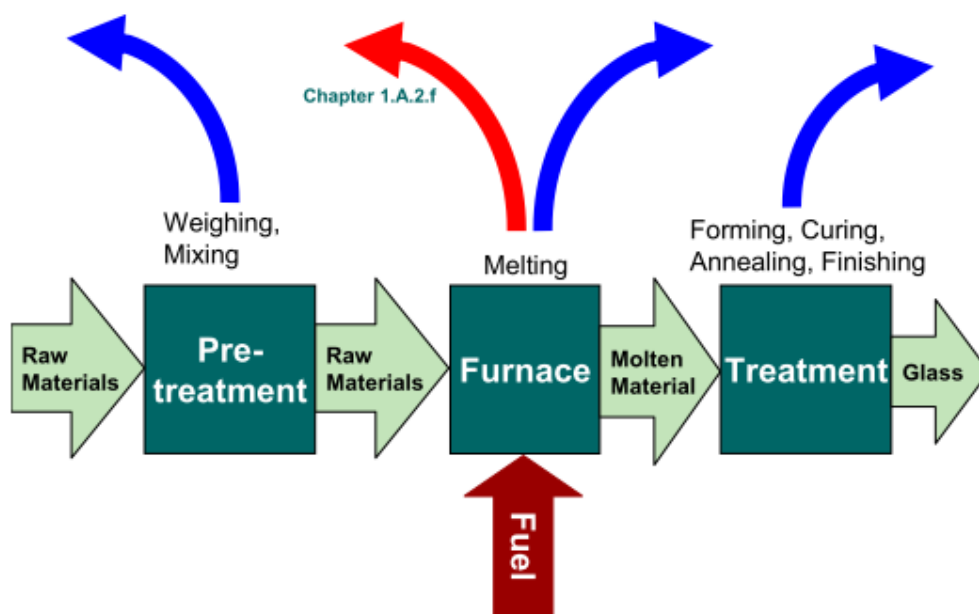


Figura 1: Schema riassuntivo del processo di trasformazione del vetro.

Dal punto di vista termico, la lavorazione del vetro si articola nelle seguenti fasi:

- Innalzamento termico progressivo (grazie all'utilizzo gas metano come combustibile che permette di raggiungere alte temperature). Durata 6 ore.
- Fase iniziale della fusione (fino alla formazione della massa di vetro fuso): 1500 °C. Durata 6 ore.
- 1° fase di affinaggio: 1300 °C. Durata 6 ore.
- 2° fase di affinaggio: 1200 °C. Durata 6 ore.
- Fase di formatura per colata: tra 1100 e 1000 °C. Durata inferiore a 1 ora.
- Fase di formatura per soffiatura e pressatura: inferiore a 1000 °C. Durata di circa 1 ora.

Dopo aver ricordato il ciclo di lavorazione del vetro si illustrano le problematiche ad esso connesse e si riepilogano le migliori tecnologie disponibili per alleviare le criticità energetiche o ambientali.

#### 4.1.2 Ridurre i consumi energetici



“There are two kinds of energies generally used in the industrial processes, namely, heat and electricity. In terms of manufacturing facilities, the former is mainly demanded by boilers, while the latter is mostly used by motors. The common energy-saving measures for boilers are high efficient combustion techniques and excellent performance heat transferring mechanisms, while those for motors are inverters and power control techniques” [1] [8].

Nel caso dell’industria di produzione del vetro i costi energetici sono rilevanti. Ad esempio, nelle aziende di produzione del vetro americane tali costi rappresentano, in media, il 14% dei costi diretti di produzione. Nel 2003, i quattro principali settori di produzione del vetro, cioè vetro piano, vetro per contenitori, vetro speciale e fibra di vetro, hanno speso oltre 600 milioni di dollari per acquistare energia elettrica [9].

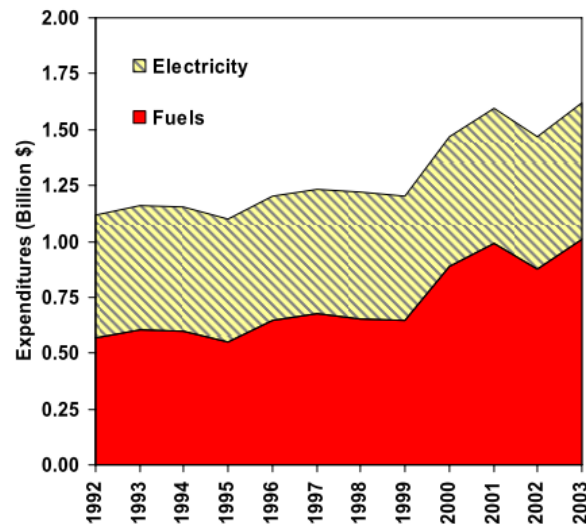


Figura 2: Consumi storici di energia elettrica relativi alle industrie americane di produzione del vetro [7].

L’elettricità viene usata principalmente come energia ausiliaria (booster energy) nelle camere di fusione, ma viene usata anche per azionare le macchine produttive e per alimentare il riscaldamento, le luci, i ventilatori, le pompe e l’aria condizionata nei capannoni industriali [10]. Le tecnologie consigliate per ridurre i consumi elettrici sono:

#### 4.1.2.1 Macchine ad alte prestazioni

“Glass making is a very energy-intensive activity and the choice of energy source, heating technique and heat-recovery method are central to the design of the furnace. The same choices are also some of the most important factors affecting the environmental performance and energy efficiency of the melting operation” [11].

Circa l’80% dell’energia totale usata nel processo manifatturiero di lavorazione del vetro è necessaria per operare i processi di riscaldamento (fondere le materie prime e trasformarle in vetro) [7] [12]. Allora, per limitare il consumo energetico è fondamentale acquistare un forno ad alte prestazioni (efficiente) e, in generale, sostituire spesso i macchinari per avere sempre a disposizione tecnologie dai bassi consumi energetici.

“Process optimization and ensuring that the most productive technologies are in place are key to realizing energy savings in a plant’s operation” [7]. Tra i forni ad alte prestazioni consigliati, ci sono le seguenti tecnologie:

- “vertically-fired furnaces”;
- “regenerative furnaces”, tra cui quelle di tipo SORG Flex Melter;

- “Oxy-fuel furnaces”, tra cui le “tall crown furnaces”
- Forni per fusione a combustione sommersa (“submerged combustion melting”) [13] [14].

#### 4.1.2.2 Caldaie a condensazione

Così come in una caldaia tradizionale, anche in una caldaia a condensazione l’acqua viene scaldata tramite il calore della combustione. Tuttavia, nella caldaia tradizionale i gas di scarico risultanti dal processo di combustione passano nella canna fumaria e vengono dispersi in ambiente (l’energia contenuta nei fumi dei gas di scarico viene persa). Al contrario, in una caldaia a condensazione si recupera il calore dei gas di scarico (che consistono in gran parte in vapore acqueo) e si reimmette l’energia ottenuta nel circuito di riscaldamento [15].

Per recuperare l’energia si fa condensare il vapore acqueo: si raffreddano i gas di scarico (portandoli ad una temperatura inferiore ai 56° C) mediante uno scambiatore di calore. L’energia recuperata è utilizzata per preriscaldare l’acqua (fredda) in ingresso alla caldaia. L’acqua preriscaldata passa nello scambiatore di calore primario, dove è ulteriormente portata alla temperatura desiderata con il processo di combustione.

Il risparmio energetico conseguibile sostituendo le caldaie tradizionali con quelle a condensazione varia da un minimo di 10% (che si ottiene sostituendo solo il generatore di calore e adeguando opportunamente la circolazione idraulica della centrale termica), fino al 50% (che, invece, si ottiene svolgendo interventi migliorativi più sostanziali) [15].

Dal punto di vista dei consumi energetici, i principali vantaggi delle caldaie a condensazione rispetto alle caldaie tradizionali sono:

- Maggior rendimento. Si recupera il calore di condensazione dei fumi grazie alla presenza di bruciatori tecnologicamente più avanzati e alla maggiore superficie di scambio. Il calore viene recuperato anche nelle condizioni di basso carico (condizioni nelle quali i generatori di calore funzionano per la maggior parte dell’anno).
- Maggiore efficacia dei sistemi di regolazione, che sono in grado di adeguare il bruciatore e, dunque, la generazione del calore alle effettive esigenze di impianto.

Gli svantaggi delle caldaie a condensazione rispetto alle caldaie tradizionali sono:

- Costo di acquisto maggiore sia dell’apparecchio che del sistema di regolazione.
- Maggiore possibilità di sporcare (“fouling”) le superfici di scambio lato acqua. Per ottenere più superfici di scambio si progettano canalizzazioni più ridotte, per le quali è necessario assicurare (soprattutto nel caso di installazione su impianti già esistenti) un adeguato sistema di filtraggio.
- Necessità di operare in combinazione con impianti che dispongono di corpi scaldanti dimensionati per lavorare anche a bassa temperatura.
- Necessità di disporre di una canna fumaria resistente all’attacco delle condense e, nel caso di impianti ad elevata potenza, necessità di provvedere alla neutralizzazione delle condense acide non direttamente scaricabili in fogna. Qualora si proceda alla sostituzione di caldaie tradizionali con caldaie a condensazione in impianti già esistenti, occorre modificare le canne fumarie secondo quanto riportato.
- Necessità di ottimizzare la circolazione idraulica al fine di assicurare la minima temperatura di ritorno al generatore di calore.

Maggior complessità dell’impianto e conseguente necessità di progettisti, installatori e manutentori specializzati.

#### 4.1.2.3 Bruciatori tecnologicamente avanzati

La letteratura tecnico-scientifica consiglia di migliorare i processi di riscaldamento dell'acqua e il funzionamento delle caldaie sostituendo caldaie obsolete con caldaie dotate di bruciatori tecnologicamente avanzati [7]. Tra i bruciatori più consigliati ci sono:

- “premix burners”;
- “sealed burners”;
- “low-NO<sub>x</sub> burner”;
- “recuperative burners”;
- “high luminosity burners (oxy-fuel)”.

Dei sistemi di riscaldamento ben progettati e dei bruciatori tecnologicamente all'avanguardia consentono di ridurre le quantità di gas e di aria necessarie a far avvenire i processi di combustione, ottimizzare l'iniezione di fluidi in camera di combustione e minimizzare le perdite. Tutto ciò permette di ottimizzare l'intero processo di fusione del vetro, ma anche le fasi di formatura, ricottura e finitura [7].

#### 4.1.2.4 Inverter

Nei motori elettrici, ridurre la velocità di rotazione dell'asse serve ad evitare che il motore funzioni alla massima potenza quando ciò non è richiesto. La potenza diminuisce con il cubo della velocità del motore, che, a sua volta, è legata alla frequenza di alimentazione. Gli inverter [16] modulano la frequenza di alimentazione (e, di conseguenza, la velocità del motore) in funzione del carico. Così facendo, consentono di seguire le reali esigenze dell'utenza e limitare i consumi energetici del motore a quelli strettamente necessari. Oltre alla riduzione dei consumi, l'adozione di inverter consente di ottenere: partenze e fermate del motore di tipo “soft”, riduzione della corrente di spunto e della caduta di tensione, miglioramento del fattore di potenza e, infine, maggiori possibilità di controllo sui motori. Per contro, l'adozione di inverter provoca la produzione di armoniche e l'introduzione di una perdita di efficienza del motore causata dall'efficienza stessa di trasformazione dell'inverter [7].

#### 4.1.2.5 Motori ad alta efficienza

Secondo quanto riportato da Confindustria nel 2017 [16], “in Italia, l'industria assorbe circa un terzo del consumo di energia del Paese e, in particolare, per quanto riguarda l'energia elettrica utilizzata dal settore industriale la percentuale arriva al 42% del consumo totale nazionale. Circa il 75% di questa energia è consumata dai sistemi a motore elettrico” [17].

A partire dalla Legge Finanziaria del 2007, sono stati introdotti diversi incentivi volti a migliorare l'efficienza energetica nel settore industriale. Essi hanno promosso l'utilizzo di motori ad alta efficienza accompagnati da inverter, in vista anche degli adeguamenti imposti a livello comunitario dal regolamento attuativo 640/2009 della Direttiva Ecodesign in merito alle specifiche per la progettazione ecocompatibile per motori elettrici e il controllo elettronico della velocità [18].

La Norma internazionale IEC 60034-30:2008 [19] [20] definisce le seguenti classi di rendimento per i motori trifase:

- IE1 → efficienza standard;
- IE2 → efficienza elevata;
- IE3 → efficienza premium.

Secondo gli studi di Confindustria [16], circa il 50% dei motori installati in Italia rientra nella classe di efficienza IE2, mentre la classe IE3 rappresenta una porzione ridotta (10-15%). Ciò lascia intendere come esistano ampi spazi per ridurre i consumi energetici attraverso l'adozione di motori elettrici ad alta efficienza. La sostituzione di motori di tecnologia obsoleta con motori ad altre prestazioni è uno degli interventi maggiormente proposti dai responsabili delle diagnosi.

#### 4.1.2.6 *Ottimizzatori di tensione ed energia elettrica*

Le apparecchiature elettriche ed elettroniche industriali (macchinari di lavorazione e apparecchi per il trasporto dei materiali), a seguito del processo di armonizzazione delle reti, devono funzionare con tensioni comprese fra 207V e 253V. La rete elettrica nazionale spesso fornisce una tensione superiore ai 230V nominali, generando un aumento nei consumi energetici. Le sovratensioni sono la principale causa di guasto o cattivo funzionamento delle apparecchiature elettriche ed elettroniche e, spesso, ne determinano una sensibile riduzione della vita media. Questo problema può essere affrontato e risolto usando degli "ottimizzatori della tensione" (high efficiency belts and cogged belts [7] [21]) che minimizzano le instabilità legate alla tensione e consentono:

- la stabilizzazione dinamica della tensione di uscita;
- la riduzione dei consumi energetici;
- il miglioramento del fattore di potenza;
- la riduzione delle armoniche di corrente e della domanda di picco.

L'operazione di ottimizzazione della tensione avviene fondamentalmente attraverso l'uso di un trasformatore. Ci sono differenze significative nel modo in cui il trasformatore può funzionare e, in base al livello di tecnologia adottato, può cambiare significativamente il risparmio di energia ottenibile.

I sistemi tradizionali di ottimizzazione della tensione sono "a riduzione fissa", cioè riducono la tensione in ingresso alla macchina di una prefissata percentuale. La tensione fornita ai carichi, dunque, viene abbassata, ma continua a fluttuare insieme alla tensione della rete nazionale (non segue l'effettiva richiesta dei carichi). Tale tipo di riduzione in caso di cali di tensione può creare problemi ai dispositivi connessi.

I sistemi più avanzati, ossia gli ottimizzatori di rete, invece, consentono di seguire le richieste di carichi effettive. Tali sistemi sono apparecchiature a trasformazione elettromagnetica a controllo di armonica, che agiscono sulle grandezze elettriche che compongono la potenza sul carico e riducono la corrente secondo le esigenze. Tali dispositivi consentono risparmi energetici compresi fra il 3% e il 10% [15].

#### 4.1.2.7 *Regolatori di pressione*

Laddove sono presenti pompe, compressori e macchinari che pressurizzano dei fluidi (in genere aria), occorre installare dei dispositivi per la regolazione della pressione. Tali dispositivi sono utili a minimizzare le cadute di pressione e i consumi energetici da esse derivanti [7].

#### 4.1.2.8 *Coibentazione delle linee di estrusione/iniezione*

L'installazione di coperture isolanti per i forni consente, in generale, di ridurre buona parte delle perdite di calore. Da ciò ne consegue:

- Un risparmio dell'energia elettrica necessaria ad alimentare i forni;
- La riduzione del tempo di messa in regime dei forni;
- La riduzione della possibilità di ottenere distribuzioni non uniformi della temperatura nei macchinari;
- La riduzione del carico termico disperso in ambiente e sulle strutture della macchina. Ciò comporta un effetto benefico collaterale dovuto alla riduzione del carico termico sui gruppi frigoriferi, che sono necessari a raffreddare le macchine.

#### 4.1.3 *Ridurre le emissioni di polvere*

Come spiegato, durante la fase di affinaggio è fondamentale rimuovere dal vetro fuso eventuali particelle di polvere o di altri materiali solidi detti "Suspended Particulate Matter – SPM". Secondo la letteratura scientifica [22] [23] esistono varie tecnologie per ridurre le emissioni di polvere e la contaminazione del vetro con SPM. Di seguito si riassumono tali tecnologie, che possono essere utilizzate singolarmente o in combinazione tra loro.

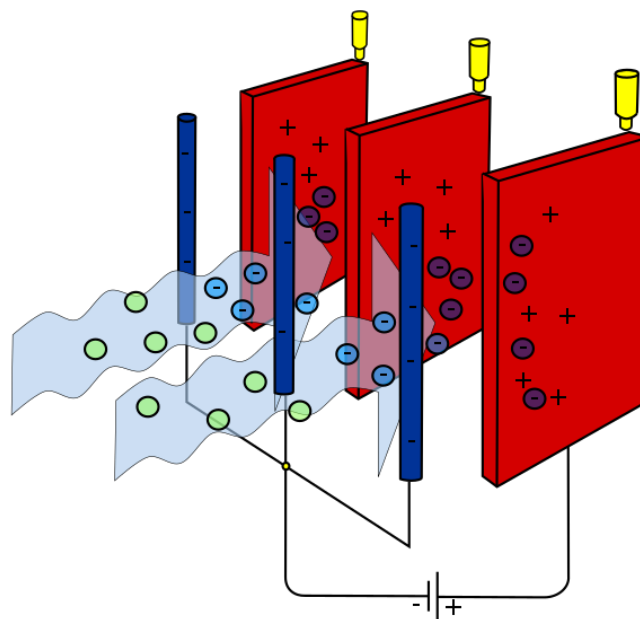
#### 4.1.3.1 Precipitatori elettrostatici

I precipitatori elettrostatici, mediante la formazione di un campo elettrico, caricano le particelle di polvere e le separano dal vetro fuso. La creazione di una scarica elettrica dà origine alla formazione di molte coppie ioni-elettroni [24]. Gli ioni (positivi) vengono attratti dall'elettrodo negativo del precipitatore (elettrodo di scarica). Invece, gli elettroni tendono a muoversi verso l'elettrodo positivo (elettrodo di captazione), ma vengono "catturati" da molecole particolarmente elettronegative, quali gli ossidi di zolfo e l'ossigeno. Da questo processo si formano ioni negativi che, per raggiungere maggiore stabilità, vengono assorbiti dalle particelle di particolato presenti nei fumi. Così facendo, il particolato, che di per sé è neutro e non subisce la presenza del campo elettrico, viene caricato e si dirige verso l'elettrodo di captazione. Una volta a contatto con esso, perde la sua carica e cade lungo le pareti del precipitatore, dove viene raccolto. Se le particelle raccolte sono secche, occorre periodicamente rimuoverle dal precipitatore tramite operazioni di pulizia manuale (estrazione delle celle e lavaggio) o automatica (sistemi di vibrazione di tipo pneumatico). Al contrario, se le particelle raccolte sono di per sé oleose, tenderanno ad agglomerarsi sulle piastre del precipitatore e a scivolare via da sole (auto-drenaggio) sotto l'effetto del loro peso.

I precipitatori elettrostatici hanno il vantaggio di poter operare a temperature molto alte e flessibili (dalla 25°C a 450°C). Essi, inoltre hanno costi di utilizzo bassi [22], consumi energetici relativamente ridotti, ottime efficienze di rimozione e capacità di rimuovere particolato anche molto fine (diametro minore di 5 micrometri) e poco concentrato.

Essi, tuttavia, hanno uno svantaggio dato dal fatto che il loro funzionamento dipende dalla resistività del particolato:

- se le particelle hanno resistività troppo elevata, non perdono la propria carica e, oltre a schermare l'effetto del campo elettrico, si incrostanto sulle pareti del precipitatore;
- se invece le particelle hanno resistività troppo bassa, perdono troppo velocemente la propria carica e rischiano di venire nuovamente raccolte dalla corrente dei fumi.



**Figura 3: schema di funzionamento di un precipitatore elettrostatico. All'interno del precipitatore, mediante un collettore composto da piastre, si crea un campo elettrico (10000-7000 volt/m) che attrae le particelle solide indesiderate. Durante il processo, il particolato, che di per sé è neutro, viene di fatto caricato e tende a**

**dirigersi verso l'elettrodo di captazione. Una volta a contatto con esso, perde la sua carica e cade lungo le pareti del precipitatore.**

#### 4.1.3.2 Filtri a maniche

I filtri a maniche sono costituiti da tessuto poroso intrecciato o da feltro attraverso cui vengono fatti passare i gas per rimuovere le particelle di polvere. I filtri a maniche hanno lo svantaggio di richiedere una selezione del materiale del tessuto adeguata alle caratteristiche dei gas di scarico e alla temperatura massima di esercizio, dunque, al contrario dei precipitatori elettrostatici, non sono adatti a lavorare in condizioni operative fortemente variabili. Essi, tuttavia, hanno il vantaggio di presentare costi di installazione inferiori a tutte le altre tecnologie di rimozione di SPM proposte [22].

#### 4.1.3.3 Forni a fusione elettrica

I forni a fusione elettrica sono forni fusori in cui l'energia è fornita da un riscaldamento resistivo (elettrodi inseriti nella parte inferiore del forno). Essi sono detti "forni a freddo" perché il sistema di alimentazione mantiene uno strato uniforme di materie prime non fuse su tutta la superficie del "bagno di fusione". Così facendo, lo strato superiore della massa di vetro fusa risulta freddo (cold top) e, ricoprendo la restante massa di materiale fuso, determina la riduzione della volatilità delle particelle solide [11].

I forni a fusione elettrica vengono solitamente usati assieme ai filtri a maniche. Infatti, i primi dispositivi riducono la volatilità degli SPM, mentre i filtri procedono a rimuovere le particelle indesiderate. Tali forni hanno il vantaggio di avere bassi costi di manutenzione, altissima efficienza energetica e basse emissioni (l'impianto di filtrazione si compone solo di un filtro a manica per le polveri) [23]. Inoltre, essi sono facili da usare e, rispetto agli altri tipi di forni, possono essere spenti e messi in stand by in tempi brevi. Tuttavia, a differenza dei precipitatori elettrostatici e dei filtri a maniche, non sono tecnologie sempre impiegabili, infatti la fusione elettrica avviene correttamente solo se i volumi di produzione del vetro sono ridotti (minori di 300 tonnellate/giorno). Inoltre, ricorrere alla fusione elettrica implica installare un nuovo forno, dunque è una soluzione con costi di installazione elevati.

#### 4.1.4 Ridurre le emissioni di NO<sub>x</sub>

In letteratura scientifica i forni per la fusione del vetro vengono identificati come sorgenti fisse di emissione di NO<sub>x</sub>. La fusione e ricottura del vetro nei forni determina l'emissione di più di 25 tonnellate di ossidi di azoto all'anno [25]. Per limitare le emissioni di NO<sub>x</sub> l'Unione Europea [23] consiglia di controllare il processo di combustione cercando di abbassare la temperatura a cui avvengono le reazioni chimiche e i processi lavorazione a temperature elevate. A tale scopo è possibile adottare uno o più dei seguenti dispositivi.

##### 4.1.4.1 Sistema di ricircolo dei fumi e bruciatori Low-NO<sub>x</sub>

Il sistema di ricircolo preleva i gas di scarico del forno e li reintroduce direttamente nella fiamma. Lo scopo è ridurre il contenuto di ossigeno nella reazione di combustione e, quindi, ridurre la temperatura della fiamma. Mediante l'uso del sistema di ricircolo e di speciali bruciatori (detti "Low-NO<sub>x</sub>") si crea un ricircolo interno dei gas di combustione, che raffreddano la radice delle fiamme e abbassano il contenuto di ossigeno nella parte più calda del forno. In questo modo diminuiscono le temperature di picco della fiamma e, sebbene si rallenti la combustione, si assicura il completamento delle reazioni chimiche e un aumento del trasferimento di calore (emissività della fiamma). Lo svantaggio di questa tecnologia è che essa funziona solo se si installano nel forno specifici bruciatori adatti allo scopo [26].

#### 4.1.4.2 Forni dal design modificato

Congiuntamente ai sistemi di ricircolo e ai bruciatori, si possono adottare forni aventi design della camera di combustione modificato. Questi forni, detti "forni recuperativi" sono progettati in modo da abbassare le temperature di fiamma e facilitare il processo di ricircolo interno dei gas. Per progettare opportunamente i forni recuperativi occorre studiare attentamente il numero e il tipo di bruciatori da inserire nella camera di combustione, la posizione dei bruciatori e la geometria del forno (altezza e dimensioni).

#### 4.1.4.3 Forni a fusione elettrica

I forni a fusione elettrica sono forni fusori in cui l'energia è fornita dal riscaldamento resistivo. Il funzionamento di tali forni è analogo a quella già definito nel Paragrafo 4.1.3.3. Queste tecnologie riducono le emissioni di NO<sub>x</sub> perché, per funzionare, spesso richiedono la presenza di nitrati, che servono per fornire le condizioni di ossidazione necessarie ad ottenere un processo di produzione del vetro stabile, sicuro ed efficiente. I forni a fusione elettrica hanno gli stessi vantaggi e svantaggi descritti nel Paragrafo 4.1.3.3.

#### 4.1.4.4 Dispositivi per l'iniezione di combustibili fossili nei gas di scarico

L'iniezione di combustibili fossili (solitamente gas naturale o petrolio) nei gas di scarico (all'ingresso del rigeneratore) provoca la riduzione chimica dell'NO<sub>x</sub> in azoto (N<sub>2</sub>) attraverso una serie di reazioni. Come si evince dalla descrizione, questa tecnologia è progettata solo per l'uso in forni rigenerativi.

#### 4.1.4.5 Dispositivi per la riduzione catalitica selettiva (Selective Catalytic Reduction - SCR)

In presenza di un letto catalitico, aggiungendo ai gas di scarico un agente chimico riducente allo stato liquido o gassoso (di solito ammoniaca o urea) e aumentando la temperatura nel forno, si fa avvenire la riduzione degli ossidi di azoto in azoto. L'agente chimico riducente ha forte tendenza ad assorbire l'ossigeno (O<sub>2</sub>), di conseguenza si limita la formazione di NO<sub>x</sub> nei gas di scarico del processo di produzione del vetro dissociando NO<sub>x</sub> in vapore acqueo (H<sub>2</sub>O) e gas azoto (N<sub>2</sub>).

Gli SCR hanno una temperatura ottimale di funzionamento di circa 300 - 450 °C e possono presentare uno o due strati di catalizzatore. Maggiore è la quantità di ammoniaca usata (due strati), maggiore sarà la quantità di NO<sub>x</sub> che la tecnologia sarà in grado di ridurre ad azoto.

In alternativa alla riduzione catalitica selettiva (SCR), che funziona solo usando tecnologie particolari e predisponendo il letto catalitico, è possibile ricorrere alla riduzione selettiva non catalitica (SNCR). La SNCR è una tecnica che non necessita di tecnologie particolari per essere attuata e, per questo motivo, non viene descritta nel presente Paragrafo.

#### 4.1.4.6 Sistemi di controllo della combustione

Un monitoraggio permanente dei parametri di combustione più importanti (per esempio il tenore di O<sub>2</sub>, il tenore di CO, il rapporto aria/combustibile, e la quantità di componenti non combustibili) consente di ottimizzare la combustione e ridurre le emissioni di ossidi di azoto. Avvalendosi della tecnologia di controllo della reazione di combustione, si realizzano le migliori condizioni di combustione. La formazione e le emissioni di NO<sub>x</sub> possono essere diminuite adeguando i parametri correnti, la distribuzione dell'aria, l'ossigeno in eccesso, la conformazione della fiamma e il profilo della temperatura.

#### 4.1.5 Ridurre le emissioni di SO<sub>x</sub>, HCl e HF

Le best available technologies per ridurre le emissioni di ossidi di zolfo ( $\text{SO}_x$ ) dai gas di scarico del processo di produzione del vetro sono descritte di seguito. Tali tecnologie vanno bene, in generale, per rimuovere tutti i gas acidi presenti nei fumi di combustione ( $\text{SO}_x$ ,  $\text{HCl}$  e  $\text{HF}$ ) [27].

#### 4.1.5.1 *Sistema di lavaggio a secco (o semi-secco) adoperato in combinazione con un sistema di rimozione delle polveri*

Il sistema di lavaggio a secco inietta ad alta pressione e disperde una raccolta di sostanze reagenti secche (o una sospensione/soluzione di reagente alcalino) nel flusso di scarico del forno. L'operazione di lavaggio a secco (o semi-secco) determina la neutralizzazione dei gas acidi contenuti nei fumi di combustione in tre fasi successive:

1. Innanzitutto, i fumi di combustione vengono fatti passare attraverso un "evaporative cooler" e raffreddati. Questa operazione serve a preparare i gas di scarico alla fase successiva e a facilitare la rimozione di tutti i gas inquinanti acidi.
2. Una volta che il gas è stato raffreddato in modo significativo, l'iniezione dei reagenti può iniziare. All'interno di una "torre di reazione", le sostanze secche spruzzate reagiscono con i gas acidi trasformandoli in sostanze non nocive. Le reazioni che le sostanze secche scatenano sono diverse a seconda del materiale che sono destinate a rimuovere. Infatti, alle volte danno origine ad una reazione chimica che neutralizza gli inquinanti, mentre altre volte fanno sì che le sostanze nocive si trasformino in sostanze diverse (tipicamente solide), che poi cadono fuori dal flusso di gas o vengono catturate da un filtro antiparticolato. Una delle sostanze secche più spesso adoperata per la rimozione dei gas acidi è il bicarbonato di sodio, che può raggiungere efficienze di rimozione del 50%. Un'altra sostanza spesso usata è la calce idrata ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) che, invece, solitamente ha efficienza di rimozione compresa tra il 15% e il 30% [28]. Simili agli scrubber a secco sono gli scrubber semi-umidi. Questi hanno funzionamento analogo a quello appena descritto, ma iniettano nei fumi di combustione soluzioni umide di soda o calce. Gli scrubber semi-umidi raggiungono maggiori efficienze di rimozione rispetto a quelli secchi (anche superiori al 90%).
3. I sistemi di rimozione delle polveri (precipitatori elettrostatici o filtri a manica) associati al sistema di lavaggio procedono a catturare le polveri di lavaggio. Con questa operazione vengono catturate le sostanze indesiderate e rimosse dal restante gas, che esce dalla camera di lavaggio pulito. La polvere esausta catturata, talvolta, può essere ripulita e riutilizzata, più spesso, però, deve essere smaltita perché non può essere lavata correttamente.

Dato che non ci sono particolari restrizioni nell'utilizzo della tecnica di lavaggio dei fumi a secco, i dry scrubber sono tra i metodi di rimozione dei gas acidi più comunemente usati. Essi vengono preferiti rispetto agli scrubber a umido perché producono quantità inferiori di materiale di scarto e, dunque, determinano spese di trasporto, conservazione e smaltimento dei rifiuti inferiore (negli scrubber a umido, oltre alle polveri esauste, si hanno grandi quantità di acque reflue da gestire). La minor quantità di sostanze esauste nei dry scrubber dipende dal fatto che il calore dei fumi di scarico, nei quali le sostanze reagenti vengono iniettate, bruciano la maggior parte delle polveri secche. Un'altra gran parte delle polveri secche viene, invece, catturata dal sistema di rimozione del particolato (filtro o precipitatore) a valle della torre di reazione.

Sebbene la pulizia dei fumi di scarico a secco abbia diversi vantaggi, essa presenta alcuni svantaggi. Innanzitutto, a valle del processo di pulizia resta comunque una certa quantità di polvere residua, che deve essere trattata e smaltita correttamente e, a causa della sua composizione chimica, corrisponde ad un rifiuto speciale. Un altro svantaggio è che non solo il costo di smaltimento dei rifiuti è alto, ma anche il processo di lavaggio in sé è assai dispendioso. Infine, sebbene si utilizzino sostanze reagenti ad alta efficacia di rimozione dei gas, il processo non è mai in grado di rimuovere il 100% delle sostanze contaminanti. La



rimozione è tanto migliore quanti più agenti assorbenti si iniettano nel sistema, ma questo si traduce automaticamente in un aumento delle quantità di rifiuti e dei costi di smaltimento [29].

#### 4.1.6 Ridurre le emissioni di metallo

Il processo di produzione del vetro può dare origine a particolato solido che, assieme ad altre sostanze nocive ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ , ecc.) può inquinare l'aria fuoriuscendo dai fumi di combustione.

Le emissioni di metallo possono presentarsi sottoforma di particelle solide, oppure sottoforma di gas. Le due tipologie di sostanze appena citate possono essere rimosse mediante le due tecnologie descritte a seguire [23].

##### 4.1.6.1 Sistema di filtraggio

I sistemi di abbattimento polveri descritti nel Paragrafo 4.1.3 possono ridurre anche le emissioni in aria dei metalli provenienti dai processi di fusione del vetro che, infatti, spesso si presentano sotto forma di particolato solido.

