



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



MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA



Ricerca di Sistema elettrico

Caratterizzazione dei processi e realizzazione  
di uno strumento di analisi e monitoraggio  
dei consumi energetici nei settori Fonderia,  
Incenerimento rifiuti e Farmaceutico

S. Miranda, R. Iannone, A. Lambiase, S. Riemma



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI  
DI SALERNO

Report RdS/PTR2021/181

## CARATTERIZZAZIONE DEI PROCESSI E REALIZZAZIONE DI UNO STRUMENTO DI ANALISI E MONITORAGGIO DEI CONSUMI ENERGETICI NEI SETTORI FONDERIA, INCENERIMENTO RIFIUTI E FARMACEUTICO.

S. Miranda, R. Iannone, A. Lambiase, S. Riemma  
(Dipartimento di Ingegneria Industriale – Università degli Studi di Salerno)

Dicembre 2021

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo : N.1 - Tecnologie

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

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

Linea di attività: LA4.9 - Analisi e caratterizzazione energetica di tre settori produttivi fortemente energy intensive

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 *“Determinazione analitica dei consumi energetici per unità di prodotto dei principali settori energivori italiani”*

Responsabile scientifico ENEA: Fabrizio Martini

Responsabile scientifico per l'Università di Salerno: Salvatore Miranda

## Sommario

<b>Abstract</b> .....	<b>7</b>
<b>Introduzione</b> .....	<b>8</b>
<b>1. Caso Studio n.1: Il settore Fonderie</b> .....	<b>9</b>
1.1. Il processo produttivo.....	10
1.1.1. <i>Progettazione del modello</i> .....	11
1.1.2. <i>Sabbie da fonderia</i> .....	14
1.1.3. <i>Leganti</i> .....	16
1.1.4. <i>Caratteristiche tecnologiche</i> .....	16
1.1.5. <i>Formatura in Forma transitoria</i> .....	17
1.1.5.1. <i>Preparazione delle anime</i> .....	19
1.1.5.2. <i>Essiccazione della forma</i> .....	20
1.1.6. <i>Formatura in Forma permanente</i> .....	21
1.1.6.1. <i>Ricomposizione della forma</i> .....	21
1.1.7. <i>Fusione</i> .....	22
1.1.8. <i>Colata</i> .....	26
1.1.9. <i>Solidificazione e raffreddamento</i> .....	28
1.1.10. <i>Distaffatura</i> .....	29
1.1.11. <i>Finitura</i> .....	29
1.1.12. <i>Trattamenti termici</i> .....	29
1.1.12.1. <i>Tempra di soluzione</i> .....	29
1.1.12.2. <i>Invecchiamento</i> .....	30
1.1.12.3. <i>Stabilizzazione</i> .....	30
1.1.13. <i>Lavorazioni meccaniche</i> .....	30
1.1.14. <i>Controllo Qualità</i> .....	31
1.1.14.1. <i>Difetti</i> .....	31
1.1.14.2. <i>Tecniche di controllo</i> .....	31
1.2. <i>Analisi Energetica</i> .....	34
1.2.1. <i>Analisi per vettore</i> .....	35
1.2.2. <i>Energia Elettrica</i> .....	36
1.2.3. <i>Gas Naturale</i> .....	38
1.2.4. <i>Gasolio</i> .....	39
1.2.5. <i>Analisi per fasi</i> .....	40
1.2.6. <i>Attività Principali</i> .....	42
1.2.6.1. <i>Reparto Formatura</i> .....	42
1.2.6.2. <i>Reparto Fusione</i> .....	43
1.2.6.3. <i>Reparto Colata</i> .....	45

1.2.6.4. <i>Reparto Finitura</i> .....	46
1.2.6.5. <i>Servizi ausiliari</i> .....	47
1.2.6.6. <i>Servizi generali</i> .....	49
1.2.6.7. <i>Autoproduzione di energia</i> .....	50
1.3. Realizzazione del cruscotto di monitoraggio.....	51
<b>1.3.1. Inserimento dei dati</b> .....	<b>51</b>
<b>1.3.2. Il foglio di calcolo</b> .....	<b>53</b>
<b>1.3.3. Il cruscotto di monitoraggio</b> .....	<b>55</b>
1.4 Bibliografia e sitografia.....	58
<b>2. Caso Studio n.2: Il processo di incenerimento dei rifiuti</b> .....	<b>59</b>
2.1 Le materie prime .....	59
2.2 Il processo di trasformazione degli inceneritori.....	60
<b>2.2.1 Movimentazione e alimentazione dei rifiuti</b> .....	<b>61</b>
<b>2.2.2 Forno / generatore di vapore</b> .....	<b>63</b>
2.2.2.1. <i>Forni a griglia</i> .....	63
2.2.2.2. <i>Forni a letto fluido</i> .....	65
2.2.2.3. <i>Forni a tamburo rotante</i> .....	66
<b>2.2.3 Ciclo termico</b> .....	<b>67</b>
<b>2.2.4 Depurazione fumi</b> .....	<b>68</b>
2.3 I prodotti finiti .....	69
2.4 Trattamento dei RSU e FORSU .....	69
<b>2.4.1 Linea di trattamento RSU</b> .....	<b>69</b>
2.4.1.1. <i>Ricezione e preparazione delle materie prime</i> .....	69
2.4.1.2. <i>Trattamento biologico di bioessiccazione</i> .....	70
2.4.1.3. <i>Raffinazione e produzione CDR</i> .....	70
<b>2.4.2 Linea di trattamento FORSU</b> .....	<b>71</b>
2.4.2.1. <i>-Ricezione e pretrattamento</i> .....	71
2.4.2.2. <i>Stadio di digestione</i> .....	71
2.4.2.3. <i>Trattamento aerobico</i> .....	71
2.4.2.4. <i>Unità di recupero energetico</i> .....	71
2.5. Analisi Energetica .....	72
<b>2.5.1. Individuazione delle attività principali, dei servizi ausiliari e generali</b> .....	<b>72</b>
<b>2.5.2. Panoramica generale dell'analisi e definizione dei vettori energetici</b> .....	<b>73</b>
<b>2.5.3. Mappatura del processo</b> .....	<b>76</b>
2.5.3.1. <i>Movimentazione/alimentazione dei rifiuti</i> .....	77
2.5.3.2. <i>Forno/ generatore di vapore</i> .....	77
2.5.3.3. <i>Il ciclo termico</i> .....	79
2.5.3.4. <i>Depurazione dei fumi</i> .....	80
2.5.3.5. <i>I servizi ausiliari</i> .....	81



2.5.3.6. <i>I servizi generali</i> .....	83
2.6. Realizzazione del cruscotto di monitoraggio .....	85
2.6.1. <i>Inserimento dei dati</i> .....	85
2.6.2. <i>Il foglio di calcolo</i> .....	88
2.6.3. <i>Il cruscotto di monitoraggio</i> .....	89
2.7. Bibliografia .....	93
<b>3. Caso Studio n.3: l'industria Farmaceutica</b> .....	<b>94</b>
<i>Nascita e sviluppo dell'industria farmaceutica</i> .....	94
<i>Good Manufacturing Practices</i> .....	96
<i>Dimensioni imprese ed investimenti per il risparmio energetico</i> .....	96
3.1 I processi farmaceutici e le fasi di produzione .....	101
3.1.1. <i>I principi attivi</i> .....	101
3.1.2. <i>Lavaggio e sterilizzazione degli ambienti di lavoro prima della produzione</i> .....	103
3.1.3. <i>Pesata delle materie prime</i> .....	104
3.1.4. <i>Preparazione del granulato</i> .....	104
3.1.5. <i>Produzione delle diverse forme farmaceutiche</i> .....	106
3.1.6. <i>Confezionamento</i> .....	106
3.2. Forme farmaceutiche SOLIDE .....	107
3.2.1 <i>Miscelazione</i> .....	107
3.2.2. <i>Essiccamento</i> .....	108
3.2.3. <i>Le compresse</i> .....	109
3.2.4. <i>Le capsule</i> .....	109
3.2.5. <i>Il rivestimento</i> .....	110
3.3. Forme farmaceutiche FLUIDO-SOLIDE .....	112
3.4. Forme farmaceutiche LIQUIDE .....	114
3.4.1. <i>La solubilizzazione</i> .....	114
3.4.2. <i>La miscelazione</i> .....	115
3.4.3. <i>La filtrazione</i> .....	116
3.4.4. <i>La pulizia</i> .....	116
3.4.4.1. <i>Sterilizzazione</i> .....	117
3.4.5. <i>La ripartizione</i> .....	118
3.4.5.1. <i>Fiale e flaconi</i> .....	119
3.4.5.2. <i>Siringhe pre-riempite</i> .....	119
3.4.6. <i>La liofilizzazione</i> .....	120
3.5. Analisi Energetica .....	122
3.5.1 <i>Analisi dei vettori energetici e definizione dei confini d'analisi</i> .....	123
3.5.2. <i>Mappatura dei processi relativi a servizi ausiliari e generali</i> .....	129

3.5.2.1. <i>I servizi ausiliari</i> .....	129
3.5.2.2. <i>I servizi generali:</i> .....	139
3.6. Realizzazione del cruscotto di visualizzazione.....	142
<b>3.6.1 Inserimento dei dati</b> .....	<b>142</b>
<b>3.6.2. Il foglio di calcolo</b> .....	<b>145</b>
<b>3.6.3. Foglio di calcolo HVAC</b> .....	<b>146</b>
<b>3.6.4. Foglio di calcolo Impianti frigo a compressione di vapore</b> .....	<b>150</b>
<b>3.6.5. Foglio di calcolo Compressori d'aria</b> .....	<b>151</b>
<b>3.6.6. Il cruscotto di visualizzazione</b> .....	<b>153</b>
3.7. Bibliografia.....	159
<b>4. Analisi di scenario</b> .....	<b>161</b>
<b>5. Attività di disseminazione</b> .....	<b>165</b>
<b>6. Conclusioni</b> .....	<b>167</b>
<b>Elenco ALLEGATI al REPORT</b> .....	<b>169</b>
<b>CV brevi degli autori</b> .....	<b>170</b>

## Abstract

Il lavoro presentato in questa relazione è associato ad una specifica linea di attività (WP4 – LA4.9) per il 2021 relativa al Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021, che vede la collaborazione tra l'Unità Tecnica Efficienza Energetica dell'ENEA e il CINTEST a cui afferisce anche UNISA.

Gli obiettivi dell'attività di ricerca prevedono:

- Caratterizzazione energetica del settore Fonderie: mappatura dei processi produttivi e individuazione delle fasi energivore.
- Caratterizzazione energetica del settore Incenerimento rifiuti similmente a quanto fatto per il settore precedente
- Caratterizzazione energetica del settore Farmaceutico similmente a quanto fatto per i settori precedenti
- Realizzazione di tre cruscotti di analisi e monitoraggio al fine di trasferire alle tre associazioni di categoria un quadro della gestione energetica e che permetta alle aziende appartenenti a ognuno dei tre settori di controllare le proprie performance energetiche.

La mappatura dei processi e dell'utilizzo dei vettori energetici ha consentito di individuare le fasi del processo su cui porre attenzione. In questo modo, grazie alla collaborazione con il CINTEST (Centro per l'Innovazione Tecnologica e lo Sviluppo del Territorio), si sono potuti definire degli indicatori di prestazione specifici per ogni fase critica. Per quanto riguarda la fonderia, sono stati analizzati principalmente i processi produttivi relativi ad acciaio, ghisa ed alluminio, per quanto riguarda l'incenerimento dei rifiuti ci si è focalizzati sui rifiuti solidi urbani; nel settore farmaceutico invece sono stati analizzati i servizi ausiliari, più delle linee produttive.

Questo lavoro ha dato la possibilità di indagare le cause di variazione delle performances con l'obiettivo di supportare gli addetti alla gestione dell'energia nella definizione di opportune strategie di intervento. È stato possibile reperire i valori utili al calcolo degli indicatori per poter effettuare un confronto tra consumo teorico e reale. Per semplificare la raccolta dati è stato condiviso con le aziende un semplice foglio Excel da compilare, in base a cui è stato realizzato un cruscotto di monitoraggio, sviluppato ad hoc per ciascun settore mediante l'applicativo Power BI, che permettesse alle realtà produttive di effettuare un'autodiagnosi delle proprie fasi critiche attraverso il controllo costante dei propri consumi.

## Introduzione

Il lavoro presentato in questa relazione è associato ad una specifica linea di attività (WP4 – LA4.9) per il 2021 relativa al progetto di ricerca inquadrato nel Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021, che vede la collaborazione tra l'Unità Tecnica Efficienza Energetica dell'ENEA e il Centro per l'Innovazione Tecnologica e lo Sviluppo del Territorio (CINTEST) a cui afferisce anche l'Università degli Studi di Salerno.

Il Work Package nell'ambito del quale si inquadra il presente progetto ha come macro-obiettivo quello di contribuire all'efficientamento energetico di diversi settori industriali italiani attraverso attività di ricerca finalizzate allo sviluppo di strumenti di supporto alle decisioni aziendali e realizzate grazie alla collaborazione di ENEA, diverse Università italiane e con il coinvolgimento di diverse aziende ed associazioni di categoria.

Lo specifico progetto nasce dalle analisi dei risultati dei progetti di ricerca portati avanti da ENEA e terminati nei periodi precedenti che hanno portato alla definizione di indicatori di prestazione energetica e alla loro valutazione per oltre 15.000 siti in Italia attraverso i dati di consumo raccolti sul campo per mezzo della campagna di diagnosi energetiche del 2015 ai sensi del D.Lgs 102/2014. L'analisi di questi dati consente il calcolo di valori medi di prestazione utili a caratterizzare i singoli settori e fornire una rappresentazione affidabile del settore produttivo italiano. Nel quadriennio 2015-2018 un significativo lavoro di analisi degli indicatori e standardizzazione delle modalità di raccolta dei dati è stato effettuato allo scopo di rendere ancora più affidabili i risultati ottenibili dall'approccio proposto.

Il lavoro di ricerca della presente linea di attività si inquadra quindi come una sezione dell'intero progetto che ha l'obiettivo finale di sviluppare degli indicatori attraverso l'analisi dei processi produttivi dei settori selezionati e la loro mappatura, effettuata secondo la metodologia definita nell'annualità precedente.

Gli indicatori di riferimento ricercati, affiancati agli indicatori di prestazione valutati con i dati raccolti dalle diagnosi del 2019, consentiranno inoltre di avere un quadro di riferimento delle prestazioni energetiche di alcuni importanti settori produttivi italiani. Analizzati e trattati i dati reperiti sarà mostrata la realizzazione dello strumento di calcolo reso disponibile a ciascuna azienda del settore e presente in allegato. Grazie ad esso la rappresentazione ed il calcolo degli indicatori risultano semplificati, questo cruscotto rappresenta una risorsa necessaria alle singole realtà produttive in quanto permette loro di potersi auto-valutare in maniera critica, confrontando i consumi teorici con quelli ideali ed essendo uno strumento di supporto agli esperti del settore per la scelta di interventi di efficientamento.

Gli obiettivi dell'attività di ricerca prevedono:

1. Caratterizzazione energetica del settore Fonderie: esecuzione di sopralluoghi nelle aziende del settore ove possibile, sostituiti da incontri con le aziende e scambio di fogli di raccolta dati al fine di individuare e valutare i loro usi energetici. Mappatura dei processi produttivi al fine di identificare ed analizzare i flussi energetici più significativi e definire un quadro della gestione energetica dell'intero stabilimento o di una qualunque attività. Individuazione delle fasi dei processi produttivi o delle macchine maggiormente energivore.
2. Caratterizzazione energetica del settore Farmaceutico: esecuzione di sopralluoghi nelle aziende del settore ove possibile, sostituiti da incontri con le aziende e scambio di fogli di raccolta dati al fine di individuare e valutare i loro usi energetici. Mappatura dei processi produttivi al fine di identificare ed analizzare i flussi energetici più significativi e definire un quadro della gestione energetica dell'intero stabilimento o di una qualunque attività. Individuazione delle fasi dei processi produttivi o delle macchine maggiormente energivore.

3. Caratterizzazione energetica del settore incenerimento rifiuti non pericolosi: esecuzione di sopralluoghi nelle aziende del settore ove possibile, sostituiti da incontri con le aziende e scambio di fogli di raccolta dati al fine di individuare e valutare i loro usi energetici. Mappatura dei processi produttivi al fine di identificare ed analizzare i flussi energetici più significativi e definire un quadro della gestione energetica dell'intero stabilimento o di una qualunque attività. Individuazione delle fasi dei processi produttivi o delle macchine maggiormente energivore.

4. La realizzazione di un cruscotto di monitoraggio al fine di trasferire alle associazioni di categoria un quadro della gestione energetica dei settori Vetro e Cemento, che permetta alle aziende del settore di controllare costantemente le proprie performance, confrontando i propri consumi con i benchmark di fase, stabiliti dagli indicatori teorici ed operativi. Gli strumenti di cui sopra sono presenti in allegato al documento;

La linea di attività 4.9 relativa al terzo anno (2021), descritta in questo rapporto, ha visto il gruppo impegnato nell'analisi dei processi produttivi aziendali e nello studio dei software di monitoraggio dei dati.

Il lavoro svolto risulta essere simile per tutti i settori scelti e si struttura come segue:

1. Introduzione al settore di riferimento con contestualizzazione del lavoro;
2. Analisi del processo produttivo e mappatura dello stesso, secondo le metodologie prestabilite. Analisi dei vettori energetici maggiormente utilizzati ed individuazione delle fasi maggiormente energivore
3. Sviluppo del cruscotto di monitoraggio ad hoc per il settore.

L'analisi del processo produttivo ed in particolare, dell'utilizzo dei vettori energetici, ha consentito di individuare quelle fasi del processo su cui porre maggiore attenzione. In questo modo è stato possibile, grazie alla collaborazione con il CINTEST, definire degli indicatori di prestazione specifici per ogni fase critica. La parte di sviluppo del cruscotto di monitoraggio risulta fondamentale per rendere i dati fruibili alle aziende, garantendo loro una facile comprensione dei risultati ottenuti.

## **1. Caso Studio n.1: Il settore Fonderie**

Secondo le statistiche pubblicate da Assofond relative al 2018 l'Italia vede la presenza di 1067 fonderie che occupano circa 30.600 addetti, con un fatturato totale annuo che sfiora i 7 miliardi di euro e con una quantità di metallo fuso che arriva ai 2,3 milioni di tonnellate.

Solo l'1% delle imprese supera i 250 dipendenti mentre il 99% del comparto è formato da PMI di cui una buona parte a conduzione familiare, il 55% ha meno di 10 dipendenti. Le fonderie di metalli non ferrosi sono prevalenti come numero rispetto a quelle di metalli ferrosi, 859 contro 185, ma la seconda classe prevede imprese di dimensioni maggiori, ciò si riflette nel fatturato medio che per la prima classe ammonta a 4,9 mln di euro mentre per la seconda 10,8 mln di euro.

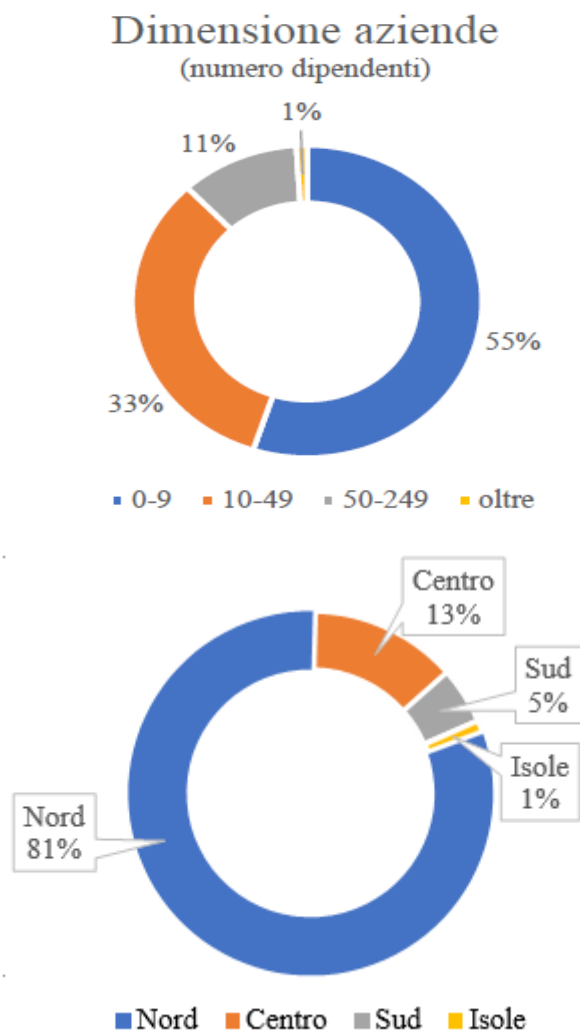


Figura 1.1 Posizionamento

L'80% delle fonderie hanno sede nel nord del paese, nello specifico è un vero e proprio distretto delle fonderie la provincia di Brescia con quasi 200 aziende.

Da segnalare anche l'assenza di questa industria dalle Isole italiane che prevedono pochissimi casi di fonderie e la bassa presenza nel sud Italia che vede solo il 5% delle fonderie italiane. [1]

### 1.1. Il processo produttivo

Il processo di fonderia si basa sul principio di voler realizzare una parte colando metallo fuso in una cavità avente forma complementare a quella del prodotto cercato e dal successivo raffreddamento della colata. Per realizzare un getto, le materie prime (metallo greggio di prima fusione in pani e rottame) e le materie ausiliarie (combustibili, sabbie, agglomeranti ecc.) vengono sottoposte ad una serie ordinata di operazioni che costituiscono il diagramma di lavorazione di cui sotto (Figura 1.2).

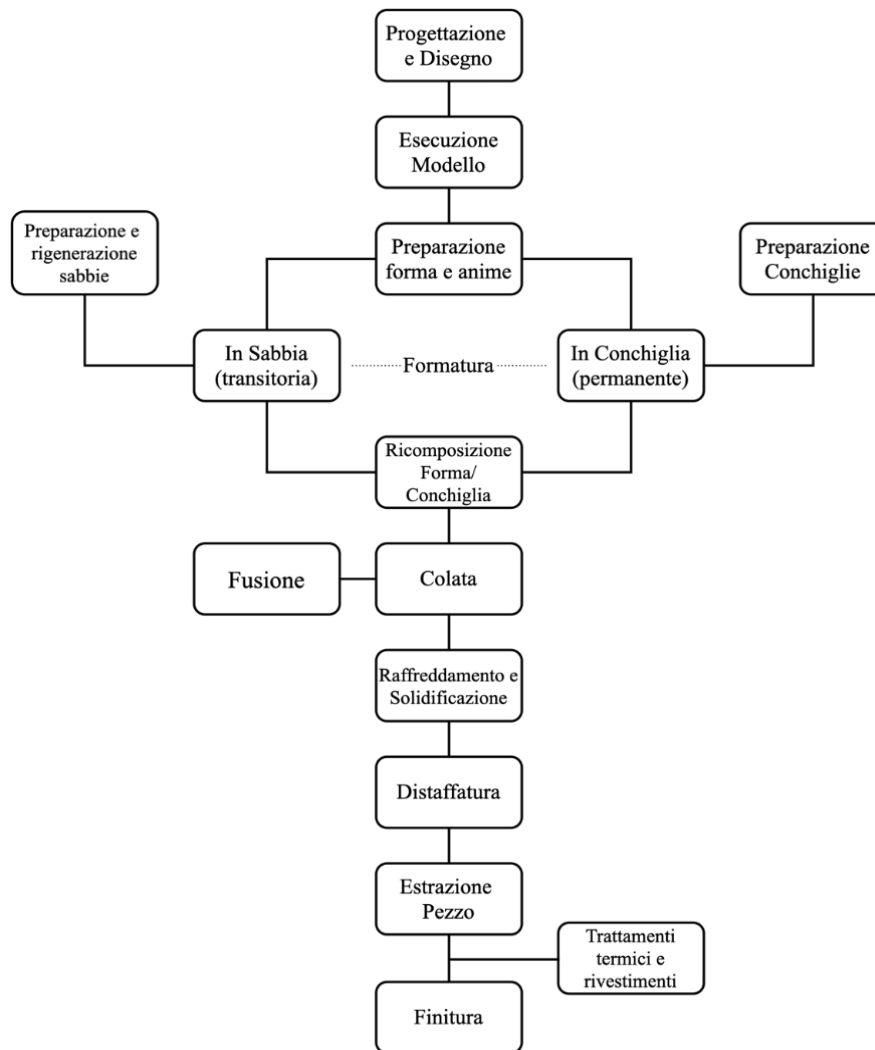


Figura1.2- Diagramma di Lavorazione

### 1.1.1. Progettazione del modello

Il processo inizia, quindi, con la progettazione del modello: il progettista ha in mente il getto da realizzare, ne studia i dettagli e per trasmettere le sue idee al costruttore realizza i disegni d'insieme e quelli esplosi di ciascun pezzo, quotati.

Come norma quando si progetta una struttura, questa va disegnata sempre in funzione delle tecnologie con le quali andrà realizzata, con la fonderia questo concetto è particolarmente stringente, infatti, questa fase non viene eseguita direttamente in fonderia ma dev'esserci, comunque, uno stretto legame tra progettista, modellista e fonditore.

Grazie a questa sinergia si potrà giungere a disegni realizzabili, limitare i costi, ridurre scarti e getti difettosi ed ottenere una qualità in linea generale maggiore.

Il disegno viene controllato e trasmesso ad un meccanico specializzato che con la fonderia costruisce il modello tenendo conto del ritiro del metallo e del sovrmetalto per le lavorazioni meccaniche.



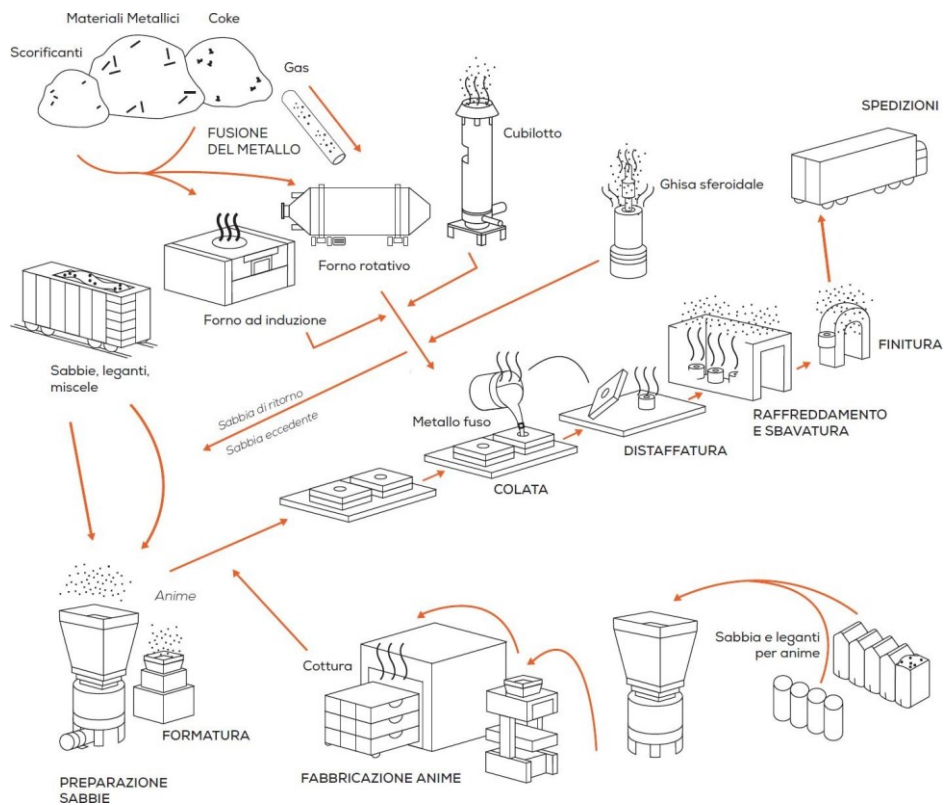


Figura 1.3- Schema del processo

I **metalli** tra cui può scegliere il progettista sono soprattutto acciai, ghise, ottoni, bronzi, leghe di alluminio, di magnesio e di titanio. Requisiti di un metallo da fonderia sono la temperatura di fusione non superiore ai 1500-1600°C ed una buona fluidità allo stato fuso in modo tale da non avere problemi nel riempire la forma.

Le leghe d'alluminio rientrano ampiamente in questi requisiti in quanto hanno temperature di fusione molto inferiori a quelle massime raggiungibili, questa proprietà permette di avere un ventaglio di soluzioni più vario in quanto temperature di poco superiori ai 700° C sono raggiungibili dalla quasi totalità delle configurazioni di forni utilizzati in fonderia.

Scegliere di pressofondere l'alluminio facilita il raggiungimento di alcuni obiettivi come l'ottenere un'ottima finitura superficiale, avere la possibilità di progettare con tolleranze più stringenti data la struttura molecolare salda, consente di avere un'alta precisione negli spessori, una bassa porosità, una buona tenuta in pressione, longevità e di avere un materiale economico e leggero.

La progettazione dei modelli dovrà tenere conto di alcune caratteristiche, la prima è l'**estraibilità** in quanto una volta realizzata la forma, questa verrà aperta lungo le superfici di sformatura (o separatrici) ed il modello verrà quindi sformato, cioè tirato fuori.

Affinché il modello possa fuoriuscire, le sue superfici devono essere di sezione sempre minore andando verso l'interno della forma per far sì che al momento dell'estrazione non trascini con sé materiale indesiderato rischiando il danneggiamento.

L'angolo che i fianchi del modello formeranno rispetto alla normale al piano di separazione è detto **sformo** o spoglia ( $\beta$ ) ed è generalmente compreso tra i 3 ed i 30°. L'estraibilità del modello può essere favorita anche dall'uso di vernici nel caso di modelli in legno o di lubrificanti nel caso di modelli metallici.

La seconda caratteristica da tenere in considerazione è la **durevolezza**, cioè il numero di utilizzi per cui il modello dovrà essere utilizzato che si rifletterà su caratteristiche diverse di questo, altro elemento è il **sovrametallo**.

Altra caratteristica è l'erosione che subiscono gli spigoli vivi di forma ed anime al passaggio del metallo liquido, è quindi buona norma prevedere sempre ampi **raggi di raccordo**, nelle forme permanenti gli spigoli vivi sono origine di tensioni in fase di solidificazione.

I modelli possono essere classificati in base al materiale impiegato per la loro realizzazione:

- **Modelli in legno:** economici, di rapida costruzione ma poco durevoli, deformabili, combustibili e molto sensibili alle condizioni atmosferiche quali l'umidità che li fa gonfiare o ritirare in maniera non proporzionale per tutte le direzioni; sono adatti quindi alla formatura di pochi pezzi
- **Modelli metallici:** meno deformabili, più durevoli, non combustibili e quindi adatti per un gran numero di riutilizzi per la realizzazione di pezzi medio-piccoli.

I metalli più utilizzati per questo scopo sono l'ottone e le leghe di alluminio, meno frequentemente vengono impiegati anche bronzo e ghisa.

In questo caso il modello dovrà prevedere tre ritiri: sia quello del metallo utilizzato per preparare il modello (che verrà stimato con un coefficiente di ritiro lineare specifico del metallo) che quello del getto definitivo più quello del sovrametallo che servirà poi per le lavorazioni meccaniche

- **Modelli in gesso e cemento:** utilizzati per la realizzazione delle placche modello e forme false (false staffe o staffe di supporto)
- **Modelli in cera:** costituiti da cera d'api con paraffine o resine in minore quantità, utilizzati nella microfusione e come modelli transitori in processi di fonderia artistica per la riproduzione di sculture, questi processi vengono detti a cera persa in quanto nel momento della colata i modelli vengono distrutti

Altra classificazione che possono avere i modelli è tra modelli per esterni e modelli per interni, i primi sono i modelli propriamente detti, sono il positivo del pezzo da realizzare, servono a creare il negativo del pezzo nella sabbia, i secondi vengono detti anche **casse d'anima**, vengono utilizzati quando il pezzo presenta della cavità interne, sono delle cassette aperte e scomponibili che conterranno delle sporgenze chiamate *portate* (coniche o piramidali) il cui ruolo è quello di supportare l'anima e permetterne il centraggio.

Le **anime** sono il negativo delle cavità desiderate, generalmente prismi, con questo sistema il metallo liquido potrà riempire solo lo spazio lasciato libero tra la forma e l'anima, diventa perciò importante l'estraibilità di quest'ultima.

Le casse d'anima sono quasi sempre scomponibili per poter estrarre l'anima e forate da almeno un lato per l'ingresso della sabbia.

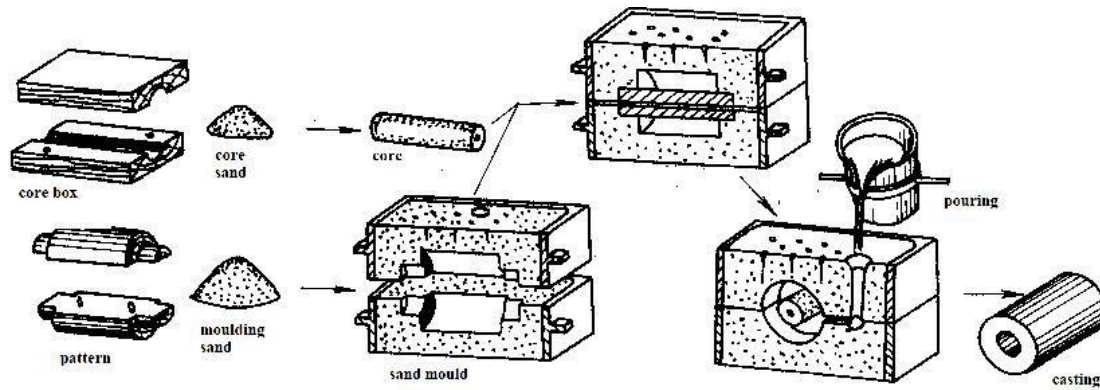


Figura 1.4- Modelli per interni e per esterni

Generalmente si tende a costruire i modelli assemblando pezzi semplici cercando di lasciare più vuoto possibile all'interno in maniera da risparmiare materiale guadagnando in leggerezza, costi e facilità di lavorazione.

Le unioni degli elementi che costituiscono il modello possono essere stabili o smontabili, nel primo caso avvengono tramite colla, chiodi, spine in legno, linguette, incastri; nel secondo caso le unioni avvengono tramite viti, bulloni, tiranti, perni e giunzioni a coda di rondine.

Quando la stabilità del modello lo consente, conviene costruire i modelli in maniera tale che siano scomponibili lungo le superfici di separazione della forma.

Il modello e la cassa d'anima vengono completati con marche e numeri in rilievo in punti che non disturbino la *sformatura* e con le piastre per lo *scampanamento*.

Il modello viene rifinito stuccandolo con gesso e colla nel caso sia di legno e viene liscio con carta vetrata, gli viene poi applicata una vernice impermeabile che non faccia aderire la sabbia.

### 1.1.2. Sabbie da fonderia

Le sabbie da fonderia sono formate da grani di quarzo, ossia biossido di silicio in forma cristallina, altamente refrattari, ed argilla che è il legante che dà plasticità e sgretolabilità alla forma.

In base al contenuto in argilla le sabbie si classificano in: **Sabbie silicee** se il tenore d'argilla è al di sotto del 5%, in questo caso l'argilla viene considerata un'impurezza

- Sabbie argillose (**terre**) se il contenuto d'argilla è superiore al 5%, queste a loro volta possono essere suddivise in:
  - terre forti o grasse se il contenuto di argilla è superiore al 18%
  - terre semigrasse se il contenuto di argilla è tra l'8% ed il 18%
  - terre magre se il contenuto d'argilla è tra il 5% e l'8%

In base alla **forma** del grano le sabbie possono essere classificate in sabbie a grano sferoidale, spigolato o composto, la forma viene osservata al microscopio.

In base alle **dimensioni** del grano si suddividono sabbie a grano grosso, medio o fine; viene fatta un'analisi granulometrica facendo passare la sabbia attraverso setacci a maglie successivamente sempre più larghe, in base alla quantità in percentuale raccolta da ogni setaccio si può definire un indice di finezza della sabbia

che rappresenta la quantità di maglie per pollice attraverso cui passerebbero tutti i grani se fossero di dimensione uniforme, più la sabbia è uniforme e più è permeabile. Generalmente vengono utilizzate contemporaneamente due tipologie di sabbie, una più raffinata che andrà a contatto diretto col pezzo da copiare ed un'altra tipologia per il riempimento della staffa e compattazione della sabbia, questa viene usualmente recuperata a fine lavorazione.

Prima di venire unita con nuova sabbia e ricominciare il ciclo subisce una serie di lavorazioni.

Per prima cosa vengono eliminate croste e zolle bruciate, la sabbia passa poi nel *rompizolle* che è un macchinario con due cilindri rotanti non a contatto tra i quali vengono sgretolate le zolle; vengono poi eliminate magneticamente le parti ferrose e setacciata la sabbia con *setacci* rotativi o a scossa; a questo punto la sabbia sarà granulare e priva di corpi metallici o grossolani e viene mescolata con quella nuova in una *molazza* in cui entrano anche i leganti, nelle sabbie argillose viene aggiunta l'acqua mentre in quelle destinate alla formatura a verde si mette il *nero minerale*.

A questo punto la sabbia è stata **rigenerata**, cioè ogni grano sarà rivestito di argilla umida o agglomerante, con i *disintegratori* o *lanciaterra* la sabbia viene lanciata e per effetto della resistenza dell'aria si separano i vari grani.

Nei getti di fonderia in cui la massa di metallo liquido che entra nelle forme è rilevante, vi è spesso la necessità di essiccare le forme, ovvero portarle in un ambiente chiuso (solitamente una stufa) in cui passa aria calda, la quale asporta sotto forma di vapore acqueo l'umidità che è contenuta in esse.

Tutte le anime, siano di terra o di sabbia agglomerata, quindi anche nel caso di colata in forme permanenti, vengono portate alla stufa, le prime per l'essiccazione, le seconde invece per la cottura che risulta nella trasformazione chimica dell'agglomerante.

Le **formature a secco** sono protette contro l'azione del metallo dalle tinte o "*neri di stufa*", in genere a base di grafite.

L'effetto del seccare la forma è nell'aumento della coesione e della permeabilità insieme al minore volume di gas che evaporerà al momento della colata. I pezzi colati a secco hanno finitura migliore.

Le **forme a verde** vengono esposte all'azione del metallo senza alcuna essiccazione e quindi sono umide, a scopo protettivo si incorpora nella terra del *nero minerale*, ossia una miscela di carbon fossile polverizzato detto "a lunga fiamma" per via dell'alto contenuto di componenti volatili che bruciano al momento della colata, i prodotti di questa combustione formano un velo protettivo tra metallo e sabbia; la mancanza della fase di essiccazione fa risultare questo tipo di formatura più economico, dato il mancato indurimento ci sarà meno resistenza alle spinte metallostatiche. [2]

Non sempre le sabbie possono essere impiegate in fonderia così come escono dalla cava ma spesso vanno sottoposte a correzioni per ottenere la combinazione di parametri tecnologici più ottimale per l'utilizzo.

Le **sabbie sintetiche** sono sabbie silicee più pure possibili a cui vengono addizionate sostanze leganti, sono più uniformi di quelle naturali ed hanno l'ovvio vantaggio di poterne controllare le caratteristiche come la refrattarietà e la permeabilità che sono generalmente più alte. Le forme realizzate con queste sabbie soffrono però di un'essiccazione molto più veloce di quelle naturali per cui l'intervallo di tempo disponibile per lavorarle è minore; queste forme sono più difficili da rifinire e riparare.

### 1.1.3. Leganti

I principali leganti sono quelli inorganici di tipo argilloso come le argille e le bentoniti, quelli inorganici cementizi come silicati e cementi e quelli organici come cereali, catrame, resine ed olii

Con l'utilizzo dei leganti **cementizi** come il cemento Portland l'indurimento della forma è ottenuto grazie al fenomeno di presa del cemento

I leganti **organici** migliorano la coesione delle sabbie a verde ed agiscono quindi da *Agglutinanti*.

Tra i leganti **cereali** c'è la *destrina* che deriva dall'amido di grano ed impedisce alla superficie della forma di perdere umidità troppo rapidamente e di incrostarsi, rendono quindi la sabbia lavorabile a percentuali di umidità più basse, bruciano ad alta temperatura e perciò la sabbia diventa meno resistente dopo la colata e quindi più sgretolabile, aspetto negativo è che spesso i leganti cereali ostruiscono i vuoti della sabbia andandone a diminuire la permeabilità.

Il **catrame** conferisce alle forme un'elevata resistenza a secco, è quindi un *agglomerante*, è molto resistente all'assorbimento dell'umidità e quindi viene spesso utilizzato per la formatura di grosse anime per le quali si prevede un lungo lasso di tempo tra essiccazione ed impiego, inoltre è economico. Le **resine** agiscono da leganti solo quando sottoposte a calore, come il catrame ritardano la perdita di resistenza della forma essiccata quando esposta ad un'atmosfera umida.

Le **resine termoindurenti** si induriscono in modo permanente a temperature relativamente basse (100-150°C).

Gli **oli** vengono utilizzati nella preparazione delle sabbie per anime, conferiscono alla sabbia agglomerata scarsa coesione a verde.

### 1.1.4. Caratteristiche tecnologiche

- La **refrattarietà** di una sabbia è misurata dalla temperatura massima alla quale può resistere senza presentare segni di fusione, ciò che dà alla sabbia questo tipo di proprietà è la silice, meno è presente e più si abbassa il punto di vetrificazione. La refrattarietà richiesta alla sabbia è legata alla temperatura del metallo che verrà colato, per i metalli non ferrosi come l'alluminio le temperature vanno dagli 800 ai 1400° C.

- La **coesione** dipende dalla percentuale di umidità come dalla natura e quantità dell'agglomerante, numericamente viene stabilita guardando alla  $\sigma_r$  a compressione, a trazione, a flessione e a taglio; quella a compressione indica se la sabbia una volta serrata sarà in grado di reggere le sollecitazioni alle quali verrà sottoposta, il sigma di rottura di taglio è indicativa della plasticità della sabbia.

- La **permeabilità** è la proprietà che indica quanto la sabbia si lasci attraversare dai gas permettendogli di evacuare dalla forma al momento della colata.

Se la permeabilità fosse bassa il gas non sfogherebbe e ci sarebbe un ribollimento del metallo liquido che avrebbe come conseguenza la presenza di bolle che porteranno il getto ad essere scartato. Dipende dai vuoti presenti nella sabbia per cui una sabbia più grossa sarà più permeabile, una sabbia con grandezze dei grani uniformi è più permeabile rispetto ad una sabbia con grandezze più variegata, una sabbia spigolata è più permeabile di una sabbia sferica perché i grani non si accoppiano bene tra loro e lasciano degli spazi.

Una sabbia più compressa sarà meno permeabile ma più coesa.

In relazione all'umidità, la permeabilità ha un massimo per un contenuto acquoso intorno al 5% e decresce per percentuali minori e maggiori.

- La **scorrevolezza** è la mobilità di una sabbia da fonderia per cui questa può riempire ogni punto della superficie del modello, diminuisce con l'aumentare delle dimensioni dei grani.

Il modello una volta controllato passa al formatore che eseguirà la forma, cioè un negativo del getto nel quale verrà poi colato il metallo liquido, se il getto dovrà avere delle cavità interne vi sarà la necessità di un'anima che verrà realizzata dall'animista.

### 1.1.5. Formatura in Forma transitoria

Caso più comune per realtà piccole o per una porzione minoritaria di produzione su commessa di aziende più strutturate.

Viene eseguita serrando sabbia da fonderia intorno al modello all'interno di un telaio chiamato staffa, aperta la forma ed estratto il modello, ricomposta, colato il metallo e demolita la forma per poter recuperare il getto; per eseguire un secondo getto dello stesso oggetto sarà quindi necessario ripetere la formatura.

Questa procedura si presta per tutti i metalli, getti di qualsiasi dimensione ed in qualunque numero ma non è ottimale per produzioni di grandi serie.

Le principali macro-tipologie di formatura:

- Formatura **allo scoperto**: l'impronta viene creata in un pavimento di sabbia, la faccia superiore del getto sarà quindi scoperta ed a contatto con l'ambiente, può venire utilizzata per getti di scarso valore e per i quali imperfezioni nella superficie superiore non sono rilevanti.

- Formatura **in fossa**: l'impronta viene ricavata in una buca nel pavimento della fonderia e contenuta in un involucro refrattario interrato realizzato in mattoni o calcestruzzo, la parte superiore della fossa è sempre chiusa, questo tipo di formatura è adatta per getti di grandi dimensioni.

- Formatura **in staffa**: l'impronta viene ricavata nella sabbia contenuta tra due o più staffe facilmente apribili e ricomponibili, si presta a tutti i tipi di getto.

- Formatura **in motta** o formelle senza staffe: in questo caso le staffe servono solo al momento della formatura ma poi una volta serrata la sabbia e ricomposta la forma vengono rimosse prima della colata e riutilizzate per la forma successiva, questo tipo di formatura ha un'elevata produttività e viene utilizzata per gli impianti in continuo.

Le staffe vengono fabbricate in ferro, ghisa o alluminio, la parte inferiore si chiama mezza di sotto mentre quella superiore coperchio o mezza di sopra. Hanno due boccole ai lati destinate alle spine che permettono il reciproco centraggio delle staffe e quattro maniglie per le manovre.

Nel caso più semplice di formatura a mano viene prima fissata la prima metà di modello su una **placca modello**, setacciata la *sabbia da modello* intorno allo stesso e viene quindi riempita la mezza di sotto con *sabbia argillosa*. Serrata la sabbia con pestelli pneumatici elettrici o con una tavola che va in pressione. In caso di placca modello a doppia faccia, la staffa viene ribaltata e sull'altra parte avviene la formatura della metà superiore oppure, nel caso in cui ci sia una placca modello per ogni metà modello, avverrà la stessa procedura su un altro tavolozzo per la staffa superiore.

Vengono incorporati nella mezza di sopra anche i modelli di **colatoi** o di **montanti**.



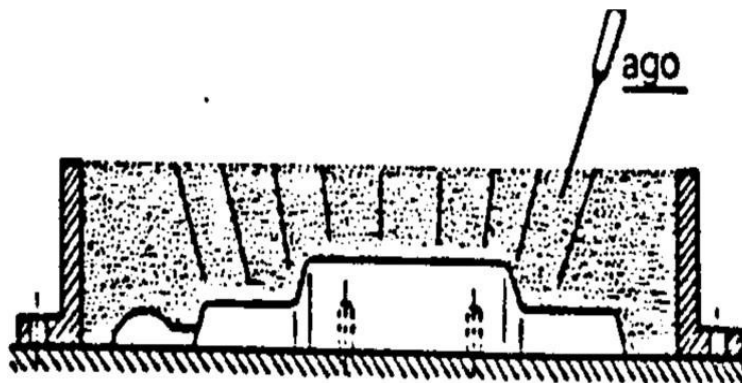


Figura 1.5 - Formatura - Foratura con ago

Per migliorare la permeabilità della forma, questa viene bucata con degli spilli facendo attenzione a non intaccare il modello, questi fori favoriscono l'evacuazione dei gas che si verranno a creare al momento della colata. Sul piano di separazione delle due staffe viene sparsa polvere isolante che faciliterà l'apertura della forma. A fine formatura viene asportata la sabbia in eccesso facendo scorrere una riga sulla staffa superiore

Si distinguono diversi tipi di formatura anche per il modo in cui viene serrata la sabbia, il più semplice è quello a pressione dall'alto con cui con pestelli pneumatici o pistoni viene compressa la sabbia che sarà più addensata verso la superficie superiore della forma, altro metodo è quello di muovere verso l'alto il modello che andrà a premere all'interno della forma ottenendo un addensamento della sabbia nelle vicinanze del modello, si può avere anche una formatura che preveda una vibro- compressione cioè sia la pressione superiore con un pistone che la vibrazione del modello.

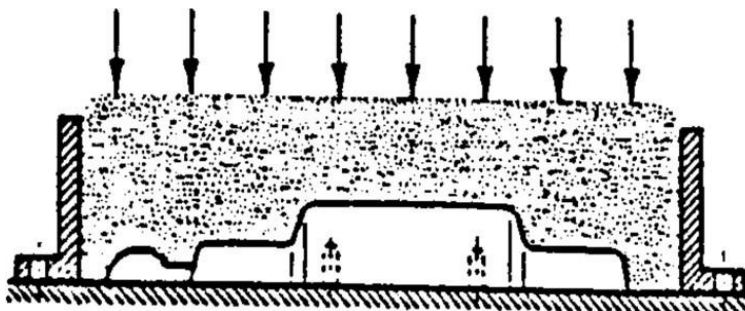


Figura 1.6 - Formatura – Compressione Sabbia

La forma va poi aperta e va estratto il modello con dei *tiranti ad occhiello*, a seconda delle dimensioni vengono dati dei colpi ai tiranti in varie direzioni per *scampanare*, possono venire utilizzati anche dei *vibratori pneumatici* per questo scopo, il modello può anche venire estratto con una gru in caso di grandi dimensioni.

Se ci fosse bisogno, il modello una volta estratto va ritoccato/ riparato/ pulito dalla sabbia con pennelli, spazzole o soffiati.



Nel caso di fusione in Alluminio la forma va spolverata con talco prima della ricomposizione nel caso di colata a verde, se va colata a secco viene verniciata con neri di fonderia tramite uno spruzzatore ad aria compressa.

### 1.1.5.1. Preparazione delle anime

Nel caso in cui il getto dovesse contenere cavità ci sarà necessità delle anime con i loro relativi supporti, in loro assenza queste si deformerebbero o si sposterebbero sotto la spinta del metallo. Questi supporti sono detti **portate d'anima**, sono degli alloggiamenti all'interno della forma, cilindrici in caso di anima orizzontale e tronco-conici in caso di anima verticale, possono esserci una portata per fronte nel caso di doppio appoggio oppure l'anima può venire montata a sbalzo, in questo caso il baricentro dell'anima è da far ricadere all'interno della portata per avere più stabilità.

È importante che le anime siano costituite da materiale refrattario, che abbiano sufficiente resistenza meccanica per non deformarsi né rompersi sotto l'azione metallostatica, che siano permeabili affinché non si formino *soffiature*, che siano friabili, inteso come facilmente svuotabili successivamente alla colata in modo da rendere la **sterratura** più semplice.

Generalmente le anime vengono realizzate in sabbia con alcuni leganti ed a volte con armature o fili metallici.

La foratura con gli aghi può venire praticata anche sulle anime nel caso il materiale non garantisca sufficiente permeabilità.

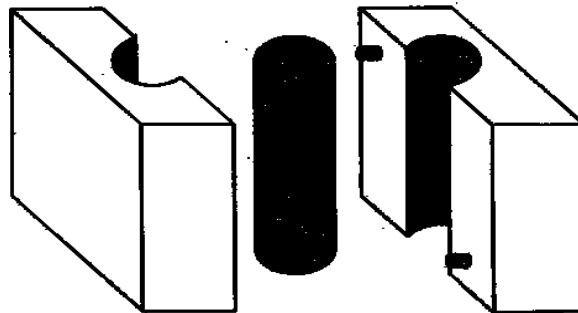


Figura 1.7 - Cassa d'anima

Possono venire preparate con diverse tecniche, una di queste prevede l'utilizzo della **cassa d'anima** che può essere vista come la forma dell'anima, due matrici che una volta accoppiate tramite spine e bloccate, riproducono la cavità corrispondente all'anima.

Versione più industrializzata, adatta per grandi serie è l'utilizzo della macchina a soffiare che spara sabbia silicea agglomerata, tramite aria compressa, in casse d'anima in metallo duro, in questo caso riempimento e serraggio avvengono in pochi istanti, l'anima viene poi appoggiata su una placca di sostegno ad essiccare, questo sistema permette di produrre con una sola macchina migliaia di anime al giorno.

### 1.1.5.2. Essiccazione della forma

Fase presente in caso di formatura a secco, in questo caso le forme e le anime prima di venire ricomposte vengono trasportate ed essiccate nelle **stufe**, un'eccezione sono le forme in fossa molto voluminose che vengono essiccate sul posto con stufe portatili.

Il tipo di stufa più comune è quello *a camera*, la permanenza delle forme va dalle 12 alle 16 ore (numero di ore che considera anche le tempistiche delle operazioni di carico e scarico), le staffe entrano nella camera grazie ad un trasporto a binario e carrello, il calore viene fornito da un focolare che può essere sia interno che esterno ed i vapori acquei provenienti dalle forme vengono allontanati grazie ad un camino.

Queste stufe hanno un funzionamento discontinuo in quanto una volta introdotto il carico da essiccare vengono chiuse le porte e viene acceso il fuoco per 6/10 ore dopo le quali viene fatto mancare il combustibile lasciando raffreddare le forme per altre 2/3 ore. L'essiccazione va condotta a temperature inferiori ai 300° oltre i quali si avrebbero dei ritiri della forma troppo marcati, distacco di parti di essa e la cottura dell'argilla presente nella sabbia, la quale non potrebbe più essere rigenerata.

Al fine di avere una maggiore efficienza energetica è bene che le stufe siano realizzate in materiali refrattari ed isolate sia la camera che la porta che sarà possibilmente con un meccanismo a saracinesca. Per le stufe di medie dimensioni si può considerare l'utilizzo di gru o argani per la movimentazione delle forme in quanto la movimentazione manuale col carro diventa gravosa. Nelle stufe piccole si utilizzano **combustibili** prevalentemente solidi come carboni e ligniti, in questo caso la stufa prevedrà una griglia, per stufe di dimensioni maggiori si utilizzano combustibili fluidi come la nafta ed il metano. Il consumo di combustibile varia molto in base al tipo di stufa, alla sua dimensione, al modo di caricarla, ai pesi delle staffe e della sabbia, dell'umidità ma mediamente, 1 m<sup>2</sup> di griglia brucia circa 70 kg di coke all'ora, se presente tiraggio forzato col ventilatore si arriva anche a 100kg.

Spesso è previsto un **sistema di ricircolo** dei prodotti di combustione, ciò crea una temperatura più uniforme nella camera e provoca una circolazione di aria che permette un'asportazione più veloce dell'umidità ma soprattutto permette di risparmiare dal 20 al 30% del combustibile ottenendo così dalla stufa un rendimento maggiore.

Per quanto riguarda le **stufe a camera per anime**, la struttura è simile ma spesso si trovano a cuocere anime in sabbia agglomerata, in questo caso l'obbiettivo non è quello di eliminare l'umidità ma di cuocere l'agglomerante, i ventilatori non sono necessari e le temperature si attestano tra i 100 ed i 240°C.

Le **stufe elettriche** vengono utilizzate nei contesti in cui si ha necessità di mantenere la temperatura intorno ad un valore e si cerca una precisione anche sui tempi, queste proprietà sono abilitate dalla presenza di termoregolatori ed interruttori orari.

Per produzioni in serie vengono anche utilizzate le **stufe continue** che consistono in camere con pareti metalliche isolate nelle quali le forme scorrono lentamente con sistemi a catena in caso di stufe verticali mentre le forme vengono trasportate da nastri in caso di stufe orizzontali.

In alcuni casi può essere sufficiente un'essiccazione superficiale che può essere ottenuta riducendo i tempi, facendo lambire le forme dalle fiamme o attraverso la flambatura, cioè l'utilizzo di un bruciatore direttamente sulla superficie della forma.

L'indurimento della forma può avvenire anche per via chimica come col passaggio di una corrente di CO<sub>2</sub> nelle forme in sabbia con silicato di sodio oppure con le **formature cold-box** in cui le resine polimerizzano

al passaggio di una corrente gassosa o ancora nel caso della **formatura hot-box** dove la sabbia contiene resine e catalizzatori che agiscono a caldo, questa viene sparata su un modello preriscaldato il cui calore fa agire i catalizzatori nella sabbia e polimerizzare le resine. Le possibilità di rigenerazione degli ultimi due metodi dipendono dal tipo di resina. Altro metodo è quello di includere nella sabbia una frazione di circa il 10% di cemento che con l'aggiunta di acqua farà partire il processo di presa che nei getti grandi ha durate di alcune ore.

Altri metodi sono lo **shell-molding** con cui si punta a creare solo uno strato di sabbia solida intorno al modello o i metodi di **formatura a perdere** che possono utilizzare polistirene espanso che si gassificherà durante la colata o la cera in caso di **microfusione**.

### 1.1.6. Formatura in Forma permanente

Non prevede un precedente modello, attraverso lavorazioni meccaniche di tornitura, foratura, fresatura etc. la forma viene ricavata in uno o più blocchi di metallo che costituiranno la conchiglia, generalmente sono in acciaio legato o ghise speciali, in alcuni casi si utilizzano anche materiali cementizi.

La **conchiglia** può durare anche centinaia se non migliaia di colate a seconda delle esigenze e della loro progettazione, necessitando solo di piccole riparazioni. I pezzi ottenuti in conchiglia godono di ottime precisioni e finiture ma il contro è il costo, di molto superiore alla formatura in sabbia in quanto la difficoltà di sformatura dei getti impone conchiglie scomponibili in più parti così come la difficoltà di lavorazione meccanica in getti (soprattutto per getti in ghisa che richiedono una ricottura per ottenere parametri di buona lavorabilità) che raggiungono durezza molto elevate.

Nell'ambito dei metalli a basso punto di fusione come l'alluminio viene utilizzata spesso la fusione in conchiglia sia a pressione che non; per le ghise c'è più difficoltà per via della temperatura di fusione più elevata, delle contrazioni e dilatazioni più imponenti.

Nella **macchina a conchiglia semplice** la conchiglia viene preparata alla colata riscaldandola in maniera uniforme a circa 350° C, le pareti interne vengono ricoperte con neri da fonderia quale può essere il nerofumo di acetilene che previene l'adesione del pezzo colato alla forma, la conchiglia viene poi chiusa, colata e riaperta con la rimozione del pezzo. Dato il progressivo aumento della temperatura dovuto alle colate successive la macchina prevede anche un ventilatore di raffreddamento.

Questo tipo di formatura è quindi particolarmente indicata per getti semplici, piccoli, in grande numero e per leghe a basso punto di fusione quali possono essere le leghe di rame, alluminio, zinco e piombo.

#### 1.1.6.1. Ricomposizione della forma

Completata la formatura, i modelli verranno scampanati per far distaccare la terra e rimossi i modelli dei canali di colata e delle materozze, aperte le due staffe ed estratto il modello. Viene a questo punto riparata la forma da eventuali imperfezioni che si sono create nella sformatura e viene quindi ricomposta posizionando l'eventuale anima e sovrapponendo le due staffe centrando le due staffe coi perni di riferimento.

A questo punto la forma è pronta per la fase di colata.

### 1.1.7. Fusione

Il materiale passa da stato solido a stato liquido portandolo a temperatura di fusione somministrando una specifica quantità di calore, diversa per ogni metallo, attraverso **forni fusori**. Una volta raggiunta la temperatura di fusione si dovrà somministrare una quantità di calore pari al *calore latente* di fusione per permettere la liquefazione di tutta la massa metallica, in questo frangente la temperatura non aumenta, dopodiché prima della colata il materiale viene surriscaldato, quindi portato ad una temperatura superiore a quella di fusione e tenuto in **forni di mantenimento** che sono prevalentemente elettrici. La quantità di calore per portare il metallo a temperatura è legata al *calore specifico* della lega, questo è la quantità di calore necessaria a far aumentare di 1°C 1 kg di metallo, il calore specifico nella realtà non è una costante ma varia a seconda della temperatura per cui in diversi range di temperature un metallo potrà presentare dei calori specifici diversi. Mediamente il calore specifico dell'alluminio allo stato solido è di 0,23 cal/kg mentre il calore latente di fusione è di 85 cal/kg.

I forni fusori possono essere distinti in forni a combustibile, convertitori e forni elettrici.

I **Forni a Combustibile** possono prevedere combustibile separato dal metallo o in caso di cubilotti i due elementi sono a contatto.

Nella scelta del combustibile si deve tenere conto della sua temperatura teorica di fiamma in quanto, questa dovrà essere alcune centinaia di gradi superiore alla temperatura di fusione del metallo da fondere per compensare le perdite di calore. L'ossigeno necessario per la combustione viene comunemente dall'aria che è spesso preriscaldata in maniera tale da poter raggiungere temperature più alte all'interno del forno, ad esempio il carbone senza preriscaldamento dell'aria brucia con una temperatura teorica di fiamma di 2.104°C, con un preriscaldamento dell'aria a 1.000°C la temperatura passa a 2.710°C.

Tra i forni a combustibile separato, il più semplice e tradizionale è quello a **crogiolo fisso** che utilizza come combustibili coke, nafta o gas, si utilizza nelle piccole fonderie per leghe non ferrose come l'alluminio. Guardando alla costruzione si trova un crogiolo in grafite lamellare poggiato su zoccoli in materiale refrattario circondato da coke che viene acceso e portato ad incandescenza con l'aria soffiata. Per l'alluminio vengono consumati circa 30-35 kg di coke ogni 100 kg di alluminio fuso.

I forni a crogiolo fisso hanno il difetto che il prelievamento del metallo fuso deve avvenire in piccole quantità con tazze oppure va estratto tutto il crogiolo ed inclinato per la colata, per questo motivo sono nati i **forni a crogiolo inclinabile** (idraulicamente o meccanicamente) e si è pensato di preriscaldare l'aria che viene insufflata a circa 400°C, in questo modo l'aria andrà a sottrarre meno calore dal combustibile che investe.

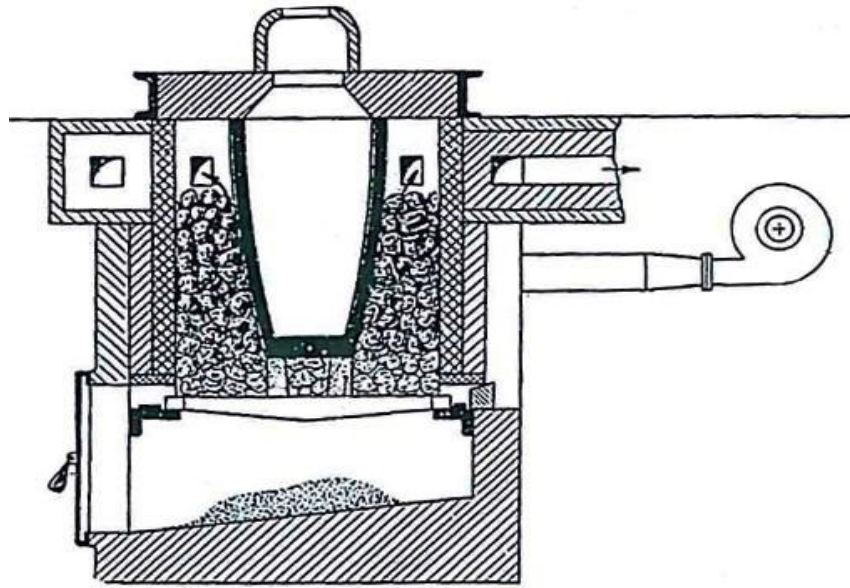


Figura 1.8 - Forno a crogiolo fisso a coke

I **cubilotti** vengono impiegati solamente per la seconda fusione (la prima è nell'altoforno) della ghisa, consistono in un forno che si sviluppa verticalmente le cui capacità sono inferiori a quelle di un altoforno e sono un esempio di forno con contatto tra metallo e combustibile che in questo caso sarà prevalentemente carbon coke. La superficie laterale interna del forno è cilindrica ed in materiale refrattario, allo scarico, nell'*avancrogiolo* vengono effettuate le correzioni chimiche che rendono una ghisa comune, speciale.

Esistono anche altre configurazioni quali i forni a riverbero e nello specifico il forno Siemens-Martin.

I **Forni Elettrici** hanno il vantaggio di essere facilmente regolabili, anche in maniera automatizzata, raggiungere temperature elevate e di non presentare il problema dei prodotti di combustione; possono essere classificati in forni elettrici ad arco, a resistenza e ad induzione.

Quelli **ad arco diretto** sono derivati del *forno di Héroult* ad elettrodi verticali che fu molto apprezzato per la sua semplicità sia costruttiva che nell'utilizzo, questo forno prevede un crogiolo rivestito di refrattario con capacità nell'ordine di alcune tonnellate, provvisto di due aperture, una per la carica ed un becco di colata per l'uscita, questo crogiolo viene ribaltato tramite un argano o con un'elettropompa.

Gli elettrodi arrivano fino a dentro il laboratorio, sono fabbricati a partire da coke, coke di petrolio, antracite calcinata o grafite naturale.

Devono resistere sia alle alte temperature che alla corrosione effettuata dalle scorie. Sono previsti anche dei bracci porta elettrodi, un trasformatore che riduce la tensione a 350, 220V o valori inferiori a seconda della fase della fusione. All'inizio si utilizzano valori maggiori per accelerare la fusione, nel momento in cui c'è bisogno di affinare si utilizzano voltaggi più bassi, l'ultima componente è il regolatore automatico il cui obiettivo è di mantenere costante la potenza assorbita.

I **forni elettrici a resistenza** possono essere a **resistenza non metallica** ed a resistenza metallica.

Nel primo caso i forni sono a tamburo con porta di carico e becco di colata, la corrente non sarà trifase come sopra ma monofase dai 25 ai 75V, la resistenza passa all'interno della camera ed è in grafite, si riscalda

a più di 2.000°C potendo portare temperature di 1.650°C nel laboratorio, l'elettrodo essendo soggetto ad usura viene sostituito periodicamente. Il sistema è rotante, ciò porta ad avere un rimescolamento del liquido ed una temperatura più uniforme, le capacità variano dai 50 ai 1.500 kg, le potenze dai 250 ai 500 kW.

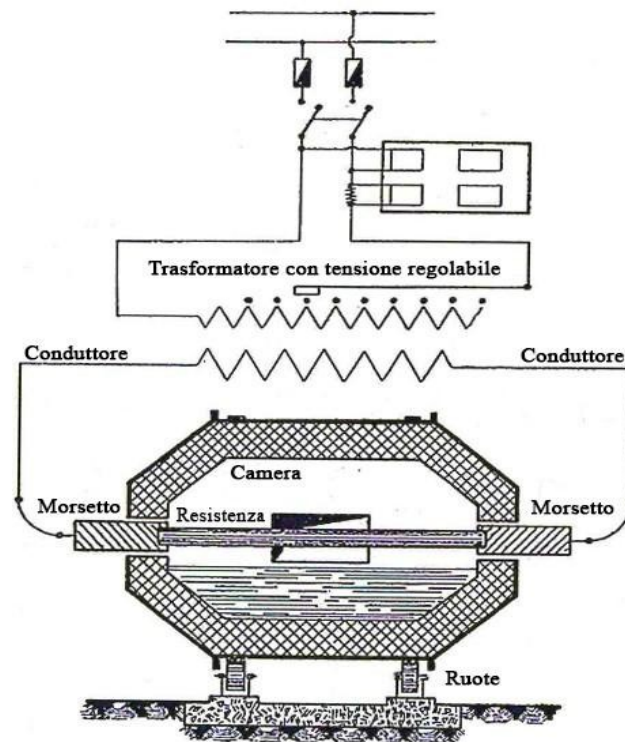


Figura 1.9 Forno elettrico a resistenza non metallica

Nel caso di **forni a resistenza metallica** il calore proviene dalla potenza dissipata nei fili per effetto Joule, questi fili vengono avvolti a formare una spirale intorno alla camera per avere la maggiore lunghezza nel più breve spazio possibile e sono formati in leghe di Nichel-Cromo (80-20) o con leghe che vedono come elementi anche Silicio, Alluminio o Cobalto.

Le temperature nella camera in questo caso possono arrivare ai 1.300°C, temperatura adatta per fondere metalli come Alluminio, Zinco e Magnesio.

Costruttivamente ci sono diverse soluzioni: a crogiolo fisso, oscillante o a riverbero. Questo tipo di forno è molto utilizzato nel caso di **forni di mantenimento** che hanno capacità maggiore rispetto al forno fusorio ma utilizzano potenze minori in quanto il loro obiettivo è di mantenere costante la temperatura prima della colata.

**I forni ad induzione** si dividono in forni a bassa frequenza con nucleo magnetico e forni ad alta frequenza senza nucleo magnetico.

I primi si dicono anche **forni ad induzione a frequenza industriale**, prevedono una camera che si allunga in un canale che gira intorno al nucleo magnetico circondato da una spirale che gli trasmette energia elettromagneticamente

$W = I^2 R = V^2/R$ , la corrente avrà frequenze di 42 o 50 Hz. All'atto della colata si lascia sempre un quantitativo di



metallo liquido residuo tale da avere la parte di laboratorio che si estende intorno al nucleo piena di metallo solido al nuovo avvio, in questa maniera si avrà una parte di metallo nelle vicinanze del sottocircuito e la fusione inizierà da lì potendosi poi propagare al metallo nella parte superiore della camera, i movimenti convettivi del metallo sono favoriti dall'azione elettromagnetica.

Questo tipo di forno è molto adatto per la fusione di Alluminio, Bronzo, Ottone ed in misura minore di alcune ghise.

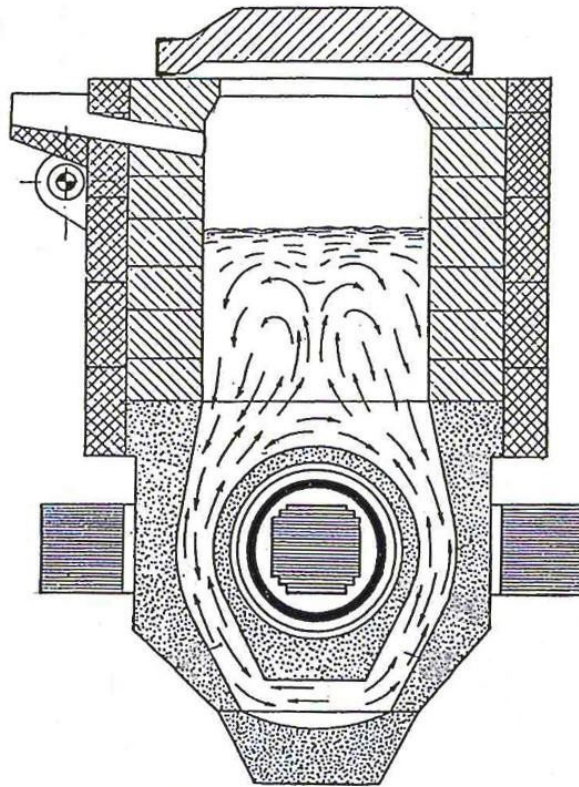


Figura 1.10 Forno a Induzione

I **forni ad induzione da alta frequenza** senza nucleo di basano sul principio che si possa indurre una corrente all'interno di corpi metallici sottoposti ad un campo magnetico in corrente alternata, questa corrente dissipandosi scaldere il metallo in maniera proporzionale all'intensità del campo ed alla sua frequenza che in questo caso varia dai 500 ai 3000 Hz.

Il campo elettromagnetico è generato da una spirale in rame attorno al crogiolo. Questa tipologia di forno presenta alcuni vantaggi come la bassa ossidazione del metallo, la mancanza degli elettrodi, semplicità di pulizia e manutenzione e basso consumo di energia elettrica. Non è adatto a metalli con buona conducibilità ovvero con bassa resistività come il rame e l'alluminio. [3]

I **convertitori** servono a trasformare la ghisa liquida in acciaio facendo gorgogliare aria sotto pressione nella massa liquida che reagendo col carbonio presente nel metallo ne porterà via una parte come monossido di carbonio CO, anche il silicio ed il manganese vedranno diminuite le loro percentuali in quanto si ossidano e formano scorie che verranno rimosse prima della colata.



Costruttivamente il convertitore prevede un involucro di lamiera rivestito di mattoni refrattari, sul fondo prevede degli ugelli inclinati attraverso i quali può entrare l'aria in pressione, il contenitore è ruotabile intorno a due perni ed ha una capacità di alcune tonnellate [4]

### 1.1.8. Colata

Una volta che la forma è stata ricomposta e chiusa si può colare il metallo fuso attraverso un opportuno **sistema di colata**, questo è l'insieme delle canalizzazioni che permettono al metallo liquido di riempire la forma.

Ci sono alcuni principi che vanno seguiti come il ricercare il riempimento della forma il più velocemente possibile ma evitando turbolenze che creerebbero erosioni, spruzzi e la creazione di bolle d'aria, utilizzare filtri e labirinti per tenere lontane le scorie dal getto, ricercare un gradiente termico che porterà ad una solidificazione direzionale.

Gli elementi principali di un sistema di colata sono rappresentati nell'immagine in basso e sono:

- **Bacino di colata** che è il primo spazio che trova la colata, serve a regolare la velocità con cui arriva il metallo liquido nella forma e se dotato di filtri trattiene le scorie.
- **Filtri** presenti all'uscita del bacino, in ceramica o altro materiale refrattario, hanno la funzione di ridurre possibili moti turbolenti, la creazione di gocce fredde e di trattenere le scorie.
- **Canale di colata** che porta il materiale dal bacino esterno al piano mediano della forma
- **Piede di colata** evita che il materiale abbia un ingresso turbolento nella forma.
- **Canale Distributore** porta il materiale agli ingressi del getto, spesso prevede trappole ferma scorie.
- **Attacchi di colata** ricevono il metallo fuso dal canale distributore e lo portano nel getto.

I sistemi di colata possono essere *pressurizzati* o *non pressurizzati*, anche detti *convergenti* e *divergenti*; nel primo caso c'è un progressivo restringimento delle sezioni di passaggio del metallo liquido, questo sistema evita che il liquido si distacchi dalle pareti col rischio di inglobare aria, la sezione minore sarà quella di attacco; nel secondo caso le velocità di efflusso saranno basse avendo così minori turbolenze ed un moto del fluido prevalentemente laminare, viene spesso utilizzato per materiali che si ossidano facilmente o che hanno problemi di grande formazione di scorie, in questo caso la sezione minore sarà quella iniziale del canale di colata.

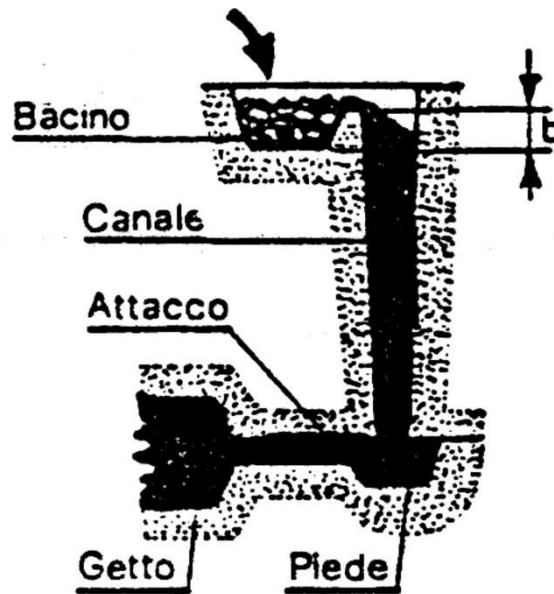


Figura 1.11 - Terminologia Canale di Colata

Il tempo di riempimento dev'essere minore del tempo che intercorre tra l'inizio della colata e quello della solidificazione così come dev'essere minore del tempo massimo a cui resiste la terra a quella determinata temperatura senza collassare.

I sistemi di colata differiscono in base alla modalità con cui il metallo viene versato nella forma, i principali sistemi di colata sono: dall'alto, dal basso, centrifuga, laterale.

Nel caso di **colata in sorgente** sarà fatto in modo che il flusso di metallo arrivi dal basso, ciò consente di avere turbolenze ridotte date le basse velocità, è un sistema che fa evacuare bene l'aria ma per contro presenta molti sfridi.

La **colata laterale** si utilizza per pezzi alti colando il metallo con diversi imbocchi posti a diverse altezze, porta lo svantaggio di avere distribuzioni di temperature non simmetriche.

La **colata dall'alto** porta ad avere una solidificazione direzionale ma presenta il rischio di turbolenze, spruzzi e gocce fredde.

Con la **colata centrifuga** il getto viene formato mettendo in rotazione il metallo fuso in una conchiglia tubolare, porta densità uniformi, omogeneità a livello di strutture, bassa porosità ed ottime caratteristiche meccaniche, è perciò molto usata per la formatura di getti tubolari o anulari, si utilizza anche per la realizzazione di getti con due strati di materiale diverso come nel caso dei tubi rivestiti in acciaio inossidabile.

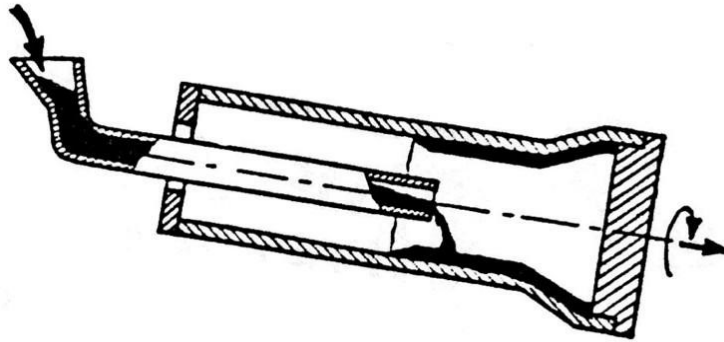


Figura 1.12 – Colata centrifuga

Il metodo più utilizzato per la colata in conchiglia è quello della colata in pressione, nel caso di leghe di *Zamak*, ossia di leghe a base di Zinco (Z), Alluminio (A), Magnesio (Ma) e Rame (K), che hanno problemi di ossidazione si parla di **inietto-fusione** a camera calda; per le altre leghe come l'alluminio si parla di **pressofusione** a camera fredda.

Questi metodi sono particolarmente adatti per la realizzazione di pezzi che richiedono buone tolleranze, se si ricerca un alto ritmo di produzione, se si vogliono realizzare oggetti medio-piccoli, complessi o con pareti sottili. Le **macchine a camera calda** sono quelle che prevedono un forno fusorio integrato nella macchina, consentono di avere produttività fino ai 1000 pz/h in caso di pezzi piccoli, le principali tecnologie sono quella a camera oscillante e quella a pistone tuffante.

Le **macchine a camera fredda** hanno il forno fusorio separato dalla macchina, la produttività arriva ai 200 pz/h, quindi minore della tipologia precedente, viene utilizzata per metalli con punti di fusione tra i 640 ed i 980°C quali leghe di alluminio e rame. La camera di compressione viene riempita con metallo fuso da un forno esterno, questo metallo viene spinto da un pistone nella camera di compressione, raggiunta la pressione adatta si solleva un contropistone ed il materiale viene iniettato nella conchiglia.

### 1.1.9. Solidificazione e raffreddamento

Dopo la colata il getto deve essere lasciato solidificare e raffreddare nella forma.

Il tempo necessario per questa operazione può andare da pochi istanti per i pezzi più piccoli fatti in conchiglia ad alcuni minuti per i pezzi medi colati in sabbia ad alcuni giorni per i pezzi più massicci.

La solidificazione, nel caso sia *esogena*, ha inizio dalle zone più fredde che sono le pareti della forma o della conchiglia ed a mano a mano si espande verso l'interno della massa con un fronte che a seconda del metallo può essere liscio o frastagliato.

Se la solidificazione avviene per grani si parla di solidificazione *endogena*, a seconda del metallo i grani possono avere una distribuzione uniforme o essere più addensati verso le pareti. Il sistema di alimentazione viene scelto in base al tipo di solidificazione.

Ogni materiale subisce una contrazione del volume in seguito a raffreddamento per cui c'è bisogno di compensare la mancanza di materiale che si verificherà, nel caso il ritiro del materiale avvenga durante la solidificazione ci compensa con le **materozze**, serbatoi di materiale fuso extra posto in previsione del ritiro del materiale all'interno della forma, le materozze hanno anche una seconda funzione: di spostare il baricentro termico (punto a temperatura maggiore e che quindi solidifica per ultimo) dall'interno della forma

all'interno della materozza in maniera che si abbia più a lungo materiale fuso in questa zona e poter continuare ad alimentare le zone soggette a ritiri.

La presenza di spigoli vivi o parti del getto con spessori molto diversi tra loro può dar luogo a sollecitazioni tra punti adiacenti e portare alla formazione di cricche a caldo durante la solidificazione, se c'è ancora alimentazione queste potrebbero anche essere sanate da nuovo metallo fuso, prevedere ampi raccordi è una soluzione migliore a questo problema.

#### 1.1.10. Distaffatura

Una volta solidificato e raffreddato, il pezzo viene tolto dalla conchiglia o dalla staffa, nel primo caso la conchiglia viene semplicemente aperta avendo parti montate a cerniera e pensate per essere facilmente apribili in maniera meccanica; nel secondo caso invece la sabbia va demolita con scalpelli o scuotitori meccanici.

La prima operazione da compiere è la **smaterozzatura** che consiste nella rimozione del canale di colata, si fa principalmente in maniera manuale ed in base al getto si possono usare attrezzi quali un martello, martello pneumatico, sega circolare, un cannello ossiacetilenico o un arco voltaico.

#### 1.1.11. Finitura

Il getto estratto dalla forma è generalmente grezzo, con croste di sabbia, bave in corrispondenza dei piani di separazione delle staffe o delle conchiglie. Queste imperfezioni vanno eliminate così come vanno rimossi i colatoi, i montanti, le materozze e vanno fatte una sabbiatura ed una pulizia del getto.

Una volta estratto dalla forma, il getto può avere ancora della terra attaccata e perciò potrebbe essere necessaria un'operazione di **sterratura** con spazzole o martelli pneumatici per i getti piccoli, o tramite *burattatura* con frammenti di ghisa per i getti di grandi dimensioni [X].

La burattatura può essere utile anche per le operazioni di **sbavatura** che consistono nell'eliminare le bave che si creano sul piano di separazione della forma o nei pressi delle portate d'anima; un'alternativa manuale alla burattatura può essere quella di utilizzare mole portatili o scalpelli.

Importante operazione di finitura è la **sabbiatura** che si pone come obiettivo la rimozione degli ultimi granelli di sabbia rimasti sul getto insieme all'eliminazione di possibili ossidazioni della superficie, la sabbiatrice lavora lanciando graniglia sul pezzo sfruttando la forza centrifuga.

#### 1.1.12. Trattamenti termici

A volte il prodotto non è commercializzabile già a valle della finitura ma richiede dei trattamenti termici per raggiungere specifiche caratteristiche meccaniche, i più utilizzati nel caso di pezzi in alluminio sono la tempra di soluzione, l'invecchiamento e la stabilizzazione.

##### 1.1.12.1. Tempra di soluzione

Il nome viene dal diverso obiettivo rispetto alla tempra di indurimento degli acciai, in questo caso l'obiettivo è quello di ottenere delle leghe d'alluminio soprassature in quanto se la lega di alluminio

solidifica lentamente, i soluti tenderanno a precipitare impoverendo la soluzione, nel caso a lato, da rame ma se getto viene portato alla temperatura di solubilizzazione (senza arrivare alla fusione) e poi avviene un raffreddamento rapido, la separazione dei soluti viene impedita ottenendo così una soluzione soprassatura ed instabile; per i getti in lega d'alluminio si preferisce temprare con acqua a 60-100°C per evitare distorsioni e rotture

### 1.1.12.2. Invecchiamento

Alcune leghe d'alluminio presentano una velocità di precipitazione molto bassa e quindi la fuoriuscita del soluto dalla soluzione avviene con molta più lentezza, questo processo di precipitazione favorisce proprietà meccaniche quali la durezza e la resistenza meccanica, nel caso in cui si voglia velocizzare questo processo si ricorre ad **invecchiamento artificiale** riscaldando i pezzi ad una temperatura di circa 150° C per 12h.

### 1.1.12.3. Stabilizzazione

Permette di eliminare le tensioni residue e favorire la stabilizzazione dimensionale, le variazioni dimensionali possono verificarsi quando, in pezzi sottoposti a cicli termici, la dilatazione subita nel riscaldamento non viene totalmente recuperata una volta ricondotto il pezzo a temperatura ambiente. Rispetto all'invecchiamento artificiale le temperature sono più alte ed i tempi più lunghi. [6] Oltre che dei trattamenti termici il pezzo può necessitare anche di essere rivestito con particolari sostanze protettive con operazioni di smaltatura dei getti per l'industria chimica e la zincatura.

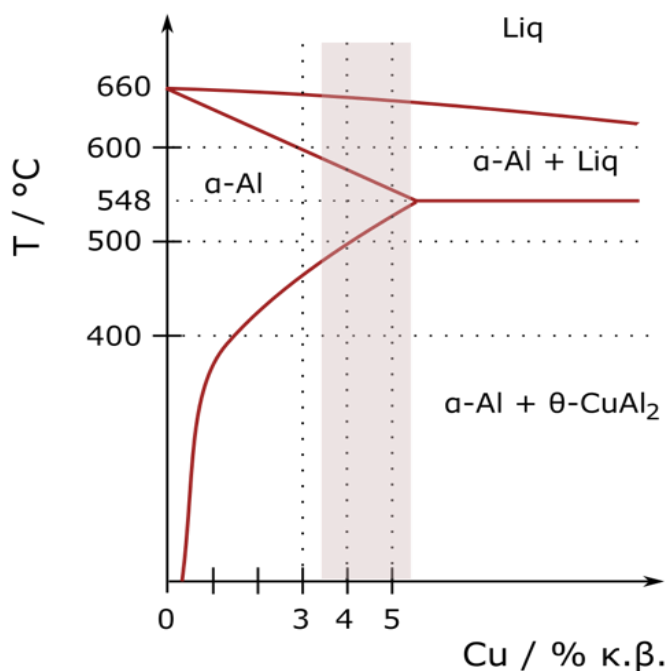


Figura 1.13 - Grafico Tempra di soluzione Alluminio

### 1.1.13. Lavorazioni meccaniche

La fase finale passa spesso dall'officina meccanica per lavorazioni alle macchine utensili che hanno lo scopo di ridurre i getti a quote esatte nei punti principali per consentire dei corretti accoppiamenti, queste

operazioni sono le classiche lavorazioni per asportazione di truciolo quali tornitura, fresatura, molatura, foratura etc.

#### 1.1.14. Controllo Qualità

Il controllo qualità ha l'obiettivo di verificare, attraverso diverse tecniche, che nel pezzo non ci siano difetti creatisi durante il processo.

Questi possono essere causati da un materiale sbagliato utilizzato per la fonditura, applicazione sbagliata delle pratiche di formatura o per errore del lavoratore o ancora per ordini imprecisi che gli vengono impartiti, l'utilizzo di strumenti inadatti.

A seconda del difetto, questi possono essere irrecuperabili e quindi tutto il pezzo è da rifondere, recuperabili ma l'intervento non varrebbe la pena a livello economico oppure recuperabili con profitto.

##### *1.1.14.1. Difetti*

Il primo difetto può essere quello della presenza di **bave** non eliminate precedentemente, possono essere causate da giochi nella forma o da una spinta metallostatica maggiore di quella teorizzata in progettazione, possono esserci anche dei **distacchi di sabbia** come difetto a causa di parti non raccordate, scarsa coesione o scarsa permeabilità della sabbia. Se i gas non riescono a sfiatare bene a causa di una bassa permeabilità della sabbia, compressione eccessiva, grana troppo fine o troppa umidità c'è il rischio che si creino **soffiature interne**, chiaramente riconoscibili in superficie perché si presentano in cluster di forellini da massimo 3 mm di diametro.

Può succedere che tra pezzi contigui caratterizzati da comportamenti diversi in raffreddamento si creino delle tensioni di trazione che portano a delle **fratture a freddo**, raggi di raccordo mal progettati tra zone a spessori diversi possono portare a **cricche**, lasciandosi dietro i pori nel getto.

Tra i difetti delle superfici può verificarsi che queste si presentino a **buccia d'arancia** a causa di terre mal rigenerate o di reazioni che ci sono state con gli additivi. Può verificarsi una **porosità** del getto se c'è una produzione di gas dalla forma ed assorbimento nel getto al momento della colata, questi gas vengono rilasciati poi durante la fase di raffreddamento

In caso di cattiva progettazione si possono ottenere anche dei pezzi incompleti a causa di temperature non abbastanza alte, spessori non uniformi per uno sbagliato concepimento del sistema di colata; un'alta pressione metallostatica può portare ad un'espansione della forma risultando così in un getto di dimensioni maggiori di quelle previste, il fenomeno può essere anche causato da una cattiva compressione della sabbia. [7] Ultima tipologia di difetto sono le **inclusioni** che possono essere di scorie se queste non vengono ben filtrate durante la colata, di parti di sabbia che si sono distaccate dalla forma o di gocce fredde non amalgamate col resto della fusione.

##### *1.1.14.2. Tecniche di controllo*

Ci sono casi in cui la precisione dimensionale è fondamentale ai fini degli accoppiamenti e quindi una delle prime cose che vanno fatte è l'**ispezione dimensionale**, questa può venire effettuata tramite metodi diversi

a partire dall'utilizzo di strumenti tradizionali come righelli, calibri, comparatori o attraverso tecniche come l'utilizzo degli ultrasuoni per misurare gli spessori o strumenti per misurare dimensioni relative quali distanze da centro a centro o angoli rispetto ad una superficie. Queste misurazioni possono essere eseguite in maniera semi-automatica tramite una macchina a controllo numerico multi-assiale che è la *macchina di misura a coordinate* (CMM) che prevede una sonda a contatto che misura i punti lungo le superfici della parte di oggetto da misurare con una sensibilità che va dal millesimo di millimetro a 0,05mm, queste misurazioni verranno poi confrontate con i disegni. Oltre alle dimensioni macroscopiche va valutata anche la *rugosità* ma spesso nei prodotti di fonderia non è necessario valutarla con precisione ma basta una comparazione visiva con gli standard utilizzando anche lenti d'ingrandimento.

Per fare degli esami tesi ad individuare difetti interni e che quindi non possono essere rilevati visivamente si ricerca sempre l'utilizzo di tecniche non distruttive, queste tecniche possono aiutare sia a rilevare la presenza del difetto che a localizzarlo all'interno del getto.

Il primo test è il **test stetoscopico** che punta ad individuare eventuali rotture interne attraverso la percussione del getto con un martello, la parte viene sospesa con catene o altre attrezzature che le permettano di oscillare liberamente. Ci si aspetta una certa frequenza nel suono di ritorno che darebbe la sicurezza di non avere grosse discontinuità interne, il tono cambia nel caso queste siano presenti.

Per componenti destinate a lavorare a pressione, si utilizzano fluidi come acqua, aria o vapore per individuare eventuali perdite, la pressione a cui verranno portati i fluidi per il test sarà di 1,5÷2 volte quella di esercizio. Tra i fluidi si tende a preferire l'acqua per questo tipo di test in quanto, oltre all'essere economica, essendo all'incirca incomprimibile questa causa danni minori in caso di cedimento della parte testata.

Sfruttando la **radiografia** possono essere individuati i vuoti all'interno del getto, il tipo di onda utilizzata è quella a raggi x in quanto hanno proprietà simili a quelle della luce visibile ma lunghezze d'onda minori e possono impressionare un film fotosensibile per ottenere delle immagini. Il principio generale per la scelta della lunghezza d'onda è che questa diminuisca al crescere della densità del materiale in cui le onde devono penetrare ed è regolabile in base alla tensione tra i poli del tubo utilizzato. In corrispondenza di vuoti, i raggi troveranno meno resistenza alla penetrazione e sul film fotografico posto dal lato opposto rispetto alla fonte delle onde si formeranno dei segni in corrispondenza delle vacanze.

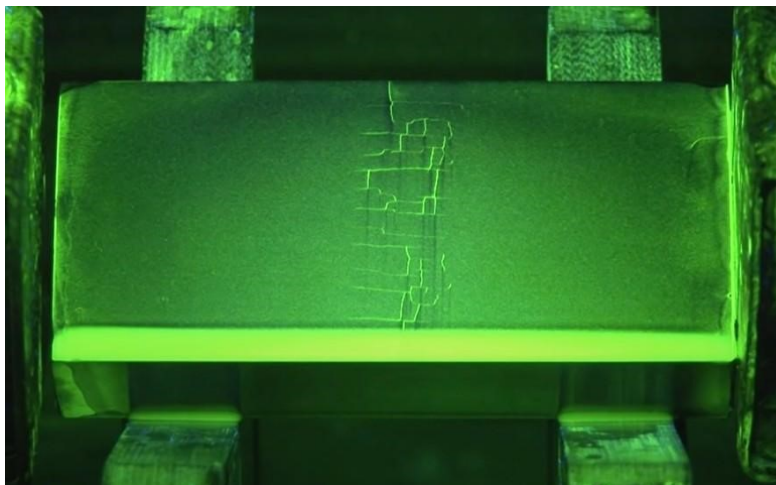


Figura 1.14 - Test radiografico



L'**esame a particelle magnetiche** serve a rivelare la posizione delle cricche vicine alla superficie di getti in materiali ferromagnetici come ferro e acciaio. La parte viene magnetizzata facendola attraversare da una corrente, ponendola in una bobina in corrente diretta o ponendola tra due poli magnetici. In secondo luogo, viene cosparsa con una sospensione contenente particelle magnetiche, accendendo un campo magnetico le particelle di ferro si allineeranno in direzione delle linee di forza; in caso di getto senza difetti la polvere si disporrà in maniera uniforme, in caso contrario, questa tenderà a girare intorno alle discontinuità ed avere una concentrazione nelle estremità del difetto portando a conformazioni visibili già ad occhio nudo ma evidenziabili ancora di più al buio con la luce ultravioletta. Studiando la disposizione della polvere si riesce a risalire anche alla profondità del difetto. Simile alla tecnica a raggi X, c'è il **test ad ultrasuoni**, questi vengono utilizzati per rilevare vuoti interni o altri difetti. In assenza di difetti e con un volume omogeneo, l'onda attraversa tutto il getto ed avrà un determinato tempo di ritorno, se incontra un difetto, questo la riflette e quindi avrà un tempo di ritorno minore. Questi tempi possono essere rilevati da un oscillografo e plottati. Questo metodo ha diversi vantaggi: è conservativo, può localizzare il difetto con precisione e può anche misurarlo; per dare un'idea, con questo metodo si riescono a rilevare bolle d'aria con diametri intorno al centesimo di millimetro.

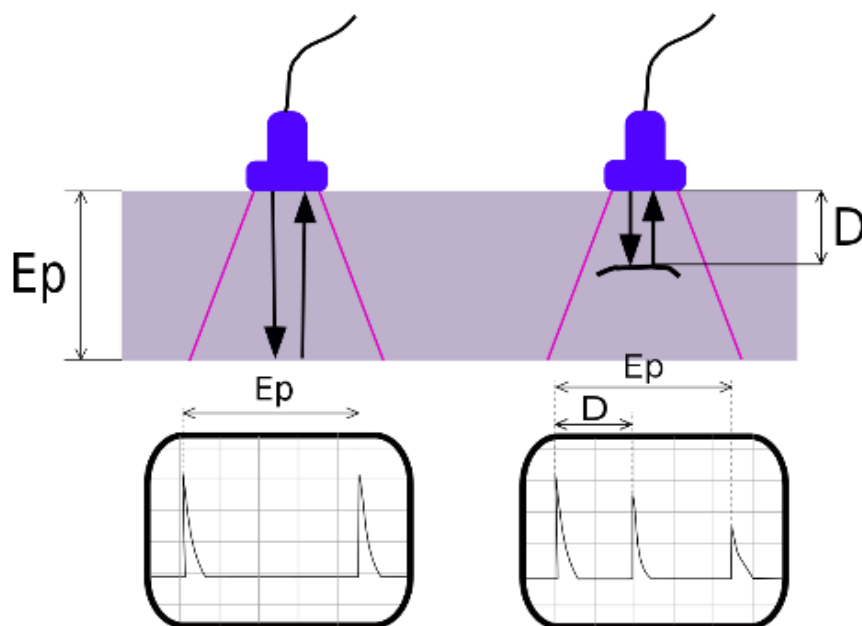


Figura 1.15 - Test ad ultrasuoni

## 1.2. Analisi Energetica

Analizzato il processo generale di fonderia, si pone ora l'attenzione sull'analisi della domanda energetica nell'ambito delle fonderie di alluminio italiane.

Lo studio verrà condotto attraverso l'analisi della richiesta dei singoli vettori e sarà poi osservata la richiesta di essi per singolo reparto e singola fase, in questo contesto le principali fonti energetiche sono l'energia elettrica, il gas naturale ed il gasolio, l'origine dei dati sono 35 diagnosi energetiche, rese anonime, fornite da ENEA.

Una **diagnosi energetica, anche detta audit energetico**, consente di individuare cause di inefficienze energetiche, stabilire tipologie di intervento, investimento necessario ed eventuali tempi di ritorno. Secondo la definizione tratta dal Decreto Legislativo 115/08 questa è una procedura sistematica volta a:

- fornire un'adeguata conoscenza del profilo di consumo energetico di un edificio o gruppo di edifici di una attività e/o impianto industriale o di servizi pubblici o privati.
- individuare e quantificare le opportunità di risparmio energetico sotto il profilo costi-benefici.
- riferire in merito ai risultati.

La redazione di un audit energetico porta dei vantaggi:

- Razionalizzazione dei flussi energetici.
- Recupero delle energie disperse (es: recupero di calore).
- Individuazione di tecnologie per il risparmio di energia.
- Maggiore efficienza energetica del sistema.
- Autoproduzione di parte dell'energia consumata.
- Ottimizzazione dei contratti di fornitura energetica.
- Riduzione dei costi per gli approvvigionamenti di energia elettrica e gas.
- Riqualificazione del sistema energetico.

Il processo di fonderia è particolarmente energivoro in quanto si basa sul portare i metalli ad altissime temperature e mantenerli fusi fin quando non è prevista la solidificazione, nel caso dell'alluminio, questo va portato e mantenuto a più di 660° C, proprio per la sua richiesta di energia, da D.Lgs. 102/14 nasce l'obbligo di redazione dell'audit energetico. Dall'analisi svolta risulta una domanda complessiva media di **0,55 tep per tonnellata di prodotti finiti in alluminio**, dati i quantitativi richiesti, l'approvvigionamento energetico rappresenta quindi per questo tipo di industria una voce di costo non trascurabile, diventa perciò importante cercare di comprendere al meglio la domanda energetica dei diversi vettori utilizzati all'interno dell'azienda e la distribuzione lungo il processo di questa domanda.

Di seguito il diagramma fase – vettore generico delle fonderie analizzate, rappresenta la struttura energetica dei siti illustrando qualitativamente i bisogni energetici ogni reparto ed ogni fase. Nei prossimi paragrafi si andrà nel dettaglio dell'analisi di questa distribuzione.

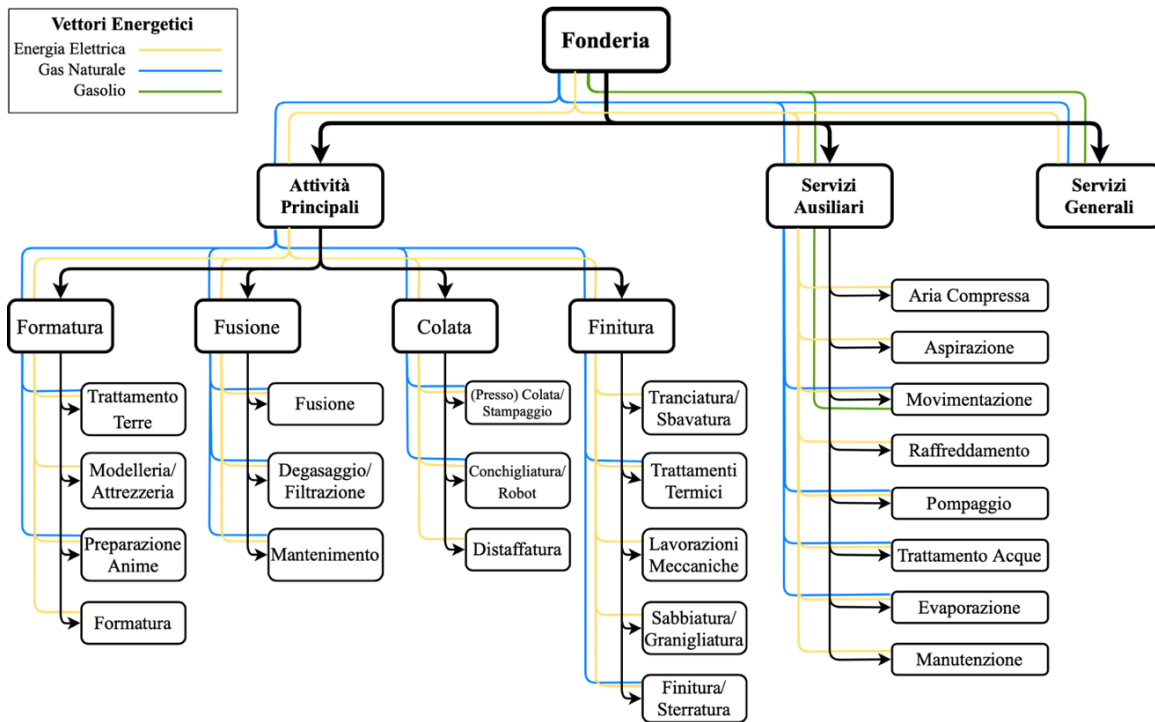
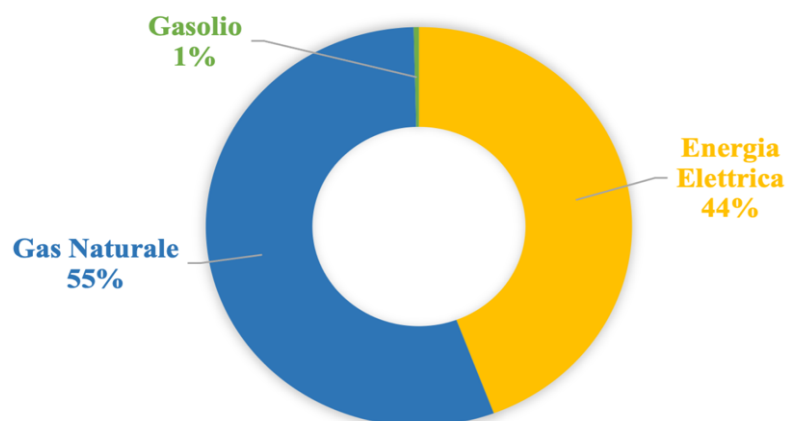


Figura 1.16 - Diagramma Fasi e Vettori

### 1.2.1. Analisi per vettore

Dall'analisi ed elaborazione dei dati anonimi forniti dalle associazioni di categoria si è evidenziato che i principali vettori utilizzati all'interno dell'industria delle fonderie di alluminio siano, in ordine di consumi, gas naturale, energia elettrica ed in misura minore gasolio nelle proporzioni riportate nel grafico che segue.

## DISTRIBUZIONE VETTORI



Valori pesati sulle ton di Al trattate

Figura 1.17 - Richiesta Vettori

Guardando al diagramma fase-vettore della pagina precedente si nota come l'energia elettrica sia il vettore che ha un utilizzo più capillare in quanto necessaria per ogni reparto ed ogni fase del processo, escludendo la fase di fusione, può essere considerato il vettore primario della fonderia.

Il gas naturale, come evidente dal grafico di Figura 1.17, col 55% delle tep totali è preponderante nei consumi in quanto principale vettore della fase più energivora del processo: la fusione. Si è riscontrato infatti che la maggioranza delle aziende non utilizzano forni a resistenza o a induzione ma scelgono forni alimentati con gas naturale. Inoltre, guardando alla Figura 1.16, si nota che la fusione non è l'unica utenza del gas naturale ma questo viene utilizzato, sia pur in proporzioni minori, anche in molte altre fasi del processo.

Il gasolio ha una domanda marginale rispetto ai due vettori precedenti in quanto il suo utilizzo risiede soprattutto nell'autotrazione e in alcuni servizi generali.

Il seguente diagramma fase-vettore riprende e rielabora quello visto nell'introduzione del capitolo, illustrando la suddivisione delle attività che verrà utilizzata nel proseguire dell'analisi ed evidenziando vettori energetici che alimentano ogni macrofase. Il diagramma viene arricchito con le percentuali relative di domanda di ogni fonte di energia in maniera da avere un primo sguardo complessivo sulla distribuzione.

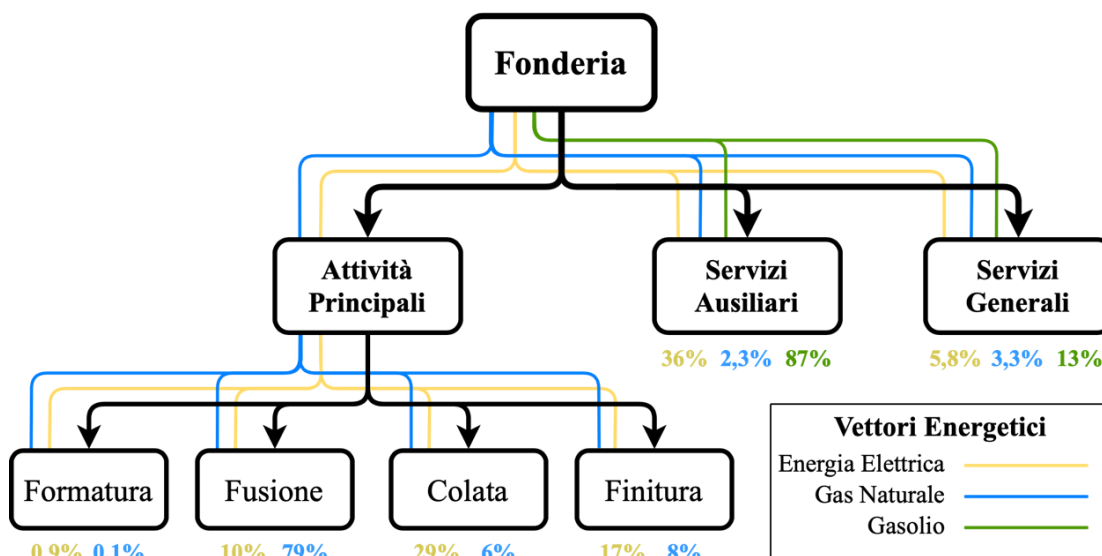


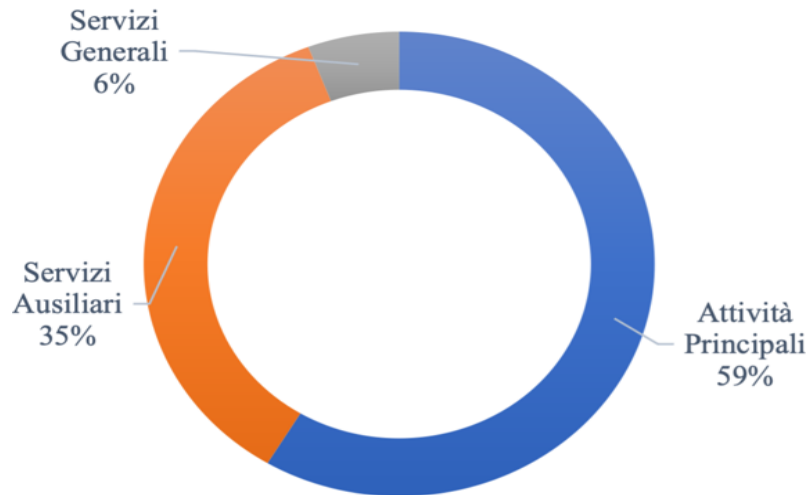
Figura 1.18 - Diagramma Fasi - Vettori Reparti

### 1.2.2. Energia Elettrica

Dai grafici delle figure successive si nota come l'energia elettrica misurata in kWh, (di qui in poi abbreviata con EE) sia forse il vettore più difficile da gestire a causa del numero di utenze servite e delle conseguenti possibili inefficienze, è perciò importante farne uno studio accurato.

Dalla figura 1.19 si nota come i principali utilizzatori dell'EE siano le attività principali che ne richiedono il 59%, seguiti dai servizi ausiliari al 35% ed i servizi generali al 6%.

## Energia Elettrica



Valori pesati sulle ton di Al trattate

Figura 1.19 - Distribuzione Macro EE

Si vede ora come sia distribuita questa EE tra i reparti produttivi considerando i soli centri di costo principali, si evidenzia che il reparto più dispendioso sia quello relativo alla colata, spesso effettuata per pressofusione, questo reparto include i consumi della colata, di eventuali robot e conchigliatrici e la fase di distaffatura. La fusione risulta indietro perché sfrutta l'energia elettrica soprattutto per i forni di mantenimento e poco per quelli di fusione. Da segnalare anche il contributo del reparto finitura col 17% dei consumi di EE.

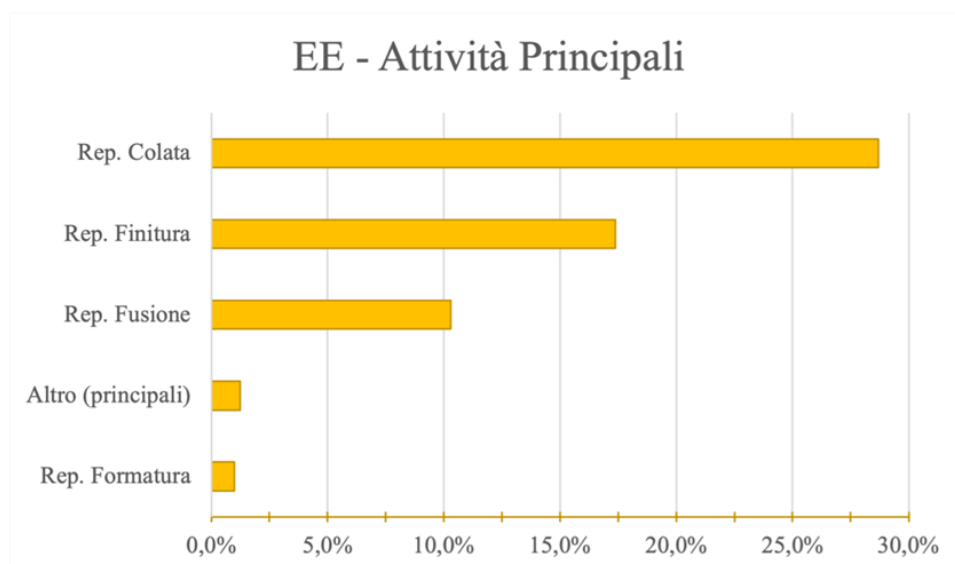


Figura 1.20 – EE Attività principali

La Figura 1.21 espone la percentuale del 35% di EE assorbita dai servizi ausiliari evidenziata dal grafico in Figura 1.19 mettendo in luce un'importanza della domanda di EE da parte dei servizi di aria compressa e di

aspirazione rispettivamente al 13,2% ed al 10,6% del fabbisogno complessivo di EE, rilevante è anche il consumo del raffreddamento del 4,4%.

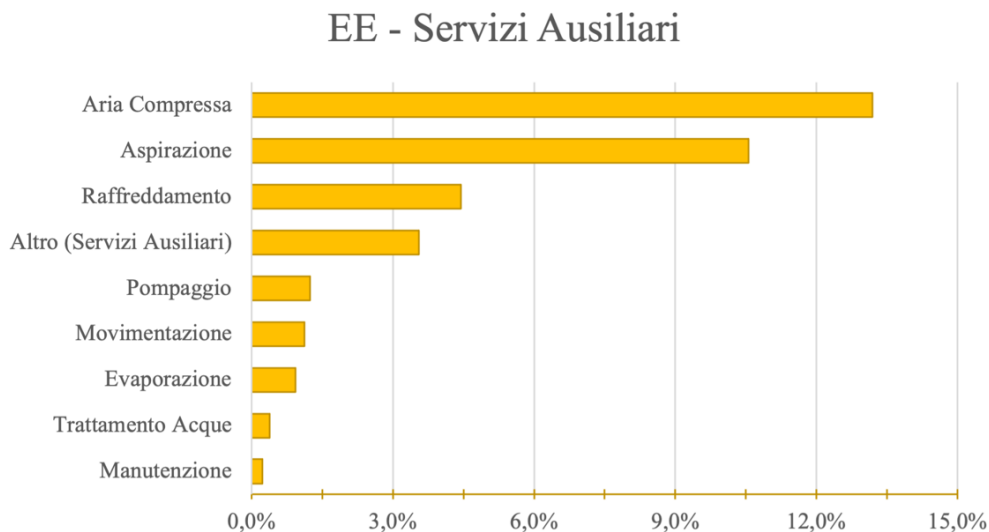
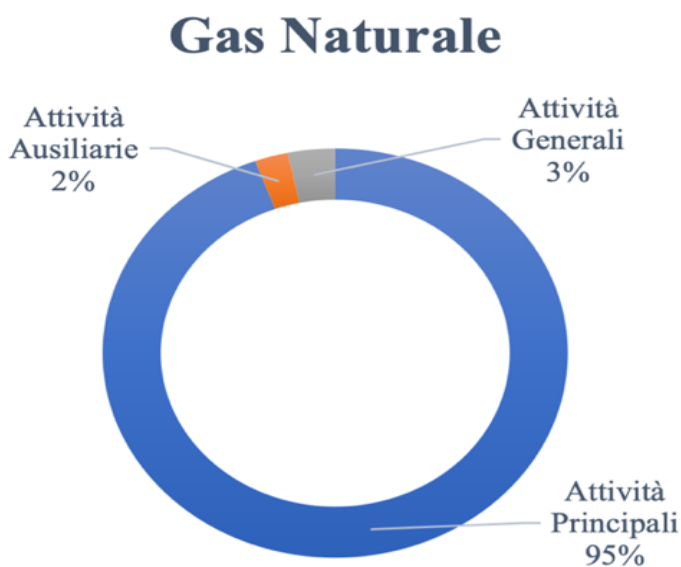


Figura 1.21 - EE - Servizi Ausiliari

### 1.2.3. Gas Naturale



Valori pesati sulle ton di Al trattate

Figura 1.22 Distribuzione Macro GN

Come visto sopra, il gas naturale (da qui in poi abbreviato con GN) è la fonte energetica principale per la fonderia, dai due grafici emerge chiaramente che la domanda sia catalizzata dalle attività principali, più precisamente dal reparto fusione che da solo vale il 79% della domanda ed ancora più nello specifico, i soli forni da fusione concentrano il 76% della domanda di gas naturale dell'intera fonderia. Viene misurato in metri cubi standard cioè la quantità di gas contenuta in 1 m<sup>3</sup> a 15° C e 1 atm, gli smc si utilizzano per rendere indipendente la misurazione dei consumi dalle condizioni ambientali.

### GN - Attività Principali

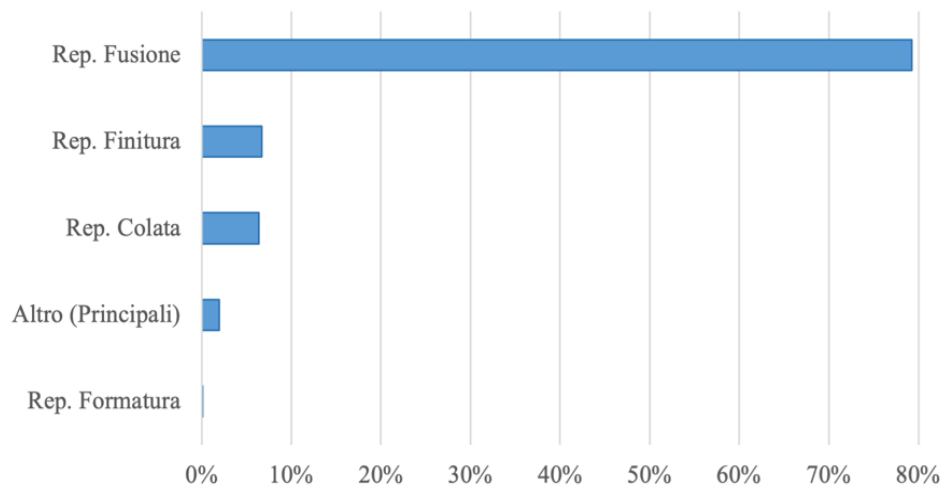


Figura 1.23 - GN - Attività Principali

#### 1.2.4. Gasolio

Misurato in litri, il gasolio è il terzo vettore per ordine d'importanza e rappresenta solamente l'1% del consumo energetico totale, la quasi totalità di questo consumo è dovuto a trasporti per esterni ed autotrazione, ad esempio per auto aziendali. Sul gasolio si evidenzia una differenza tra le medie aritmetiche rilevate tra le diverse aziende confrontate e le medie pesate rispetto alle tonnellate di Alluminio prodotte, nello specifico risultano più rilevanti i contributi dei servizi generali ed ausiliari.

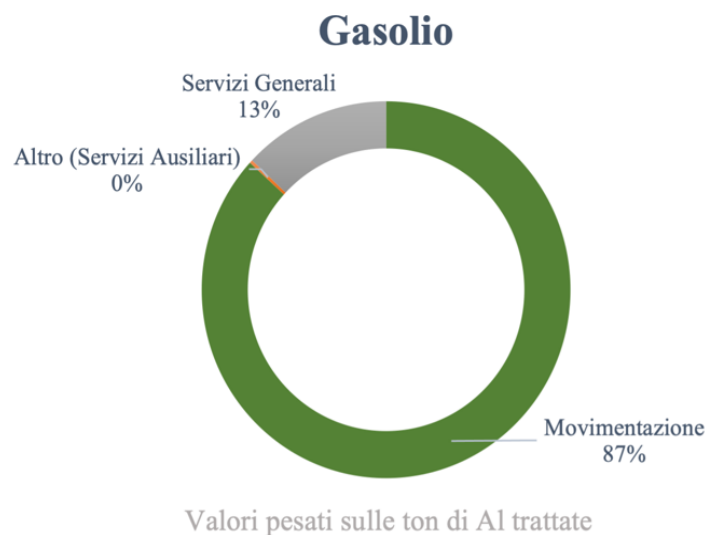


Figura 1.24- Distribuzione Macro Gasolio



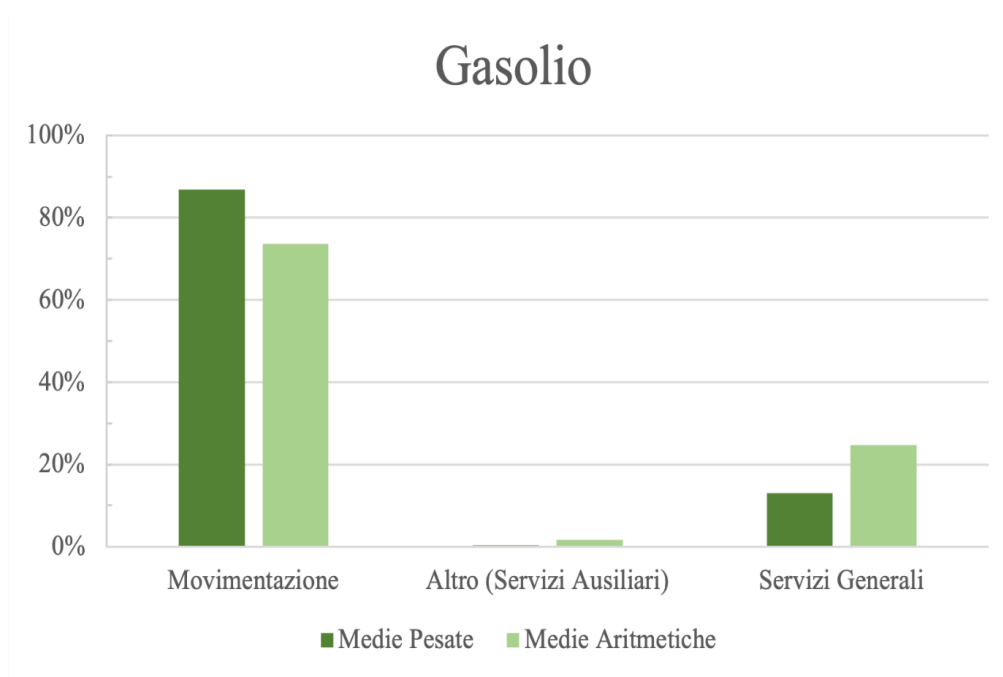


Figura 1.25 -Confronto domande gasolio medie pesate vs medie aritmetiche

#### 1.2.5. Analisi per fasi

Svolta una prima panoramica sulla la domanda dei singoli vettori si passa ora allo studio dei consumi energetici di reparti e singole fasi considerando le tep totali di tutti i vettori e quindi senza più distinguere tra energia elettrica, gas naturale e gasolio.

Lo studio verrà condotto in primo luogo analizzando i consumi di ogni macroattività e poi entrando anche nello specifico delle fasi presenti nella stessa.

Dal diagramma di Pareto di Figura 1.26 emerge che il reparto più energivoro sia sempre quello della fusione con il 48% delle tep assorbite, seguito dai servizi ausiliari e dal reparto colata, considerando solo queste 3 aree si starebbe già studiando l'83,6% dei consumi e sono quindi le aree a cui prestare più attenzione.

Emerge anche che il reparto formatura, con lo 0,5%, contribuisca alla domanda in maniera molto marginale così come i servizi generali che, col 3,9% dei consumi, sono minoritari rispetto ad altre voci.

La fase successiva richiede di passare ad uno sguardo sui consumi di ogni fase e servizio esplodendo le macrofasi viste nel diagramma precedente, anche qui considerando le tep totali e quindi senza distinguere i diversi vettori. Seguendo una logica abc si nota che la fusione, che da sola vale il 44,7% dei consumi, insieme alla colata, la produzione di aria compressa, i trattamenti termici ed il servizio di aspirazione rappresentano da sole il 78% dei consumi e quindi, le prime fasi che si trovano sul grafico di Figura 1.27 sono quelle la cui gestione energetica più oculata può portare ad un impatto maggiore

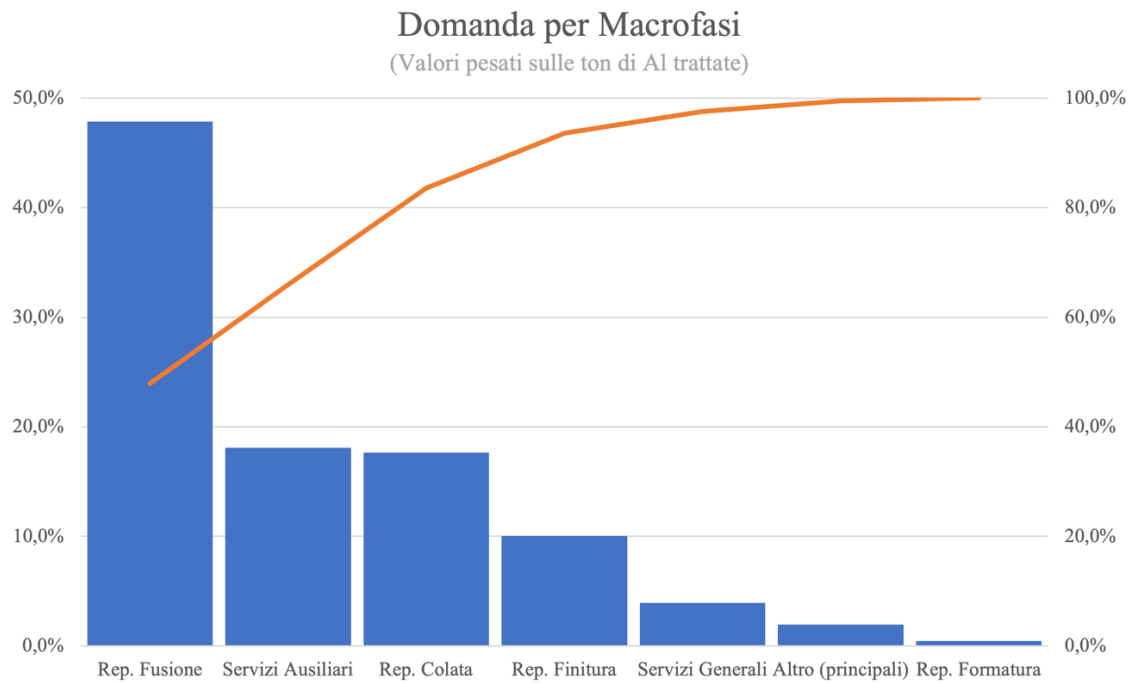


Figura 1.26 - Diagramma Pareto Macrofasi

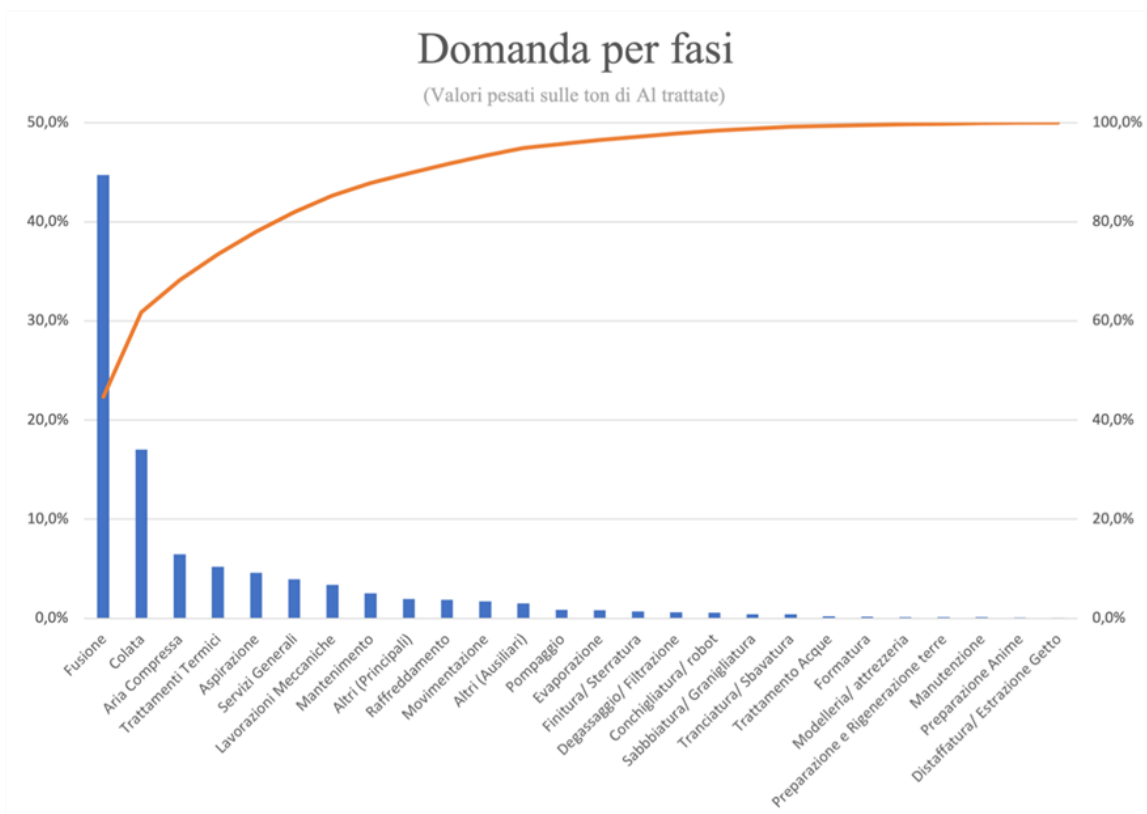


Figura 1.27 - Diagramma Pareto Fasi

Verrà descritta ora l'analisi energetica reparto per reparto dove per ciascuno si andranno ad evidenziare gli input sia materiali che energetici, gli output ed i consumi energetici delle singole fasi per le tre fonti di energia cercando anche nel processo la spiegazione di alcuni risultati.

L'analisi prende inizio dalle attività principali intese come centri produttivi che svolgono un'attività diretta sul prodotto.