Al fine di rimuovere correttamente anche le particelle di metallo estremamente volatili (ad esempio il selenio) è necessario impostare opportunamente la temperatura di filtraggio.

##### 4.1.6.2 Sistema di lavaggio a secco (o a semi-secco) adoperato in combinazione con un sistema di rimozione delle polveri

I metalli gassosi possono essere ridotti utilizzando una tecnica di scrubbing a secco o semi-secco con un reagente alcalino. Il reagente reagisce con le specie gassose per formare un solido che deve essere rimosso per filtrazione (stesso processo descritto nel Paragrafo 4.1.5.1).

#### 4.1.7 Ridurre le emissioni di gas combinati quali $\text{SO}_x$ , HCl, HF e composti del boro

La produzione del vetro può dare origine a gas inquinanti ottenuti combinando fra loro sostanze quali  $\text{SO}_x$ , HCl, HF e composti del boro. Le tecnologie per rimuovere gas combinati di questo tipo sono quelle elencate di seguito.

##### 4.1.7.1 Sistemi di lavaggio a umido (wet scrubbers)

Le torri di lavaggio (assorbitori) sono sistemi simili a "docce", dove l'effluente inquinato (gas di combustione) viene lavato da un liquido di ricircolo (acqua o soluzione alcalina) al fine di assorbire gli inquinanti. Il liquido scorre verso il basso per gravità, mentre il gas scorre verso l'alto e contrasta il passaggio del liquido [27]. Il lavaggio del fumo avviene perché gas e liquido, quando si incontrano, si scambiano sostanze. L'efficienza di rimozione delle emissioni nocive dipende da diversi fattori, tra cui: l'altezza dell'assorbitore, il tipo di gas usato e le sue proprietà, il tipo di liquido usato e le sue proprietà.

Il liquido di lavaggio viene stoccato alla base dello scrubber, all'interno di una stazione di dosaggio. Quest'ultima è costituita da serbatoi di stoccaggio e da pompe dosatrici (solitamente due, una operativa e una di riserva). Essa è atta a monitorare costantemente il pH della soluzione. Il livello di acidità o basicità del liquido determina la buona riuscita dell'intero processo di pulizia. Ad esempio, i composti inorganici volatili basici vengono abbattuti grazie a soluzioni acide, mentre i composti inorganici volatili di tipo acido vengono abbattuti usando soluzioni basiche.

A valle dello scrubber a umido, i gas di scarico saturi d'acqua vengono raccolti. Dopo aver separato i gas dalle goccioline di acqua, si ottengono:

- da un lato i gas puliti, che vengono immessi in atmosfera
- dall'altro i liquidi inquinati, che devono essere trattati con un processo di depurazione delle acque reflue e opportunamente smaltiti. Usando sistemi di filtraggio (precipitatori o filtri) o sistemi di sedimentazione, le particelle insolubili vengono separate dai liquidi e smaltite a parte.

Gli scrubber sono particolarmente indicati per abbattere polveri, composti organici volatili e composti inorganici volatili. Essi, inoltre, rimuovono gas acidi (SO<sub>x</sub>, HCl e HF) e composti del boro. Tali sistemi, tuttavia, hanno lo svantaggio di assorbire male le particelle aventi diametro minore di 5 micrometri. Per questo tipo di sostanze sono da preferire gli scrubber a secco o semi-secco (Paragrafo 4.1.5.1).

#### 4.1.8 Ridurre le emissioni di sostanze gassose e liquide combinate

Oltre alle combinazioni di gas inquinanti, la produzione del vetro può dare origine a combinazioni di sostanze gassose e liquide indesiderate. La maggior parte di queste sostanze è generata durante le lavorazioni del vetro che implicano la produzione di polvere, ad esempio il taglio, la smerigliatura e la lucidatura. In queste operazioni, solitamente, si adoperava un getto di liquido per raffreddare i prodotti di lavorazione e, soprattutto, per diminuire la volatilità delle polveri (che altrimenti formerebbero una nebbia che il personale potrebbe respirare). Le migliori tecnologie disponibili per rimuovere le sostanze gas-liquido ottenute sono [23] di seguito riassunte.

##### 4.1.8.1 Sistemi di lavaggio a umido (*wet scrubbers*)

Gli scrubber umidi sono le stesse tecnologie descritte nel Paragrafo 4.1.7.1. Essi non solo possono essere adoperati per rimuovere sostanze inquinanti gassose, ma anche per rimuovere combinazioni di liquidi e gas. I criteri di progettazione per la rimozione di liquidi, di gas o, addirittura, di particolato sono diversi; pertanto, la progettazione è spesso un compromesso tra le varie opzioni.

##### 4.1.8.2 Precipitatori elettrostatici a umido

Questi sistemi sono costituiti da un precipitatore elettrostatico (il cui funzionamento è stato descritto nel Paragrafo 4.1.3.1) in cui il materiale indesiderato viene raccolto sulle piastre di appositi collettori e poi rimosso in un secondo momento [30].

I precipitatori a umido si distinguono da quelli a secco perché in essi la rimozione (lavaggio) delle sostanze inquinanti dalle piastre viene effettuata con un liquido, di solito acqua (Paragrafo 4.1.3.1). Essi vengono utilizzati per rimuovere sostanze liquide o gassose, per le quali i sistemi a vibrazione automatici (adatti a rimuovere particolato solido) non basterebbero a ripulire completamente le piastre.

Come nei precipitatori a secco, nei precipitatori a umido, dopo ogni ciclo di lavaggio, bisogna trattare i gas di scarico per separare da un lato le goccioline di liquido contenenti le sostanze indesiderate e dall'altro i gas puliti. Per questo motivo, generalmente, nei precipitatori elettrostatici umidi viene installato un meccanismo di separazione delle sostanze. Il meccanismo può essere o un setto poroso o un campo a vapore secco finale. I vantaggi e gli svantaggi dei precipitatori a umido sono analoghi a quelli dei precipitatori a secco (Paragrafo 4.1.3.1).

##### 4.1.8.3 Sistemi di filtraggio a maniche

Il funzionamento di tali dispositivi è già stato descritto nel Paragrafo 4.1.3.2.

#### 4.1.9 Ridurre le emissioni di H<sub>2</sub>S e di composti organici volatili (VOC)

La produzione del vetro può dare origine a emissioni di H<sub>2</sub>S e composti organici volatili (VOC). La letteratura tecnico-scientifica di riferimento [23] [31] suggerisce, nel caso della produzione di vetro, di adoperare

sistemi di incenerimento (catalitici o termici) per ridurre tali emissioni. Una breve descrizione delle tecnologie suggerite per effettuare tale operazione è riportata di seguito.

#### 4.1.9.1 *Sistema di incenerimento dei gas di scarico*

Il sistema di incenerimento dei gas di scarico [32] è costituito da un postcombustore che:

- Ossida l'idrogeno solforato (generato da forti condizioni di riduzione nel forno fusorio) in anidride solforosa.
- Ossida il monossido di carbonio in anidride carbonica.
- Incenerisce i VOC grazie all'elevata temperatura di combustione e, conseguentemente, ossida i VOC trasformandoli in anidride carbonica, acqua e altri prodotti di combustione (ad esempio  $\text{NO}_x$  o  $\text{SO}_x$ ).

## 4.2 Cementifici

Per limitare il consumo energetico e diverse problematiche di natura ambientale, negli impianti di produzione del cemento si possono adottare tecniche e tecnologie avanzate.

Come detto nell'introduzione del presente Paragrafo, l'obiettivo di UNIFI è individuare le migliori tecnologie disponibili. Pertanto, di seguito non si descrivono metodologie di controllo dei processi che prescindono dall'utilizzo di dispositivi, macchinari e tecnologie specifiche e non si prendono in considerazione attività di controllo delle reazioni chimiche (quali la riduzione del rapporto aria/combustibile o la riduzione della temperatura dell'aria in ingresso alla combustione o, addirittura, la sostituzione dell'aria di combustione con ossigeno puro per ridurre le emissioni di Nox). Allo stesso modo non si considerano modalità di selezione delle materie prime da introdurre in ingresso al processo produttivo, ma, piuttosto, si illustrano (riportandone una breve descrizione) tutte le tecnologie da adottare per diminuire consumi energetici e limitare emissioni di sostanze inquinanti, di rumore e di altri effetti indesiderati.

### 4.2.1 Processo di produzione del cemento

Il processo di produzione del cemento può essere suddiviso in 5 fasi di lavorazione e trasformazione delle materie prime estratte in cava fino alla distribuzione del prodotto finito. In particolare, sono:

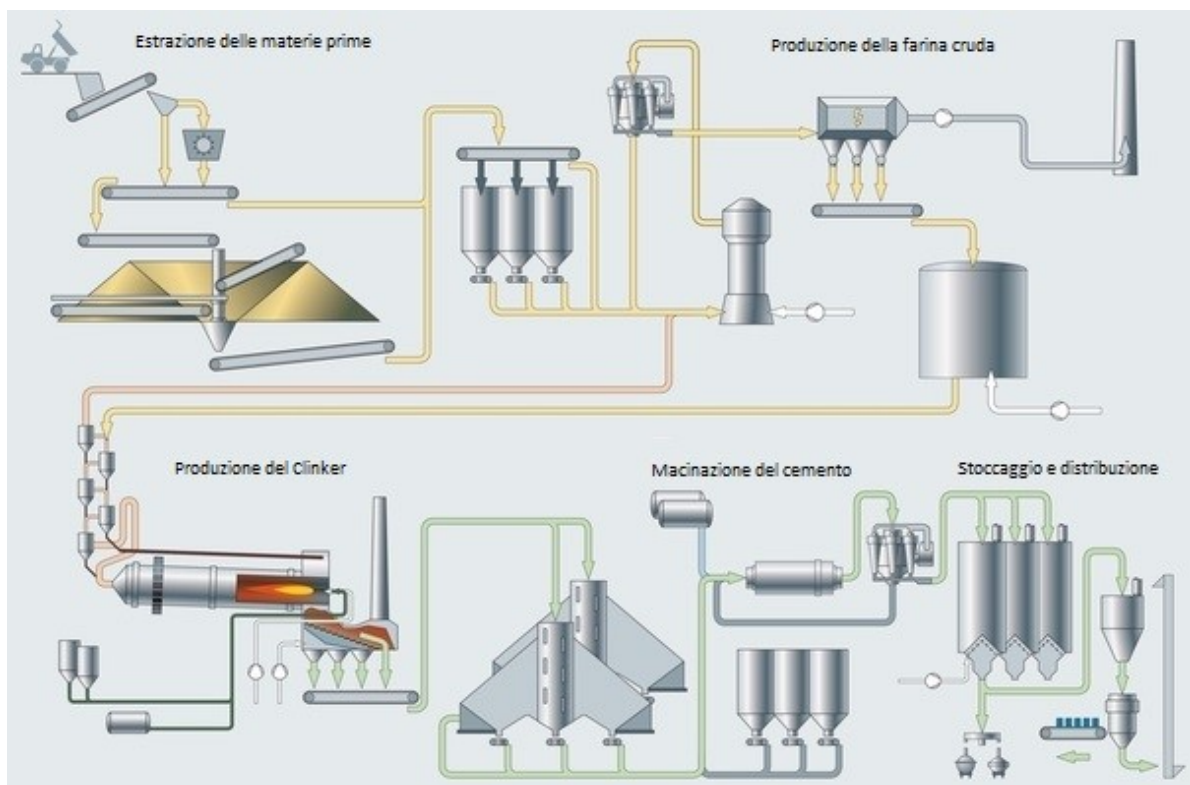
- **Estrazione delle materie prime:** Le materie prime (calcare, marna e altri costituenti minori), sono estratte in cava e miscelate per ottenere la giusta composizione chimica. La miscela delle materie prime deve essere definita non solo tenendo in considerazione la composizione in massa degli ossidi principali, ma anche della quantità di elementi, denominati "fondenti", che ottimizzano l'eutettico e creano una sufficiente quantità di fase liquida durante il processo di cottura nella zona calda del forno denominata "zona di cottura". I principali elementi che contribuiscono alla formazione della fase liquida sono (espressi in termini di ossidi):  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $K_2O$  e  $Na_2O$ .
- **Produzione della farina cruda:** Le materie prime (calcare, marna e altri costituenti minori) nelle appropriate proporzioni sono macinate finemente nei mulini per produrre una polvere fine denominata "farina cruda".
- **Produzione del Clinker:** La farina, dopo la sua omogeneizzazione, è inviata al forno rotante dove subisce il processo di cottura. Il sistema forno è costituito essenzialmente da 3 parti:
  - Il forno che consiste in un tubo cilindro che ruota su appositi supporti.
  - Il preriscaldatore per recuperare il più possibile il calore prodotto per portare la farina a  $1450\div 1500$  °C ed utilizzarlo per le prime fasi del processo come essiccazione e/o decarbonatazione, in modo che i gas di processo escano dal sistema forno a temperature più basse.
  - Un raffreddatore per recuperare il calore sensibile del clinker scaricato dal forno a ca  $1200$  °C [33].

All'interno del forno i minerali delle materie prime di partenza subiscono delle trasformazioni chimiche ad alte temperature per formare i composti chimici che caratterizzano il clinker da cemento. Il clinker di Cemento è un materiale a comportamento idraulico composto da una certa frazione in massa (in funzione della qualità del cemento) di silicati di calcio: tricalcico ( $3CaO\cdot SiO_2$ ) e bicalcico ( $2CaO\cdot SiO_2$ ). La parte rimanente contiene ossido d'alluminio ( $Al_2O_3$ ) principalmente sotto forma di alluminato tricalcico ( $3CaO\cdot Al_2O_3$ ), ossido di ferro ( $Fe_2O_3$ ) principalmente sotto forma di ferrito-alluminato tetracalcico ( $4CaO\cdot Al_2O_3\cdot Fe_2O_3$ ) e altri ossidi. I quattro costituenti principali del clinker in letteratura sono indicati rispettivamente con i nomi di: alite, belite, celite, e fase ferrica. Il

rapporto in massa  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  non deve essere minore di 2,0. Il tenore di ossido di magnesio ( $\text{MgO}$ ) non deve superare il 5,0% in massa [34].

- Macinazione del cemento:** Il clinker è successivamente co-macinato finemente con di solfato di calcio (in adeguate proporzioni), per controllare le velocità delle reazioni di idratazione, e con gli altri costituenti che caratterizzano le prestazioni dei cementi in proporzioni e tipologie definite nelle norme tecniche di prodotto. La EN 197-1 definisce le tipologie dei costituenti utilizzabili nella produzione dei cementi, sia in termini di caratteristiche chimico-fisiche che relativamente alla loro origine, sia naturale che derivante da processi di produzione industriali. Oltre ai costituenti principali, nella formulazione dei cementi possono essere utilizzati costituenti secondari in ragione massimo del 5 % che possono essere o minerali di origine naturale o materiali inorganici derivanti esclusivamente dal ciclo di produzione del clinker (es. polveri eletofiltri). In relazione alla disponibilità delle materie prime, i costituenti utilizzati nella produzione di cemento sono essenzialmente: calcare (LL, L), loppa granulata d’altoforno (S), pozzolana naturale (P), cenere volante silicea (V).
- Stoccaggio e distribuzione:** Il cemento pronto viene trasferito dal silo direttamente nel veicolo destinato al trasporto sfuso, oppure immesso in sacchi del peso di 25 chilogrammi. Il tutto praticamente in assenza di polveri, perché i cementifici moderni dispongono di macchine automatiche avanzatissime per la movimentazione e il confezionamento del materiale.

In Figura 4 è riportato uno schema dell’intero processo di produzione e stoccaggio appena descritto.



**Figura 4: Processo di produzione del cemento.**

Tra tutte le fasi appena descritte, la più energivora e impattante dal punto di vista ambientale è la produzione del Clinker, per la quale si adotta un forno ad alta temperatura alimentato da combustibile fossile. Le BAT evidenziate nella letteratura tecnico-scientifica si concentrano infatti sulla riduzione delle

emissioni dovute alla combustione ed in particolare alla riduzione della formazione di particolato, NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub> [35].

Il processo di produzione del cemento è un processo che sfrutta l'energia termica di combustibili fossili per cuocere la farina cruda ed ottenere così il clinker. Tale processo ha un elevato impatto ambientale e deve quindi essere ottimizzato al fine di diminuire le emissioni di gas e particolato in atmosfera. A tal riguardo la letteratura tecnico-scientifica prevede l'utilizzo delle tecniche riportate nei sotto-paragrafi seguenti.

#### 4.2.2 Ridurre il consumo energetico

Per limitare/ridurre al minimo il consumo di energia termica, le BAT [36] prevedono l'applicazione combinata delle seguenti tecniche [37].

##### 4.2.2.1 Dosatori gravimetrici ed alimentatori di combustibili solidi

I dosatori massici, spesso detti anche gravimetrici, dosano il materiale secondo la sua massa. Un tipico metodo di controllo della massa si basa sulla lettura del peso, da cui il nome dosatore gravimetrico.

I dosatori gravimetrici generalmente pesano una quantità di materiale crescente fino al raggiungimento della massa voluta da immettere in miscela.

Questo tipo di dosatori è indipendente da variazioni di densità o omogeneità del materiale dosato. Sono sistemi semplici ed economici facilmente applicabili in impianto. Una dosatura ottimale dei combustibili solidi permette di ottimizzare il consumo di combustibile [38].

##### 4.2.2.2 Sistemi di preriscaldamento e precalcinazione

Operando un preriscaldamento ed una precalcinazione della farina cruda prima della cottura del forno per la produzione del clinker, si ottimizza il consumo energetico del forno stesso [39].

##### 4.2.2.3 Sistemi di recupero del calore in eccesso dai forni

Recuperando il calore in eccesso dai forni, soprattutto dalla loro area di raffreddamento ed in particolare il calore in eccesso dai forni ottenuto dall'area di raffreddamento (aria calda) o dal preriscaldatore, questo può essere utilizzato per l'essiccazione delle materie prime.

##### 4.2.2.4 Sistemi di bypass

L'uso di un sistema di bypass ottimizzato, ovvero riducendo al minimo i flussi al suo interno si ottimizza sia il consumo energetico che termico di impianto.

#### 4.2.3 Ridurre le emissioni di polvere

Per limitare le emissioni di polveri e particolato, la letteratura tecnico-scientifica di riferimento consiglia perlopiù di trattare i gas di scarico alla camera di combustione. A tale scopo è necessario adottare uno o più dei seguenti dispositivi:

##### 4.2.3.1 Precipitatori elettrostatici

I precipitatori elettrostatici (ESP), già introdotti nel Paragrafo 4.1.3.1, generano un campo elettrostatico nel flusso d'aria attraversato dal particolato. In questo modo, le particelle che compongono il particolato si caricano negativamente e migrano verso le piastre di raccolta con carica positiva. Le piastre di raccolta vengono periodicamente fatte vibrare in modo che il materiale depositato cada nelle tramogge di raccolta sottostanti [40].

È importante che i cicli di vibrazione dell'ESP siano ottimizzati per ridurre al minimo il rientro del particolato, che influenza le caratteristiche del pennacchio.

Gli ESP si caratterizzano per la loro capacità di operare in condizioni di alte temperature (fino a circa 400 °C) e di elevata umidità. I principali svantaggi di questa tecnica sono:

- la loro ridotta efficienza in presenza di uno strato isolante
- un accumulo di materiale che può essere generato con un elevato apporto di cloro e zolfo.

Per le prestazioni complessive degli ESP, è importante evitare formazione di CO. Anche se non ci sono restrizioni tecniche sull'applicabilità degli ESP nei vari processi dell'industria del cemento, essi non sono spesso scelti per la depolverazione dei mulini per cemento a causa dei costi di investimento e dell'efficienza (emissioni relativamente elevate) durante gli avviamenti e gli arresti [41].

#### 4.2.3.2 Filtri a tessuto

I filtri in tessuto sono efficienti depolveratori (Paragrafo 4.1.3.2). Il principio di base della filtrazione a tessuto è quello di utilizzare una membrana di tessuto permeabile ai gas ma che trattiene la polvere.

Fondamentalmente, il mezzo filtrante è disposto geometricamente. Inizialmente, la polvere si deposita sia sulle fibre superficiali che all'interno della profondità del tessuto, ma man mano che sullo strato superficiale si accumula la polvere, essa stessa diventa il mezzo filtrante dominante. La polvere può fluire dall'interno del sacco verso l'esterno o viceversa. Con l'addensarsi della polvere depositata sul filtro, la resistenza al flusso di gas aumenta, è quindi necessaria una pulizia periodica del mezzo filtrante per controllare la caduta di pressione del gas attraverso di esso.

Il filtro in tessuto dovrebbe avere più compartimenti che possono essere isolati individualmente in caso di guasto del pacco filtri e dovrebbero essere sufficienti per consentire il mantenimento di prestazioni adeguate se un compartimento viene tolto dalla linea. In ogni scomparto dovrebbero esserci dei "rilevatori di rottura del sacco" per indicare la necessità di manutenzione quando ciò accade. I sacchetti filtranti sono disponibili in una gamma di tessuti e tessuti non tessuti.

I moderni tessuti sintetici possono funzionare a temperature abbastanza elevate fino a 280 °C. Le prestazioni dei filtri a tessuto sono influenzate principalmente da diversi parametri, come la compatibilità del mezzo filtrante con le caratteristiche dei gas di combustione e delle polveri, le proprietà adatte per la resistenza termica, fisica e chimica, come l'idrolisi, gli acidi, gli alcali, l'ossidazione e la temperatura di processo. L'umidità e la temperatura dei gas di combustione devono essere prese in considerazione prima di utilizzare questa tecnica [42].

#### 4.2.3.3 Filtri ibridi

I filtri ibridi sono la combinazione di ESP (Paragrafo 4.2.3.1) e filtri in tessuto (Paragrafo 4.2.3.2) nello stesso dispositivo. Essi sono generalmente il risultato della conversione di ESP esistenti e consentono il parziale riutilizzo delle vecchie apparecchiature [43].

#### 4.2.4 Ridurre le emissioni di NO<sub>x</sub>

Per limitare le emissioni di NO<sub>x</sub> la letteratura tecnico-scientifica di riferimento consiglia perlopiù di controllare la combustione. A tale scopo è necessario adottare uno o più dei seguenti dispositivi:

##### 4.2.4.1 Sistemi di raffreddamento della fiamma

L'aggiunta di acqua al combustibile o direttamente sulla fiamma utilizzando diversi metodi di iniezione, come l'iniezione di un fluido (liquido) o di due fluidi (liquido e aria compressa o solidi) o l'uso di rifiuti

liquidi/solidi con un alto contenuto di acqua riduce la temperatura e aumenta la concentrazione di radicali idrossilici. Questo può avere un effetto positivo sulla riduzione degli NO<sub>x</sub> nella zona di combustione.

#### 4.2.4.2 *Bruciatori a basse emissioni di NO<sub>x</sub>*

I modelli di bruciatori a basse emissioni di NO<sub>x</sub> (accensione indiretta) variano nei dettagli, tuttavia il combustibile e l'aria vengono in linea di massima iniettati nel forno mediante tubi concentrici. La percentuale di aria primaria è ridotta a circa il 6 – 10 % dell'aria richiesta per i processi di combustione stechiometrica (tipicamente pari al 10 – 15 % nei bruciatori tradizionali). L'aria assiale viene iniettata con forte impulso nel canale esterno. Il carbone può essere soffiato attraverso la tubatura centrale o il canale intermedio. Un terzo canale viene utilizzato per il vortice d'aria, il cui movimento è causato dalla presenza di palette poste in prossimità dell'uscita del tubo di accensione o dietro di essa.

Questo modello di bruciatore ha l'effetto di indurre molto presto l'accensione, in particolare dei composti volatili presenti nel combustibile, in un'atmosfera priva di ossigeno, e ciò tenderà a ridurre la formazione di NO<sub>x</sub>. L'utilizzo di bruciatori a basse emissioni di NO<sub>x</sub> non è sempre seguito da una riduzione delle emissioni di NO<sub>x</sub>, pertanto la struttura del bruciatore deve essere ottimizzata [44].

#### 4.2.4.3 *Impianti di tipo mid-kiln firing*

Nei forni che utilizzano il processo lungo per via umida e il processo lungo per via secca, la creazione di un'area favorevole alla riduzione delle emissioni, grazie all'utilizzo di combustibili in pezzatura grossa, contribuisce a ridurre la quantità di NO<sub>x</sub> emessa.

I forni che utilizzano il processo lungo non hanno solitamente accesso a un'area di temperatura di circa 900 – 1 000 °C, pertanto gli impianti di tipo mid-kiln firing possono essere installati per alimentare combustibili derivati da rifiuti, i quali non riuscirebbero a essere alimentati nel bruciatore principale (ad esempio, gli pneumatici) [36].

La velocità di combustione dei combustibili può rappresentare un fattore fondamentale.

- Se la combustione è troppo lenta, nell'area di combustione si possono verificare condizioni di riduzione delle emissioni in grado di influenzare negativamente la qualità del prodotto.
- Se è troppo veloce, si rischia il surriscaldamento nell'area delle catene del forno, con il conseguente logorio delle catene stesse.

Un intervallo di temperatura inferiore a 1 100 °C esclude l'impiego di rifiuti pericolosi con un contenuto di cloro superiore all'1 % [45].

#### 4.2.4.4 *Combustione a stadi (combustibili convenzionali o di scarto), anche in combinazione con un precalcinatore e l'uso di un mix di combustibili ottimizzato*

La combustione in stadi viene applicata nei forni per cemento con un precalcinatore appositamente progettato. La prima fase di combustione avviene nel forno rotativo in condizioni ottimali per il processo di combustione del clinker. Il secondo stadio di combustione è dotato di un bruciatore all'ingresso del forno, che produce un'atmosfera riducente che decompone una parte degli ossidi di azoto generati nella zona di sinterizzazione. L'alta temperatura in questa zona è particolarmente favorevole per la reazione che riconverte gli NO<sub>x</sub> in azoto elementare. Nel terzo stadio di combustione, il combustibile di calcinazione viene immesso nel calcinatore con una quantità di aria terziaria, producendo un'atmosfera riducente anche lì.



Questo sistema riduce la generazione di NO<sub>x</sub> dal combustibile, e diminuisce anche gli NO<sub>x</sub> che escono dal forno. Nel quarto ed ultimo stadio di combustione, l'aria terziaria rimanente viene immessa nel sistema come "aria di punta" per la combustione residua.

#### 4.2.4.5 SNCR

La riduzione selettiva non catalitica (SNCR), già introdotta nel Paragrafo 4.1.4.5, consiste nell'iniettare acqua di ammoniaca (fino al 25 % di NH<sub>3</sub>), composti precursori dell'ammoniaca o soluzione di urea nel gas di combustione per ridurre gli NO a N<sub>2</sub>. La reazione ha un effetto ottimale in una finestra di temperatura di circa 830 - 1050 °C, e deve essere previsto un tempo di ritenzione sufficiente perché gli agenti iniettati reagiscano con NO [46].

#### 4.2.4.6 SCR

La riduzione selettiva catalitica (SCR), già descritta nel Paragrafo 4.1.4.5, riduce NO e NO<sub>2</sub> a N<sub>2</sub> con l'aiuto di NH<sub>3</sub> e di un catalizzatore ad un intervallo di temperatura di circa 300 - 400 °C.

Questa tecnica è ampiamente utilizzata per l'abbattimento di NO<sub>x</sub> in altre industrie (centrali elettriche a carbone, inceneritori di rifiuti). Nell'industria del cemento, fondamentalmente si considerano due sistemi:

1. una configurazione a bassa polvere tra l'unità di depolverazione e la pila
2. e una configurazione ad alta polvere tra il preriscaldatore e l'unità di depolverazione.

I sistemi a bassa polverosità richiedono il riscaldamento dei gas di scarico dopo la depolverazione, che può causare costi energetici aggiuntivi e perdite di pressione. I sistemi ad alta polverosità sono considerati preferibili per ragioni tecniche ed economiche.

Questi sistemi non richiedono il riscaldamento, perché la temperatura dei gas di scarico all'uscita del sistema di preriscaldamento è solitamente nel giusto intervallo di temperatura per il funzionamento SCR [47].

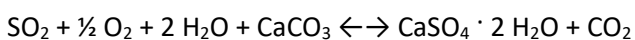
### 4.2.5 Ridurre le emissioni di SO<sub>x</sub>

Per limitare le emissioni di SO<sub>x</sub> la letteratura tecnico-scientifica di riferimento consiglia perlopiù di agire sulla miscela che subirà il processo di cottura in forno. A tale scopo è necessario adottare uno delle seguenti tecniche:

#### 4.2.5.1 Sistemi di abbattimento a umido

I sistemi di abbattimento a umido (Paragrafo 4.1.7.1) sono la tecnica più comunemente usata per la desolforazione degli effluenti gassosi nelle centrali a carbone.

Per i processi di produzione del cemento, il processo a umido di riduzione delle emissioni di SO<sub>2</sub> costituisce una tecnica consolidata. L'abbattimento a umido si basa sulla seguente reazione chimica:



SO<sub>x</sub> adsorbiti da un liquido/fango spruzzato da una torre di nebulizzazione. L'adsorbente solitamente impiegato è il carbonato di calcio. I sistemi di abbattimento a umido presentano i valori di efficienza più elevati per i gas acidi solubili tra tutti i metodi di desolforazione degli effluenti gassosi (flue-gas

desulphurisation, FGD) a fronte dei rapporti stechiometrici in eccesso più bassi e della percentuale più bassa di rifiuti solidi generati [48]. La tecnica necessita di una determinata quantità di acqua, con la conseguente necessità di effettuare il trattamento delle acque reflue.

### 4.3 Cartiere

Per limitare il consumo energetico e diverse problematiche di natura ambientale, negli impianti di produzione della carta si possono adottare tecniche e tecnologie avanzate [49] [50].

Come detto nell'introduzione del presente Paragrafo, l'obiettivo di UNIFI è individuare le migliori tecnologie disponibili. Pertanto, di seguito non si descrivono metodologie di controllo dei processi che prescindono dall'utilizzo di dispositivi, macchinari e tecnologie specifiche e non si prendono in considerazione attività di controllo delle reazioni chimiche (quali la riduzione del rapporto aria/combustibile o la riduzione della temperatura dell'aria in ingresso alla combustione o, addirittura, la sostituzione dell'aria di combustione con ossigeno puro per ridurre le emissioni di  $\text{NO}_x$ ). Allo stesso modo non si considerano modalità di selezione delle materie prime da introdurre in ingresso al processo produttivo, ma, piuttosto, si illustrano (riportandone una breve descrizione) tutte le tecnologie da adottare per diminuire consumi energetici e limitare emissioni di sostanze inquinanti, di rumore e di altri effetti indesiderati.

#### 4.3.1 Processo di produzione della carta:

In sintesi, il processo di fabbricazione consiste in diverse fasi che portano alla formazione della carta dal legno. Le fasi principali sono:

- Preparazione delle fibre: spappolamento
- Sbiancamento
- Formatura e pressatura del foglio
- Vari trattamenti superficiali
- Asciugatura.

Il legno è formato approssimativamente da:

- Cellulosa (circa 45%)
- Emicellulosa (circa 30%)
- Lignina (circa 20%)
- Vari estraibili: terpeni, resine, acidi grassi (circa 5%).

La cellulosa e l'emicellulosa sono le fibre del legno, mentre la lignina è l'inter-fibra che le tiene insieme. All'alba dell'industria della carta, i fogli sono stati creati manualmente, poi sono state sviluppate macchine per la produzione continua di carta. Inizialmente si trattava di fabbriche che utilizzavano il processo completo dal taglio degli alberi alla carta (in bobine). Oggi la maggior parte delle industrie utilizza come materia prima la pasta di cellulosa prodotta altrove (e possibilmente carta riciclata).

Il materiale più comunemente usato è la pasta di legno o cellulosa, di solito legno morbido come abete o pioppo, ma - a seconda degli usi - possono essere utilizzate anche altre fibre come il cotone, il lino e la canapa, oltre naturalmente alla carta riciclata [51].

#### **Preparazione delle fibre: spappolamento**

Considerando il processo che parte dal legno, in questa fase il legno viene scortecciato e ridotto in trucioli, poi si formano delle polpe che rompono il legame della lignina in vari modi. La materia prima viene trasformata in polpa, una miscela concentrata di fibre sospese nel liquido. La separazione delle fibre avviene sia con metodi fisici (battitura, calore) che chimici (alcali). Poiché le fibre derivano da fonti naturali, sono necessarie diverse fasi di separazione e di lavaggio, quindi sbiancamento o tintura per alterarne l'aspetto a quello del prodotto finale [52].

**Paste chimiche (processo Kraft):** la lignina viene sfibrata chimicamente (con soda caustica e solfuro di sodio) e selettivamente, lasciando intatte le fibre di cellulosa: si ottiene una pasta marrone che richiede molti agenti sbiancanti, ma la carta finale è molto resistente (kraft, che in tedesco significa forte). Il processo ha degli svantaggi ambientali (lo zolfo genera odore di uova marce, e ci sono molti rifiuti acquosi) e di resa (solo il 50% del legno viene trasformato in polpa, anche se molti rifiuti vengono bruciati e l'energia viene recuperata) [53].

**Paste meccaniche e termomeccaniche (groundwood pulping e thermo mechanical pulp):** La lignina viene defibrillata con una macinazione esclusivamente meccanica (macinazione), o termomeccanica, e le fibre cellulosiche vengono rilasciate ma anche parzialmente danneggiate, e senza la completa separazione delle fibre, che possono rimanere raggruppate in fasci isolati. La pasta è molto impura, con la conservazione di tutte le sostanze insolubili del legno, comprese quelle incrostanti: le fibre poco raffinate rendono la carta così prodotta meno resistente alle sollecitazioni meccaniche, data la difficoltà delle fibre a formare ponti di idrogeno; inoltre, a causa dell'elevato residuo di lignina, il prodotto finale presenta una scarsa stabilità alla luce, con conseguente tendenza ad un facile ingiallimento. Il processo ha alcuni vantaggi in termini di resa (il 95% del legno viene trasformato in polpa), ma richiede molta energia meccanica, anche se la polpa meccanica prodotta è più economica di quella chimica. Per queste sue caratteristiche, viene generalmente utilizzata in tutte quelle applicazioni in cui non è richiesta un'elevata resistenza meccanica e fotostabilità: carta da giornale, elenchi telefonici, ecc [54].

**Paste semichimiche (CTMP):** Il processo di formazione della polpa è intermedio: il legno viene trattato chimicamente (con processi più blandi) e poi trattato con vapore e meccanicamente (Chemo Thermo Mechanical Pulping). Il trattamento separa la maggior parte delle fibre, ma la purificazione è solo parziale, a seconda della durata e dell'intensità.

La carta prodotta è più resistente di quella ottenuta con pasta meccanica e intermedia di quella prodotta con pasta chimica. Può essere utilizzata per produrre carta patinata [55].

#### **Preparazione delle fibre: sbiancamento**

Le paste sono solitamente sbiancate con cloro o diossido di cloro. I sistemi a basso impatto ambientale utilizzano ossigeno e perossido di idrogeno. Il pH finale della carta varia normalmente da 4 a 7. Di solito la carta non sbiancata viene chiamata "non sbiancata" mentre la carta sbiancata e poi ricolorata (marrone) viene chiamata "avana".

Dopo questi trattamenti si ottiene una polpa costituita da una sospensione di fibre epurate. Da qui è possibile produrre balle di cellulosa (che verranno poi utilizzate come materia prima dalle cartiere, dovendo quindi essere nuovamente miscelate in pulper) o passare direttamente alla formazione dei fogli [56].

#### **Formazione del foglio e pressatura**

Nell'antichità, la polpa preparata con la lisciviazione di stracci di lino e cotone veniva diluita con acqua per ottenere una poltiglia leggera. In questa sospensione era immersa la "forma", una sorta di setaccio, su cui si depositava una trama di fibre. In questa fase si poteva formare una filigrana quando alla "forma" venivano attaccati dei fili metallici opportunamente sagomati che impedivano alla polpa di depositarsi uniformemente, generando così un'immagine visibile in controluce. A questo punto la carta era pronta e doveva solo essere pressata e asciugata.

Nelle moderne cartiere continue moderne, la soluzione di cellulosa viene drenata dalla cassa di scorrimento (circa il 3% di cellulosa come residuo secco) attraverso uno spazio largo quanto la macchina su un nastro a flusso continuo: le fibre vengono concentrate e compattate (preferibilmente allineate nella direzione della macchina) formando il foglio iniziale (circa l'80% di acqua). La velocità del nastro in relazione alla portata delle fibre dalla cassa di scorrimento determina la "squadratura" della carta, cioè l'orientamento delle fibre e quindi la resistenza meccanica trasversale e longitudinale. Segue la pressatura, che viene effettuata in continuo nell'essiccatoio con rulli dotati di feltri: le fibre vengono maggiormente compattate e il foglio subisce una laminazione, perdendo ancora acqua e raggiungendo una concentrazione del 3-4%. Da qui i termini "lato feltro" e "lato tela" della carta [57].

### **Trattamenti superficiali**

La carta grezza ottenuta dalla pressatura della pasta è piuttosto assorbente e non ha una superficie adatta alla scrittura o ad altre applicazioni come la stampa (o la siliconatura per le etichette autoadesive, ad esempio). Per questo motivo viene utilizzata una vasta gamma di additivi per ottenere le proprietà desiderate. Questi vengono applicati come rivestimento sulla superficie, formando una patina.

Gli agenti patinatori sono di solito polimeri progettati per ottenere una superficie migliore su cui scrivere. L'amido, il poliaccoppiato di vinile (PVA) e molti altri prodotti sono utilizzati per realizzare diversi tipi di carta. La patinatura può anche migliorare la superficie levigandola. La matrice di fibra è ruvida e il caolino è spesso usato per renderla liscia. Ad esempio, la carta patinata per riviste è realizzata in questo modo. L'aspetto lucido (ad esempio delle copertine delle riviste) viene aggiunto dopo la stampa applicando uno strato trasparente (come lo smalto) alla pagina stampata, e non è quindi una caratteristica originale della carta.

Altri additivi vengono aggiunti per migliorare altre caratteristiche specifiche della carta, a seconda dell'applicazione.

Seguendo il percorso della carta in una macchina da cartiera, vengono poi applicati dei primer per modificare le caratteristiche superficiali della carta (collatura). Generalmente si applicano soluzioni di alcool polivinilico e carbossimetilcellulosa o una soluzione con i riempitivi per le carte patinate.

### **Essiccamento**

La carta generalmente esce dal trattamento di calibratura con umidità ancora elevata. Il foglio viene poi asciugato facendolo passare nuovamente in un essiccatore e poi calandrato attraverso uno o più rulli riscaldati (di solito in acciaio) che danno una certa pressione al foglio, rendendolo relativamente liscio sul lato a contatto con i cilindri (carta calandrata) [58].

### **Altri trattamenti**

A seconda del tipo di carta e dell'applicazione, la carta può essere ulteriormente lavorata (sia in linea, cioè in un unico processo, sia in un processo separato fuori linea). Ad esempio, per produrre carte glassine si utilizzano supercalandre che comprimono e riscaldano la carta fino a frantumare le fibre, diminuendo lo spessore del foglio e aumentando la levigatezza: la carta acquista un aspetto traslucido (da qui il nome glassine che in francese richiama la trasparenza del vetro).

In Figura 5 si riporta lo schema tipico di un impianto di produzione di carta.

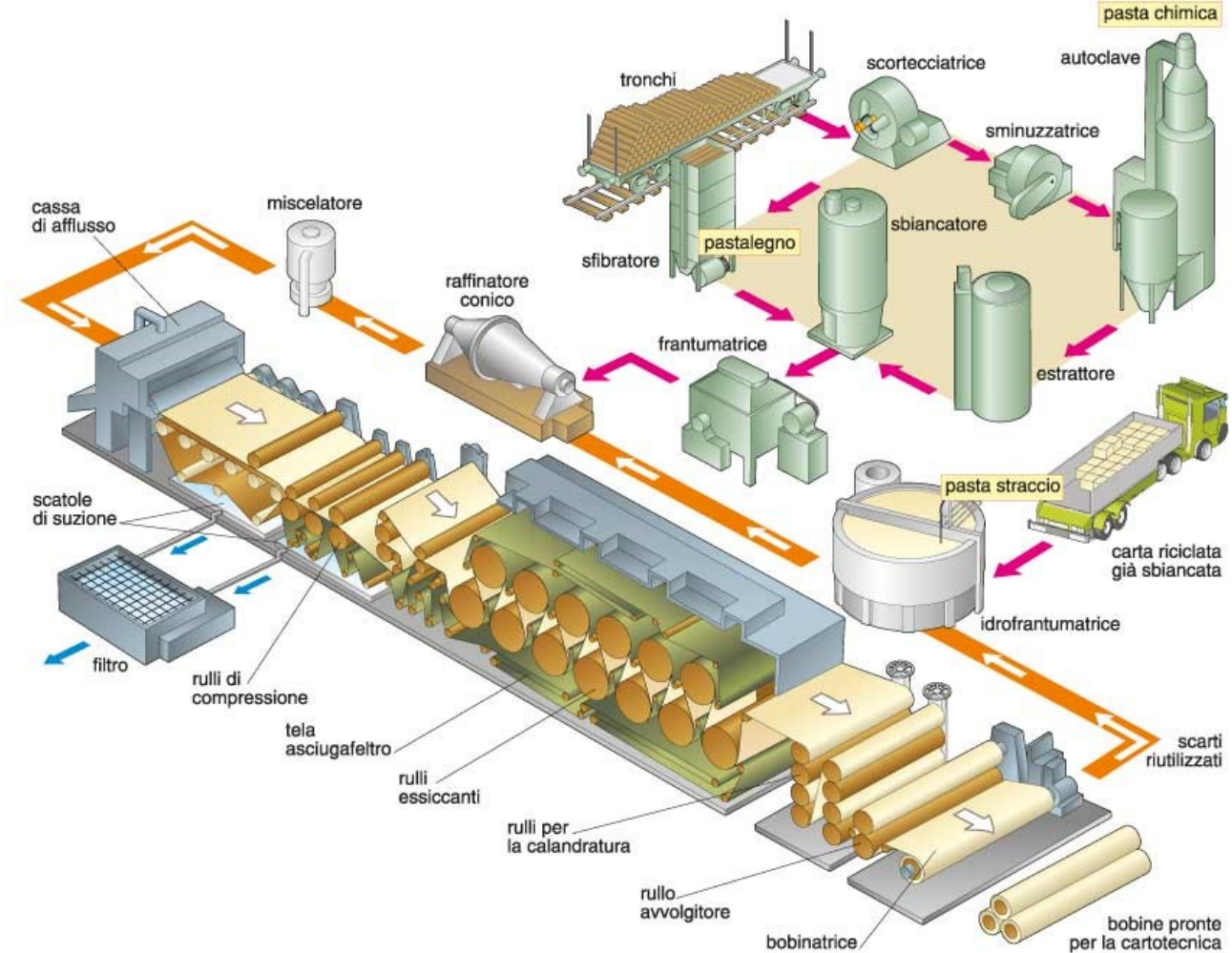


Figura 5: processo di produzione della carta.

#### 4.3.2 Ridurre il consumo energetico

Per ridurre il consumo di energia termica (vapore), massimizzare il beneficio dei vettori energetici usati e ridurre il consumo di energia elettrica, la letteratura tecnico scientifica prevede di applicare una o più delle tecniche riportate di seguito:

##### 4.3.2.1 Sistema di gestione dell'energia

Per ridurre il consumo di combustibile e di energia è necessario utilizzare un sistema di gestione dell'energia con le seguenti caratteristiche:

- valutazione del consumo e della produzione di energia complessivi della cartiera
- individuazione, quantificazione e ottimizzazione del potenziale di recupero dell'energia
- monitoraggio e protezione della condizione ottimizzata del consumo energetico

##### 4.3.2.2 Inceneritori per recupero energia

L'incenerimento dei rifiuti e dei residui della produzione di pasta per carta e cartone aventi contenuto organico e potere calorifico elevati, permette di ridurre il consumo di combustibile e di energia [59].

##### 4.3.2.3 Impianto di cogenerazione di calore ed energia

La copertura della domanda di vapore ed energia dei processi produttivi per quanto possibile per mezzo della cogenerazione di calore ed energia (CHP) permette di ridurre il consumo di combustibile e di energia.

L'uso di questa tecnologia prevede rifacimenti importanti dell'impianto di produzione dell'energia anche in termini di layout della cartiera [60].

#### *4.3.2.4 Sistema di riutilizzo del calore in eccesso*

Utilizzare il calore in eccesso per essiccare la biomassa e i fanghi, per riscaldare l'acqua di alimentazione della caldaia e di processo, oltre al riscaldamento degli edifici, permette di ridurre il consumo di combustibile ed incrementare l'efficienza energetica complessiva della cartiera.

#### *4.3.2.5 Termocompressori*

I termocompressori sono progettati per incrementare le proprietà termofluidodinamiche del vapore a bassa pressione miscelandolo con il vapore ad alta pressione. Si basano sulla collaudata tecnologia delle pompe a getto e permettono così di recuperare il calore latente di vaporizzazione ed in definitiva di ridurre i consumi energetici [61].

#### *4.3.2.6 Coibentazione condutture*

L'uso di coibentanti nelle condutture di vapore permette di isolarle dalle condizioni ambientali incrementando di fatto l'efficienza energetica. Questa tecnica è applicabile solo nel caso in cui vi sia disponibilità in impianto di vapore a media pressione.

#### *4.3.2.7 Sistemi sottovuoto per la disidratazione efficiente*

L'uso di sistemi sottovuoto per la disidratazione efficienti sotto il profilo energetico permette di ridurre il consumo energetico complessivo di impianto.

#### *4.3.2.8 Motori, pompe e agitatori elettrici ad alta efficienza*

L'uso di motori, pompe e agitatori elettrici di ultima generazione ad alta efficienza permette, ovviamente, di ridurre i consumi energetici con conseguenti benefici nel processo complessivo di produzione della carta. Le considerazioni da fare sono analoghe a quelle già riportate nel Paragrafo 4.1.2.1.

#### *4.3.2.9 Inverter*

Utilizzare inverter nei motori elettrici di azionamento ventilatori, pompe e compressori, permette di modulare il carico di questi macchinari in funzione del reale fabbisogno, con conseguente incremento dell'efficienza energetica [62], come già detto nel Paragrafo 4.1.2.4.

#### *4.3.2.10 Valvole di riduzione della pressione*

L'uso di valvole di regolazione di pressione a valle della caldaia permette di allineare i livelli di pressione del vapore con le esigenze reali di produzione, con conseguente ottimizzazione del processo.

### **4.3.3 Ridurre le emissioni di polveri**

Per limitare le emissioni di polveri e particolato, la letteratura tecnico-scientifica di riferimento consiglia perlopiù di trattare i gas di scarico alla camera di combustione. A tale scopo è necessario adottare uno o più dei seguenti dispositivi:

#### *4.3.3.1 Precipitatore elettrostatico (ESP)*

I precipitatori elettrostatici funzionano caricando e separando le particelle per mezzo di un campo elettrico. Essi possono funzionare in condizioni molto diverse [40] e hanno gli stessi vantaggi e svantaggi già descritti per gli impianti di produzione del vetro (Paragrafo 4.1.3.1).

#### *4.3.3.2 Scrubber alcalini*

I composti gassosi sono disciolti in un liquido idoneo (acqua o soluzione alcalina). È possibile realizzare la rimozione simultanea dei composti solidi e gassosi. A valle del sistema di abbattimento ad umido, i gas reflui sono saturati con acqua ed è necessaria una separazione delle goccioline prima di procedere allo

scarico di questi gas. Il liquido che ne risulta va trattato con un impianto di trattamento delle acque reflue, atto a raccogliere la materia insolubile per sedimentazione o filtraggio [63].

#### 4.3.4 Ridurre le emissioni di NOx

Per limitare le emissioni di NOx la letteratura tecnico-scientifica di riferimento consiglia perlopiù di controllare la combustione. A tale scopo è necessario adottare uno o più dei seguenti dispositivi:

##### 4.3.4.1 Sistemi di controllo della combustione

Un monitoraggio permanente dei parametri di combustione più importanti (per esempio il tenore di O<sub>2</sub>, il tenore di CO, il rapporto aria/combustibile, e la quantità di componenti non combustibili) consente di ottimizzare la combustione e ridurre le emissioni di ossidi di azoto.

Avvalendosi della tecnologia di controllo della reazione di combustione, si realizzano le migliori condizioni di combustione. La formazione e le emissioni di NOx possono essere diminuite adeguando i parametri correnti, la distribuzione dell'aria, l'ossigeno in eccesso, la conformazione della fiamma e il profilo della temperatura.

##### 4.3.4.2 Incenerimento per fasi

L'incenerimento graduale si basa sul ricorso a due zone di combustione, con rapporti di aria e temperatura controllati in una prima camera. La prima zona funziona in condizioni sottostechiometriche per convertire i composti dell'ammoniaca in azoto elementare ad alta temperatura. Nella seconda un apporto d'aria supplementare completa la combustione a temperatura inferiore. Successivamente alle due fasi di incenerimento i gas reflui sono convogliati in una seconda camera per recuperarne il calore, producendo vapore per il processo.

##### 4.3.4.3 Bruciatore a bassa emissione di NOx

I bruciatori a bassa emissione di NOx sono basati sui principi di riduzione delle temperature di picco della fiamma, sul ritardo della combustione che avviene però integralmente e sull'aumento del trasferimento di calore (emissività aumentata della fiamma). Possono essere associati a una progettazione modificata della camera di combustione della caldaia.

##### 4.3.4.4 Sistema di iniezione graduale di liquor esausto

L'immissione di liquor esausto al solfito nella caldaia a diversi livelli graduali evita la formazione di NOx e consente una combustione integrale.

##### 4.3.4.5 Riduzione non catalitica selettiva (SNCR)

Questa tecnica si basa sulla riduzione dei NOx in azoto mediante reazione ad alta temperatura con ammoniaca o urea. La soluzione di ammoniaca (fino al 25 % di NH<sub>3</sub>), i composti precursori dell'ammoniaca o le soluzioni di urea sono immessi nel gas di combustione per ridurre NO in N<sub>2</sub>. La reazione raggiunge un effetto ottimale in un intervallo di temperatura compreso fra circa 830 °C e 1 050 °C, e deve essere dato un tempo di ritenzione sufficiente affinché gli agenti immessi possano reagire con il NO. È necessario controllare i dosaggi di ammoniaca o di urea per contenere entro bassi livelli la perdita di NH<sub>3</sub> [46].

#### 4.3.5 Ridurre le emissioni di SO<sub>2</sub>/TRS

Per limitare le emissioni di SO<sub>2</sub> e TRS la letteratura tecnico-scientifica di riferimento consiglia perlopiù di porre l'attenzione al processo di essiccazione della carta, controllando sia la composizione della miscela da essiccare che i combustibili impiegati per il bruciatore in caldaia. A tale scopo è necessario adottare uno delle seguenti tecniche:

#### 4.3.5.1 Sistemi di ottimizzazione della combustione

Tecniche come un sistema di controllo efficiente del tasso di combustione (rapporto aria/combustibile, temperatura, tempo di permanenza) o di controllo dell'eccesso di ossigeno o una corretta miscelazione di aria e combustibile.

#### 4.3.5.2 Sistemi di controllo del tenore di $\text{Na}_2\text{S}$ nell'apporto di fango calcareo

Un lavaggio e una filtrazione efficienti dei fanghi riducono la concentrazione di  $\text{Na}_2\text{S}$ , riducendo così la formazione di acido solfidrico nel forno a calce durante il processo di ricombustione

#### 4.3.5.3 Sistemi di raccolta e recupero delle emissioni di $\text{SO}_2$

Raccolta dei gas reflui ad alta concentrazione di  $\text{SO}_2$  provenienti dalla produzione di liquor acido, dai digestori, dai diffusori o dai serbatoi soffianti. Si recupera  $\text{SO}_2$  in cisterne di assorbimento a diversi livelli di pressione, per motivi sia economici che ambientali.

#### 4.3.5.4 Sistemi per l'incenerimento dei gas odorigeni e dei TRS

I gas fortemente odorigeni raccolti possono essere smaltiti mediante incenerimento nella caldaia di recupero, in appositi bruciatori TRS o nel forno a calce. I gas debolmente odorigeni raccolti sono idonei all'incenerimento nella caldaia di recupero, nel forno a calce, nella caldaia per la produzione di energia o nei bruciatori TRS. I gas provenienti dai serbatoi di dissoluzione dei reagenti possono essere inceneriti nelle moderne caldaie di recupero.

#### 4.3.5.5 Caldaia a recupero per l'incenerimento dei gas debolmente odorigeni

Combustione dei gas debolmente odorigeni (ampio volume, basse concentrazioni di  $\text{SO}_2$ ) combinata con un sistema di riserva. I gas debolmente odorigeni e gli altri componenti odorigeni sono raccolti simultaneamente per essere inceneriti nella caldaia di recupero. L'acido solfidrico è quindi recuperato dai gas esausti della caldaia di recupero attraverso scrubber multistadio in controcorrente e riutilizzato come sostanza chimica di cottura. Il sistema di riserva è costituito dagli scrubber

#### 4.3.5.6 Sistema di abbattimento ad umido

I composti gassosi sono disciolti in un liquido idoneo (acqua o soluzione alcalina). È possibile realizzare la rimozione simultanea dei composti solidi e gassosi. A valle del sistema di abbattimento ad umido i gas reflui sono saturati con acqua ed è necessaria una separazione delle goccioline prima di procedere allo scarico di questi gas. Il liquido che ne risulta va trattato da un impianto di trattamento delle acque reflue, raccogliendo la materia insolubile per sedimentazione o filtraggio [64].

#### 4.3.5.7 ESP o multicicloni con scrubber Venturi multistadio o scrubber multistadio in equicorrente con doppia immissione

La separazione delle polveri è effettuata in un precipitatore elettrostatico o in un ciclone multistadio. Per il processo al solfito di magnesio, le polveri trattenute nell'ESP consistono essenzialmente in  $\text{MgO}$  ma in misura minore anche in K, Na o composti di Ca. Le ceneri di  $\text{MgO}$  recuperate sono sospese in acqua e pulite mediante lavaggio e spegnimento per formare  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , usato quindi come soluzione alcalina di lavaggio negli scrubber multistadio per recuperare il componente di zolfo delle sostanze chimiche di cottura. Per il processo a base di solfito di ammonio, la base di ammoniacca ( $\text{NH}_3$ ) non è recuperata poiché è decomposta in azoto nel processo di combustione. Dopo la rimozione delle polveri, il gas refluo è raffreddato attraverso un abbattitore di raffreddamento ad acqua per essere convogliato in tre o più scrubber multistadio per il gas, dove le emissioni di  $\text{SO}_2$  sono lavate nella soluzione alcalina a base di  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  (processo al solfito di magnesio) o in una soluzione di  $\text{NH}_3$  fresca al 100 % (processo al solfito di ammonio) [65].

#### 4.3.6 Ridurre l'uso di acqua fresca/flusso di acque reflue nonché il carico inquinante nelle acque reflue

La letteratura tecnico-scientifica riporta il largo utilizzo di acqua pura da parte degli impianti di produzione di carta. L'acqua reflua di impianto viene poi trattata prima di reimmetterla nella nel corso d'acqua di



alimentazione. Di seguito vengono quindi riportate le migliori tecniche e tecnologie utilizzate per limitare l'uso di acqua fresca e gli inquinanti nelle acque reflue di impianto.

#### *4.3.6.1 Tamburi rotanti per la scortecciatura a secco*

Scortecciatura a secco dei tronchi in tamburi rotanti a secco (l'acqua è usata solo nel lavaggio dei tronchi e riciclata solo con un lieve spurgo nell'impianto di trattamento delle acque reflue) [66].

#### *4.3.6.2 Sistemi per lo sbiancamento senza utilizzo di cloro (TCF)*

Nello sbiancamento TCF l'uso di sostanze chimiche sbiancanti contenenti cloro è del tutto evitato, in modo da non avere emissioni di sostanze organiche e di composti organici clorurati generati dallo sbiancamento [67].

#### *4.3.6.3 Sistemi per lo sbiancamento moderno senza utilizzo di cloro elementare (ECF)*

Lo sbiancamento ECF moderno riduce al minimo il consumo di diossido di cloro mediante il ricorso a una delle seguenti fasi di sbiancamento o a una combinazione di esse: ossigeno, fase di idrolisi acida a caldo, fase con ozono a consistenza media e alta, fasi con perossido di idrogeno a pressione atmosferica e perossido di idrogeno pressurizzato o il ricorso a una fase a diossido di cloro a caldo [68].

#### *4.3.6.4 Sistemi di delignificazione estesa*

La delignificazione estesa mediante a) cottura modificata o b) delignificazione a ossigeno rafforza il grado di delignificazione della pasta per carta (abbassandone il numero kappa) prima dello sbiancamento, riducendo così l'uso di sostanze chimiche sbiancanti e il carico di COD nelle acque reflue. Abbassare il numero kappa di un'unità prima dello sbiancamento può ridurre il COD rilasciato nell'impianto di sbiancamento di circa 2 kg COD/ADt. La lignina rimossa può essere recuperata e convogliata verso il sistema di recupero delle sostanze chimiche e dell'energia [69].

#### *4.3.6.5 Sistemi per la cottura modificata estesa*

La cottura modificata estesa (in lotto o in continuo) prevede tempi di cottura più lunghi in condizioni ottimizzate (per esempio la concentrazione di basi nel liquor di cottura è adeguata per essere più bassa all'inizio e più alta alla fine del processo di cottura), per estrarre il maggior quantitativo possibile di lignina prima dello sbiancamento, senza indebita degradazione degli idrati di carbonio o perdita eccessiva di resistenza della pasta per carta. Diventa così possibile ridurre l'uso di sostanze chimiche nella successiva fase di sbiancamento e il carico organico nelle acque reflue dell'impianto di sbiancamento

#### *4.3.6.6 Sistemi di delignificazione a ossigeno*

La delignificazione a ossigeno è un'opzione per rimuovere una frazione sostanziale della lignina rimanente dopo la cottura, se l'impianto di cottura deve operare con numeri kappa più elevati. In condizioni alcaline la pasta per carta reagisce con l'ossigeno per rimuovere una parte della lignina residua [70].

#### *4.3.6.7 Sistemi di vaglio e lavaggio efficienti in ciclo chiuso della pasta greggia*

Il vaglio della pasta greggia è effettuato con filtri in pressione fessurati in un ciclo chiuso multistadio. Le impurità e i frammenti sono quindi rimossi in una fase iniziale del processo. Il lavaggio della pasta greggia separa le sostanze chimiche disciolte organiche e inorganiche dalle fibre della pasta per carta. La pasta greggia può essere prima lavata nel digestore e successivamente in impianti di lavaggio ad alta efficienza prima e dopo la delignificazione a ossigeno, ossia prima dello sbiancamento. Si riducono così il trasferimento, il consumo di sostanze chimiche dello sbiancamento e il carico emissivo nelle acque reflue. Si consente inoltre il recupero delle sostanze chimiche di cottura provenienti dalle acque di lavaggio. Un lavaggio efficiente si effettua con un lavaggio controcorrente multistadio, per mezzo di filtri e presse. Il sistema idrico dell'impianto di vaglio della pasta greggia è completamente chiuso.

#### 4.3.6.8 Sistemi di riciclo parziale delle acque di lavorazione nell'impianto di sbiancamento

I filtrati acidi e basici sono riciclati all'interno dell'impianto di sbiancamento in controcorrente rispetto al flusso della pasta per carta. L'acqua è spurgata nell'impianto di trattamento delle acque reflue o, in alcuni casi, nel lavaggio successivo al lavaggio a ossigeno. Un prerequisito per ottenere basse emissioni è dato da impianti di epurazione efficienti nelle fasi intermedie di lavaggio. Gli impianti Kraft efficienti realizzano un flusso di effluente proveniente dall'impianto di sbiancamento di 12 — 25 m<sup>3</sup>/ADt.

#### 4.3.6.9 Sistemi per il monitoraggio e contenimento delle perdite, anche con un recupero delle sostanze chimiche e dell'energia

Un sistema efficace di controllo, cattura e recupero delle fuoriuscite in grado di prevenire rilasci accidentali di carichi altamente organici e talvolta tossici o valori pH di picco (verso l'impianto secondario di trattamento delle acque reflue) comprende:

- il monitoraggio della conduttività o del pH in punti strategici per individuare perdite e fuoriuscite
- la raccolta del liquor deviato o fuoriuscito con la massima concentrazione possibile di solidi
- la reimmissione nel processo del liquor e delle fibre raccolti nei luoghi opportuni
- il contenimento delle fuoriuscite di flussi concentrati o pericolosi provenienti da zone di processo critiche (compresi il tallolio e la trementina), affinché non entrino nell'impianto di trattamento biologico degli effluenti
- serbatoi-tampone di dimensioni adeguate a raccogliere e stoccare liquor tossici o concentrati caldi.

#### 4.3.6.10 Sistemi per il mantenimento di una sufficiente evaporazione del liquor nero e capacità della caldaia di recupero di far fronte ai picchi di carico

Una capacità sufficiente dell'impianto di evaporazione del liquor nero e della caldaia di recupero garantiscono la possibilità di trattare carichi supplementari di liquor e di solido secco provenienti dalla raccolta di fuoriuscite o dagli effluenti dell'impianto di sbiancamento. Si riducono così le perdite di liquor nero a bassa concentrazione, di altri effluenti di processo concentrati e degli eventuali filtrati provenienti dall'impianto di sbiancamento. L'evaporatore a effetto multiplo concentra il liquor nero a bassa concentrazione generato dal lavaggio della pasta greggia e, a volte, anche i biofanghi provenienti dall'impianto di trattamento degli effluenti e/o il solfato di sodio proveniente dall'impianto a ClO<sub>2</sub>. Una capacità di evaporazione supplementare, superiore a quanto richiesto per il funzionamento normale, offre un margine sufficiente per recuperare le fuoriuscite e trattare gli eventuali flussi di riciclo dei filtrati di sbiancamento.

#### 4.3.6.11 Sistemi di estrazione dei condensati contaminati (incrostazioni) e loro riutilizzo nel processo

L'estrazione dei condensati contaminati (incrostazioni) e il loro riutilizzo nel processo riduce il fabbisogno di acqua fresca di una cartiera e il carico organico dell'impianto di trattamento delle acque reflue. In una colonna di estrazione, il vapore è convogliato controcorrente attraverso i condensati di processo filtrati in precedenza che contengono composti ridotti dello zolfo, terpeni, metanolo e altri composti organici. Le sostanze volatili del condensato si accumulano nel vapore di testa come gas non condensabili e metanolo e sono estratti dal sistema. I condensati purificati possono essere riutilizzati nel processo, per esempio per il lavaggio nell'impianto di sbiancamento, nel lavaggio della pasta greggia, nell'area di caustificazione (lavaggio e diluizione dei fanghi, spruzzi a filtro per fanghi), come liquor di lavaggio TRS per i forni a calce o come costituente del liquor bianco. I gas estratti non condensabili derivati dai condensati più concentrati sono immessi nel sistema di raccolta per i gas fortemente odoriferi e inceneriti. I gas estratti derivati dai condensati moderatamente concentrati sono raccolti nel sistema per i gas a basso volume e ad alta concentrazione (LVHC) e inceneriti.

#### *4.3.6.12 Sistemi di recupero degli effluenti destinati all'evaporazione e all'incenerimento provenienti dalla fase di estrazione alcalina a caldo*

Gli effluenti sono innanzitutto concentrati per evaporazione e quindi inceneriti come biocombustibile in una caldaia di recupero. Il carbonato di sodio contenente polveri e residui di combustione della fornace sono disciolti per recuperare una soluzione di soda.

#### *4.3.6.13 Sistemi di ricircolo dei liquidi di lavaggio provenienti dalle fasi comprese fra il pretrattamento sbiancante e il lavaggio della pasta greggia e l'evaporazione per ridurre le emissioni del pretrattamento sbiancante a base di MgO*

I prerequisiti per usare questa tecnica consistono in un numero kappa relativamente basso dopo la cottura (per esempio 14-16), una capacità sufficiente dei serbatoi, degli evaporatori e della caldaia di recupero per trattare flussi supplementari, la possibilità di ripulire le attrezzature di lavaggio dai depositi e un grado di bianco moderato della pasta per carta ( $\leq 87$  % ISO) poiché a volte questa tecnica può generare una lieve perdita di grado di bianco. Per i produttori di pasta per carta destinata alla vendita o altri operatori tenuti a ottenere un grado di bianco molto elevato ( $> 87$  % ISO), può essere difficile applicare il pretrattamento sbiancante a base di MgO.

#### *4.3.6.14 Apparat per il flusso in controcorrente dell'acqua di processo*

Negli impianti integrati, l'acqua fresca è immessa di norma attraverso gli spruzzi delle macchine continue passando successivamente alla sezione di produzione della pasta per carta.

#### *4.3.6.15 Sistemi per la separazione dei cicli*

I cicli delle diverse unità di processo (per esempio unità di produzione della pasta per carta, unità di sbiancamento e macchine continue) sono separati dal lavaggio e dalla disidratazione della pasta per carta (per esempio con presse di lavaggio). Questa separazione evita il trasferimento di inquinanti alla fase successiva e consente di eliminare le sostanze di disturbo dai volumi ridotti.