## 1.2.6. Attività Principali

### 1.2.6.1. Reparto Formatura

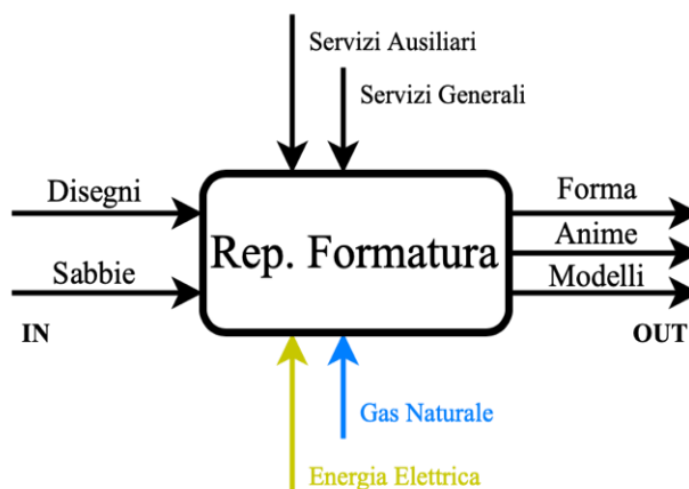


Figura 1.28 - IDEF-0 Modelli e Formatura

Il reparto formatura è dove ha inizio tutto il processo ed è quello meno dispendioso dal punto di vista energetico.

Tra gli input del diagramma IDEF-0 figurano anche i disegni, il motivo è che in questo raggruppamento è stata inclusa anche la fase di realizzazione del modello per la poca rilevanza relativa che ha a livello energetico. La prima fase è quella di preparazione e rigenerazione delle sabbie con le modalità descritte nel capitolo 3.2, la sabbia che figura tra gli input sarà quindi sia sabbia nuova che sabbia rigenerata e servirà poi sia nella fase di formatura per esterni che nella fase di preparazione delle anime per cui gli output del reparto saranno la forma voluta, le eventuali anime ed i modelli utilizzati per realizzarle.

Questo reparto sfrutta come fonti l'energia elettrica ed il gas naturale, contribuisce alla loro domanda secondo le percentuali indicate dai tre indicatori sottostanti (medie pesate), quindi in maniera marginale, con conseguente gestione meno precisa.

È interessante notare che il consumo energetico medio del reparto sia sostanzialmente basso, ciò è probabilmente da imputare anche allo scarso utilizzo di forme in sabbia da parte delle aziende oggetto di studio in favore dell'utilizzo della più produttiva colata in conchiglia.



Reparto Formatura	Preparazione e Rigenerazione Terre	Modelleria/ Attrezzeria	Preparazione Anime	Formatura
<b>Tot</b> Media Aritmetica	0,35%	0,30%	0,22%	0,49%
Media Pesata	0,13%	0,13%	0,07%	0,15%
<b>EE</b> Media Aritmetica	0,69%	0,54%	0,45%	1,44%
Media Pesata	0,23%	0,21%	0,12%	0,43%
<b>GN</b> Media Aritmetica	0,19%		0,09%	
Media Pesata	0,06%		0,04%	

Tabella 1.1 Contributo ai consumi Reparto Formatura

### 1.2.6.2. Reparto Fusione

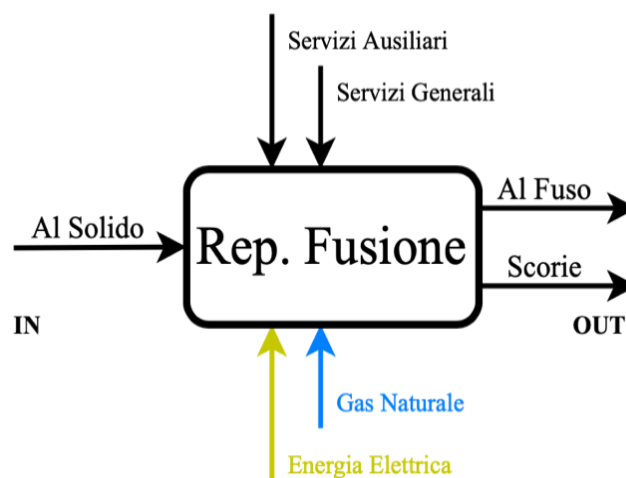


Figura 1.29 - IDEF-0 Reparto Fusione

Come visto nei paragrafi precedenti, il reparto fusione è quello più dispendioso a livello energetico, è perciò quello per cui è necessaria una gestione più oculata. Tra gli input del diagramma a lato figura il metallo solido, questo può arrivare in fonderia in pani, lingotti, rottami o dalla rifusione di scarti o sfridi delle fasi successive. Le fasi incluse nel reparto sono la fase effettiva di fusione fino a temperature superiori al 660°C<sup>19</sup> con forni alimentati prevalentemente a gas naturale, la fase di degassaggio, la filtrazione dalle scorie (evidenziate come output nel diagramma) ed il mantenimento del metallo allo stato fuso prima della colata; la maggioranza dei forni di mantenimento piuttosto che alimentati a gas naturale come quelli della fusione sono invece forni elettrici.

Negli indicatori sottostanti sono riportati i contributi del reparto alla domanda energetica a livello di tep totali, di energia elettrica e di gas naturale.



Reparto Fusione		Forno	Degasaggio/ Filtrazione	Mantenimento
<b>Tot</b>	<b>Media Aritmetica</b>	47,39%	0,33%	4,60%
	<b>Media Pesata</b>	44,70%	0,62%	2,53%
<b>EE</b>	<b>Media Aritmetica</b>	10,68%	0,59%	5,04%
	<b>Media Pesata</b>	6,63%	2,21%	1,45%
<b>GN</b>	<b>Media Aritmetica</b>	80,39%	0,12%	3,98%
	<b>Media Pesata</b>	76,07%	0,01%	3,19%

Tabella 1.2 Contributo ai consumi Reparto Fusione

### 1.2.6.3. Reparto Colata

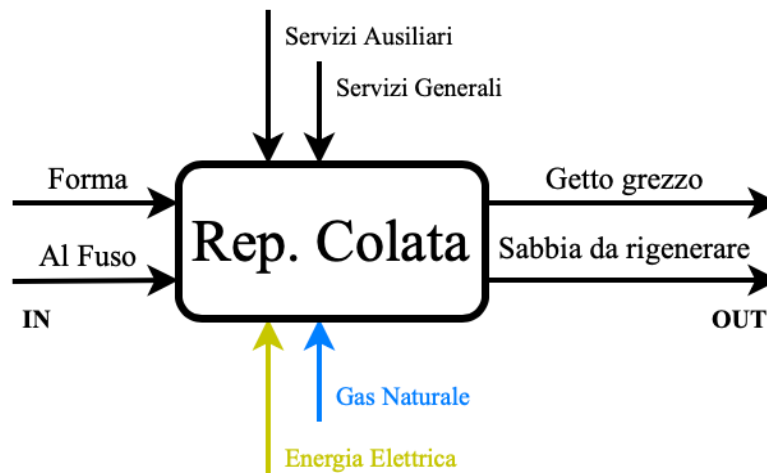
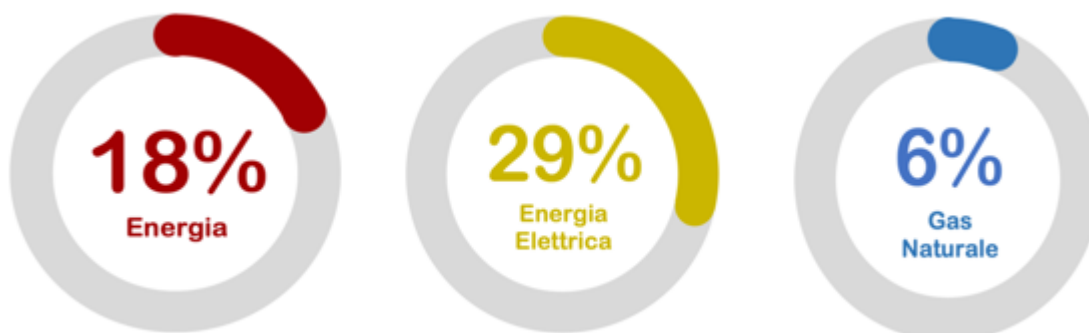


Figura 1.30 - IDEF-0 Colata e Recupero Getto

La colata è la procedura volta a conferire l'alluminio fuso, ottenuto nel reparto precedente, l'aspetto e le geometrie che poi manterrà una volta solidificatosi andando a versare il materiale all'interno delle cavità ottenute al reparto formatura secondo le modalità illustrate nel capitolo 3.6. I metodi rilevati più spesso sono la colata per pressofusione e la colata per gravità, in molte aziende questa operazione non viene effettuata manualmente ma con l'aiuto di robot che prelevano tazze di metallo fuso dal crogiolo e lo versano nella forma o ancora, in aziende più automatizzate le operazioni possono anche venire effettuate da macchine conchigliatrici. La richiesta energetica del servizio di raffreddamento degli stampi è riportata a parte tra i servizi ausiliari mentre è inclusa in questo reparto anche la fase di distaffatura che avviene a pezzo solidificato, questa fase porta ad avere eventuale sabbia da rigenerare tra gli output del diagramma IDEF-0.

La quota di gas naturale nella fase di colata è data dal preriscaldamento degli stampi.



Reparto Colata		(Presso) Colata/ Stampaggio	Conchigliatura/ Robot	Distaffatura/ Estrazione Getto
<b>Tot</b>	<b>Media Aritmetica</b>	14,41%	1,02%	0,21%
	<b>Media Pesata</b>	17,03%	0,56%	0,04%
<b>EE</b>	<b>Media Aritmetica</b>	23,64%	1,80%	0,63%
	<b>Media Pesata</b>	27,82%	0,77%	0,10%
<b>GN</b>	<b>Media Aritmetica</b>	4,72%	0,07%	
	<b>Media Pesata</b>	6,05%	0,29%	

Tabella 1.3 Contributo ai consumi Reparto Colata e Recupero Getto

1.2.6.4. Reparto Finitura

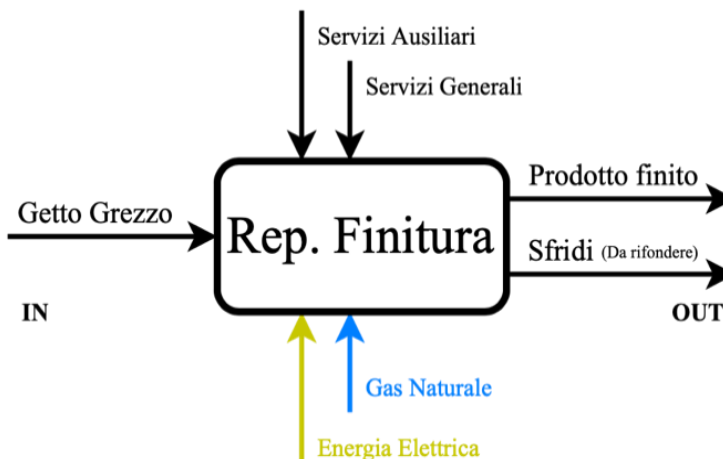


Figura 1.31 - IDEF-0 Reparto Finitura

Nel reparto finitura sono state incluse tutte le fasi di lavorazione che avvengono successivamente all'estrazione del getto dalla forma o dalla conchiglia. Tra queste attività figurano la rimozione di canali di colata, materozze e bave, i trattamenti termici che nel caso di getti in lega d'alluminio sono tempra di soluzione, invecchiamento e stabilizzazione (come citato nel cap. 3.10), le lavorazioni meccaniche di asportazione di truciolo, eventuale sterratura ed i processi di finitura superficiale quali possono essere una sabbiatura o una granigliatura. Il vettore maggiormente utilizzato per queste operazioni è l'energia elettrica per la quale lavorazioni meccaniche e trattamenti termici sono prevalenti in questo gruppo, mentre riguardo al gas naturale significativa è solo la porzione utilizzata come combustibile per i trattamenti termici.



Di seguito gli indicatori con i dati aggregati delle medie pesate della contribuzione ai consumi da parte del reparto.



Reparto Finitura		Tranciatura/ Sbavatura	Trattamenti Termici	Lavorazioni Meccaniche	Sabbiatura/ Granigliatura	Finitura/ Sterratura
<b>Tot</b>	Media Aritmetica	1,08%	2,39%	1,96%	0,46%	1,02%
	Media Pesata	0,39%	5,20%	3,36%	0,41%	0,68%
<b>EE</b>	Media Aritmetica	2,39%	3,42%	3,55%	0,86%	1,32%
	Media Pesata	0,80%	6,10%	8,91%	0,49%	1,07%
<b>GN</b>	Media Aritmetica		1,77%	0,34%	0,02%	0,60%
	Media Pesata		5,20%	1,13%	0,00%	0,37%

Tabella 1.4 Contributo ai consumi Reparto Finitura

#### 1.2.6.5. Servizi ausiliari

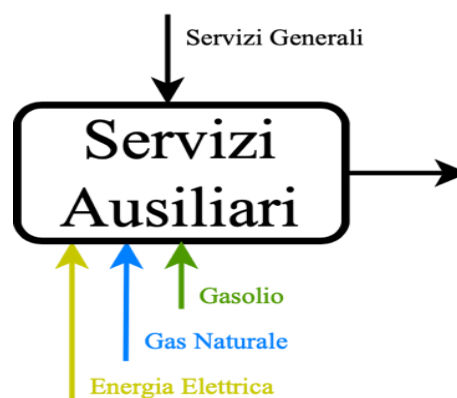
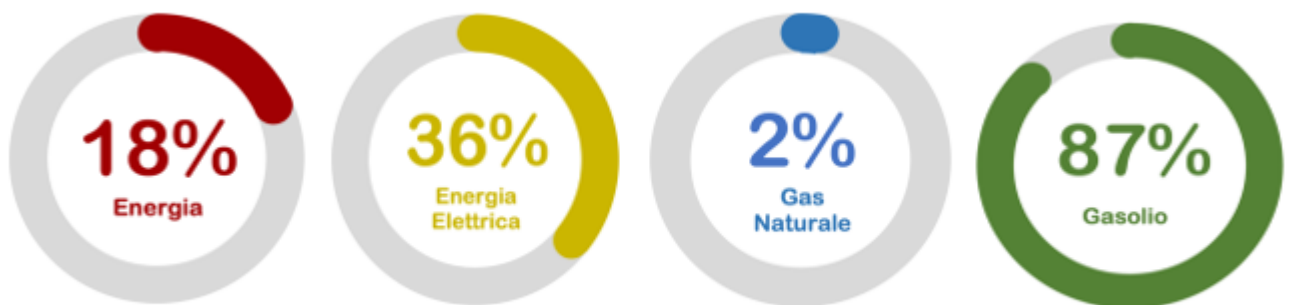


Figura 1.32- IDEF-0 Servizi Ausiliari

Per servizi ausiliari si intendono tutti quei servizi che supportano l'attività produttiva non intervenendo però direttamente nel processo ma fornendo un apporto misurabile alle attività principali.

Tra i principali servizi ausiliari rilevati nelle fonderie si trovano:

- **Produzione e distribuzione di aria compressa:** impianto sempre presente nelle fonderie e che si presta a diversi utilizzi come la nebulizzazione del fluido refrigerante per il distacco dei pezzi, il soffiaggio dei pezzi finiti, la movimentazione pneumatica di alcune macchine e la verniciatura. A causa del suo peso sulla domanda di energia elettrica l'impianto di aria compressa viene periodicamente sottoposto a ricerca di eventuali perdite. Dato l'incremento di pressione che subisce l'aria esterna durante il passaggio nel compressore si ha che parte dell'umidità presente in essa condensa, ciò rende necessaria la presenza di essiccatori antecedenti l'impianto di distribuzione in cui andrà poi l'aria, l'acqua ottenuta con l'essiccatore viene mandata all'impianto di *depurazione*. Spesso le aziende prevedono alcuni compressori che entrano in funzione solo per picchi di produzione o come riserva.
- **Aspirazione:** gli impianti di aspirazione sono finalizzati all'aspirazione e al convogliamento all'esterno dell'ambiente di lavoro delle polveri, dei fumi e dei vapori che si originano nelle fasi di: fusione del metallo, degasaggio, stampaggio e finitura prodotti. Sempre in funzione durante l'attività lavorativa, in alcune condizioni ambientali si può realizzare un'aspirazione con tiraggio naturale che si converte in forzato in caso di operazioni di pulizia o picchi di produzione. Di norma l'impianto di aspirazione è dotato di motori elettrici in funzionamento continuo, sono generalmente muniti di filtri a manica puliti periodicamente.
- **Movimentazione:** servizio che include tutti i trasporti interni all'azienda quali i carrelli, che in caso di utilizzo interno saranno elettrici mentre in caso di utilizzo per esterni saranno a gasolio come evidente dalla percentuale di contribuzione alla domanda di gasolio da parte di questo servizio. In caso di colatura di pezzi di grandi dimensioni il sito produttivo può essere dotato anche di un carro ponte per spostare questi getti.
- **Raffreddamento, pompaggio, evaporazione e trattamento acque** sono tutte voci legate al circolo dell'acqua in circuiti chiusi all'interno dello stabilimento e, nello specifico, al raffreddamento necessario in alcune fasi del processo come lo stampaggio o i trattamenti termici. Alcune aziende raffreddano l'acqua con torri evaporative dotate di ventilatori e pompe che andranno ad assorbire energia elettrica, soprattutto in estate dove per il raffreddamento sono richieste portate d'aria maggiori. Di uso comune per il raffreddamento sono i *chiller*. L'acqua di reintegro viene normalmente attinta dagli acquedotti.
- **Manutenzione:** nel contesto della fonderia il compito principale del reparto manutenzione è quello di riparare stampi e forme rovinatisi successivamente alle colate, oltre ai compiti standard di manutenzione su impianti e macchinari.



Servizi Ausiliari	Aria Compressa	Aspirazione	Movimentazione	Raffreddamento	Pompaggio	Trattamento Acque	Evaporazione	Manutenzione	Altro (Servizi Ausiliari)
<b>Totale</b>									
Media Aritmetica	7,10%	3,41%	1,59%	1,72%	1,47%	0,24%	0,36%	0,14%	1,34%
Media Pesata	6,46%	4,60%	1,71%	1,85%	0,84%	0,22%	0,82%	0,11%	1,49%
<b>EE</b>									
Media Aritmetica	15,19%	7,53%	1,34%	4,15%	2,61%	0,15%	0,57%	0,28%	3,44%
Media Pesata	13,19%	10,56%	1,12%	4,45%	1,24%	0,38%	0,93%	0,22%	3,55%
<b>GN</b>									
Media Aritmetica			0,85%		0,85%	0,27%	0,17%		
Media Pesata			1,26%		0,30%	0,04%	0,71%		
<b>Gasolio</b>									
Media Aritmetica			73,61%						1,72%
Media Pesata			86,78%						0,28%

Tabella 1.5 Contributo ai consumi Servizi Ausiliari

### 1.2.6.6. Servizi generali

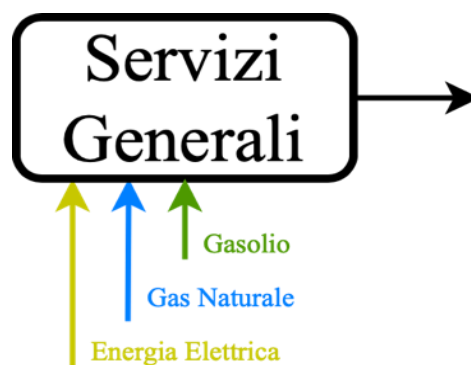


Figura 1.33 - IDEF-0 Servizi Generali

In questa categoria di servizi rientrano tutte le attività di carattere generale che servono a far funzionare l'azienda e migliorare il benessere dei lavoratori ma non intervengono direttamente nella produzione.

Tra i servizi generali più citati negli audit energetici figurano: uffici, illuminazione interna ed esterna, spogliatoi, impianto di riscaldamento e condizionamento, ventilazione, mensa ed auto aziendali. L'impianto di riscaldamento utilizza caldaie a combustibile e quindi metano per l'alimentazione, le auto aziendali possono consumare gasolio o benzina a seconda del modello mentre gli altri servizi sfruttano tutti l'energia elettrica.

Servizi Generali		
Totale	Media Aritmetica	5,11%
	Media Pesata	3,93%
EE	Media Aritmetica	5,88%
	Media Pesata	5,79%
GN	Media Aritmetica	4,82%
	Media Pesata	3,28%
Gasolio	Media Aritmetica	24,67%
	Media Pesata	12,95%

Tabella 1.6 Contributo ai consumi Servizi Generali

Come si evidenzia dalla tabella a lato la domanda energetica dei servizi generali presi singolarmente è marginale nella gestione, contribuiscono in una percentuale rilevante solo per il gasolio ma è bene ricordare che è sempre una percentuale di un 1% dei consumi totali.

#### 1.2.6.7. Autoproduzione di energia

Delle 35 aziende analizzate solo 6 sono dotate di un **impianto fotovoltaico** con cui producono mediamente l'8,7% dell'energia elettrica consumata nei rispettivi siti.

Nonostante la bassa percentuale di adozione, la quasi totalità delle aziende prevede, all'interno dei futuri interventi migliorativi, la realizzazione di un proprio impianto ad energia solare entro pochi anni.

Una porzione minore di fonderie considera invece l'installazione di un impianto di **cogenerazione** o **trigenerazione**, soluzione da valutare sulla base delle possibilità di sfruttamento dell'energia termica e dell'eventuale energia frigorifera recuperate. Nella maggior parte dei casi l'energia termica potrebbe essere utilizzata solo nel riscaldamento degli ambienti e quindi solo d'inverno, rendendo l'investimento poco appetibili.

### 1.3. Realizzazione del cruscotto di monitoraggio

Una volta studiati i processi produttivi, sono state definite le formule per gli indicatori teorici e contattate le aziende per reperire le informazioni necessarie al calcolo. Data la mole di dati, è stato fondamentale trattarli e suddividerli per semplificare il lavoro, per cui quest'ultima fase è stata organizzata seguendo i tre step mostrati in figura.



Figura 1.34 - Passi necessari allo sviluppo del cruscotto

È stata necessaria anzitutto un'analisi dei dati per suddividerli in base alla loro variabilità e frequenza di acquisizione; in seguito, è stato possibile predisporre un foglio elettronico per agevolare e strutturare la raccolta dati e per rendere più immediata e semplice la lettura delle informazioni di riepilogo, presente in allegato con il nome di "Database Fonderie".

I valori ottenuti dalle formule teoriche risultano essere di riferimento e rappresentano i valori a cui le aziende dovrebbero tendere per ottimizzare i propri consumi. Questi dati di riferimento non sono presenti in letteratura, e spesso non è facile per le aziende del settore reperirli, per questo motivo è di fondamentale importanza l'analisi svolta. Una volta adeguate le unità di misura, gli indicatori saranno comparati con quelli che sono i consumi reali delle aziende e resi fruibili attraverso la realizzazione un cruscotto di monitoraggio. Questo confronto permetterà a ciascuna realtà operativa di effettuare un'autodiagnosi e approfondire le cause di inefficienza nei periodi in cui gli indicatori e i consumi risulteranno difforni. Dal punto di vista software la realizzazione del cruscotto è stata effettuata mediante l'applicativo di analisi aziendale "Power BI" di Microsoft.

È importante precisare che, per motivi di privacy, non potranno essere mostrati dati appartenenti ad alcuna azienda o ente, quelli mostrati nei paragrafi successivi a scopo esemplificativo saranno dati verosimili ma di pura fantasia

#### 1.3.1. Inserimento dei dati

I dati necessari al calcolo sono stati forniti dal CINTESTe possono essere classificati come segue:

- **Dati statici:** sono i dati che non cambiano o che cambiano di rado, valori caratteristici dei materiali e/o dell'impianto, temperature non variabili
- **Dati dinamici:** sono i dati che variano di continuo, valori dipendenti dalle temperature o semplicemente variabili nel tempo, come i kg di materiali utilizzati. Questi subiscono una frequenza di variazione genericamente mensile.

Sulla base di quanto detto è stato realizzato un foglio di raccolta dati da consegnare alle aziende, mostrato in figura e presente in allegato con il nome di “Foglio raccolta dati Fonderie”. Le aziende potranno inserire I dati necessari al calcolo degli indicatori, specificando se questi siano statici o dinamici.

	Informazioni necessarie	Unità di misura	Dati Processo 1		Dati Processo 2		Dati Processo 3		Dati Processo 4	
			Statico/Dinamico	Valore	Stat/Din	Valore	Stat/Din	Valore	Stat/Din	Valore
Fusione	Calore necessario alla reazione chimica	kJ/kg metallo								
	Calore latente posseduto dalla miscela	kJ/kg metallo								
	massa scorie	kg/kg metallo								
	massa aria in ingresso	kg/kg metallo								
	massa metallo in uscita	kg/kg metallo								
	massa gas esausti	kg/kg metallo								
	cp scorie	kJ/kg K								
	cp aria, in	kJ/kg K								
	cp metallo in uscita	kJ/kg K								
	cp gas esausti	kJ/kg K								
	Temperatura scorie	K								
	Temperatura aria in ingresso	K								
	Temperatura metallo in uscita	K								
	Temperatura fumi in uscita dal forno	K								
	Consumo Reale	MJ/kg metallo								

Figura 1.35- Foglio di raccolta dati Fonderie

Ciascuna azienda potrebbe avere più linee di processo, per cui sono presenti più colonne, e per ciascun processo oltre al valore va inserito anche “statico” o “dinamico” a seconda della variabilità del dato.

I dati ottenuti vengono caricati su di un ulteriore foglio Excel presenti in allegato con il nome di “database Fonderie” e successivamente trasferiti ad un software necessario per la rappresentazione degli indicatori; se si volessero aggiornare dati già esistenti o aggiungerne di nuovi, sarebbe possibile farlo inserendo manualmente i dati, ciascun utilizzatore dello strumento lo potrà personalizzare in base alle proprie esigenze e caratteristiche di produzione.

Il database per la fase di produzione è mostrato in figura ed è evidenziata una suddivisione fra i dati relativi al materiale e quelli relativi al processo. Produttivo. A titolo esemplificativo vengono mostrati due database per simulare una raccolta dei dati con cadenza mensile (Figura 1.36) e quotidiana (Figura 1.37).

Oltre ai dati mostrati è possibile aggiungere ulteriori colonne in cui specificare il consumo reale e/o un valore di benchmark. Quando il valore di benchmark inserito è diverso da zero, viene utilizzato in sostituzione all’indicatore calcolato. Nel in cui il benchmark sia posto pari a zero, lo strumento interpreterà l’assenza di dati dall’esterno e procederà al calcolo in automatico del valore di benchmark come media dei valori dell’indicatore sperimentati in un determinato orizzonte temporale.

Month	Dati materiale							Dati di processo							Risultati			
	Calore chimico	Calore latente miscela	Cp Scorie	cp uscita gas	cp aria ingresso	Cp met uscita	massa scorie	massa aria in	massa gas in uscita	massa met	T scorie	T aria in	T O	T metallo uscita	T uscita gas	Cons spec	Indicatore	Efficienza
gen 19	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,20	0,20	0,30	1,30	900,00	100,00	16,00	660,00	226,00	2212,00	<b>1987,68</b>	0,90
feb 19	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,17	0,20	0,30	1,20	900,00	100,00	23,00	660,00	293,00	3397,00	<b>1838,24</b>	0,54
marzo 19	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,15	0,20	0,30	1,50	900,00	100,00	22,00	660,00	168,00	2635,00	<b>2134,35</b>	0,81
apr 19	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,10	0,20	0,30	1,50	900,00	100,00	18,00	660,00	238,00	2723,00	<b>2109,09</b>	0,77
mag 19	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,12	0,20	0,30	1,40	900,00	100,00	24,00	660,00	191,00	2883,00	<b>1979,21</b>	0,69
giu 19	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,16	0,20	0,30	1,20	900,00	100,00	20,00	660,00	171,00	3725,00	<b>1783,55</b>	0,48
lug 19	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,19	0,20	0,30	1,10	900,00	100,00	24,00	660,00	206,00	3650,00	<b>1701,79</b>	0,47
ago 19	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,16	0,20	0,30	1,50	900,00	100,00	21,00	660,00	242,00	2835,00	<b>2171,20</b>	0,77
set 19	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,16	0,20	0,30	1,40	900,00	100,00	19,00	660,00	254,00	3958,00	<b>2066,41</b>	0,52
ott 19	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,19	0,20	0,30	1,30	900,00	100,00	24,00	660,00	197,00	3268,00	<b>1948,38</b>	0,60
nov 19	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,11	0,20	0,30	1,10	900,00	100,00	17,00	660,00	225,00	2714,00	<b>1631,50</b>	0,60
dic 19	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,18	0,20	0,30	1,10	900,00	100,00	24,00	660,00	203,00	3129,00	<b>1692,92</b>	0,54
gen 20	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,14	0,20	0,30	1,40	900,00	100,00	19,00	660,00	281,00	3304,00	<b>2042,29</b>	0,62
feb 20	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,11	0,20	0,30	1,00	900,00	100,00	21,00	660,00	180,00	2992,00	<b>1479,09</b>	0,49
marzo 20	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,14	0,20	0,30	1,20	900,00	100,00	18,00	660,00	266,00	2249,00	<b>1802,99</b>	0,80
apr 20	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,12	0,20	0,30	1,30	900,00	100,00	21,00	660,00	206,00	2269,00	<b>1871,67</b>	0,82
mag 20	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,19	0,20	0,30	1,10	900,00	100,00	16,00	660,00	191,00	2809,00	<b>1718,15</b>	0,61
giu 20	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,19	0,20	0,30	1,20	900,00	100,00	24,00	660,00	265,00	2853,00	<b>1846,04</b>	0,65
lug 20	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,10	0,20	0,30	1,50	900,00	100,00	20,00	660,00	208,00	2922,00	<b>2099,60</b>	0,72
ago 20	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,20	0,20	0,30	1,30	900,00	100,00	19,00	660,00	288,00	2935,00	<b>2004,74</b>	0,68
set 20	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,17	0,20	0,30	1,40	900,00	100,00	25,00	660,00	229,00	3762,00	<b>2043,90</b>	0,54
ott 20	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,16	0,20	0,30	1,30	900,00	100,00	22,00	660,00	187,00	2748,00	<b>1908,71</b>	0,69
nov 20	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,11	0,20	0,30	1,20	900,00	100,00	16,00	660,00	213,00	3865,00	<b>1740,36</b>	0,45
dic 20	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,17	0,20	0,30	1,50	900,00	100,00	16,00	660,00	167,00	2818,00	<b>2182,43</b>	0,77

Figura 1.36- Database Fase fusione Fonderie con cadenza mensile

data	Dati materiale							Dati di processo							Risultati			
	Calore chimico	Calore lat	Cp Scorie	cp uscita	cp aria ing	Cp met us	massa sc	massa ari	massa ga	massa me	T scorie	T aria in	T O	T metallo	T uscita g	Cons spec	Indicatore	Efficienza
01/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,12	0,20	0,30	1,10	900,00	100,00	18,00	660,00	258,00	2931,00	<b>1642,65</b>	0,56
02/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,19	0,20	0,30	1,00	900,00	100,00	22,00	661,00	173,00	3461,00	<b>1576,58</b>	0,46
03/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,10	0,20	0,30	1,50	900,00	100,00	24,00	662,00	208,00	2566,00	<b>2081,13</b>	0,81
04/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,18	0,20	0,30	1,50	900,00	100,00	19,00	663,00	245,00	2318,00	<b>2213,61</b>	0,95
05/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,15	0,20	0,30	1,00	900,00	100,00	21,00	664,00	220,00	3003,00	<b>1552,63</b>	0,52
06/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,17	0,20	0,30	1,00	900,00	100,00	20,00	665,00	167,00	3090,00	<b>1570,97</b>	0,51
07/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,18	0,20	0,30	1,20	900,00	100,00	18,00	666,00	260,00	2843,00	<b>1859,67</b>	0,65
08/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,19	0,20	0,30	1,50	900,00	100,00	25,00	667,00	298,00	3861,00	<b>2242,70</b>	0,58
09/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,15	0,20	0,30	1,10	900,00	100,00	23,00	668,00	276,00	3803,00	<b>1696,75</b>	0,45
10/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,15	0,20	0,30	1,30	900,00	100,00	21,00	669,00	174,00	3220,00	<b>1914,99</b>	0,59
11/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,20	0,20	0,30	1,20	900,00	100,00	19,00	670,00	239,00	2397,00	<b>1866,48</b>	0,78
12/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,11	0,20	0,30	1,40	900,00	100,00	19,00	671,00	253,00	2332,00	<b>2022,66</b>	0,87
13/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,16	0,20	0,30	1,20	900,00	100,00	17,00	672,00	239,00	3575,00	<b>1839,96</b>	0,51
14/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,14	0,20	0,30	1,00	900,00	100,00	21,00	673,00	224,00	2714,00	<b>1559,18</b>	0,57
15/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,17	0,20	0,30	1,30	900,00	100,00	20,00	674,00	193,00	3235,00	<b>1966,79</b>	0,61
16/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,11	0,20	0,30	1,40	900,00	100,00	21,00	675,00	276,00	3957,00	<b>2042,90</b>	0,52
17/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,12	0,20	0,30	1,30	900,00	100,00	19,00	676,00	272,00	2677,00	<b>1934,58</b>	0,72
18/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,16	0,20	0,30	1,50	900,00	100,00	20,00	677,00	275,00	2581,00	<b>2235,08</b>	0,87
19/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,18	0,20	0,30	1,20	900,00	100,00	25,00	678,00	214,00	2297,00	<b>1862,31</b>	0,81
20/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,16	0,20	0,30	1,20	900,00	100,00	18,00	679,00	278,00	2952,00	<b>1867,47</b>	0,63
21/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,15	0,20	0,30	1,40	900,00	100,00	21,00	680,00	282,00	2471,00	<b>2108,28</b>	0,85
22/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,12	0,20	0,30	1,50	900,00	100,00	22,00	681,00	223,00	3399,00	<b>2172,84</b>	0,64
23/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,14	0,20	0,30	1,40	900,00	100,00	16,00	682,00	171,00	3689,00	<b>2078,80</b>	0,56
24/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,13	0,20	0,30	1,50	900,00	100,00	19,00	683,00	199,00	3688,00	<b>2185,39</b>	0,59
25/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,14	0,20	0,30	1,00	900,00	100,00	24,00	684,00	224,00	3631,00	<b>1575,99</b>	0,43
26/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,19	0,20	0,30	1,00	900,00	100,00	18,00	685,00	251,00	2220,00	<b>1659,79</b>	0,75
27/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,17	0,20	0,30	1,40	900,00	100,00	21,00	686,00	173,00	2811,00	<b>2117,28</b>	0,75
28/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,19	0,20	0,30	1,40	900,00	100,00	25,00	687,00	261,00	2725,00	<b>2151,21</b>	0,79
29/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,16	0,20	0,30	1,50	900,00	100,00	18,00	688,00	300,00	2839,00	<b>2278,47</b>	0,80
30/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,18	0,20	0,30	1,20	900,00	100,00	21,00	689,00	259,00	2686,00	<b>1901,12</b>	0,71
31/01/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,19	0,20	0,30	1,20	900,00	100,00	20,00	690,00	206,00	2878,00	<b>1912,34</b>	0,66
01/02/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,16	0,20	0,30	1,10	900,00	100,00	18,00	691,00	189,00	3315,00	<b>1736,27</b>	0,52
02/02/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,17	0,20	0,30	1,40	900,00	100,00	24,00	692,00	166,00	3634,00	<b>2116,52</b>	0,58
03/02/2019	20,00	64,60	1,50	1,10	1,00	1,90	0,12	0,20	0,30	1,00	900,00	100,00	24,00	693,00	201,00	2483,00	<b>1552</b>	



progetto. Esso è stato strutturato sulla base dei dati raccolti grazie al foglio Excel citato in precedenza, a causa dell'assenza dei sopralluoghi previsti. Il foglio è presente in allegato al documento con il nome di "Database Fonderie"

Per il settore fonderie è stata analizzata la sola fase di fusione.

Suddivisi i dati, adeguate le unità di misura, per garantire una visualizzazione chiara e di semplice comprensione è stato utilizzato il software Power-BI, che come già accennato fa parte di una famiglia di strumenti di business intelligence di Microsoft che permette, a partire dai dati aziendali, di generare report e quindi informazioni a supporto delle decisioni. È possibile ricevere in input dati da differenti fonti, tra le quali Excel, come si vede in figura evidenziato in blu.

In figura 1.38 è possibile osservare come si presenta una parte del database del software la cui visualizzazione è simile ad Excel. Questo database è accessibile selezionando la seconda icona che troviamo in alto a sinistra nello strumento, cerchiato in rosso.

Month	Calore chimico	Calore latente miscela	Cp Scorie	cp uscita gas	cp aria ingresso	Cp met uscita	massa scorie	massa aria in	massa gas in uscita	mi
gennaio 2019	20	2,2	1,5	1,1	1	1,9	0,5	0,2	0,3	
febbraio 2019	20	2,2	1,5	1,1	1	1,9	0,5	0,2	0,3	
marzo 2019	20	2,2	1,5	1,1	1	1,9	0,5	0,2	0,3	
aprile 2019	20	2,2	1,5	1,1	1	1,9	0,5	0,2	0,3	
maggio 2019	20	2,2	1,5	1,1	1	1,9	0,5	0,2	0,3	
giugno 2019	20	2,2	1,5	1,1	1	1,9	0,5	0,2	0,3	
luglio 2019	20	2,2	1,5	1,1	1	1,9	0,5	0,2	0,3	
agosto 2019	20	2,2	1,5	1,1	1	1,9	0,5	0,2	0,3	
settembre 2019	20	2,2	1,5	1,1	1	1,9	0,5	0,2	0,3	
ottobre 2019	20	2,2	1,5	1,1	1	1,9	0,5	0,2	0,3	
novembre 2019	20	2,2	1,5	1,1	1	1,9	0,5	0,2	0,3	
dicembre 2019	20	2,2	1,5	1,1	1	1,9	0,5	0,2	0,3	
gennaio 2020	20	2,2	1,5	1,1	1	1,9	0,5	0,2	0,3	

Figura 1.38 - Database Power BI

È fondamentale nella prima colonna indicare il mese e l'anno di riferimento o la data per esteso se si tratta di una cadenza quotidiana, seguono i dati relativi al materiale ed infine quelli di processo. La colonna dell'indicatore è semplicemente realizzata implementando la formula nella barra superiore, evidenziata in verde.

In questo caso è stata analizzata una sola fase, quindi quella di fusione ma se ci fosse la necessità di studiare una seconda fase del processo si dovrebbe procedere esattamente allo stesso modo, realizzando un secondo foglio di raccolta, indicando una cadenza di raccolta dei dati identica per entrambe le fasi. Una delle sezioni del foglio di calcolo, che viene mostrata in Figura 1.39, permette di definire le relazioni tra gruppi di dati nel caso ci fossero più fasi, in questo caso esisterebbero due collegamenti bilaterali. Questi collegamenti fanno sì che ogni qualvolta ci si riferisca ad uno specifico mese, tutti gli indicatori delle varie fasi si sincronizzino su quella data, garantendo un orizzonte temporale comune, sia esso quotidiano, mensile o annuo

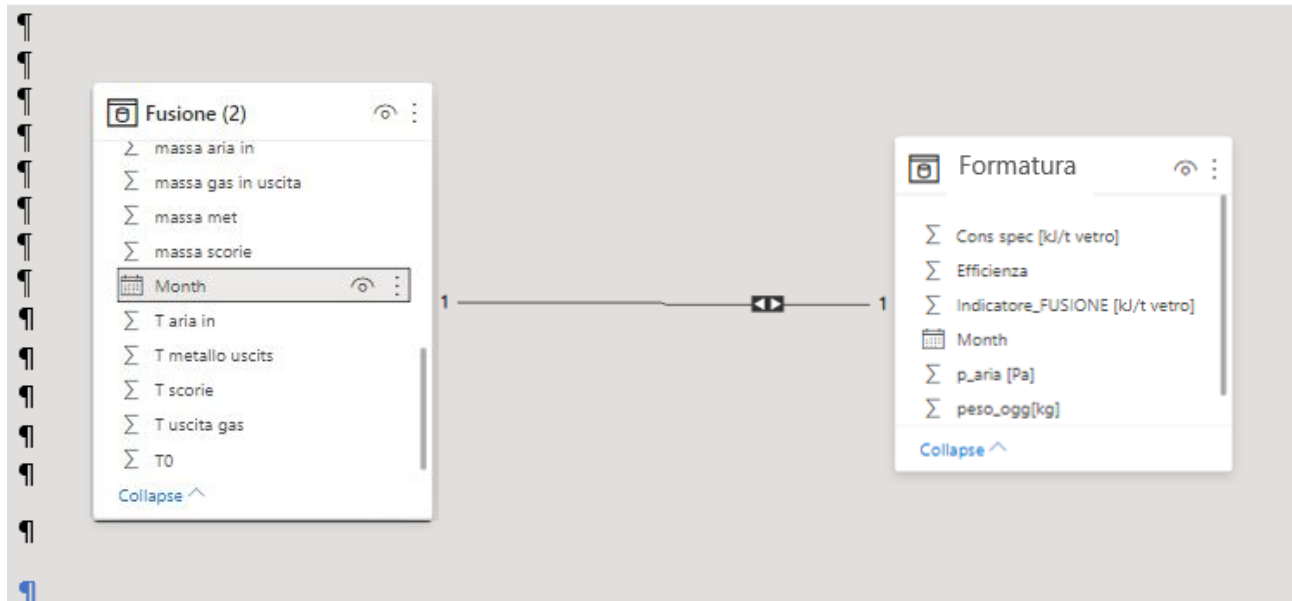


Figure 1.39- Collegamento tra Fasi

### 1.3.3. Il cruscotto di monitoraggio

Una volta completato il database e definite le relazioni presenti tra i gruppi di dati, è stato finalmente possibile modellare il cruscotto di monitoraggio che rappresenta il punto focale per le aziende del settore: grazie ad esso è possibile inquadrare al meglio i consumi aziendali, confrontarli con i valori ideali, fare valutazioni, proporre soluzioni di miglioramento in maniera rapida ma accurata. La scelta dell'applicativo è stata fatta dopo attenta valutazione delle caratteristiche dei principali software con foglio di calcolo per sfruttare la sua estrema versatilità, scalabilità e adattabilità a casi differenti, unita alla efficacia della rappresentazione di sintesi, sia grafica che numerica dei risultati di performance.

Esso è composto di tre sezioni interdipendenti: Cruscotto, Composizione Indicatori, Storico Indicatori.

In figura viene mostrato il cruscotto principale: in alto vi è la possibilità di scegliere l'orizzonte temporale di cui si vogliono visualizzare i dati, può essere selezionato un singolo mese, più mesi o tutti quelli a disposizione tramite il tasto "Select All". Nell'esempio sottostante è stata presa in considerazione una variabilità dei dati mensile.

Scelto il periodo di interesse, sono in automatico mostrati i consumi delle fasi analizzate, espressi secondo le unità di misura prestabilite. La visualizzazione è simile ad un indicatore Gauge, troviamo il valore minimo in assoluto tra tutti i valori in database in basso a sinistra, in basso a destra viene mostrato il valore massimo che assume il consumo, mentre al centro troviamo il valore attuale. In una colorazione più scura, troviamo il valore target o benchmark (ovvero l'indicatore definito in precedenza secondo gli studi effettuati dal CINTEST) inserito direttamente sulla barra di visualizzazione, come una lancetta. Le unità di misura sono in kJ/kg di metallo per l'indicatore relativo alla fase di fusione

In alto a destra, troviamo un valore percentuale, che indica l'efficienza della fase produttiva in quel mese o in più mesi. Essa è il rapporto tra il consumo teorico e quello effettivo. La percentuale si colora di rosso se il valore è compreso tra 0% e 40%, di arancione nel range 40-55%, di giallo tra 55 e 70% di verde se superiore al 70%

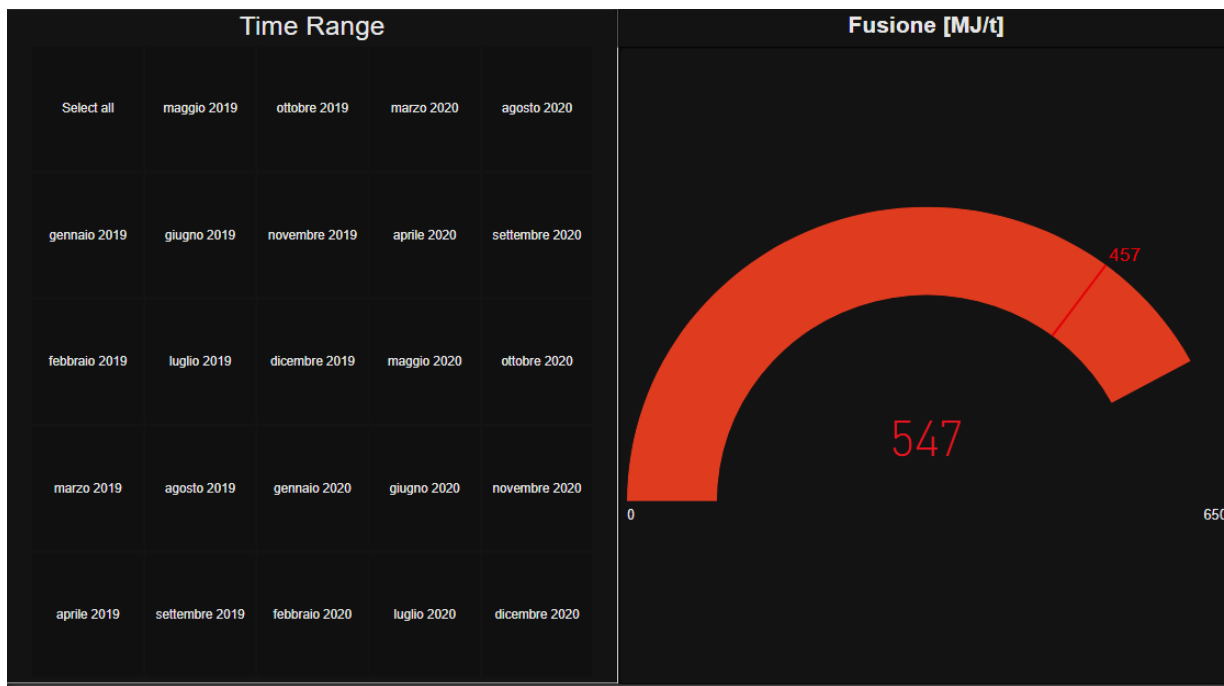


Figura 1.40 - Cruscotto fonderie con indicatore per la fase di fusione

In basso è possibile selezionare la sezione che si preferisce visualizzare tra le tre precedentemente elencate.

In Figura 1.41 viene mostrata la seconda sezione del progetto che ha la finalità di mostrare all’utente il peso dei vari componenti dell’indicatore; in particolare per la fase di Fusione abbiamo visto che ciascun termine dell’equazione equivale ad un calore specifico, ed è quindi importante evidenziarle per poter capire se sono presenti stranezze. Paradossalmente, infatti, l’indicatore potrebbe essere in regola, ma i termini che lo compongono potrebbero non essere adeguati. Vediamo quindi, in basso, la sezione del time range: essa è sincronizzata con quella della pagina precedente e successiva in modo da permettere all’utente dello strumento, di selezionare una volta sola i mesi di interesse e di non ripetere l’operazione nelle sezioni successive.

Nella zona in alto a destra, un grafico “a ciambella”, nel quale sono specificate le percentuali di ciascun termine, corredato da una legenda che mostra i diversi termini che compongono l’indicatore. A sinistra, troviamo tutti i periodi selezionabili per l’analisi.

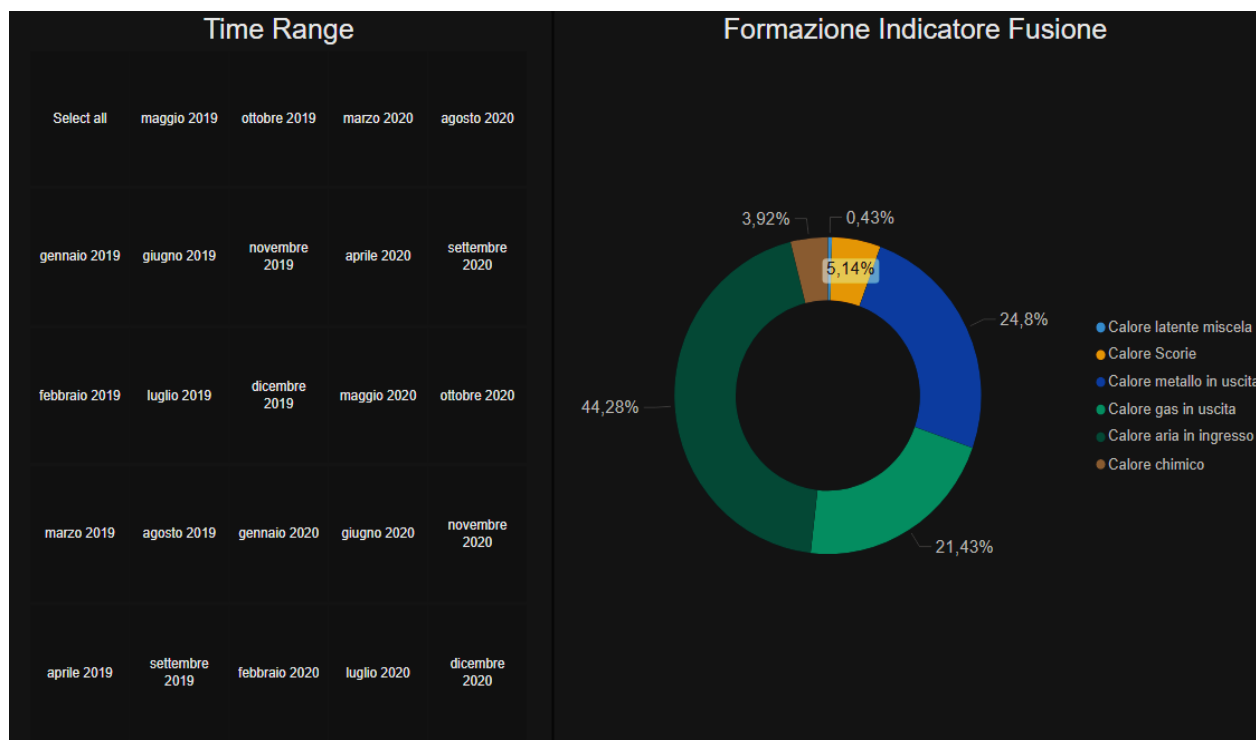


Figura 1.41- Composizione Indicatore

L'ultima sezione dello strumento è strutturata come mostrato in Figura 1.42.

In basso troviamo nuovamente il time range sia per poter tenere a mente il periodo di riferimento, sia perché esso può essere sempre modificato e tale modifica verrà apportata a tutte e tre le pagine in cui esso è presente.

In alto a sinistra una tabella in cui vengono specificati i valori dei consumi suddivisi per fase e per mese; quindi, non un valore medio come si vede nel Cruscotto iniziale, ma un vero e proprio report in cui sono elencati tutti i consumi mese per mese. Questa tabella permette di ordinare in senso crescente o decrescente ciascuna colonna, se si volesse sapere quindi qual è il mese in cui il consumo del crudo è maggiore basterebbe selezionare quella colonna per ordinare i dati in senso crescente o decrescente.

A destra troviamo invece un grafico a barre verticali: in base ai mesi selezionati viene mostrato l'andamento dei consumi reali e degli indicatori nel tempo. La linea indica sempre il valore di benchmark, mentre le barre indicano i consumi effettivi. Tramite un cursore di scorrimento slide presente nella parte inferiore del grafico è possibile allargare o restringere la visuale in maniera individuale per ciascun grafico, senza cambiare l'orizzonte temporale.

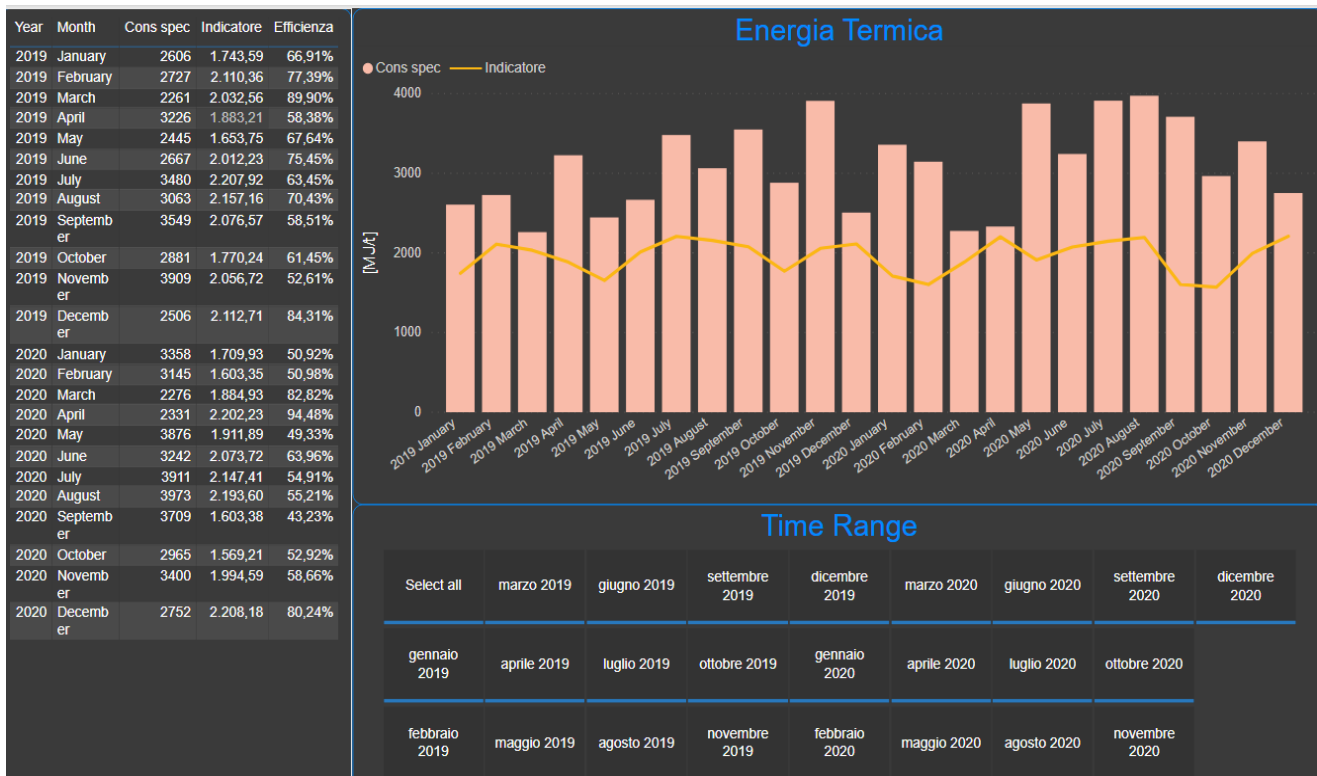


Figura 1.42- Storico Indicatori fonderie

Per rapidità, è possibile selezionare come time range tutto l’orizzonte temporale presente nel database, tramite la presenza del tasto “Select All”. In questo modo è possibile, con una sola occhiata, comprendere quali fasi e in quali mesi è stato raggiunto il risultato desiderato e quali sono stati invece i mesi e le fasi meno efficienti.

In linea teorica i consumi risultano sempre maggiorati rispetto ai dati teorici rappresentati nel grafico a barre, in quanto nel calcolo degli indicatori teorici non sono tenute in considerazione tutte le perdite dovute a fermate, guasti, condizioni di lavoro non ideali.

## 1.4 Bibliografia e sitografia

- [1]. Assofond [Online]. Available: <https://www.assofond.it/foundries-in-italy>.
- [2]. IndustrialeWeb, 27 Settembre 2011. [Online]. Available: <https://www.industrialeweb.com/fonderia-forme-secco-verde/>. [Consultato il giorno 22 Maggio 2021].
- [3]. E. Capello, Fonderia ad uso degli istituti industriali, delle scuole d'ingegneria e dei tecnici specializzati, Milano: Carlo Signorelli, 1958.
- [4]. Wikipedia.org [Online]. Available: [https://it.wikipedia.org/wiki/Storia\\_della\\_siderurgia](https://it.wikipedia.org/wiki/Storia_della_siderurgia).
- [5]. Italtres [Online]. Available: <https://www.italpres.it/news-pressofusione-alluminio/cose-la-burattatura>.
- [6]. P. L. Jain, «Defects in Castings and Quality Control» in Principles of Foundry Technology (IV ed), New Delhi, McGraw-Hill, 2003, pp. 277-305.
- [7]. V. S. Fabrizia Caiazza, Tecnologie Generali dei materiali, CittàStudi Editore, 2012.

## 2. Caso Studio n.2: Il processo di incenerimento dei rifiuti

Una delle controindicazioni più gravi che lo sviluppo socioeconomico ha portato, in Italia ed ovunque nel mondo, è certamente quella dell'elevata produzione di rifiuti urbani e industriali.

Seppure da sempre sia stata utilizzata la tecnica dell'incenerimento per smaltire i rifiuti, basti pensare che il primo inceneritore sia stato costruito alla fine dell'Ottocento in Germania, solo negli ultimi tempi ci si è soffermati sulla tossicità dei fumi emessi nell'ambiente e quindi si è avuta l'esigenza di trovare delle tecnologie in grado di ridurre al minimo le emissioni nocive.

In particolare, solo un anno dopo il disastro di Seveso (1976) che causò la fuoriuscita e la dispersione di una nube di diossina TCDD, una sostanza artificiale fra le più tossiche, un ricercatore dell'Università di Amsterdam identificò le diossine nelle polveri dei filtri degli inceneritori di rifiuto solido urbano. Da quel momento nacque un forte movimento contrario all'incenerimento dei rifiuti e diminuì notevolmente il numero di sostenitori di tale soluzione. Furono addirittura interrotte le costruzioni dei suddetti impianti per potersi concentrare sull'adeguamento di quelli già esistenti e trovare una giusta combinazione tra le esigenze ambientali e quelle produttive. Raggiunto un livello adeguato di emissioni di inquinanti, grazie all'utilizzo di nuove tecnologie, solo nel 1986 è stata di nuovo possibile la costruzione di nuovi impianti [1].

Attualmente, per ridurre la presenza e la generazione dei rifiuti, risulta necessario ridurre la produzione degli stessi, perseguire la raccolta differenziata per il riutilizzo della materia e procedere con l'incenerimento per la frazione non riutilizzabile.

Sicuramente le tecnologie di incenerimento si sono evolute rispetto al passato. I moderni impianti vengono definiti anche *termovalorizzatori* perché in grado di valorizzare l'energia prodotta; infatti, sono progettati per effettuare un efficiente recupero energetico. Nella seguente sezione del lavoro, si ripercorrono le fasi produttive principali che trasformano i rifiuti in energia elettrica e termica, partendo dall'analisi generale e arrivando ad un'analisi dettagliata delle singole fasi, che saranno mappate secondo quanto definito nei precedenti capitoli, al fine di comprendere al meglio i flussi energetici.

### 2.1 Le materie prime

L'Inceneritore è un impianto di trattamento termico di rifiuti urbani e speciali non pericolosi. Per questo motivo la materia prima utilizzata risulta essere proprio la quantità di rifiuti trattati. In questo processo di trasformazione, non è possibile individuare materie prime nel senso stretto del termine, ad esempio materie o semilavorati da cui inizializzare la produzione per ottenere prodotti finiti.

La differenza tra le due tipologie di rifiuti trattati dipende dalla loro origine, se proveniente da un'abitazione oppure da un sito produttivo, non dalle caratteristiche chimiche o fisiche.

I rifiuti urbani sono materiali domestici di scarto o avanzo derivanti da diverse attività umane svolte in luoghi adibiti ad abitazioni civili.

Sono definiti tali dall' Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente:

1. i rifiuti domestici, anche ingombranti, provenienti da locali e luoghi adibiti ad uso di civile abitazione;
2. i rifiuti non pericolosi provenienti da locali e luoghi adibiti ad usi diversi da quelli di cui alla lettera a), assimilati ai rifiuti urbani per qualità e quantità, ai sensi dell'articolo 21, comma 2, lettera

g) del decreto medesimo;

3. i rifiuti provenienti dallo spazzamento delle strade;
4. i rifiuti di qualunque natura o provenienza, giacenti sulle strade ed aree pubbliche o sulle strade ed aree private comunque soggette ad uso pubblico o sulle spiagge marittime e lacuali e sulle rive dei corsi d'acqua;
5. i rifiuti vegetali provenienti da aree verdi, quali giardini, parchi e aree cimiteriali;
6. i rifiuti provenienti da esumazioni ed estumulazioni, nonché gli altri rifiuti provenienti da attività cimiteriale diversi da quelli di cui alle lettere b), c) ed e) [2].

I rifiuti speciali sono materiali di scarto o avanzo derivanti da attività produttive di industrie e aziende.

Fanno parte dei rifiuti speciali:

- i rifiuti da lavorazione industriale;
- i rifiuti da attività commerciali;
- i rifiuti derivanti dall'attività di recupero e smaltimento di rifiuti, i fanghi prodotti da trattamenti delle acque e dalla depurazione delle acque reflue e da abbattimento di fumi;
- i rifiuti derivanti da attività sanitarie;
- i macchinari e le apparecchiature deteriorati ed obsoleti;
- i veicoli a motore, rimorchi e simili fuori uso e loro parti;
- altri [3].

In particolare, i rifiuti speciali trattati sono quelli non pericolosi che sono caratterizzati da una bassa concentrazione di sostanze inquinanti.

## 2.2 Il processo di trasformazione degli inceneritori

Il processo di trasformazione in esame trasforma e recupera l'energia contenuta nei rifiuti non riciclabili in energia elettrica e termica.

Nello schema di Figura 2.1 si riportano le principali attività che costituiscono il processo produttivo degli inceneritori.

La trattazione pone l'attenzione sulle fasi produttive raggruppandole come segue:

1. Movimentazione e alimentazione dei rifiuti (accettazione, controllo, identificazione e pesatura, stoccaggio, movimentazione);
2. Forno/generatore di vapore (combustione ed evacuazione scorie);
3. Ciclo termico (produzione energia);
4. Depurazione dei fumi (trattamento e depurazione dei fumi).



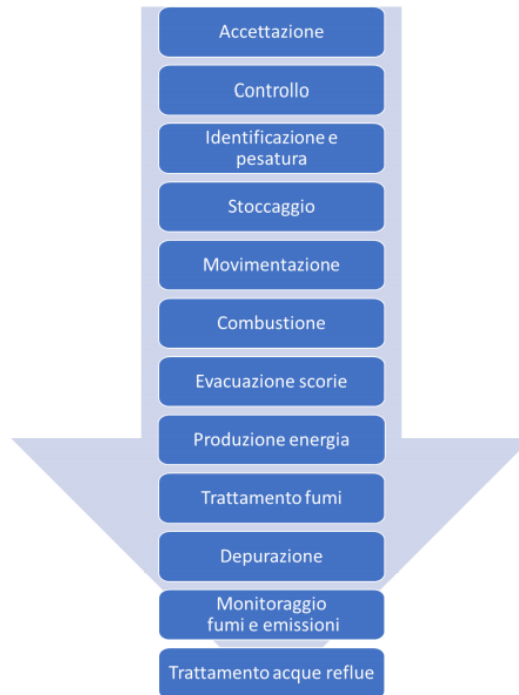


Figura 2.1 - Schema attività produttive principali

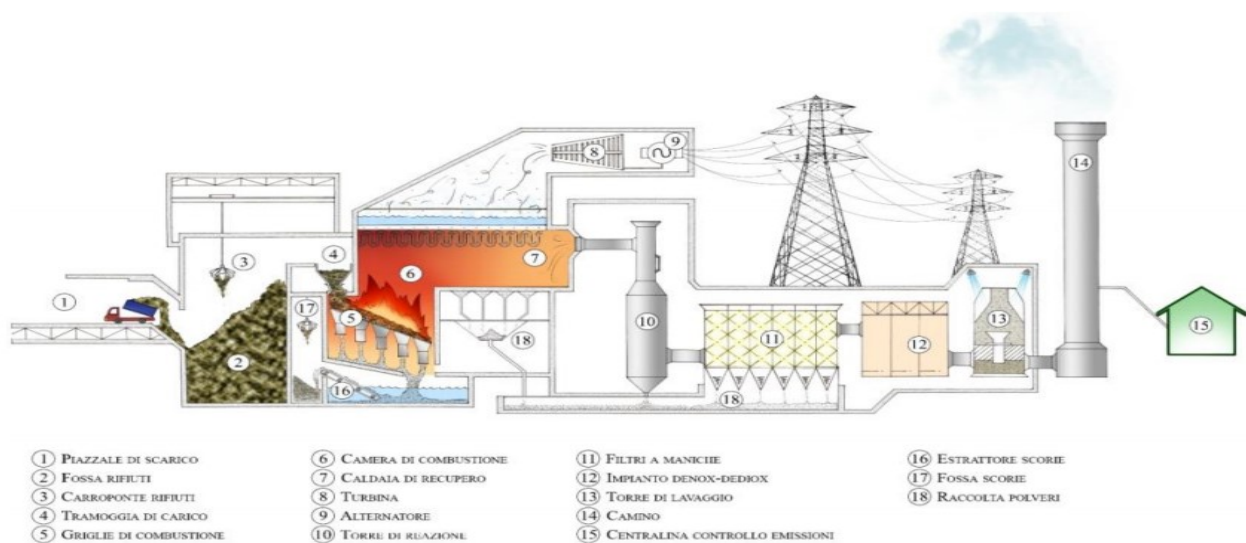


Figura 2.2 - Rappresentazione dell'impianto di incenerimento

### 2.2.1 Movimentazione e alimentazione dei rifiuti

L'impianto risulta composto da una sezione di ricevimento, movimentazione e stoccaggio dei rifiuti in ingresso. [4]

Le attività svolte in accettazione rifiuti hanno lo scopo di assicurare che siano rispettati i requisiti contrattuali fra le parti e le vigenti prescrizioni normative, oltre che a rilevare il peso e indirizzare il rifiuto alla linea di trattamento prevista.