#### *4.3.6.16 Sistemi di sbiancamento ad alta consistenza (perossido)*

Per lo sbiancamento ad alta consistenza, la pasta per carta è disidratata per esempio con una linea a doppia tela o altre presse prima dell'aggiunta delle sostanze sbiancanti. Questo consente un uso più efficiente delle sostanze sbiancanti e produce una pasta per carta più pulita, un minor trasferimento di sostanze nocive verso le macchine continue e genera meno COD. Il perossido residuo può essere reimmesso in circolo e riutilizzato [71].

#### *4.3.6.17 Sistemi di recupero di fibre e cariche e trattamento delle acque bianche*

Le acque bianche provenienti dalle macchine continue possono essere trattate mediante le tecniche seguenti:

- dispositivi «save-all» (solitamente filtri a tamburo o a disco o unità di flottazione ad aria dissolta ecc.) che separano i solidi (fibre e cariche) dall'acqua di processo. La flottazione in aria dissolta nei cicli delle acque bianche trasforma i solidi sospesi, i fini, i materiali colloidali di dimensioni ridotte e le sostanze anioniche in fiocchi che vengono successivamente rimossi. Le fibre e le cariche recuperate sono reimmesse nel processo. Le acque bianche pulite possono essere riutilizzate negli spruzzi aventi requisiti meno rigorosi relativamente alla qualità dell'acqua.
- Un'ultrafiltrazione supplementare delle acque bianche prefiltrate produce un filtrato super chiaro di qualità sufficiente per essere usato come acqua da spruzzi ad alta pressione, acqua di tenuta e per la diluizione di additivi chimici.

#### *4.3.6.18 Sistemi di chiarificazione delle acque bianche*

I sistemi di chiarificazione dell'acqua usati quasi esclusivamente nell'industria cartaria sono basati su sedimentazione, filtraggio (filtro a disco) e flottazione. La tecnica più diffusa è la flottazione in aria dissolta.

Le cariche anioniche e i fini sono agglomerati mediante l'uso di additivi in fiocchi che possono successivamente essere trattati per via fisica. I polimeri idrosolubili di elevato peso molecolare o gli elettroliti inorganici sono usati come flocculanti. Gli agglomerati così ottenuti (fiocchi) sono fatti galleggiare nel bacino di chiarificazione. Nella flottazione ad aria dissolta (DAF) il materiale solido in sospensione si lega a bolle d'aria [72].

#### *4.3.6.19 Sistemi di ricircolo dell'acqua*

L'acqua chiarificata è reimpressa in ciclo come acqua di processo nello stesso impianto o, nel caso di un impianto integrato, dalla macchina continua può essere inviata all'impianto di produzione della pasta per carta e da quest'ultimo all'impianto di scortecciatura. L'effluente è scaricato per la maggior parte dai punti aventi il maggior carico inquinante (per esempio filtrato chiaro del filtro a disco dell'impianto di scortecciatura).

#### *4.3.6.20 Ottimizzazione della progettazione e della costruzione di serbatoi e tine (fabbricazione della carta)*

I serbatoi di contenimento dell'impasto e delle acque bianche sono progettati in modo da poter far fronte a fluttuazioni nel processo produttivo e a flussi variabili anche nei momenti di avvio e fermata.

#### *4.3.6.21 Fase di lavaggio prima di raffinare la pasta meccanica di conifere*

Alcuni impianti effettuano un pretrattamento del cippato di conifere combinando il preriscaldamento pressurizzato, l'alta compressione e l'impregnazione per migliorare le proprietà della pasta per carta. Una fase di lavaggio prima della raffinazione e dello sbiancamento riduce considerevolmente i COD separando un flusso di effluente modesto ma altamente concentrato che può essere trattato separatamente.

#### *4.3.6.22 Sistemi per lo sbiancamento in ciclo chiuso*

Negli impianti di produzione di pasta al solfito che usano il sodio come base di cottura, l'effluente dell'impianto di sbiancamento può essere trattato ad esempio con ultrafiltrazione, flottazione e separazione delle resine e degli acidi grassi, il che consente uno sbiancamento in ciclo chiuso. I filtrati derivati dallo sbiancamento e dal lavaggio sono riutilizzati nella prima fase di lavaggio dopo la cottura e infine riciclati nelle unità di recupero delle sostanze chimiche [73].

#### *4.3.6.23 Dispositivi per l'adeguamento del pH nel liquor diluito prima/all'interno dell'impianto di evaporazione*

La neutralizzazione è effettuata prima dell'evaporazione o dopo la prima fase di evaporazione, per mantenere gli acidi organici disciolti nel concentrato e convogliarli verso la caldaia di recupero con il liquor esausto.

#### *4.3.6.24 Sistemi di trattamento anaerobico dei condensati provenienti dagli evaporatori*

In assenza di aria il trattamento anaerobico delle acque reflue converte per mezzo di microrganismi il contenuto organico delle acque reflue in metano, diossido di carbonio, solfuri ecc. Il processo si svolge in un serbatoio reattore ermetico. I microrganismi sono trattenuti nel serbatoio come biomassa (fanghi). Il biogas formato dal processo biologico è composto di metano, diossido di carbonio e altri gas, come idrogeno e acido solfidrico, ed è idoneo alla generazione di energia. A causa dei carichi residui di COD, il trattamento anaerobico è considerato un pretrattamento prima del trattamento aerobico. Il trattamento anaerobico riduce il quantitativo di fanghi generato dal trattamento biologico.

#### *4.3.6.25 Sistemi di estrazione e recupero di SO<sub>2</sub> dai condensati provenienti dagli evaporatori.*

SO<sub>2</sub> è estratto dai condensati, i concentrati sono trattati biologicamente mentre SO<sub>2</sub> estratto è recuperato come sostanza chimica di cottura.

#### *4.3.6.26 Sistemi di prevenzione ed eliminazione dei biofilm con metodi che minimizzano le emissioni di biocidi*

Un apporto continuo di microorganismi nelle acque e nelle fibre crea uno specifico equilibrio microbiologico in ciascuna cartiera. Per evitare la proliferazione dei microorganismi, dei depositi di biomassa agglomerata e di biofilm nei cicli e nelle attrezzature, si fa spesso ricorso a bio-disperdenti o a biocidi. Nel processo di disinfezione catalitica a perossido di idrogeno i biofilm e i germi liberi dell'acqua di processo e dei fanghi di cartiera sono eliminati senza l'uso di biocidi.

#### *4.3.6.27 Sistemi di rimozione del calcio dall'acqua di processo con precipitazione controllata del carbonato di calcio*

Abbassare la concentrazione di calcio con rimozione controllata del carbonato di calcio (per esempio in una cella di flottazione ad aria dissolta) riduce il rischio di precipitazioni indesiderate di carbonato di calcio o di formazione di calcare nei cicli e nelle attrezzature, per esempio nelle sezioni di bobinatura, conduzione, feltri e negli ugelli degli spruzzatori, nelle condutture o negli impianti biologici di trattamento delle acque reflue.

#### *4.3.6.28 Apparat per il trattamento delle acque reflue*

La letteratura tecnico-scientifica riporta il largo utilizzo di acqua pura da parte degli impianti di produzione di carta. L'acqua reflua di impianto viene poi trattata prima di reimmetterla nel corso d'acqua di alimentazione. Di seguito vengono quindi riportate le migliori tecniche e tecnologie utilizzate per trattare le acque reflue di impianto.

#### *4.3.6.29 Apparat per il trattamento primario*

Trattamento fisico-chimico, come equalizzazione, neutralizzazione o sedimentazione. L'equalizzazione (per esempio nei bacini di equalizzazione) è usata per prevenire ampie variazioni di flusso, temperatura e concentrazioni di contaminanti, evitando così il sovraccarico del sistema di trattamento delle acque reflue.

#### *4.3.6.30 Apparat per il trattamento secondario (biologico)*

Per il trattamento delle acque reflue per mezzo di microorganismi, i processi disponibili sono il trattamento aerobico e il trattamento anaerobico. In una fase secondaria di chiarificazione, i solidi e la biomassa sono separati dagli effluenti per sedimentazione, a volte combinata con flocculazione.

#### *4.3.6.31 Apparat per il trattamento aerobico*

Nell'impianto di trattamento biologico aerobico delle acque reflue, in presenza di aria il materiale biodegradabile disciolto e il materiale colloidale sono trasformati per mezzo di microorganismi in parte in una sostanza a cellula solida (biomassa) e in parte in diossido di carbonio e acqua. I processi usati sono:

- fanghi attivati in una o due fasi
- processi con reattore a biofilm
- biofilm/fanghi attivati (impianto di trattamento biologico compatto) Questa tecnica consiste nel combinare il processo depurativo a letto mobile con fanghi attivati (BAS).

La biomassa generata (fanghi di risulta) è separata dall'effluente che l'acqua sia avviata allo scarico.

#### *4.3.6.32 Apparat per il trattamento combinato anaerobico/aerobico*

In assenza di aria il trattamento anaerobico delle acque reflue converte per mezzo di microorganismi il contenuto organico delle acque reflue in metano, diossido di carbonio, solfuri ecc. Il processo si svolge in un serbatoio reattore ermetico. I microorganismi sono trattenuti nel serbatoio come biomassa (fanghi). Il biogas formato dal processo biologico è composto di metano, diossido di carbonio e altri gas, come idrogeno e acido solfidrico, ed è idoneo alla generazione di energia. A causa dei carichi residui di COD, il trattamento anaerobico è considerato un pretrattamento prima del trattamento aerobico. Il trattamento anaerobico riduce il quantitativo di fanghi generato dal trattamento biologico

#### 4.3.6.33 *Apparati per il trattamento terziario*

Il trattamento avanzato comprende tecniche come il filtraggio per un'ulteriore rimozione dei solidi, la nitrificazione e la denitrificazione per rimuovere l'azoto o la flocculazione/precipitazione seguita da filtraggio per rimuovere il fosforo. Il trattamento terziario di norma è usato nei casi in cui il trattamento primario e biologico non siano sufficienti per ottenere bassi livelli di TSS, azoto o fosforo, il che può essere richiesto ad esempio da condizioni locali

#### 4.3.6.34 *Impianto di trattamento biologico ottimizzato*

Un impianto di trattamento biologico progettato e gestito correttamente comprende una progettazione e un dimensionamento dei serbatoi e dei bacini di trattamento (per esempio bacini di sedimentazione) adeguati ai carichi idraulici e di contaminanti. Un basso livello di emissioni di TSS è realizzato garantendo una buona sedimentazione della biomassa attiva. Revisioni periodiche della progettazione, del dimensionamento e dell'esercizio dell'impianto di trattamento delle acque reflue facilitano il raggiungimento di questi obiettivi. 30.9.2014 L 284/125 Gazzetta ufficiale dell'Unione europea IT [74].

#### 4.3.7 *Prevenire la generazione di rifiuti e gestione degli stessi*

La letteratura tecnico-scientifica riporta la criticità degli impianti di produzione della carta nella gestione dei rifiuti soprattutto per quanto concerne il loro smaltimento. Di seguito sono riportate le migliori tecnologie riportate in letteratura per ottimizzare il processo di smaltimento e termovalorizzazione dei rifiuti prodotti.

##### 4.3.7.1 *Sistemi di disidratazione dei rifiuti*

la disidratazione per esempio di fanghi, corteccia o scarti e talvolta essiccazione per aumentare la capacità di riutilizzo prima dello stesso (per esempio aumentare il potere calorifico prima dell'incenerimento). Per la disidratazione si usano presse a nastro, presse a vite, centrifughe di decantazione o filtri-prensa a camera. La disidratazione dei rifiuti permette inoltre di ridurre peso e volume per il loro trasporto.

##### 4.3.7.2 *Sistemi di frantumazione degli scarti*

la frantumazione/triturazione degli scarti, per esempio provenienti dai processi RCF e la rimozione delle parti metalliche, per aumentare le proprietà di combustione prima dell'incenerimento.

##### 4.3.7.3 *Inceneritori o in impianti a biomassa*

I residui della scorciatoia, cippatura, vaglio ecc. come corteccia, fanghi di fibre o altri residui essenzialmente organici sono termovalorizzati in inceneritori o in impianti a biomassa per il loro elevato potere calorifico [75].

#### 4.4 Industrie di lavorazione della plastica

Per limitare il consumo energetico e diverse problematiche di natura ambientale, negli impianti di produzione della plastica si possono adottare tecniche e tecnologie avanzate. Come detto nell'introduzione del Capitolo 3, l'obiettivo di UNIFI è individuare le migliori tecnologie disponibili. Pertanto, di seguito non si descrivono metodologie di controllo dei processi che prescindono dall'utilizzo di dispositivi e macchinari specifici (ad esempio non si prendono in considerazione attività di controllo delle reazioni chimiche, né si considerano modalità di selezione delle materie prime da introdurre in ingresso al processo produttivo). Al contrario, si illustrano (riportandone una breve descrizione) tutte le tecnologie da installare nell'impianto di produzione della plastica per diminuire consumi energetici e limitare emissioni di sostanze inquinanti, di rumore e di altri effetti indesiderati.

Prima di descrivere le tecnologie più avanzate per ridurre emissioni e consumi energetici, si riporta una breve descrizione del processo di lavorazione della plastica. Una volta descritto tale processo, si illustrano ad uno ad uno i problemi che caratterizzano la lavorazione in questione e si suggeriscono i dispositivi da installare per risolverli.

##### 4.4.1 Principali processi di trasformazione della plastica

Le lavorazioni necessarie per trasformare le materie plastiche in prodotto finito sono molteplici. Il ciclo di lavorazione della plastica tipico è composto da tre fasi, all'interno delle quali vengono svolte una o più operazioni, che possono essere realizzate in sequenza o contemporaneamente. Di seguito si sintetizzano le fasi di produzione della plastica e le lavorazioni ad esse associate. Ogni lavorazione viene condotta su macchine apposite che, se ben congegnate e associate alle "Best Available Techniques (BAT)", possono presentare limitati consumi energetici e basso impatto ambientale.

Le fasi di produzione della plastica sono tre:

1. La prima fase è la **pre-lavorazione**. Durante questa fase avvengono il trasporto della materia prima (granuli o polvere), la miscelazione, l'essiccamento (se necessario), la fusione, la pressurizzazione del fuso e, infine, il degassaggio (se necessario). Con questo processo i granuli di polimero/bipolimero vengono approvvigionati, miscelati, riscaldati, portati alla temperatura di plastificazione e pressurizzati. Quando si esegue il degassaggio, si fa seguire alle operazioni di fusione e pressurizzazione un processo di rimozione dei gas disciolti presenti nel fuso polimerico.
2. La seconda fase di lavorazione è la **formatura**. Le lavorazioni necessarie alla formatura dei prodotti possono essere suddivise in due macro-categorie a seconda della modalità di attraversamento del materiale fuso: le operazioni a produzione continua e le operazioni a produzione intermittente. In entrambi i casi la formatura avviene imponendo una geometria prestabilita all'uscita dell'estrusore e il raffreddamento controllato del fuso. I principali processi di formatura sono:
  - estrusione;
  - calandratura;
  - stampaggio a iniezione;
  - stampaggio a compressione;
  - estrusione-soffiaggio di corpi cavi;
  - stiro-soffiaggio di preforme;
  - estrusione di film (cast o blow);
  - termoformatura.

Il processo scelto dipende dalla forma del prodotto polimerico che si vuole ottenere, come riepilogato in Figura 6 [76].

• extrusion	for pipes, profiles, sheets and cable insulation
• injection moulding	for products of different, often very complex shapes like machine parts, electrical plugs and medical equipment such as syringes; thermoplastics and thermosets
• blow moulding	for bottles, containers and films
• calendering	for films and sheeting
• rotomoulding	for large shapes
• pultrusion	for rods, tubes, etc.
• blown film	for thermoplastics
• cast film	for thermoplastics
• coating	for thin layers on different substrates
• pressing	for resins
• spinning	for fibres
• transfer moulding	for thermosets
• compression moulding	for thermosets
• vulcanisation	for rubbers
• blending	generally applicable technique.

Figura 6: la figura riassume le forme possibili che si possono dare ai prodotti polimerici a seconda delle lavorazioni a cui si sottopongono le materie di partenza [76].

3. L'ultima fase di lavorazione è la **post-lavorazione**, durante la quale si eseguono operazioni necessarie a completare il prodotto desiderato. Le operazioni svolte in questa fase vengono suddivise in operazioni meccaniche, giunzioni, preparazioni della superficie e/o finiture superficiali.

Il processo di lavorazione della plastica è riassunto in Figura 7.



Figura 7: ciclo di lavorazione della plastica.

Si ricorda che, tra tutte le lavorazioni elencate, alcune sono spesso presenti nelle aziende di lavorazione dei polimeri, mentre altre possono non essere necessarie a seconda del tipo di materia prima trattata e della qualità del prodotto finito richiesta. Ad esempio, la sequenza costituita dalle operazioni di trasporto della materia prima, fusione in pressione e trasporto del fuso è presente in tutte le aziende eccetto quelle che operano a partire da bobine di film o foglia già pronti (su cui tipicamente vengono eseguite solo lavorazioni “secondarie” quali taglio, stampa e termoformatura). Al contrario, operazioni quali l’essiccamento della materia prima, la miscelazione e il degassaggio, talvolta, non sono presenti nel ciclo produttivo della plastica.

Dopo aver ricordato il ciclo di lavorazione della plastica, si illustrano le problematiche ad esso connesse e si riepilogano le migliori tecnologie disponibili per alleviare le criticità energetiche o ambientali.

#### 4.4.2 Ridurre i consumi energetici

Per la riduzione dei consumi energetici negli impianti di produzione della plastica si possono adottare le tecnologie descritte di seguito.



#### 4.4.2.1 Caldaie a condensazione

Così come nell'impianto di produzione del vetro (Paragrafo 4.2.1.2) anche nel caso delle aziende di produzione della plastica la letteratura consiglia di sostituire le caldaie a gas tradizionali con le caldaie a condensazione [76] [15].

I vantaggi e gli svantaggi di queste tecnologie sono gli stessi di quelli descritti nel Paragrafo 4.2.1.2. Essi sono:

- Maggior rendimento. Si recupera il calore di condensazione dei fumi grazie alla presenza di bruciatori tecnologicamente più avanzati e alla maggiore superficie di scambio. Il calore viene recuperato anche nelle condizioni di basso carico (condizioni nelle quali i generatori di calore funzionano per la maggior parte dell'anno).
- Maggiore efficacia dei sistemi di regolazione, che sono in grado di adeguare il bruciatore e, dunque, la generazione del calore alle effettive esigenze di impianto.

Gli svantaggi sono:

- Costo di acquisto maggiore sia dell'apparecchio che del sistema di regolazione.
- Maggiore possibilità di sporcare ("fouling") le superfici di scambio lato acqua. Per ottenere più superfici di scambio si progettano canalizzazioni più ridotte, per le quali è necessario assicurare (soprattutto nel caso di installazione su impianti già esistenti) un adeguato sistema di filtraggio.
- Necessità di operare in combinazione con impianti che dispongono di corpi scaldanti dimensionati per lavorare anche a bassa temperatura.
- Necessità di disporre di una canna fumaria resistente all'attacco delle condense e, nel caso di impianti ad elevata potenza, necessità di provvedere alla neutralizzazione delle condense acide non direttamente scaricabili in fogna. Qualora si proceda alla sostituzione di caldaie tradizionali con caldaie a condensazione in impianti già esistenti, occorre modificare le canne fumarie secondo quanto riportato.
- Necessità di ottimizzare la circolazione idraulica al fine di assicurare la minima temperatura di ritorno al generatore di calore.

Maggior complessità dell'impianto e conseguente necessità di progettisti, installatori e manutentori specializzati.

#### 4.4.2.2 Cinghie dentate

Sostituendo le trasmissioni a cinghia trapezoidale con trasmissioni a cinghie dentate è possibile ridurre le perdite di calore causate dallo slittamento dei sistemi di distribuzione. Si stima un risparmio energetico superiore al 5% e si ha la possibilità di ottenere TEE (Titoli di Efficienza Energetica) [77]. Si riducono, inoltre, i costi di manutenzione perché le cinghie dentate hanno tempi di sostituzione doppi rispetto alle cinghie trapezoidali. Tuttavia, si ottengono come svantaggi una maggior rumorosità, la necessità di maggior monitoraggio del sistema di trasmissione e, infine, l'impossibilità di sfruttare l'effetto di slittamento per salvaguardare l'elemento trascinato [15].

#### 4.4.2.3 Coibentazione delle linee di estrusione/iniezione

L'installazione di coperture isolanti per i cilindri di estrusione (o per quelli di iniezione) determina:

- Un risparmio dell'energia necessaria a preriscaldare i polimeri da estrarre/iniettare
- La riduzione del tempo di messa in regime dell'estrusore (o dell'iniettore). Ciò contribuisce a stabilizzare la temperatura di processo.

- La riduzione della possibilità di ottenere distribuzioni non uniformi della temperatura nei cilindri di estrusione/iniezione. Ciò impedisce il verificarsi di innalzamenti indesiderati della temperatura localizzati in alcune zone della macchina, che potrebbero far degradare il polimero.
- La riduzione del carico termico disperso in ambiente e sulle strutture della macchina. Ciò comporta un effetto benefico collaterale dovuto alla riduzione del carico termico sui gruppi frigoriferi, che sono necessari a raffreddare le macchine.

Si stima che la coibentazione delle linee di estrusione/iniezione determini risparmi nei consumi energetici dell'ordine del 10-25% del consumo totale dell'estrusore/iniettore. L'investimento iniziale da sostenere per effettuare la coibentazione è un relativamente basso e gli unici costi di manutenzione che si hanno sono legati alla necessità di sostituire la copertura isolante in caso di fuoriuscita del materiale dalla macchina (eventualità superabile usando estrusori in cascata o pompe del fuso) [15].

#### 4.4.2.4 *Inverter*

Gli inverter [16] sono già stati descritti nel Paragrafo 4.1.2.4.

Ad oggi, l'installazione di inverter è uno degli interventi maggiormente proposti per migliorare gli impianti di produzione della plastica. Tipicamente i motori su cui viene proposto questo intervento azionano ventilatori o pompe.

#### 4.4.2.5 *Motori ad alta efficienza*

Anche l'acquisto di motori ad alta efficienza [17] è già stato proposto come intervento migliorativo (Paragrafo 4.1.2.5).

#### 4.4.2.6 *Motori a corrente alternata (CA) con inverter*

La sostituzione di motori a corrente continua (CC) con motori a corrente alternata (CA) dotati di inverter è un intervento proposto principalmente per i motori delle linee di estrusione. Quando si adottano motori CA con inverter occorre installare un software per la regolazione dei vari parametri dell'estrusione, delle temperature e dello spessore. Il software sarà integrato con i sistemi di regolazione dei giri del motore delle viti di estrusione.

I principali svantaggi nell'adozione dei motori CA sono due:

- l'elevato costo di acquisto (circa cinque volte maggiore rispetto ad un motore a corrente continua di pari taglia)
- la lentezza nel rinnovo delle macchine (le linee di estrusione dei polimeri hanno una lunga vita media).

#### 4.4.2.7 *Ottimizzatori di tensione ed energia elettrica*

Questi dispositivi sono già stati descritti nel Paragrafo 4.1.2.6.

#### 4.4.2.8 *Sistemi di recupero termico dai compressori*

Durante il processo di compressione, un'alta percentuale dell'energia elettrica consumata viene trasformata in calore. In un impianto di produzione di aria compressa che voglia essere definito efficiente, questo calore non deve essere perso, bensì recuperato e destinato ad altre applicazioni. Una percentuale tra il 70% e l'80% dell'energia utilizzata per produrre aria compressa può essere recuperata e impiegata per altre necessità.

Ci sono principalmente due metodi di recupero di calore, che possono essere usati a seconda della modalità con cui il compressore viene raffreddato.

1. Nel caso di raffreddamento ad aria, il calore generato dal motore elettrico e dal radiatore dell'olio viene ceduto al flusso di aria di raffreddamento, che riesce ad asportare fino al 90% del calore generato. Il flusso di aria di raffreddamento può, poi, essere riutilizzato direttamente (mediante un'apposita canalizzazione) per riscaldare ambienti o strutture di produzione.
2. Nel caso di circuito di raffreddamento e lubrificazione a olio, il calore generato viene recuperato dal circuito attraverso uno scambiatore di calore olio/acqua, che può riscaldare l'acqua fino ad una temperatura di circa 70°C. L'acqua calda ottenuta può, poi, essere utilizzata o come acqua sanitaria, oppure per alimentare un sistema di riscaldamento centralizzato. Questo metodo consente di recuperare, sotto forma di calore, circa il 75% della potenza elettrica assorbita dalla rete [15].

#### 4.4.2.9 Sistemi di cogenerazione

Tali sistemi determinano consumi energetici inferiori perché generano energia recuperando anche il calore contenuto nel vapore prodotto in altri processi.

#### 4.4.2.10 Presse elettriche

Se si adoperano presse idrauliche per aprire e chiudere gli stampi delle operazioni di fusione/pressofusione/stampaggio e arrivare al prodotto finito, gli apporti energetici necessari ad azionare le presse sono di due tipi: termico ed elettrico. Sostituire le presse idrauliche con le presse elettriche comporta l'eliminazione della parte di energia termica necessaria. Essa, infatti, è attribuibile ai consumi del gruppo frigo, che alimenta con acqua il circuito di refrigerazione dello scambiatore, che, a sua volta, raffredda l'olio del circuito oleodinamico della pressa.

Per quanto concerne l'energia elettrica, nel caso delle presse idrauliche, il motore oleodinamico è collegato ad una centralina elettrica esterna. La centralina lavora al massimo della sua potenza in ogni fase del processo di stampaggio/fusione. Anche quando i meccanismi sono fermi (fase di raffreddamento), la pressione dell'olio deve essere massima per mantenere serrate le due parti dello stampo. Nelle macchine elettriche, invece, anziché avere un singolo motore, si hanno più servomotori, responsabili ciascuno di un singolo movimento. Ne consegue che il consumo elettrico predominante riguarda volta per volta il motore delegato al singolo movimento richiesto. La riduzione del fattore di carico della macchina e l'ottimizzazione dell'intero processo (miglior precisione) determina, così, un notevole risparmio energetico (50-80%).

Ciò che impedisce la completa adozione della tecnologia "full electric" è il costo di investimento indicativamente superiore del 50% rispetto alle presse idrauliche. Tale spesa viene consigliata nel caso in cui i costi variabili (costi di esercizio e di manutenzione), che sono inferiori nelle presse elettriche, compensino i costi fissi. Un confronto fra le due tecnologie adottabili, pertanto, dovrebbe tenere conto dei volumi di produzione che l'azienda ha e del costo unitario di produzione finale dei singoli prodotti. Il confronto, inoltre, dovrebbe tenere conto della maggior precisione di lavorazione ottenibile adottando presse elettriche.

#### 4.4.2.11 Presse ibride

Un limite delle presse elettriche è dato dal non ottimale raggiungimento di elevatissime pressioni tipico delle produzioni di materiali voluminosi o ad elevato spessore. Una soluzione che consente sia di avere dei consumi minori, che una forza di iniezione elevata è l'utilizzo di presse ibride. In queste presse l'azionamento dei motori per la chiusura dello stampo e per la carica (azionamento) delle viti sono elettrici, mentre il motore per la vite punzonante rimane idraulico. La riduzione del consumo in questo caso è inferiore al 40%, ma con le stesse qualità di precisione, elevata velocità, ridotta rumorosità ed efficienza

tipiche delle presse elettriche. La presenza di olio determina una riduzione della pulizia della macchina che la rende non indicata per la realizzazione di prodotti polimerici destinati al settore farmaceutico.

#### 4.4.3 Ridurre le emissioni di gas inquinanti (NO<sub>x</sub>, CO, VOC ecc.)

##### 4.4.3.1 Sistemi di aspirazione e sistemi di post-trattamento dei gas di scarico

Quando si producono alcuni tipi di plastica, le operazioni di fusione, estrusione e finitura possono dare origine a gas di scarico ricchi di sostanze inquinanti. Ad esempio, il processo produttivo del polietilene (soprattutto il Low Density Polyethylene - LDPE) produce gas ricchi di composti organici volatili (VOC), mentre il processo produttivo del polivinilcloruro (PVC) dà origine a gas ricchi di "Vinyl Chloride Monomer" (VCM).

Le emissioni di tali monomeri possono essere ridotte raccogliendo i gas di scarico con appositi sistemi di aspirazione. Questi ultimi vanno installati a valle della sezione che produce i gas e fatti seguire da sistemi di post-trattamento delle sostanze indesiderate. Il post-trattamento elimina i VOC contenuti nei gas di scarico mediante una delle seguenti tecniche:

- incenerimento termico (sistemi di flaring dei gas);
- ossidazione catalitica;
- adsorbimento;
- assorbimento.

Questi processi costituiscono delle BAT solo se le emissioni presenti dei gas di scarico non possono essere riciclate nel processo o utilizzate come combustibile.

Se si adottano sistemi di aspirazione e post-trattamento dei gas di scarico nella sezione di estrusione, allora la necessità di trattare i flussi anche a valle della sezione di finitura dipende da quanto è stata efficace la prima operazione di rimozione dei VOC. In base al livello di VOC residuo nel prodotto proveniente dalle sezioni di produzione o di estrusione, si deciderà se trattare i gas di scarico anche nelle fasi finali del processo produttivo.

##### 4.4.3.2 Caldaie a condensazione

Le caldaie a condensazione (già descritte nel Paragrafo 4.1.2.2) possono essere utilizzate anche per ridurre alcune emissioni inquinanti [15]. Tali caldaie, infatti, rispetto a quelle tradizionali (a gas), adottano bruciatori tecnologicamente più avanzati, progettati per limitare la produzione di NO<sub>x</sub> e CO durante il processo di combustione.

##### 4.4.3.3 Valvole di sicurezza con tenuta a soffietto o a doppia tenuta

Per limitare il rilascio in atmosfera di gas di scarico inquinanti (quali i gas ricchi di VOC prodotti dalle lavorazioni di fusione, estrusione o finitura), è possibile predisporre delle valvole di sicurezza che intercettino le emissioni indesiderate. Le valvole possono essere a loro volta attrezzate di tenute, che possono essere a soffietto, doppie e doppie con liquido barriera.

L'uso di valvole è particolarmente consigliato per gestire rischi connessi alla sicurezza dell'impianto quando il processo di produzione produce sostanze altamente tossiche. Dopo aver effettuato un'analisi dei rischi, le valvole vanno collocate nelle zone soggette al rischio di fuoriuscita dei gas (bocchette di uscita dal reattore, sezione di uscita dell'estrusore e/o sezione di uscita dalle macchine destinate alla finitura). Al posto delle valvole, si possono installare altri tipi di dispositivi, fra cui: pompe ad azionamento magnetico, "canned

pumps”, pompe a doppia tenuta con liquidi barriera, compressori ad azionamento magnetico, “canned compressors”, compressori a doppia tenuta con liquido barriera, agitatori ad azionamento magnetico, “canned agitators”, o agitatori a doppia tenuta con liquido barriera.

#### 4.4.3.4 *Dischi di rottura*

Oltre a installare valvole di sicurezza, per intercettare gas di scarico, è possibile installare dei dischi di rottura a monte delle valvole. I dischi di rottura sono dispositivi costituiti da una sottile membrana metallica che si rompe quando si verifica un valore di differenza di pressione tra i due lati della membrana prossimo al valore ammissibile per il recipiente.

Usando i dischi di rottura, si monitora costantemente la pressione tra dischi e valvole e, settando correttamente il valore della pressione ammissibile, si prevengono fuoriuscite di sostanze inquinanti. L’uso di dischi di rottura è consigliato quando il processo di produzione della plastica genera sostanze altamente tossiche. Tuttavia, nel caso in cui le valvole di sicurezza siano direttamente collegate ad un inceneritore (atto a bruciare i VOC e gli altri inquinanti), i dischi di rottura possono non essere necessari.

#### 4.4.4 *Ridurre l’inquinamento dell’ambiente causato da acque reflue*

L’intero processo di produzione della plastica dà origine ad acque reflue che provengono dall’utilizzo dei dispositivi d’impianto (ad esempio dal funzionamento delle caldaie a condensazione), dai sistemi di raffreddamento delle macchine e/o dai sistemi di rimozione delle particelle ad alta volatilità (nel caso di lavorazioni che producono polveri e trucioli). I liquami in eccesso vanno raccolti e smaltiti separatamente. Le tecnologie per ridurre l’impatto ambientale legato allo smaltimento delle acque reflue in ambiente sono le seguenti.

##### 4.4.4.1 *Sistemi di drenaggio e fognatura per l’asportazione dei liquami seguiti da sistemi per lo smaltimento dei liquami*

Le condutture destinate alla raccolta delle acque reflue sono soggette a corrosione a causa degli effluenti di processo, che possono contenere sostanze acide. Per ridurre il rischio di perdite di sostanze inquinanti nel sottosuolo, allora, il sistema di raccolta dei liquidi in eccesso va progettato con condutture di materiali resistenti alla corrosione e con apposite tenute. Le condutture, laddove possibile, vanno costruite fuori terra in modo da renderle facilmente ispezionabili, riparabili e monitorabili. Le condutture devono essere connesse ad appositi sistemi di smaltimento atti a separare l’acqua dalle sostanze nocive.