In particolare, sono verificate: la documentazione di accompagnamento del rifiuto e la sua corretta compilazione; la rispondenza tra le informazioni in essa contenute ed il rifiuto conferito; la conformità del rifiuto all'impianto di destinazione.

All'ingresso dell'impianto i veicoli passano attraverso un portale di controllo della eventuale radioattività che rilevano l'eventuale inquinamento da radioattività nei carichi di rifiuti in ingresso. Continuano poi verso la zona di ricezione e pesatura in benna per effettuare le operazioni di identificazione e quantificazione dei rifiuti. È presente un sistema automatico che consente l'apertura delle porte che separano tale zona alla fossa di stoccaggio rifiuti. È permesso l'accesso, tramite segnalazione semaforica verde e apertura della sbarra veicolare, dopo aver eseguito la registrazione dei dati.

Tutto questo sistema consente un continuo controllo e monitoraggio dell'alimentazione delle linee per la loro migliore gestione.

A questo punto ci si dirige verso il piazzale di scarico dove vengono depositati i rifiuti. I portoni della fossa di stoccaggio (Figura 2.3) sono mantenuti chiusi e la fossa stessa è tenuta in depressione per evitare la fuoriuscita di odori.



Figura 2.3 – Fossa di stoccaggio

Per la movimentazione dei rifiuti dalla fossa alla tramoggia di carico della linea di combustione, viene utilizzato un carroponete munito di benna a polipo (Figura 2.4) manovrato da un gruista la cui cabina è posta su un lato del vano della fossa, in posizione rialzata e con ampia vetrata, in modo da consentire la totale visibilità della fossa. La cabina è dotata anche di monitor a circuito chiuso per dare al gruista un ulteriore grado di sorveglianza sulle tramogge di carico.

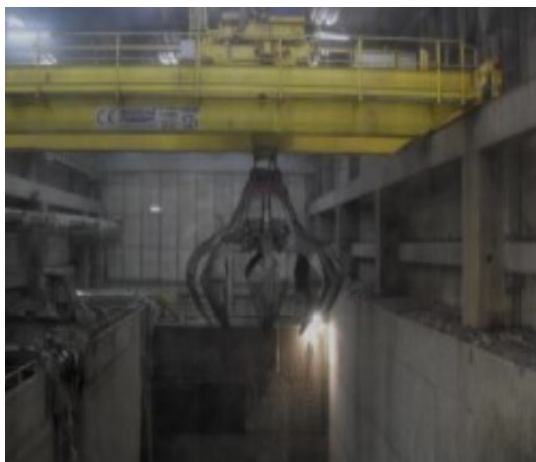


Figura 2.4 – Carro ponte munito di benna a polipo

È spesso utilizzato anche un sistema di alimentazione costituito da un fondo mobile e uno o più nastri trasportatori in serie che veicolano il prodotto praticamente in continuo dal capannone di stoccaggio fino alla tramoggia del forno. I nastri trasportatori sono comandati tramite dei variatori di frequenza che permettono di variarne la capacità. Il materiale trasportato dai nastri viene scaricato in una tramoggia che alimenta il forno, la corretta distribuzione del materiale viene assicurata dalla pendolazione di un dispositivo sospeso oscillante.

La parte terminale della fase di carico viene seguita dall'operatore attraverso le telecamere poste nella zona sovrastante le tramogge, utili anche per il controllo del grado di riempimento dei forni.

### 2.2.2 Forno / generatore di vapore

Tramite il sistema di trasporto predisposto, i rifiuti vengono convogliati lungo la linea di incenerimento, nella quale si sviluppa la combustione.

Attualmente si individuano tre principali soluzioni tecnologiche impiegate nella combustione dei rifiuti:

- Forni a griglia;
- Forni a letto fluido;
- Forni a tamburo rotante.

La scelta della soluzione tecnologica da impiegare dipende in larga parte dal tipo di combustibile da smaltire e dalle sue proprietà chimico-fisiche che ne influenzano il comportamento durante il processo di combustione. I tre tipi di forni sono brevemente descritti di seguito.

#### 2.2.2.1. Forni a griglia

I forni a griglia (Figura 2.5) sono costituiti appunto da una griglia, che può essere mobile o fissa, e sulla quale avanza il rifiuto fino alla zona di scarico delle scorie, grazie alla loro inclinazione e alla presenza di una serie di gradini mobili.

I rifiuti vengono immessi mediante una tramoggia nella parte più alta della griglia e sospinti meccanicamente verso i gradini inferiori, ad una velocità variabile a seconda del tempo di permanenza necessario per ottenere il completamento della combustione.

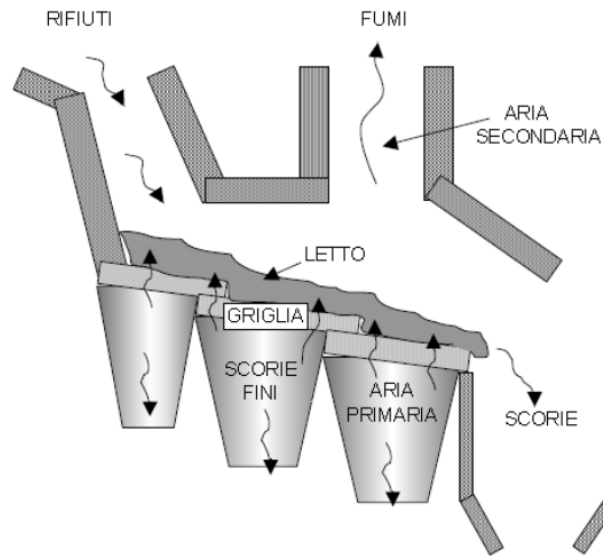


Figura 2.5: Schema di Funzionamento del Forno a Griglia

Allo stesso tempo, l'aria di combustione primaria è iniettata al di sotto della griglia, opportunamente preriscaldata tramite uno scambiatore di calore, all'incirca nella quantità stechiometrica necessaria per la combustione.

Ulteriore aria (l'aria di combustione secondaria) è iniettata nella camera al di sopra della griglia, in quantità necessaria per assicurare contemporaneamente un adeguato controllo della temperatura, adeguate condizioni di turbolenza e disponibilità di ossigeno.

Sono previsti appositamente ingressi differenziati all'inizio della camera di post-combustione, allo scopo di migliorare il grado di turbolenza.



Figura 2.4 – Forno a griglia

Nella zona prossima all'alimentazione, i rifiuti subiscono dapprima un processo d'essiccamento, in cui la frazione di acqua contenuta è parzialmente o totalmente separata dalla restante frazione solida: le sostanze

volatili che si liberano sono in gran parte costituite dall'umidità evaporata ed il rilascio di calore risulta modesto.

Il rifiuto essiccato subisce successivamente i processi di combustione e di gassificazione della componente organica, che viene convertita in una frazione gassosa ed in un residuo solido, a seconda di maggiore o minore disponibilità locale di ossigeno (proveniente fondamentalmente dall'aria primaria).

I prodotti che si sprigionano dal letto di rifiuto sono completamente ossidati nella camera sovrastante la griglia prima di essere inviati a successivi trattamenti. I residui del processo di combustione, invece, sono scaricati dalla parte finale della griglia in adeguate vasche di accumulo. Lo scarico prosegue con un nastro trasportatore annegato in acqua la cui funzione è quella di effettuare il raffreddamento delle scorie; queste vengono raccolte nella fossa scorie e prelevate con benna mordente, caricate su autocarri e smaltite in idonee discariche.

La camera di post-combustione ha lo scopo di completare l'ossidazione dei composti incombusti volatili, riducendo le concentrazioni di monossido di carbonio e di composti organici volatili nei fumi. In essa inizia il trattamento di depurazione dei fumi che deve essere effettuato prima dello scarico in atmosfera. I fumi estratti dalla camera primaria, a una temperatura di circa 1.000-1.100 °C, transitano nei canali di post-combustione per un tempo di almeno 2 secondi a temperatura superiore a 850°.

Questa tipologia di forno è quella più utilizzata nell'ambito di trattamento dei rifiuti, grazie al suo funzionamento affidabile e flessibile.

I forni a griglia offrono ulteriore flessibilità al processo poiché è possibile regolare l'andamento della velocità degli elementi mobili e/o la portata di aria di combustione alimentata nelle varie zone della griglia, modificando così le condizioni di combustione per far fronte a variazioni qualitative dell'alimentazione.

#### *2.2.2.2. Forni a letto fluido*

I forni a letto fluido (Figura 2.5) sono costituiti da una camera di combustione nella quale è inviato dal basso un forte getto di aria con materiale inerte (ad esempio, sabbia) introdotto attraverso una griglia di distribuzione e sostegno posta sul fondo. Quindi, il letto di inerte si solleva provocando la miscelazione continua tra l'aria e il combustibile, favorendo la combustione. È chiaro che per il corretto funzionamento del forno deve essere garantita una omogeneità granulometrica.

A questo punto vengono introdotti il CSS (Combustibile solido secondario) o i fanghi provenienti dalla depurazione di acque reflue (data la loro omogeneità). Non sono adatti alla combustione di rifiuti indifferenziati se questi non vengono prima sottoposti a trattamento di triturazione. Tutta la massa di rifiuti, combustibile e sabbia circola completamente all'interno della fornace.

I forni a letto fluido possono essere sia a pressione atmosferica sia in pressione. Tuttavia, l'impiego di rifiuti come combustibili porta ad avere effluenti gassosi non utilizzabili in turbina, se non dopo trattamenti di addolcimento e di abbattimento dei residui solidi.

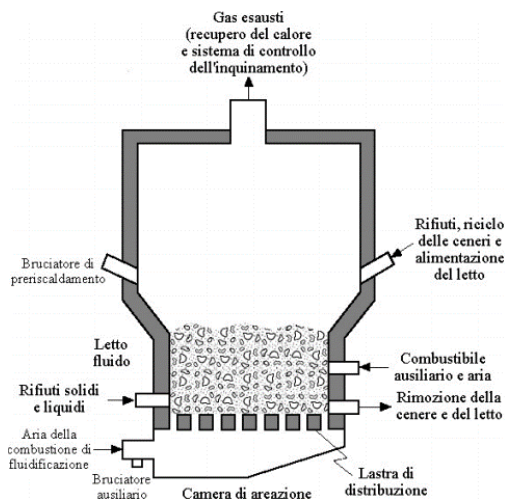


Figura 2.5 – Schema di Funzionamento del Forno a letto profondo

### 2.2.2.3. Forni a tamburo rotante

I forni a tamburo rotante sono costituiti da una prima camera di combustione che consiste in un tubo cilindro leggermente inclinato che ruota lentamente attorno al proprio asse e costruito in materiale refrattario.

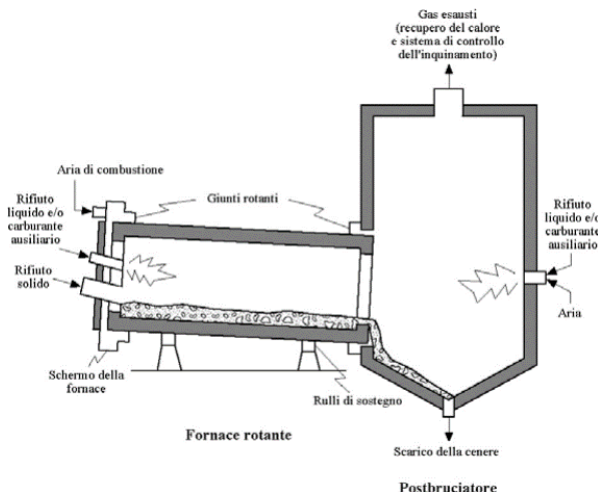


Figura 2.6 – Schema di Funzionamento del Forno a tamburo ruotante

L'alimentazione dei rifiuti è collocata in corrispondenza di una l'estremità più alta del forno, mentre lo scarico delle scorie e dei residui avviene all'estremità opposta, infatti la rotazione fa accumulare all'estremità del cilindro le ceneri e il resto della frazione non combusta solida, che viene infine raccolta all'esterno. La combustione del letto di rifiuti avviene direttamente a contatto con la parete del forno.

Allo stesso tempo è iniettata l'aria di combustione nella testata di ingresso del rifiuto o in quella di scarico, con la possibilità di proporre due configurazioni, equicorrente o in controcorrente.

I gas proseguono in una seconda camera di combustione fissa e con la finalità di portare a completamente le reazioni di ossidazione in fase gassosa.

I forni a tamburo rotante sono utilizzati per il trattamento di rifiuti industriali, quali liquidi, solidi, pastori, anche pericolosi.



Figura 2.7 –Forno a tamburo rotante

I fumi prodotti arrivano al generatore di vapore che recupera il calore sviluppato durante la combustione, raffreddandoli e producendo vapore surriscaldato. Nel dettaglio, il sistema si compone in sequenza di:

- economizzatori, che provvedono a preriscaldare l'acqua di alimento fino alla temperatura di saturazione del liquido;
- vaporizzatori che permettono la vaporizzazione del fluido;
- surriscaldatori che trasformano il vapore saturo in vapore surriscaldato.

Il vapore così prodotto viene inviato successivamente al ciclo termico per la produzione di energia elettrica.

### 2.2.3 Ciclo termico

Il vapore surriscaldato viene inviato al turboalternatore a vapore per il recupero di energia, principalmente sottoforma di energia elettrica; ma, in funzione dell'organizzazione dell'impianto, il vapore in uscita dalla turbina può essere convogliato verso gli scambiatori per la rete di teleriscaldamento per recuperare anche energia termica. L'energia elettrica prodotta dall'alternatore è utilizzata per le richieste dell'impianto e, nella parte eccedente, ceduta alla rete.

Il vapore in uscita dalla turbina è inviato ad una serie di scambiatori di calore al fine di raffreddarlo e reimmetterlo nel ciclo.

In particolare, la condensazione del vapore esausto dalle turbine e la sua re-immissione nel ciclo avviene mediante un sistema di condensazione ad aria oppure ad acqua, degasatore o torri di raffreddamento, pompe di estrazione del condensato e pompe di alimento caldaia.



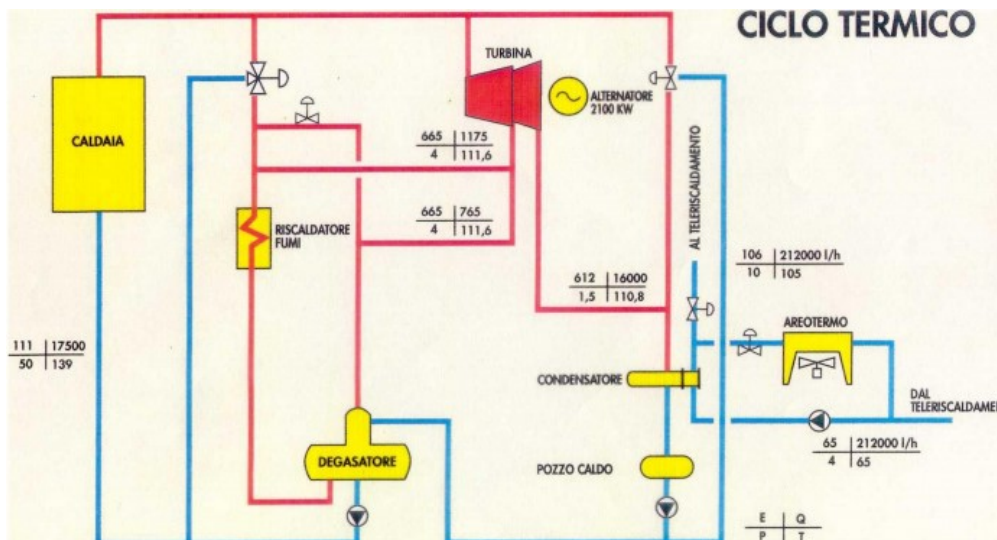


Figura 2.8 – Schema del ciclo termico di impianto

### 2.2.4 Depurazione fumi

La linea dei fumi è progettata in modo tale da minimizzare l’impatto ambientale, sia dal punto di vista delle emissioni sia dal punto di vista della sicurezza.

Al fine di garantire in modo continuo e controllato che le emissioni si mantengano al di sotto dei limiti di concentrazione previsti dalla normativa vigente, i fumi vengono opportunamente trattati, lungo tutto il percorso dalla camera di combustione al camino.

Esistono diverse configurazioni possibili della linea di trattamento fumi, le principali attività sono:

- sistema di abbattimento polveri che può essere costituito da cicloni pre-separazione degli inquinanti, da filtro a maniche per la captazione delle polveri e la filtrazione dei metalli pesanti, oppure da elettrofiltro;
- sistema di de acidificazione ed abbattimento metalli pesanti che può essere:
  - o a secco: in cui vengono iniettati carbonato di sodio  $\text{NaHCO}_3$  e carboni attivi
  - o a umido (scrubber): per l’ulteriore abbattimento degli inquinanti;
  - o a semi secco;
- un ventilatore di estrazione fumi;
- sistema di abbattimento polveri e sali residui;
- misura in continuo degli inquinanti sul grezzo
- uno scambiatore fumi/fumi posto all’ ingresso/uscita allo scopo di raffreddare i fumi in ingresso e riscaldare i fumi in uscita;
- un convogliatore dei fumi al camino.



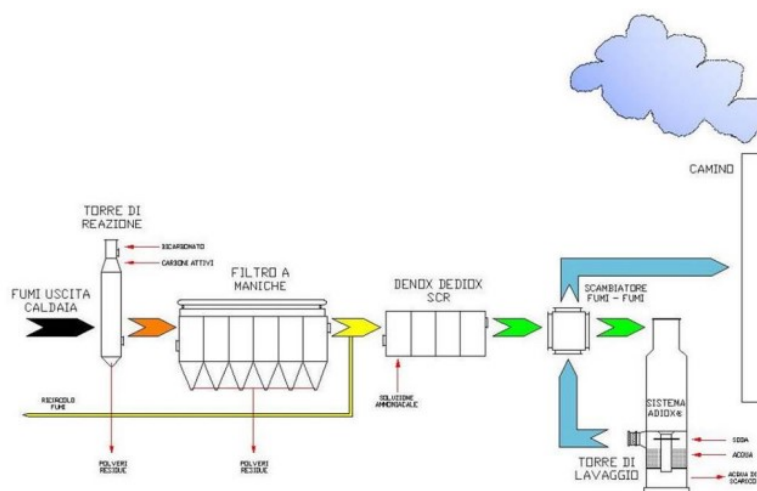


Figura 2.9 – Schema della linea di depurazione dei fumi

## 2.3 I prodotti finiti

Gli impianti di smaltimento di rifiuti sono generalmente volti al recupero energetico tramite l'incenerimento degli stessi, principalmente sottoforma di produzione di energia elettrica, ma anche di energia termica. Pertanto, la produzione erogata può essere individuata nella quantità complessiva di energia (elettrica e termica) ceduta dall'impianto alle rispettive reti.

## 2.4 Trattamento dei RSU e FORSU

Il lavoro di analisi, di cui tratta l'elaborato, è stato avviato non solo nell'ambito degli impianti di incenerimento, ma anche riguardo il processo di smaltimento dei rifiuti solidi urbani (RSU) e la frazione organica del rifiuto solido urbano (FORSU).

In particolare, sono considerati rifiuti solidi urbani i rifiuti non riciclabili e combustibili provenienti dalle economie domestiche e i rifiuti assimilabili ai RSU provenienti da industrie e artigianato [5]; mentre è classificata come frazione organica dei rifiuti urbani (FORSU) la frazione di rifiuto proveniente da cucine di utenze domestiche e mense, costituita da scarti alimentari raccolti separatamente [6].

Seppur la frazione organica dei rifiuti solidi urbani è una sezione minore dei rifiuti urbani, il processo di trattamento e smaltimento, così anche i prodotti a cui si giunge sono assolutamente differenti. Di seguito sono riportati i suddetti processi di trasformazione.

### 2.4.1 Linea di trattamento RSU

La linea di trattamento dei rifiuti urbani (RSU) si costituisce delle seguenti principali attività produttive

#### 2.4.1.1. Ricezione e preparazione delle materie prime

I mezzi in ingresso, contenenti il rifiuto indifferenziato, sono sottoposti ad un preliminare controllo, alla pesatura e successivamente indirizzati verso la zona di scarico. Seguono le fasi di pretrattamento a partire dalla

movimentazione dei rifiuti verso i triturator, che hanno la funzione di rompere i sacchi di contenimento e di sminuzzare il rifiuto, passando per l'operazione di deferrizzazione, ovvero la separazione dei materiali ferrosi attraverso un elettromagnete e giungendo alla vagliatura che provvede ad effettuare una separazione meccanica della frazione umida (sottovaglio), avente ancora una importante componente organica, dalla frazione secca (sovravaglio o sopravaglio) del rifiuto che, essendo piú leggera, tenderà a "flottare" all'interno del vaglio. La frazione secca "inorganica" generalmente viene trasferita direttamente alla sezione di raffinazione per essere avviata alla produzione di CDR/CSS/CSS-c; mentre la frazione "sottovaglio" viene conferita al bacino di carico della sezione di stabilizzazione biologica.

#### *2.4.1.2. Trattamento biologico di bioessicazione*

I rifiuti pretrattati vengono sottoposti a trattamento biologico caratterizzato dal processo di bioessicazione, che consiste nel riscaldare i rifiuti per ridurre l'umidità, e dal processo di biostabilizzazione della sostanza organica putrescibile contenuta in essi. Il processo comporta, quindi, i due seguenti effetti:

1. la stabilizzazione della parte organica attraverso la distruzione delle componenti putrescibili (carboidrati, grassi e proteine), in vista anche di un eventuale stoccaggio a lungo termine, in modo da annullare maleodoranti emissioni di biogas e polveri ed igienizzare il rifiuto;
2. la produzione di un substrato avente buone caratteristiche per la termoutilizzazione, cioè con un elevato potere calorifico.

Tutto il trattamento è eseguito all'interno di biocelle, nelle quali vengono create opportune condizioni climatiche tramite l'immissione di tre distinti flussi di aerazione: aria fresca aspirata all'interno della zona di biostabilizzazione, aria di ricircolo non raffreddata e aria di ricircolo raffreddata.

Completato il processo di bio-stabilizzazione, il materiale viene prelevato e avviato alla raffinazione per la produzione di CDR/CSS/CSS-c.

#### *2.4.1.3. Raffinazione e produzione CDR*

Il materiale bioessiccato viene inviato alla raffinazione, dove il rifiuto viene lavorato da un vaglio rotante che ha il compito di selezionare il materiale in:

- sottovaglio: costituito da materiale di piccole dimensioni, generalmente da inerti, organico stabilizzato e metalli, caratterizzato da un basso potere calorifico;
- sopravaglio: costituito da carta, plastiche, tessuti e caratterizzato da un alto potere calorifico.

Le fasi descritte attivano dei processi di trasformazione chimico-fisica che hanno come obiettivi la riduzione del volume e del peso dei rifiuti da inviare allo smaltimento finale e il recupero dei materiali e dell'energia contenuti negli stessi.

Dai rifiuti trattati vengono prodotti:

- CDR: combustibile derivante dai rifiuti
- CSS: combustibile solido secondario;
- materiale bioessiccato.

## 2.4.2 Linea di trattamento FORSU

La linea di trattamento della frazione organica del rifiuto solido urbano (FORSU) si costituisce delle seguenti principali attività produttive:

### 2.4.2.1. *-Ricezione e pretrattamento*

Il rifiuto organico viene sottoposto innanzitutto alla fase di pesatura e registrazione dei conferimenti, dopodiché scaricato all'interno dell'edificio di ricezione e stoccaggio, sezione tenuta in depressione, in modo da limitare il più possibile fuoriuscite di emissioni maleodoranti. Viene poi sottoposto a triturazione con rottura dei sacchi e miscelato con materiale strutturante (ramaglia e/o sopravaglio di seconda vagliatura).

Subisce quindi la vagliatura grossolana a mezzo di vaglio rotante e deferizzazione con elettromagnete.

Gli scarti provenienti dalla vagliatura grossolana vengono destinati alla linea di trattamento RSU, mentre i metalli ferrosi vengono separati e raccolti in appositi dispositivi.

### 2.4.2.2. *Stadio di digestione*

Il materiale pretrattato viene alimentato al digestore o fermentatore all'interno del quale viene preparata la ricetta ottimale affinché avvenga il processo biologico. Esistono differenti tecnologie che possono essere adottate in base all'organizzazione delle specifiche realtà aziendali, processo di degradazione anaerobica: a secco, semisecco o ad umido.

In ogni caso, la fase suddetta ha l'obiettivo di formare la cosiddetta "sospensione organica". Affinché la biomassa si trasformi in biogas, è necessaria l'azione di diversi tipi di microrganismi.

Per semplicità un primo gruppo di batteri dà il via al processo di degradazione, trasformando la sostanza organica in composti intermedi. Poi un secondo gruppo di batteri porta a termine il lavoro di trasformazione delle proteine, carboidrati e grassi contenuti nei rifiuti organici, producendo biogas.

All'interno del digestore il volume della sospensione organica viene mantenuto costante e il biogas che si produce viene captato per essere destinato a produrre energia elettrica e termica tramite motori di cogenerazione dedicati.

### 2.4.2.3. *Trattamento aerobico*

Dal digestore esce il cosiddetto digestato, che viene avviato in apposite centrifughe che permettono di separare l'acqua, che passa poi alla depurazione, dal residuo solido, che viene invece sottoposto ad un processo di trattamento aerobico tramite insufflazione di aria in tunnel dedicato, allo scopo di consentirne l'ossidazione e la stabilizzazione. Alla fine, si ottiene la produzione di compost che diventa un ottimo fertilizzante organico per l'agricoltura.

### 2.4.2.4. *Unità di recupero energetico*

In base all'organizzazione di ciascuna azienda, il biogas, che si produce dal processo di digestione anaerobica, può essere convogliato verso un gruppo di cogenerazione per la produzione di energia elettrica. L'energia elettrica, poi, può essere immessa in rete al netto degli autoconsumi necessari al funzionamento della sezione di digestione e degli stessi gruppi di recupero energetico.

Dai rifiuti trattati viene prodotto compost, biostabilizzato e biogas.

Purtroppo, per quanto riguarda la sezione di trattamento e smaltimento di RSU e FORSU non è stato possibile approfondire lo studio del fabbisogno energetico relativo ad ogni fase, per mancanza di dati sufficienti a formulare una valutazione significativa.

Per tale motivo, la trattazione della trasformazione di RSU e FORSU si limita alla pura descrizione del processo definito tramite le principali attività produttive e fa da punto di partenza per possibili sviluppi futuri.

## 2.5. Analisi Energetica

Dopo aver analizzato il processo di incenerimento dei rifiuti, ci si concentra in questa sezione del lavoro, sull'analisi puntuale dei consumi energetici, relativa alle singole fasi del processo di trasformazione, tramite lo studio dei vettori energetici più utilizzati [7].

Lo smaltimento dei rifiuti e l'annesso recupero energetico sono delle attività molto energivore, in quanto prevedono un sistema ad alte prestazioni che sfrutta consistenti quantità di energia elettrica, maggiormente utilizzata nelle fasi di ciclo termico e depurazione dei fumi, con consumi percentuali medi rispettivamente pari al 32,40% e al 27,16%.

L'altra voce energetica più utilizzata è quella relativa al gas naturale, per il quale vettore risulta l'attività di forno/generatore di vapore la maggiormente energivora con un consumo percentuale medio pari a 63,03%.

Risulta necessario, quindi, svolgere un'attività puntuale di analisi dei consumi per comprendere il fabbisogno energetico delle singole fasi ed in seguito individuare degli indicatori energetici in grado di valutare le prestazioni, ovvero l'efficienza, del processo [8].

### 2.5.1. Individuazione delle attività principali, dei servizi ausiliari e generali

Ai fini connessi alla seguente analisi energetica, nell'intento di redigere un documento utile ad una conoscenza più dettagliata ed approfondita dei principali centri di consumo di energia interni ai confini d'impianto, si considerano le definizioni di "Attività Principali", "Servizi Ausiliari" e "Servizi Generali" contenute nelle linee guida

In particolare, sono definite attività principali:

1. Movimentazione e alimentazione dei rifiuti;
2. Forno/generatore di vapore;
3. Ciclo termico;
4. Depurazione dei fumi.

Le principali utenze che costituiscono i servizi ausiliari sono:

- Produzione acqua demineralizzata;
- Produzione di aria compressa;
- Centrale di pompaggio;
- Movimentazione materiali;
- Ventilazione;
- Pulizia filtro a maniche;
- Sistema antincendio.

Invece, i servizi generali comprendono:

- Climatizzazione;
- Illuminazione;
- Servizi di stabilimento;

- Uffici;
- Officina di manutenzione

### 2.5.2. Panoramica generale dell'analisi e definizione dei vettori energetici

L'attività di analisi è stata svolta su un campione costituito da 16 aziende, le quali hanno reso disponibili i propri dati, al fine di poter permettere l'esecuzione dell'analisi energetica relativa agli impianti di incenerimento.

Si definiscono innanzitutto i vettori energetici che maggiormente contribuiscono al processo produttivo:

- energia elettrica;
- gas naturale;
- gasolio.

In solo due diagnosi sono presenti anche i vettori energetici di energia termica e GPL che, quindi, vengono trascurati dalla trattazione dettagliata che segue.

Inoltre, bisogna riportare la seguente suddivisione dei vettori coinvolti:

- vettori in ingresso al processo produttivo: quelli acquistati dall'esterno;
- vettori in uscita dal processo produttivo: quelli prodotti dal processo di trasformazione e destinati all'utilizzo esterno;
- vettori autoprodotti dal sistema produttivo: quelli derivanti dalla trasformazione interna e destinati all'utilizzo dello stesso processo produttivo.

In particolare, si specifica che il consumo di energia elettrica, che viene riportato nella seguente analisi, ingloba l'aliquota acquistata dall'esterno e quella autoprodotta.

Si riporta una tabella riassuntiva relativa al consumo energetico in termini percentuali ottenuta dall'analisi dei consumi delle singole aziende:

	%	media aritmetica	media pesata
Energia elettrica	100%	73,71%	77,78%
Gas naturale	94%	24,37%	19,80%
Gasolio	75%	1,29%	1,36%
GPL	6%	0,05%	>0,01%
Energia termica	6%	39,42%	1,06%

Figura 2.10 – Tabella riassuntiva dei consumi energetici relativi a impianti di incenerimento

È opportuno chiarire le informazioni trasferite dalla tabella: la seconda colonna indica la percentuale di aziende che utilizzano i relativi vettori, la terza riporta la media aritmetica valutata quindi sul numero di aziende

che utilizza il vettore preso in riferimento, la quarta indica la media pesata valutata rispetto all’apporto energetico delle singole aziende.

Sulla base di questi dati, è stato possibile costruire un diagramma a torta che permette di chiarire la suddivisione del fabbisogno energetico e di evidenziare i vettori maggiormente utilizzati:

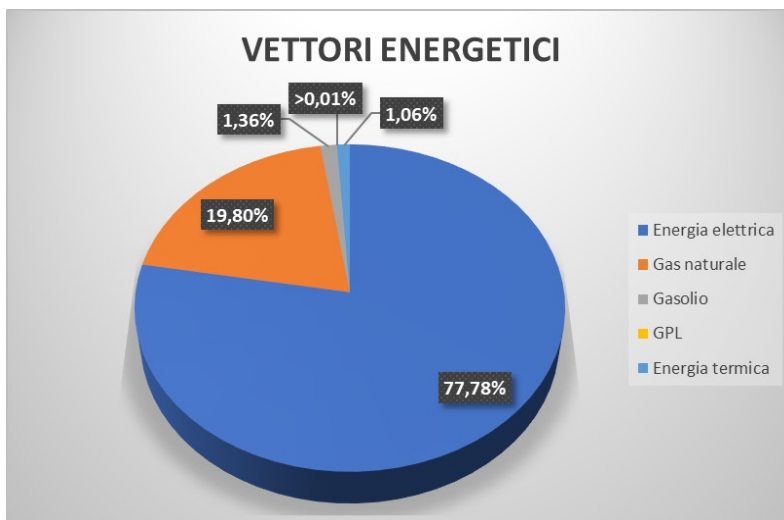


Figura 2.11 – Diagramma a torta dei vettori energetici

È chiaro il maggiore utilizzo dei vettori energetici di energia elettrica e di gas naturale per i quali si dettaglia il consumo tra le diverse fasi del processo.

Il seguente grafico a torta evidenzia la suddivisione del fabbisogno energetico elettrico per le attività svolte:

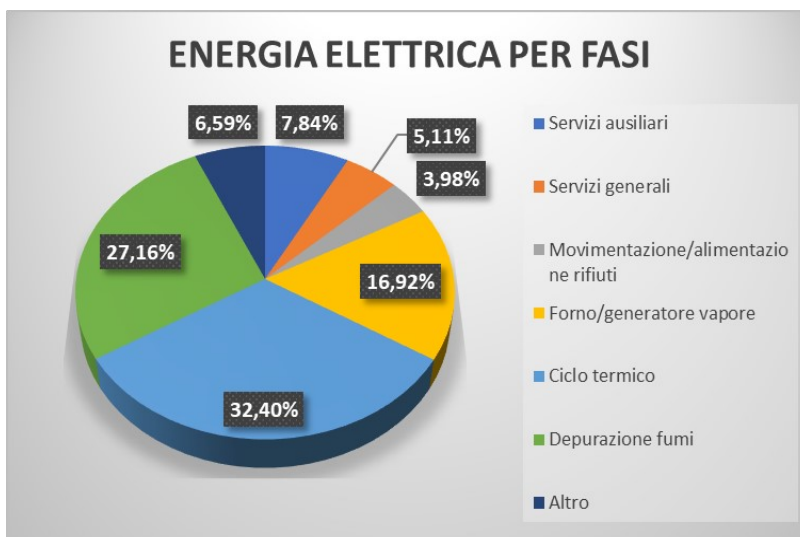


Figura 2.12 – Diagramma a torta dell’utilizzo di energia elettrica per fasi

In relazione al vettore energetico di energia elettrica, le fasi più energivore risultano essere il ciclo termico e la depurazione dei fumi.

Si riporta anche il diagramma a torta relativo al consumo di gas naturale tra le diverse attività:

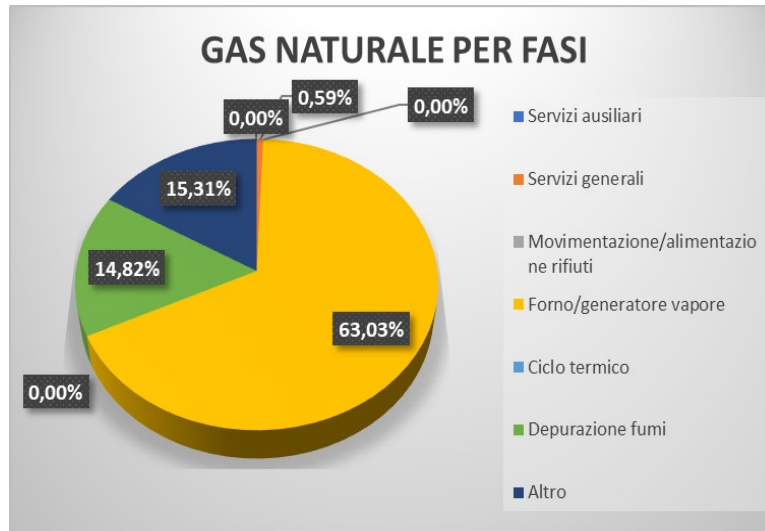


Figura 2.13 – Diagramma a torta dell’utilizzo di gas naturale per fasi

Dal grafico relativo al gas naturale, risulta essere maggiormente energivora l’attività svolta dal forno e dal generatore di vapore.

Per avere una chiara visione della suddivisione del fabbisogno energetico tra le fasi di trasformazione, si riporta in seguito la rappresentazione del processo produttivo in cui è specificato il consumo elettrico percentuale:

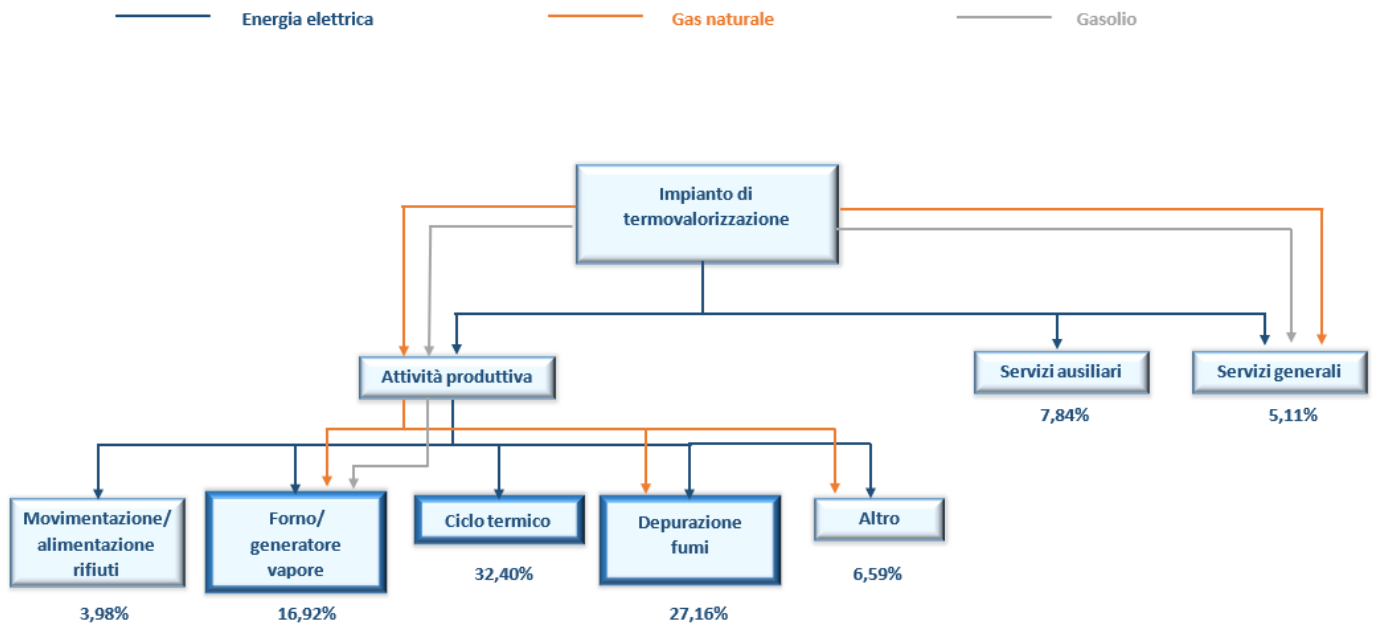


Figura 2.14 –Diagramma Fasi principali –Vettori energetici

La fase nominata “Altro” comprende delle attività differenziate aggiuntive la cui trattazione viene trascurata nella presente analisi.

### 2.5.3. Mappatura del processo

A questo punto è necessario definire la sequenzialità tra le differenti fasi e identificare per ognuna l'input e l'output per effettuarne l'analisi energetica.

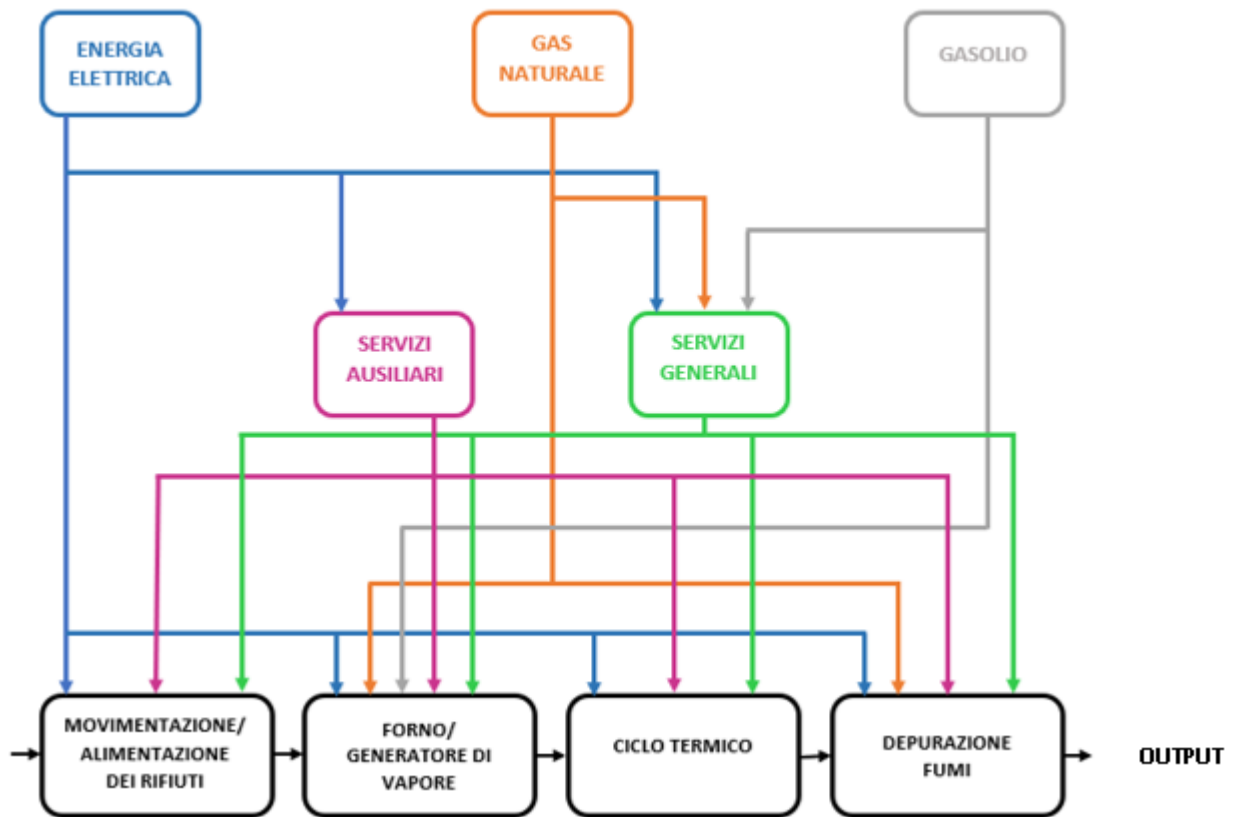


Figura 2.15 – Schema impatti servizi Ausiliari e generali sulle fasi produttive

È evidente il maggiore utilizzo dell'energia elettrica in quasi tutte le fasi del processo, seguito da quello del gas naturale.

Il gasolio, invece, è caratterizzato da un modesto consumo come carburante per i veicoli di movimentazione sia interna che esterna al sito e viene utilizzato per effettuare prove periodiche del gruppo elettrogeno e delle motopompe.

A questo punto si procede con l'analisi puntuale relativa alle singole fasi del processo utilizzando il metodo di mappatura del tipo IDEF-0 [9], descritta nel Report 2019 e considerando anche i fabbisogni energetici di servizi ausiliari e generali, completando in questo modo l'analisi [10].



### 2.5.3.1. *Movimentazione/alimentazione dei rifiuti*

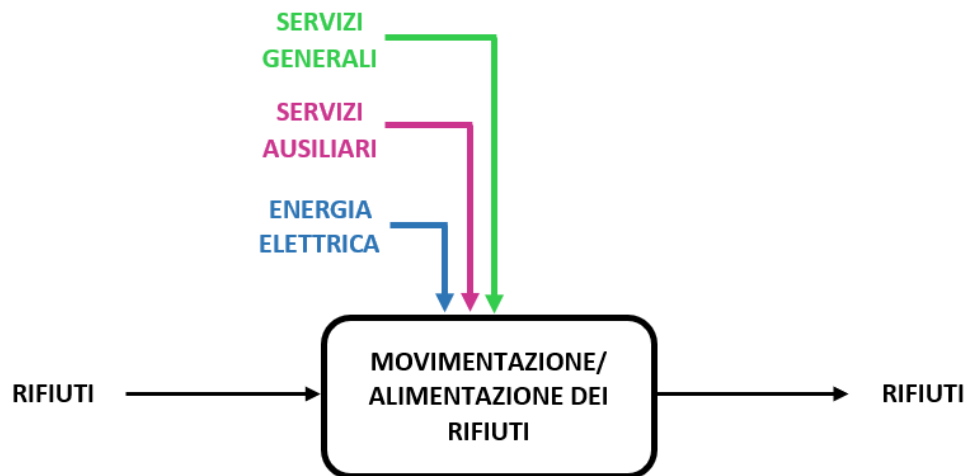


Figura 2.16 – IDEF 0 Movimentazione/Alimentazione rifiuti

– INPUT:

l'input della prima fase del processo è rappresentato dai rifiuti conferiti, urbani e speciali non pericolosi.

– OUTPUT:

l'output è sempre rappresentato dai rifiuti perché questi, in tale fase, vengono semplicemente trasferiti da una zona all'altra dello stabilimento per essere poi immessi alle fasi produttive.

– ATTREZZATURE PRINCIPALI:

- Sistemi di scarico rifiuti
- Sistema misura peso benna;
- Sistema di movimentazione carroponti;
- Sistema di triturazione e/o apertura balle (eventuali)
- Benna a polipo;
- Sistema alimentazione CSS;
- Trasporti e dosaggio CSS in camera di combustione;
- Nastro trasportatore;
- Tramogge di alimentazione.

– CONSUMI ENERGETICI:

in questa fase l'energia elettrica viene utilizzata per azionare le utenze prima citate, che preparano le materie prime alle attività produttive successive.

I servizi ausiliari danno il proprio contributo per permettere la movimentazione dei rifiuti.

I servizi generali, così come la stessa definizione riporta, offrono un apporto continuo e costante non solo alla suddetta fase, ma a tutte le attività del processo di trasformazione, tramite gli impianti di illuminazione, di condizionamento, di supporto ad uffici ed officine di manutenzione.

### 2.5.3.2. *Forno/ generatore di vapore*

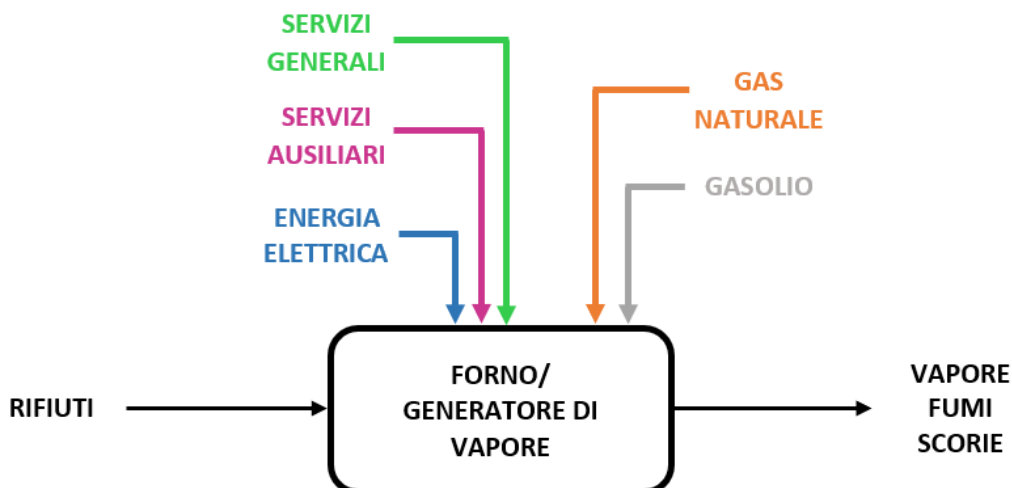


Figura 2.17 – IDEF 0 Forno/ Generatore Vapore

– INPUT:

all'ingresso del forno si hanno i rifiuti urbani e speciali non pericolosi.

– OUTPUT:

a seguito della combustione i rifiuti sono trasformati in: fumi e scorie. Il calore dei fumi viene recuperato dal generatore di vapore, che quindi produce vapore.

– ATTREZZATURE PRINCIPALI:

- Sistema di ventilazione aria primaria;
- Sistema di ventilazione aria secondaria;
- Sistema di ventilazione ricircolo aria fumi;
- Sistema di movimentazione griglia (centralina Oleodinamica);
- Sistema di raffreddamento griglia;
- Bruciatori di post-combustione;
- Sistema di pulizia caldaia;
- Sistema di evacuazione, spegnimento, trasporto e stoccaggio scorie;
- Circuito di raffreddamento.

– CONSUMI ENERGETICI:

in questa fase il vettore energetico più utilizzato è quello relativo al gas naturale che viene impiegato nelle fasi di avviamento e spegnimento dell'impianto e per il supporto alla combustione per garantire il rispetto dei limiti autorizzativi di emissioni al camino. Infatti, sono presenti dei bruciatori ausiliari a gas naturale che entrano in funzione qualora la temperatura dei fumi tenda a scendere al di sotto di 850°C per ridurre la formazione di inquinanti (diossine, residui incombusti, ecc.). Tale quantitativo viene di fatto recuperato a livello energetico in quanto contribuisce alla produzione vapore e quindi di energia elettrica.

Il consumo di gas naturale in post-combustione dipende principalmente dall'andamento del PCI dei rifiuti, mentre quello per avviamenti dipende dal numero delle fermate per i lavori di manutenzione e delle ore di preriscaldamento impiegate per essiccare i refrattari di nuova installazione in camera di combustione.

I servizi ausiliari coadiuvano questa fase grazie all'uso dei sistemi di aria primaria, di aria secondaria e ricircolo dei fumi. Il sistema di aria primaria consente la combustione, immettendo aria preriscaldata in uno scambiatore di calore e dosata in maniera automatica e differenziata in funzione delle effettive esigenze per ogni zona di combustione.

Il sistema di aria secondaria ha la finalità di dosare la temperatura raggiunta dai fumi e di garantire contemporaneamente adeguate condizioni di turbolenza e disponibilità di ossigeno per sostenere la combustione.

Il riciclo dei fumi serve a diminuire l'emissione di ossidi di azoto (NOx) reintroducendo ulteriore ossigeno in camera di combustione senza aumentare la quantità di azoto.

I servizi generali danno il proprio contributo tramite i sistemi di illuminazione, di condizionamento, di supporto ad uffici ed officine di manutenzione.

### 2.5.3.3. *Il ciclo termico*

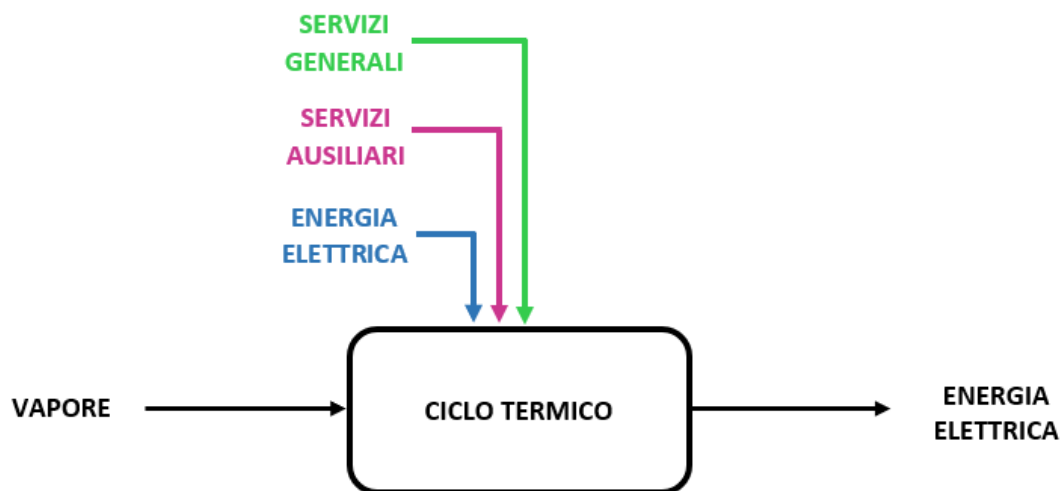


Figura 2.18 – IDEF 0 Ciclo termico

- INPUT:  
in ingresso si trova il vapore prodotto dal generatore di vapore posto nella fase precedente.
- OUTPUT:  
in uscita è presente l'energia elettrica che è stata prodotta al partire dal vapore tramite l'utilizzo di un turboalternatore.
- ATTREZZATURE PRINCIPALI:
  - o Sistema di condensazione;
  - o Sistema di estrazione condense;
  - o Sistema di acqua alimento caldaia;
  - o Degasatore;
  - o Quadro controllo turboalternatore.

– CONSUMI ENERGETICI:

la fase presa in esame è la più energivora dal punto di vista del vettore energetico dell'energia elettrica che è impiegata per azionare le utenze coinvolte.

I servizi ausiliari sono notevolmente impiegati tramite l'utilizzo dei sistemi di trattamento delle acque al fine di reimmettere nel ciclo il vapore raffreddato.

I servizi generali danno il proprio contributo tramite i sistemi di illuminazione, di condizionamento, di supporto ad uffici ed officine di manutenzione.

2.5.3.4. *Depurazione dei fumi*

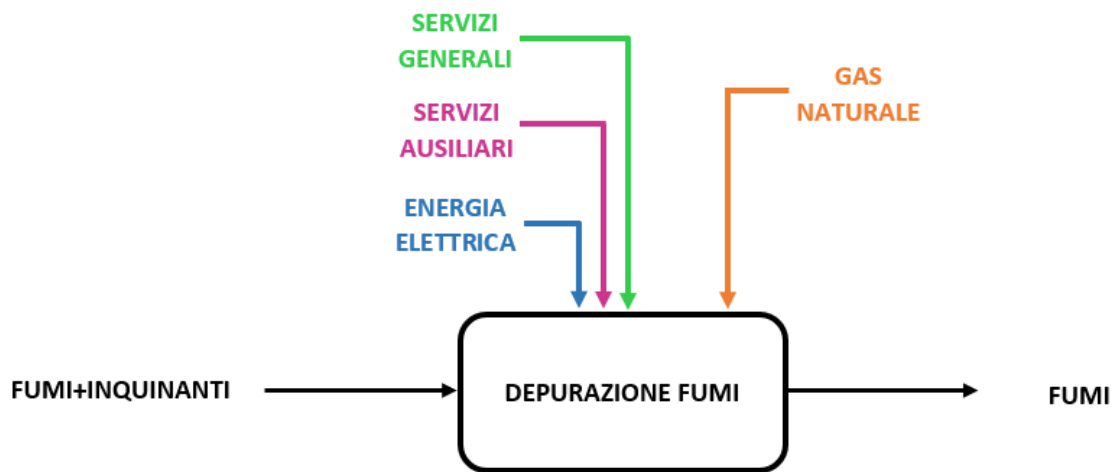


Figura 2.19 – IDEF 0 Depurazione fumi

– INPUT:

in ingresso ci sono i fumi con le sostanze inquinanti.

– OUTPUT:

in uscita si trovano i fumi depurati dagli inquinanti e pronto ad essere immessi nell'ambiente rispettando le normative vigenti.

– ATTREZZATURE PRINCIPALI:

- Sistema di estrazione fumi;
- Sistema di rimozione polveri;
- Sistema di abbattimento inquinanti;
- Sistema di stoccaggio, alimentazione e dosaggio chemicals:
  - Depurcal;
  - Bicarbonato + carbone attivo;
  - Ammoniaca;

- Scrubber + dosaggio Soda;
- Sistemi di monitoraggio qualità fumi SME;
- Sistema di convogliamento, trasporto e stoccaggio ceneri.

– **CONSUMI ENERGETICI:**

la suddetta fase è la seconda più energivora dal punto di vista dell'energia elettrica che viene impiegata per l'azionamento delle varie attrezzature coinvolte. È presente, per alcune imprese, un consistente utilizzo del gas naturale utilizzato per il sistema di preriscaldamento dei fumi a monte del reattore DENOX SCR.

I servizi ausiliari sono coinvolti in tale fase tramite l'utilizzo del sistema di trattamento dei fumi. L'utenza più rappresentativa della sezione in esame è la centrale ad aria compressa impiegata nella pulizia del filtro a maniche e nella rimozione delle polveri.

I servizi generali danno il proprio contributo tramite i sistemi di illuminazione, di condizionamento, di supporto ad uffici ed officine di manutenzione.

### 2.5.3.5. *I servizi ausiliari*

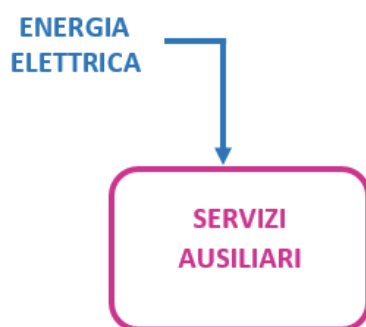


Figura 2.20 – IDEF 0 Servizi Ausiliari

Sono definiti “Servizi ausiliari” tutti quei servizi che supportano le attività principali di processo ed assolvono funzioni necessarie alla buona riuscita dello stesso.

Bisogna delineare i principali utilizzi di tali servizi al fine di comprendere l'impatto energetico complessivo del processo.

Le utenze principali dei servizi ausiliari sono le utenze maggiormente energivore, ossia la produzione di aria compressa e di acqua demineralizzata:

– **Impianto per aria compressa**

È presente in ogni stabilimento delle aziende analizzate in quanto il suo apporto è essenziale per la combustione nel forno, per il suo mantenimento garantendo adeguate condizioni di turbolenza e disponibilità di ossigeno, e in parte per il trasporto pneumatico.

Per l'azionamento necessita dell'energia elettrica.

– **Produzione di acqua demineralizzata**

L'impianto di produzione di acqua demineralizzata è utilizzato per generare acqua che abbia determinate qualità per evitare la corrosione o l'incrostazione delle apparecchiature durante il processo di produzione del vapore.

Se i parametri chimici dell'acqua non vengono rispettati, la turbina o la caldaia possono danneggiarsi, determinando un aumento dei costi dovuto all'arresto della produzione e alla sostituzione dei componenti. L'acqua deve essere trattata, in genere rimuovendo tutti i sali contenuti attraverso la demineralizzazione.

Per il funzionamento necessita dell'energia elettrica.

– **Impianto per trattamento dei fumi**

Al fine di rispettare le normative vigenti riguardo i fumi da immettere nell'ambiente, è predisposto un sistema di trattamento dei fumi lungo il processo.

Per quanto riguarda la rimozione delle polveri, essa viene effettuata per lo più per via meccanica, per mezzo di apparecchiature dedicate allo scopo, costituite da:

- Cicloni: utilizzabili solo nella fase di pre-depurazione delle polveri e non sufficienti da soli a rispettare i limiti vigenti;
- Filtri elettrostatici (a secco e ad umido): utilizzati per la possibilità di trattare fumi in ampio campo di temperature e perché garantiscono bassi livelli di concentrazioni in uscita;
- Filtri a maniche: anch'essi determinano bassi livelli di concentrazioni in uscita e, inoltre, partecipano anche all'abbattimento degli inquinanti acidi.

L'impianto di trattamento dei fumi comprende anche i sistemi di depurazione degli inquinanti contenuti nei fumi, tramite la loro neutralizzazione con opportuni reagenti.

I processi più utilizzati possono essere classificati, in funzione del principio chimico-fisico di trattamento che li caratterizza, in:

- Processi di filtrazione/adsorbimento ("a secco", "a semisecco");
- Processi di assorbimento ("ad umido", eventualmente senza scarichi liquidi e/o con l'impiego di reagenti specifici);
- Processi di adsorbimento specifici ("a secco" o "a semisecco" con iniezione di carbone attivo o coke, "polishing" finale con iniezione di carbone e filtrazione, a valle di un sistema "ad umido");
- Processi riduttivi/ossidativi, quali la riduzione degli ossidi di azoto effettuata per via catalitica ("DeNOx SCR") o non catalitica ("DeNOx SNCR").

Per il funzionamento necessita dell'energia elettrica.

– **Impianto per le acque di raffreddamento**

L'impianto per le acque di raffreddamento è impiegato per produrre acqua industriale raffreddata che transita nel fascio tubiero di uno scambiatore di calore, il quale condensa il vapore in uscita dalla turbina.

La portata dell'acqua di raffreddamento dipende dallo scambiatore di calore e, naturalmente, dal volume del campione d'acqua necessario per alimentare tutti gli analizzatori. È possibile utilizzare

anche altri tipi di acqua, meno trattata, a seconda della sua provenienza (di superficie, di fiume, municipale e così via).

Per il funzionamento necessita dell'energia elettrica.

– **Ventilatori**

I ventilatori assolvono una serie di attività fondamentali per il processo, a partire dall'avanfossa in cui garantiscono la circolazione di aria, proseguendo con i ventilatori di aria primaria e secondaria nel forno per assicurare un buon grado di turbolenza e consentire la combustione. Sono utilizzati poi i ventilatori di raffreddamento griglie, ventilatori per il ricircolo e il trasporto dei fumi, in genere in coda all'impianto per evitare che il particolato li danneggi e per mantenere l'impianto in depressione sia al punto di presa fumi che in camera di combustione.

Per il funzionamento necessita dell'energia elettrica.

– **Impianto di pompaggio**

L'impianto di pompaggio è impiegato per convogliare l'acqua di raffreddamento nella griglia del forno e nella centralina oleodinamica, per alimentare le caldaie, per estrarre il condensato generato da esse e per permettere la circolazione dell'acqua nelle torri di raffreddamento (quando presenti).

Per il funzionamento necessita dell'energia elettrica.

2.5.3.6. *I servizi generali*

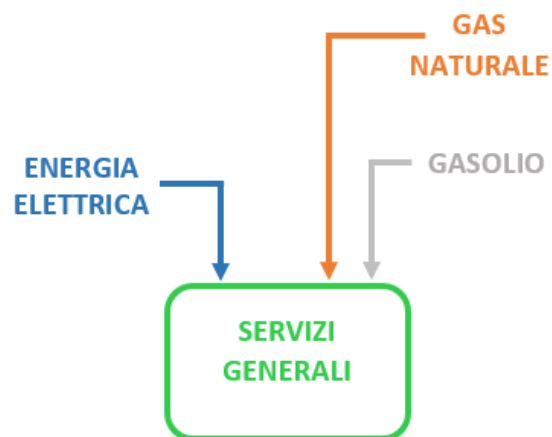


Figura 2.21 – IDEF 0 Servizi Generali

Sono definiti “Servizi generali” tutti quei servizi relativi al processo produttivo/servizio fornito, ma non strettamente correlate ad esse e i cui consumi sono sostanzialmente indipendenti dal processo produttivo di stabilimento, ma sono più correlate a fattori ambientali e climatici.

Si tratta principalmente di:

- Impianti di illuminazione: garantiscono l'illuminazione interna ed esterna allo stabilimento, quindi nei magazzini e nei piazzali;

- Impianti di condizionamento: forniscono sia riscaldamento che raffrescamento degli ambienti. In particolare, per il riscaldamento invernale, vengono impiegate caldaie e generatori di calore che producono acqua calda sanitaria. Invece per il raffrescamento estivo si utilizzano le unità che garantiscono una climatizzazione continua di alcuni locali tecnici;
- Servizi di stabilimento, uffici e officina di manutenzione: si tratta di tutte le utenze che permettono il funzionamento del sito, degli uffici e dell'officina meccanica ed elettrica dello stabilimento.

L'energia elettrica è ovviamente impiegata in tutte le attività; mentre il gas naturale viene utilizzato per il riscaldamento e il gasolio sia per effettuare prove sui gruppi elettrogeni sia come carburante per i mezzi di trasporto e attrezzature.



## 2.6. Realizzazione del cruscotto di monitoraggio

Una volta studiati i processi produttivi, sono state definite le formule per gli indicatori teorici e contattate le aziende per reperire le informazioni necessarie al calcolo. Data la mole di dati, è stato fondamentale trattarli e suddividerli per semplificare il lavoro, per cui quest'ultima fase è stata organizzata seguendo i tre step mostrati in figura.

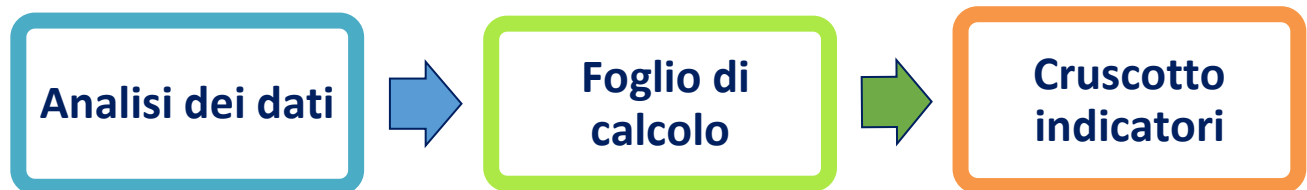


Figura 2.22 – Passi necessari allo sviluppo del cruscotto

È stata necessaria anzitutto un'analisi dei dati per suddividerli in base alla loro variabilità e frequenza di acquisizione; in seguito, è stato possibile predisporre un foglio elettronico per agevolare e strutturare la raccolta dati e per rendere più immediata e semplice la lettura delle informazioni di riepilogo, presente in allegato con il nome di "Database Incenerimento Rifiuti".

I valori ottenuti dalle formule teoriche risultano essere di riferimento e rappresentano i valori a cui le aziende dovrebbero tendere per ottimizzare i propri consumi. Questi dati di riferimento non sono presenti in letteratura, e spesso non è facile per le aziende del settore reperirli, per questo motivo è di fondamentale importanza l'analisi svolta. Una volta adeguate le unità di misura, gli indicatori saranno comparati con quelli che sono i consumi reali delle aziende e resi fruibili attraverso la realizzazione un cruscotto di monitoraggio. Questo confronto permetterà a ciascuna realtà operativa di effettuare un'autodiagnosi e approfondire le cause di inefficienza nei periodi in cui gli indicatori e i consumi risulteranno difforni. Dal punto di vista software la realizzazione del cruscotto è stata effettuata mediante l'applicativo di analisi aziendale "Power BI" di Microsoft.

È importante precisare che, per motivi di privacy, non potranno essere mostrati dati appartenenti ad alcuna azienda o ente, quelli mostrati nei paragrafi successivi a scopo esemplificativo saranno dati verosimili ma puramente indicativi.

### 2.6.1. Inserimento dei dati

I dati necessari al calcolo sono stati forniti dal CINTEST e possono essere classificati come segue:

- **Dati statici:** sono i dati che non cambiano o che cambiano di rado, valori caratteristici dei materiali e/o dell'impianto, temperature non variabili
- **Dati dinamici:** sono i dati che variano di continuo, valori dipendenti dalle temperature o semplicemente variabili nel tempo, come i kg di materiali utilizzati. Questi subiscono una frequenza di variazione genericamente mensile.

Sulla base di quanto detto è stato realizzato un foglio di raccolta dati da consegnare alle aziende, mostrato in figura e presente in allegato con il nome di “Foglio raccolta dati Incenerimento Rifiuti”. Le aziende potranno inserire I dati necessari al calcolo degli indicatori, specificando se questi siano statici o dinamici.

	Informazioni necessarie	Unità di mi	Dati Processo 1		Dati Processo 2		Dati Processo 3		Dati Processo 4	
			Statico/D	Valore	Stat/Din	Valore	Stat/Din	Valore	Stat/Din	Valore
Forno/ Generatore di vapore	cp fumi	kJ/kg K								
	T minima fumi	°C								
	Hi rifiuti	kJ/kg								
	Hi combustibile ausiliari	kJ/kg								
	massa rifiuti bruciati	kg								
	massa combustibile ausiliari	kg								
	massa fumi	kg								
	Temperatura ambiente	°C								
Ciclo termico (EE+ET)	T minima refrigerante	°C								
	T adiabatica di fiamma	°C								
Forno/Generat ore di vapore per aggiunta	massa fumi prodotta	kg								
	T riferimento in CC	°C								
	T adiabatica di fiamma	°C								
Trattamento fumi	Temperatura fumi per SCR	°C								
	Temperatura in uscita filtro	°C								

Figura 2.23 – Foglio di raccolta dati Incenerimento Rifiuti

Ciascuna azienda potrebbe avere più linee di processo, per cui sono presenti più colonne, e per ciascun processo oltre al valore va inserito anche “statico” o “dinamico” a seconda della variabilità del dato.

I dati ottenuti vengono caricati su di un ulteriore foglio Excel presenti in allegato con il nome di “database Incenerimento Rifiuti” e successivamente trasferiti ad un software necessario per la rappresentazione degli indicatori; se si volessero aggiornare dati già esistenti o aggiungerne di nuovi, sarebbe possibile farlo inserendo manualmente i dati, ciascun utilizzatore dello strumento lo potrà personalizzare in base alle proprie esigenze e caratteristiche di produzione.

Il database per la fase di produzione è mostrato in figura ed è evidenziata una suddivisione fra i dati relativi al materiale e quelli relativi al processo. Produttivo. A titolo esemplificativo vengono mostrati due dei 4 database relativi ai 5 indicatori (il database degli indicatori relativi al ciclo termico è condiviso).

Oltre ai dati mostrati è possibile aggiungere ulteriori colonne in cui specificare il consumo reale e/o un valore di benchmark. Quando il valore di benchmark inserito è diverso da zero, viene utilizzato in sostituzione all’indicatore calcolato. Nel in cui il benchmark sia posto pari a zero, lo strumento interpreterà l’assenza di dati dall’esterno e procederà al calcolo in automatico del valore di benchmark come media dei valori dell’indicatore sperimentati in un determinato orizzonte temporale.

Month	Dati statici				Dati dinamici			
	cp fumi	T min fumi	Hi rifiuto [kJ/kg]	Hi comb aux [kJ/kg]	massa rifiuti bruciati [kg]	massa comb aux [kg]	massa fumi [kg]	T0
gen 19	1,10	1110,00	41000,00	8000,00	0,18	0,20	0,50	23,00
feb 19	1,10	1110,00	41000,00	8000,00	0,13	0,20	0,50	24,00
marzo 19	1,10	1110,00	41000,00	8000,00	0,11	0,20	0,50	17,00
apr 19	1,10	1110,00	41000,00	8000,00	0,18	0,20	0,50	23,00
mag 19	1,10	1110,00	41000,00	8000,00	0,10	0,20	0,50	18,00
giu 19	1,10	1110,00	41000,00	8000,00	0,21	0,20	0,50	21,00
lug 19	1,10	1110,00	41000,00	8000,00	0,16	0,20	0,50	22,00
ago 19	1,10	1110,00	41000,00	8000,00	0,21	0,20	0,50	17,00
set 19	1,10	1110,00	41000,00	8000,00	0,12	0,20	0,50	20,00
ott 19	1,10	1110,00	41000,00	8000,00	0,17	0,20	0,50	22,00
nov 19	1,10	1110,00	41000,00	8000,00	0,19	0,20	0,50	19,00
dic 19	1,10	1110,00	41000,00	8000,00	0,12	0,20	0,50	19,00
gen 20	1,10	1110,00	41000,00	8000,00	0,20	0,20	0,50	23,00
feb 20	1,10	1110,00	41000,00	8000,00	0,11	0,20	0,50	20,00
marzo 20	1,10	1110,00	41000,00	8000,00	0,14	0,20	0,50	17,00
apr 20	1,10	1110,00	41000,00	8000,00	0,13	0,20	0,50	24,00
mag 20	1,10	1110,00	41000,00	8000,00	0,13	0,20	0,50	21,00
giu 20	1,10	1110,00	41000,00	8000,00	0,19	0,20	0,50	16,00
lug 20	1,10	1110,00	41000,00	8000,00	0,20	0,20	0,50	16,00
ago 20	1,10	1110,00	41000,00	8000,00	0,12	0,20	0,50	24,00
set 20	1,10	1110,00	41000,00	8000,00	0,11	0,20	0,50	25,00
ott 20	1,10	1110,00	41000,00	8000,00	0,12	0,20	0,50	18,00
nov 20	1,10	1110,00	41000,00	8000,00	0,17	0,20	0,50	17,00
dic 20	1,10	1110,00	41000,00	8000,00	0,12	0,20	0,50	25,00

Figura 2.24 – Database Fase Generatore Vapore

Month	Dati dinamici		Dati Reali	
	Tmin	Tmax	Consumo EE Ciclo termico	Q rec
gen 19	34,00	2164,00	3310,00	5620,00
feb 19	25,00	2192,00	2973,00	5579,00
marzo 19	25,00	2192,00	3623,00	5830,00
apr 19	23,00	2052,00	3531,00	5644,00
mag 19	27,00	2068,00	3831,00	5705,00
giu 19	20,00	2028,00	2881,00	5977,00
lug 19	23,00	2034,00	2955,00	5926,00
ago 19	31,00	2191,00	2854,00	5868,00
set 19	22,00	2129,00	3293,00	5773,00
ott 19	35,00	2160,00	3028,00	5644,00
nov 19	22,00	2154,00	3622,00	5920,00
dic 19	29,00	2126,00	3568,00	5985,00
gen 20	30,00	2059,00	2948,00	5757,00
feb 20	31,00	2175,00	3769,00	5965,00
marzo 20	33,00	2037,00	3600,00	5534,00
apr 20	21,00	2013,00	3147,00	5892,00
mag 20	24,00	2111,00	3466,00	5794,00
giu 20	31,00	2036,00	2877,00	5753,00
lug 20	24,00	2043,00	3819,00	5642,00
ago 20	30,00	2199,00	3428,00	5642,00
set 20	20,00	2118,00	3424,00	5543,00
ott 20	31,00	2078,00	3233,00	5787,00
nov 20	26,00	2157,00	3231,00	5989,00
dic 20	28,00	2058,00	3158,00	5531,00

Figura 2.25 – Database Fase Ciclo Termico

### 2.6.2. Il foglio di calcolo

La realizzazione del foglio di calcolo ha lo scopo di strutturare e sistematizzare il patrimonio informativo aziendale, semplificando la fase di raccolta dei dati e consentendo una migliore comprensibilità e consultabilità delle informazioni al fine di rendere più efficaci e veloci le successive attività previste dal progetto. Esso è stato strutturato sulla base dei dati raccolti grazie al foglio Excel citato in precedenza, a causa dell'assenza dei sopralluoghi previsti. Il foglio è presente in allegato al documento con il nome di "Database Incenerimento rifiuti"

Per il settore incenerimento sono state analizzate 3 fasi, suddivise in 5 indicatori: Forno/generatore di vapore, ciclo termico e trattamento de rifiuti.

Suddivisi i dati, adeguate le unità di misura, per garantire una visualizzazione chiara e di semplice comprensione è stato utilizzato il software Power-BI, che come già accennato fa parte di una famiglia di strumenti di business intelligence di Microsoft che permette, a partire dai dati aziendali, di generare report e quindi informazioni a supporto delle decisioni. È possibile ricevere in input dati da differenti fonti, tra le quali Excel, come si vede in figura evidenziato in blu.

In figura è possibile osservare come si presenta una parte del database del software la cui visualizzazione è simile ad Excel. Questo database è accessibile selezionando la seconda icona che troviamo in alto a sinistra nello strumento, cerchiato in rosso.

È fondamentale nella prima colonna indicare il mese e l'anno di riferimento o la data per esteso se si tratta di una cadenza quotidiana, seguono i dati relativi al materiale ed infine quelli di processo. La colonna dell'indicatore è semplicemente realizzata implementando la formula nella barra superiore, evidenziata in verde.

Month	Calore chimico	Calore latente miscela	Cp Scorie	cp uscita gas	cp aria ingresso	Cp met uscita	massa scorie	massa aria in	massa gas in uscita	mi
gennaio 2019	20	2,2	1,5	1,1	1	1,9	0,5	0,2	0,3	
febbraio 2019	20	2,2	1,5	1,1	1	1,9	0,5	0,2	0,3	
marzo 2019	20	2,2	1,5	1,1	1	1,9	0,5	0,2	0,3	
aprile 2019	20	2,2	1,5	1,1	1	1,9	0,5	0,2	0,3	
maggio 2019	20	2,2	1,5	1,1	1	1,9	0,5	0,2	0,3	
giugno 2019	20	2,2	1,5	1,1	1	1,9	0,5	0,2	0,3	
luglio 2019	20	2,2	1,5	1,1	1	1,9	0,5	0,2	0,3	
agosto 2019	20	2,2	1,5	1,1	1	1,9	0,5	0,2	0,3	
settembre 2019	20	2,2	1,5	1,1	1	1,9	0,5	0,2	0,3	
ottobre 2019	20	2,2	1,5	1,1	1	1,9	0,5	0,2	0,3	
novembre 2019	20	2,2	1,5	1,1	1	1,9	0,5	0,2	0,3	
dicembre 2019	20	2,2	1,5	1,1	1	1,9	0,5	0,2	0,3	
gennaio 2020	20	2,2	1,5	1,1	1	1,9	0,5	0,2	0,3	

Figura 2.26 – Database Power BI

In questo caso sono state analizzate 3 fasi ma gli indicatori sono 5, e si procede esattamente allo stesso modo per ciascuno di essi, indicando una cadenza di raccolta dei dati identica per le varie fasi. Una delle sezioni del foglio di calcolo, che viene mostrata in figura, permette di definire le relazioni tra gruppi di dati nel caso ci fossero più fasi, in questo caso esisterebbero collegamenti bilaterali. Questi collegamenti fanno sì che ogni

qualvolta ci si riferisca ad uno specifico mese, tutti gli indicatori delle varie fasi si sincronizzano su quella data, garantendo un orizzonte temporale comune, sia esso quotidiano, mensile o annuo

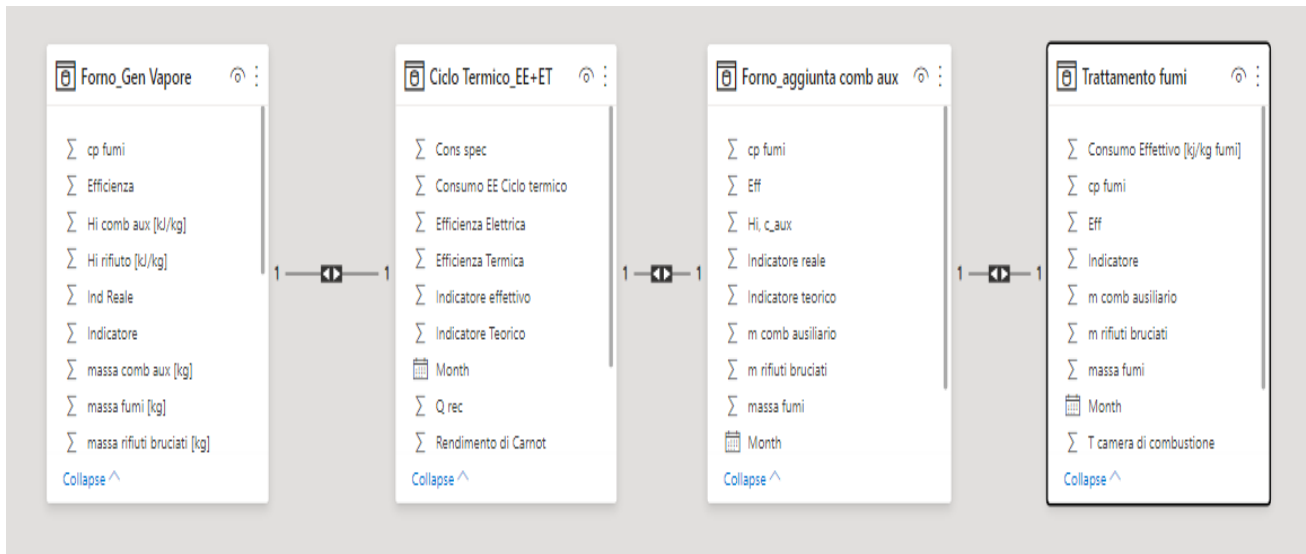


Figura 2.27 – Collegamento tra fasi su Power BI

### 2.6.3. Il cruscotto di monitoraggio

Una volta completato il database e definite le relazioni presenti tra i gruppi di dati, è stato finalmente possibile modellare il cruscotto di monitoraggio che rappresenta il punto focale per le aziende del settore: grazie ad esso è possibile inquadrare al meglio i consumi aziendali, confrontarli con i valori ideali, fare valutazioni, proporre soluzioni di miglioramento in maniera rapida ma accurata. La scelta dell’applicativo è stata fatta dopo attenta valutazione delle caratteristiche dei principali software con foglio di calcolo per sfruttare la sua estrema versatilità, scalabilità e adattabilità a casi differenti, unita alla efficacia della rappresentazione di sintesi, sia grafica che numerica dei risultati di performance.

Esso è composto di tre sezioni interdipendenti: Cruscotto, Composizione Indicatori, Storico Indicatori.

In figura viene mostrato il cruscotto principale: in alto vi è la possibilità di scegliere l’orizzonte temporale di cui si vogliono visualizzare i dati, può essere selezionato un singolo mese, più mesi o tutti quelli a disposizione tramite il tasto “Select All”. Nell’esempio sottostante è stata presa in considerazione una variabilità dei dati mensile.

Scelto il periodo di interesse, sono in automatico mostrati i consumi delle fasi analizzate, espressi secondo le unità di misura prestabilite. La visualizzazione è simile ad un indicatore Gauge, troviamo il valore minimo in assoluto tra tutti i valori in database in basso a sinistra, in basso a destra viene mostrato il valore massimo che assume il consumo, mentre al centro troviamo il valore attuale. In una colorazione più scura, troviamo il valore target o benchmark (ovvero l’indicatore definito in precedenza secondo gli studi effettuati dal CINTEST) inserito direttamente sulla barra di visualizzazione, come una lancetta. Le unità di misura sono in kJ/kJ per la fase di Ciclo termico e Generatore di vapore e di kJ/kg di fumi per l’indicatore relativo alla fase di trattamento fumi.

In un angolino di ciascun indicatore, troviamo un valore percentuale, che indica l’efficienza della fase produttiva in quel mese o in più mesi. Essa è il rapporto tra il consumo teorico e quello effettivo. La percentuale

si colora di rosso se il valore è compreso tra 0% e 40%, di arancione nel range 40-55%, di giallo tra 55 e 70% di verde se superiore al 70%.



Figura 2.28 – Cruscotto Incenerimento Rifiuti

In figura viene visualizzata la seconda sezione del progetto che ha la finalità di mostrare all’utente dello strumento l’effettiva quota di calore recuperato dal forno rispetto alla quota teorica che dovrebbe essere recuperata; in particolare vediamo un grafico a barre dove la barra indica il valore effettivo mentre la linea indica quello teorico che, come vediamo è sempre superiore. Vediamo quindi, in basso, la sezione del time range: essa è sincronizzata con quella della pagina precedente e successiva in modo da permettere all’utente dello strumento, di selezionare una volta sola i mesi di interesse e di non ripetere l’operazione nelle sezioni successive.

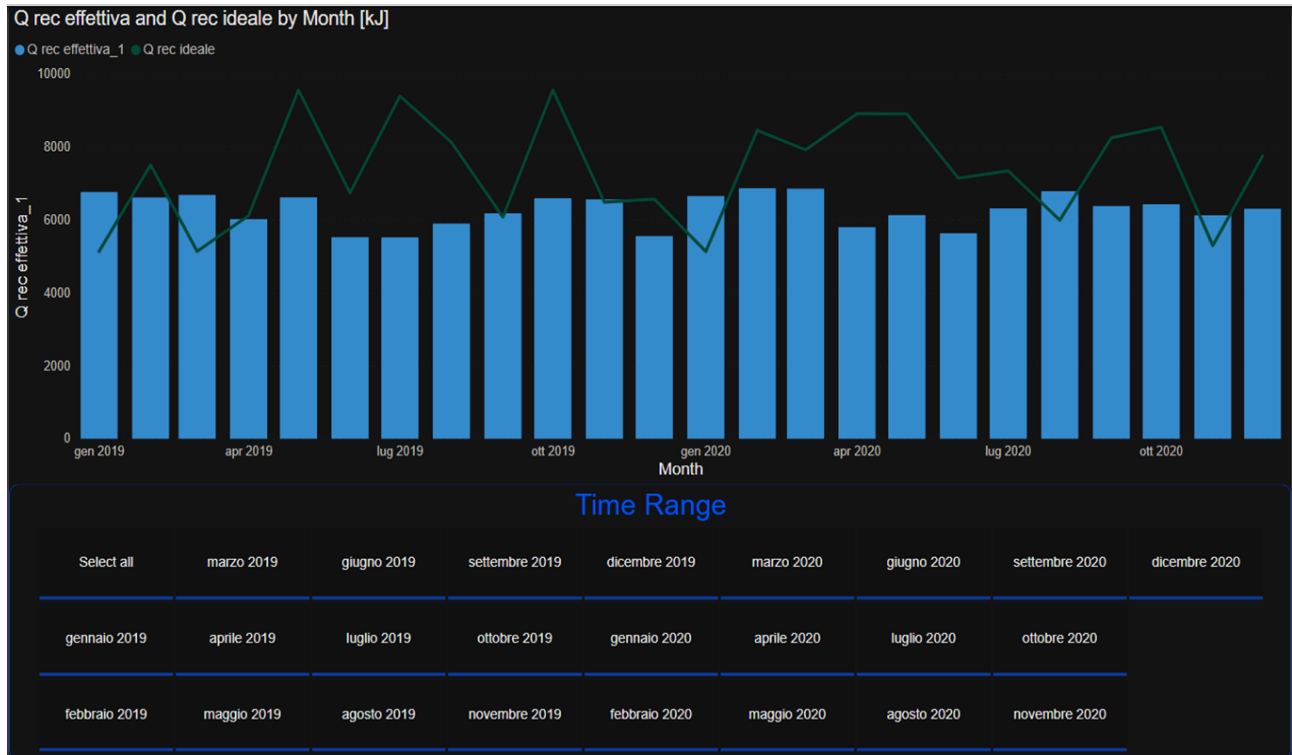


Figura 2.29 – Cruscotto con grafico storico del Calore Recuperato

L'ultima sezione dello strumento è strutturata come mostrato in Figura 2.30. A sinistra troviamo nuovamente il time range sia per poter tenere a mente il periodo di riferimento, sia perché esso può essere sempre modificato e tale modifica verrà apportata a tutte e tre le pagine in cui esso è presente. A destra troviamo invece un grafico a barre verticali per ciascun indicatore: in base ai giorni selezionati viene mostrato l'andamento dei consumi e degli indicatori nel tempo. La linea indica sempre il valore di benchmark, mentre le barre indicano i consumi effettivi. Tramite uno slide presente nella parte inferiore del grafico è possibile allargare o restringere la visuale in maniera individuale per ciascun grafico, senza cambiare l'orizzonte temporale, come nell'ultimo grafico in basso a destra. Come per le pagine precedenti, i grafici in rosso indicano dei valori di consumo di energia termica; i blu indicano un consumo di energia elettrica. Questa grafica ci permette di avere sotto occhio, con una singola schermata, lo storico ed il trend di ciascuna fase critica.

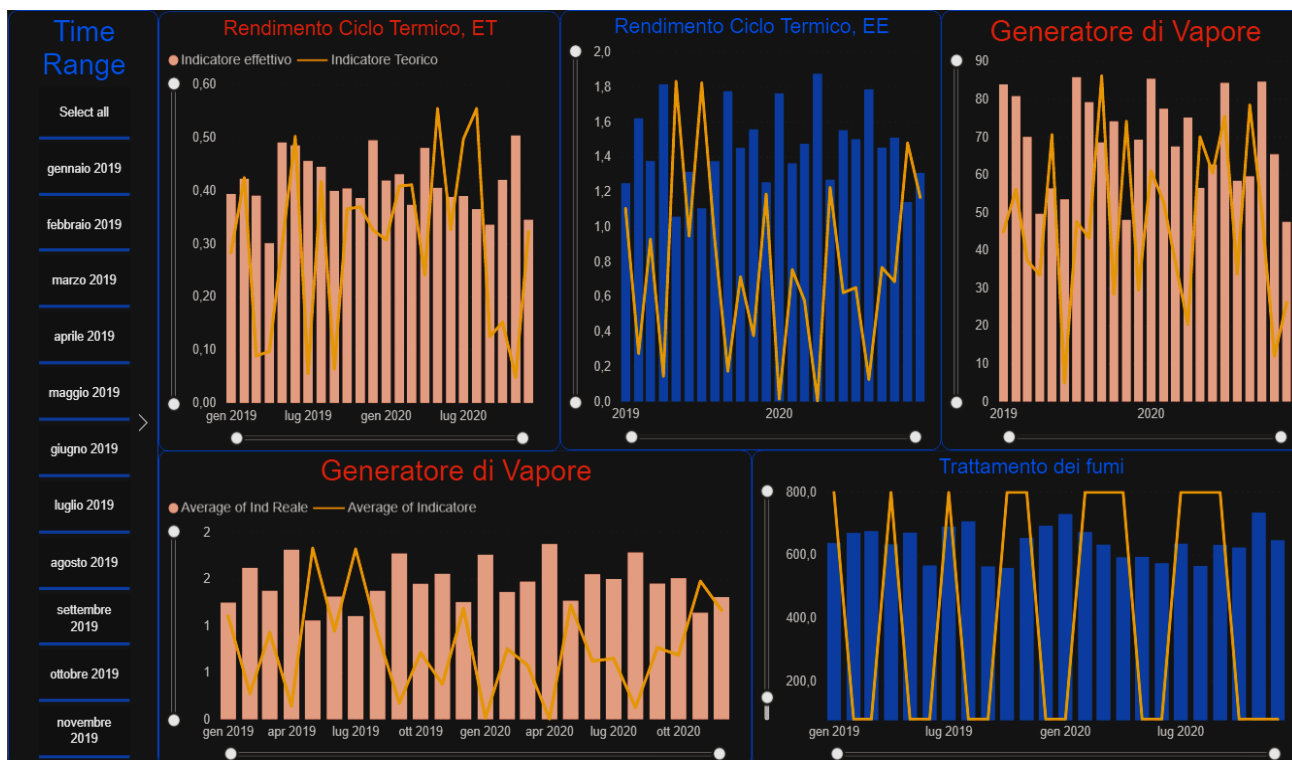


Figura 2.30 – Cruscotto con storico Indicatori incenerimento rifiuti

Per rapidità, è possibile selezionare come time range tutto l’orizzonte temporale presente nel database, tramite la presenza del tasto “Select All”. In questo modo è possibile, con una sola occhiata, comprendere quali fasi e in quali mesi è stato raggiunto il risultato desiderato e quali sono stati invece i mesi e le fasi meno efficienti.

In linea teorica i consumi risultano sempre maggiorati rispetto ai dati teorici rappresentati nel grafico a barre, in quanto nel calcolo degli indicatori teorici non sono tenute in considerazione tutte le perdite dovute a fermate, guasti, condizioni di lavoro non ideali.



## 2.7. Bibliografia

- [1]. Tirlor W., Palmitano M., Raccanelli S., INCENERITORI E DIOSSINA: EVOLUZIONE DEI SISTEMI DI ABBATTIMENTO E DI MONITORAGGIO DELLE EMISSIONI, *Ingegneria dell’Ambiente*, Vol. 4 n. 1/2017
- [2]. [www.arpa.piemonte.it](http://www.arpa.piemonte.it)
- [3]. [www.mite.gov.it](http://www.mite.gov.it)
- [4]. Panepinto, D., & Zanetti, M. C. (2018). Municipal solid waste incineration plant: A multi-step approach to the evaluation of an energy-recovery configuration. *Waste management*, 73, 332-341.
- [5]. [www.aziendarifiuti.ch](http://www.aziendarifiuti.ch)
- [6]. [www.arpa.veneto.it](http://www.arpa.veneto.it)
- [7]. Sisani, F., Maalouf, A., & Di Maria, F. (2022). Environmental and energy performances of the Italian municipal solid waste incineration system in a life cycle perspective. *Waste Management & Research*, 40(2), 218-226.
- [8]. F. Lindberg, S. Tan, J. Yan and F. Starfelt, Key Performance Indicators Improve Industrial Performance, *Energy Procedia*, vol. 75, 2015
- [9]. IDEF Family of Methods, <https://www.idef.com>
- [10]. J. A. Brimson e J. Antos, *Activity-Based Management for Service Industries, Government Entities, and Nonprofit Organizations*, John Wiley & Sons Inc, 1994

### 3. Caso Studio n.3: l'industria Farmaceutica

L'industria farmaceutica è il settore economico che riunisce le attività di ricerca e sviluppo, produzione e commercializzazione dei farmaci per la medicina umana o veterinaria, nonché di prodotti terzi rispetto ai medicinali, come cosmetici e integratori alimentari [11].

Il settore si suddivide nella fabbricazione di prodotti primari comprensivo dei settori alimentari, cosmetico, etc. (quindi anche non medicinali), e nell'elaborazione, invece, di prodotti finiti commercializzati per l'uso medico quali API (Active Pharmaceutical Ingredients ovvero i principi attivi) con metodi conosciuti come produzione secondaria. Tra i processi di produzione secondaria vi è la fabbricazione di medicinali in dosi prestabilite, come farmaci per la somministrazione orale, soluzioni per iniezione, ovuli e supposte.

Altri preparati, diversi da quelli inclusi nel settore cosmetico e alimentare del settore farmaceutico, sono quelli da somministrare per via orale, come caramelle, per inalazione per mezzo di aerosol, tramite gocce per via nasale, orale e parenterale. Inoltre, alcune aziende producono anestetici, altre ancora mezzi di contrasto per visualizzare la struttura del corpo umano tramite raggi X o risonanza magnetica nucleare.

L'industria farmaceutica, comprensiva dunque di diversi settori, rappresenta una delle attività industriali più redditizie e importanti economicamente al mondo; tra le prime aziende classificate per ricavi troviamo Pfizer, Novartis, Merck&co e Bayer. In particolare, come riportato da Farmindustria, il farmaceutico italiano può vantare una produzione da oltre 34 miliardi di euro a cui va sommato l'export con un aumento del 58% nel corso del triennio 2017-2019 facendo dell'Italia, insieme alla Germania, la nazione leader in Europa nell'ambito.

#### *Nascita e sviluppo dell'industria farmaceutica*

Le radici della storia dell'industria farmaceutica risalgono da un lato, da quei farmacisti che intorno alla metà dell'Ottocento iniziarono a produrre su vasta scala farmaci come la morfina, il chinino, la stricnina e simili, dall'altro, dalle industrie chimiche e dei coloranti che si dotarono di propri laboratori di ricerca scoprendo possibili applicazioni dei loro prodotti anche in campo medico. Ma l'industria per come la conosciamo noi inizia solamente nella seconda metà del XIX secolo; inizialmente, alcune case farmaceutiche nacquero come semplici farmacie dedicate alla vendita di farmaci, altre invece iniziarono la propria attività producendo composti chimici organici.

La fusione di questi due tipi di imprese, che ha dato vita all'industria farmaceutica moderna, coincise con l'emergere della farmacologia come disciplina scientifica a sé verso la fine del XIX secolo. Le case farmaceutiche, grazie alla collaborazione e allo scambio di conoscenze con i laboratori universitari, indirizzarono le proprie ricerche verso quei gruppi di sostanze chimicamente reattive, i recettori, in grado di legarsi con i coloranti (gli anticorpi del sistema immunitario) e altri agenti fisiologicamente attivi in modo da uccidere selettivamente o rendere innocui parassiti, batteri e altri microbi. Merck in Germania fu probabilmente la prima compagnia a sfruttare le conoscenze acquisite fino a quel momento a beneficio della salute umana.

All'epoca, però, nella totale assenza di una regolamentazione, mancavano regole precise come quelle attuali per delineare le differenze tra aziende chimiche e quelle farmaceutiche; per ovviare parzialmente a quest'assenza di regole, gli organismi professionali, comprese le associazioni nazionali dei medici e le corporazioni dei farmacisti, fissavano gli standard qualitativi a cui attenersi e denunciavano coloro i quali dichiaravano una falsa composizione dei farmaci. Nonostante ciò, all'inizio degli anni Trenta, la maggior parte dei farmaci erano venduti senza prescrizione e preparati dai farmacisti locali; questo perché, anche se la

professione medica era ben salda, l'industria farmaceutica invece tardava ad evolversi e solo allora iniziava a sviluppare le prime medicine per combattere il dolore, le malattie infettive e cardiache e altre infermità. Anche se inizialmente le scoperte in campo chimico applicate alla medicina sembravano un'idea promettente, in realtà i successi ottenuti fino a quel momento si limitavano a poche sostanze.

L'intervallo tra la Prima e la Seconda Guerra Mondiale, quindi tra il 1930 e il 1960, fu segnato da due scoperte fondamentali che prefigurarono l'avvento dell'industria farmaceutica per come la conosciamo oggi: la prima fu l'insulina, la seconda invece fu la penicillina, la quale ebbe un impatto straordinario in medicina salvando migliaia di vite umane durante la guerra e il cui sviluppo portò ad una nuova era nell'evoluzione dei principi attivi da parte dell'industria farmaceutica. La guerra aveva anche stimolato la ricerca verso nuove forme di analgesico o di medicine contro il tifo, rafforzando la collaborazione tra le compagnie e i governi.

Dopo la guerra, l'arrivo dei servizi sanitari nazionali in Europa, creò l'esigenza di un sistema più strutturato per le prescrizioni mediche e il loro rimborso; in particolare, in America, iniziarono ad inasprirsi i controlli sui farmaci e il loro collaudo prima dell'immissione sul mercato con conferimento di un maggior potere alla Food and Drug Administration (FDA). Lo scandalo della talidomide (un sedativo molto diffuso in Europa, in America Meridionale e in alcuni paesi asiatici che, assunto dalle madri durante la gravidanza, causò la nascita di circa 10.000 bambini con gravi malformazioni in tutto il mondo) del 1961 fece aumentare le regole e i test sui principi attivi prima che venisse concessa la licenza e, successivamente, furono definite chiaramente le differenze tra la produzione di medicinali e altri prodotti chimici. Nel 1962 la FDA introdusse inoltre una regola in cui si richiedeva prova dell'efficacia e un'accurata dichiarazione degli effetti collaterali per i nuovi medicinali.

Una crescente conoscenza di biologia e chimica fece in modo che i principi attivi fossero scelti sempre più sistematicamente e non più casualmente; questa "età dell'oro" di sviluppo avvenne nel contesto del boom economico del dopoguerra che portò ad un miglioramento di massa degli standard di vita con un aumento della vita media in Europa e in America di dieci anni, passando da 59,7 a 69,7 anni.

Dopo questa fase di sviluppo ci fu però una crisi; tra il 1960 e il 1980, lo sviluppo dell'industria farmaceutica incontrò forti resistenze di ordine medico, politico ed economico. A valle dell'inasprimento dei regolamenti e alla tragedia della talidomide, le imprese farmaceutiche investirono maggiori risorse nelle prove di laboratorio e nelle sperimentazioni cliniche; anche le grandi case farmaceutiche, dotate di enormi programmi di ricerca e sperimentazione, cominciarono a lamentare la diminuzione del numero di nuovi farmaci che ottenevano la licenza di commercializzazione.

Tuttavia, negli ultimi venti anni, si sono avute scoperte clamorose che hanno permesso di migliorare notevolmente le aspettative di vita umane, quali ad esempio farmaci capaci di agire sul sistema nervoso centrale e soprattutto le nuove medicine biotecnologiche che hanno lo scopo di sostituire o rafforzare alcune funzioni fondamentali del sistema immunitario. In particolare, alcune sostanze un tempo estratte dagli animali, come l'insulina, hanno cominciato a essere prodotte con un maggiore grado di purezza utilizzando organismi geneticamente modificati. Nel 2001 il sequenziamento del genoma ha portato ad una miglior conoscenza della genetica e delle cause sottostanti di molte malattie, tra cui il cancro. Ora l'industria farmaceutica si è rivolta con grande interesse verso l'immunoterapia, che non agisce direttamente sulla malattia ma stimola il sistema immunitario a combattere contro il tessuto canceroso. Questo, insieme ad altre innovazioni come gli oligonucleotidi antisenso, ha condotto allo sviluppo di medicine per malattie rare considerate prima incurabili. Siamo vicini allo sviluppo di trattamenti per combattere l'epatite C e nel 2020 l'industria ha prodotto dozzine di potenziali vaccini Covid in tempi record, dando una speranza di poter uscire dalle scomode condizioni attuali.

L'industria farmaceutica grazie alla sua preziosità in quanto fornitore di un bene pubblico essenziale (i farmaci sono necessari per combattere le malattie e allungare la vita) e poiché è stata sempre uno dei protagonisti dell'economia di mercato è, dal 1880, il singolo settore produttivo che ha fatto segnare i maggiori profitti.

### *Good Manufacturing Practices*

Nel settore farmaceutico, l'attività di produzione dei medicinali è sottoposta a numerose leggi e regole. Le norme fondamentali sono rappresentate dalle Good Manufacturing Practices GMP (Buone Norme di Fabbricazione), con base legale nell'articolo 47 della direttiva 2001/83/EC, le quali rappresentano un insieme di concetti per poter garantire che i prodotti siano controllati e prodotti secondo determinati standard di qualità. La conformità alle GMP risulta essere dunque un requisito obbligatorio per legge: per questo motivo, con cadenza biennale, tutte le aziende vengono ispezionate dall'ente nazionale preposto, che per l'Italia corrisponde all'AIFA, "Agenzia Italiana del Farmaco" [3].

Le GMP sono enunciate in un documento, articolato in capitoli, corredati da allegati tecnici specifici che si focalizzano sulle diverse attività necessarie per ottenere un prodotto sicuro e di qualità. Esse forniscono numerose informazioni che, per poter essere applicate in tutti i diversi processi in campo farmaceutico, devono necessariamente essere generali, senza specificare di preciso come ogni standard debba essere raggiunto, lasciando tale responsabilità alle aziende. Per questo motivo, c'è stata una naturale evoluzione delle GMP in cGMP, ovvero current GMP per indicare unitamente i requisiti di qualità e le metodologie adoperate per raggiungerli. Infatti, secondo questo criterio, nel momento in cui all'interno dello stabilimento produttivo si verificassero dei problemi, potranno essere introdotte azioni correttive al fine di evitare che questi errori possano verificarsi nuovamente; così l'azienda sarà proiettata verso un costante e continuo miglioramento. Le GMP sono nate per regolamentare la produzione dei farmaci in senso stretto ma poi la loro applicazione si è estesa a molti altri prodotti come alimenti, dispositivi medici, derivati biologici, cosmetici e principi attivi.

La sicurezza e l'efficacia sono riconosciute come caratteristiche indispensabili per ogni farmaco e possono essere ottenute solo attraverso l'applicazione stringente delle GMP durante ogni fase del processo produttivo. I requisiti richiesti dalle Buone Norme di Fabbricazione sono:

- Un sistema di assicurazione della qualità delle attività di produzione e controllo del medicinale;
- Personale adeguatamente addestrato e formato sulle attività da svolgere a livello pratico e sulle normative GMP;
- Pulizia e sanitizzazione di strutture e attrezzature, mantenendo il livello di contaminazione entro i limiti predefiniti;
- Verifica del corretto funzionamento dei macchinari, con conseguente pulizia e manutenzione;
- Registrazione e tracciabilità documentale: ogni attività o operazione, ma anche i materiali e i reagenti utilizzati, devono essere registrati accuratamente in moduli, registri, form creati ad hoc;
- Adeguata gestione dei materiali, definizione del processo produttivo, modalità di gestione del medicinale durante tutte le fasi del processo produttivo, dal materiale di partenza al confezionamento del prodotto finito;
- Controlli analitici su tutti i reagenti, materiali utilizzati e prodotto finito secondo procedure analitiche convalidate e studio della stabilità del prodotto finito nelle condizioni di conservazione stabilite;
- Corretta gestione dei prodotti risultati non conformi alle specifiche predefinite (fonte AIFA. Good Manufacturing Practice (GMP) [3]).

### *Dimensioni imprese ed investimenti per il risparmio energetico*

Le imprese del settore farmaceutico operanti in Italia sono complessivamente 283 (materie prime e specialità medicinali). Il valore della produzione farmaceutica realizzata in Italia nel 2020 è stato pari a 34,3 miliardi di

euro, con un incremento dell'1% rispetto all'anno passato. Tale risultato è determinato interamente dalla crescita delle esportazioni, aumentate del 3,8% rispetto al 2019.

Le imprese farmaceutiche hanno dimensioni medie superiori alla media dell'industria: infatti il 71,4% del totale sono imprese con più di 250 lavoratori dipendenti, rispetto ad una media manifatturiera del 24,1%. Le imprese del farmaco in Italia continuano a creare sviluppo e possono farlo ancora di più, in un quadro di riforme che consideri la farmaceutica un settore strategico per occupazione qualificata, produzione ed export, proprietà intellettuale e investimenti in ricerca e tecnologia e, soprattutto, per salute e benessere della popolazione e per la sicurezza nazionale [11].

Nonostante le dimensioni del settore farmaceutico in Italia siano minori rispetto a quelle delle grandi imprese internazionali, le aziende farmaceutiche italiane rappresentano una certa leadership nei confronti dell'estero e confermano il loro ruolo dominante nell'economia del Paese. Inoltre, in più del 90% dei casi le imprese del farmaco in Italia hanno confermato o incrementato gli investimenti in R&S e in digitalizzazione, investendo circa 1,6 miliardi di euro, cioè il 6% del totale degli investimenti in Italia (+1,4% rispetto al 2019); fra le principali motivazioni di tali investimenti spicca la volontà di raggiungere un ulteriore aumento di efficienza nel campo della riduzione dei consumi. Infatti, nel 90% delle imprese, i programmi d'investimento riguarderanno le tecnologie a minore impatto ambientale, sia riadattando gli impianti esistenti (67%), sia con acquisto di nuovi impianti (53%). Questo efficientamento dei processi produttivi e un monitoraggio costante dei consumi hanno consentito un migliore impiego sia di risorse idriche che energetiche.

**TAVOLA 6** Evoluzione degli investimenti in Italia nel 2020 rispetto al 2019  
(% sul totale di imprese)

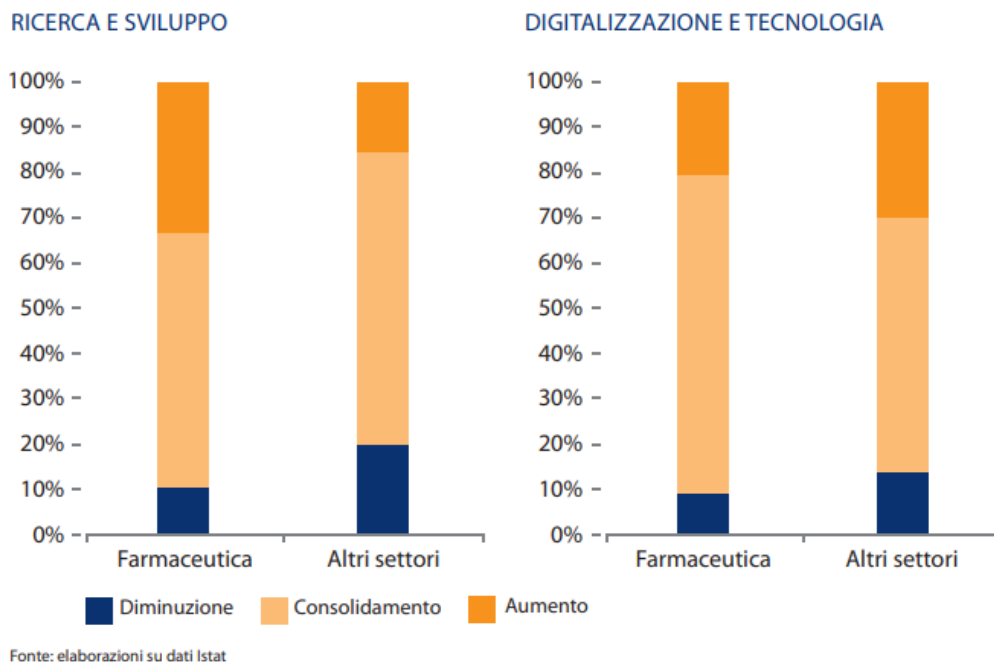


Figura 3.1: Evoluzione degli investimenti in Italia nel 2020 rispetto al 2019 – Fonte: Istat

La lotta al Covid ha visto in prima linea le imprese del farmaco e tutto l'ecosistema della Ricerca in Italia e ha dimostrato che la Salute è ricchezza e libertà in quanto stare bene significa generare PIL.

Sul tema riguardante i vaccini, argomento ormai all’ordine del giorno, l’Italia è un hub internazionale di Ricerca e produzione, con una solida tradizione scientifica e una forte vocazione all’export, che ha permesso di ottenere in 10 anni 4 miliardi di saldo estero positivo, ovvero di domanda di altri Paesi soddisfatta da produzione realizzata in Italia (Figura 3.2).

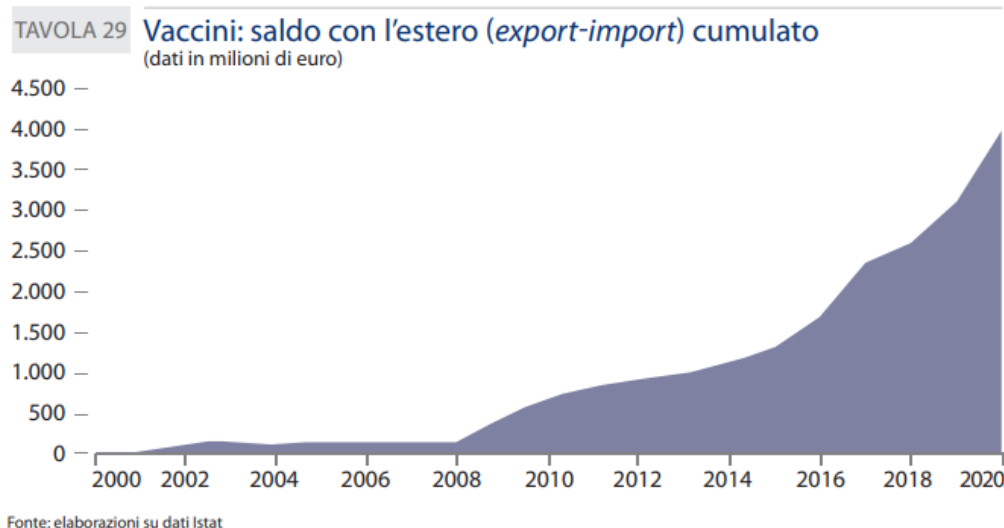


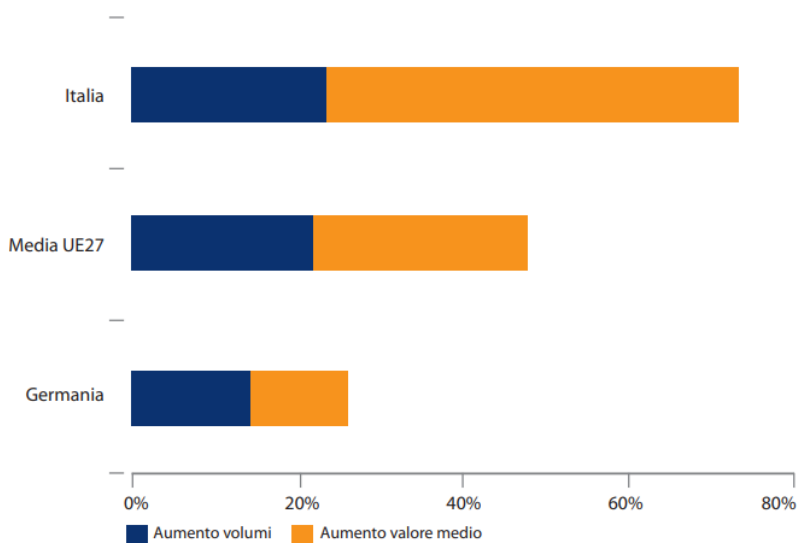
Figura 3.2: Vaccini: saldo con l’estero (export-import) cumulato – Fonte: Istat

Per quanto riguarda la produzione invece, i dati pubblicati da Efpia, la Federazione Europea dell’Industria Farmaceutica, mostrano che l’Italia è da anni protagonista: con 34,3 miliardi di valore della produzione nel 2020 concorre in maniera fondamentale, con Francia e Germania, allo sviluppo dell’Unione Europea. La capacità delle imprese di coniugare altissimi livelli qualitativi, innovazione, investimenti e produzione a elevato valore aggiunto (grazie a tradizione scientifica e industriale, competenze e a una filiera forte e diversificata) ha sostenuto lo sviluppo del settore e l’attrazione di rilevanti investimenti nazionali ed esteri. Lo testimonia l’incremento dell’export (+74% tra il 2015 e il 2020), cresciuto a ritmi superiori a quelli della media Ue (+48%), grazie all’aumento dei valori medi dei farmaci esportati (+50%), che ne riflette l’aumento del contenuto innovativo[11].

Le aziende farmaceutiche in Italia hanno colto il valore dell’ambiente e hanno fatto della sfida ambientale un fattore di competitività. In dieci anni l’industria farmaceutica ha abbattuto:

- Del 32% le emissioni dei gas climalteranti (anidride carbonica, biossido di azoto, metano e altri gas), rispetto a un calo del 28% della media manifatturiera com’è visibile in Figura 3.4;
- Del 59% i consumi energetici, rispetto a una media dell’industria manifatturiera del -17%, visibile nel grafico in Figura 3.5. (Farmindustria, 2021)

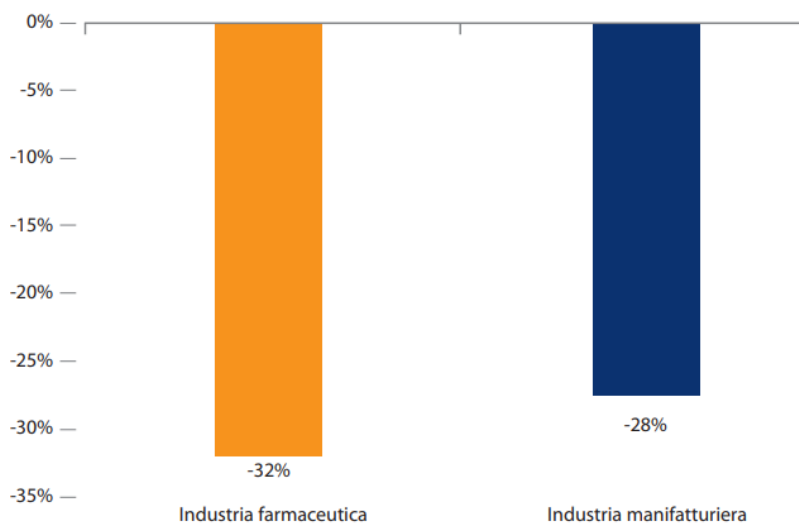
**TAVOLA 14** Evoluzione dell'export farmaceutico tra il 2015 e il 2020  
(variazione % cumulata)



Fonte: elaborazioni su dati Eurostat

Figura 3.3: Evoluzione dell'export farmaceutico tra il 2015 e il 2020 – Fonte: Istat

**TAVOLA 23** Emissioni di gas climalteranti: var. % cumulata decennale  
(2008-2018, ultimo dato disponibile)



Fonte: elaborazioni Farmindustria su dati Istat

Figura 3.4: Emissioni di gas climalteranti: var. % cumulata – Fonte: elaborazioni Farmindustria su dati Istat

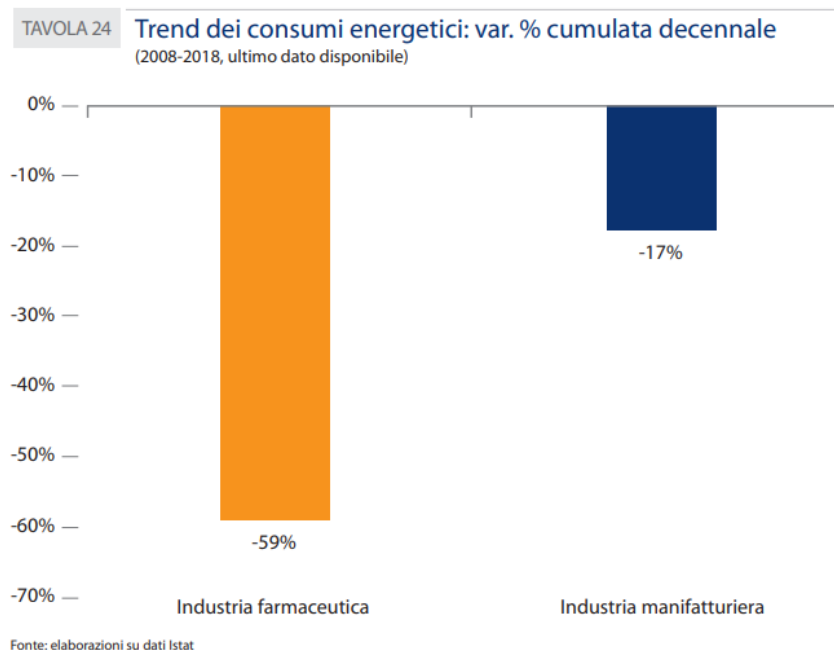


Figura 3.5: Trend dei consumi energetici: var. % cumulata decennale– Fonte: elaborazioni su dati Istat

Questi risultati si sono ottenuti grazie agli investimenti fatti in tecnologie green: la percentuale di investimenti in tecnologie ecosostenibili per la prevenzione dell'inquinamento (che riducono o eliminano alla fonte l'inquinamento del processo produttivo) nell'industria farmaceutica è pari al 44%, rispetto a una media manifatturiera del 37%. Inoltre, il settore farmaceutico nel 2015 ha dato il via ad un programma europeo a guida industriale per la gestione intelligente e sostenibile dell'impatto ambientale del farmaco lungo tutto il suo ciclo di vita chiamato Eco-PharmacoStewardship (EPS).

L'incidenza dell'industria farmaceutica sul totale dell'industria manifatturiera in Italia varia dall'1,7% dell'occupazione al 13% delle spese per Ricerca e Sviluppo. Rispetto agli altri settori l'industria farmaceutica si caratterizza per:

- più alto valore aggiunto per addetto (+123%rispetto alla media manifatturiera);
- più alte spese per il personale per dipendente (+101%);
- più alti investimenti per addetto (+312%) di cui in produzione (+175%), in Ricerca e Sviluppo (+642%) e in protezione dell'ambiente (+223%);
- più alte esportazioni per addetto (+378%). (Farminindustria, 2021)



## 3.1 I processi farmaceutici e le fasi di produzione

Nel corso degli anni i termini “farmaco”, “medicinale” e “prodotto medicinale” sono stati utilizzati come sinonimi, però di recente si è preferito utilizzare il termine “medicinale”.

Si intende per medicinale (Ministero della Salute):

- ogni sostanza o associazione di sostanze presentata come avente proprietà curative o profilattiche delle malattie umane;
- ogni sostanza o associazione di sostanze che possa essere utilizzata sull'uomo o somministrata all'uomo allo scopo di ripristinare, correggere o modificare funzioni fisiologiche, esercitando un'azione farmacologica, immunologica o metabolica, ovvero di stabilire una diagnosi medica.

Tutti i medicinali sono costituiti da uno o più principi attivi e da vari eccipienti. Il *principio attivo* è il componente dei medicinali da cui dipende la sua azione curativa, il medicinale vero e proprio.

Gli *eccipienti* sono invece componenti inattivi del medicinale, privi di ogni azione farmacologica; hanno la funzione di proteggere il principio attivo dagli agenti esterni che potrebbero danneggiarlo, di facilitare l'assorbimento del principio attivo nell'organismo, di rendere il sapore dei medicinali più gradevole, ecc. (Ministero della Salute).

Tuttavia, prima di poter essere somministrato, il principio attivo deve essere trasformato in un'opportuna forma che ne consenta la somministrazione per via e dosaggio prescelti; infatti, è possibile fare una distinzione nelle lavorazioni del settore farmaceutico a seconda che il farmaco prodotto sia in forma solida, liquida o semisolida.

Alcune fasi legate alla produzione dei medicinali, come la pulizia e la sterilizzazione degli impianti e degli ambienti di lavoro, la pesata delle materie prime, la preparazione del granulato e il confezionamento del prodotto finito, sono comuni a tutte le forme farmaceutiche.; in particolare, la preparazione dei principi attivi non viene effettuata dalle aziende che producono i farmaci finiti, bensì viene spesso svolta presso aziende terze specializzate.

### 3.1.1. I principi attivi

I principi attivi possono essere preparati in tre modi la cui scelta dipende dalla struttura della molecola che si vuole produrre e dai costi della produzione:

- 1. Sintesi chimica:** spesso parte da un principio attivo già noto da modificare per ottenere un nuovo principio attivo, con caratteristiche potenziate o migliorate rispetto a quello di partenza. Si ricorre a questo tipo di processo per la produzione di strutture poco complesse.
- 2. Purificazione da matrici naturali** (di solito vegetali): viene realizzata mediante l'utilizzo di tecnologie analitiche classiche, come la cromatografia in fase liquida: un esempio è rappresentato dalle sostanze alcaloidi, utilizzate per la produzione di farmaci sedativi, che vengono purificate dalle loro cellule vegetali.
- 3. Biotecnologia:** si avvale di microrganismi o cellule superiori per produrre o modificare prodotti: questo tipo di processo sta acquisendo una grande rilevanza nell'ambito della produzione farmaceutica. I prodotti biotecnologici sono metaboliti o prodotti di sintesi cellulare, e possono essere naturali o esogeni.

In particolare, nel caso della **biotecnologia**, sono due i principali processi utilizzati:

- **Fermentazione**: con il termine fermentazione viene indicato qualsiasi processo che implichi l'allestimento e il mantenimento di colture di microrganismi o di cellule all'interno di un fermentatore. Pertanto, si definisce come fermentazione la coltura di cellule in condizioni controllate, realizzata mediante inoculo, in un terreno sterile, della specie microbica o della specie cellulare di interesse (A. Brusco). Il reattore è di solito costruito in acciaio inossidabile con basso grado di rugosità e contiene tutti i nutrienti necessari per la biosintesi della molecola d'interesse. Per l'inizio della procedura di sintesi, il fermentatore deve essere sterile (sterilizzazione realizzata con getti di vapore ad alta pressione, o mediante biociti successivamente lavati via con acqua microbiologicamente pura) e deve assicurare che i parametri stabiliti per il tipo di molecola specifico, restino costanti. I processi biotecnologici possono avvenire in tipi diversi di bioreattori, che possono essere statici o in agitazione, e in condizioni differenti, ovvero in aerobiosi (presenza di ossigeno) o in anaerobiosi (assenza di ossigeno). In generale, ogni bioreattore, per mantenere la coltura a temperatura, è dotato di uno scambiatore di calore, che può essere una serpentina refrigerante o un'intercapedine isolante (camicia). Inoltre, il fermentatore è dotato di sensori di controllo che permettono di misurare continuamente i parametri di pH, temperatura, pressione, concentrazioni gassose, ecc..., anche se in alcuni casi si ricorre ad un campionatore (presente in un laboratorio di servizio esterno alla linea di produzione) per verificare "off line" la concentrazione in soluzione di nutrienti e cataboliti tossici per la coltura. Grazie all'utilizzo della spettroscopia nel vicino infrarosso (NIR), è oggi possibile effettuare analisi chimiche e di biomassa non distruttive, cioè senza la necessità di prelevare materialmente il campione; le analisi effettuate sono importanti perché tutti i materiali che entrano in contatto con le soluzioni immerse nel bioreattore devono essere atossiche e resistenti alla corrosione e ai getti di vapore ad alta pressione. Le tecniche di coltura cellulare più utilizzate possono essere classificate in base alla modalità di somministrazione del terreno di coltura: a ciclo chiuso, a ciclo chiuso alimentato, a ciclo continuo e allo stato solido.

- **Biocatalisi**: la biocatalisi è un processo che riduce l'energia di attivazione di una reazione chimica, accelerandone lo svolgimento, tramite l'intervento di biomolecole (alcuni enzimi e coenzimi) che non subiscono alcuna trasformazione durante la reazione stessa. I reattori industriali in cui si svolgono le biocatalisi sono chiamati enzimatori. La biocatalisi, a differenza della fermentazione, spesso non richiede condizioni di sterilità, ed è inoltre un processo di basso costo e di basso impatto ambientale. (A. Brusco)

Al termine dei processi fermentativi o biocatalitici, le molecole di interesse devono essere purificate dal "brodo" di fermentazione o di reazione: questo può essere fatto mediante processi di separazione quali la distillazione, la centrifugazione, la filtrazione, l'ultrafiltrazione, l'estrazione con solventi, l'adsorbimento, la filtrazione con membrane selettive, l'osmosi inversa, la gel filtrazione, l'elettroforesi e la cromatografia di affinità.

Le applicazioni più significative delle biotecnologie in campo farmaceutico riguardano la produzione e lo sviluppo di:

- biofarmaci e biosimilari;
- tecniche terapeutiche innovative (terapie con cellule staminali e xenotrapianti);
- vaccini;
- kit diagnostici.
- 

In generale, il **ciclo produttivo dell'industria farmaceutica** può essere riassunto nelle seguenti fasi:

- Arrivo delle materie prime e immagazzinamento
- *Lavaggio e sterilizzazione degli ambienti di lavoro prima della produzione*
- *Pesata delle materie prime*
- *Preparazione del granulato*
- *Produzione delle diverse forme farmaceutiche (solide, semisolide e liquide)*
- *Confezionamento*
- Immagazzinamento e spedizione.

Di seguito verranno analizzate le fasi principali.

### 3.1.2. Lavaggio e sterilizzazione degli ambienti di lavoro prima della produzione

Nell'ambito della produzione del settore farmaceutico risulta di fondamentale importanza evitare qualsiasi tipo di contaminazione microbica; per cui è dunque necessario che i recipienti, le apparecchiature e gli stessi ambienti di lavoro (soprattutto se utilizzati nelle produzioni sterili) debbano essere puliti, disinfettati e sterilizzati. Tali operazioni possono essere effettuate sia in loco (CIP: cleaning in place, SIP: sterilizing in place) sia in aree di lavaggio dedicate (COP: cleaning out of place, SOP: sterilizing out of place). In realtà, le apparecchiature moderne prevedono già l'installazione al proprio interno di dispositivi di spruzzo che provvedono alla pulizia e disinfezione e, se necessario, anche alla sterilizzazione.

Per la *pulizia*, vengono comunemente impiegati acqua e saponi detergenti; per la *disinfezione*, si ricorre ad alcol etilico denaturato o disinfettanti più o meno energici. Per la *sterilizzazione* invece si può precedere con vari mezzi:

- Fisici (calore umido, calore secco, radiazioni  $\beta$ ,  $\gamma$ , o UV)
- Meccanici (filtrazione su setti con porosità inferiore a 2  $\mu\text{m}$ )
- Chimici (uso di vapori o gas: ossido di etilene, formaldeide, glutaraldeide).