##### 4.4.4.2 *Caldaie a condensazione*

Le caldaie a condensazione danno origine a piccole quantità di acque reflue che devono essere smaltite. Tuttavia, i liquami di scarto generati da tali caldaie non sono considerati “pericolosi” né nocivi perché hanno acidità bassa. Pertanto, nelle BREF per la produzione di polimeri [76] si consiglia di sostituire le caldaie tradizionali con caldaie a condensazione, le cui acque reflue possono essere immesse in un normale sistema di scarico senza necessitare di ulteriore neutralizzazione.

#### 4.4.5 *Ridurre le emissioni di polvere*

La materia prima in ingresso al processo di produzione della plastica è costituita da polvere o granuli (pellet) di polimeri. L’aria usata per il trasporto pneumatico dei pellet e per il funzionamento delle unità di depolverizzazione di essi contiene polvere e particelle di filo.

La contaminazione dell’aria dipende dalla densità del polimero trasportato e immesso nel processo. La densità influenza la formazione di polveri e particelle di filo in questo modo: una maggior densità dei polimeri porta ad una maggior formazione di polvere che, se non rimossa, viene emessa in atmosfera. Invece, una minor densità dei polimeri aumenta la formazione di filo. Le particelle di filo sono meno

impattanti sull'ambiente perché, a differenza della polvere, non vengono immesse in atmosfera, ma finiscono nel prodotto finito dove possono essere raccolte come polimero di scarto.

Di seguito le tecnologie che si possono adottare per ridurre l'emissione di polveri.

#### *4.4.5.1 Cicloni*

I cicloni solitamente vengono posizionati nei condotti di scarico dell'aria di depolverazione (air dedusting units) e nei condotti di scarico dell'aria derivante da altre lavorazioni tra cui, soprattutto, l'essiccazione (air exhausts units). I cicloni sono particolarmente adatti a rimuovere particelle di polvere di piccole dimensioni (micro-sospensioni).

#### *4.4.5.2 Filtri*

Anche i filtri, come i cicloni, vengono posizionati nei condotti di scarico dell'aria di depolverazione (air dedusting units) e nei condotti di scarico dell'aria derivante da altre lavorazioni tra cui, soprattutto, l'essiccazione (air exhausts units). Si possono usare filtri a maniche singoli o multipli. L'uso di filtri è consigliato rispetto ai cicloni quando si devono rimuovere emulsioni di PVC. Sebbene i filtri siano meno adatti rispetto ai cicloni a rimuovere micro-sospensioni, quando sia in ha che fare con le polveri sottili, i filtri più efficaci sono quelli in tessuto.

#### *4.4.5.3 Sistemi di lavaggio a umido*

Tali sistemi sono già stati descritti nel Paragrafo 4.1.7.1.

## 4.5 Fonderie e Acciaierie

Per limitare il consumo energetico e diverse problematiche di natura ambientale, nelle fonderie e nelle acciaierie si possono adottare tecniche e tecnologie avanzate. Come detto nell'introduzione del presente Paragrafo, l'obiettivo di UNIFI è individuare le migliori tecnologie disponibili. Pertanto, di seguito non si descrivono metodologie di controllo dei processi che prescindono dall'utilizzo di dispositivi, macchinari e tecnologie e non si prendono in considerazione attività di controllo delle reazioni chimiche. Allo stesso modo non si considerano modalità di selezione delle materie prime da introdurre in ingresso al processo produttivo, ma, piuttosto, si illustrano (riportandone una breve descrizione) tutte le tecnologie da adottare per diminuire consumi energetici e limitare emissioni di sostanze inquinanti, di rumore e di altri effetti indesiderati.

### 4.5.1 Principali processi di estrazione del ferro

Il ferro è il più abbondante dei metalli dopo l'alluminio. Esso è diffusissimo in natura e, dato che è un elemento chimico particolarmente reattivo, anziché trovarlo allo stato puro, più spesso lo si trova combinato con altri elementi a formare ossidi, solfuri, carbonati e silicati. Alcuni esempi di composti presenti in natura sono l'ematite  $Fe_2O_3$ , la magnetite  $Fe_3O_4$ , la limonite  $FeO(OH)$ , la siderite  $FeCO_3$  e la pirite  $FeS_2$ . Poiché non è facile trovare il ferro allo stato puro, per estrarlo dai minerali è necessario applicare un processo di raffinazione per separarlo dalle impurità e alle altre sostanze indesiderate.

Per raffinare il ferro si ricorre a processi siderurgici, nei quali i composti contenenti ferro vengono ridotti a ferro attraverso l'uso di carbone. Il carbone più usato è coke metallurgico (Met coke), un materiale carbonioso di consistenza dura e porosa, che si ottiene per distillazione secca di litantraci o di altre miscele di carbone bitumoso.

Il metodo di estrazione del ferro più comune prevede l'utilizzo dell'altoforno (blast furnace - BF), così chiamato perché costituito da una torre di altezza superiore ai 30 m e larghezza di circa 12 metri (rivestita all'interno con materiale refrattario), connessa a dei serbatoi per il preriscaldamento dell'aria (Figura 8) [1].

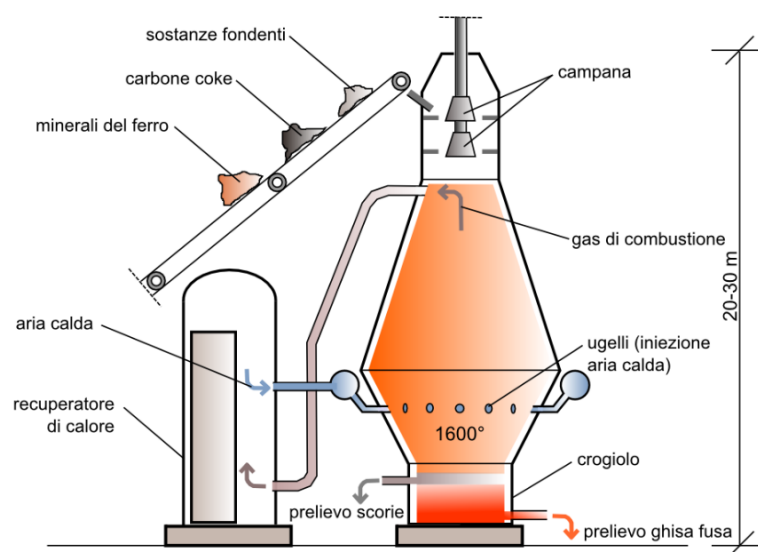


Figura 8: elementi costitutivi e funzionamento di un altoforno.

Come riportato in Figura 8, nella parte alta della torre si immette una miscela bilanciata composta da minerale ferroso, coke e sostanze fondenti (solitamente calcare). La carica che discende lungo il forno è investita da una corrente ascendente di gas ad alta temperatura, che si ottiene a seguito della combustione del coke con aria preriscaldata (700-800°C). L'aria viene portata in temperatura mediante uno scambiatore di calore, poi viene compressa e introdotta nella torre con ugelli collocati alla base del forno.

Nell'altoforno si stabilisce un gradiente di temperatura che va da 200 °C (alla sommità) fino a circa 2000°C (nella zona bassa dove brucia il coke). Le reazioni cominciano al di sopra dei 400 °C e, essendo esotermiche, contribuiscono ad innalzare la temperatura.

La reazione di combustione del coke produce monossido di carbonio, che riduce gli ossidi di ferro a ferro e consente di estrarre dal forno il metallo raffinato. Allo stesso tempo, la sostanza fondente, aggiunta come scorificante, rende fusibili impurezze del minerale (ganga) e consente di rimuoverle separandole dal ferro. Se la ganga da rimuovere è acida, cioè a base di silice e allumina, si aggiunge fondente basico (ossidi di calcio e di magnesio), al contrario, se la ganga è acida si aggiunge silice.

Al termine della reazione, nel crogiolo sottostante al forno, da un lato vengono raccolte le scorie residue (ganga, zolfo e biossido di carbonio formato dalla decomposizione della siderite), dall'altro si spilla il metallo fuso che viene colato in grandi siviere. Il processo di raffinazione del ferro viene effettuato a ciclo continuo.

Sulla superficie della massa fusa raccolta si possono riscontrare alcune scorie residue. Esse proteggono il ferro dall'ossidazione da parte dell'aria insufflata e possono essere eliminate in un secondo momento, mediante operazioni di magnetizzazione o separazione per differenza di densità.

Il metallo prodotto nell'altoforno non è ferro puro, bensì è ghisa e contiene in media 4% di carbonio, 2.5% di silicio, 2% di fosforo, 0.1% di zolfo e fino a 2.5% di manganese. Se il metallo raccolto alla base dell'altoforno viene raffreddato rapidamente, si ottiene la ghisa bianca. Se, invece, viene raffreddato lentamente, si ottiene la ghisa grigia. La ghisa (bianca o grigia) può essere a sua volta sottoposta ad ulteriori raffinazioni o a processi di trasformazione in acciaio.

#### 4.5.2 Principali processi di trasformazione della ghisa in acciaio

L'acciaio, che è una lega di ferro e carbonio, può essere prodotto in due modi:

1. Partendo dalla ghisa (altoforno) e convertendola in acciaio mediante una fornace → due fasi consecutive (ciclo integrale).
2. Oppure usando il forno ad arco elettrico e ottenendo l'acciaio in una sola fase (ciclo forno elettrico).

Gli impianti con altoforno creano maggiori difficoltà a livello ambientale, per fumi ed emissione di gas nocivi, nonostante l'impegno profuso per costruire sistemi di captazione delle particelle inquinanti sofisticati.

1. Produzione dell'acciaio a partire dalla ghisa:



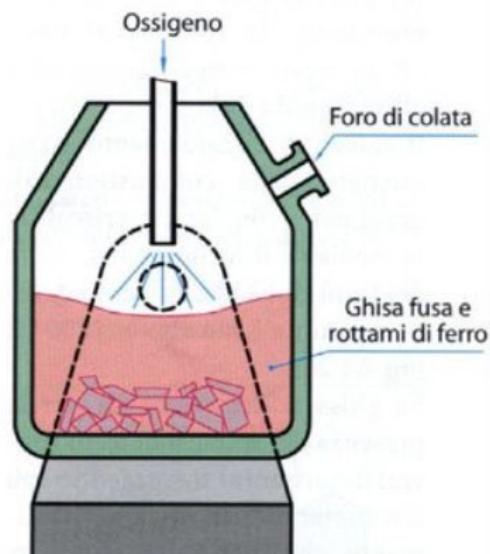
A partire dalla ghisa (prodotta secondo il processo descritto nel Paragrafo 4.5.1), effettuando l'operazione detta "affinazione termicale", si ottiene l'acciaio allontanando dalla ghisa le impurità di carbonio, fosforo, silicio, manganese e zolfo.

Esistono varie tecniche che consentono di svolgere questo processo: processo Bessemer, processo Thomas, processo Martin-Siemens e processo Linz-Donawitz (L.D.). Tra queste, l'ultima è l'unica che ad oggi viene usata a livello industriale. Essa viene effettuata usando dei convertitori L.D.

I convertitori L.D. (fornaci) trasformano la ghisa in acciaio mediante processi di raffinazione che implicano:

- l'ossidazione di quasi tutto il carbonio (si passa dal 4% all'1%) → ottenuta soffiando ossigeno puro sulla superficie del metallo fuso con una lancia raffreddata ad acqua. L'insufflazione di ossigeno nella colata abbassa il tenore della lega e dà origine ad acciaio dolce.
- l'eliminazione del fosforo e dello zolfo
- l'aggiunta di altri metalli (detti "carica") per conferire all'acciaio particolari caratteristiche. Aggiungendo nella reazione la calce viva o la dolomite, si mantiene una percentuale di carbonio superiore al 3% e, in questo modo, si dà origine ad una lega acciaio-ghisa resistente.

Il processo complessivo è un processo basico (a causa dell'elevato indice di basicità della scoria prodotta) e all'ossigeno (che viene insufflato per far avvenire l'ossidazione). Per questo motivo, spesso ci si riferisce al processo L.D. chiamandolo "Basic Oxygen Steelmaking (BOS)" o "Basic Oxygen Process (BOP)". Allo stesso modo, ci si riferisce al convertitore L.D. chiamandolo "Basic Oxygen Furnace".



**Figura 9: elementi costitutivi di un convertitore L.D, anche detto "Basic Oxygen Furnace (BOF)".**

La ghisa liquida proveniente dall'altoforno (Paragrafo 4.5.1) viene versata in un contenitore, detto siviera, rivestito di materiale refrattario. Il metallo nella siviera viene introdotto direttamente nella fornace BOF, oppure viene sottoposto prima ad una operazione di pretrattamento (che serve per ridurre le concentrazioni zolfo, silicio, e fosforo), poi inviato alla fornace. La decisione di pretrattare o meno dipende dalla qualità della ghisa uscita dall'altoforno e dalla qualità dell'acciaio richiesto.

Nella fornace (Figura 9), si soffia ossigeno puro (al 99%) sulla superficie del metallo fuso e si aggiunge del magnesio in polvere.

- L'ossigeno e l'alta temperatura del forno provocano l'ossidazione del carbonio e la sua scissione in monossido di carbonio e anidride carbonica. Il processo BOS è autogeno, quindi non è necessario

apportare nel forno energia termica dato che essa viene generata dalle reazioni chimiche (si arriva addirittura a 1700°C).

- Il magnesio, invece, lega con le impurità di zolfo e provoca una violenta reazione esotermica che dà origine a solfuro di magnesio. Per la buona riuscita del processo, è fondamentale controllare l'inserimento del reagente per mantenere il giusto rapporto metallo-carica.

Al termine del processo, da un lato della fornace BOF viene raccolto e asportato il solfuro, dall'altro lato viene spillato l'acciaio (o la lega ghisa-acciaio). Oltre a eliminare lo zolfo, si possono rimuovere anche altre sostanze quali il silicio e il fosforo inserendo come carica nella fornace ruggine, ossido ferrico e calce (reagenti).

La raccolta dell'acciaio, detta operazione di "tapping", viene effettuata inclinando il convertitore BOS e gettando il metallo in una grande siviera. Talvolta, in fase di tapping, si fanno gorgogliare nella siviera l'argon o l'azoto gassosi, che vengono inseriti per assicurarsi che la lega si mescoli correttamente. A questo punto, l'acciaio può essere rimosso dalla siviera e stampato (leghe da fonderia) o sottoposto a trattamenti termo-meccanici (leghe da deformazione).

## 2. Produzione diretta dell'acciaio a partire dal minerale di ferro

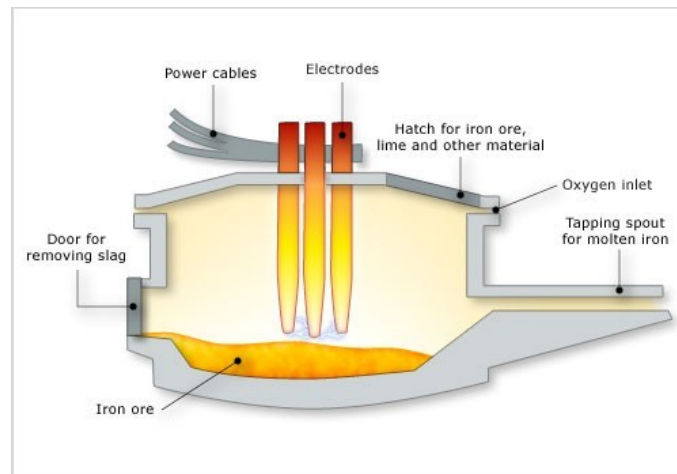
La fusione diretta mediante forno ad arco elettrico (Electric Arc Furnace - EAF), detta anche Direct Reduced Iron (DRI), è un processo di produzione dell'acciaio che è stato sviluppato in alternativa al processo di trasformazione della ghisa (appena descritto). La DRI è stata concepita con l'obiettivo di limitare l'impatto ambientale, infatti si distingue dal precedente metodo per tre motivi:

- non usa coke, né alcun tipo di gas riducente;
- non prevede la fase iniziale di sinterizzazione del minerale di ferro (non si crea la ghisa, ma si ottiene l'acciaio trasformando direttamente i minerali di ferro);
- può essere alimentato riciclando rottami di ferro o acciaio inossidabile.

In questo processo, l'acciaio è ottenuto inserendo nella fornace il minerale di ferro (o i rottami di ferro/acciaio inox) e riducendo il materiale introdotto mediante tecnologie di riduzione/fusione diretta, senza l'apporto di gas riducenti. In particolare, all'interno del forno uno o più elettrodi cilindrici consumabili in grafite fanno scoccare un arco elettrico. L'arco fonde il minerale (o i rottami) e la reazione tra il carbone fossile e l'ossigeno sviluppa gas riducenti che, a loro volta, vengono usati per ridurre altro minerale.

I prodotti della reazione sono:

- l'acciaio, che viene spillato inclinando la fornace e gettando il metallo in una siviera (operazione di "tapping");
- le scorie, che, invece, vengono separate dall'acciaio (operazione di "scorifica") e smaltite;
- e i fumi derivanti dal processo di fusione, che passano attraverso un'apertura della fornace, vengono raccolti e trattati opportunamente o emessi in atmosfera.



**Figura 10: elementi costituenti di un forno ad arco elettrico.**

Il forno ad arco elettrico è, generalmente, costituito dai seguenti elementi:

- Il **tino inferiore**, che è un contenitore metallico rivestito internamente di materiale refrattario. Esso è appoggiato su una piattaforma basculante, che consente di cambiare l'inclinazione del forno per le operazioni di scorifica e spillamento dell'acciaio.
- Il **tino superiore**, che è una gabbia metallica che alloggia dei pannelli raffreddati ad acqua. Esso ha lo scopo di contenere il materiale fuso ed evitare che fuoriesca dalla fornace.
- La **volta**, che è un vero e proprio coperchio (raffreddato ad acqua) e viene sollevato per le operazioni di carica della fornace. La volta presenta un foro per il passaggio degli elettrodi, un foro per l'aspirazione dei fumi prodotti durante la fusione e un'ulteriore apertura per la carica degli additivi.
- Gli **elettrodi**. A seconda che il forno sia alimentato con corrente continua o alternata si hanno rispettivamente tre elettrodi o un solo elettrodo. Quando si hanno tre elettrodi, l'arco scocca direttamente tra ciascun elettrodo e il minerale di ferro (o il rottame). Quando, invece, si usa un solo elettrodo, l'arco è scoccato tra l'elettrodo (catodo) e tre anodi posti sul fondo del forno. Tra catodo e anodi si interpone il minerale di ferro (o il rottame), così che l'arco attraversi l'elemento e lo porti a fusione.

Dopo aver riassunto sia il processo di produzione del ferro (Paragrafo 4.5.1), sia il processo di produzione dell'acciaio (Paragrafo 4.5.2), di seguito si illustrano le migliori tecnologie disponibili per limitare i consumi energetici degli impianti siderurgici (Paragrafo 4.5.3) e le emissioni inquinanti da essi derivanti (Paragrafi dal 4.5.4 al 3.5.6).

#### 4.5.3 Ridurre i consumi energetici

Per quanto riguarda l'industria siderurgica, come riportato da Lu et al. (2013) [1], le procedure più "energy consuming" sono:

- la produzione del ferro mediante l'uso dell'altoforno (Paragrafo 4.5.1)
- la produzione dell'acciaio mediante la trasformazione della ghisa nell'altoforno o la fusione dei minerali/rottami nel forno ad arco elettrico (Paragrafo 4.5.2)
- infine, l'operazione di laminazione (rolling) con la quale si deforma plasticamente il metallo

Queste operazioni, in ordine, utilizzano le seguenti percentuali di energia: 70.6%, 2.9% e 14%.

Poiché non è detto che l'acciaio (o la lega acciaio-ghisa), una volta prodotto, venga sottoposto a operazioni di deformazione plastica (tra cui la laminazione), le tecnologie proposte in letteratura tecnico-scientifica per

ridurre i consumi energetici degli impianti siderurgici si concentrano prevalentemente sull'ottimizzazione dell'assorbimento elettrico dei forni. Le best available technologies individuate sono descritte di seguito.

#### 4.5.3.1 *Macchine ad alte prestazioni*

Come nel caso delle industrie di produzione del vetro (Paragrafo 4.1.2.1), anche nelle industrie siderurgiche, in generale, si consiglia di ridurre i consumi energetici acquistando macchine più efficienti possibile. Ad esempio, si consiglia di installare fornaci, macchine per la finitura dei metalli, macchine per la deformazione plastica [1], apparecchiature di macinazione, pompe, apparecchiature di ventilazione e apparecchiature di trasporto [78] caratterizzate da elevate prestazioni.

È fondamentale porre particolare attenzione alle prestazioni delle fornaci, perché nei processi di produzione del ferro e/o acciaio la maggior parte delle operazioni ad alta intensità energetica è connessa al loro utilizzo [1].

L'Unione Europea [78] sconsiglia di usare forni semplici a cuore aperto (open heart furnace - OHF) per produrre ghisa e acciaio, ma piuttosto suggerisce di ricorrere ad altiforni a ossigeno (blast oxygen furnaces - BOF) per estrarre la ghisa dai minerali e a forni ad arco elettrico (EAF) per produrre, invece, l'acciaio. Gli altiforni nel caso della ghisa e gli EAF nel caso dell'acciaio sono tecnologie caratterizzate da consumi molto inferiori rispetto ai forni a cuore aperto [78].

Sebbene gli altiforni abbiano consumi minori dei forni a cuore aperto, sono comunque contraddistinti da elevato consumo energetico [79] [80]. La letteratura tecnico-scientifica, allora, suggerisce o di acquistare altiforni tecnologicamente avanzati, che siano stati progettati in modo da ottimizzare le prestazioni e limitare più possibile il consumo elettrico (efficient power generation from blast furnace gas) [81] [78], oppure di sostituire gli altiforni con altre tecnologie a minor assorbimento elettrico.

In sostituzione agli altiforni, compatibilmente con i limiti intrinseci legati al processo produttivo, la letteratura propone le seguenti tecnologie:

- Forno per eseguire Smelt Reduction [81]. Questo forno è stato ideato negli anni Novanta, ma come riportato da Lu et al. [1], si è evoluto di recente passando da mero concetto teorico a prodotto commerciale.

Esso si ottiene combinando una riduzione diretta (DRI - Direct Reduced Iron) [82] [83], con una fusione dei minerali di ferro per produrre ghisa (altoforno).

Il forno per Smelt Reduction è la tecnologia più consigliata per abbassare i consumi energetici. Il suo principio di funzionamento è il seguente:

1. Si parte dal minerale di ferro (sottoforma di grumi, pellet o ammende), che viene ridotto a sponge iron in un processo a due stadi. Con il termine "sponge iron", detto anche "ferro a riduzione diretta (DRI)" [1] ci si riferisce al ferro che si ottiene quando si effettua l'ossidazione diretta dei minerali di ferro a ferro metallico mediante una sostanza riducente che può essere un gas o un carbone elementare (non il coke). Il processo di riduzione diretta avviene interamente allo stato solido e non raggiunge mai temperature pari al punto di fusione del ferro [2].
2. Successivamente, lo sponge iron viene inserito nell'altoforno, dove viene fuso con carbone (non coke) e con ossigeno per formare la ghisa. Solitamente si sostituisce il coke usando carbone a vapore.

Questa tipologia di forno è decisamente meno "energy consuming" rispetto ad un altoforno [84]. Le ragioni del ridotto consumo elettrico dipendono dalla minor temperatura di funzionamento

(soprattutto nella prima fase del processo), dal fatto che non è necessaria la produzione del coke (si usano altri tipi di carbone) e, infine, dal fatto che sono richieste meno operazioni di preparazione del minerale di ferro di partenza.

Lo svantaggio principale del forno per Smelt Reduction è che l'energia richiesta per l'operazione di fusione del ferro (seconda fase del processo) è fornita dalla combustione del carbone e produce grandi quantità di monossido di carbonio come gas di scarico [85].

#### 4.5.3.2 Sistemi di recupero termico ed eventuali sistemi di preriscaldamento

"It is found that the recovery and utilization of residual energy and heat (RUREH) plays an important role for energy saving and CO<sub>2</sub> emission reduction no matter what method is used" [86].

L'Unione Europea suggerisce di limitare i consumi energetici ottimizzando la termodinamica dei processi siderurgici. Ciò si può ottenere recuperando il calore all'interno dell'impianto e reimpiegando l'energia recuperata per altre attività, ad esempio per effettuare un preriscaldamento dei materiali in ingresso ai forni. Tutto ciò è possibile se si installano nell'impianto sia gli apparati per il recupero dell'energia, sia i sistemi di preriscaldamento.

Le tecnologie disponibili per recuperare calore all'interno dell'impianto siderurgico sono le seguenti [78]:

- Impianto di cogenerazione. La produzione combinata di calore ed energia può essere realizzata installando appositi scambiatori e apparati di distribuzione, che permettano di recuperare il calore residuo dei processi e di distribuirlo in altre parti dello stabilimento siderurgico o a una rete di teleriscaldamento.
- Caldaie a vapore (Paragrafo 4.1.2.2) e sistemi di produzione dell'energia elettrica mediante recupero del calore proveniente dai vapori caldi in uscita dalle caldaie.
- Scambiatori di calore per il recupero del calore prodotto dalla sinterizzazione dei minerali.
- Scambiatori di calore per il recupero del calore prodotto dagli altiforni a ossigeno (BOF). Questo sistema è mostrato nella Figura 8 contenuta nel Paragrafo 4.5.1.
- Scambiatori di calore per il recupero dell'energia termica contenuta nei gas di scarico dei forni a coke (Coke Oven Gas – COG).
- Apparati per il Coke Dry Quenching (CDQ). Il CDQ è un sistema per recuperare il calore sensibile del coke rosso caldo mediante un gas inerte. Il calore recuperato viene reimpiegato per produrre (senza energia aggiuntiva) vapore ad alta temperatura e ad alta pressione in una caldaia. Il vapore così prodotto viene usato, a sua volta, per generare energia elettrica e/o produrre acciaio. Grazie al suo sistema di tempra a secco senza l'utilizzo di acqua, il CDQ ha un efficace utilizzo dell'energia [87].
- Scambiatori di calore installati all'uscita degli altiforni/forni (nelle zone adibite al raffreddamento di acciaio e ghisa)

#### 4.5.3.3 Sistemi di ottimizzazione e controllo dei processi

Adottare sistemi di controllo dei processi (siano essi automatici e computerizzati o no) consente di ottimizzare le prestazioni energetiche dell'intero impianto, come riportato nelle BAT conclusions [78]. Esempi di dispositivi di controllo sono:

- i sistemi gravimetrici moderni di alimentazione dei combustibili solidi
- i sistemi di monitoraggio online dei processi di combustione e dei flussi di energia più importanti nel sito, compreso il monitoraggio di tutti i gas combustibili in torcia per prevenire le perdite di energia.

I sistemi di controllo (soprattutto quelli di tipo online) consentono una manutenzione istantanea dell'impianto garantiscono la continuità del processo produttivo. Essi possono tenere sotto controllo parametri quali le temperature, le velocità di reazione, le quantità di calore scambiate, le quantità di materia prima inserita nei processi e le quantità di vapore presenti negli impianti.

**4.5.3.4 Sistemi di coibentazione nelle condutture di vapore e di acqua calda**

I vantaggi connessi all'introduzione di apparati di coibentazione nelle condutture di vapore e dell'acqua calda sono analoghi a quelli descritti nel Paragrafo 4.1.2.8.

**4.5.3.5 Pompe di calore e pannelli solari**

Pompe di calore e pannelli solari possono essere installati nell'impianto siderurgico per ottenere energia rinnovabile da usare al posto dell'energia elettrica per raffreddare l'acciaio e la ghisa prodotti [81].

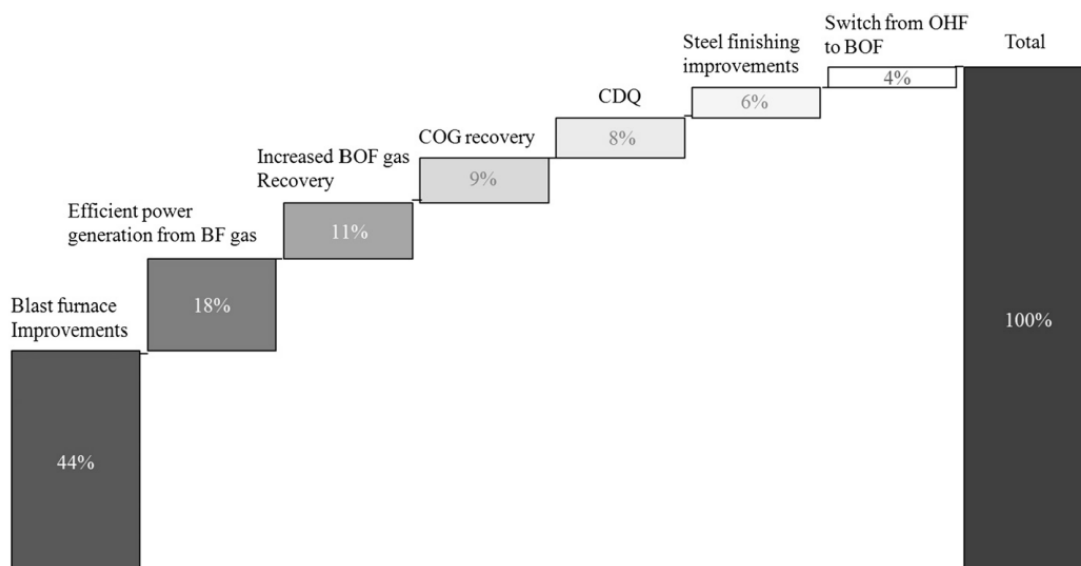
**4.5.3.6 Turbine per lo sfruttamento della pressione dei gas di scarico dell'altoforno**

Installando una turbina in prossimità della bocca dell'altoforno, si può sfruttare la pressione dei fumi di scarico per convertire l'energia cinetica dei gas prodotti nella fornace in energia elettrica.

**4.5.3.7 Gasometri**

Per mantenere i gas di processo in pressione si possono utilizzare dei gasometri o altri sistemi per lo stoccaggio dei gas a breve termine. Evitare perdite di pressione significa evitare di dover spendere altra energia elettrica per riportare i gas allo stato di compressione necessario.

La Figura 11 riassume alcune quote di potenziale di risparmio energetico dell'industria siderurgica globale. La Figura è stata estratta da un articolo del 2013 [1], ma può essere considerata rappresentativa anche per l'anno 2020 perché le Best Available Techniques indicate dall'Unione Europea sul sito ufficiale fanno riferimento all'anno 2012 e non sono state aggiornate negli ultimi anni (indice del fatto che la tecnologia nel settore siderurgico non ha subito modifiche radicali).



**Figura 11: Potenziali di risparmio energetico nel settore siderurgico (iron and steel) in accordo alle BAT. In Figura si rispetta la seguente notazione: BF blast furnace, OHF open heart furnace, BOF blast oxygen furnace, COG coke oven gas, CDQ coke dry quenching [1].**

**4.5.4 Ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub>**

La sostanza inquinante maggiormente emessa dagli impianti siderurgici è l'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) [88], che si ottiene raffinando i minerali di ferro e, man mano, ossidando il carbonio in essi contenuto.

“The energy consumption of iron and steel industry accounts for 10% -15% of the total energy consumption in the world, and the CO<sub>2</sub> emission accounts for about 7% of the total anthropogenic CO<sub>2</sub> emission” [89].

In linea di massima, nell'industria siderurgica, la gran parte dei dispositivi per ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> serve per limitare l'impatto ambientale dei forni. Infatti, come detto, è proprio dentro ai forni che avviene il processo chimico di ossidazione del carbonio che genera l'anidride carbonica [90]. Le migliori tecnologie proposte dalla letteratura per limitare le emissioni di CO<sub>2</sub> sono descritte di seguito [86] [91] [92].

#### 4.5.4.1 Sistemi di aspirazione dei fumi di scarico uniti a sistemi di filtraggio

Qualunque tipo di fornace si usi (altiforni a ossigeno, forni ad arco elettrico, ecc.), si possono installare sistemi di aspirazione dei fumi di scarico (cappe) in prossimità della bocca dei forni. Le cappe possono essere aperte (aspirano l'aria esterna), o chiuse a tenuta stagna e servono a evitare l'emissione delle sostanze inquinanti direttamente in atmosfera.

L'aria aspirata dalla cappa viene filtrata attraverso un sistema di pulizia (filtraggio), che separa le particelle inquinanti dalla portata principale. L'aria depurata viene immessa in ambiente, mentre l'anidride carbonica viene smaltita a parte.