Le radiazioni sono tipicamente impiegate per la sterilizzazione di tutto ciò che non può essere sottoposto ad altro tipo di trattamento, come gli iniettabili e tutti quei materiali termosensibili; sono anche impiegate per la sterilizzazione di ambienti o di contenitori delle materie prime degli iniettabili. Le tipologie di impianto più utilizzate per effettuare questo tipo di trattamento sono:

- A sorgente radioattiva: in questo caso la sorgente è costituita da una cremagliera metallica (dove sono alloggiati le barre radioattive), da una struttura di calcestruzzo e da un sistema di trasporto automatico per il materiale da sterilizzare. La sterilizzazione avviene nella cella di irraggiamento, che è collegata alla cremagliera; inoltre, questi impianti possono essere a secco o in piscina;
- Ad acceleratore di elettroni.

Per la sterilizzazione di contenitori e materiali termoresistenti, invece, si utilizzano delle autoclavi con calore umido o forni con calore secco. Le autoclavi sono recipienti metallici a chiusura ermetica, muniti di tubazioni e di valvole di sicurezza e di sfiato, in cui per effetto delle elevate temperature di esercizio (che raggiungono i 121°C) viene prodotto vapore sotto pressione. La sterilizzazione dei recipienti chiusi, ovvero fiale e flaconi contenenti soluzioni acquose, è un'operazione molto delicata, a causa dell'aumento di pressione che si realizza nei contenitori ad opera della sterilizzazione stessa. La pressione del volume di testa (d'aria o di altro gas) presente all'interno della fiala o del flacone di vetro al di sopra del liquido, è di circa 1 bar; in seguito al riscaldamento a 121°C, tale pressione sale a circa 1,30 bar; contemporaneamente, sempre a causa del riscaldamento, l'acqua presente nella soluzione genera vapore ad una pressione di circa 2 bar. In conclusione,

la pressione interna della fiala o del flacone, a seguito della sterilizzazione, risulta essere pari a circa 3,5 bar, contro una pressione dell'autoclave di circa 2 bar. Tutto ciò provoca un'esposizione del recipiente (fiala/flacone) ad una variazione di pressione di circa 1,5 bar: questo potrebbe provocare la rottura o il sollevamento dei tappi delle fiale e dei flaconi. È quindi necessario prestare molta attenzione sia ai parametri del processo di sterilizzazione, che alla rimozione dei recipienti dall'autoclave: infatti, se quest'ultima operazione viene effettuata quando la soluzione non si è ancora raffreddata, a causa della riduzione della pressione esterna da 2 bar fino alla pressione atmosferica, si verifica una vaporizzazione molto rapida della soluzione, con conseguente esplosione del contenitore.

La sterilizzazione con vapore saturo non è applicabile a tutti i recipienti in plastica (poiché si deformerebbero per effetto della pressione e della temperatura) e ai blister. In questi casi si ricorre infatti alla sterilizzazione a freddo mediante un agente sterilizzante in forma di gas o vapore e tra le tante sostanze utilizzate, l'ossido di etilene (ETO) è quella dotata di maggiore potere sterilizzante. La sterilizzazione con l'ossido di etilene viene eseguita a temperature comprese tra 40°C e 60°C, in relazione al materiale trattato, e sempre in abbinamento con vapore d'acqua.

### 3.1.3. Pesata delle materie prime

La pesatura delle materie prime rappresenta la prima vera fase del ciclo produttivo e consiste nell'andare a pesare i principi attivi e gli eccipienti che costituiscono il medicinale.

Questa fase avviene in un ambiente dedicato e può essere:

- *Manuale*: è necessario che gli operatori lavorino in un ambiente microbiologicamente controllato, munito di pavimenti e pareti lavabili, e l'aria immessa viene opportunamente filtrata dal sistema di condizionamento. Gli addetti prelevano le materie prime dai loro contenitori o sacchi e le pesano mediante l'utilizzo di bilance elettroniche o manuali;
- *Completamente automatizzata*.

### 3.1.4. Preparazione del granulato

A valle della pesatura, poiché spesso le polveri hanno dimensioni piuttosto grossolane, per poterle ridurre in particelle più fini è necessaria una fase di macinazione con successiva granulazione.

La *macinazione* può essere classificata a seconda delle dimensioni finali delle particelle in grossolana, intermedia e fine e può essere realizzata in modo:

- Meccanico: questo tipo di macinazione è eseguita tramite molino nel quale la riduzione delle dimensioni delle particelle avviene per urto delle particelle, contro degli utensili o contro altre particelle; essa può essere realizzata a umido o a secco. La macinazione a umido si differenzia dalla macinazione a secco per l'utilizzo di acqua, che viene spruzzata all'interno del molino in modo da ridurre il calore prodotto dagli urti per attrito, che provocherebbe la modifica delle caratteristiche farmacologiche delle particelle.
- Non meccanico: essa può essere eseguita mediante diversi metodi quali Spray drying (si può utilizzare solo per i principi attivi che sono solubili in acqua), utilizzo di fluido supercritico e precipitazione per cambio di solvente.

In generale, gli apparecchi utilizzati per le operazioni di macinazione sono costituiti da: una tramoggia per l'alimentazione, una camera di macinazione e un serbatoio dove avviene la raccolta del prodotto macinato.



Figura 3.6: esempio di mulino di macinazione per l'industria farmaceutica

Per una *macinazione completa*, è necessario eseguire le tre seguenti fasi:

- frantumazione,
- polverizzazione,
- micronizzazione.

La prima fase, quella della frantumazione, in genere non viene realizzata nell'ambito dell'industria farmaceutica, in quanto le materie prime utilizzate sono già ridotte in dimensioni granulometriche. Per la polverizzazione è possibile utilizzare diversi tipi di molini: molini a pioli o perni, molini a martelli, o molini a coltelli.

Dopo la polverizzazione viene eseguita la micronizzazione mediante molini a getto d'aria ai quali si ricorre quando è necessario ottenere un principio attivo molto fine ad alta velocità di solubilizzazione. Questi micronizzatori sono azionati dall'aria, la quale produce una corrente di particelle che, ruotando ad alta velocità, urtano, si sfregano e riducono le proprie dimensioni granulometriche.

Dopo aver ultimato la macinazione, le particelle di principio attivo devono essere *setacciate*, in modo da rendere il più possibile uniformi le loro dimensioni; questo tipo di operazione viene eseguita con delle setacciatrici che possono essere di vario tipo: vibranti, a spazzole e pneumatiche.

Infine, si passa alla fase di *granulazione* in cui vengono fatte aggregare le polveri fini in granelli più grandi, allo scopo di migliorare le caratteristiche di scorrimento, dosabilità, comprimibilità e omogeneità della miscela finale. La granulazione può essere di due tipi:

- A secco: se la miscela viene sottoposta a compattamento per opera di compattatori e ridotta in formelle dette slugs, le quali saranno poi frantumate e fatte passare attraverso setacci da 0,1 a 1000  $\mu\text{m}$ ;
- A umido: se la miscela viene caricata nel granulatore e ad essa si aggiunge un solvente (acqua pura o miscela di acqua-alcool) o anche un legante (gomma arabica o amido), in modo che si trasformi in una massa semi pastosa. Questa pasta viene fatta passare attraverso le maglie di un setaccio o i fori di una piastra metallica e quindi essiccata; l'essiccazione può essere eseguita sia all'interno del

granulatore stesso mediante soffi di aria compressa, sia in essiccatori.

A valle dell'essiccazione si ottiene il granulato che viene *di nuovo setacciato*; questo granulato può essere utilizzato direttamente per preparati in bustine, oppure inviato alle linee di produzione.

### 3.1.5. Produzione delle diverse forme farmaceutiche

Il tipo di produzione è strettamente legato alla forma farmaceutica che si intende realizzare la quale può essere:

- *Solida*: essa comprende le compresse, le capsule e le bustine;
- *Semisolida*: composta da supposte, ovuli e pomate, che a loro volta sono classificabili in unguenti, paste, creme o gel;
- *Liquida*: comprende preparati in soluzione o sospensione, ovvero siringhe confezionate, fiale iniettabili e flaconi.

### 3.1.6. Confezionamento

La legislazione farmaceutica garantisce la qualità e la sicurezza dei medicinali attraverso il rispetto delle normative e i controlli rigorosi su tutte le fasi della produzione e su tutti i materiali utilizzati. Tali normative e controlli, tuttavia, non riguardano solo le sostanze attive e i processi produttivi che le trasformano nel medicinale da immettere sul mercato, ma anche i materiali usati per il suo confezionamento. La normativa relativa al packaging farmaceutico prevede infatti che il confezionamento dei medicinali risponda a requisiti ben precisi.; in generale, è possibile fare una distinzione tra confezionamento:

- Primario: è quello che va a diretto contatto con il farmaco e deve adattarsi ad esso in modo da garantire l'integrità del prodotto ed evitare la contaminazione da agenti esterni (oltre a non avere esso stesso caratteristiche che possano alterarlo). Alcuni esempi sono: per i solidi flaconi o flaconcini; per le polveri: opercoli, blister e pillolieri; per i liquidi: flaconi per sciroppi, flaconcini, fiale e siringhe pre-riempite; per i semisolidi: tubetti in metallo o in plastica monostrato o triplo strato, valve, strip.
- Secondario: è quello che racchiude il confezionamento primario e la sua funzione è quella di illustrare delle informazioni sul medicinale come gli eccipienti noti o avvertenze di sicurezza. Per il confezionamento secondario si utilizzano, invece, astucci che possono essere di diversa forma e materiale, cassettoni in plastica o in altro materiale e device (tutti quei dispositivi che vengono usati per facilitare l'assunzione del farmaco ma che non vanno a diretto contatto con esso).

Sia sul confezionamento primario che su quello secondario vengono stampigliate la data di scadenza e il numero del "lotto" di produzione; per gli astucci, invece, viene posto il foglietto illustrativo all'interno, mentre all'esterno viene apposta l'etichetta autoadesiva con numerazione progressiva a lettura automatica. Le confezioni secondarie sono poi assemblate in colli.

Illustrato il ciclo produttivo, si può procedere ora con un focus sulle diverse forme farmaceutiche.

## 3.2. Forme farmaceutiche SOLIDE

Nel caso di forme farmaceutiche solide, i preparati si ottengono a partire da materie prime in polvere o in granuli, i quali permettono di ottenere preparati più omogenei e più facilmente assimilabili. Il granulato è ottenibile mediante l'esecuzione di diverse operazioni in serie:

- la macinazione, con conseguente frantumazione, polverizzazione e micronizzazione;
- la setacciatura del granulato ottenuto;
- *la miscelazione per evitare la segregazione;*
- la granulazione;
- *l'essiccamento;*
- *la ripartizione delle forme farmaceutiche solide in compresse, capsule, ecc.;*
- *il rivestimento delle forme farmaceutiche solide ad uso orale.*

Dopo la macinazione e la setacciatura, operazioni già analizzate precedentemente, vi è la miscelazione.

### 3.2.1 Miscelazione

La miscelazione ricorre in quasi tutte le forme farmaceutiche ed è fondamentale per ottenere omogeneità nel preparato finale. Essa è un'operazione mediante la quale due o più componenti che in precedenza erano separati o mescolati grossolanamente, vengono trattati in modo che ogni particella di un componente sia quanto più vicina possibile alle particelle dell'altro componente. A causa delle diverse dimensioni dei granuli dei vari componenti miscelati, in seguito alla miscelazione potrebbe però verificarsi la segregazione; si può quindi riassumere la miscelazione nelle seguenti fasi:

- espansione del letto di particelle solide,
- applicazione di forza di taglio al letto di polveri,
- rimescolamento per ottenere la randomizzazione delle particelle,
- mantenere la randomizzazione anche al termine della miscelazione (ovvero evitare segregazione).

Quando le particelle solide vengono inserite nel miscelatore, infatti, formano un letto statico e risulta quindi necessario che tale letto si espanda per poter consentire la miscelazione; per far sì che sia possibile l'espansione, deve essere disponibile uno spazio sufficiente all'interno del miscelatore per far allontanare le particelle tra loro. A questo punto vengono applicate delle forze di compressione per avvicinare le particelle tra loro, quelle di tensione per allontanare le particelle tra loro, e le forze di taglio, che sono fondamentali per il rimescolamento delle particelle stesse. La miscelazione può essere eseguita mediante diverse apparecchiature, tutte però accomunate dall'utilizzo di acciaio inossidabile per le componenti a diretto contatto con il farmaco, in linea con le Norme di Buona Fabbricazione.

I *miscelatori*, nello specifico, possono essere classificati in base alla loro tendenza a far insorgere segregazione nel preparato: si parla quindi di miscelatori "più segreganti", se la miscelazione avviene per rotazione della camera di miscelazione, producendo una polvere omogenea solo se i vari elementi hanno caratteristiche granulometriche simili; invece i miscelatori "meno segreganti" svolgono le operazioni di miscelazione sottoponendo il preparato a forze di convezione, che consentono di ottenere una maggiore omogeneità. È possibile operare un'ulteriore classificazione dei miscelatori: miscelatori che lavorano *per lotto di prodotto* (quelli più usati nell'industria farmaceutica) e miscelatori *in continuo*.

Un esempio di miscelatori per lotto, sono i miscelatori a corpo rotante (Figura 3.7), costituiti da un contenitore cavo che viene posto in rotazione per mettere in movimentazione le particelle e possono essere di forme diverse: cilindrici, cubici, a V, a tamburo, biconici. Questi miscelatori hanno diversi vantaggi, quali la

facilità di carico e scarico, di pulizia e manutenzione, ma presentano anche svantaggi, quali la lentezza operativa. Sebbene infatti siano dotati di motori a velocità regolabile, non è consigliato lavorare con un elevato numero di giri al minuto, perché questo provocherebbe il sollevamento delle polveri più fini, che andrebbero a depositarsi sulla superficie della mescola una volta arrestata l'apparecchiatura, con conseguente segregazione.

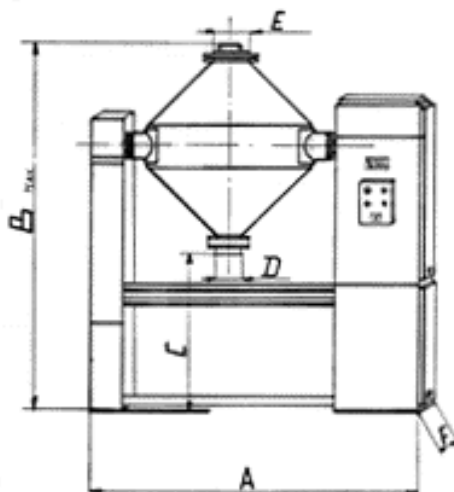


Figura 3.7: esempio di miscelatore a corpo rotante

Un esempio, invece, di miscelatori in continuo è il miscelatore a zig-zag: per questo tipo di miscelatore (e in generale per tutti quelli che lavorano in continuo) gli ingredienti sono dosati all'inizio, e vengono poi versati nell'apparecchiatura, che è costituita da diverse sezioni tubolari poste in rotazione. Grazie proprio alla rotazione di queste, tipicamente di forma a V, gli ingredienti avanzano mentre vengono mescolati, fino a giungere all'altro capo dove verranno prelevati come una miscela omogenea.

A seguito della miscelazione, vi è la granulazione, che consiste nel far agglomerare tra loro piccole particelle in modo da formare i granuli, delle masse più stabili.

Si passa poi all'essiccamento.

### 3.2.2. Essiccamento

L'essiccamento è una procedura che consente la rimozione di un liquido da un solido che lo contiene in quantità variabile (di solito ridotta); normalmente il liquido a cui ci si riferisce è l'acqua.

I metodi di essiccamento più semplici, e anche i più antichi, sono quelli basati sull'evaporazione del solvente, e per questo sono anche definiti *termici*. Esistono anche metodi di tipo *chimico*, che invece fanno sì che il solvente reagisca con un'altra sostanza, in modo da facilitare il suo allontanamento dal sistema; i metodi *meccanici*, infine, consistono nella spremitura del "solido umido" sul quale si intende operare l'essiccamento.

L'essiccamento termico rimane il metodo più utilizzato in campo farmaceutico perché è più sicuro in quanto non prevede l'introduzione di sostanze estranee; tale metodo può essere realizzato usando diversi tipi di attrezzature: essiccatore continuo o discontinuo, essiccatore a calore diretto o indiretto ed essiccatore a calore radiante.

Gli scopi dell'essiccamento in campo farmaceutico sono diversi: serve per la riduzione del volume e/o peso di un materiale per ridurre i costi di trasporto e stoccaggio, per facilitare la macinazione, per aumentare la stabilità chimica del materiale (migliore conservabilità), per la granulazione ad umido e per il processamento dei materiali.



Al termine di queste operazioni si ottengono le polveri e i granulati, che possono essere sia già utilizzati in quanto tali, oppure forniscono una base di partenza per la realizzazione di compresse, capsule, bustine, ecc... In tal caso si parla di ripartizione delle forme farmaceutiche.

### 3.2.3. Le compresse

Tra le forme farmaceutiche solide ritroviamo le compresse, tra le più diffuse grazie alle semplici operazioni che sono necessarie per realizzarle. Si parte da una certa quantità di polvere o granulato, dosata all'interno di una matrice, che viene compattata grazie all'azione di due punzoni, uno superiore e uno inferiore (figura 3.8): avvicinandosi tra loro, i pistoni riducono il volume della polvere presente nella matrice, fino a renderla compatta e in forma solida.

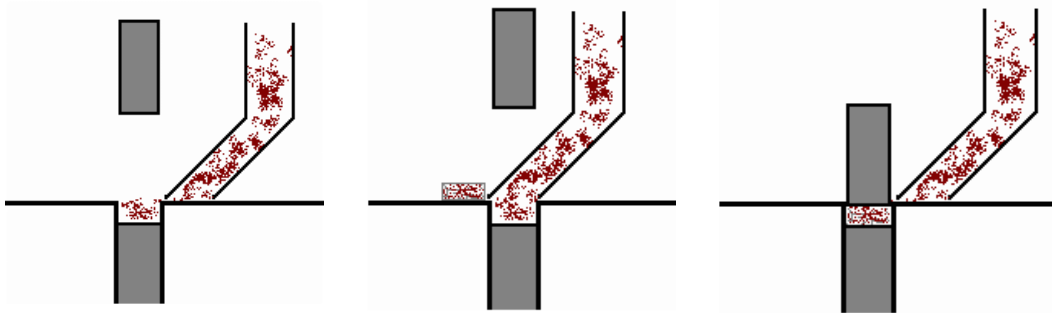


Figura 3.8: schema di funzionamento di una macchina compresse a punzone singolo

Per far sì che si ottenga un agglomerato solido, tipicamente si aggiungono dei materiali leganti alle polveri, che devono essere inerti per non modificare l'azione biologica del farmaco. Le compresse devono la loro forma alla matrice utilizzata e al profilo dei punzoni, che consentono di ottenere compresse rotonde, rotonde bombate, rettangolari, ecc... La durezza delle compresse, invece, dipende dalla forza esercitata dai pistoni nell'azione di compressione, mentre il peso è legato alla quantità delle polveri immesse nella matrice.

### 3.2.4. Le capsule

Altra forma farmaceutica solida sono le capsule, costituite da un involucro esterno duro o molle, all'interno delle quali si possono introdurre i principi attivi in diverse forme: granulati, polveri, liquidi o una combinazione delle precedenti. Le capsule sono tipicamente assunte per via orale, e per questo l'involucro è stato per anni realizzato in gelatina alimentare: questa soluzione però presenta alcune criticità, quali il fatto che essa ha un elevato contenuto di acqua e tende a formare una pellicola insolubile che ritarda l'assorbimento del principio attivo. Oltre alla gelatina, viene aggiunta la glicerina (o altra sostanza) fino al 30%, la quale è responsabile della loro morbidezza ed elasticità; spesso vengono aggiunte anche sostanze conservanti per prevenire la crescita di muffe e batteri sulla gelatina. Al posto della classica gelatina, l'involucro della capsula può essere sostituito da amido; si parla in questo caso di capsule amilacee, di cachets o di cialdini. L'involucro del cialdino è fatto di pane azzimo, usualmente di farina di frumento, e consiste di due sezioni cilindriche appiattite e preformate.

In generale, come rappresentato in figura 3.9, esistono due tipi di capsule: rigide e molli.



**Casule rigide**



**Casule molli**

Figura 3.9: esempio di capsule rigide e molli

Uno dei motivi del grande successo delle capsule di gelatina rigida è costituito dalla loro versatilità: esse possono contenere diverse combinazioni di prodotti solidi, nonché prodotti liquidi o pastosi. La produzione prevede un processo a due fasi: la prima, in cui le due metà di una capsula vuota, 'corpo' e 'cappuccio', vengono prodotte e successivamente unite; la seconda, in cui vengono riaperte dai produttori farmaceutici, riempite con il medicinale, e poi ben saldate.

A differenza di quelle rigide, le capsule morbide di forma convessa vengono prodotte tramite uno stampo in un singolo pezzo avente una superficie più spessa. Sono più flessibili e morbide e di solito contengono principi attivi sotto forma di oli e paste.

La differenza principale tra le capsule molli e le capsule dure (dette anche opercoli), consiste nel fatto che le prime vengono oggi preparate con un unico procedimento e non è possibile aprirle se non tagliandole o perforandone l'involucro; le seconde, invece, vengono preparate vuote e vendute come tali all'industria utilizzatrice che le riempie con apposite macchine dette incapsulatrici.

Il metodo di riempimento può essere:

- Diretto: il riempimento diretto può avvenire in due modi: per caduta dall'alto o per riempimento a coclea. Tra i metodi di riempimento diretto troviamo:
  - o riempimento per precompressione, che prevede la compressione delle polveri al fine di realizzare un cilindretto di principio attivo, che verrà poi inserito nella capsula;
  - o riempimento per mezzo di tubicini dosatori: in questo caso la compressione non avviene precedentemente, ma nel momento stesso del riempimento
- Indiretto.

### 3.2.5. Il rivestimento

Le forme farmaceutiche solide possono essere utilizzate così come sono al termine delle operazioni di compressione, oppure possono essere rivestite con svariate sostanze. La scelta di rivestire queste forme farmaceutiche, soprattutto le compresse, può essere dettata da diversi fattori:

- fattori puramente estetici, come mascherare odori o sapori sgradevoli e renderne più facile l'assunzione e il riconoscimento del prodotto (ad esempio rivestimento colorato) da parte del paziente;
- per proteggere il principio attivo dall'ambiente esterno;

- evitare alcune incompatibilità tra due principi attivi includendone uno nel nucleo e uno nel rivestimento;
- per proteggere la compressa dagli acidi dello stomaco o per proteggere il rivestimento dello stomaco da farmaci aggressivi;
- per riuscire a gestire il suo assorbimento, sia in termini di rilascio graduale, sia in termini di preciso distretto dell'apparato digerente.

Il rivestimento delle compresse può essere di due tipi: con zucchero (confettatura) e con film.

Come tecniche di rivestimento delle compresse troviamo invece:

- *Confettatura a secco*: viene realizzata con delle comprimatrici dette comprimatrici rotative confettatrici, le quali sono costituite da due macchine; la prima produce i nuclei da rivestire e la seconda li confetta.
- *Rivestimento in bassina*: in questo caso, si vuole ricoprire la superficie del nucleo (ovvero la compressa) con un polimero, far sì che il tutto risulti asciutto e che il film sia ben fissato e può essere utilizzato sia per la confettatura che per la filmatura. La bassina ha il compito di mescolare le compresse affinché non aderiscano tra loro, mentre il sistema di spruzzatura le ricopre con il polimero prescelto; contemporaneamente il sistema di essiccamento integrato, utilizzando dell'aria precedentemente trattata in una UTA, ha lo scopo di eliminare l'umidità e assicurare una presa stabile del film sulle compresse. Le bassine possono inoltre essere a parete non perforata o a parete perforata: le prime presentano il vantaggio di poter eseguire il rivestimento su qualsiasi tipo di forma farmaceutica solida per uso orale poiché, non presentando aperture, possono gestire anche nuclei di dimensioni molto ridotte; le seconde invece non consentono ciò, ma mostrano un notevole vantaggio per la fase di essiccamento, in quanto l'aria può facilmente raggiungere i nuclei attraverso tutte le aperture presenti sul cilindro.



Figura 3.10: esempio di bassina

- *Rivestimento in tamburo perforato*: in questo caso il rivestimento delle compresse e la loro asciugatura avviene dentro un cilindro le cui pareti sono perforate. Questo permette un flusso d'aria ottimale all'interno del tamburo, nel quale sono presenti deflettori di determinata forma e peso per ottenere un mescolamento omogeneo delle compresse.

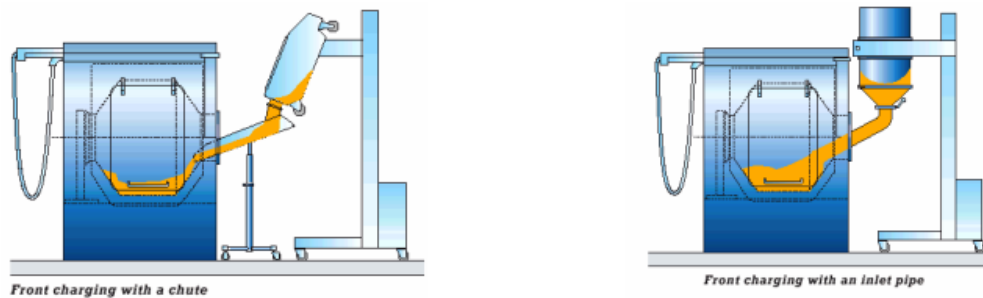


Figura 3.11: esempio di tamburo perforato con caricamento frontale del materiale da rivestire

- *Rivestimento in letto fluido*: rappresenta un'alternativa a quello in bassina se si devono realizzare rivestimenti con solventi acquosi o organici. Non è consentita la confettatura ed inoltre questo metodo si presta meglio al trattamento di nuclei di dimensioni contenute.

### 3.3. Forme farmaceutiche FLUIDO-SOLIDE

Le forme farmaceutiche semisolide comprendono:

- Supposte e ovuli;
- Pomate.

Questi due medicinali sono caratterizzati da una consistenza pastosa e si ottengono dalla miscelazione tra principi attivi ed eccipienti i quali costituiscono la differenza esistente tra supposte e ovuli. In particolare, per le supposte si utilizzano eccipienti lipofili, ovvero grassi a basso punto di fusione che possono essere liquefatti ad una temperatura inferiore a quella corporea; per gli ovuli, invece, sono prevalentemente idrofili, ovvero capaci di legarsi con l'acqua (ad es. gelatina, glicerina).

Le pomate possono avere una consistenza cremosa o gelatinosa e si dividono in:

- unguenti idrofobi;
- creme idrofile e idrofobe;
- gel idrofili.

Gli unguenti idrofobi vengono prodotti incorporando il principio attivo ad una fase lipofila, ottenuta per fusione dei componenti lipofili solidi o semisolidi, a una temperatura compresa tra i 70°C e i 90°C.

Le creme sono dette "sistemi dispersi", poiché costituite da due fasi liquide (una oleosa, l'altra acquosa) immiscibili tra loro; le due fasi, se opportunamente agitate, formano un'emulsione.

I gel idrofili sono costituiti invece da una soluzione acquosa, che viene poi resa viscosa grazie all'aggiunta di un gelificante, detto anche "agente viscosizzante"; l'assorbimento dei principi attivi contenuti nelle pomate avviene per via cutanea.

Alle forme farmaceutiche semisolide, vengono solitamente aggiunti conservanti ad azione antimicrobica il quale, idealmente, deve essere stabile, non deve interferire con l'attività dei principi attivi e non deve essere tossico, e deve essere efficace (anche alle basse temperature) contro un ampio spettro di microrganismi.

Le supposte e gli ovuli vengono preparati in egual modo e possono essere prodotti:

- per fusione: i principi attivi vengono incorporati negli eccipienti fusi, fino ad ottenere un composto omogeneo. Tale composto viene realizzato in un serbatoio in acciaio inox, dotato di:

agitatore, tubazioni di carico, termometro e collegamento con una pompa del vuoto. La fusione avviene grazie al fatto che il composto viene riscaldato in modo indiretto, tramite un fluido riscaldante che scorre nell'intercapedine tra il serbatoio e la camicia esterna; si ottiene così una massa fusa, che viene poi colata in stampi metallici e lasciata raffreddare.

- per compressione: in questo caso, i principi attivi vengono addizionati agli eccipienti che sono stati precedentemente sminuzzati ottenendo una pasta che viene poi spinta dentro gli stampi metallici mediante una pressa a vite.

Dopo la fase di formatura, si ottengono delle supposte pronte per essere confezionate in alveoli di plastica termoformabile o in alluminio (blister). Negli impianti moderni si utilizzano macchine che operano in automatico e che si occupano di mantenere la massa alla temperatura di colaggio, per poi ripartirla in alveoli di alluminio o plastica (PVC) accoppiati con PE, i quali possono essere preformati o formati lungo la linea nello stesso impianto.

Nel caso di *unguenti idrofobi*, la prima fase di preparazione consiste nella fusione e miscelazione dei componenti lipofili, e nella dispersione in tale fase del principio attivo, se solubile. Dopodiché vengono eseguite le operazioni di filtrazione, miscelazione, raffreddamento e omogeneizzazione. Se il principio attivo è insolubile nella fase lipofila, esso viene addizionato nel corso dell'omogeneizzazione.

Per la produzione di *gel idrofili*, il principio attivo viene sciolto o disperso nella soluzione acquosa. Seguono le operazioni di filtrazione, miscelazione, gelificazione, mediante l'introduzione di un agente viscosizzante, e di omogeneizzazione. Anche qui il principio attivo, se insolubile, viene addizionato nel corso dell'ultima operazione di omogeneizzazione.

Per la produzione di *creme idrofile/idrofobe*, si procede alla preparazione delle due fasi contemporaneamente, quella oleosa e quella acquosa, e il principio attivo viene disciolto nella fase in cui esso risulta solubile. Nel caso di crema idrofila, si ha una dispersione della fase oleosa in quella acquosa; viceversa, per una crema idrofoba, avviene la dispersione della fase acquosa in quella oleosa.

Dopo la preparazione delle soluzioni, seguono le operazioni di filtrazione e di emulsione, per il quale si ricorre ad un turboemulsore, che svolge la duplice funzione di miscelare e omogeneizzare le due fasi. Nel recipiente d'acciaio di cui è costituito il turboemulsore, vengono inseriti i principi attivi, gli eccipienti e gli opportuni stabilizzanti che permettono di evitare che si verifichi una disgregazione dell'emulsione; gli stabilizzanti, in genere, sono costituiti da tensioattivi lipofili o idrofili, a seconda che si voglia ottenere un'emulsione di acqua in olio, o viceversa, e da altri emulsionanti (es. gomma arabica). Si ottiene così una pasta, che viene trasferita mediante sistemi di tubazioni in grossi recipienti di acciaio (detti bulk), prelevata ed inviata, tramite tubi a circuito chiuso, all'intubettatrice, una macchina in grado di dosare le esatte quantità di pomata da inserire in tutti i tubetti (di solito realizzati in alluminio o plastica).

Il riempimento dei tubetti avviene tramite un ugello, collegato a un sistema automatico a pistone e se il tubetto riempito è metallico, esso viene chiuso sul fondo utilizzando delle pinze; invece, se il tubetto è di plastica, esso viene sigillato con un fondello in alluminio, apposto con saldatura a caldo. Dopo aver completato il riempimento e la chiusura, i tubetti vengono tappati con tappi in plastica, forniti in continuo da un alimentatore su guida vibrante.

### 3.4. Forme farmaceutiche LIQUIDE

Le forme farmaceutiche liquide più diffuse sono le soluzioni, le sospensioni e le emulsioni con solventi acquosi e non acquosi.

Le *soluzioni* sono delle preparazioni liquide nelle quali sono presenti una o più sostanze chimiche disciolte in un adatto solvente (o una miscela di solventi); le *sospensioni* sono preparazioni liquide formate da particelle solide disperse in una fase liquida in cui le particelle non sono solubili; le *emulsioni*, invece, sono sistemi bifasici in cui un liquido si trova disperso in un altro liquido sotto forma di piccole gocce.

Queste forme farmaceutiche sono destinate a diversi utilizzi (orale, esterno, parenterale) per cui possono essere sia sterili che non sterili.

I loro molteplici impieghi impongono un attento studio del layout e delle attrezzature da scegliere per gestire eventuali preparazioni altamente tossiche o sterili: ad esempio, per poter preparare farmaci iniettabili, è necessario disporre di ambienti, attrezzature e processi totalmente sterili e apirogeni. Per poter conseguire questi obiettivi, è necessario che le attrezzature utilizzate possano essere facilmente sottoposte ad operazioni di lavaggio, sanificazione, sterilizzazione e sanitizzazione; un'apparecchiatura non correttamente lavata, infatti, potrebbe inficiare la qualità del preparato, rilasciando particelle contaminanti provenienti da preparazioni precedenti. Anche una difficoltosa sanitizzazione potrebbe compromettere il preparato, perché porterebbe ad un graduale incremento della carica microbiologica. Per tenere a bada tutti questi aspetti, è consigliabile utilizzare attrezzature con interstizi facilmente raggiungibili nelle operazioni di lavaggio, e che abbiano una finitura superficiale e una rugosità tali da non consentire alle emulsioni di "aggrapparsi" alla superficie, rendendo più facile la loro asportazione.

La preparazione delle forme farmaceutiche liquide prevede le seguenti fasi:

- la solubilizzazione o dispersione;
- la miscelazione;
- l'eventuale filtrazione per rimuovere le impurità;
- preparazione per la ripartizione nei contenitori scelti per la distribuzione all'utente;
- pulizia (lavaggio/sterilizzazione) dei contenitori e dei dispositivi di chiusura (confezionamento primario);
- ripartizione e chiusura o ripartizione, liofilizzazione e chiusura dei contenitori primari;
- confezionamento secondario.

#### 3.4.1. La solubilizzazione

La solubilizzazione o dispersione avviene per mezzo dei dissolutori, contenitori di capacità variabile in cui vengono preparate le soluzioni o in cui si effettua la miscelazione dei liquidi. In generale, i dissolutori sono costituiti da un contenitore centrale in acciaio inox sollevato dal pavimento per lo scarico del materiale, in grado di resistere a pressioni superiori e inferiori a quella atmosferica, e di riscaldare o raffreddare il contenuto, mediante un sistema di circolazione di fluidi. Per lo scarico del materiale è presente sul fondo un rubinetto; è inoltre costituito da un agitatore per consentire la miscelazione, e una sonda per monitorare la temperatura.

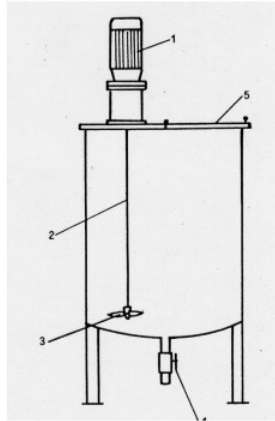


Figura 3.12: schema generico di un dissolvente

L'acqua, se utilizzata come solvente di preparati iniettabili, deve essere deionizzata, sterilizzata ed esente da pirogeni, di solito microbi, prodotti microbici o tossine, in grado di provocare un brusco innalzamento della temperatura corporea.

### 3.4.2. La miscelazione

Dopo la solubilizzazione, si passa alla miscelazione; per la preparazione di masse completamente liquide o con particelle in sospensione o in emulsione, vengono utilizzati gli agitatori. Queste apparecchiature, per garantire una perfetta miscelazione, combinano tra loro più movimenti:

- *trasporto meccanico*, con il quale si intende quel movimento impresso al prodotto che lo fa variare continuamente di posizione. Questo movimento non garantisce un efficiente mescolamento;
- *flusso turbolento*, che prevede che al liquido venga impresso un moto turbolento, garantendo un movimento delle particelle più casuale e, dunque, una miscelazione più efficace;
- *diffusione molecolare*, che si concentra sul moto delle singole particelle e lo amplifica, mediante ad esempio gli ultrasuoni.

Gli agitatori, che possono essere utilizzati per la preparazione di soluzioni e miscele di liquidi, possono essere di diversa tipologia e la scelta dipende dalle condizioni operative e dal tipo di fluido trattato. Le tipologie sono:

- agitatori ad elemento rotante: sono quelli più utilizzati perché sono anche i più versatili, in quanto si adattano sia alle esigenze industriali che a quelle di laboratorio. Ne esistono di diversi tipi: ad albero passante, a trascinamento magnetico (il quale, essendo collocato sul fondo del recipiente, non ha un albero passante e dunque non ha contatti con l'esterno, riducendo la probabilità di contaminazione), a pale e a turbina.
- agitatori a getto d'aria: il funzionamento è basato sull'insufflazione di un gas nella miscela (tipicamente aria) la quale, spinta a forza nel fluido, forma delle bollicine, che consentono la miscelazione.
- agitatori a getto di fluido: essi svolgono la miscelazione imprimendo al fluido un moto turbolento, per mezzo di una pompa ed ugelli.
- agitatori ad ultrasuoni: gli ultrasuoni provocano nel fluido il fenomeno della cavitazione e quindi, grazie alle variazioni di pressione, si ha un rimescolamento del fluido.



Soprattutto quando la miscelazione riguarda emulsioni e sospensioni, si rende necessaria, al termine della miscelazione stessa, un'operazione di omogeneizzazione in modo da aumentare la stabilità fisica del preparato, ottenere una maggiore uniformità di distribuzione delle particelle e per, soprattutto per i preparati iniettabili, assicurarsi che le particelle rientrino nei limiti dimensionali prescritti per questo tipo di somministrazione.

### 3.4.3. La filtrazione

Se nella preparazione liquida sono presenti delle impurezze sospese, si deve procedere con la filtrazione: è un'operazione di tipo meccanico, svolta mediante l'utilizzo di un filtro, ovvero di un mezzo che riesce a separare le particelle sospese in un fluido poiché risulta essere permeabile al fluido ma non lascia passare la fase solida.

Esistono due tipi di filtrazione: quella *a flusso diretto* (DFF), che consente di separare le particelle da un fluido, che sia esso liquido o gassoso; quella *a flusso tangenziale* (TFF), invece, consente di separare le particelle solo da correnti liquide.

Un solido sospeso in un fluido viene trattenuto da un filtro secondo due meccanismi principali: per azione meccanica e per effetto di forze elettrostatiche; inoltre, i solidi in sospensione possono essere separati dal liquido con tre meccanismi:

- *Impatto inerziale*: tale meccanismo è basato sul fatto che ogni particella, essendo dotata di massa e posta in movimento con una certa velocità, possiede una certa quantità di moto. Per cui, quando il liquido (e con esso le particelle) viene forzato a passare attraverso il setto filtrante, il liquido segue il percorso a minor resistenza passando attraverso i pori, mentre le particelle, a causa della loro quantità di moto, proseguono in linea retta impattando sulla superficie piena del setto.
- *Intercettazione per diffusione*: viene utilizzata per le particelle più piccole, che non riescono ad essere bloccate con il meccanismo ad impatto inerziale e prevede che le particelle di solido vadano in collisione con le molecole del liquido; in questo modo le particelle solide si muovono in modo disordinato, allontanandosi dalle linee di flusso del liquido, rendendo più probabile un impatto con la superficie piena del setto.
- *Intercettazione diretta*: in questo metodo si utilizza un filtro con un elevato numero di fibre, che svolgono la funzione di intercettazione non solo a monte, ma anche tra le maglie, trattenendo le particelle di solido.

I parametri che influenzano la filtrazione sono pressione, viscosità e caratteristiche del filtro (spessore, porosità, superficie di filtrazione); in generale, i filtri possono essere di due tipi:

- *Filtri in profondità*, nei quali il materiale viene trattenuto sia sulla superficie che nel corpo del filtro, per cui la capacità filtrante viene saturata in tempi lunghi. Questi tipi di filtro sono molto efficaci se bisogna separare grandi quantità di solido e per la sterilizzazione.
- *Filtri a schermo*, i quali trattengono il materiale solo in superficie, come un setaccio; sono utilizzati maggiormente nella filtrazione sterilizzante e sono essenzialmente delle membrane polimeriche montate su particolari supporti.

### 3.4.4. La pulizia

Il lavaggio viene effettuato tramite soluzioni acquose acide, alcaline o saline, oppure con antisettici; a questa operazione fanno seguito un prolungato e accurato risciacquo, con acqua deionizzata, e l'asciugatura, tramite insufflazione di aria pulita.



La procedura di *lavaggio* si articola in diverse fasi: prima di tutto, il confezionamento primario viene sottoposto ad una pulizia iniziale mediante l'utilizzo di ultrasuoni (le vibrazioni staccano le particelle di sporcizia adese al vetro); si passa poi ad un lavaggio sia interno che esterno con getti d'acqua, e ad una eventuale siliconatura della superficie interna; si termina con un risciacquo finale. Il lavaggio lascia gocce d'acqua sulle superfici interne ed esterne di fiale e flaconi, che vanno opportunamente rimosse mediante il soffiaggio di aria: talvolta, al termine di questa operazione, restano delle gocce residue, che possono essere rimosse con un essiccamento.

#### 3.4.4.1. Sterilizzazione

In molte delle operazioni necessarie per la produzione dei farmaci, è fondamentale che apparecchiature, utensili e ambienti siano sterilizzati, in particolar modo per la realizzazione di farmaci iniettabili.

Se il preparato da ospitare è sterile, si passerà ad un'ultima fase di sterilizzazione (per la quale si può ricorrere all'uso di forni se il processo è discontinuo, oppure di tunnel di essiccamento se il processo è continuo) e deprogenazione<sup>1</sup>, che tipicamente viene svolta sulla stessa apparecchiatura dell'essiccamento, in modo continuo su un nastro trasportatore. La sterilizzazione ha l'obiettivo di eliminare o inibire i microrganismi presenti su un oggetto o in un preparato cercando di ottenere la totale assenza di microrganismi; questa condizione però è solo ideale, in quanto la sopravvivenza di tali organismi tende a zero solo per periodi di trattamento infiniti.

Esistono vari metodi per effettuare una sterilizzazione:

- Calore umido: si effettua in autoclave, la quale utilizza vapore acqueo che ha il vantaggio di un'alta capacità termica unita alla facilità di penetrazione tra le fibre dei tessuti e nei corpi porosi. Tale metodo prevede che i microrganismi vengano esposti non solo all'azione di particolari temperature, ma anche a particolari condizioni di umidità, e quindi la temperatura non è l'unico agente sterilizzante. La presenza di acqua è dunque necessaria ai fini della sterilizzazione e può trovarsi allo stato liquido o di vapore. Per far sì che l'umidità sia presente al livello dei microrganismi, si può ricorrere a due diversi metodi: quello diretto, che prevede che il vapore investa direttamente l'oggetto da trattare; quello indiretto, invece, prevede che il vapore venga a contatto con il recipiente (ad es. fiala in vetro) che contiene il liquido, e che quindi sterilizzi solo l'esterno della fiala. Dato che però il vapore si trova ad una certa temperatura, la sua azione sulla superficie esterna della fiala porta il liquido contenuto alla sua stessa temperatura, in modo tale che esso si "auto-sterilizzi". Questo metodo è largamente utilizzato nella pratica farmaceutica, ma presenta una criticità legata all'utilizzo di vapore ed alte temperature: bisogna assicurarsi infatti che i materiali sottoposti a questo trattamento siano in grado di sopportare sia la temperatura di esercizio (121 °C) che le escursioni di pressione dovute soprattutto all'utilizzo di vapore puro.

Nello specifico, la sterilizzazione avviene in questo modo: l'oggetto da trattare viene inserito nella camera di sterilizzazione ma, prima di avviare il processo, è necessario eliminare l'aria dalla camera in quanto, avendo essa una densità maggiore del vapore, tenderebbe ad accumularsi sul fondo della camera creando gradienti di pressione. Con delle pompe da vuoto viene quindi eliminata l'aria e si procede alla fase di riscaldamento: il vapore entra nella camera e riscalda gradualmente l'oggetto cedendogli calore per portarlo alla temperatura desiderata (tipicamente 121 °C), formando però della

---

<sup>1</sup> La deprogenazione è il processo di eliminazione delle sostanze pirogene (cioè qualsiasi sostanza in grado di provocare l'innalzamento della temperatura corporea) e, tenendo in considerazione le caratteristiche del prodotto, può essere ottenuta tramite rimozione o inattivazione.

condensa che deve essere smaltita sul fondo. Una volta raggiunta la temperatura desiderata, essa deve mantenersi costante per un periodo pari al tempo di mantenimento, necessario ad eliminare tutti (o quasi) i microrganismi. Una volta effettuata la sterilizzazione, è necessario riportare l'oggetto ad una temperatura più bassa di quella di trattamento, talvolta anche al di sotto dello zero e per fare ciò si può: realizzare il vuoto nella camera di sterilizzazione, raffreddare mediante la circolazione di acqua fredda nell'intercapedine della camera, raffreddare nebulizzando acqua direttamente sugli oggetti presenti nella camera di sterilizzazione o raffreddare nebulizzando acqua con camera di sterilizzazione pressurizzata. Nelle operazioni di sterilizzazione, infatti, si potrebbe correre il rischio di danneggiare le fiale e i flaconi in vetro, a causa delle sovrappressioni interne.

- Calore secco: a differenza del metodo a calore umido, questo metodo ha un unico agente sterilizzante, ovvero la temperatura: non avendo bisogno di acqua, in concomitanza della sterilizzazione con calore secco è possibile effettuare una depirogenazione che però, solitamente, viene effettuata a temperature più elevate della sterilizzazione. Si può pertanto affermare che un elemento soggetto a depirogenazione sarà certamente anche sterile, ma un elemento soggetto a sterilizzazione non è detto che sarà anche depirogenato. Questo metodo può essere realizzato in forno o tunnel, a seconda che si voglia optare per un processo di tipo batch o continuo; in entrambi i casi, il funzionamento interno alla camera è simile a quello con calore umido, fatta eccezione per l'assenza di acqua. Entrambe le apparecchiature sono provviste di sistemi per mantenere costanti pressione e temperatura di esercizio, per una corretta sterilizzazione. I tunnel presentano sicuramente un vantaggio legato all'assenza di necessità di manualità, a differenza dei forni che richiedono il carico e lo scarico delle fiale/flaconi, aspetto che torna molto utile nel caso di produzioni su larga scala. Di contro, mentre con i forni si ha un migliore isolamento tra la zona sterile e quella non sterile, ciò non è possibile per i tunnel, che emettono aria di ricircolo che si sparge sia nell'area non sterile che in quella sterile.

- Ossido di etilene (ETO): si opta per questo metodo di sterilizzazione quando i recipienti contenenti i farmaci non resistono alle elevate temperature, per esempio le materie plastiche, realizzando una "sterilizzazione a freddo". In questo caso, l'agente sterilizzante non è quindi la temperatura o l'umidità ma un gas o vapore che abbia una sufficiente efficacia a basse temperature e che non abbia effetti collaterali su uomo, ambiente e prodotto. Un esempio di agente è l'ossido di etilene che però presenta una serie di criticità: esso è infatti tossico, ma continui studi hanno dimostrato anche una sua probabile azione cancerogena, mutagena e teratogena il che comporta l'esistenza di rigide regole per il suo utilizzo. L'ETO, infatti, ha un punto di ebollizione molto basso (a 11°C), per cui a temperatura ambiente è allo stato gassoso; dato che per poter essere impiegato deve essere diluito, spesso viene utilizzato insieme al vapore d'acqua. Inoltre, ha anche una notevole capacità di penetrazione la quale, da un lato, potrebbe essere un vantaggio (perché in questo modo è possibile investire l'esterno dei recipienti con il vapore, avendo la certezza che esso riesca a raggiungere anche i microrganismi presenti all'interno degli stessi) ma dall'altro rappresenta una pericolosità perché la sola aspirazione dell'aria presente all'interno dei recipienti non elimina del tutto l'ETO, che è in grado di permanere nei materiali porosi.

### 3.4.5. La ripartizione

Per la forma farmaceutica liquida prima della ripartizione, come visto, è dunque necessario effettuare la pulizia dei confezionamenti primari, per poi passare alla ripartizione e chiusura, o ripartizione, liofilizzazione e chiusura; infine, il prodotto viene collocato nel confezionamento secondario. I preparati liquidi vengono tipicamente collocati in fiale o flaconi.

### 3.4.5.1. Fiale e flaconi

Nel caso delle fiale, qualora esse siano destinate a contenere preparati iniettabili, anche la soluzione deve essere sterilizzata. Il preparato, dopo la sterilizzazione, viene raccolto in palloni di vetro (o acciaio inox), dai quali raggiunge direttamente la macchina infialatrice che, nel caso di flaconi prende il nome di inflaconatrice; si passa quindi al *riempimento di fiale e flaconi* che può essere effettuato seguendo diversi procedimenti:

- riempimento volumetrico: esso si basa sull'accoppiamento camicia-pistone, il quale può essere visto come una siringa. Il volume di liquido da dosare viene aspirato dal serbatoio e viene poi rilasciato nella fiala o nel flacone;
- riempimento magnetico: questo sistema è controllato elettricamente e presenta un contenitore polmonato, ovvero con una pressione controllata e costante e i trasduttori presenti consentono di regolare il flusso di liquido erogato;
- riempimento ponderale: funziona analogamente al sistema di riempimento magnetico. In questo caso il peso viene continuamente controllato e, una volta raggiunto il valore desiderato, il tubicino di distribuzione viene costretto, in modo da bloccare l'erogazione;
- riempimento tempo/pressione: il prodotto da infialare è contenuto e poi distribuito da un recipiente sotto pressione. Quando il tempo di riempimento calcolato si esaurisce, il tubo flessibile utilizzato per l'erogazione viene pizzicato, in modo da bloccare il flusso.

Le macchine per il riempimento differiscono per le fiale e per i flaconi:

- per le *fiale aperte* e per i *flaconi* il metodo di dosaggio utilizzato è analogo ed è quello volumetrico o tempo/pressione;
- per le *fiale chiuse* il riempimento è preceduto dall'apertura della fiala, che può essere effettuata per taglio o per fusione.



Figura 3.13: esempio di fiale (sinistra) e flaconi (destra)

### 3.4.5.2. Siringhe pre-riempite

Oltre fiale e flaconi, il confezionamento primario delle forme farmaceutiche liquide può essere realizzato anche utilizzando le siringhe pre-riempite. Questi contenitori sono stati sviluppati negli ultimi anni, e hanno trovato largo impiego soprattutto per i farmaci iniettabili, ma anche per gli spray nasali. Questo tipo di confezionamento ha numerosi vantaggi quali: la facilità d'uso, la riduzione del rischio di "mix-up" e rischio di assumere quantitativi eccessivi di farmaco, la riduzione delle possibilità di contaminazione, dato che non è necessaria la manualità che invece è richiesta per i contenitori tradizionali. Da un punto di vista industriale, la riduzione delle quantità contenute nelle siringhe rispetto a fiale e flaconi rappresenta un risparmio in termini

economici, ma di contro i materiali da cui esse sono composte risultano meno compatibili con i farmaci rispetto al vetro (elastomeri del pistone, silicone e metallo dell'ago).

Il processo produttivo di questi dispositivi si differenzia in base al tipo di siringa prodotto: esse, infatti, possono essere siringhe pre-riempite:

- *Da "bulk"*: in questo caso lavaggio, siliconatura, sterilizzazione e assemblaggio, vengono svolte dal produttore farmaceutico prima della fase di riempimento. In particolare, dopo aver rimosso le siringhe dagli involucri in plastica, vengono sottoposte a lavaggio e siliconatura e poi vengono inserite in alloggi che le mantengono in posizione verticale per essere sottoposte a sterilizzazione e deipirogenazione in un tunnel ad aria calda; all'uscita del tunnel proseguono verso il sistema di assemblaggio e poi a quello di riempimento, dopo il quale esse vengono chiuse mediante un tappo in gomma naturale. Le siringhe vengono ultimate con l'inserimento dell'astina e l'applicazione dell'etichetta.
- *Sterili "in nest"*: nel caso delle siringhe sterili, esse sono già lavate, siliconate ed assemblate dal fornitore e sono contenute in "nest", cioè vaschette sigillate con doppio foglio di tyvek e sterilizzate con ossido di etilene. Per poterle riempire, viene rimosso l'involucro esterno, il doppio foglio di tyvek e l'intero nest viene inviato alla stazione di riempimento; una volta riempite le siringhe, esse vengono chiuse e poi il nest viene nuovamente sigillato.

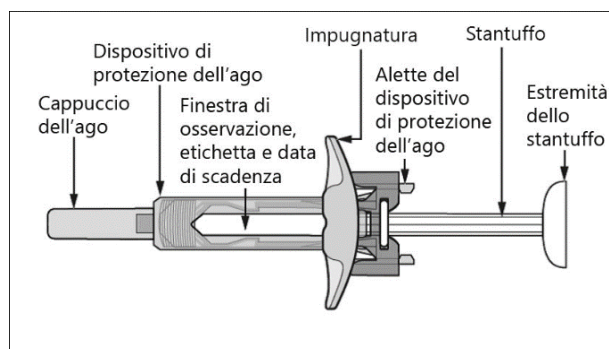


Figura 3.14: schema esemplificativo di siringa pre-riempita

### 3.4.6. La liofilizzazione

Le forme farmaceutiche liquide, oltre a poter essere utilizzate in quanto tali, possono essere sottoposte al trattamento di liofilizzazione, sia come farmaci completi che come soli principi attivi.

La liofilizzazione è una forma di essiccamento tramite cui viene eliminata completamente l'acqua presente nei farmaci, che vengono a loro volta ridotti in polveri disidratate; sotto questa forma i farmaci mantengono le loro proprietà. Dunque, la liofilizzazione è un processo fondamentale in quanto permette di realizzare formulazioni stabili nel tempo pur utilizzando delle sostanze che, se non sottoposte a tale trattamento, si degraderebbero facilmente.

Nello specifico, il materiale viene prima portato a basse temperature (fra i  $-30^{\circ}$  e i  $-40^{\circ}$ ) per provocare il congelamento del liquido che si vuole far evaporare, per poi essere sottoposto a condizioni di vuoto spinto raggiungibili mediante apposite pompe, per consentire la sublimazione (passaggio dallo stato solido a quello aeriforme). Il risultato di questo processo è un prodotto essiccato e solubile, che presenta numerosi vantaggi quali una maggiore protezione sia dagli agenti inquinanti sia dai microorganismi ed inoltre i prodotti trattati in

questo modo si possono immagazzinare e trasportare più agevolmente e si conservano più a lungo mantenendo le caratteristiche iniziali; per contro, comporta costi elevati, dovuti soprattutto all'elevata durata del processo.

Il processo di liofilizzazione include più fasi e, ovviamente, esistono dei macchinari e degli impianti specifici studiati per portare a termine ognuna di queste fasi. L'apparecchiatura per la liofilizzazione comprende infatti una camera di sublimazione, un manometro per la misurazione della pressione, una camera di condensazione e un compressore frigorifero.

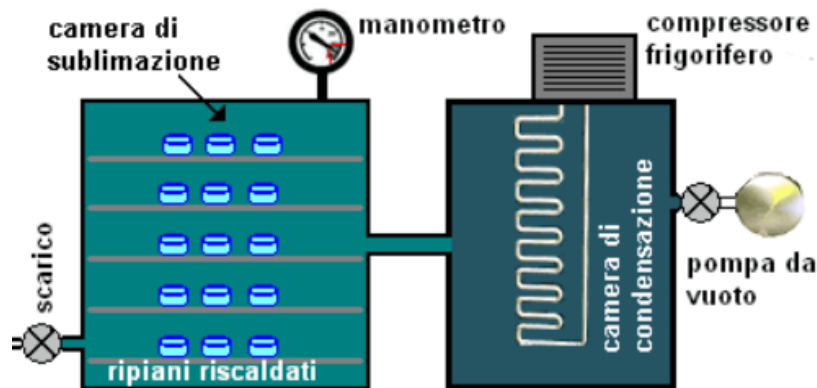


Figura 3.15: schema esemplificativo di un'apparecchiatura per la liofilizzazione

La liofilizzazione, quindi, prevede che il solvente passi dallo stato solido (congelato) a quello gassoso senza passare per lo stato liquido cioè che avvenga una sublimazione; se si considera il più comune tra i solventi utilizzati nel settore farmaceutico, l'acqua, si può dire che è possibile passare direttamente dallo stato solido a quello gassoso se si opera con pressioni tali da stare al di sotto del punto triplo.

Dopo aver completato il congelamento di soluto e solvente, si passa all'essiccamento: esso consente di rimuovere per sublimazione il solvente congelato, portando i recipienti a pressioni ben inferiori a quella nel punto critico (per es. 200 microbar) e riscaldando il prodotto congelato. In questo modo il solvente evapora, lasciando solo il soluto, che però è ancora ricco di umidità, per una percentuale di acqua che oscilla tra il 10% e il 20%: per questo motivo, all'essiccamento primario segue quello secondario.

Terminato l'essiccamento, è possibile prelevare i flaconcini dal liofilizzatore, non prima di averli sigillati e di aver riportato la pressione della camera di liofilizzazione allo stesso valore di quella esterna, tipicamente mediante un gas inerte come l'azoto.

### 3.5. Analisi Energetica

In questo capitolo verrà illustrato quello che è stato il percorso seguito per poter arrivare alla formulazione degli indicatori di prestazione teorici relativi alle fasi che sono state individuate come più energivore. Per fare ciò, una fase preliminare è stata quella di analizzare i consumi energetici di ogni fase del processo, tramite le metodologie di rappresentazione proposte nei capitoli precedenti. Lo svolgimento del tirocinio in collaborazione con ENEA ha permesso un contatto diretto con le associazioni di categoria dei vari settori industriali e, quindi, anche del farmaceutico ottenendo così un campione di 64 aziende differenti, le quali hanno fornito i loro dati delle diagnosi energetiche.

Per giungere al calcolo e poi alla definizione degli indicatori, bisogna seguire una serie di step riassunti nella figura sottostante e che verranno poi esplicitati punto per punto nel presente capitolo:



Figura 3.16: schema della metodologia generale da specializzare per i diversi settori

### 3.5.1 Analisi dei vettori energetici e definizione dei confini d'analisi

Analizzato il processo produttivo dal punto di vista teorico, è stato necessario individuare quelle che sono le fasi più dispendiose dal punto di vista energetico e quali sono i vettori energetici più utilizzati. A tale scopo, si è preso contatto con le aziende facente parte del settore farmaceutico, le quali si sono rese disponibili a fornire alcuni dati non sensibili per poter realizzare correttamente il presente lavoro di tesi. Il campione di aziende che ha contribuito a tale progetto è composto da 64 aziende la maggior parte delle quali, spesso, non si dedica esclusivamente alla produzione di una singola tipologia di farmaco, ma di molteplici forme farmaceutiche. Per questo motivo, e per la mancanza di uniformità sulle quantità di farmaci prodotte, i risultati di questa analisi non sono stati espressi in termini di media ponderata rispetto alla produzione.

In particolare, non è stato possibile individuare i consumi energetici per ognuna delle fasi del processo produttivo, sia per l'estrema eterogeneità del settore che per una politica di riservatezza portata avanti dalle aziende partecipanti, che dunque non hanno fornito dettagli sulle fasi di lavorazione. Nonostante ciò, è comunque possibile indicare quale dei vettori energetici è risultato maggiormente utilizzato; in figura 3.17 viene mostrata una tabella che riassume in generale l'utilizzo dei vettori energetici:

Vettore	N° Aziende	Utilizzo %
Energia elettrica	64	62,52%
Gas naturale	60	28,57%
Gasolio/GPL	19	0,42%
Altro	2	2,83%
Calore	2	5,66%

Figura 3.17: analisi statistica sul consumo dei vettori energetici

Nello specifico: la prima colonna indica il vettore a cui ci si riferisce, la seconda il numero di aziende che utilizza quello specifico vettore e la terza la percentuale di utilizzo rispetto al totale.

È importante specificare che i vettori utilizzati si distinguono in:

- vettori in ingresso al processo, ovvero quelli acquistati dall'esterno;
- vettori autoprodotti, ovvero quelli ottenuti mediante la trasformazione di altri vettori e destinati all'utilizzo interno all'azienda;
- vettori in uscita, ovvero un'aliquota di vettori autoprodotti in eccedenza che viene ceduta a soggetti terzi.

Quest'ultima pratica però è poco diffusa nelle aziende considerate, ed è pertanto trascurabile.

In particolare, nell'ambito dell'analisi, si è deciso di optare per una classificazione dei vettori energetici in:

- *energia elettrica*;
- *energia termica*, la quale comprende tutti i tipi di combustibile utilizzati quali calore, gas naturale, Gasolio/GPL e altro. In particolare, i consumi di gasolio/GPL sono dovuti al funzionamento di gruppi elettrogeni, della flotta aziendale e per l'autotrazione.

Tale suddivisione è stata realizzata in quanto, dall'analisi dei consumi dei vettori energetici, risultano preponderanti i valori relativi all'energia elettrica com'è possibile vedere in figura 3.18: 62,52 % contro il



37,48% dell'energia termica. Per questi "macro-vettori", si considera sia l'aliquota acquistata che quella autoprodotta, senza quindi operare una distinzione tra le due.

Dai dati delle percentuali di utilizzo, è possibile realizzare un grafico a torta che chiarisce gli impieghi percentuali dei vari vettori:

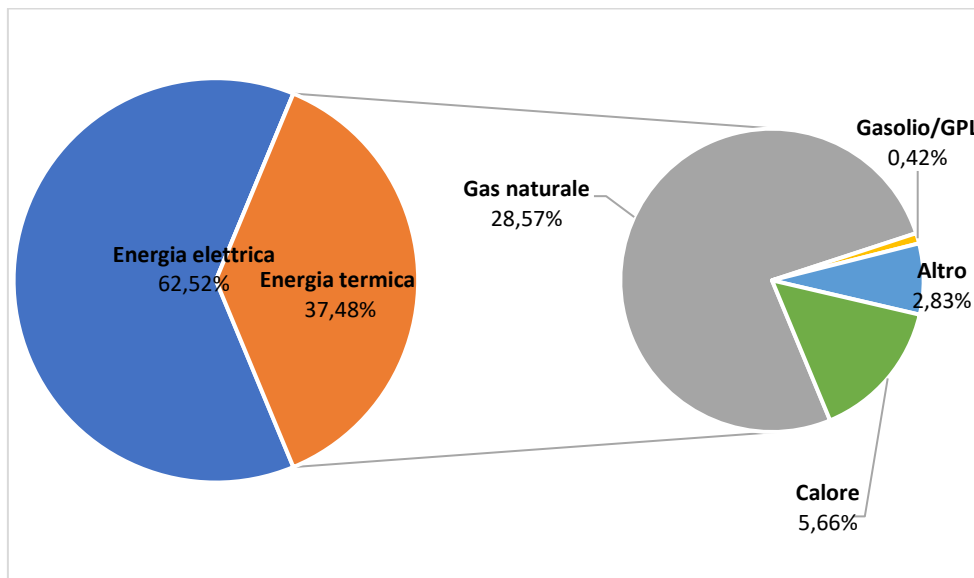


Figura 3.18: grafico a torta dei vettori energetici

Per consentire una più dettagliata analisi dei dati energetici forniti, è possibile considerare ogni azienda come costituita da tre aree funzionali:

- Attività principali: di questa voce fanno parte le linee di produzione e il confezionamento ovvero tutto il processo produttivo in generale;
- Servizi ausiliari: le principali utenze sono:
  - freddo per processo;
  - freddo per condizionamento;
  - pompaggi;
  - torri evaporative;
  - aria compressa;
  - aspirazione cappe;
  - ausiliari caldaie;
  - trattamento acque;
  - UTA;
  - calore per produzione;
  - calore per riscaldamento;
  - altri servizi (che comprendono tutte le voci estranee alle precedenti).
- Servizi generali: le principali utenze sono:
  - uffici;
  - condizionamento;
  - illuminazione;
  - magazzini;
  - R&S (ricerca e sviluppo);



- Mensa;
- CED;
- Climatizzazione altri ambienti.