Le migliori tecnologie disponibili per il filtraggio dei fumi provenienti dal forno sono:

- gli scrubber venturi
- i precipitatori elettrostatici (già descritti nel Paragrafo 4.1.3.1) che, però, non vengono quasi mai usati perché rischiano violente esplosioni quando sono riempiti con gas di combustione compresso ricco di CO.

In merito a questo argomento l'Unione Europea [81] suggerisce l'utilizzo congiunto di cappe e scrubber venturi.

Gli scrubber venturi sono particolari tipi di sistemi di lavaggio (Paragrafo 4.1.5.1) in cui il gas di scarico viene prima accelerato, poi immesso in un tubo (tipicamente entra dalla parte in alto o laterale) e depurato dalle particelle sfruttando l'“effetto Venturi”. L'elevata velocità relativa tra il flusso di gas e il liquido di lavaggio, in corrispondenza della gola del diffusore, fornisce agli scrubber la capacità di separazione.

Gli scrubber sono apparecchiature particolarmente indicate per l'abbattimento di sostanze inquinanti contenute in una corrente gassosa e caratterizzate da piccole dimensioni (polveri, aerosol e microinquinanti acidi). L'unico svantaggio di queste tecnologie è il fatto che esse comportano un consumo di energia elettrica aggiuntiva, necessaria ad aumentare la velocità dei fumi di scarico da introdurre nel diffusore. Se da un lato, quindi, gli scrubber migliorano l'impatto ambientale del forno, dall'altro rendono il processo di produzione di ghisa/acciaio più energivoro.

#### 4.5.4.2 Sistemi di recupero termico

I sistemi di recupero termico sono già stati descritti nel Paragrafo 4.5.3.2 [86].

#### 4.5.4.3 Sistemi per il CDQ

Nella generazione di energia elettrica, il processo di CDQ (già introdotto nel Paragrafo 4.5.3.2), al contrario della combustione eseguita in una normale caldaia, non produce gas serra (CO<sub>2</sub>) [93].

La riduzione di anidride carbonica ottenuta eseguendo CDQ è circa equivalente a 18T/H rispetto ad una caldaia a gasolio.

#### 4.5.5 Ridurre i residui di lavorazione

Ai fini delle BAT occorre prevenire la produzione di rifiuti mediante l'utilizzo di una delle seguenti tecniche o di una loro combinazione [81].

##### 4.5.5.1 Sistemi di recupero dei residui

Recuperare e riciclare i residui di produzione limita l'impatto ambientale dei processi siderurgici. A tal proposito si può [81]:

- Recuperare in sito i materiali refrattari provenienti dai vari processi e riciclarli per uso interno (ad esempio per la sostituzione di dolomite, magnesite e calce).
- Recuperare le polveri raccolte dai sistemi di filtraggio e usarle per il recupero esterno di metalli non ferrosi come lo zinco. Affinché questa operazione sia efficace, talvolta, prima di metterla in atto è necessario effettuare un arricchimento delle polveri dei filtri mediante ricircolo nel forno elettrico ad arco.
- Recuperare i rottami di origine acciaiosa per rifonderli nel forno elettrico insieme al ferro ottenuto tramite riduzione diretta (DRI).
- Recuperare i materiali refrattari e le scorie derivanti dal processo di fusione nel forno elettrico ad arco e riusarle come materie prime secondarie (se consentito dalle condizioni del mercato).

##### 4.5.5.2 Sistemi di raccolta e stoccaggio dei residui

Tutti i residui di lavorazione che non possono essere recuperati e riciclati vanno smaltiti in modo opportuno. Per limitare l'impatto ambientale causato dai residui di lavorazione conviene predisporre nell'impianto dei sistemi di raccolta e stoccaggio dei materiali adeguati a facilitare uno smaltimento specifico.

#### 4.5.6 Ridurre le emissioni di SO<sub>x</sub>

Le linee di sinterizzazione possono produrre emissioni di ossidi di zolfo. Per limitare le quantità di SO<sub>x</sub> emesse si possono adottare le seguenti tecnologie.

##### 4.5.6.1 Sistemi di iniezione di adsorbenti nelle linee di sinterizzazione

Iniettare agenti adsorbenti adeguati nei condotti dei gas di scarico della linea di sinterizzazione prima di procedere alla depolverazione con filtri a manica può consentire di ridurre le emissioni di SO<sub>x</sub>.

##### 4.5.6.2 Sistemi di lavaggio a umido o a secco

I sistemi di depolverazione a umido sono stati introdotti nel Paragrafo 4.1.7.1. Essi, tuttavia, non vengono usati negli impianti siderurgici a causa dei loro svantaggi [78]:

- Per essere applicati richiedono ampi spazi. Infatti, sono ingombranti e producono acque reflue, dunque richiedono anche l'installazione di sistemi per il trattamento delle acque.
- Hanno ed elevati costi di investimento e operativi.

I sistemi a secco, invece, sono stati descritti nel Paragrafo 4.1.5.1. Le tecniche di desolfurazione a secco sono basate sull'adsorbimento di SO<sub>2</sub> con carbone attivo (processo rigenerativo al carbone attivo).

Negli impianti siderurgici, i sistemi di rigenerazione al carbone attivo sono ben più utilizzati rispetto a quelli a umido. Essi devono essere installati nelle zone dell'impianto a valle delle zone dedicate all'abbattimento delle polveri.



#### 4.5.7 Ridurre le emissioni di polvere

I processi siderurgici, soprattutto le operazioni di sinterizzazione, possono dare origine a polveri. Tra i sistemi di riduzione delle emissioni di polvere, l'Unione Europea propone i seguenti dispositivi.

##### 4.5.7.1 Sistemi di aspirazione dei gas e sistemi di filtraggio

I sistemi di aspirazione (cappe) possono essere usati per convogliare i gas contenenti le polveri nei sistemi di filtraggio.

La letteratura consiglia di installare le cappe soprattutto nelle zone di scarico dei gas prodotti nelle linee di sinterizzazione. Inoltre, la letteratura, tra i dispositivi di rimozione delle particelle, consiglia di adottare i filtri a manica, che sono già stati descritti nel Paragrafo 4.1.3.2 [78].

Nelle linee di sinterizzazione, di norma, i filtri a manica sono applicati a valle di un precipitatore elettrostatico o di un ciclone (Paragrafi 4.1.3.1 e 4.4.5.1). Nelle altre zone dell'impianto, invece, dato che i filtri possono essere usati anche autonomamente, non si utilizzano i precipitatori elettrostatici per il motivo espresso nel Paragrafo 4.5.4.1.

##### 4.5.7.2 Sistemi di iniezione di acqua nebulizzata seguiti da sistemi di filtraggio

L'acqua nebulizzata appesantisce le particelle di polvere. In questo modo è più facile rimuovere le sostanze volatili. Solitamente, una volta che si è nebulizzata l'acqua, si inviano i gas umidi ad un sistema di filtraggio, ad esempio un filtro o precipitatore elettrostatico (Paragrafi 4.1.3.1 e 4.1.3.2).

L'Unione Europea si raccomanda di non utilizzare acqua di mare per eseguire l'operazione di nebulizzazione perché il cloruro di sodio sporca i precipitatori elettrostatici degli impianti di sinterizzazione. Inoltre, il cloro unito alle materie prime in ingresso al processo può determinare un aumento delle emissioni (formando policloro-dibenzo-diossine/policloro-dibenzo-furani) e può ostacolare il ricircolo delle polveri nei filtri [78].

##### 4.5.7.3 Sistemi di trasporto, macinatori e tramogge che possono essere coperti

Quando il processo dà origine a materiali estremamente sensibili ai movimenti e tali che possono determinare considerevoli emissioni di polveri, si suggerisce di installare sistemi trasferimento, trasportatori vibranti, macinatori, tramogge e altri apparati simili in modo che essi possano essere completamente coperti e in modo che le polveri sollevate vengano raccolte direttamente in un sistema di filtraggio (ad esempio in un filtro a manica).

##### 4.5.7.4 Sistemi per il CDQ

Nel CDQ (Paragrafo 4.5.3.2) non si producono fumi di scarico né polveri perché tutti i processi avvengono in spazi totalmente chiusi.

#### 4.5.8 Ridurre le emissioni di NO<sub>x</sub>

Gli ossidi di azoto si formano nelle zone dell'impianto caratterizzate da elevate temperature e presenza di una grossa quantità di ossigeno. Per ridurre le emissioni di NO<sub>x</sub> si possono adottare le seguenti tecnologie.

##### 4.5.8.1 Sistemi di ricircolo dei gas di scarico

Per limitare la formazione di NO<sub>x</sub> bisogna cercare di ottenere un processo di fusione più uniforme possibile, evitando picchi di temperatura e limitando la velocità del processo. A tale scopo, si possono installare dei sistemi di ricircolo dei gas, in modo che i fumi di scarico del processo di sinterizzazione (più freddi) vengano re-iniettati nel flusso principale (più caldo). In questo modo si possono contenere le temperature e l'eccesso di ossigeno e uniformare le condizioni termo-fluidodinamiche in tutti i punti interni alla linea di sinterizzazione [94].

I sistemi di ricircolo dei gas, oltre a ridurre l'impatto ambientale dell'impianto, consentono anche di ridurre i consumi elettrici [78]. Tuttavia, essi devono essere utilizzati facendo attenzione alle seguenti cose:

- Il monossido di carbonio (CO) contenuto nei gas di scarico che ricircolano può avvelenare il personale dell'impianto;
- Se non controllato, il ricircolo dei gas nelle linee di sinterizzazione può avere effetti negativi sulla qualità e sulla produttività del processo.

#### 4.5.8.2 *Bruciatori Low-NO<sub>x</sub>*

Questi dispositivi sono già stati citati nel Paragrafo 4.1.4.1.

#### 4.5.8.3 *Sistemi di lavaggio a secco*

Il processo rigenerativo al carbone attivo (descritto nel Paragrafo 4.5.6.2) può essere effettuato anche per rimuovere gli ossidi di azoto.

#### 4.5.8.4 *Dispositivi per la SCR*

I dispositivi che effettuano la riduzione catalitica selettiva (SCR) sono già stati descritti nel Paragrafo 4.1.4.5. Essi presentano elevati costi di investimento e operativi, pertanto vengono utilizzati solo se le altre tecniche di abbattimento delle emissioni non consentono di rispettare le norme in materia di qualità ambientale [81].

#### 4.5.9 *Ridurre l'inquinamento dell'ambiente causato da acque reflue*

In generale, per gestire correttamente le acque di scarico del processo si consiglia di installare condutture e sistemi per raccogliere e separare tipi diversi di acque reflue, ricercando il massimo riciclo dei liquami all'interno dell'impianto e usando un trattamento di smaltimento adeguato a ogni tipo di flusso finale.

##### 4.5.9.1 *Dispositivi di intercettazione, filtraggio o sedimentazione dell'olio*

Adottando appositi dispositivi di intercettazione, filtraggio o sedimentazione si possono separare gli oli dalle acque reflue. Gli oli, poi, possono essere raccolti e smaltiti a parte [78].

##### 4.5.9.2 *Sistemi di ricircolo delle acque reflue*

Così come nelle industrie di produzione della carta, per ridurre al minimo il consumo di acqua si possono installare dei sistemi di ricircolo in modo da riutilizzare i liquami di scarto per le operazioni di raffreddamento.

##### 4.5.9.3 *Sistemi di trattamento delle acque reflue*

Seguendo i precetti dell'Ingegneria sanitaria, attraverso trattamenti meccanici (grigliatura, dissabbiatura e precipitazione dei metalli pesanti), sistemi biologici (nitrificazione e denitrificazione) e trattamenti chimico-fisici (sedimentazione, disoleatura e raschiatura delle sostanze flocculanti), si possono trattare le acque reflue per ripulirle prima di immetterle in ambiente [95].

#### 4.5.10 *Ridurre le emissioni di rumore*

I forni, soprattutto quelli elettrici ad arco producono livelli di rumore elevati, che possono essere causati, ad esempio, da urti meccanici fra elementi interni al forno.

Occorre, allora, ridurre le emissioni acustiche derivanti dai processi di produzione della ghisa e dell'acciaio e ciò può essere fatto adottando una combinazione delle seguenti tecnologie, che vengono selezionate in base alle condizioni operative dell'impianto [81].

#### *4.5.10.1 Materiali fonoassorbenti*

Per ridurre le emissioni acustiche limitare la propagazione aerea del rumore si possono adottare dei materiali fonoassorbenti. In particolare, si può:

- Applicare materiali fonoassorbenti sulle pareti e sul tetto dell'edificio che ospita il forno (soprattutto quello elettrico ad arco);
- Costruire barriere antirumore attorno alle macchine più rumorose.

L'Unione Europea [78] consiglia anche di non attaccare il forno a nessuna parete, ma piuttosto di lasciare una certa distanza rispetto ai muri esterni, così da ridurre i rumori strutturali dell'edificio indotti dal funzionamento dell'EAF.

#### *4.5.10.2 Sistemi di sollevamento e trasporto della carica di materia prima nei forni atti a prevenire urti meccanici*

Le apparecchiature di sollevamento e trasporto delle ceste di caricamento dei materiali nel forno possono essere progettate in modo che il loro funzionamento prevenga urti meccanici.

#### *4.5.10.3 Silenziatori ai camini di scarico dei forni*

Disporre dei dispositivi silenziatori sui camini di scarico dei forni aiuta a limitare le emissioni acustiche.

## 5 Modello di assessment per la raccolta di dati e informazioni e per la valutazione del livello di maturità

Una delle attività da svolgere nell'anno 2019 era la costruzione di un modello di assessment per la raccolta di dati e informazioni e per la valutazione del livello di maturità delle aziende manifatturiere italiane ad alto consumo energetico.

UNIFI nel 2019 ha avviato l'attività di costruzione di un modello di assessment per la raccolta di dati e informazioni e per la valutazione del livello di maturità delle aziende manifatturiere italiane ad alto consumo energetico.

L'attività in questione ha richiesto, prima di tutto, di svolgere un'analisi della letteratura tecnoco-scientifica riguardante i metodi di valutazione e auto-valutazione dello stato di avanzamento tecnologico delle aziende manifatturiere.

UNIFI ha avviato la ricerca bibliografica suddetta e ha iniziato a progettare il modello di assessment atteso. Tuttavia, lo studio della bibliografia ha richiesto più tempo e più approfondimenti del previsto perché UNIFI ha ritenuto opportuno analizzare in maniera più ampia le varie modalità di costruzione di un modello e i vantaggi e svantaggi dei metodi disponibili.

Alla luce di queste affermazioni, sebbene UNIFI abbia iniziato a svolgere l'attività di costruzione del modello di assessment, non lo ha completato nel 2019, ma lo ha ultimato a inizio 2020. A tal proposito, UNIFI ha inviato nel 2020 un documento di completamento degli obiettivi dell'anno 2019, che è qui riportato in Appendice A.

## 6 Conclusioni

Lo svolgimento delle attività appena elencate e l'ampia analisi della letteratura svolta hanno generato un insieme cospicuo di soluzioni che le aziende manifatturiere italiane appartenenti ai settori selezionati possono adottare per limitare il consumo energetico del loro impianto e l'impatto ambientale.

I risultati delle attività condotte nel 2019 saranno utilizzati da UNIFI negli anni a venire (2020 e 2021) per raggiungere il macro-obiettivo definito in collaborazione con ENEA: "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 per l'efficienza energetica di prodotti e processi industriali".

I risultati ottenuti, infatti, costituiranno il termine di riferimento per esaminare il quadro italiano e stabilire, di conseguenza, il livello di maturità energetica delle aziende manifatturiere del territorio nazionale. Essi saranno utilizzati per consigliare alle aziende sottoposte ad assessment quali attività implementare per trovare un buon compromesso tra i consumi energetici e l'impatto ambientale e ottimizzare coerentemente le performance dell'intero impianto.

Le aziende che seguiranno i suggerimenti proposti potranno notevolmente migliorare il loro livello di sostenibilità (energetica e ambientale).

### Appendice A: Completamento obiettivi anno 2019

#### *Premessa*

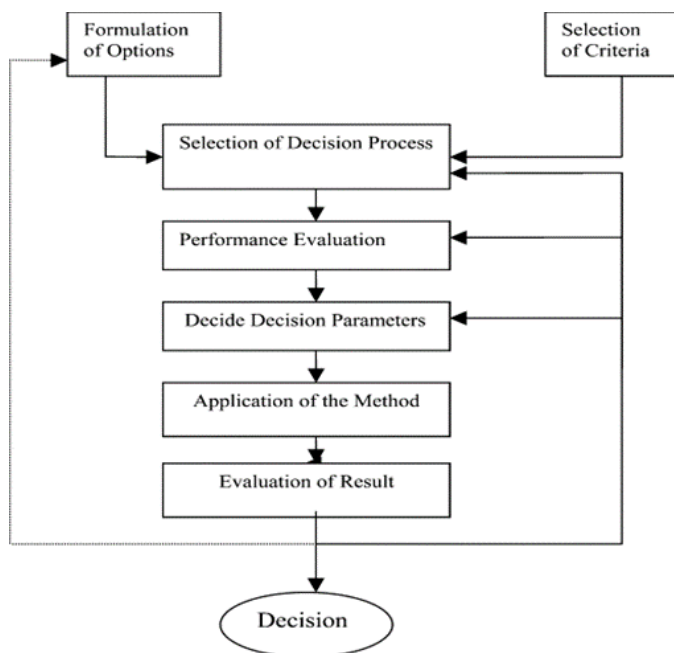
La linea d'attività LA4.13 è stata completata dal gruppo di ricerca dell'università degli Studi di Firenze (di seguito UNIFI) nella prima parte dell'anno 2020, così come indicato nella relazione sulle attività dell'anno 2019. In questo documento sono relazionati gli esiti dell'attività LA4.13, ponendosi come obiettivo la descrizione della struttura e del funzionamento del modello di *assessment* destinato alla caratterizzazione energetica dei macchinari e all'analisi della maturità delle tecnologie aziendali.

Per un generico settore manifatturiero, a partire dalla lista di soluzioni tecnologiche disponibili per ridurre i consumi energetici d'impianto, una generica azienda può applicare tale modello e determinare una classificazione delle soluzioni che le consenta di determinare l'intervento migliorativo ottimale. L'assessment risulta multi-criterio, classificando le tecnologie non solo sulla base dei consumi energetici che provocano ma anche del loro costo e di parametri ambientali e operativi. Infine, il modello permette di determinare per ogni azienda, la soluzione ottimale per essa, tenendo in considerazione le esigenze e i limiti dell'impianto in analisi.

#### *Modello di assessment per la raccolta di dati e informazioni e per la valutazione del livello di maturità*

UNIFI ha sviluppato un **modello di analisi multi-criterio** che possa tenere conto **sia di dati quantitativi (laddove presenti), sia di dati qualitativi** sugli interventi tecnologici energy-saving e che possa **avvalersi sia dello studio della letteratura, sia della consultazione di esperti di settore**.

La necessità di fare scelte ottimali tra una moltitudine di alternative ha portato negli anni allo sviluppo di un gran numero di modelli di valutazione che supportassero i decisori nelle loro scelte, fornendogli strumenti adeguati ad analizzare il problema e giungere alla soluzione migliore. Questi strumenti vengono chiamati modelli decisionali multicriterio, proprio per il fatto che forniscono un supporto nell'individuazione della decisione migliore da prendere, tenendo in considerazione molteplici criteri di valutazione. Il processo decisionale multicriterio può essere schematizzato come riportato in Figura 12.



**Figura 12. Linee guida per progettare e costruire un modello decisionale multi-criterio.**

Il processo di costruzione del modello multi-criterio si compone di varie fasi, indicate in Figura 12. Una volta definito il problema che si vuole analizzare, la prima cosa da fare è individuare le opzioni disponibili (“formulation of options”) che, in questo caso, sono le alternative tecnologiche applicabili. Oltre a questo, altre due importanti operazioni devono essere svolte: la scelta dei criteri di valutazione (“selection of criteria”) e la scelta del processo decisionale (“selection of decision process”).

Una volta completati questi primi passaggi si passa alla fase di valutazione (“performance evaluation”), dove vengono decisi i parametri e i metodi con cui si valutano le performance delle varie alternative secondo le dimensioni di valutazione prese in considerazione. In questa fase si definiscono gli indici usati per valutare le performance ed è possibile, eventualmente, che si delineino anche le metodologie e gli strumenti con cui le misurazioni verranno poi realmente attuate. Per chiarire meglio l’ultima affermazione prendiamo come esempio il caso in cui si voglia valutare il consumo di carburante di un macchinario. In tal caso, si decide di utilizzare come indice il consumo per unità di tempo, si decide inoltre di misurare empiricamente tale consumo e, quindi, si definiscono il metodo e gli strumenti che verranno utilizzati per fare tali misurazioni. Ad esempio, si decide di utilizzare una valvola provvista di sensore che misura la portata, di posizionarla in un determinato punto del sistema di afflusso del carburante, seguendo una determinata procedura di montaggio.

Dopo aver valutato le prestazioni delle alternative tecnologiche si devono definire i parametri decisionali del metodo (“define decision parameters”), ad esempio nel caso del metodo AHP tale operazione corrisponde all’assegnazione dei pesi relativi dei vari criteri di valutazione che verranno utilizzati.

A questo punto siamo in possesso dei dati e dei parametri necessari per svolgere l’analisi. Quindi, è possibile applicare il metodo decisionale multicriterio (“application of the method”), fare le opportune verifiche per accertarsi della validità dei risultati (“evaluation of result”) e, infine, prendere la decisione che risulta essere la migliore per il problema (“decision”). Complessivamente, la procedura appena descritta è comune a tutti i metodi decisionali multicriterio, la vera differenza nei risultati è dovuta al metodo stesso e alle sue caratteristiche. Esistono innumerevoli metodi decisionali multicriterio, ognuno con le sue proprietà e i suoi vantaggi e svantaggi. Ogni metodo elabora i dati che gli vengono forniti in ingresso in modo peculiare, seguendo un proprio algoritmo e basandosi su determinate formule e concetti matematici. Tra i principali metodi di valutazione multi-criterio ci sono:

- weighted sum method (WSM)
- weighted product method (WPM)
- analytical hierarchy process (AHP)

- preference ranking organization method for enrichment evaluation (PROMETHEE)
- the elimination and choice translating reality (ELECTRE)
- the technique for order preference by similarity to ideal solutions (TOPSIS)
- compromise programming (CP)
- multi-attribute utility theory (MAUT)

Il metodo AHP risulta spesso preferibile rispetto agli altri strumenti di valutazione visti i suoi vantaggi in termini di flessibilità di applicazione e possibilità di adattamento a molteplici situazioni con eterogenee informazioni in ingresso. Visti i suoi punti di forza, tale modello ha trovato ampia diffusione in svariati ambiti quali la pianificazione, la scelta dell'alternativa migliore, l'allocazione delle risorse e la risoluzione di conflitti. La letteratura offre anche applicazioni del modello in campi specifici quali il marketing, la medicina e cura della persona, la ricerca e sviluppo, l'allocazione di risorse e la selezione di progetti e, infine, anche il settore dell'energia. Data la flessibilità del modello AHP, per lo sviluppo del presente progetto, si è deciso di utilizzarlo per effettuare la valutazione multi-criterio delle soluzioni tecnologie di risparmio energetico. Questa applicazione risulta d'interesse sia a livello industriale (perché le aziende potranno usare il modello per selezionare la soluzione tecnologica per loro ottimale), sia a livello accademico (perché non ci risultano documenti in letteratura che propongano un modello AHP per classificare le strategie tecnologiche di risparmio energetico relative non a uno, ma a diversi settori manifatturieri). Nei sottoparagrafi a seguire si fornisce una descrizione dettagliata del funzionamento e delle modalità di implementazione del metodo di valutazione proposto.

### *Il metodo AHP – descrizione del metodo di applicazione e utilizzo*

L'Analytic Hierarchy Process (AHP) è uno dei più popolari metodi decisionali multicriterio. Il suo principale sviluppatore è il Prof. Thomas L. Saaty. Tale modello si pone come strumento di supporto nell'analisi e valutazione di situazioni che presentano numerose alternative applicabili e che necessitano di essere valutate secondo molteplici criteri. L'AHP permette l'utilizzo in input di dati esclusivamente quantitativi, quali-quantitativi o esclusivamente qualitativi, producendo comunque valutazioni e risultati affidabili. L'AHP si basa sui seguenti principi:

1. principio di reciprocità
2. principio di omogeneità
3. principio di sintesi

Il primo principio riguarda l'assegnazione dei giudizi nel confronto a coppie e impone la reciprocità dei punteggi nel confronto tra due alternative. Ad esempio, se nel confronto a coppie tra l'alternativa A e quella B il punteggio di preferenza di A su B è 3, allora per tale principio il punteggio di preferenza di B su A dovrà essere il suo reciproco, in questo caso 1/3.

Il secondo principio riguarda l'omogeneità degli elementi che vengono confrontati tra loro e impone che essi non differiscano troppo nelle proprietà per cui vengono valutati, perché, nel caso in cui ciò accadesse, si incorrerebbe in errori nel giudizio. Ciò impone che la natura delle alternative sia simile, in modo tale che possano essere confrontate, e che la differenza tra esse non sia talmente grande da eccedere la scala di valutazione, che ricordiamo andare da 1 (egualmente preferibile) a 9 (decisamente molto preferibile).

Il terzo principio riguarda l'indipendenza dei giudizi e degli elementi tra i vari livelli gerarchici e presuppone che essa sia presente a tutti i livelli. Mentre i primi due principi sono del tutto coerenti con le applicazioni nel mondo reale, per il terzo principio è necessaria maggiore attenzione perché non è raro che venga violato.

Il confronto a coppie è la principale metodologia con cui vengono acquisiti i giudizi sia riguardo le prestazioni delle varie alternative sia riguardo i pesi relativi tra le dimensioni di valutazione stesse.

Nel modello progettato da UNIFI, i **pesi relativi tra le dimensioni di valutazione** vengono assegnati da una persona o da un panel di persone sufficientemente informate da poterli esprimere in maniera corretta. Ad esempio, è possibile consultare membri della dirigenza dell'azienda stessa che vogliono svolgere la

valutazione e assegnare i punteggi d'importanza ai vari criteri di valutazione, in modo tale da rispecchiare quelle che sono le priorità dell'azienda. Mediante un apposito questionario che viene descritto di seguito e presentato in ALLEGATO 6, potranno essere analizzate aziende che danno maggior importanza al criterio del risparmio energetico, prediligendo le soluzioni che ottimizzano al massimo i consumi anche necessitando di investimenti economici notevoli; oppure, al contrario, potranno essere analizzate aziende che daranno maggior importanza al criterio economico, prediligendo soluzioni poco costose, seppur meno performanti in base ad aspetti energetici. Maggiori dettagli su queste affermazioni verranno forniti nel paragrafo 1.1.5.

**Per la valutazione delle tecnologie**, invece, non avendo a disposizione sufficienti dati quantitativi sulle performance di tutte le soluzioni tecnologiche di risparmio energetico, ad assegnare i punteggi nel modello di UNIFI sono gli esperti del settore in analisi, dato che essi hanno le conoscenze e competenze necessarie per esprimere giudizi corretti. Nel caso in cui fossimo in possesso di sufficienti dati quantitativi, la valutazione degli esperti di settore potrebbe essere sostituita dall'utilizzo di tali dati. Gli esperti consultati nel presente progetto provengono dalle associazioni di categoria del settore in analisi. Nello specifico, parliamo di Assovetro per il settore del vetro e Federbeton per il settore del cemento.

Grazie ai punteggi relativi ottenuti tramite il confronto a coppie siamo in grado di costruire delle matrici dei giudizi che racchiudono le valutazioni ottenute dalle varie tecnologie per ogni dimensione di valutazione.

Un esempio di tali valutazioni è fornito in Figura 13. Altre matrici dei giudizi sono visibili nei fogli excel dell'ALLEGATO 5. L'allegato in questione contiene dei file editabili che possono essere usati dalle aziende per ottenere la valutazione delle tecnologie. L'ALLEGATO 5 si riferisce al settore del vetro, riportando un file excel per ogni macro-fase di processo. Tuttavia, il file può essere facilmente esteso alle fasi e alle tecnologie di qualunque altro settore manifatturiero.

	B	C	D	E	F	G	H
1							
2							
3	<b>COSTO INIZIALE</b>						
4	Macchine per miscelazione M.P.						
5	A - Usare tecnologie di essiccazione a spruzzo per il dosaggio selettivo e la premiscelazione	1	2	4	3	0,4	
6	B - Usare miscelatori con orbita a vite (screw orbit mixers)	0,5	1	2	1,5	0,8	
7	C - Usare miscelatori a nastro (ribbon mixers)	0,25	0,5	1	0,8	0,2	
8	D - Usare miscelatori ad anello passante (ring through mixers)	0,33	0,67	1,25	1	0,35	
9	E - Usare miscelatori a vasca rotante (rotating pan mixers)	2,5	1,25	5	2,86	1	
10							
11		CR	0,0377961	CI	0,04		
12							

**Figura 13. Esempio di matrice dei giudizi. Nell'esempio riportato, ad esempio, la soluzione A assume punteggio pari a 4 se paragonata con C. Ciò implica che la soluzione A sia preferibile rispetto a C e che, all'inverso, C assuma un punteggio di 1/4 rispetto ad A.**

Nonostante i molteplici aspetti positivi del confronto a coppie, esso ha anche dei possibili aspetti critici, uno dei quali è l'inconsistenza delle matrici dei giudizi. L'inconsistenza delle matrici è legata al fatto che i giudizi del confronto a coppie sono attribuiti in modo soggettivo da una persona che potrebbe, nonostante l'esperienza e la conoscenza della materia, finire col dare dei punteggi non del tutto coerenti nei vari confronti a coppie, soprattutto con matrici molto grandi. Per capire meglio tale problematica prendiamo come esempio una matrice dove sono confrontate tre alternative possibili (A, B e C) rispetto ad una dimensione di valutazione. Poniamo il caso che nel confronto a coppie A riceva un punteggio di 3 rispetto a B, allo stesso modo che B riceva un punteggio di 3 rispetto a C. A questo punto si è delineata una situazione dove avremo  $A > B > C$  per transitività e ci aspetteremmo che nell'ultimo confronto a coppie di A rispetto a C, A sia valutato come preferibile rispetto a C.

Dato che, però, i giudizi dei confronti sono espressi da una persona, esiste il rischio che essi presentino dei tratti di soggettività che portino le varie valutazioni ad essere non del tutto coerenti tra loro. Immaginiamo, ad esempio, che nell'ultimo confronto C venga giudicato preferibile rispetto ad A, questo fa sì che non ci sia coerenza tra le valutazioni relative tra le varie opzioni, rendendo così la matrice inconsistente. Man mano che le alternative da valutare aumentano, dunque aumentando le dimensioni della matrice, il rischio di inconsistenza diventa sempre più concreto. Per verificare che questo problema non accada e che le varie



matrici siano consistenti, il metodo AHP prevede di calcolare per ogni matrice un “Indice di Consistenza - CI”:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1}$$

dove  $\lambda$  è il massimo autovalore della matrice A e n rappresenta la dimensione della matrice stessa. Inoltre, viene definito anche un “Indice di Consistenza Casuale – RI” RI viene determinato a partire dalla Tabella 2 (fornita da Thomas L. Saaty), dove alla dimensione della matrice A è associato il rispettivo valore di RI.

**Tabella 2. valori di RI in base alla grandezza della matrice.**

RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49
n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Mettendo a rapporto il valore della matrice in analisi e quello dell’indice di consistenza casuale, si ottiene il valore del “rapporto di consistenza della matrice – CR”:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Nel caso meno restrittivo, per poter considerare la matrice A consistente, viene posto come vincolo  $CR < 0.1$  (10%). Volendo determinare in modo più preciso e in funzione della dimensione di A la soglia entro la quale considerare consistente la matrice, possiamo utilizzare i valori presenti in Tabella 3:

**Tabella 3. valori di soglia per la verifica della consistenza.**

Soglia	n
0.05	3
0.08	4
0.10	$\geq 5$

Una volta ottenute le matrici dei giudizi (sia dei criteri di valutazione sia delle prestazioni delle varie alternative tecnologiche) e verificata la consistenza di quest’ultime, è possibile calcolare i punteggi di tutte le alternative e individuare tra di esse la migliore per gli scopi prefissati. Per fare ciò, per ogni alternativa tecnologica, è necessario calcolare una somma pesata dei punteggi ottenuti valutando l’alternativa sulla base delle varie dimensione di analisi e dei relativi pesi che rappresentano l’importanza di quella specifica dimensione rispetto alle altre. Ad esempio, per calcolare il punteggio finale dell’alternativa A dovremo utilizzare la seguente formula:

$$\text{valutazione finale di A} = \sum_i [(\text{punteggio di A rispetto alla dimensione } D_i) \times (\text{importanza della dimensione } D_i)]$$

Tra tutte le alternative, quella con il punteggio più alto sarà la soluzione preferibile.