Questa suddivisione, enunciata nelle linee guida fornite da ENEA, consente di perseguire una maggiore omogeneità nei risultati ottenuti da ogni azienda.

Nello specifico caso di studio, il settore farmaceutico ha seguito una politica mirata alla riservatezza, per cui i dati resi disponibili sulle attività principali **non consentono una dettagliata analisi** dei consumi di quest'area funzionale, né una suddivisione in sottofasce; pertanto queste ultime sono state analizzate solo da un punto di vista teorico.

Da un punto di vista numerico, quindi, le attività principali sono trattate come un'unica macrofase; per quanto riguarda i servizi ausiliari e generali, invece, è stata possibile un'analisi più dettagliata. Nella figura sottostante è possibile notare che le attività principali sono responsabili della percentuale minore dei consumi e pertanto risulta interessante concentrarsi sulle altre due aree funzionali, ovvero i servizi ausiliari e generali:

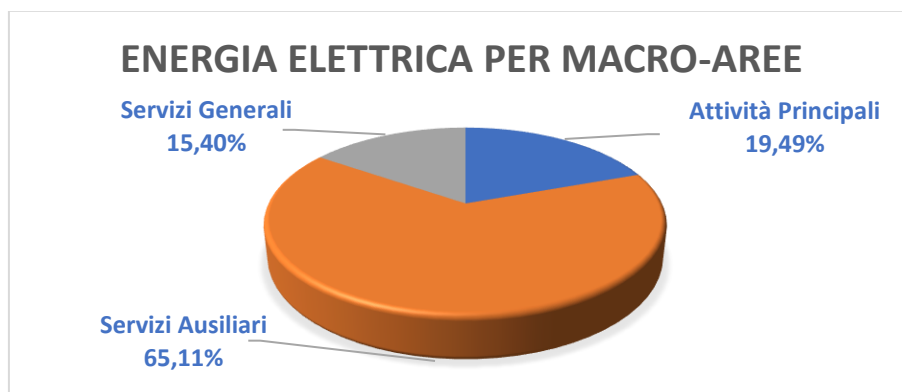


Figura 3.19a: grafico a torta dei consumi di energia elettrica distribuita per macro-aree

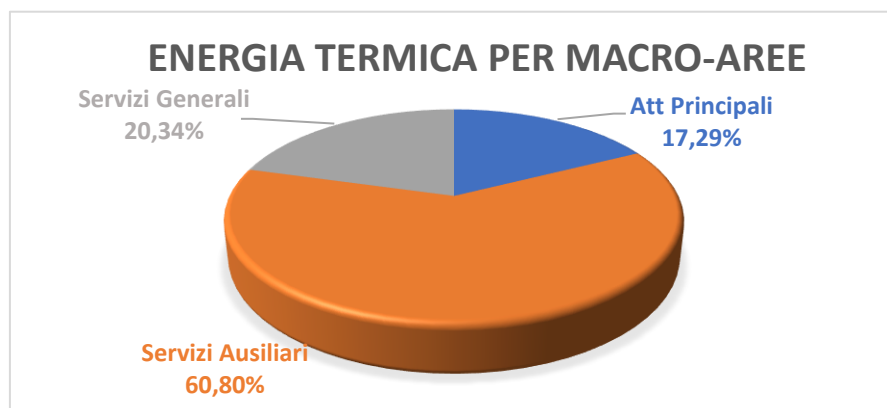


Figura 3.19b: grafico a torta dei consumi di energia termica distribuita per macro-aree

Il seguente grafico (Figura 3.20) invece mostra un dettaglio sui consumi di energia elettrica, la quale ha una percentuale maggiore di utilizzo rispetto alla termica, per ogni attività, con un focus sui servizi ausiliari:

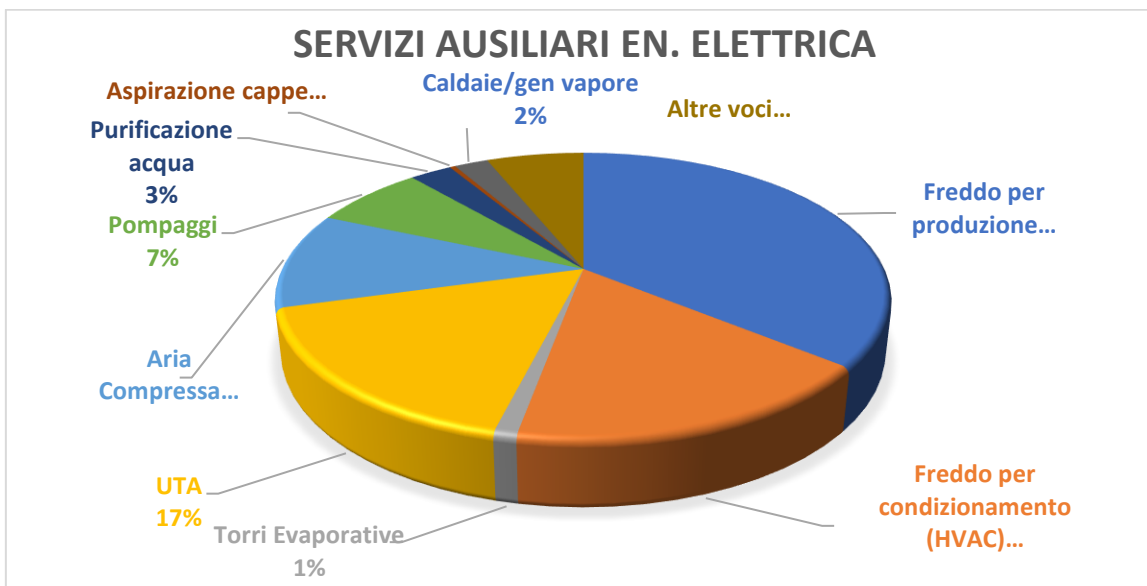


Figura 3.20: grafico a torta dei consumi di energia elettrica nei servizi ausiliari

Fase	Utilizzo %
<b>Freddo per produzione</b>	36%
(Linee produttive)	28,57%
<b>UTA</b>	17%
<b>Freddo per condizionamento</b>	11%
<b>Aria Compressa</b>	11%

Figura 3.21: analisi delle fasi più energivore dal punto di vista elettrico

Nella figura 3.21 sono tabellate le fasi più energivore dal punto di vista elettrico con la relativa percentuale di utilizzo. È possibile notare come la fase che assorbe una maggior quantità di energia elettrica, nell'ambito dei servizi ausiliari è la generazione del freddo per il processo produttivo per via delle condizioni ambientali particolari da mantenere per assicurare la qualità delle materie prime e dei lavoratori; segue l'UTA (Unità Trattamento dell'Aria).

Nell'ambito dei processi farmaceutici è fondamentale un corretto sistema di raffreddamento, in quanto operazioni di granulazione, miscelazione o agitazione potrebbero aumentare la temperatura del preparato, compromettendo l'efficacia dei principi attivi.

Anche l'UTA prevede dei consumi elevati, dato alla sua ampia diffusione sia all'interno dei reparti produttivi e sia nelle aree destinate ad uso uffici e laboratori per riscaldamento e umidificazione allo scopo di mantenere le condizioni igrometriche e di temperatura desiderate; dunque, a seconda dell'umidità e della temperatura esterna sia avrà un consumo più o meno maggiore da parte di quest'utenza.

Passando invece al dettaglio sui servizi generali di seguito si riporta la suddivisione del consumo di energia elettrica:

### ENERGIA ELETTRICA DETTAGLIO GENERALI

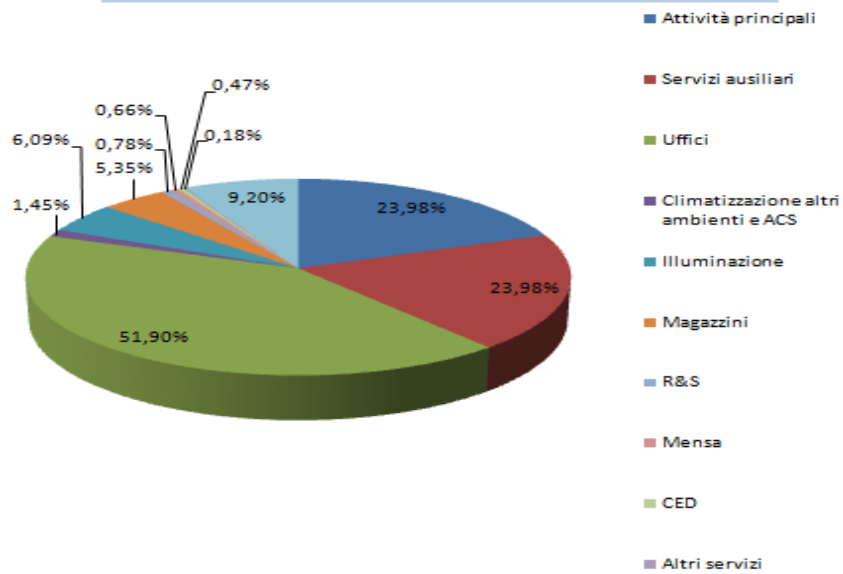


Figura 3.22: analisi delle fasi più energivore dal punto di vista elettrico

È evidente come nel caso dei servizi generali, la fase maggiormente energivora sia quella legata agli uffici; seguono gli altri servizi.

Le stesse valutazioni sono state fatte anche per l'energia termica.

Analizzando i servizi ausiliari, è possibile affermare che la fase maggiormente energivora è il calore per produzione (Figura 3.23). Questo è dovuto principalmente all'utilizzo di vapore per effettuare operazioni di sterilizzazione di macchinari, utensili e confezionamenti primari (fiale e flaconi in vetro).

### ENERGIA TERMICA DETTAGLIO AUSILIARI

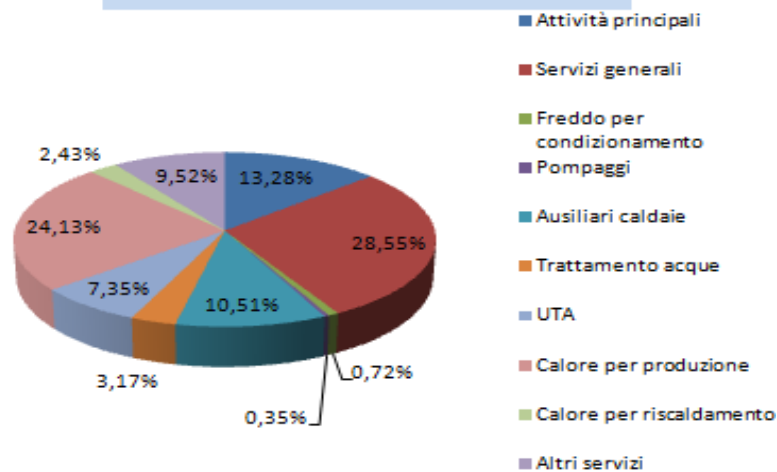


Figura 3.23: grafico a torta dei consumi di energia termica nei servizi ausiliari

Se analizziamo i servizi generali invece, è evidente che il consumo di energia termica è concentrato nella fase di climatizzazione degli ambienti non produttivi e la produzione di acqua calda sanitaria, come è evidente dal grafico di Figura 3.24:

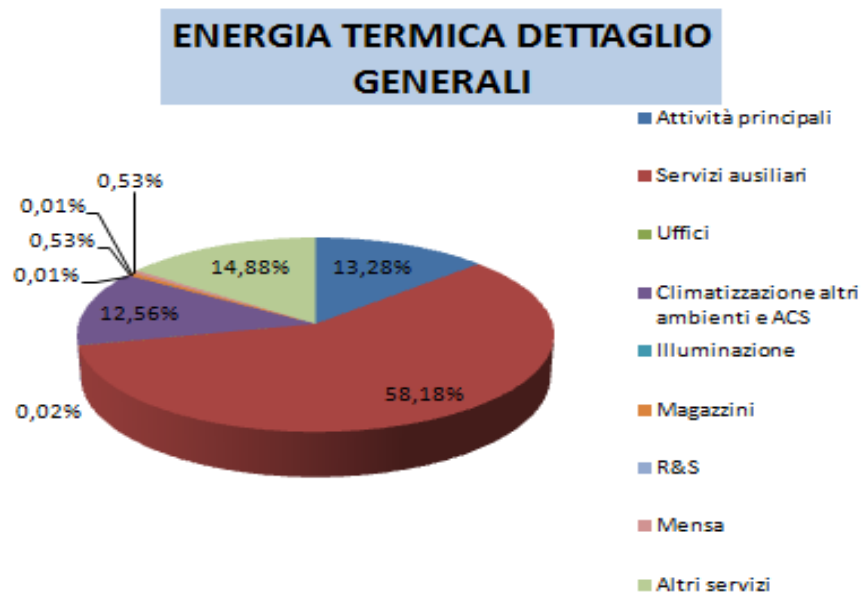


Figura 3.24: grafico a torta dei consumi di energia termica nei servizi generali

Il passo successivo è quello di svolgere l'analisi energetica del processo, per comprendere al meglio le fasi più energivore e i loro flussi energetici; come è stato già detto in precedenza, per eseguire un'analisi energetica completa è importante una corretta mappatura del processo che ritroviamo in figura 3.25, eseguita secondo le modalità definite nel Capitolo 1.

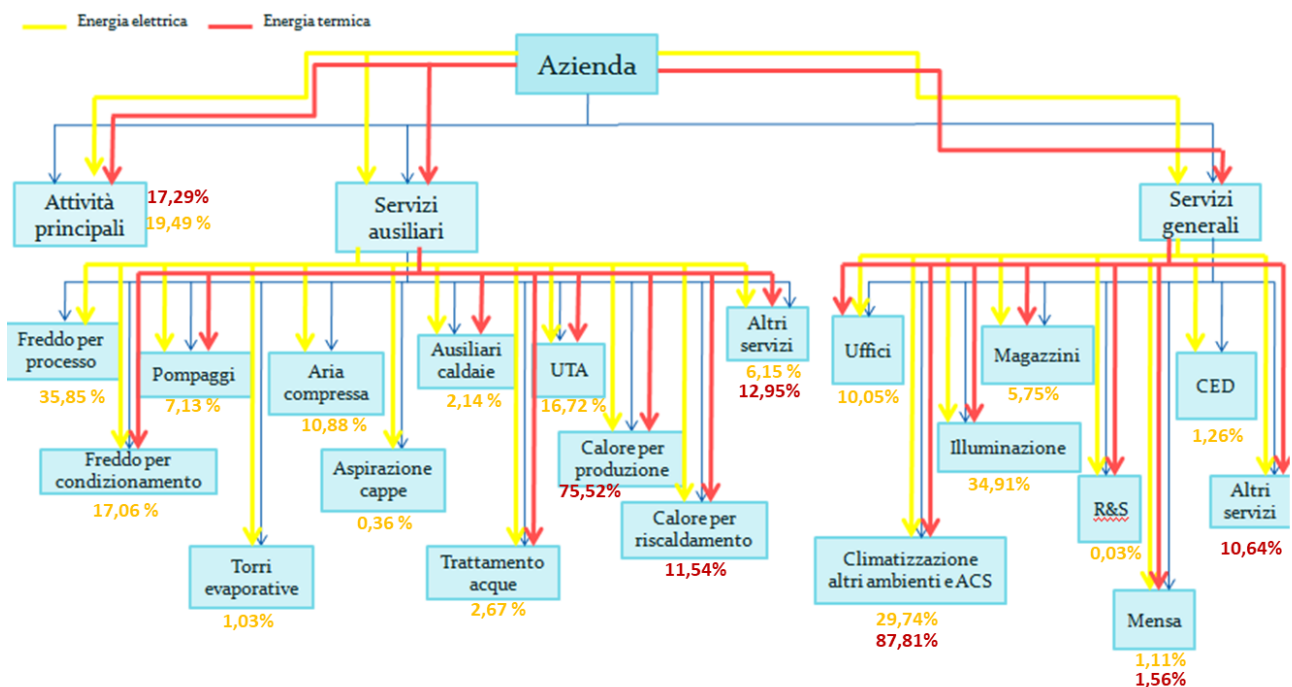


Figura 3.25: mappatura del processo

Si può dunque vedere come l'energia elettrica trovi impiego in tutte le fasi del processo, mentre l'energia termica è limitata solo ad alcune di esse, a dimostrazione del maggior consumo di energia elettrica come mostrato in Figura 3.18.

Noto ciò, è possibile analizzare i consumi in termini di media aritmetica espressa in percentuale separatamente per i due vettori energetici, energia elettrica (in giallo) ed energia termica (in rosso) com'è stato evidenziato nella mappa.

Questo ricalca quanto detto prima ovvero che il vettore energetico più utilizzato è l'energia elettrica e le fasi maggiormente energivore sono il freddo per condizionamento e l'UTA a causa delle stringenti condizioni (di temperatura, umidità e qualità dell'aria) da mantenere nei laboratori e all'interno del processo produttivo, che si possono conseguire con alti valori di ricambi d'aria negli ambienti con i sistemi di ventilazione. Le fasi indicate come "altri servizi", comprendono una serie di attività non rilevanti per la trattazione e, dunque, vengono trattate come un tutt'uno.

### 3.5.2. Mappatura dei processi relativi a servizi ausiliari e generali

Il passo successivo è stato quello di suddividere l'intero processo produttivo in fasi e, per ognuna, individuare input e output al fine di realizzarne un'analisi energetica.

Come già detto, il focus sarà sui servizi ausiliari e generali tralasciando invece le attività principali sia perché i consumi energetici legati alla produzione sono trascurabili rispetto a quelli dei servizi, sia per la scarsità delle informazioni che si hanno sul processo produttivo.

Quindi è possibile analizzare, fase per fase, le aree funzionali mediante l'utilizzo dei diagrammi di flusso del tipo IDEF-0, corredati anche dai fabbisogni energetici delle attività principali.

#### 3.5.2.1. I servizi ausiliari

- **freddo per processo**

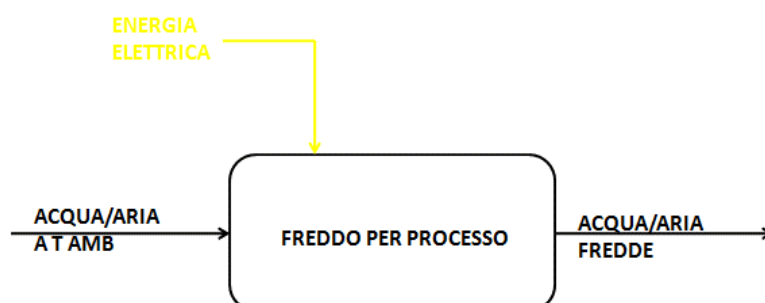


Figura 3.26: Rappresentazione IDEF-0 Freddo per processo

- INPUT: a seconda del tipo di apparecchiatura utilizzata, potremmo avere acqua o aria in ingresso
- OUTPUT: acqua o aria a temperature comprese tra i 5 e i 12 °C
- ATTREZZATURE PRINCIPALI:
  - Refrigeratori di acqua
  - Refrigeratori a condensatore ad aria
  - Pompe di calore
  - Chiller
- CONSUMI ENERGETICI: In questa fase, l'unico vettore energetico che entra in gioco è l'energia elettrica; le apparecchiature coinvolte, infatti, sono alimentate dall'elettricità. In molte aziende, sono presenti gruppi frigoriferi a compressione, i quali possono funzionare con ammoniaca o con freon come gas frigorifero; il loro ciclo di funzionamento prevede la condensazione di tale gas, con cessione del calore asportato dal fluido da raffreddare, durante il ciclo di evaporazione. La condensazione del gas può avvenire per mezzo di due tipologie di scambiatore, ad aria o ad acqua; da questa suddivisione, i chiller vengono classificati in condensati ad acqua o ad aria. Tipicamente questo tipo di servizio ausiliario serve le fasi del processo che riguardano la produzione dei farmaci iniettabili o, più in generale, le forme farmaceutiche sterili. È una fase fortemente energivora infatti, in alcune aziende, essa arriva a raggiungere picchi di consumo del 49% circa dell'energia elettrica utilizzata in totale dall'azienda. Non è previsto l'utilizzo di alcun combustibile e, dunque, non ritroviamo il vettore energia termica.

- **freddo per condizionamento**

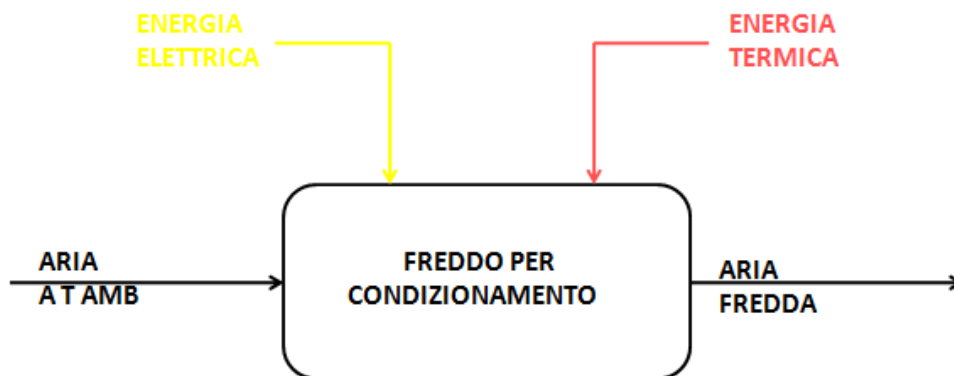


Figura 3.27: Rappresentazione IDEF-0 Freddo per condizionamento

- INPUT: aria a temperatura ambiente
- OUTPUT: aria fredda
- ATTREZZATURE PRINCIPALI:
  - Chiller
  - Pompe di calore
  - Anelli ad acqua

- **CONSUMI ENERGETICI:** Gli impianti di condizionamento ad anello d'acqua sono basati sull'impiego di apparecchiature autonome funzionanti a pompa di calore od in condizionamento, e possono essere del tipo acqua-aria o anche acqua-acqua. L'elemento caratterizzante tali impianti è l'anello d'acqua, composto da due sole tubazioni, una di andata ed una di ritorno dell'acqua. L'acqua di ritorno funge da fluido termovettore per il trasporto dell'energia termica e/o frigorifera alle varie apparecchiature, con possibilità di recupero del calore e di personalizzare le condizioni termoigrometriche nei vari ambienti serviti. Generalmente la temperatura dell'acqua va da 10-15 °C durante il periodo invernale a 30-35 °C nel periodo estivo. Per tali ragioni le tubazioni che convogliano l'acqua non necessitano di essere isolate.

Queste apparecchiature possono essere alimentate sia ad energia elettrica che con combustibili, facendo sì che sia presente anche il vettore di energia termica. Inoltre, alcune aziende utilizzano impianti frigoriferi ad assorbimento, i quali richiedono energia termica per il funzionamento.

- **pompaggi**

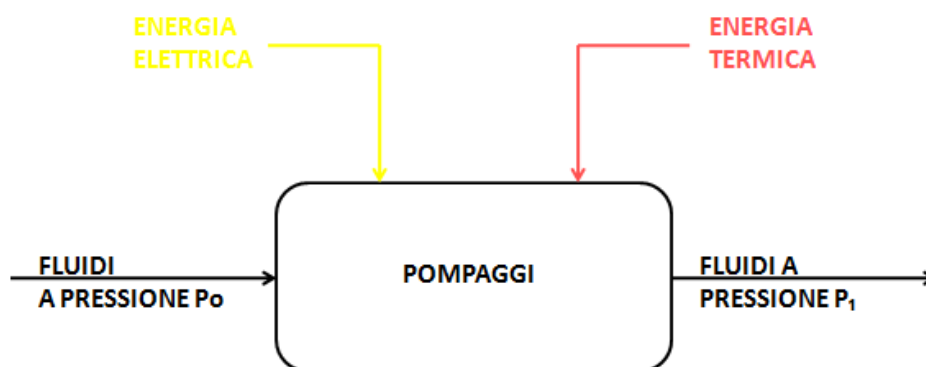


Figura 3.28: Rappresentazione IDEF-0 Pompaggi

- INPUT: fluidi a pressione  $P_0$
- OUTPUT: fluidi a pressione  $P_1$
- ATTREZZATURE PRINCIPALI:
  - Pompe ricircolo;
  - Pompe serbatoio;
  - Pompe di distribuzione;
  - Pompe di rimando;
  - Elettropompe;
  - Pompe a vuoto.
- **CONSUMI ENERGETICI:** Questi tipi di attrezzature sono tipicamente alimentate da energia elettrica; inoltre, in una azienda, è presente un grosso consumo in termini di tep (Tonnellate di Petrolio Equivalente), legato al prelievo dei fluidi dalla centrale fluidi puri, e la loro distribuzione nelle varie fasi del processo produttivo.

L'avanzamento dei fluidi avviene grazie ad una depressione instaurata nel punto di aspirazione, in cui il fluido ha una pressione  $P_0$ , ed energizzarlo fino al punto di mandata, dove avrà una pressione  $P_1$  maggiore di  $P_0$ . Le pompe sono alla base di tutti i sistemi di Pump, e consentono l'approvvigionamento alle varie fasi del processo sia di fluidi caldi, per esempio per la sterilizzazione, che di fluidi freddi.

In alcuni casi, l'acqua viene prelevata dal sistema di pompaggio dall'acquedotto; dopodiché, l'acqua di pozzo è inviata in un serbatoio di accumulo in attesa di essere smistata attraverso un collettore, il quale la indirizza agli impianti degli edifici che realizzano i trattamenti necessari. Tali trattamenti dipendono poi dalla destinazione, a seconda di se si necessita di acqua purificata (per cui ci saranno gli step di addolcimento, filtrazione osmotica ed elettrodeionizzazione) o di acqua per usi industriali (solo filtrazione osmotica), che viene dunque utilizzata per i circuiti di acqua refrigerata, reintegri per i circuiti di vapore delle caldaie e del cogeneratore, ecc.

- **torri evaporative**

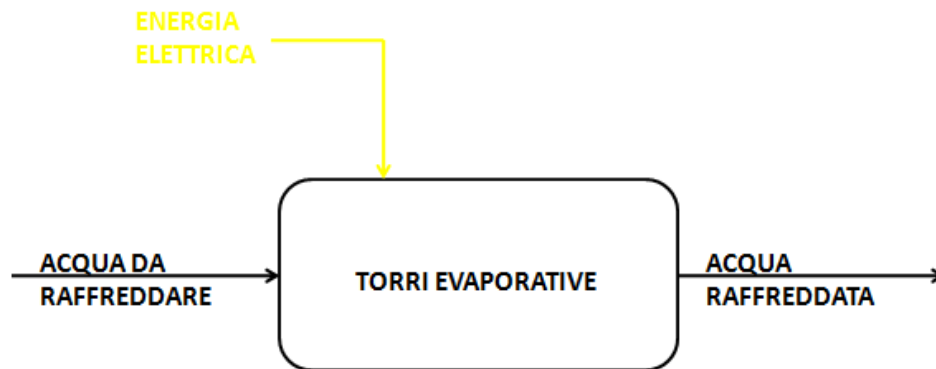


Figura 3.29: Rappresentazione IDEF-0 Torri evaporative

- INPUT: acqua dal processo da raffreddare
- OUTPUT: acqua raffreddata, che viene poi inviata nuovamente al processo
- ATTREZZATURE PRINCIPALI:
  - Torri di evaporazione;
  - Vasche di accumulo;
  - Elettropompe centrifughe;
  - Ventilatori.
- CONSUMI ENERGETICI: Le torri evaporative richiedono la sola energia elettrica per il loro funzionamento. In particolare, esse si occupano di prelevare l'acqua dalla vasca di raccolta, proveniente dal processo produttivo o dagli impianti frigoriferi e, tramite un contatto con una corrente d'aria (spesso a temperatura ambiente), parte dell'acqua evapora, cedendo calore all'aria. L'acqua così raffreddata viene prelevata in basso e inviata ad un'altra sezione della vasca di raccolta, pronta per essere nuovamente inviata al processo o ai sistemi di raffreddamento. L'energia elettrica viene impiegata in questi sistemi per l'azionamento delle pompe che portano l'acqua alle torri, e per gli eventuali ventilatori nel caso in cui il funzionamento sia a ricircolo forzato di aria, i quali sono l'unico



organo in movimento che forzano l'evaporazione dell'acqua necessaria per realizzare il raffreddamento.

Non è previsto l'utilizzo di energia termica.

- **aria compressa**

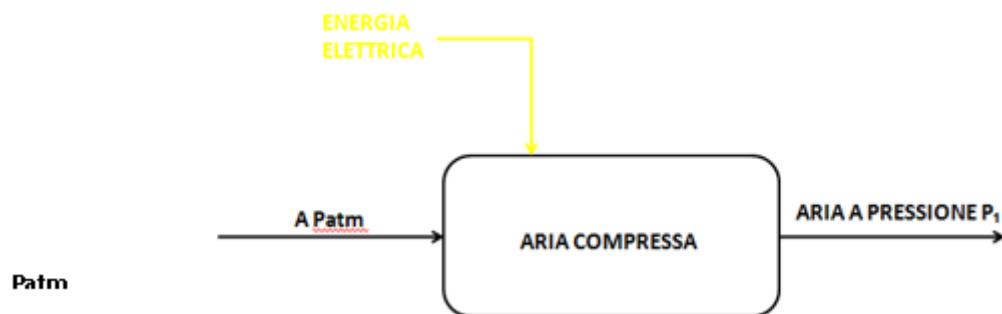


Figura 3.30: Rappresentazione IDEF-0 Aria compressa

- INPUT: aria a pressione pari alla pressione atmosferica
- OUTPUT: aria a pressione superiore della pressione atmosferica
- ATTREZZATURE PRINCIPALI:
  - Compressori a velocità fissa o variabile
  - Essiccatori
  - Serbatoi
- CONSUMI ENERGETICI: L'aria compressa è aria atmosferica compressa, cioè ridotta di volume con un compressore alternativo, oppure accelerata e poi rallentata in modo da convertire la sua energia cinetica in energia di pressione (con un compressore dinamico) e successivamente immagazzinata in un serbatoio, o generalmente bombole resistenti alla pressione, oppure utilizzata subito. Nella maggioranza dei casi, l'aria compressa viene direttamente prodotta all'interno delle aziende che la utilizzano tramite uno o più compressori situati in un vano tecnico.

L'unico vettore presente è l'energia elettrica, che serve ad alimentare l'apparecchiatura.

L'aria compressa può essere ottenuta mediante compressori a velocità fissa o variabile, per poi trovare applicazione in fasi come quella di essiccamento. L'aria compressa nei moderni impianti farmaceutici non solo è utilizzata per il funzionamento delle macchine, ma anche per la loro asciugatura (a seguito della pulizia a cui sono soggetti macchinari ma anche fiale, flaconi, ecc.), e spesso viene direttamente a contatto con il prodotto (come nel caso del processo di produzione delle pastiglie). Gli essiccatori vengono utilizzati sia per la produzione di forme farmaceutiche solide, in quanto consentono di ottenere polveri con umidità ridotta per poter essere compresse, sia per la produzione di forme farmaceutiche liquide. Per queste ultime l'essiccamento entra in gioco nella realizzazione delle polveri, che verranno poi disciolte in un solvente per essere somministrate per via

orale o venosa. Infine, l'aria compressa viene spesso utilizzata nell'industria farmaceutica per il trasporto dei componenti nel processo di produzione, ad es. materiali sfusi, liquidi, polveri e granuli.

- **aspirazione cappe**

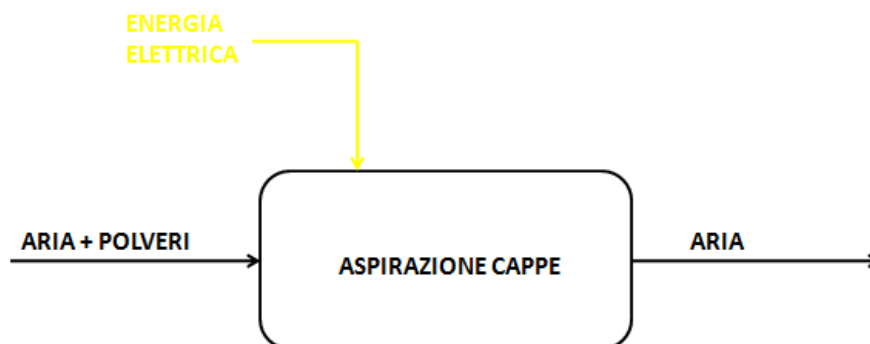


Figura 3.31: Rappresentazione IDEF-0 Aspirazione cappe

- INPUT: aria contaminata da polveri provenienti da operazioni di taglio fiale, o da operazioni svolte con agitatori
- OUTPUT: aria depurata dalle particelle in sospensione
- ATTREZZATURE PRINCIPALI:
  - Ventilatori per aspirazione
  - Pompe a vuoto
  - Cappe a flusso laminare
  - Aspiratori
- CONSUMI ENERGETICI: Le cappe aspiranti rendono sicure varie operazioni tipiche dei processi industriali e trovano applicazione in diverse zone di lavorazione, siano esse mescolatori, agitatori, buratti, reattori, vagli o altro.

Nell'industria farmaceutica si utilizzano agenti chimici che producono grandi quantità di esalazioni nell'aria che sono potenzialmente pericolose per le persone e per l'ambiente; proprio per questi motivi, di norma bisogna installare nei punti critici della linea produttiva gli impianti di aspirazione specifici per il settore farmaceutico.

Le cappe di aspirazione sono punti di prelievo dell'inquinante proveniente da un processo industriale e sono tipicamente tenute in depressione da un idoneo ventilatore centrifugo.

L'impianto di aspirazione può essere strutturato con una o più cappe, di portata differente e con cicli di funzionamento alternati o manuali.

Solitamente, un sistema di aspirazione prevede il convogliamento dell'inquinante prelevato in un'unica pipeline e può essere corredato di una o più apparecchiature filtranti idonee al trattamento degli inquinanti captati.

Le cappe sono in grado di catturare le polveri aerodisperse: esse tipicamente si formano durante le operazioni di taglio delle fiale di vetro. Risulta quindi indispensabile che eventuali residui vengano allontanati per evitare che contaminino il farmaco iniettabile.

Il loro azionamento avviene mediante l'utilizzo di energia elettrica. L'energia termica non viene utilizzata in questa fase.

- **ausiliari caldaie**

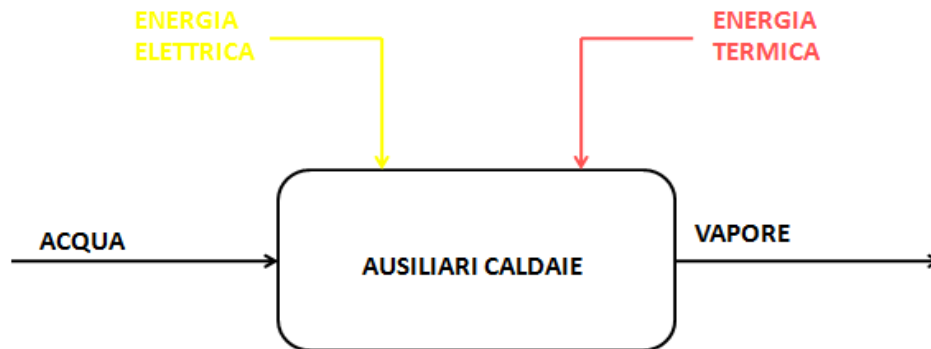


Figura 3.32: Rappresentazione IDEF-0 Ausiliari caldaie

- INPUT: vista la diffusione delle caldaie a vapore nel campione analizzato, si considera come input acqua alla quale verrà ceduto calore in caldaia
- OUTPUT: si ottiene vapore dal passaggio di stato dell'acqua, che verrà usato per fasi di processo quali la sterilizzazione, o per il riscaldamento di ambienti
- ATTREZZATURE PRINCIPALI:
  - Pompe;
  - Valvole;
  - Ventilatori;
  - Sistemi di regolazione e controllo
  - Pompe di calore;
  - Cogeneratori.
- CONSUMI ENERGETICI: I servizi ausiliari delle caldaie consentono l'azionamento sia dei sistemi di movimentazione, quali pompe e valvole, sia degli opportuni sistemi di ventilazione presenti che di quelli di regolazione e controllo. In questo caso, il vettore che entra in gioco è quello dell'energia elettrica. Questi servizi vengono denominati ausiliari elettrici.  
È presente però anche il vettore energia termica: infatti le caldaie possono essere alimentate da combustibili fossili.

Inoltre, alcune aziende del campione, utilizzano un sistema di cogenerazione, il quale è costituito da motori a combustione interna utilizzando gas metano e permette, proprio a partire dal gas naturale, di ottenere energia elettrica che viene poi utilizzata nelle diverse fasi del processo all'interno dello stabilimento.

- **trattamento acque**

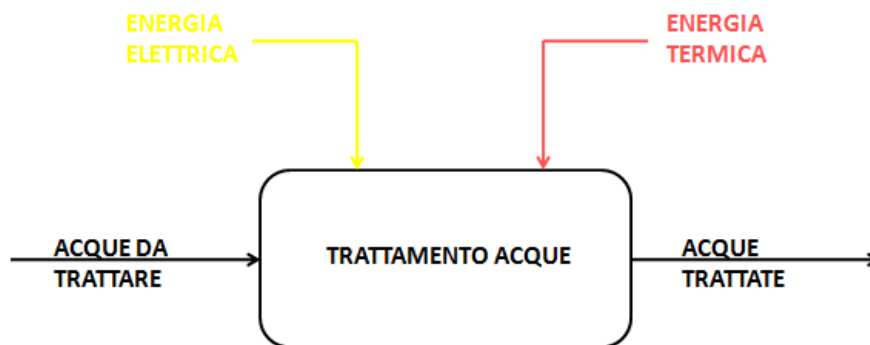


Figura 3.33: Rappresentazione IDEF-0 Trattamento acque

- INPUT: acqua da rete pubblica
- OUTPUT: acqua distillata
- ATTREZZATURE PRINCIPALI:
  - Filtri
  - Depuratori
  - Distillatori
- CONSUMI ENERGETICI: L'acqua, tipicamente prelevata da pozzi, viene accumulata in cisterne esterne, dalle quali con una pompa (i.e. elettropompa) viene inviata alle varie fasi: raffreddamento, pompe del vuoto, ecc., e quindi va a perdere in fognatura. Una parte dell'acqua trattata viene utilizzata per il processo produttivo (ad esempio per far disciogliere le sostanze semisolide), parte potrebbe essere impiegata come vapore puro nel processo, mentre la restante parte viene tipicamente destinata alla cisterna antincendio.

L'acqua di rete se destinata ad usi industriali WFI (Water For Injection), viene dapprima prelevata dai pozzi mediante un sistema di pompaggio, accumulata e poi distribuita mediante dei collettori per poter essere trattata per diventare appunto acqua distillata WFI. Quest'acqua può essere ad esempio utilizzata sia per la formulazione del farmaco che per la pulizia della cartuccia prima del riempimento e, in particolare, viene sottoposta ad un trattamento di:

- Filtrazione con filtro grossolano da 20 micron;
- Addolcimento;
- Declorazione con filtro a carboni (non viene iniettato cloro all'interno);
- Osmotizzazione;
- Miglioramento condizioni chimiche con EDI e filtro CO<sub>2</sub>;
- Distillazione.

Se invece è utilizzata per l'alimentazione della centrale termica, è previsto un trattamento di:

- Filtrazione con filtro grossolano da 20 micron;
- Declorazione con filtro a carboni (non viene iniettato cloro all'interno);
- Addolcimento;
- Osmotizzazione.

Per il trattamento delle acque è largamente impiegata l'energia elettrica, per l'alimentazione di pompe, distillatori, osmotizzatori, ecc... Tuttavia, è presente anche il vettore di energia termica, a

causa dell'impiego di combustibili fossili per il cogeneratore presente in alcuni casi, il cui caldo a bassa temperatura potrebbe essere utilizzato per l'utenza di riscaldamento dell'acqua distillata.

- **UTA**

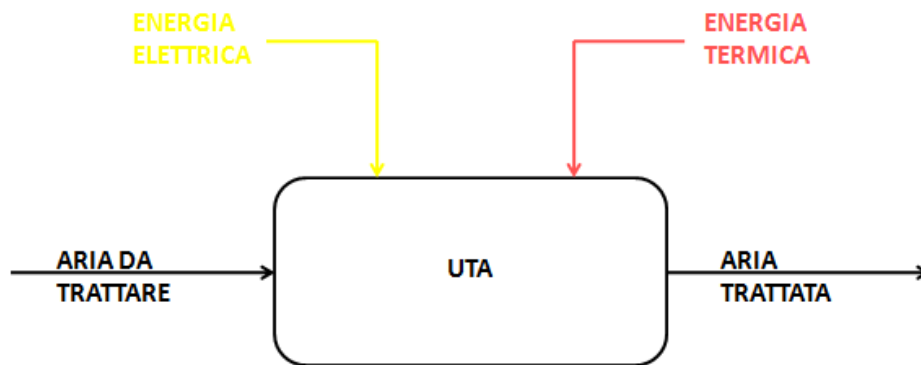


Figura 3.34: Rappresentazione IDEF-0 UTA

- **INPUT:** aria da trattare per ottenere precise condizioni di umidità, temperatura, velocità e purezza.
- **OUTPUT:** aria nelle condizioni di umidità, temperatura, velocità e purezza desiderate.
- **ATTREZZATURE PRINCIPALI:**
  - Pompe a vuoto
  - Deumidificatori
  - Ventilatori
- **CONSUMI ENERGETICI:** Nella produzione farmaceutica, l'impatto delle condizioni dell'ambiente sulla qualità del prodotto è di importanza fondamentale; di conseguenza, i sistemi deputati al trattamento dell'aria rappresentano usi significativi in un impianto farmaceutico. L'Unità di Trattamento Aria (UTA) è una macchina che può assolvere alla funzione di ricambio dell'aria interna, al riscaldamento o raffreddamento della stessa, ma anche al controllo dell'umidità relativa interna e della qualità dell'aria, grazie ai filtri di cui dispone. Gli elementi principali di cui è costituita sono il ventilatore, le batterie di scambio termico e i filtri che, nel contesto degli ambienti a contaminazione controllata, rivestono un'importanza cruciale.

Il funzionamento delle UTA si può riassumere così:

- la presa d'aria esterna, dotata di serrande talvolta automatiche, preleva un flusso d'aria dall'esterno o dagli ambienti e lo immette nella macchina;
- l'aria attraversa una sezione filtrante, costituita da filtri piani, rigenerabili e soggetti a pulizia periodica, e da filtri di efficienza superiore, che sono invece destinati ad essere sostituiti dopo un periodo di tempo prefissato;
- successivamente si procede al trattamento termo igrometrico dell'aria; esso prevede che l'aria venga fatta passare in una sezione di pretrattamento, che può consistere in un raffreddamento o riscaldamento, ottenuto mediante l'utilizzo di gas o acqua calda. Vi è poi la sezione di umidificazione;
- infine, l'aria passa attraverso la sezione di post riscaldamento-raffreddamento ed è

pronta per essere espulsa dalla macchina, procedimento che avviene tipicamente mediante un ventilatore.

Questo tipo di sistema prevede dunque l'utilizzo di energia elettrica per l'azionamento dei sistemi di ventilazione ed aspirazione, e l'energia termica per i trattamenti termo igrometrici.

- **calore per produzione**

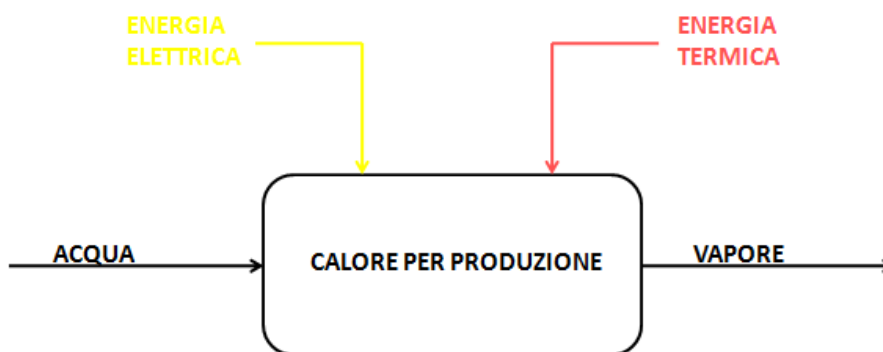


Figura 3.35 - Rappresentazione IDEF-0 Calore per produzione

- INPUT: acqua, cui viene ceduto calore proveniente dalla combustione di gas naturale, per ottenere acqua surriscaldata
- OUTPUT: vapore proveniente dallo scambio termico tra acqua e fumi di combustione
- ATTREZZATURE PRINCIPALI:
  - Caldaie a vapore;
  - Scambiatori di calore;
  - Centrali termiche.
- CONSUMI ENERGETICI: In questa fase viene prodotto il calore necessario alle varie fasi del processo produttivo. Il servizio ausiliario in questione garantisce calore alla lavorazione mediante la produzione di vapore. Il vapore viene prodotto con l'ausilio di caldaie a vapore, che sono alimentate da gas naturale e consentono di ottenere vapore a partire da acqua, alla quale viene ceduto calore per ottenere acqua surriscaldata.

Il vettore energetico che entra in gioco quindi è l'energia termica, che ricordiamo essere composto da gas naturale, gasolio, GPL ed altri combustibili. Tipicamente le caldaie sono alimentate proprio dal gas naturale, più raramente da altri combustibili come l'olio diatermico ad esempio.

Anche il vettore energia termica è però presente, necessario per l'alimentazione della componentistica.

- **calore per riscaldamento**

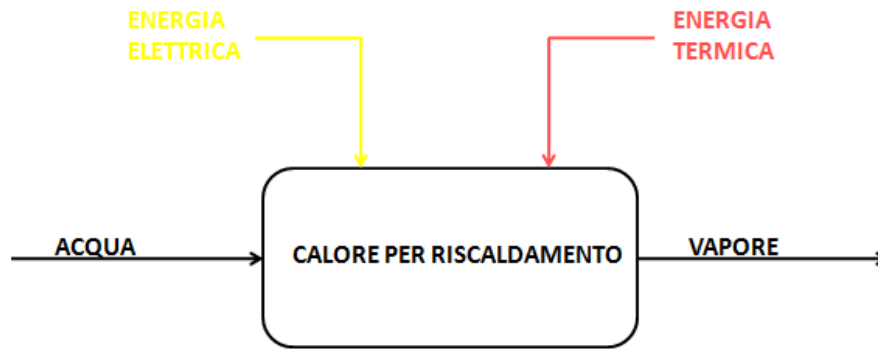


Figura 3.36: Rappresentazione IDEF-0 Calore per riscaldamento

- INPUT: acqua che verrà riscaldata mediante la cessione di calore da parte dei fumi in caldaia
- OUTPUT: vapore liberato dall'acqua surriscaldata
- ATTREZZATURE PRINCIPALI:
  - Caldaie a vapore;
  - Centrali termiche.
- CONSUMI ENERGETICI: Questa fase viene tipicamente svolta utilizzando le stesse apparecchiature necessarie per produrre calore per la produzione. Ciò che le distingue, infatti, è la destinazione d'uso del vapore, che in questo caso viene utilizzato per il riscaldamento.

Analogamente alla fase precedente, ritroviamo sia il vettore energia termica, per l'utilizzo di combustibili di alimentazione delle caldaie, sia il vettore energia elettrica, responsabile dell'alimentazione della componentistica.

### 3.5.2.2. I servizi generali:

Nei servizi generali vanno inserite tutte le attività che sono in qualche modo legate al processo produttivo i cui fabbisogni però non sono ad esso strettamente correlati ma sono più legati a fattori ambientali e climatici.

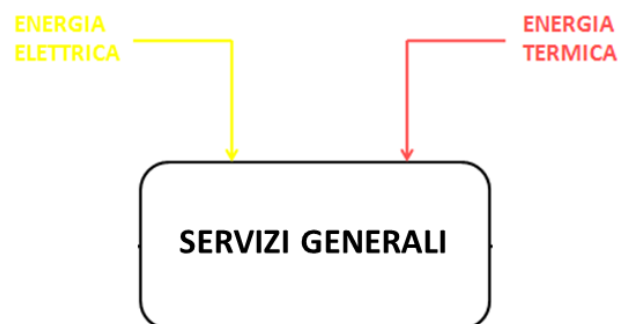


Figura 3.37: Rappresentazione IDEF-0 Servizi generali

- **uffici**

In questa fase sono racchiuse tutti i consumi legati alle utenze necessarie per il supporto agli uffici quali ad esempio i consumi di forza motrice (FM), UTA, acqua calda sanitaria. Per questa fase si hanno sia consumi di energia elettrica che di energia termica.

- **climatizzazione altri ambienti**

Per climatizzazione altri ambienti si intende il raffrescamento, riscaldamento o regolazione dell'umidità degli ambienti non produttivi.

Per poter riscaldare gli ambienti vengono impiegati comuni sistemi di climatizzazione come caldaie e generatori di calore per il riscaldamento invernale e unità per il raffrescamento estivo, oppure anche parte del vapore prodotto dalle caldaie. Risulta dunque ovvia la presenza sia del vettore energia elettrica che termica.

- **illuminazione**

A questa fase appartengono tutti quei dispositivi che consentono un'illuminazione interna ed esterna dello stabilimento e che, per funzionare, richiedono l'utilizzo di energia elettrica come lampade fluorescenti o lampade a LED.

Tuttavia, in alcune aziende è stata riscontrata anche la presenza del vettore energia termica per lo svolgimento di questa fase, a causa dell'utilizzo di gruppi elettrogeni alimentati a gasolio.

- **magazzini**

I magazzini sono delle strutture adibite al ricevimento e allo stoccaggio di materie prime e semilavorati e al deposito temporaneo dei prodotti finiti in uscita dallo stabilimento, oltre che alla conservazione di attrezzature varie. Queste strutture richiedono l'energia elettrica per l'illuminazione, l'alimentazione di sistemi di movimentazione automatici e, in tal caso, anche per la conservazione dei farmaci a temperature opportune; infatti dalle diagnosi sono risultati, ad esempio, consumi elettrici derivanti dai ventilatori di mandata e di espulsione delle unità di trattamento aria asservite ai magazzini.

È presente in minima parte anche l'impiego di energia termica, per quelle aziende che non hanno trattato separatamente i mezzi di trasporto interno, necessari per la movimentazione degli oggetti a magazzino ai quali è necessario gasolio per autotrazione.

- **R&S**

La fase di ricerca e sviluppo comprende i consumi legati ai laboratori, nei quali si procede allo sviluppo di nuovi prodotti e nuove metodiche analitiche e all'identificazione di nuove applicazioni dei prodotti già in distribuzione.

Per tutte queste attività sono necessarie sia l'energia elettrica che l'energia termica, per alimentare tutte le apparecchiature da laboratorio, il trattamento dell'aria, ecc...

- **Mensa**

Per questa fase si hanno sia consumi di energia elettrica che di energia termica. Vengono computati, infatti, tutti i consumi relativi al funzionamento della mensa, quali l'alimentazione di elettricità per l'illuminazione, il condizionamento, i frigoriferi, l'alimentazione di gas naturale per la cucine, sistema di pompaggio per l'approvvigionamento dall'acquedotto, ecc.



- **CED**

Un centro elaborazione dati (CED) o in inglese data center, è l'unità organizzativa che, all'interno dell'azienda, si occupa del coordinamento e del mantenimento delle apparecchiature e dei servizi di gestione dei dati, ovvero l'infrastruttura informatica. Svolge una funzione cardine per la corretta ed efficiente gestione delle varie attività.

Questa fase ovviamente impiega energia elettrica, necessaria per alimentare i calcolatori ed i server, necessari per la gestione dei dati.

### 3.6. Realizzazione del cruscotto di visualizzazione

Nell'ultimo capitolo sarà illustrata tutta l'analisi dei dati necessari al calcolo degli indicatori appena mostrati e come essi siano stati utilizzati; infine verrà descritto, step by step, la procedura per la realizzazione del cruscotto per il monitoraggio delle prestazioni energetiche dei servizi ausiliari del settore analizzato, ovvero il farmaceutico.

Per poter reperire le informazioni su risorse, attività e processi necessarie al calcolo degli indicatori definiti nel capitolo precedente, sono state contattate le associazioni di categoria alle quali è stato posto un questionario. Poiché i dati reperiti sono in numero elevato, è stato fondamentale dapprima trattarli e suddividerli per semplificare il lavoro; dunque, per la realizzazione di questa fase sono stati seguiti tre step come mostrato in Figura 3.38:

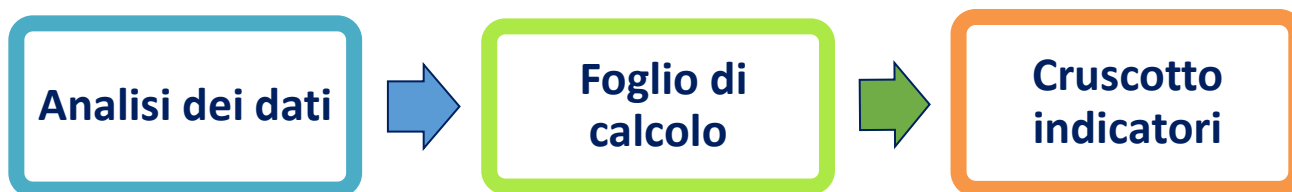


Figura 3.38 - passi necessari allo sviluppo del cruscotto

La prima fase è stata quella di analizzare i dati per suddividerli in base alla loro variabilità, frequenza di acquisizione e tipologia; dopodiché, è stato possibile realizzare un foglio elettronico utilizzando Excel per strutturare i dati raccolti e rendere poi più immediata la lettura delle informazioni di riepilogo.

I valori ottenuti dagli indicatori teorici rappresentano dei valori di riferimento a cui le aziende dovrebbero tendere per ottimizzare i propri consumi; questi valori di benchmark con cui confrontarsi, non sono però di facile reperimento per le aziende del settore analizzato e, per tale motivo, è importante l'analisi svolta nel presente lavoro. Una volta adeguate le unità di misura, gli indicatori verranno confrontati con i consumi reali delle aziende e resi poi disponibili tramite la realizzazione di un cruscotto che ne consente la visualizzazione. Lo scopo di questo confronto è proprio quello di permettere a ciascuna azienda di poter fare un'autovalutazione e capire e analizzare quali sono le cause di inefficienza che comportano un disallineamento tra consumi reali e indicatori, allo scopo di attuare delle procedure correttive per eliminare i divari individuati.

Dal punto di vista pratico, la realizzazione del cruscotto di monitoraggio è stata effettuata mediante l'applicativo di analisi aziendale "Power BI" di Microsoft.

*È importante precisare che, per motivi di privacy, non potranno essere mostrati dati appartenenti ad alcuna azienda o ente; quelli mostrati nei paragrafi successivi a scopo esemplificativo saranno dati verosimili che servono a mostrare il funzionamento del cruscotto realizzato.*

#### 3.6.1 Inserimento dei dati

I dati necessari al calcolo sono stati precedentemente elencati e possono essere classificati come segue:

- **Dati statici:** sono i dati che non cambiano o che cambiano di rado, come ad esempio valori caratteristici dei materiali e/o dell'impianto, temperature non variabili.

- **Dati dinamici:** sono i dati che variano nel tempo, dipendenti dalle temperature o semplicemente dal processo, come i kg di materiali utilizzati o i dati di consumo elettrico. Questi subiscono una frequenza di variazione genericamente nel periodo di riferimento (che in tal caso è mensile).

HVAC	
<i>Dati statici</i>	<i>Dati dinamici</i>
$ \Delta P_{HVAC} $	Giorni lavorativi al mese
$P_{air(inv \ o \ est)}$	$T_{esterna}$
$V_{target}$	$u. r._{esterna}$
$N_{ricambi}$	Gradi al giorno (caldo o freddo)
Ore di apertura impianto al giorno	$Q$
$T_{target}$	$EE_{HVAC, reale}$
$u. r._{target}$	$ET_{HVAC, reale}$
$X_{RIC}$	
Pompa di calore	
Rendimento pompa di calore	

Tabella 3.1: raccolta dati statici e dinamici per HVAC

Imp frigo a compressione di vapore		Imp frigo ad assorbimento	
<i>Dati statici</i>	<i>Dati dinamici</i>	<i>Dati statici</i>	<i>Dati dinamici</i>
$\bar{T}_{sup}$	$EE_C$	$\bar{T}_{sup}$	$Q_{REFR}$
$\bar{T}_{inf}$	$Q_{REFR}$	$\bar{T}_{inf}$	$Q_{gen}$
		$\bar{T}_0$	

Tabella 3.2: raccolta dati statici e dinamici impianti frigo a compressione di vapore e ad assorbimento

Compressori d'aria	
<i>Dati statici</i>	<i>Dati dinamici</i>
$p_2$	$V_{air, compr}$
	$EE_{COMPR}$

Tabella 3.3: raccolta dati statici e dinamici per Compressori d'aria

Per il sistema HVAC (Tabella 3.1) è stata considerata costante la densità dell'aria  $\rho_{air (inv,est)}$  in quanto, essendo l'aria un fluido facilmente comprimibile, entro certi limiti, è valida l'approssimazione di densità costante al variare della pressione (la quale è stata considerata anch'essa costante). Il  $V_{target}$  è costante poiché dipende semplicemente dal volume dello stabilimento che, una volta fissato, rimane inalterato a meno di modifiche. Il  $|\Delta p_{HVAC}|$  resta costante anch'esso una volta definite le condizioni di funzionamento dell'impianto, così come  $N_{ricambi}$ ,  $X_{RIC}$  e le *Ore di apertura impianto al giorno*. La  $T_{target}$  e l'umidità relativa target  $u.r._{target}$  rimangono sempre uguali poiché rappresentano le condizioni di temperatura e umidità target da rispettare, secondo le normative, all'interno dello stabilimento. L'utilizzo o meno della pompa e il suo rendimento sono sempre le stesse una volta definite (a patto di cambiamenti sostanziali all'impianto che comporta un cambiamento della pompa stessa).

I dati variabili invece sono i *Giorni lavorativi al mese* e  $T_{esterna}$  e  $u.r._{esterna}$  le quali dipendono appunto dalle condizioni dell'ambiente esterno che presentano una variabilità abbastanza elevata; lo stesso vale per i Gradi al giorno (caldo o freddo). Il carico termico  $Q$  ha anch'esso una sua variabilità in quanto dipende dal calore sensibile (legato alla differenza di temperatura tra ambiente interno ed esterno e indotto da interazioni energetiche con l'ambiente esterno) e latente (legato alla differenza di umidità tra ambiente interno ed esterno o fonti endogene di umidità e indotto dalla presenza di persone e dall'umidità associate all'aria).  $EE_{HVAC, reale}$  e  $ET_{HVAC, reale}$  sono i consumi termici ed elettrici associati i quali variano anche giorno per giorno.

Per gli impianti frigoriferi i valori di temperatura delle due sorgenti termiche, calda e fredda, sono costanti una volta determinati i parametri di progetto dell'impianto; nello specifico, per gli impianti frigo ad assorbimento è stato considerato costante anche il valore della temperatura media oraria ambiente. Per quanto riguarda i dati dinamici, in entrambi i casi abbiamo il carico termico da asportare dall'acqua refrigerata dello stabilimento; nel caso degli impianti frigoriferi a compressione di vapore abbiamo l'energia elettrica assorbita (in quanto esso, per il funzionamento, deve assorbire lavoro dall'esterno e dunque richiede elettricità) mentre in quelli ad assorbimento vi è la potenza termica ceduta al generatore.

Infine, per i compressori, è stata considerata costante la pressione di utilizzo a cui deve essere fornita l'aria compressa poiché solitamente, una volta definite le condizioni di funzionamento, rimane tale; variabili sono invece il volume di aria processata nel tempo e l'energia elettrica consumata dai compressori in quanto dipendono dalle ore di utilizzo e di funzionamento degli stessi.

Parte dei dati statici può essere reperita dai manuali, parte invece deve essere specificata dalle aziende poiché è correlata alle caratteristiche degli impianti; per i dati dinamici è essenziale invece una comunicazione costante con l'azienda in quanto soggetti a forte variabilità e difficili da reperire altrimenti.

I dati così ottenuti vengono caricati su di un foglio Excel e successivamente trasferiti ad un database necessario per la rappresentazione degli indicatori; se si volessero aggiornare dati già esistenti o aggiungerne di nuovi, sarebbe possibile farlo grazie ad una pagina iniziale dedicata all'inserimento dati di cui alcune parti, a scopo esemplificativo, sono mostrate nelle figure seguenti (Figura 3.39a, 3.39b, 3.39c):

HVAC													
Month	$\Delta P$ [Pa]	$\rho$ air [Kg/m <sup>3</sup> ]	V_target [m <sup>3</sup> ]	N°ricambi [1/h]	GG lavorativi	Ore apertura [h/giorno]	T target	U.R. interna	T esterna [°C]	U.R. esterna	Gradi giorno caldo	Gradi giorno freddo	X ricircolo
gen-20	15,00	1,204	44.438	18	18	24	20	50%	5,7	85,60%	448	0	0,6
feb-20	15,00	1,204	44.438	18	20	24	20	50%	4,2	81,00%	453	0	0,6
mar-20	15,00	1,204	44.438	18	22	24	20	50%	8	76,70%	383	0	0,6
apr-20	15,00	1,204	44.438	18	19	24	20	50%	17,3	65,90%	110	0	0,6
mag-20	15,00	1,204	44.438	18	22	24	20	50%	20,2	70,70%	50	4	0,6
giu-20	15,00	1,204	44.438	18	21	24	20	50%	24,7	58,50%	0	56	0,6
lug-20	15,00	1,204	44.438	18	22	24	20	50%	27	61,20%	0	158	0,6
ago-20	15,00	1,204	44.438	18	15	24	20	50%	27,1	57,50%	0	159	0,6
set-20	15,00	1,204	44.438	18	20	24	20	50%	23	59,50%	18	43	0,6
ott-20	15,00	1,204	44.438	18	23	24	20	50%	17	73,70%	114	2	0,6
nov-20	15,00	1,204	44.438	18	21	24	20	50%	10,6	89,00%	283	0	0,6
dic-20	15,00	1,204	44.438	18	19	24	20	50%	4	89,60%	479	0	0,6

Figura 3.39a - Parte della pagina iniziale di inserimento dati (Sistema HVAC)

Month	IMPIANTI FRIGO a compressione di vapore				IMPIANTI FRIGO ad assorbimento				
	Consumo Elettrico frigo Reale [kWh]	Q refr [KJ]	T inf [K]	T sup [K]	Q refr (kJ)	Q gen (kJ)	T inf [K]	T sup [K]	T 0 [K]
gen-20									
feb-20									
mar-20									
apr-20									
mag-20									
giu-20									
lug-20									
ago-20									
set-20									
ott-20									
nov-20									
dic-20									

Figura 3.39b - Parte della pagina iniziale di inserimento dati (Impianti Frigo)

Month	COMPRESSORI		
	P2 [bar]	V_air, compr [m <sup>3</sup> ]	Consumo elettrico COMPRESSORI Reale [kWh]
gen-20	10,4	116.081,356	21.424,158
feb-20	10,4	128.979,284	23.804,620
mar-20	10,4	141.877,213	26.185,083
apr-20	10,4	122.530,320	22.614,389
mag-20	10,4	141.877,213	26.185,083
giu-20	10,4	135.428,249	24.994,851
lug-20	10,4	141.877,213	26.185,083
ago-20	10,4	96.734,463	17.853,465
set-20	10,4	128.979,284	23.804,620
ott-20	10,4	148.326,177	27.375,314
nov-20	10,4	135.428,249	24.994,851
dic-20	10,4	122.530,320	22.614,389

Figura 3.39c - Parte della pagina iniziale di inserimento dati (Compressori)

### 3.6.2. Il foglio di calcolo

Il foglio di calcolo permette di strutturare e organizzare il patrimonio delle informazioni raccolte dalle aziende, al fine di rendere più efficaci e rapide le attività successive del progetto e consentire una migliore

consultabilità e comprensibilità delle informazioni. Esso rappresenterà il database dal quale verranno estrapolate le informazioni necessarie al calcolo degli indicatori di prestazione.