Dopo aver descritto come si costruisce un modello decisionale AHP e averne illustrato il funzionamento, di seguito, seguendo la procedura delineata in Figura 12, si mostra come è stato costruito il modello di classificazione delle tecnologie. Con questa descrizione rispondiamo anche all’ultimo obiettivo del 2019 (“Sviluppare un modello di assessment da sottoporre alle aziende italiane”), che era rimasto in sospeso nel precedente anno di progetto. Un prototipo di modello è stato sviluppato relativamente al settore del vetro (può però essere facilmente esteso al settore del cemento), ed è riportato nell’ALLEGATO 5 e nell’ALLEGATO 6. L’ALLEGATO 5 contiene 4 file Excel (uno per ogni fase di processo produttivo del vetro) e per ogni file sono riportati i confronti a coppie delle soluzioni tecnologiche rispetto a diversi criteri così come descritto in dettaglio nei paragrafi a seguire. L’ALLEGATO 6, invece, riporta la struttura del questionario che è stato costruito su Google Moduli e che serve per ottenere la classificazione finale delle tecnologie in base alle specifiche esigenze dell’azienda in analisi. I paragrafi a seguire descrivono come è stato ottenuto il prototipo di modello e come funziona. Pertanto, ne costituiscono anche il manuale d’uso.

### **Individuazione delle tecnologie disponibili**

Per poter sviluppare un modello in grado di valutare e classificare le tecnologie disponibili nella produzione del vetro o del cemento siamo, innanzitutto, partiti dall’individuazione delle varie alternative tecnologiche

descritte nella letteratura tecnico-scientifica internazionale (reperita mediante analisi bibliografica) o proposte da aziende del territorio italiano attraverso le diagnosi energetiche. A tale scopo UNIFI, oltre a consultare database scientifici quali Scopus e Google Scholar, ha anche letto e analizzato approfonditamente 103 diagnosi energetiche relative al settore del vetro e 48 relative al settore del cemento.

Il processo produttivo è stato ripartito in varie fasi che, a loro volta, sono state suddivise in ulteriori sottofasi di cui sono state raccolte le tecnologie disponibili. Questo passaggio è stato necessario per poter raggruppare le alternative tecnologiche affini che potevano essere implementate per svolgere una medesima funzione all'interno del processo produttivo. Un esempio di tale pratica, che potrà essere utile anche ai fini della comprensione, è quello che riguarda la sottofase dei compressori e sistemi di iniezione dell'aria compressa, comune sia al processo del vetro che del cemento, Tabella 4.

**Tabella 4. Esempi di soluzioni tecnologiche alternative per ridurre i consumi energetici di compressori e altri sistemi ad aria compressa.**

	Sostituire compressori, sistemi d'adduzione aria e sistemi frigoriferi con macchinari più avanzati (revamping)
	Sostituire compressori necessari a raffreddare, aspirare, agitare, mescolare o gonfiare il vetro con ventilatori
	Sostituire compressori necessari a pulire o rimuovere detriti con spazzole
	Sostituire compressori necessari a movimentare componenti con soffiatori o attuatori elettrici o idraulici
	Sostituire compressori necessari a creare il vuoto con pompe a vuoto
	Sostituire compressori per alimentare macchine, utensili e attuatori con motori elettrici
	<b>Sostituire compressori con compressori inverterizzati</b>
	Montare valvole nei sistemi di distribuzione dell'aria compressa per interrompere l'afflusso di aria nei macchinari quando non viene usata ridurre la pressione nominale dell'impianto
Compressori e sistemi di iniezione aria compressa	Installare dispositivi di rilevamento perdite d'aria, guarnizioni nei punti soggetti a trafileamento
	Installare tubi col diametro più grande possibile nei sistemi di distribuzione dell'aria per ridurre le perdite
	Installare regolatori di pressione e sistemi di controllo dell'aria
	installare motori a velocità variabile per azionare compressori
	istallare compressori alimentati a gas
	Diminuire la temperatura dell'aria in ingresso al compressore
	<b>Usare acqua calda (pompe di calore) anziché resistenze elettriche per riscaldare l'aria spinta dai compressori</b>

In Tabella 4 sono state raggruppate le soluzioni tecnologiche che riguardano sistemi ad aria compressa quali compressori, pompe, ventole, eccetera. Le scritte in rosso provengono dalle diagnosi energetiche di ENEA, mentre le scritte nere si riferiscono a soluzioni individuate in letteratura. La stessa convenzione di colori viene adottata negli ALLEGATI 1 e 2 al presente report.

Tra le soluzioni elencate sono presenti tecnologie che svolgono la medesima funzione nel processo produttivo e che si pongono in modo “sostitutivo” l’una rispetto all’altra. Oltre a queste, sono presenti anche altre soluzioni tecnologiche che potremmo definire “accessorie”, che comprendono tutti quegli interventi migliorativi attuabili sul sistema già presente. Alcune di esse vanno ad agire sui parametri operativi del macchinario, altre riguardano l’aggiunta o la miglioria di alcune parti del sistema, il tutto ovviamente finalizzato ad un miglioramento delle performance del sistema stesso. Per svolgere questa parte di progetto ci siamo serviti della collaborazione con ENEA (Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l’energia e lo sviluppo economico sostenibile), che ci ha fornito le diagnosi energetiche fatte su un campione di aziende del settore dal 2015 al 2018, grazie al quale abbiamo avuto informazioni riguardo alle tecnologie effettivamente implementate in stabilimenti reali e su altre che erano state prese in considerazione per essere installate negli impianti.

Nel caso del vetro sono state consultate 103 diagnosi, mentre nel caso del cemento sono state consultate 48 diagnosi. Ad integrazione di tali dati, è stata svolta preliminarmente anche una ricerca in letteratura che ha permesso di identificare gli articoli elencati nella bibliografia del presente report. Tutte le informazioni raccolte sono state riepilogate in due file Excel, di cui uno per il vetro e uno per il cemento (ALLEGATI 1 e 2). Per semplicità, si illustra il file Excel creato riferendosi alla sua applicazione in un impianto di produzione del vetro, ma la descrizione può essere facilmente estesa all’impianto di produzione del cemento.

Nella prima colonna del file (ALLEGATO 1) partendo da sinistra (Figura 14), il processo di produzione del vetro è stato suddiviso nelle sue 4 **principali fasi** (preparazione alla fusione, fusione e raffinazione, condizionamento e formatura, finitura). Oltre alle fasi di processo, è stata inserita in questa colonna un’ulteriore categoria, quella delle soluzioni tecnologiche inerenti ai servizi ausiliari. A questa voce sono state associate tutte quelle opportunità tecnologiche atte a diminuire i consumi energetici di motori elettrici, trasformatori, turbomacchine e altri servizi ausiliari comuni a diverse fasi dell’impianto. In generale, il filtro nella prima cella consente di selezionare il contenuto del file focalizzandosi solo sulla fase produttiva che si vuole analizzare, ad esempio quella caratterizzata da maggiori consumi energetici e criticità legate alla sostenibilità d’impianto. Informazioni più dettagliate sui consumi energetici delle varie fasi sono state analizzate all’interno di questo progetto dalle Università degli studi di Salerno e della Tuscia. Le informazioni da loro reperite possono essere utilizzate come input per il lavoro dell’Università di Firenze.

B	C	D
Fase del processo	Macchinario d'interesse	Soluzione per migliorare i consumi energetici
	Bilance per pesatura M.P.	Installare celle di carico nei nastri trasportatori per effettuare la pesatura automatizzata e computerizzata
	Sollevatori e nastri trasporto M.P.	Usare sistemi di recupero del rottame proveniente dal forno fusorio
		Installare GlasMax per pulire il rottame riciclato e separarlo da particelle coloranti
		Installare sistemi di movimentazione M.P. di tipo "a nastro" anziché pneumatici
	Mulini da macinazione M.P.	Installare sistemi per preriscaldare rottami e carica
		Comprare mulini da macinazione ad alta efficienza (preferibilmente rotanti, con velocità di rotazione basse, ma veloci)
	Macchine per miscelazione M.P.	Installare macinatori per la macinazione del rottame, se nell'impianto si effettua riciclaggio del rottame
		Usare tecnologie di essiccazione a spruzzo per il dosaggio selettivo e la premiscelazione delle M.P.
		Usare miscelatori con orbita a vite (screw orbit mixers)
		Usare miscelatori a nastro (ribbon mixers)
		Usare miscelatori ad anello passante (ring through mixers)
		Usare miscelatori a vasca rotante (rotating pan mixers)

Figura 14. File di riepilogo delle soluzioni tecnologiche e delle informazioni reperite in letteratura e nelle diagnosi.

Continuando verso destra, troviamo la colonna dove sono riportate le varie **sottofasi** in cui si sono divise le fasi principali. Ad esempio, considerando la fase “preparazione alla fusione”, le sottofasi dell’elenco sono: pesatura, macinazione e miscelazione. Anche questa colonna offre l’opportunità di filtrare le sottofasi in modo da poter focalizzare l’attenzione e gli sforzi di miglioramento solo sull’operazione d’interesse. Successivamente troviamo la colonna dove sono riportate le vere e proprie **alternative tecnologiche** che possono essere implementate nel processo produttivo, anch’esse raggruppate in base alla sottofase di cui fanno parte (Figura 14).

Le successive 7 colonne, Figura 15, riguardano le **dimensioni di valutazione** prese in considerazione per giudicare le prestazioni delle varie tecnologie. In esse sono riportati i **dati sulle performance** acquisiti tramite la letteratura. Come si evince da Figura 15, la letteratura non ha fornito dati sufficientemente esaustivi su tutte le alternative tecnologiche riscontrate. Per questo motivo, come già ampiamente discusso, si è optato per la costruzione di un modello di analisi AHP.

E	F	G	H	I	J	K
costo iniziale	costi operativi	consumi energetici	qualità del vetro	emissioni inquinanti	payback period	velocità di produzione
						aumenta
		riduzione 10-20%			2-3 anni	
		riduzione 20-30%				aumento 50%
		riduzione 10 Kwh/t				
		riduzione 10Kwh/t				
		riduzione 20Kwh/t				
		riduzione 20Kwh/t				
		riduzione 10-15%			5 mesi	
		riduzione 20-25%			5-6 mesi	
		12%, riduzione perdite energetiche 8% ogni bar			3-4 mesi	
		10-15%			3 mesi	

Figura 15. Esempio di dati quantitativi reperiti in letteratura relativamente a ogni soluzione tecnologica. Per migliorare la leggibilità dell’ALLEGATO 1, tali colonne sono state nascoste, ma sono consultabili espandendo il foglio Excel.

L	M	N
Interventi letteratura	Interventi individuati	Interventi effettuati
1	0	0
1	0	0
1	0	0
1	0	0
1	1	0
1	0	0
1	0	0
1	0	0
1	0	0
1	0	0
1	0	0
1	0	0
1	0	0
1	0	0
1	1	1

Figura 16. Elenco delle soluzioni reperite in letteratura o nelle diagnosi energetiche sotto le rispettive voci degli interventi già effettuato dalle aziende o suggeriti come intervento di sviluppo futuro.

In Figura 16 sono mostrate le tre colonne nelle quali sono state inserite informazioni riguardo la **provenienza** delle soluzioni tecnologiche identificate. La prima delle tre colonne indica se la soluzione è stata individuata consultando la letteratura (1) oppure no (0). La seconda colonna indica se la soluzione è stata realizzata negli ultimi 4 anni da una o più delle aziende delle diagnosi. La terza colonna infine indica se la soluzione è stata proposta dalle aziende campione come possibile intervento migliorativo da effettuare nei prossimi 4 anni. Per completare la prima colonna sono stati consultati i database Scopus e Google Scholar, mentre per completare le altre due colonne UNIFI si è servita delle diagnosi energetiche.

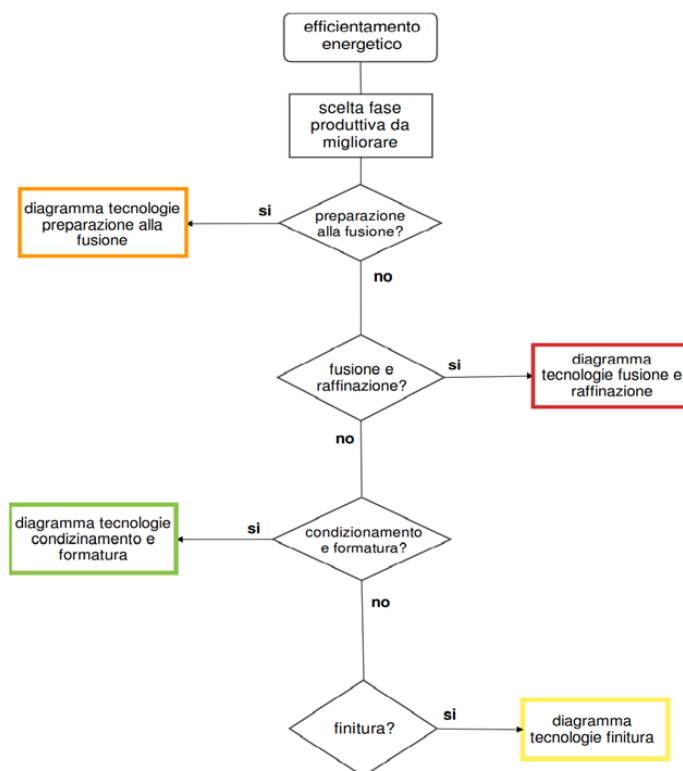
O	P
Applicabilità della soluzione	Fonte
1	
2	
3	
4	
5	
6	industrial efficiency technology database
7	
8	
9	industrial efficiency technology database
10	
11	
12	
13	
14	Explorative study on Compressed Air Systems' energy efficiency in production and use: Fi
15	
16	
17	
18	
19	Explorative study on Compressed Air Systems' energy efficiency in production and use: Fi
20	
21	
22	Explorative study on Compressed Air Systems' energy efficiency in production and use: Fi
23	Explorative study on Compressed Air Systems' energy efficiency in production and use: Fi
24	Estimating Potential Energy Savings in Compressed Air Systems (Ryszard Dindorf 2012)

Figura 17. Vantaggi o limiti di applicabilità delle soluzioni e fonti bibliografiche consultate.

In ultima istanza, nel file Excel sono stati riepilogati i **vantaggi o i limiti di applicabilità** delle diverse soluzioni e le **fonti bibliografiche** consultate per reperire le informazioni (Figura 17). A proposito delle caratteristiche di applicabilità delle soluzioni, una distinzione visiva fatta tramite diverse colorazioni ha consentito di mettere in evidenza:

- in rosso i vincoli e le problematiche più stringenti, come l’inapplicabilità di una certa tecnologia con un certo tipo di prodotto finito o l’incompatibilità con altri tipi di macchinari presenti in altre fasi del processo;
- in quelle giallo le problematiche o limitazioni di entità meno rilevante;
- in verde gli aspetti positivi e i vantaggi delle alternative, come ad esempio il loro funzionamento ottimale per determinati tipi di produzione o la loro sinergia con altre tecnologie.

Oltre a questo file, sono stati realizzati anche dei diagrammi di flusso che, riferendosi a titolo di esempio al processo di produzione del vetro, sintetizzassero il processo di utilizzo del modello AHP e della procedura di valutazione delle tecnologie. Analogamente al file Excel, anche i diagrammi realizzati si pongono come supporto alle imprese nell'individuazione delle possibili soluzioni tecnologiche implementabili nella sottofase produttiva di loro interesse. Sono costruiti con una struttura flowchart dove è l'utente stesso a dover prendere decisioni e, in base ad esse, seguire un ramo piuttosto che un altro. Il loro utilizzo parte dal primo diagramma, Figura 18, dove l'utente individua la fase di lavorazione per la quale vuole ridurre i consumi energetici.



**Figura 18. Primo diagramma di flusso. L'utente seleziona la fase di processo da ottimizzare.**

Successivamente, si passa al diagramma della fase scelta. A titolo d'esempio si mostra il diagramma relativo alla preparazione alla fusione (Figura 19). Qui l'utente viene guidato all'interno del diagramma fino ad arrivare ad una lista delle possibili alternative tecnologiche applicabili nel caso di suo interesse.

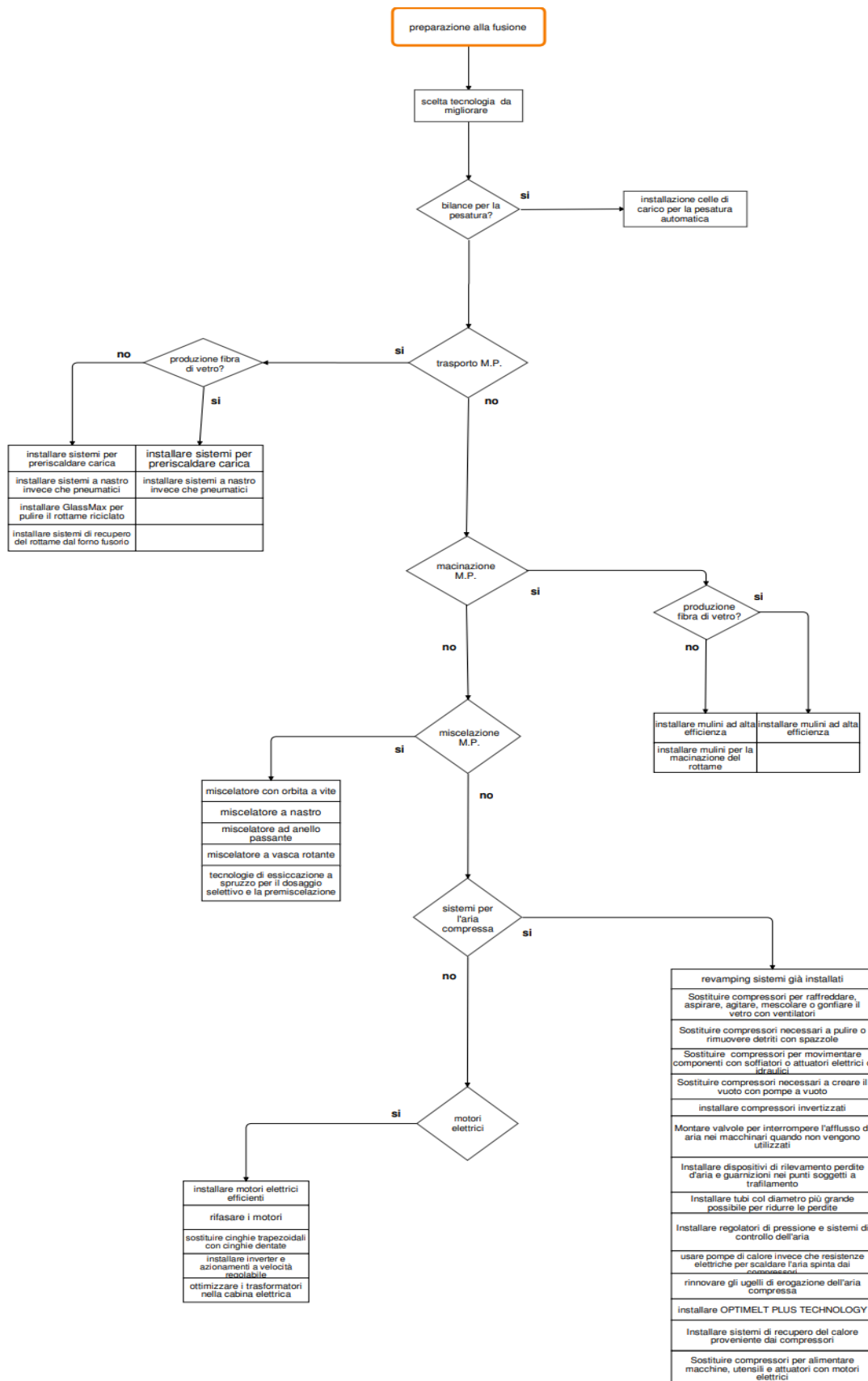


Figura 19. Diagramma di flusso della sottofase di preparazione alla fusione. Riepilogo delle soluzioni tecnologiche in base alla sottofase e al macchinario di cui si vogliono limitare i consumi.

### Definizione dimensioni di valutazione

Una volta individuate tutte le tecnologie disponibili per ogni singola fase del processo produttivo, per valutare correttamente una possibile soluzione tecnologica e l’impatto che essa può avere su un impianto, sono state definite delle dimensioni di valutazione che tenessero conto delle necessità e degli interessi di tutti gli stakeholders (chi deve investire economicamente sulle tecnologie e chi vuole migliorare i consumi energetici nazionali).

Si è ovviamente presa in considerazione la dimensione che riguarda il consumo energetico indotto da ciascuna tecnologia; infatti, questo progetto è rivolto verso i settori industriali più energivori e mira a ridurre i consumi specifici. Oltre al consumo energetico, sono anche stati inclusi altri **parametri di valutazione** utili a valutare in modo completo le eterogenee tecnologie presenti nelle varie fasi del processo di lavorazione. Figura 20 riassume i parametri riferendosi al settore del vetro.



Figura 20. Dimensioni del modello di valutazione delle tecnologie energy-saving

Le prime tre dimensioni di analisi riguardano la sfera economica, mentre le altre dimensioni riguardano aspetti tecnici legati al processo produttivo del vetro e alle performance d’impianto. In particolare, le dimensioni “economiche” sono il costo di investimento iniziale che l’azienda deve sostenere per acquistare la tecnologia, il costo che l’impresa deve affrontare per utilizzare tale tecnologia e il payback period (PBP), cioè quanto tempo ci mette l’investimento a ripagarsi. Invece, le dimensioni di valutazione “tecniche” sono: il consumo energetico che la tecnologia implica, le emissioni inquinanti che produce, l’impatto sulla velocità di produzione e, infine, l’impatto sulla qualità del vetro o del cemento prodotto. La necessità di effettuare un modello di valutazione multi-criterio, includendo nell’analisi tutte queste dimensioni, può essere facilmente spiegata con il seguente esempio. Si prenda in considerazione un impianto di produzione del vetro che applichi un intervento di rinnovamento del forno fusorio sostituendolo con uno nuovo con prestazioni migliori. Tale intervento potrà avere un effetto positivo sulla sostenibilità della produzione in quanto il nuovo forno, se energeticamente avanzato, diminuirà il consumo energetico e la quantità di emissioni inquinanti prodotte. Non considerando gli aspetti economici e d’investimento, questa soluzione potrebbe apparire la migliore in assoluto. Tuttavia, occorre tenere presente che il tessuto industriale è costellato di molteplici realtà produttive che, anche operando nello stesso settore e producendo lo stesso prodotto, possono essere diverse l’una dall’altra. Per tale ragione, l’attuazione dell’intervento di sostituzione del forno avrà un impatto positivo sui consumi energetici d’impianto, ma potrà risultare inapplicabile in aziende caratterizzate da ridotta disponibilità economica e scarso budget. Sostituire il forno, infatti avrà un costo di investimento iniziale non trascurabile che, a seconda della situazione finanziaria dell’azienda, potrà essere sostenibile o no. Ecco perché si è ritenuto indispensabile introdurre criteri di valutazione delle soluzioni a carattere economico. Con una visione d’insieme allargata e un approccio olistico sarà possibile valutare correttamente la scelta tecnologica che risulta migliore compatibilmente con la situazione attuale e le esigenze della specifica azienda considerata.

La scelta di questi criteri di valutazione è stata guidata sia dalle informazioni reperite in letteratura, sia dalla consultazione delle diagnosi energetiche. Pur ritenendo che le dimensioni scelte costituiscano una buona base di partenza per la valutazione delle tecnologie, abbiamo volutamente realizzato un modello AHP (flessibile) in modo che i parametri di analisi possano essere, eventualmente, ampliati nel caso in cui si ritenga di aver trascurate aspetti rilevanti nella valutazione di un impianto. In tal caso, acquisendo le valutazioni necessarie in input e adattando leggermente i file Excel in base al nuovo gruppo di dimensioni di

valutazione, il modello continuerà ad essere funzionante garantendo dei giudizi e dei risultati accurati e affidabili.

### Valutazione delle prestazioni

Una volta conclusa la ricerca delle dimensioni di analisi e individuate le tecnologie disponibili, si sono cercati dati che indicassero le prestazioni delle soluzioni tecnologiche rispetto alle varie dimensioni di valutazione. L'obiettivo iniziale era quello di svolgere una valutazione interamente quantitativa in modo tale da ottenere una classificazione oggettiva delle tecnologie. A tal scopo, siamo partiti da una ricerca in letteratura di dati quantitativi delle tecnologie interessate. Tuttavia, effettuando la ricerca abbiamo notato la presenza in letteratura di un maggior numero di informazioni qualitative piuttosto che quantitative e la loro possibile rilevanza soltanto per alcuni ambiti tecnologici, come ad esempio l'aria compressa. I dati quantitativi raccolti, inoltre, non risultavano comparabili tra loro perché non omogenei (queste considerazioni sono risultate le medesime sia per il settore del vetro, come da informazioni riportate nell'ALLEGATO 1, sia per il settore del cemento, come mostrato nell'ALLEGATO 2). Infatti, provenendo da fonti della letteratura scientifica differenti, i dati reperiti presentavano unità di misura diverse e riferimenti tecnologici (benchmark) diversi, rendendo impossibile effettuare un paragone tra le prestazioni quantitative delle varie tecnologie. Alla luce dello studio della letteratura svolto, è stato necessario sviluppare un modello qualitativo piuttosto che quantitativo.

A questo punto, si è individuato un modo alternativo per reperire valutazioni delle tecnologie che fossero attendibili. Le informazioni qualitative provenienti dalla letteratura non erano sufficienti a consentire l'analisi di tutte le tecnologie secondo le sette dimensioni di analisi e non permettevano di ottenere una valutazione omogenea delle soluzioni alternative. Pertanto, per ovviare al problema e raggiungere gli scopi prefissati, si è ritenuto essenziale consultare il personale esperto del settore e sfruttare il know-how di chi quotidianamente ha a che fare con impianti di produzione del vetro o del cemento. In tale prospettiva, abbiamo stilato un questionario da sottoporre a esperti di settore (ALLEGATO 5). Nel questionario (di cui un esempio è fornito in Figura 21), si sono poste le domande in modo tale da consentire agli esperti di indicare mediante confronti a coppie le valutazioni delle alternative tecnologiche. Il questionario è stato costruito in modo da consentire la successiva implementazione dell'analisi AHP. Quando i questionari saranno sottoposti agli esperti, per ogni fase e sotto-fase di processo, si effettuerà un confronto a coppie tra le soluzioni migliorative alternative. Nel confronto, ogni coppia verrà confrontata e valutata secondo ogni dimensione di valutazione e verrà espressa una preferenza di una sull'altra attraverso un punteggio numerico da 1 a 9, dove 1 indica che le due soluzioni sono ugualmente preferibili per la dimensione presa in considerazione, mentre 9 indica che la prima soluzione è estremamente preferibile.

	B	C	D	E	F	G	H
1							
2							
3	<b>COSTO INIZIALE</b>						
4	Macchine per miscelazione M.P.						
5	A - Usare tecnologie di essiccazione a spruzze per il dosaggio selettivo e la premiscelazione	1	2	4	3	0,4	
6	B - Usare miscelatori con orbita a vite (screw orbit mixers)	0,5	1	2	1,5	0,8	
7	C - Usare miscelatori a nastro (ribbon mixers)	0,25	0,5	1	0,8	0,2	
8	D - Usare miscelatori ad anello passante (ring through mixers)	0,33	0,67	1,25	1	0,35	
9	E - Usare miscelatori a vasca rotante (rotating pan mixers)	2,5	1,25	5	2,86	1	
10							

Figura 21. esempio di matrice del questionario di valutazione da sottoporre agli esperti del settore.

Il questionario è realizzato come file Excel editabile dove le valutazioni dei confronti sono raggruppate in una matrice per ogni sottofase. Le celle in grigio non devono essere riempite dall'esperto, bensì si compilano automaticamente con il reciproco del punteggio del confronto corrispondente, che l'esperto avrà inserito nella cella corrispondente. Le valutazioni raccolte attraverso questo questionario ci permetteranno di calcolare autovettori e autovalori di tutte le alternative e ottenere, così, una classifica qualitativa delle prestazioni per tutte le dimensioni prese in considerazione.



### Definizione dei parametri decisionali

Questa fase del processo di applicazione di un metodo decisionale multicriterio, nel nostro caso, corrisponde all'operazione di consultazione dell'azienda in questione (caso studio) per capirne le priorità e le limitazioni. Ciò equivale a definire quale sia l'importanza che le varie dimensioni di valutazione hanno per loro, in modo tale da stabilirne i pesi relativi e poter calcolare i punteggi finali in funzione di essi. Per fare ciò si utilizza ancora una volta il confronto a coppie, che viene somministrato all'azienda tramite un questionario realizzato con Google moduli. A titolo di esempio ne riportiamo un'immagine nelle Figure 22-23. Il questionario completo è mostrato nell'ALLEGATO 6.

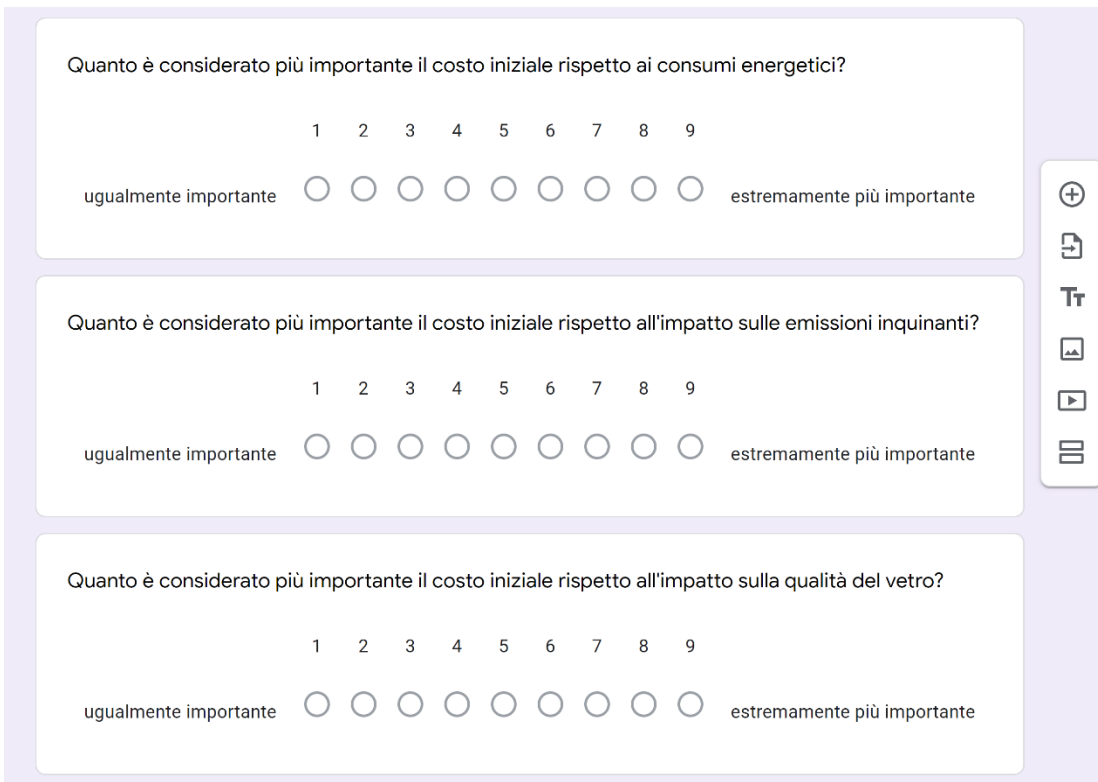


Figure 22 shows a Google Forms questionnaire with three Likert scale questions. Each question has a scale from 1 to 9, with 'uguale importanza' (equally important) at 1 and 'estremamente più importante' (extremely important) at 9. The questions are:

- 1. Quanto è considerato più importante il costo iniziale rispetto ai consumi energetici?
- 2. Quanto è considerato più importante il costo iniziale rispetto all'impatto sulle emissioni inquinanti?
- 3. Quanto è considerato più importante il costo iniziale rispetto all'impatto sulla qualità del vetro?

Figura 22. Questionario da sottoporre all'azienda in analisi, parte 1.

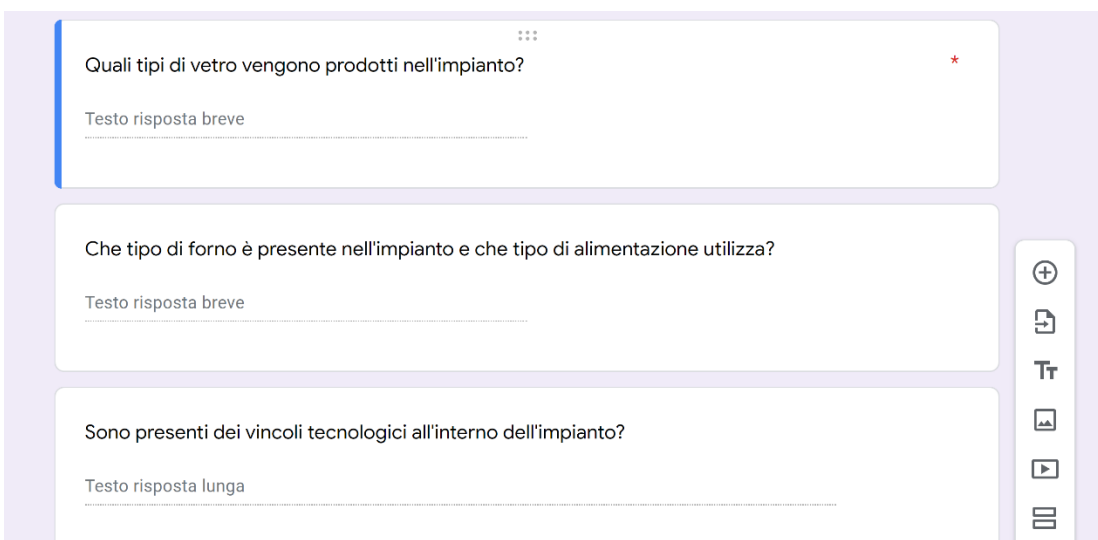


Figure 23 shows a Google Forms questionnaire with three short-answer questions. The questions are:

- 1. Quali tipi di vetro vengono prodotti nell'impianto? (marked with a red asterisk)
- 2. Che tipo di forno è presente nell'impianto e che tipo di alimentazione utilizza?
- 3. Sono presenti dei vincoli tecnologici all'interno dell'impianto?

Figura 23. Questionario da sottoporre all'azienda in analisi, parte 2

Come per la valutazione delle tecnologie anche in questo confronto a coppie viene chiesto di valutare le alternative con un punteggio di preferenza da 1 a 9. A differenza del precedente però, in questo questionario, sono presenti anche alcune domande a risposta aperta dove vengono raccolte informazioni di carattere generale sulla produzione, le tecnologie installate ed eventuali vincoli presenti. Queste informazioni sono necessarie sia per definire i pesi relativi delle dimensioni di valutazione - per giungere a dei punteggi finali accurati e tarati sulle esigenze aziendali -, sia per identificare i vincoli d’impianto e verificare l’applicabilità delle soluzioni tecnologiche, escludendo quelle incompatibili con la realtà produttiva considerata. Anche in questo caso la struttura del questionario è mostrata per il settore del vetro, ma può essere facilmente estesa e replicata nel caso del settore del cemento.

### Applicazione del metodo e valutazione dei risultati

Grazie ai passaggi precedentemente svolti e alle informazioni reperite in essi, si è in grado di applicare il modello AHP ed ottenere una classificazione delle alternative. Per fare ciò abbiamo realizzato dei file Excel dove fosse possibile inserire le valutazioni ottenute con i questionari, e che calcolassero in automatico i punteggi finali verificando al tempo stesso l’eventuale inconsistenza delle valutazioni. In ogni file Excel (uno per ogni fase di processo, visibili nell’ALLEGATO 5), il primo foglio racchiude i punteggi finali e le classifiche delle varie soluzioni tecnologiche in ogni sottofase o sottocategoria (Figura 24). I restanti fogli, invece, contengono le matrici utilizzate per calcolare autovettori e autovalori delle soluzioni (Figura 25). Come si può notare in Figura 24, i punteggi e le classifiche presentano una colorazione basata su una scala di colori che mostra in verde i punteggi più alti e in rosso i punteggi più bassi. La colorazione delle celle, come il calcolo dei punteggi stessi, avviene in automatico in base ai punteggi in input inseriti nelle matrici delle valutazioni.

	B	C	D	E
15				
16	<b>Macchine per miscelazione M.P.</b>			
17	Usare tecnologie di essiccazione a spruzzo per il dosaggio selettivo e la premiscelazione	0,27		
18	Usare miscelatori con orbita a vite (screw orbit mixers)	0,18		
19	Usare miscelatori a nastro (ribbon mixers)	0,08		
20	Usare miscelatori ad anello passante (ring through mixers)	0,11		
21	Usare miscelatori a vasca rotante (rotating pan mixers)	0,37		
22				
23				
24				
25	<b>Motori elettrici</b>			
26	Installare motori elettrici efficienti	0,27247		
27	Rifasare i motori	0,17987		
28	Sostituire le cinghie di trasmissione trapezoidali con cinghie dentate per ottimizzare le tensioni	0,07648		
29	Installare inverter e azionamenti a velocità regolabile	0,10532		
30	Ottimizzare i trasformatori nella cabina elettrica	0,36585		
31				
32				
33				
34	<b>Compressori</b>			
35	Sostituire compressori, sistemi d'adduzione aria e sistemi frigoriferi con macchinari più avanzati	0,2298		
36	Sostituire compressori necessari a raffreddare, aspirare, agitare, mescolare o gonfiare il vetro con ventilatori	0,11076		
37	Sostituire compressori necessari a pulire o rimuovere detriti con spazzole	0,08459		
38	Sostituire compressori necessari a creare il vuoto con pompe a vuoto	0,07648		

Figura 24. Esempio del foglio di calcolo dei punteggi finali delle soluzioni relative al settore del vetro.

	A	B	C	D	E	F	G	H
3	<b>COSTO INIZIALE</b>							
4	Macchine per miscelazione M.P.							
5	A - Usare tecnologie di essiccazione a spruzzo per il dosaggio selettivo e la premiscelazione		1	2	4	3	0,4	
6	B - Usare miscelatori con orbita a vite (screw orbit mixers)		0,5	1	2	1,5	0,8	
7	C - Usare miscelatori a nastro (ribbon mixers)		0,25	0,5	1	0,8	0,2	
8	D - Usare miscelatori ad anello passante (ring through mixers)		0,33	0,67	1,25	1	0,35	
9	E - Usare miscelatori a vasca rotante (rotating pan mixers)		2,5	1,25	5	2,86	1	
10								
11			CR	0,0377961	CI		0,04	
12								
13								
14								
15	<b>COSTI OPERATIVI</b>							
16	Macchine per miscelazione M.P.							
17	A - Usare tecnologie di essiccazione a spruzzo per il dosaggio selettivo e la premiscelazione		1	2	4	3	0,4	
18	B - Usare miscelatori con orbita a vite (screw orbit mixers)		0,5	1	2	1,5	0,8	
19	C - Usare miscelatori a nastro (ribbon mixers)		0,25	0,5	1	0,8		
20	D - Usare miscelatori ad anello passante (ring through mixers)		0,33	0,67	1,25	1		
21	E - Usare miscelatori a vasca rotante (rotating pan mixers)		2,5	1,25	####	####	1	
22								

Figura 25. Esempio di foglio di calcolo degli autoveicoli, autovalori e indici di consistenza delle matrici.

Per evitare errori nella compilazione delle matrici, è stata prevista una colorazione condizionale delle celle della matrice che le colora quando è presente un punteggio, mentre le lascia bianche se i valori devono essere ancora inseriti (ciò è stato fatto per dare un supporto visivo alla compilazione delle matrici stesse). Oltre a questo, per ogni matrice viene verificata in automatico la consistenza della matrice stessa, infatti come si può vedere dalla Figura 25, sotto alla matrice è presente una cella che riporta il rapporto di consistenza (CR), che assume colorazione verde o rossa in base al fatto che la consistenza della matrice sia verificata o meno.

### Scelta dell'alternativa migliore

Una volta ottenuti i punteggi finali delle alternative tecnologiche compatibili con l'impianto che stiamo trattando è possibile individuare la soluzione che viene ritenuta la migliore. I punteggi dell'analisi AHP sono ordinati in modo decrescente con una scala cromatica che va dal verde, al rosso (Figura 24). L'alternativa con il punteggio più alto rappresenta la soluzione tecnologica migliore secondo le dimensioni di valutazione scelte e le preferenze dell'azienda in analisi. Il risultato indica all'azienda l'alternativa di rinnovamento tecnologico per essa ottimale.

### Sintesi del funzionamento del modello di assessment

Di seguito si riepiloga brevemente la procedura di utilizzo del modello creato:

1. Si prendono i risultati delle analisi dei flussi energetici effettuate dalle altre università sull'azienda campione. Da questi risultati o direttamente consultando il personale dell'azienda in analisi, si individua la/e fase/i e la/e sottofase/i critica dell'impianto.
2. Si utilizza il file Excel realizzato (ALLEGATI 1 e 2) per filtrare le alternative ed individuare le soluzioni tecnologiche applicabili al nostro caso.
3. Si somministra il questionario Google Moduli (ALLEGATO 6) all'azienda in analisi e si valuta l'importanza reciproca dei criteri e delle dimensioni di analisi illustrate in Figura 20.
4. Basandosi sui risultati dei questionari e sulla valutazione qualitativa delle tecnologie effettuata da esperti di settore, si applica l'analisi AHP e si classificano gli interventi (ALLEGATO 5).

Si suggerisce all'azienda di implementare la soluzione tecnologica che risulterà vincente rispetto alle altre dal punto di vista energetico, economico e della sostenibilità ambientale. La soluzione ottenuta sarà costruita su misura in base alle specifiche esigenze e al peso dei criteri espresso dal personale dell'azienda analizzata.

## 7 Riferimenti bibliografici

- [1] S.-M. Lu, C. Lu, K.-T. Tseng, F. Chen, e C.-L. Chen, «Energy-saving potential of the industrial sector of Taiwan», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 21, pagg. 674–683, 2013.
- [2] F. Musso, G. F. Esposito, e M. Angioni, «Per un modello di valutazione della sostenibilità istituzionale delle politiche di sviluppo locale», 2019.
- [3] E. Tiezzi e N. Marchettini, *Che cos' è lo sviluppo sostenibile?: le basi scientifiche della sostenibilità e i guasti del pensiero unico*. Donzelli Editore, 1999.
- [4] European Union, «Direttiva comunitaria 96/61/CE - Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC)». 1996.
- [5] «Decreto Legislativo 4 agosto 1999, n° 372. “Attuazione della direttiva 96/61/CE relativa alla prevenzione e riduzione integrate dell’inquinamento” .», *Gazzetta Uff. DellUnione Eur.*, n. 252.
- [6] L. Ntziachristos e Z. Samaras, «EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook», *PART B 3 Bi-Iv Road Transp.*, 2017.
- [7] E. Worrell, C. Galitsky, E. Masanet, e W. Graus, «Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the glass industry», *Berkeley Natl. Lab.*, 2008.
- [8] J. Busch, «Cleanroom of the Future: An Assessment of HVAC Energy Savings Potential In a Semiconductor Industry Facility», *Environ. Energy Technol. Div. Lawrence Berkeley Natl. Lab.*, vol. 94720, 1998.
- [9] «United States Department of Energy (DOE) (2005a). Natural Gas Navigator: Prices. Energy Information Administration, Washington, D.C. [http://tonto.eia.doe.gov/dnav/ng/ng\\_pri\\_top.asp](http://tonto.eia.doe.gov/dnav/ng/ng_pri_top.asp)» .
- [10] G. M. I. Council, «Glass Industry Technology Roadmap», *Westerville Ohio*, 2002.
- [11] European Commission, «Best Available Techniques Reference Document (BREF) for the Manufacture of Glass», pag. 485, 2013.
- [12] «United States Department of Energy (DOE) (2004a). Glass Industry Analysis Brief. Energy Information Administration, Washington, D.C. <http://www.eia.doe.gov/emeu/mecs/iab98/glass/index.html>» .
- [13] H. R. Dolf e W. E. Marceau, «Method of melting glass with submerged combustion heaters and apparatus therefor», 12-lug-1966.
- [14] H. P. Hanneken, «Melting of glass with staged submerged combustion», 03-set-1985.
- [15] Z. Morvay e D. Gvozdenac, *Applied industrial energy and environmental management*, vol. 2. John Wiley & Sons, 2008.
- [16] A. Andreuzzi, E. Bruni, e M. Beccarello, «Rapporto efficienza energetica - Confindustria». 2017.
- [17] S. Vignati e E. Ferrero, «I motori elettrici ad alta efficienza», *Energia*, vol. 80, pag. 0, 2002.
- [18] «Regolamento (CE) n° 640/2009 della commissione del 22 luglio 2009 recante modalità di applicazione della direttiva 2005/32/CE del Parlamento europeo e del Consiglio in merito alle specifiche per la progettazione ecocompatibile dei motori elettrici.», *Gazzetta Uff. DellUnione Eur.*, 2009.
- [19] *Norma internazionale IEC 60034-30:2008*. 2008.
- [20] Federazione ANIE Associazione Energia, «Motori elettrici ad alto rendimento: norme e legislazione vigente». 2011.
- [21] Y. Pang e G. Lodewijks, «Improving energy efficiency in material transport systems by fuzzy speed control», in *3rd IEEE International Symposium on Logistics and Industrial Informatics*, 2011, pagg. 159–164.
- [22] A. Kasper, E. Carduck, M. Manges, H. Stadelmann, e J. Klinkers, «Contribution to the characterization of dust emissions of glass melting furnaces», in *66th Conference on Glass Problems: Collection of Papers Presented at the 66th Conference on Glass Problems, The University of Illinois at Urbana-Champaign, October 24-26, 2005*, 2009, vol. 302, pag. 203.
- [23] European Union, «Bat conclusions for the manufacture of glass», *Off. J. Eur. Union*, pag. 104, 2012.

- [24] M. Nic, L. Hovorka, J. Jirat, B. Kosata, e J. Znamenacek, *IUPAC compendium of chemical terminology—the gold book*. International Union of Pure and Applied Chemistry, 2005.
- [25] W. J. Neuffer, «Alternative control techniques document: NO<sub>x</sub> emissions from glass manufacturing», Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC (United States ...), 1994.
- [26] J. Leicher, «Flameless oxidation as a means to reduce NO<sub>x</sub> emissions in glass melting furnaces», *Int. J. Thermodyn.*, vol. 16, n. 2, pagg. 55–61, 2013.
- [27] Y. Fahmy, P. Fornasiero, S. Zinoviev, e S. Miertus, «Air pollution control technologies compendium», *U. N. Ind. Dev. Organ.*, 2007.
- [28] R. G. C. Beerkens, A. S. Den Haag, L. InfoMil, e J. van Stolberglaan, *Inventory of SO<sub>2</sub> emissions and emission reduction potential in the Netherlands glass industry*. Part, 2007.
- [29] H. Yamamoto, T. Kuroki, H. Fujishima, e Y. Yamamoto, «NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> removals for exhaust gas in glass melting furnace using a plasma and dry chemical hybrid process.», *Transactions of the JSME*, 2016.
- [30] A. Bologa, H.-R. Paur, H. Seifert, T. Wäscher, e K. Woletz, «Novel wet electrostatic precipitator for collection of fine aerosol», *J. Electrostat.*, vol. 67, n. 2–3, pagg. 150–153, 2009.
- [31] A. N. Zagoruiko *et al.*, «The process for catalytic incineration of waste gas on IC-12-S102 platinum glass fiber catalyst», *Catal. Ind.*, vol. 2, n. 2, pagg. 113–117, 2010.
- [32] D. R. Van der Vaart, W. M. Vatvuk, e A. H. Wehe, «Thermal and catalytic incinerators for the control of VOCs», *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 41, n. 1, pagg. 92–98, 1991.
- [33] P. E. Tsakiridis, G. D. Papadimitriou, S. Tsvilis, e C. Koroneos, «Utilization of steel slag for Portland cement clinker production», *J. Hazard. Mater.*, vol. 152, n. 2, pagg. 805–811, 2008.
- [34] M. Schneider, M. Romer, M. Tschudin, e H. Bolio, «Sustainable cement production—present and future», *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, n. 7, pagg. 642–650, 2011.
- [35] Z. Liu *et al.*, «Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China», *Nature*, vol. 524, n. 7565, pagg. 335–338, 2015.
- [36] European Union, «Best Available Techniques (BAT) conclusions for the production of cement, lime and magnesium oxide.», *Gazzetta Uff. Dell'Unione Eur.*, 2013.
- [37] European Commission, «Best Available Techniques Reference Documents (BREF) for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide.», pagg. 1–506, 2013.
- [38] H. Wolfschaffner, «Method and device for gravimetric dosing bulk material», 13-feb-2007.
- [39] B. Yılmaz e N. Ediz, «The use of raw and calcined diatomite in cement production», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 30, n. 3, pagg. 202–211, 2008.
- [40] J. D. Bapat, «Application of ESP for gas cleaning in cement industry—with reference to India», *J. Hazard. Mater.*, vol. 81, n. 3, pagg. 285–308, 2001.
- [41] F. Kherbouche, Y. Benmimoun, A. Tilmatine, A. Zouaghi, e N. Zouzou, «Study of a new electrostatic precipitator with asymmetrical wire-to-cylinder configuration for cement particles collection», *J. Electrostat.*, vol. 83, pagg. 7–15, 2016.
- [42] Y. Zheng, «Mercury Removal from Cement Plants by Sorbent Injection upstream of a Pulse Jet Fabric Filter», *Grad. Sch. Yearb. 2010*, pag. 205, 2011.
- [43] R. Gebert, C. Rinschler, C. Polizzi, U. Harig, G. Pranghofer, e S. J. Miller, «A new filter system, combining a fabric filter and electrostatic precipitator for effective pollution control behind cement kilns», in *Cement Industry Technical Conference, 2003. Conference Record. IEEE-IAS/PCA 2003*, 2003, pagg. 285–294.
- [44] R. J. Kraft, V. C. Martling, B. R. Mack, e M. A. Minnich, «Combustion chamber/venturi cooling for a low NO<sub>x</sub> emission combustor», 10-set-2002.
- [45] D. Watson e P. Hood, «Portland cement-making and municipal refuse conversion», 10-mag-1977.
- [46] S. Fu, Q. Song, e Q. Yao, «Study on the catalysis of CaCO<sub>3</sub> in the SNCR deNO<sub>x</sub> process for cement kilns», *Chem. Eng. J.*, vol. 262, pagg. 9–17, 2015.
- [47] R. L. Smith e R. P. Stratford, «Application considerations in handling effects of scr generated harmonics in cement plants», *IEEE Trans. Ind. Appl.*, n. 1, pagg. 63–70, 1981.
- [48] S. Michalak, J. R. Comparato, e J. E. Hofmann, «Simplified efficient process for reducing NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, and particulates», 19-ago-1997.

- [49] European Union, «Best Available Techniques (BAT) conclusions for the production of pulp, paper and board», *Gazzetta Uff. Dell'Unione Eur.*, 2014.
- [50] European Commission, «Best Available Techniques Reference Document (BREF) for the Production of Pulp, Paper and Board», pagg. 1–906, 2015.
- [51] J. Langley e D. Holroyd, «Production of paper and paperboard», 28-giu-1988.
- [52] C. Ververis, K. Georghiou, N. Christodoulakis, P. Santas, e R. Santas, «Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their suitability for paper production», *Ind. Crops Prod.*, vol. 19, n. 3, pagg. 245–254, 2004.
- [53] P. J. Kleppe, «Kraft pulping», *Tappi*, vol. 53, n. 1, pagg. 35–47, 1970.
- [54] J. Sjöström e M. Reunanen, «Characterization of lignin and carbohydrates dissolved in groundwood pulping by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry», *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 17, n. 4, pagg. 305–318, 1990.
- [55] F. Navarro, F. Davalos, F. Denes, L. E. Cruz, R. A. Young, e J. Ramos, «Highly hydrophobic sisal chemithermomechanical pulp (CTMP) paper by fluorotrimethylsilane plasma treatment», *Cellulose*, vol. 10, n. 4, pagg. 411–424, 2003.
- [56] M. Hey, «Paper bleaching: its simple chemistry and working procedures», *Pap. Conserv.*, vol. 2, n. 1, pagg. 10–23, 1977.
- [57] T.-C. Wang, «Paper shredder having a manual paper pressing device», 19-dic-2006.
- [58] A. K. Ghosh, «Fundamentals of paper drying—theory and application from industrial perspective», in *Evaporation, Condensation and Heat Transfer*, IntechOpen, 2011.
- [59] J. Oral, J. Sikula, R. Puchyr, Z. Hajny, P. Stehlik, e L. Bebar, «Processing of waste from pulp and paper plant», *J. Clean. Prod.*, vol. 13, n. 5, pagg. 509–515, 2005.
- [60] E. Sipilä, J. Vehlow, P. Vainikka, C. Wilén, e K. Sipilä, «Market potential of high efficiency CHP and waste based ethanol in European pulp and paper industry», *VTT Espoo Finl.*, 2009.
- [61] A. A. Kornhauser, «Analysis of an idealized Stirling thermocompressor», in *IECEC 96. Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 1996, vol. 2, pagg. 1331–1336.
- [62] R. M. Davis, W. F. Ray, e R. J. Blake, «Inverter drive for switched reluctance motor: circuits and component ratings», *IEE Proc. B Electr. Power Appl.*, vol. 128, n. 2, pagg. 126–136, mar. 1981, doi: 10.1049/ip-b.1981.0018.
- [63] E. B. Myers e T. J. Overcamp, «Hydrogen Peroxide Scrubber for the Control of Nitrogen Oxides», *Environ. Eng. Sci.*, vol. 19, n. 5, pagg. 321–327, set. 2002, doi: 10.1089/10928750260418953.
- [64] K. Chandrasekara Pillai, S. J. Chung, T. Raju, e I.-S. Moon, «Experimental aspects of combined NOx and SO2 removal from flue-gas mixture in an integrated wet scrubber-electrochemical cell system», *Chemosphere*, vol. 76, n. 5, pagg. 657–664, lug. 2009, doi: 10.1016/j.chemosphere.2009.04.013.
- [65] B. R. Mohan, S. Biswas, e B. C. Meikap, «Performance characteristics of the particulates scrubbing in a counter-current spray-column», *Sep. Purif. Technol.*, vol. 61, n. 1, pagg. 96–102, giu. 2008, doi: 10.1016/j.seppur.2007.09.018.
- [66] R. Baroth, «Literature review of the latest development of wood debarking», *Control Eng. Lab.*, 2005.
- [67] M. B. Roncero, A. L. Torres, J. F. Colom, e T. Vidal, «TCF bleaching of wheat straw pulp using ozone and xylanase. Part A: paper quality assessment», *Bioresour. Technol.*, vol. 87, n. 3, pagg. 305–314, mag. 2003, doi: 10.1016/S0960-8524(02)00224-9.
- [68] P. Bajpai, A. Anand, N. Sharma, S. P. Mishra, P. K. Bajpai, e D. Lachenal, «ENZYMES IMPROVE ECF BLEACHING OF PULP», *BioResources*, vol. 1, n. 1, pagg. 34–44, 2006.
- [69] J.-L. Wen, S.-L. Sun, T.-Q. Yuan, F. Xu, e R.-C. Sun, «Structural Elucidation of Lignin Polymers of Eucalyptus Chips during Organosolv Pretreatment and Extended Delignification | Journal of Agricultural and Food Chemistry», 2013.
- [70] L. G. Akim, J. L. Colodette, e D. S. Argyropoulos, «Factors limiting oxygen delignification of kraft pulp», *Can. J. Chem.*, vol. 79, n. 2, pagg. 201–210, feb. 2001, doi: 10.1139/v01-007.
- [71] «Alkaline Darkening and Its Relationship to Peroxide Bleaching of Mechanical Pulp: Journal of Wood Chemistry and Technology: Vol 24, No 1», 2007.

- [72] W. Rudolfs e H. R. Amberg, «White Water Treatment: IV. Mesophilic and Thermophilic Digestion», *Sew. Ind. Wastes*, vol. 24, n. 12, pagg. 1509–1511, 1952.
- [73] P. Tomani e A. Seisto, «Separation methods for closed-loop manufacture of bleached kraft pulp — overview of an EU project», *Desalination*, vol. 124, n. 1, pagg. 217–223, nov. 1999, doi: 10.1016/S0011-9164(99)00106-X.
- [74] M. Henze, M. C. M. Van Loosdrecht, G. A. Ekama, e D. Brdjanovic, *Biological wastewater treatment*. 2008.
- [75] H. Nurmesniemi, M. Mäkelä, R. Pöykiö, K. Manskinen, e O. Dahl, «Comparison of the forest fertilizer properties of ash fractions from two power plants of pulp and paper mills incinerating biomass-based fuels», *Fuel Process. Technol.*, vol. 104, pagg. 1–6, dic. 2012, doi: 10.1016/j.fuproc.2012.06.012.
- [76] European Commission, «Reference Document on Best Available Techniques (BREF) in the Production of Polymers.», *Off. J. Eur. Union*, pag. 314, 2007.
- [77] S. Supino, O. Malandrino, e D. Sica, «Il contributo dei Certificati Bianchi al miglioramento dell'efficienza energetica in Italia», *Esperienze Impresa*, vol. 20, n. 1, 2012.
- [78] European Union, «Bat Conclusions for the iron and steel production», *Gazzetta Uff. DellUnione Eur.*, 2012.
- [79] D. J. M. Rosado, S. B. R. Chávez, J. A. Gutierrez, F. H. M. de Araújo, J. A. de Carvalho Jr, e A. Z. Mendiburu, «Energetic analysis of reheating furnaces in the combustion of Coke Oven Gas, Linz-Donawitz Gas and Blast Furnace Gas in the steel industry», *Appl. Therm. Eng.*, pag. 114905, 2020.
- [80] P. Jin, Z. Jiang, C. Bao, S. Hao, e X. Zhang, «The energy consumption and carbon emission of the integrated steel mill with oxygen blast furnace», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 117, pagg. 58–65, 2017.
- [81] European Commission, «Best Available Techniques Reference Document (BREF) for Iron and Steel Production. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (integrated Pollution Prevention and Control)», pag. 623, 2012.
- [82] A. Zare Ghadi, M. S. Valipour, S. M. Vahedi, e H. Y. Sohn, «A Review on the Modeling of Gaseous Reduction of Iron Oxide Pellets», *Steel Res. Int.*, vol. 91, n. 1, pag. 1900270, 2020.
- [83] R. L. Stephenson e R. M. Smailer, *Direct reduced iron: technology and economics of production and use*, vol. 73. Iron & Steel Society of AIME Warrendale, 1980.
- [84] Q. Yang, N. Holmberg, N. Menad, e B. Björkman, «A Laboratory study on smelt-reduction of briquettes made of wastes from stainless steel production», in *Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology: 05/09/1999-09/09/1999*, 1999, pagg. 1061–1072.
- [85] L. Huibin *et al.*, «Energy conservation and emissions reduction in iron and steel industry», in *2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, 2011, vol. 2, pagg. 41–44.
- [86] L. Chen, B. Yang, X. Shen, Z. Xie, e 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», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 86, pagg. 151–160, 2015.
- [87] C. Gao, H. Na, K. Song, F. Tian, N. Strawa, e T. Du, «Technologies-based potential analysis on saving energy and water of China's iron and steel industry», *Sci. Total Environ.*, vol. 699, pag. 134225, 2020.
- [88] Sector Policies and Programs Division, Office of Air Quality Planning and Standards, e U.S. Environmental Protection Agency, «Available and Emerging Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from the Iron and Steel Industry». 2012.
- [89] S. Eloneva, «Reduction of CO<sub>2</sub> emissions by mineral carbonation: steelmaking slags as rawmaterial with a pure calcium carbonate end product», 2010.
- [90] D. Gielen e Y. Moriguchi, «CO<sub>2</sub> in the iron and steel industry: an analysis of Japanese emission reduction potentials», *Energy Policy*, vol. 30, n. 10, pagg. 849–863, 2002.
- [91] K. Sohaili, «The impact of improvement in Iran iron and steel production technology on environment pollution», *Procedia Environ. Sci.*, vol. 2, pagg. 262–269, 2010.
- [92] K. He e L. Wang, «Time to change the energy conservation direction of China's steel industry: From upgrading the technology level to increasing scrap ratio», *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 63, n. 1, pagg. 128–139, 2020.

- [93] M. R. Errera e L. F. Milanez, «Thermodynamic analysis of a coke dry quenching unit», *Energy Convers. Manag.*, vol. 41, n. 2, pagg. 109–127, 2000.
- [94] Ø. Skreiberg, T. Li, L. Wang, M. Bugge, e T. Løvås, «An evaluation of effects of fuel parameters and flue gas recirculation on NO<sub>x</sub> emissions through detailed chemical kinetics simulations», 217-222, 2019, doi: 10.3303/CET1974037.
- [95] C. Sigmund, «TEORIA E PRATICA DELLA DEPURAZIONE DELLE ACQUE REFLUE Procedure di dimensionamento e progettazione», pag. 186, 2008.



## 8 Abbreviazioni ed acronimi

- ADt: produzione dopo l'imballaggio
- BAT: Best Available Techniques
- BF: Blast Furnace
- BOF: Basic Oxygen Furnace
- BOP: Basic Oxygen Process
- BOS: Basic Oxygen Steelmaking
- BREF: Best Available Techniques Reference Document
- CA: Corrente Alternata
- CC: Corrente Continua
- CDQ: Coke Dry Quenching
- CHP: cogenerazione di calore ed energia
- CNCG: gas odorigeni concentrati non condensabili
- COD: domanda chimica di ossigeno
- COG: Coke Oven Gas
- CTMP: Chemo Thermo Mechanical Pulping
- DIF: Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Firenze
- DRI: Direct Reduced Iron
- EAF: Electric Arc Furnace
- ECF: senza utilizzo di cloro elementare
- ESP: precipitatori elettrostatici
- FGD: desolfurazione degli effluenti gassosi
- LDPE: Low Density Polyethylene
- LVHC: gas a basso volume e ad alta concentrazione
- NGO: Non-government organization
- OHF: Open Heart Furnace
- PVC: polivinilcloruro
- SCR: Selective catalytic reduction
- SNCR: Non Selective catalytic reduction
- SPM: Suspended particulate matter
- TCF: senza utilizzo di cloro
- TEE: Titoli di Efficienza Energetica
- TRS: composti ridotti dello zolfo
- TSS: solidi sospesi totali
- TWG: Technical Working Group
- UE: Unione Europea
- UNIFI: Università degli Studi di Firenze
- VOC: Composti Organici Volatili

## 9 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.

### 9.1 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 al 2017 è Professore Associato di Impianti Industriali presso il Dipartimento DIF.

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.

### 9.2 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 Engineering 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.

### 9.3 *Alessandra Cantini*

Alessandra Cantini ha conseguito la Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica con voto 107/110 il 3 ottobre 2016, presso la Scuola di Ingegneria dell'Università degli Studi di Firenze, discutendo la tesi dal titolo: "The plant replacement period in the natural gas distribution networks: proposal for a calculation algorithm".

Ha conseguito la Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica (curriculum gestionale e produttivo) 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 2019 ha lavorato come ingegnere freelance presso l'azienda Smartoperations S.P.A, dove si è occupata di progetti afferenti alle tematiche di ingegneria della manutenzione e dell'affidabilità, lean layout planning, gestione dei magazzini 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 Ingegneria Industriale (curriculum "Ingegneria Industriale e dell'affidabilità", ciclo XXXV) presso il Dipartimento DIF dell'Università di Firenze, dove approfondisce la seguente tematica: "Analisi di modelli strutturati di gestione dell'inventario e studio di un modello logistico avanzato per la gestione ottimale dei magazzini ricambi".

### 9.4 *Andrea Navicelli*

Andrea Navicelli si è laureato con lode il 21 aprile 2017 in ingegneria meccanica presso l'Università degli Studi di Firenze, discutendo la tesi dal titolo: Studio di fattibilità dell'applicazione di un modello manutentivo con fornitore di servizi logistici integrati per la gestione delle parti di ricambio: applicazione alla manutenzione delle reti gas.

Da ottobre 2018 è abilitato all'esercizio della professione di ingegnere.

Da giugno 2017 a maggio 2019 è stato titolare di un assegno di ricerca per il progetto di ricerca cofinanziato dalla regione Toscana SmartGEO dal titolo: Sviluppo, prototipizzazione e dimostrazione di un sistema avanzato di telediagnostica per impianti geotermici.

Da giugno 2019 a maggio 2020 è titolare di un assegno di ricerca per il progetto di ricerca cofinanziato dalla regione Toscana IOT 4.0 Yacht dal titolo: IOT 4.0, solutions for Yacht maintenance and remote assistance.

Da novembre 2017 è iscritto al corso di dottorato di ricerca in ingegneria industriale e dell'affidabilità presso l'Università degli studi di Firenze, con un progetto dal titolo: Analisi ed applicazione di modelli predittivi razionali per guasti e prestazioni finalizzati alla realizzazione di un sistema di diagnostica

predittiva con l'obiettivo di ampliare la capacità di analisi on-line e off-line di sistemi e componenti di impianti industriali, prevenendo le possibili cause di inefficienza incrementandone la disponibilità.

È autore di 3 pubblicazioni scientifiche pubblicate su congressi internazionali.

### 9.5 *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 4 pubblicazioni scientifiche su riviste internazionali.