Una volta che i dati sono stati sistematizzati e strutturati e che le unità di misura sono state adeguate, è stato utilizzato il software Power-BI per poter trasformare tali dati in informazioni e per avere una visualizzazione interattiva, chiara e di semplice comprensione. Power-BI, come già detto, fa parte di una famiglia di strumenti di business intelligence di Microsoft che permette agli utenti di creare report e dashboard a partire dai dati aziendali e di trasformare i dati in opportunità cioè di prendere decisioni informate basate su analisi sempre aggiornate. È possibile ricevere in input dati da differenti fonti, tra le quali Excel, come si vede in Figura 3.40 evidenziato in blu.

Nella figura è possibile osservare, a scopo esemplificativo, come si presenta una parte del database del software, che è molto simile alla visualizzazione di Excel; questo database è accessibile selezionando la seconda icona presente in alto a sinistra nella parte di Data Modeling del software, detta Data View, cerchiata in rosso.

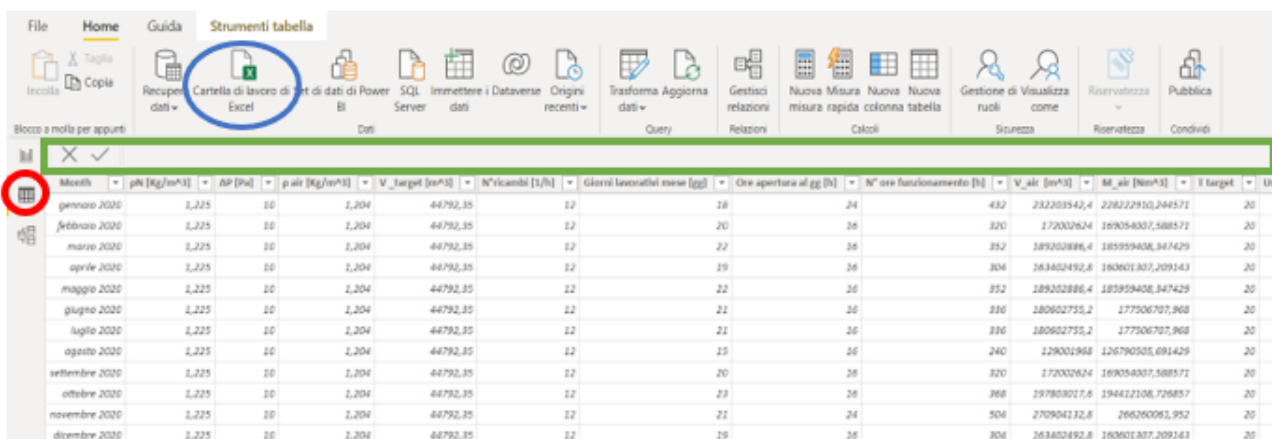


Figura 3.40 - Parte database HVAC in Power BI

È importante che nella prima colonna siano indicati il mese e l'anno di riferimento e successivamente i dati statici e dinamici. La colonna dell'indicatore è realizzata implementando la formula nella barra superiore, evidenziata in verde, la quale può essere scritta in linguaggio DAX, un particolare tipo di linguaggio utilizzato in Power BI. Inoltre, ai fini dell'autovalutazione, è utile inserire nel foglio di calcolo una colonna per l'efficienza, calcolata come il rapporto tra i consumi teorici (quindi ideali) e quelli reali.

È possibile fare una breve ma efficace descrizione dei tre fogli, uno per uno.

### 3.6.3. Foglio di calcolo HVAC

Dopo aver inserito i dati necessari nel foglio di input su Excel, verranno richiamati i dati relativi al sistema HVAC in questo foglio dedicato. Grazie ad essi e all'implementazione delle formule sarà possibile effettuare una serie di calcoli in modo automatico, al fine di ottenere l'indicatore complessivo del sistema in esame e la relativa efficienza.

Nella figura 3.41a vengono mostrati, a titolo esemplificativo i calcoli presenti sul foglio di raccolta Excel e relativi all'Entalpia ambiente, all'entalpia target e all'entalpia per deumidificazione necessari alla determinazione dei fabbisogni energetici e, di conseguenza, al calcolo successivo degli indicatori di efficienza.

In questo foglio vengono anche evidenziati i regimi estivo, invernale o misto di ogni singolo periodo, automaticamente individuati in base all'inserimento dei relativi gradi giorno caldo e/o freddo.

Month	Regime	CALCOLO ENTALPIA AMBIENTE				CALCOLO ENTALPIA TARGET			
		P vs [Pa]	P v [Pa]	x air amb (titolo) [KGv/KGa]	h air amb [KJ/KG]	P vs [Pa]	P v [Pa]	x air target (titolo) [KGv/KGa]	h air target [KJ/KG]
gen-20	Invernale	916,77	784,75	0,00485	17,92	2342,47	1171,24	0,00727	38,57
feb-20	Invernale	825,52	668,67	0,00413	14,59	2342,47	1171,24	0,00727	38,57
mar-20	Invernale	1073,98	823,74	0,00510	20,87	2342,47	1171,24	0,00727	38,57
apr-20	Invernale	1978,16	1303,60	0,00811	37,93	2342,47	1171,24	0,00727	38,57
mag-20	Misto	2371,65	1676,76	0,01047	46,89	2342,47	1171,24	0,00727	38,57
giu-20	Estivo	3117,78	1823,90	0,01140	53,88	2342,47	1171,24	0,00727	38,57
lug-20	Estivo	3572,66	2186,47	0,01372	62,16	2342,47	1171,24	0,00727	38,57
ago-20	Estivo	3593,68	2066,37	0,01295	60,30	2342,47	1171,24	0,00727	38,57
set-20	Misto	2814,83	1674,82	0,01045	49,72	2342,47	1171,24	0,00727	38,57
ott-20	Misto	1940,92	1430,46	0,00891	39,65	2342,47	1171,24	0,00727	38,57
nov-20	Invernale	1279,86	1139,07	0,00707	28,48	2342,47	1171,24	0,00727	38,57
dic-20	Invernale	813,98	729,32	0,00451	15,33	2342,47	1171,24	0,00727	38,57

Month	Regime	CALCOLO ENTALPIA per Deumidificazione					
		P vs [Pa]	T2 [°C]	U.R. 2	P v [Pa]	x 2 [KGv/KGa]	h2 [KJ/KG]
gen-20	Invernale	1169,79	9,26	100%	1169,79	0,007264798	27,61
feb-20	Invernale	1169,79	9,26	100%	1169,79	0,007264798	27,61
mar-20	Invernale	1169,79	9,26	100%	1169,79	0,007264798	27,61
apr-20	Invernale	1169,79	9,26	100%	1169,79	0,007264798	27,61
mag-20	Misto	1169,79	9,26	100%	1169,79	0,007264798	27,61
giu-20	Estivo	1169,79	9,26	100%	1169,79	0,007264798	27,61
lug-20	Estivo	1169,79	9,26	100%	1169,79	0,007264798	27,61
ago-20	Estivo	1169,79	9,26	100%	1169,79	0,007264798	27,61
set-20	Misto	1169,79	9,26	100%	1169,79	0,007264798	27,61
ott-20	Misto	1169,79	9,26	100%	1169,79	0,007264798	27,61
nov-20	Invernale	1169,79	9,26	100%	1169,79	0,007264798	27,61
dic-20	Invernale	1169,79	9,26	100%	1169,79	0,007264798	27,61

Month	Regime	Q HVAC, invernale [KJ]	Q RAFFR, estivo [KJ]	Q POST-RISC, estivo [KJ]	EE Teorico Ventilazione/LAF (KJ)
gen-20	Invernale	1.374.517.301,27			5.183.248.320
feb-20	Invernale	4.434.853.346,56			5.759.164.800
mar-20	Invernale	3.600.908.064,06			6.335.081.280
apr-20	Invernale	112.565.528,49			5.471.206.560
mag-20	Misto	377.036.796,89	342.215.138,14	205.695.759,50	6.335.081.280
giu-20	Estivo		8.295.766.970	5.323.388.092,78	6.047.123.040
lug-20	Estivo		10.374.193.751	5.576.882.763,86	6.335.081.280
ago-20	Estivo		6.815.249.370	3.802.420.066,27	4.319.373.600
set-20	Misto	135.733.246,88	3.678.812.734,99	2.211.229.414,58	5.759.164.800
ott-20	Misto	859.643.896,90	171.107.569,07	102.847.879,75	6.623.039.520
nov-20	Invernale	1.958.685.164,35			6.047.123.040
dic-20	Invernale	4.082.325.281,79			5.471.206.560

Figura 3.41a: Foglio di calcolo del sistema HVAC su EXCEL



ACCORDO DI PROGRAMMA MISE (OGGI MITE)-ENEA

Month	pH [Kg/m³]	AP [Pa]	p air [Kg/m³]	V_target [m³/s]	N'ricambi [1/h]	Giorni lavorativi mese [gg]	Ore apertura al gg [h]	N' ore funzionamento [h]	V_air [m³/s]	M_air [Nm³/s]
gennaio 2020	1,225	10	1,204	44792,35	12	18	24	432	232202542,4	228222910,244571
febbraio 2020	1,225	10	1,204	44792,35	12	20	16	320	172002624	169054007,588571
marzo 2020	1,225	10	1,204	44792,35	12	22	16	352	189202886,4	185959408,347429
aprile 2020	1,225	10	1,204	44792,35	12	19	16	304	163402492,8	160601307,209143
maggio 2020	1,225	10	1,204	44792,35	12	22	16	352	189202886,4	185959408,347429
giugno 2020	1,225	10	1,204	44792,35	12	21	16	336	180602755,2	177506707,968
luglio 2020	1,225	10	1,204	44792,35	12	21	16	336	180602755,2	177506707,968
agosto 2020	1,225	10	1,204	44792,35	12	15	16	240	129001968	126790505,691429
settembre 2020	1,225	10	1,204	44792,35	12	20	16	320	172002624	169054007,588571
ottobre 2020	1,225	10	1,204	44792,35	12	23	16	368	197803017,6	194412108,726357
novembre 2020	1,225	10	1,204	44792,35	12	21	24	504	270904132,8	26620061,952
dicembre 2020	1,225	10	1,204	44792,35	12	19	16	304	163402492,8	160601307,209143

T target	Umidità relativa interna	Testena [°C]	T esterna [K]	Umidità relativa esterna media	Gradi giorno caldo	Gradi giorno freddo	Regime	P vs [Pa]	P v [Pa]	x air amb [litro] [Kg/Kg]	h air amb [KJ/Kg]
20	0,5	8,8	282,95	0,821	309	0	Invernale	1133,9708802997	930,900097430605	0,005768031789584035	23,367811757664
20	0,5	5,3	278,45	0,708	392	0	Invernale	891,603810226626	631,255497640451	0,00389935761623385	15,1186799272568
20	0,5	9,7	282,85	0,742	292	0	Invernale	1204,97284292419	894,088444949748	0,00553737774081794	23,7011469784715
20	0,5	16,7	289,85	0,643	67	30,6	Misto	1904,29262796934	1228,26874304016	0,00783244863080504	36,1182554774629
20	0,5	19,2	292,35	0,739	27	56,3	Misto	2228,86518837951	1647,13137421246	0,010278266692684	45,382163893368
20	0,5	22,9	296,05	0,617	0	162,7	Estivo	2797,84015940956	1726,2671878557	0,0107806422940758	50,4533584249549
20	0,5	26,3	299,45	0,594	0	262,7	Estivo	3428,47208944489	2036,51242113014	0,0127578811686172	58,5
20	0,5	25,9	299,05	0,6	0	252,1	Estivo	3348,37466775581	2009,02480065349	0,0125821996239741	58,126527672647
20	0,5	22,6	295,75	0,598	1	146,1	Misto	2747,40203556472	1642,9484172677	0,0102517216972488	48,7997255618223
20	0,5	18,1	291,25	0,68	3	26,2	Misto	2080,53540443904	1424,76407501855	0,0080773877318103	40,5263353053955
20	0,5	12,4	285,55	0,792	20	0	Invernale	1441,9900025333	1142,05088178464	0,007096169761786	30,3653257028966
20	0,5	6,6	279,75	0,854	375	0	Invernale	975,68521868238	833,25178754656	0,0051579607181652	18,59725805525

P vs [Pa_1]	P v [Pa_2]	x air target [litro] [Kg/Kg]	h air target [KJ/Kg]	P vs [Pa_3]	T2 [°C]	Umidità relativa 2	P v [Pa_4]	x 2 [Kg/Kg]	h2 [KJ/Kg]	X ricircolo
2342,47193784157	1171,23596892078	0,00727390308009452	38,572804262208	1169,78674336708	9,26	1	1169,78674336708	0,00726479761477755	27,6053938445704	0,5
2342,47193784157	1171,23596892078	0,00727390308009452	38,572804262208	1169,78674336708	9,26	1	1169,78674336708	0,00726479761477755	27,6053938445704	0,5
2342,47193784157	1171,23596892078	0,00727390308009452	38,572804262208	1169,78674336708	9,26	1	1169,78674336708	0,00726479761477755	27,6053938445704	0,5
2342,47193784157	1171,23596892078	0,00727390308009452	38,572804262208	1169,78674336708	9,26	1	1169,78674336708	0,00726479761477755	27,6053938445704	0,5
2342,47193784157	1171,23596892078	0,00727390308009452	38,572804262208	1169,78674336708	9,26	1	1169,78674336708	0,00726479761477755	27,6053938445704	0,5
2342,47193784157	1171,23596892078	0,00727390308009452	38,572804262208	1169,78674336708	9,26	1	1169,78674336708	0,00726479761477755	27,6053938445704	0,5
2342,47193784157	1171,23596892078	0,00727390308009452	38,572804262208	1169,78674336708	9,26	1	1169,78674336708	0,00726479761477755	27,6053938445704	0,5
2342,47193784157	1171,23596892078	0,00727390308009452	38,572804262208	1169,78674336708	9,26	1	1169,78674336708	0,00726479761477755	27,6053938445704	0,5
2342,47193784157	1171,23596892078	0,00727390308009452	38,572804262208	1169,78674336708	9,26	1	1169,78674336708	0,00726479761477755	27,6053938445704	0,5
2342,47193784157	1171,23596892078	0,00727390308009452	38,572804262208	1169,78674336708	9,26	1	1169,78674336708	0,00726479761477755	27,6053938445704	0,5
2342,47193784157	1171,23596892078	0,00727390308009452	38,572804262208	1169,78674336708	9,26	1	1169,78674336708	0,00726479761477755	27,6053938445704	0,5

m_air, inv e est [Kg]	m_air, ricircolo [Kg]	m_air, ambiente [Kg]	Pompa di calore	Rendimento pompa	h_i, inv e est [KJ/Kg]	Q	h air_target [KJ/Kg]	h_M, inv e est [KJ/Kg]	h air_amb [KJ/Kg]	h2, est
279573065,0496	139786532,5248	139786532,5248	SI	1,12	38,572804262208	0	38,572804262208	30,970308009936	23,367811757664	27,6053938445704
207091159,296	103545579,648	103545579,648			38,572804262208	0	38,572804262208	26,8457420947324	15,1186799272568	27,6053938445704
227800275,2256	113900137,6128	113900137,6128			38,572804262208	0	38,572804262208	31,1369756203998	23,7011469784715	27,6053938445704
196736601,8312	98368300,6656	98368300,6656			38,572804262208	0	38,572804262208	37,345528688355	36,1182554774629	27,6053938445704
227800275,2256	113900137,6128	113900137,6128			38,572804262208	0	38,572804262208	41,9778102258724	45,382163893368	27,6053938445704
217445717,2608	108722858,6304	108722858,6304			38,572804262208	0	38,572804262208	44,5130813435815	50,4533584249549	27,6053938445704
217445717,2608	108722858,6304	108722858,6304			38,572804262208	0	38,572804262208	48,7796711775788	58,8865380929495	27,6053938445704
155318369,472	77659184,736	77659184,736			38,572804262208	0	38,572804262208	48,3496569897364	58,126527672647	27,6053938445704
207091159,296	103545579,648	103545579,648			38,572804262208	0	38,572804262208	43,6862599120102	48,7997255618223	27,6053938445704
238154833,1904	119077416,5952	119077416,5952			38,572804262208	0	38,572804262208	39,5495697838018	40,5263353053955	27,6053938445704
326168575,8912	163084287,9456	163084287,9456			38,572804262208	0	38,572804262208	34,4890649825523	30,3653257028966	27,6053938445704
196736601,8312	98368300,6656	98368300,6656			38,572804262208	0	38,572804262208	29,0850289386665	18,59725805525	27,6053938445704

Q HVAC, inv [kW]	Q HVAC, est [kW]	Q R&R, est [kW]	Q POST-R&R, est [kW]	Q HVAC/GG caldo o freddo [KJ/Kg]	Q R&R, est/ GG freddo [KJ/Kg]	Q POST-R&R, est/ GG freddo [KJ/Kg]	EE HVAC teorica [GJ]	EE HVAC teorica [GJ]	Indicatore EE HVAC teorica
1062726585,6789				3495244,6296365			2322035424	2322035424	10,1744180040512
242857089,39879				6211278,77084089			1720026240	1720026240	10,1744180040512
18938881,14799				3806971,95388426			1893038864	1893038864	10,1744180040512
36542849,270434	852988007,008002	541048292,549792	512931728,2707				2854024928	2854024928	10,1744180040512
148436260,903034	1369404831,81707	993434431,448189	87893079,910883				1893038864	1893038864	10,1744180040512
6061330860,20009	3676504215,44392	238483424,73678	37484976,2535002		22736575,3582421	14748400,8952382	1806027552	1806027552	10,1744180040512
688807346,91187	460431582,1351	238483424,73678	36884767,2130161		17526668,6080894	9078086,80512668	1806027552	1806027552	10,1744180040512
4925486825,76199	5221368522,36423	1705440508,8977	19937512,300365		12780308,8070775	6757002,5948552	129001968	129001968	10,1744180040512
542435,8992051	4072647350,99943	2583230823,87989	1489429527,61954				1720026240	1720026240	10,1744180040512
16272917,8777813	703444893,494504	463348783,57332	20705932,919432				1978030176	1978030176	10,1744180040512
1388510786,67409				603553,98330344			2709041328	2709041328	10,1744180040512
188893872,29152				4977580,4984313			1854024928	1854024928	10,1744180040512

EE HVAC Reale [GJ]	EE HVAC Reale [GJ]	Efficienza ELETTRICA HVAC	Consumo TORICO EE + ET [GJ]	Consumo TORICO EE + ET [GJ]	Indic_EUinv HVAC teorico	Indic_ETestate HVAC teorico	Indic_ETinviato HVAC teorico
2736000000	2736	84,87%	3279446766,01612	3279,44676601612	4,65652895451662		
2685600000	2685,6	64,05%	3907927951,17008	3907,92795117008	14,3656511551576		
2750400000	2750,4	68,79%	3418050315,48467	3418,05031548467	9,10889008428862		
2854800000	2854,8	57,24%	2785521864,16918	2785,52186416918			7,483150074994658
2890800000	2890,8	65,45%	3536498307,16773	3536,49830716773			9,08239612312788
2944800000	2944,8	61,33%	7631015052,99056	7631,01505299056		33,5616178916449	
2995200000	2995,2	60,30%	8558766739,70174	8558,76673970174		38,6985920517777	
2988000000	2988	43,17%	6046617106,32612	6046,61710632612		38,1808657815355	
2941200000	2941,2	58,48%	5649960517,05448	5649,96051705448			23,7099072799398
2876400000	2876,4	68,77%	2696566197,42868	2696,56619742868			3,77598611182932
2790000000	2790	97,10%	3914906910,58927	3914,90691058927	5,02708061757827		
2703600000	2703,6	60,44%	3315639948,08281	3315,63994808281	11,6225247772184		



ET HVAC Reale [KJ]	ET HVAC Reale [GJ]	Consumo REALE EE + ET [kJ]	Consumo REALE EE + ET [GJ]	Efficienza TOTALE HVAC
7669535631,47793	7669,53563147793	10405535631,4779	10405,5356314779	31,52%
5681137504,79846	5681,13750479846	8366737504,79846	8366,73750479846	46,71%
6249251255,27831	6249,25125527831	8999651255,27831	8999,65125527831	37,98%
5397080629,55854	5397,08062955854	8251880629,55854	8251,88062955854	33,73%
6249251255,27831	6249,25125527831	9140051255,27831	9140,05125527831	38,69%
5965194380,03839	5965,19438003839	8909994380,03839	8909,99438003839	85,65%
5965194380,03839	5965,19438003839	8960394380,03839	8960,39438003839	95,52%
4260853128,59885	4260,85312859885	7248853128,59885	7248,85312859885	83,41%
5681137504,79846	5681,13750479846	8622337504,79847	8622,33750479846	65,53%
6533308130,51823	6533,30813051823	9409708130,51823	9409,70813051823	28,66%
8947791570,05758	8947,79157005758	11737791570,0576	11737,7915700576	33,35%
5397080629,55854	5397,08062955854	8100680629,55854	8100,68062955854	40,93%

Figura 3.41b: Foglio di calcolo del sistema HVAC in Power BI

Il foglio del sistema HVAC importato sul Power BI a partire dai fogli di input e di elaborazione Excel si presenta, nel dettaglio, nel seguente modo (Figura 3.41b):

- Mese e anno di riferimento nella prima colonna;
- Alcuni dati statici (cioè che non subiscono variazioni) forniti dall'azienda;
- Alcuni dati dinamici calcolati mediante opportune formule;
- Definizione del regime invernale, estivo o misto: la definizione del regime si basa sui Gradi al Giorno caldo/freddo rilevati, cioè se per un dato mese (o giorno a seconda del dettaglio considerato) è presente il valore dei gradi al giorno caldo, il regime è invernale mentre se è presente il valore dei gradi al giorno freddo, il regime è estivo; invece, se sono presenti entrambi i valori il regime sarà quindi misto;
  - Calcolo delle entalpie target, ambiente e dopo il raffreddamento cioè prima del passaggio nella batteria calda: questi valori sono ottenuti prendendo in input i valori della temperatura e dell'umidità relativi e implementando le formule introdotte nel Capitolo 4;
  - Altri dati statici e dinamici che servono per il calcolo degli indicatori come le masse d'aria ambiente e di ricircolo, la percentuale di aria di ricircolo, l'utilizzo o meno della pompa di calore con l'eventuale rendimento, ecc.;
  - Carichi termici dell'ambiente da servire nei tre regimi individuati, opportunamente calcolati mediante le formule;
  - Rapporti dei carichi termici invernali/estivi rispetto ai gradi giorno caldo/freddo per calcolare la media dei consumi in kJ per un grado giorno, al fine di poter trovare una correlazione tra il consumo termico mensile e le condizioni di temperatura reale rilevate nel mese (o nel giorno);
  - Energia elettrica teorica e reale per calcolare l'efficienza elettrica come rapporto dei due valori;
  - Energia termica reale: essendo un valore reale, essa è basata sugli effettivi consumi ed è dunque un dato raccolto dalle aziende mediante appositi strumenti;
  - Consumo totale dell'energia elettrica e termica sia teorico che reale;
  - Indicatori ideali: essi vengono calcolati per ogni tipologia di regime (invernale, misto ed estivo) utilizzando le formule esplicitate nel capitolo 4;

- Efficienza totale del sistema HVAC calcolata come rapporto tra il consumo energetico totale (quindi elettrico più termico) ideale e consumo energetico totale reale.

### 3.6.4. Foglio di calcolo Impianti frigo a compressione di vapore

Per gli impianti frigo a compressione di vapore, il foglio di calcolo si presenta più snello e lineare rispetto al precedente, come è possibile notare nelle figure 3.42a (Excel) e 3.42b (su Power BI):

Month	Dati statici			Dati dinamici		Indicatori		
	T inf [K]	Cp h <sub>2</sub> O [KJ/KgK]	T sup [K]	EE imp frigo a compressione Reale [KJ]	Q refr [KJ]	Ind. elettrico reale [KJ/Nm <sup>3</sup> ]	Ind. elettrico teorico [KJ/Nm <sup>3</sup> ]	Efficienza
gen-20	278,15	4,186	289,15	1.731.959.404,96	19.329.849.071,69	0,089600255	0,039547007	44,14%
feb-20	278,15	4,186	289,15	1.924.399.338,84	17.108.207.559,74	0,112483984	0,039547007	35,16%
mar-20	278,15	4,186	289,15	2.116.839.272,73	18.737.062.909,00	0,112976046	0,039547007	35,00%
apr-20	278,15	4,186	289,15	1.828.179.371,90	17.737.062.909,00	0,103071144	0,039547007	38,37%
mag-20	278,15	4,186	289,15	2.116.839.272,73	18.144.276.746,32	0,116667052	0,039547007	33,90%
giu-20	278,15	4,186	289,15	2.020.619.305,79	18.144.276.746,32	0,111364004	0,039547007	35,51%
lug-20	278,15	4,186	289,15	2.116.839.272,73	18.551.490.583,63	0,114106156	0,039547007	34,66%
ago-20	278,15	4,186	289,15	1.443.299.504,13	18.551.490.583,63	0,077799652	0,039547007	50,83%
set-20	278,15	4,186	289,15	1.924.399.338,84	18.958.704.420,95	0,101504791	0,039547007	38,96%
ott-20	278,15	4,186	289,15	2.213.059.239,67	18.958.704.420,95	0,11673051	0,039547007	33,88%
nov-20	278,15	4,186	289,15	2.020.619.305,79	18.958.704.420,95	0,106580031	0,039547007	37,11%
dic-20	278,15	4,186	289,15	1.828.179.371,90	19.365.918.258,27	0,094401894	0,039547007	41,89%

Figura 3.42a - Foglio di calcolo degli impianti frigo a compressione di vapore in Excel

Month	T inf [K]	EE imp frigo a compressione Reale [KJ]	EE imp frigo a compressione Reale [GJ]	ΔT	Portata rh	Cpw [KJ/KgK]	Q refr [KJ]	T sup [K]
gennaio 2020	278,15	2039192568,1382	2039,1925681382	283,15		4,186	13945240740,9681	289,15
febbraio 2020	278,15	1510513013,4357	1510,5130134357			4,186	10329807956,2726	289,15
marzo 2020	278,15	1661564314,77927	1661,56431477927			4,186	11362788751,8999	289,15
aprile 2020	278,15	1434987362,76392	1434,98736276392			4,186	9813317558,45901	289,15
maggio 2020	278,15	1661564314,77927	1661,56431477927			4,186	11362788751,8999	289,15
giugno 2020	278,15	1586038664,10749	1586,03866410749			4,186	10846298354,0863	289,15
luglio 2020	278,15	1586038664,10749	1586,03866410749			4,186	10846298354,0863	289,15
agosto 2020	278,15	1132884760,07678	1132,88476007678			4,186	7747355967,20448	289,15
settembre 2020	278,15	1510513013,4357	1510,5130134357			4,186	10329807956,2726	289,15
ottobre 2020	278,15	1737089965,45106	1737,08996545106			4,186	11879279149,7135	289,15
novembre 2020	278,15	2379057996,16123	2379,05799616123			4,186	16269447531,1294	289,15
dicembre 2020	278,15	1434987362,76392	1434,98736276392			4,186	9813317558,45901	289,15

Indicatore frigo, compr_vap elettrico reale [KJ/Nm <sup>3</sup> ]	Indicatore frigo, compr_vap elettrico teorico [KJ/Nm <sup>3</sup> ]	Efficienza
0,14622856686493	0,0395470070106059	27,04%
0,14622856686493	0,0395470070106059	27,04%
0,14622856686493	0,0395470070106059	27,04%
0,14622856686493	0,0395470070106059	27,04%
0,14622856686493	0,0395470070106059	27,04%
0,14622856686493	0,0395470070106059	27,04%
0,14622856686493	0,0395470070106059	27,04%
0,14622856686493	0,0395470070106059	27,04%
0,14622856686493	0,0395470070106059	27,04%
0,14622856686493	0,0395470070106059	27,04%
0,14622856686493	0,0395470070106059	27,04%
0,14622856686493	0,0395470070106059	27,04%
0,14622856686493	0,0395470070106059	27,04%
0,14622856686493	0,0395470070106059	27,04%
0,14622856686493	0,0395470070106059	27,04%
0,14622856686493	0,0395470070106059	27,04%
0,14622856686493	0,0395470070106059	27,04%
0,14622856686493	0,0395470070106059	27,04%
0,14622856686493	0,0395470070106059	27,04%
0,14622856686493	0,0395470070106059	27,04%
0,14622856686493	0,0395470070106059	27,04%

Figura 3.42b - Foglio di calcolo degli impianti frigo a compressione di vapore in Power BI

In questo caso il foglio di calcolo su Power BI è così strutturato:

- Mese e anno di riferimento nella prima colonna;
- Temperatura inferiore e superiore della sorgente termica, le quali sono dei dati statici forniti dalle aziende;
- Energia elettrica degli impianti frigo reale;
- Eventuali valori della portata di acqua refrigerata del sistema, calore specifico dell'acqua e differenza di temperatura dell'acqua refrigerata tra ingresso e uscita dell'evaporatore, nel caso in cui fossero noti, ai fini di un calcolo più preciso;
- Carico termico da asportare all'acqua refrigerata;
- Indicatore teorico e reale dell'impianto frigorifero il cui rapporto permette di calcolare l'efficienza dello stesso.

### 3.6.5. Foglio di calcolo Compressori d'aria

Infine, nell'ultimo foglio di calcolo troviamo le informazioni e i calcoli relativi ai compressori d'aria:

Nei fogli in Figura 3.43a e 3.43b sono presenti:

- Periodo (mese e anno) di riferimento nella prima colonna;
- Dati statici come il coefficiente di dilatazione adiabatica  $k$  e le due pressioni, quella iniziale prima della compressione e quella di utilizzo;
- Volume di aria compressa processata nel tempo, il quale è un dato preso dal foglio di input e dunque noto e fornito dalle aziende;
- Energia elettrica consumata dai compressori, sia reale che ideale;

Il solo foglio Power BI aggiunge ai precedenti anche:

- Indicatore teorico, calcolato come il consumo teorico di energia elettrica (il quale non tiene conto dei servizi di trattamento dell'aria compressa come essiccazione, raffreddamento e perdite di carico) e volume di aria compressa trattata;
- Efficienza dei compressori come rapporto tra consumo elettrico ideale e reale.

Month	Dati Aria Compressa					Risultati	
	$(k-1)/k$	K	P1 [Pa]	P2 [Pa]	V <sub>air, compr</sub> [m <sup>3</sup> ]	EE COMPRESSORI Reale [KJ]	EE COMPRESSORI Teorico [KJ]
gen-20	0,286	1,4	101325,0	1040000,0	116081,356	77.126.970	38.907.795,87
feb-20	0,286	1,4	101325,0	1040000,0	128979,2845	85.696.634	43.230.884,30
mar-20	0,286	1,4	101325,0	1040000,0	141877,2129	94.266.297	47.553.972,73
apr-20	0,286	1,4	101325,0	1040000,0	122530,3203	81.411.802	41.069.340,09
mag-20	0,286	1,4	101325,0	1040000,0	141877,2129	94.266.297	47.553.972,73
giu-20	0,286	1,4	101325,0	1040000,0	135428,2487	89.981.465	45.392.428,52
lug-20	0,286	1,4	101325,0	1040000,0	141877,2129	94.266.297	47.553.972,73
ago-20	0,286	1,4	101325,0	1040000,0	96734,46337	64.272.475	32.423.163,23
set-20	0,286	1,4	101325,0	1040000,0	128979,2845	85.696.634	43.230.884,30
ott-20	0,286	1,4	101325,0	1040000,0	148326,1772	98.551.129	49.715.516,95
nov-20	0,286	1,4	101325,0	1040000,0	135428,2487	89.981.465	45.392.428,52
dic-20	0,286	1,4	101325,0	1040000,0	122530,3203	81.411.802	41.069.340,09

Figura 3.43a: Foglio di calcolo dei compressori d'aria in Excel

Month	[k-1]/k	K	P1 [Pa]	P2 [Pa]	V_ait, compr [m³]	EE COMPRESSORI Reale [KJ]	EE COMPRESSORI Reale [GJ]
gennaio 2020	0,285714285714286	1,4	101325	1040000	116081,356039604	77126970,2970297	77,1269702970297
febbraio 2020	0,285714285714286	1,4	101325	1040000	85986,1896589659	57131089,1089109	57,1310891089109
marzo 2020	0,285714285714286	1,4	101325	1040000	94584,8086248625	62844198,019802	62,844198019802
aprile 2020	0,285714285714286	1,4	101325	1040000	81686,8801760176	54274534,6534653	54,2745346534653
maggio 2020	0,285714285714286	1,4	101325	1040000	94584,8086248625	62844198,019802	62,844198019802
giugno 2020	0,285714285714286	1,4	101325	1040000	90285,4991419142	59987643,5643564	59,9876435643564
luglio 2020	0,285714285714286	1,4	101325	1040000	90285,4991419142	59987643,5643564	59,9876435643564
agosto 2020	0,285714285714286	1,4	101325	1040000	64489,6422442244	42848316,8316832	42,8483168316832
settembre 2020	0,285714285714286	1,4	101325	1040000	85986,1896589659	57131089,1089109	57,1310891089109
ottobre 2020	0,285714285714286	1,4	101325	1040000	98884,1181078108	65700752,4752475	65,7007524752475
novembre 2020	0,285714285714286	1,4	101325	1040000	135428,248712871	89981465,3465346	89,9814653465346
dicembre 2020	0,285714285714286	1,4	101325	1040000	81686,8801760176	54274534,6534653	54,2745346534653

EE COMPRESSORI Teorico [KJ]	EE COMPRESSORI Teorico [GJ]	Indicatore COMPRESSORI_elettrico teorico [KJ/m³]	Indicatore COMPRESSORI_elettrico reale [KJ/m³]	Efficienza
38907795,8715312	38,9077958715312	335,176958634571	664,421686034715	50,45%
28820589,5344676	28,8205895344676	335,176958634571	664,421686034715	50,45%
31702648,4879143	31,7026484879143	335,176958634571	664,421686034715	50,45%
27379560,0577442	27,3795600577442	335,176958634571	664,421686034715	50,45%
31702648,4879143	31,7026484879143	335,176958634571	664,421686034715	50,45%
30261619,011191	30,261619011191	335,176958634571	664,421686034715	50,45%
30261619,011191	30,261619011191	335,176958634571	664,421686034715	50,45%
21615442,1508507	21,6154421508507	335,176958634571	664,421686034715	50,45%
28820589,5344676	28,8205895344676	335,176958634571	664,421686034715	50,45%
33143677,9646377	33,1436779646377	335,176958634571	664,421686034715	50,45%
45392428,5167864	45,3924285167864	335,176958634571	664,421686034715	50,45%
27379560,0577442	27,3795600577442	335,176958634571	664,421686034715	50,45%

Figura 3.43b: Foglio di calcolo dei compressori d’aria in Power BI

Le aziende, una volta compilato i fogli dei dati di input su Excel (mostrati in parte nelle figure 3.39a, 3.39b e 3.39c, vedranno automaticamente compilati i fogli di calcolo in Excel e successivamente quelli Power-Bi grazie all’importazione del file stesso nello strumento; inoltre, anche la parte grafica sarà di conseguenza visualizzata senza dover fare altro (come sarà spiegato nel prossimo paragrafo), in modo da poter verificare immediatamente l’andamento degli indici. I tre fogli di calcolo vengono caricati in modo indipendente e si può scegliere quali di essi, a partire dal file Excel, importare tramite una semplice spunta nel momento stesso in cui vengono caricati sullo strumento.

Questi fogli hanno in comune soltanto la prima colonna, ovvero quella della data, in modo da poterli collegare tra loro e creare il cosiddetto join.

Sempre nella parte di Data Modeling ma nella sezione di Relationship View (mostrata in figura 3.44) cerchiata in viola, è possibile definire le relazioni tra i dati; in tal caso, com’è possibile vedere, esistono due relazioni bilaterali cioè due relazioni di tipo uno-a-uno (1:1). In particolare, questi collegamenti permettono di far sì che, ogni volta che ci si riferisce ad un determinato mese, tutti e tre i fogli (e quindi gli indicatori) si sincronizzino su quella data, avendo così un orizzonte temporale comune per tutti.

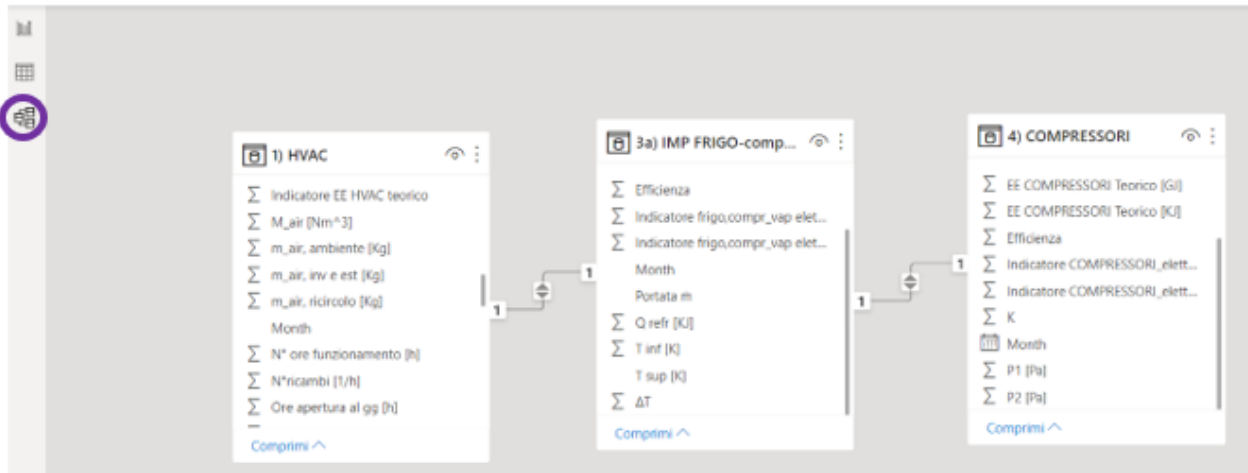


Figura 3.44: Collegamento tra database

### 3.6.6. Il cruscotto di visualizzazione

Una volta preparati i dati (prima di caricarli nel modello) e definite le relazioni tra essi, è possibile passare alla fase di modellazione e visualizzazione del cruscotto (detto anche dashboard) nella sezione denominata Report View, il quale costituisce uno strumento fondamentale per la gestione energetica e l'autodiagnosi. Questo cruscotto di monitoraggio dei consumi rappresenta il punto focale per le aziende del settore in quanto, grazie ad esso, è possibile inquadrare al meglio i consumi aziendali, confrontarli con i valori ideali, fare una corretta autodiagnosi e proporre soluzioni di miglioramento in maniera rapida ma accurata. La scelta dell'applicativo è stata fatta dopo attenta valutazione delle caratteristiche dei principali software con foglio di calcolo per sfruttare la sua estrema versatilità, scalabilità e adattabilità a casi differenti, unita alla efficacia della rappresentazione di sintesi, sia grafica che numerica, dei risultati di performance; infatti, tramite i cruscotti di Power BI, gli utenti aziendali possono disporre di una panoramica completa che raggruppa gli indicatori più importanti, aggiornati in tempo reale e disponibili sui loro dispositivi.

Il cruscotto proposto è composto di cinque sezioni interdipendenti: HVAC elettrico, HVAC termico, HVAC totale, Impianti frigo a compressione e Compressori. I fogli, come detto, sono collegati tra di loro mediante la data e si è cercato di dare, laddove possibile, uno schema stabile in cui le informazioni sono collocate più o meno allo stesso modo in modo da rendere più semplice la lettura delle informazioni.

In figura 3.45 viene mostrato il primo foglio che permette di visualizzare le prestazioni del sistema HVAC dal punto di vista elettrico.

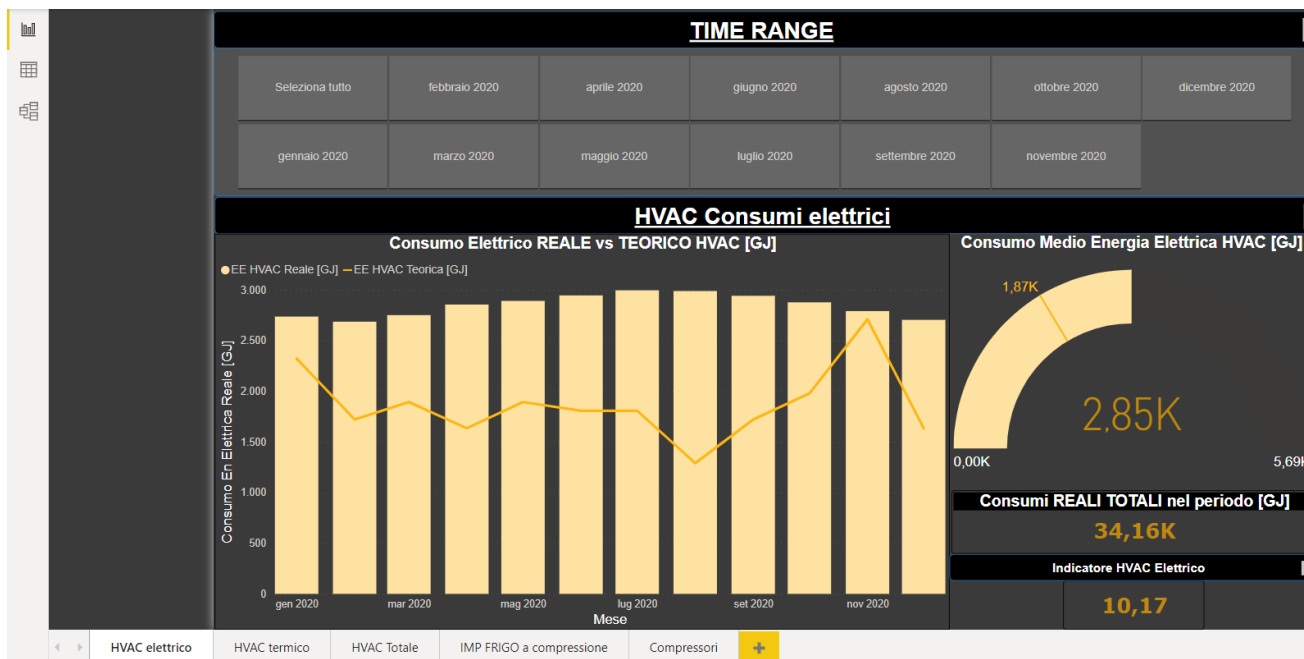


Figura 3.45: Cruscotto di visualizzazione HVAC elettrico

In alto vi è la possibilità di scegliere l’orizzonte temporale di cui si vogliono visualizzare i dati; può essere selezionato un singolo mese, più mesi o tutti quelli a disposizione tramite il tasto “Select All”; in figura sono stati presi in considerazione tutti i mesi.

Scelto il periodo di interesse, esso avrà effetto su tutti i fogli realizzati sul software; in particolare in questo caso sono in automatico mostrati:

- Grafico a linee e istogramma a colonne in pila (a sinistra) in cui, mese per mese, vengono mostrati tramite le colonne i consumi elettrici in GJ legati all’HVAC; la linea traccia invece quelli che dovrebbero essere i consumi teorici di energia elettrica in GJ per ogni mese.
- Misuratore (in alto a destra), simile ad un indicatore Gauge, in cui troviamo il valore minimo in basso a sinistra, in basso a destra viene mostrato il valore massimo che assume l’indicatore, mentre al centro troviamo il valore attuale. In una colorazione più scura, troviamo il valore target o benchmark, inserito direttamente sulla barra di visualizzazione, come una lancetta. Nel momento in cui sono selezionati tutti i mesi, questa modalità di visualizzazione fornisce un valore MEDIO dei consumi elettrici in GJ; se invece si seleziona uno specifico mese o periodo, fornisce il valore puntuale.
- Due Schede (in basso a destra): una permette di visualizzare i consumi reali elettrici TOTALI nel periodo in esame in GJ, mentre l’altra serve per mostrare il valore dell’indicatore teorico calcolato secondo le formule viste precedentemente.

In figura 3.46 viene mostrata la seconda sezione del progetto, quella riguardante le prestazioni del sistema HVAC questa volta dal punto di vista termico.

La pagina si presenta in modo simile alla precedente con in alto la sezione del time range: essa è sincronizzata con quella della pagina precedente e successiva in modo da permettere all’utente dello strumento, di selezionare una volta sola i mesi di interesse e di non ripetere l’operazione nelle sezioni successive.



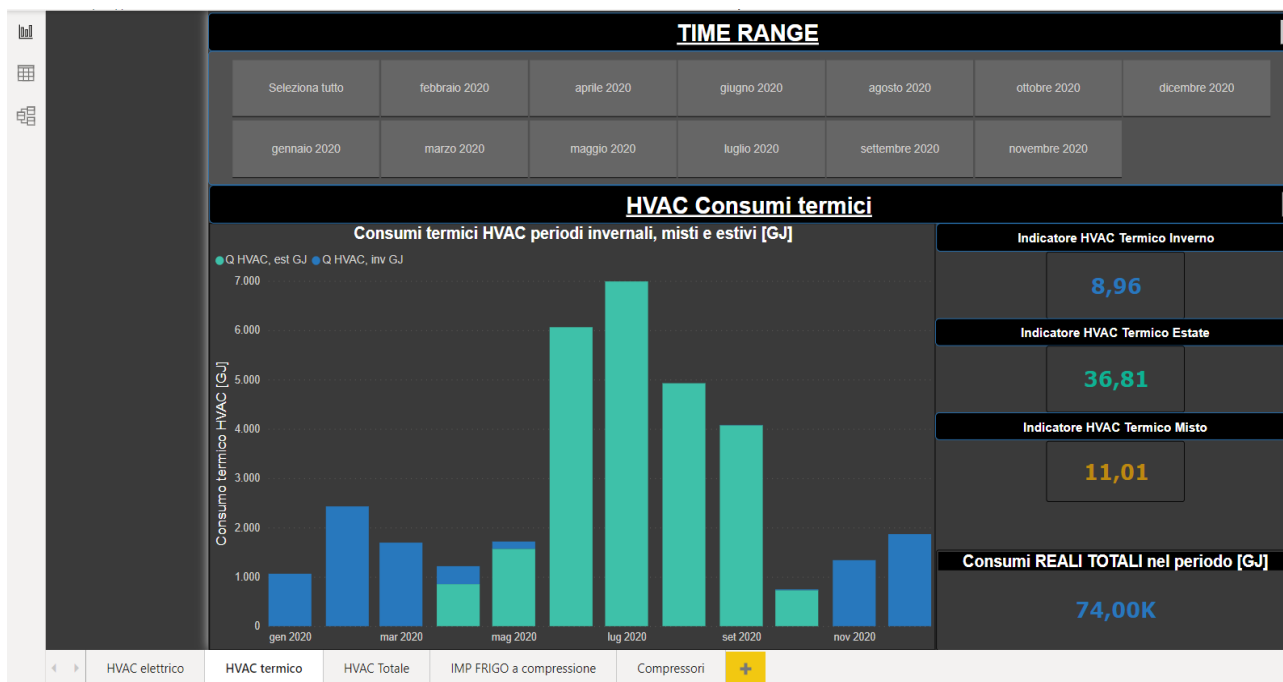


Figura 3.45: Cruscotto di visualizzazione HVAC elettrico

A sinistra è possibile vedere un istogramma nel quale vengono illustrati i consumi termici in GJ dell’HVAC mese per mese, suddivisi in diversi colori a seconda che il funzionamento del sistema in esame sia invernale (in blu), estivo (in verde) oppure misto (quando entrambi i contributi sono presenti). Tale distinzione dipende dai valori dei Gradi Giorno inseriti nel foglio in input.

A destra invece sono mostrati gli indicatori ideali precedentemente calcolati; nel momento in cui si seleziona uno specifico mese o un numero definito di mesi, verranno mostrati solo i valori relativi al funzionamento durante lo specifico periodo selezionato.

In basso sono mostrati i consumi reali TOTALI nel periodo considerato in GJ. Non è presente un misuratore in quanto non è stato possibile calcolare un consumo termico ideale con il quale poter confrontare il dato reale.

Le prestazioni globali dell’HVAC sono invece mostrate nella figura 3.47 qui di seguito:

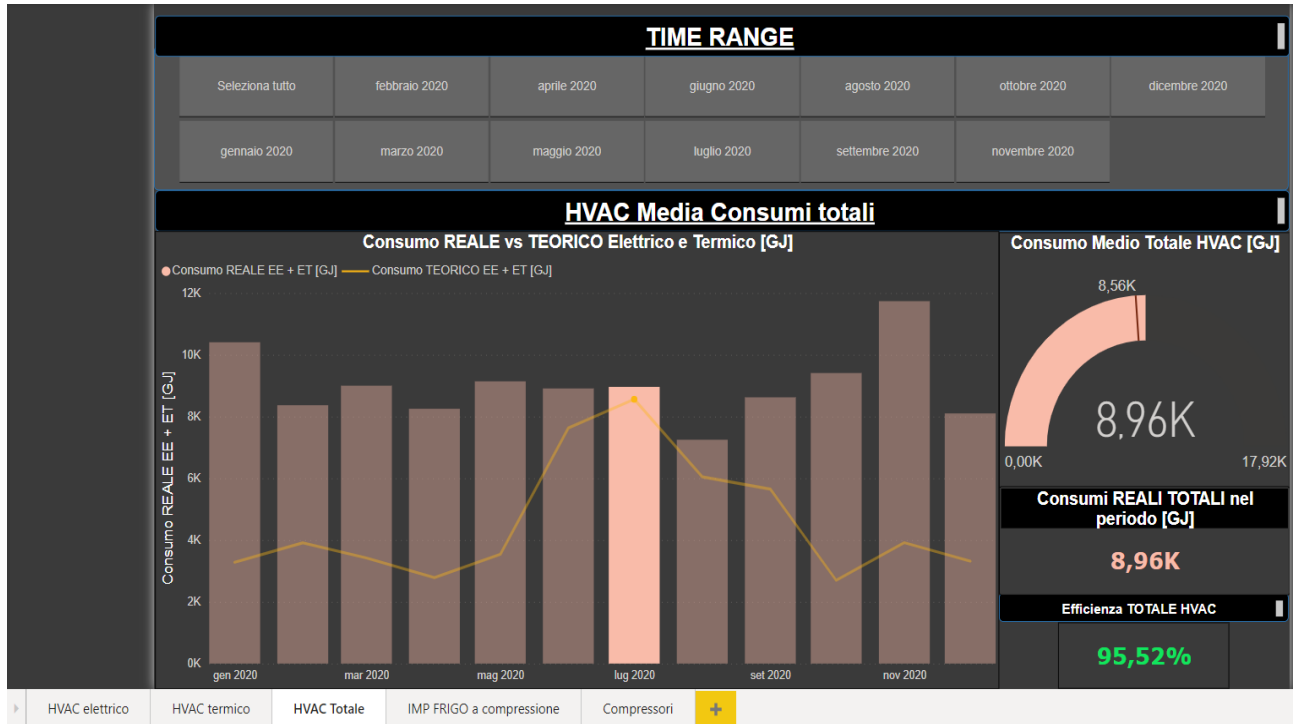


Figura 3.47: Cruscotto di visualizzazione HVAC totale

Selezionando una singola colonna nell'istogramma dei consumi totali (elettrico e termico) espressi in GJ, è possibile visualizzare il dettaglio del singolo mese selezionato; infatti, a destra vengono mostrati i valori relativi, nell'esempio, al mese di luglio. In particolare, è possibile mostrare anche l'efficienza calcolata come il rapporto tra consumi ideali e reali e, per la visualizzazione, è stata utilizzata una formattazione che permette di modificare il colore dell'etichetta dei dati in funzione del valore (se minore del 40% si colora di rosso, passando per l'arancione, fino ad arrivare al verde per un valore maggiore del 90%). Infine, è sempre presente la scheda che mostra i consumi reali totali nel periodo in GJ e il misuratore (in alto a destra) in cui troviamo al centro il valore attuale e in una colorazione più scura, il valore target.

Nella quarta sezione del cruscotto sono rappresentate le prestazioni degli impianti frigo a compressione di vapore (figura 3.48):



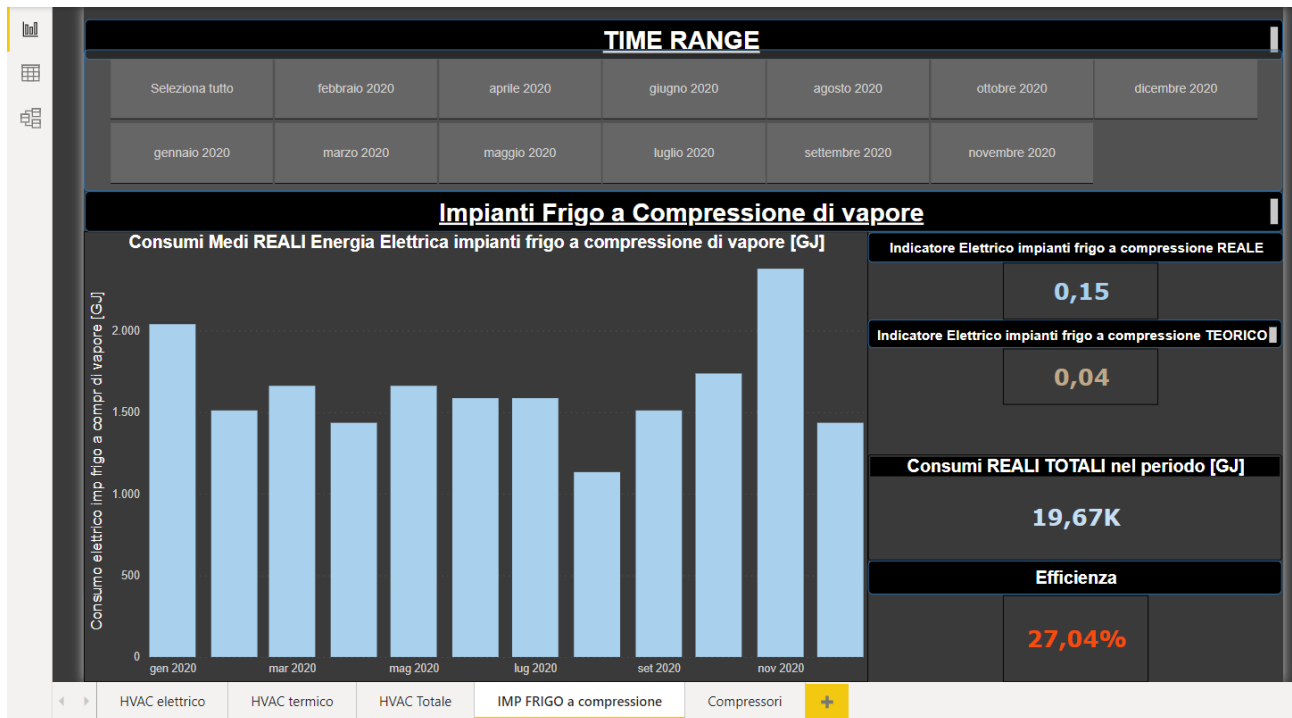


Figura 3.48 - Cruscotto di visualizzazione Impianti frigo a compressione di vapore

Come già ribadito più volte, le pagine sono collegate tra di loro tramite il time range presente in alto, e strutturate in modo più o meno simile.

Sulla sinistra è raffigurato l'istogramma a colonne in pila (di colore celeste chiaro) relativo ai consumi elettrici degli impianti frigo in GJ; sulla sinistra abbiamo il valore degli indicatori reale e ideale, i consumi totali nel periodo in GJ e infine l'efficienza (in basso) che, essendo minore del 40%, è colorata in rosso.

Anche in tal caso, non avendo il valore dei consumi di energia elettrica ideale non è stato possibile realizzare l'indicatore Gauge.

In basso è possibile selezionare la sezione che si preferisce visualizzare tra le tre precedentemente elencate.

Infine, l'ultima sezione è relativa ai Compressori d'aria, come mostrato in Figura 3.49.

A sinistra è mostrato il grafico a linee e istogramma a colonne in pila, in cui, mese per mese, vengono mostrati tramite le colonne di colore verde chiaro, i consumi elettrici legati ai compressori in GJ; la linea in verde più scuro traccia invece quelli che dovrebbero essere i consumi teorici di energia elettrica in GJ per ogni mese.

Sulla destra abbiamo un elemento in più rispetto alle sezioni precedenti, ovvero un istogramma a colonne in pila in cui vengono mostrati i volumi di aria compressa processati dai compressori, mese per mese, in m<sup>3</sup>. Inoltre, è presente il misuratore in cui troviamo al centro il valore attuale e in una colorazione più scura, il valore target; la scheda che mostra i consumi reali totali nel periodo in GJ e l'efficienza che segue sempre la formattazione specificata in precedenza (che rispetto a prima assume un colore più tendente all'arancio piuttosto che rosso in quanto il valore è maggiore).

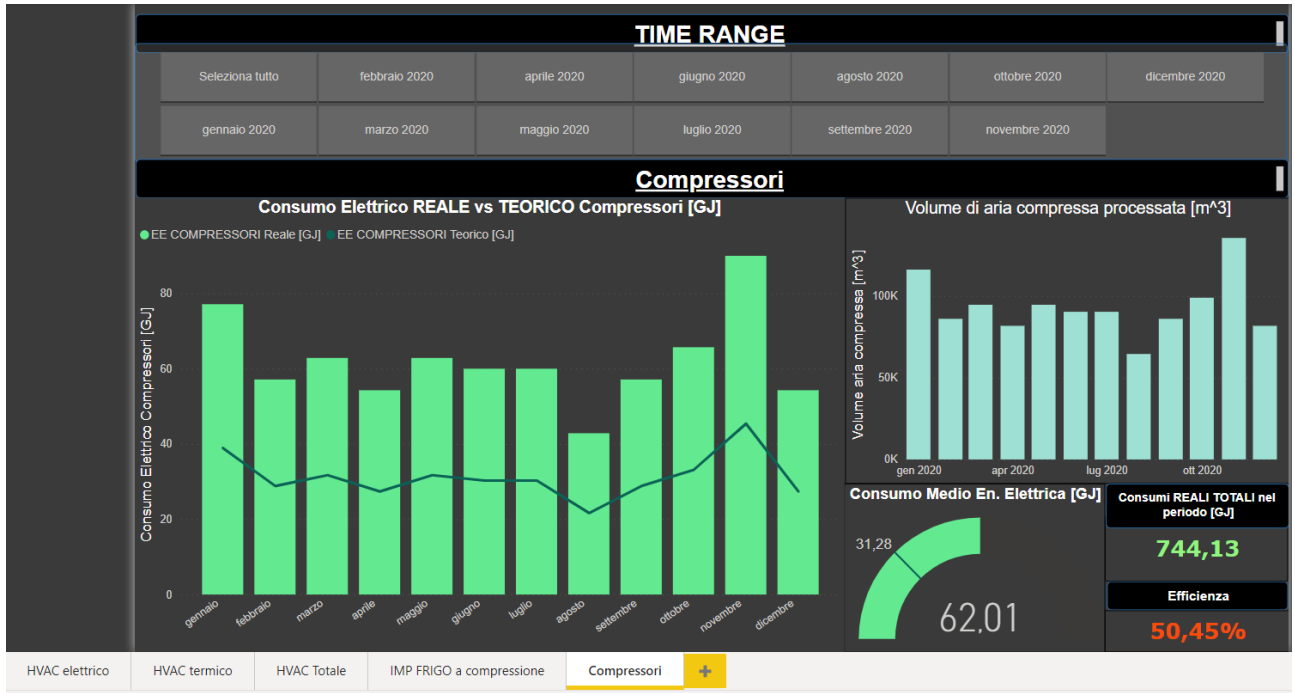


Figura 3.49: Cruscotto di visualizzazione Compressori d'aria

### 3.7. Bibliografia

- [1]. Azadeh, M. S. (2007). "An integrated DEA PCA numerical taxonomy approach for energy efficiency assessment and consumption optimization in energy intensive manufacturing sectors". *Energy Policy*, vol. 35, no. 7, pp. 3792-3806.
- [2]. Brusco, A. M. (s.d.). "Il ciclo lavorativo e i rischi nell'industria farmaceutica italiana".
- [3]. [A] AIFA. (2014). *Good Manufacturing Practice (GMP)*.
- [4]. , M. Benedetti et al. (Nov. 2019.). In *Maturity-based approach for the improvement of energy efficiency in industrial compressed air production and use systems*. *Energy*, vol. 186,.
- [5]. *Appian*. (s.d.). Tratto da <https://appian.com/it/bpm/business-process-definition.html>.
- [6]. Boie, R. K. (2003). Energy management practices in SME — case study of a bakery in Germany. *Energy Convers. Manag.*, vol. 44, , pp. 945–959, .
- [7]. *Business coaching italia BCI*. (s.d.). Tratto da <https://www.businesscoachingitalia.com/processi-aziendali-cosa-e-quali-sono-come-mapparli-e-ottimizzarli/>.
- [8]. F. Lindberg, S. T. (2015). *Key Performance Indicators Improve Industrial Performance*. *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 1785–1790.
- [9]. Cosgrove, J., Rivas, D. M., Littlewood, J., & Wilgeroth, P. (2018). An energy mapping methodology to reduce energy consumption in manufacturing operations. *Journal of Engineering Manufacture*, 1731-1740.
- [10]. Dossi, A. (2001). *I processi aziendali. Profili di misurazione e controllo*. . Egea.
- [11]. Farminindustria. (2021, Luglio). *Indicatori Farmaceutici*. Tratto da [www.farminindustria.it](http://www.farminindustria.it)
- [12]. J. Chen, Y. W. (2016). *Stochastic frontier analysis of productive efficiency in China's Forestry Industry*. *J. For. Econ.*, vol. 28, pp. 87–95.
- [13]. J. Ke, L. P. (2013). *Analysis and practices of energy benchmarking for industry from the perspective of systems engineering*. *Energy*, vol. 54, pp. 32–44.
- [14]. K. Cullinane, T.-F. W.-W. (2006). *The technical efficiency of container ports: Comparing data envelopment analysis and stochastic frontier analysis*. *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 40, no. 4, pp. 354–374.
- [15]. M. Benedetti, F. B. ( 2019). Real time energy performance control for industrial compressed air systems: Methodology and applications. *Energies*, vol. 12, no. 20.
- [16]. M. J. Moran, S. H. (2018). *Fundamentals of engineering*.
- [17]. Ministero della Salute. (s.d.). Tratto da [www.salute.gov.it](http://www.salute.gov.it)
- [18]. O. A. Olanrewaju, A. A. (2012). "Integrated IDA-ANN-DEA for assessment and optimization of energy consumption in industrial sectors". *Energy*, vol. 46, no. 1, pp. 629–635.
- [19]. Ostinelli, C. (1995). La mappatura e l'analisi dei processi gestionali: al cuore dell'activity based management. *Libero Istituto Universitario Carlo Cattaneo*.
- [20]. P. Liu, F. L. (s.d.). "A novel approach for acquiring the real-time energy efficiency of machine tools". 2017: *Energy*, vol. 121, pp. 524–532.

- [21]. Papetti, A., Menghi, R., Di Domizio, G., Germani, M., & Marconi, M. (2019). Resources value mapping: A method to assess the resource efficiency of manufacturing systems. *Applied Energy*, 326-342.
- [22]. Porter, M. E. (1987). *"Competizione globale"*. Torino: Isedi.
- [23]. *Projectland*. (2018, Luglio). Tratto da Analisi Benchmark e analisi di mercato: <https://www.projectland.it/efficacia-professionale/benchmark-e-analisi-di-mercato/>
- [24]. R. Mahamud, W. L. (2017). *"Energy characterisation and benchmarking of factories"*. CIRP Ann. - Manuf. Technol., vol. 66, no. 1, pp. 457-460.
- [25]. S. Meyers, B. S.-j. (2016). Energy efficiency, carbon emission, and measures towards their improvement in the food and beverage sector for six European countries. *Energy*, vol 4, pp.266-238.
- [26]. S. Salvatori, M. B. (2018). *"Inter-sectorial benchmarking of compressed air generation energy performance: Methodology based on real data gathering in large and energy-intensive industrial firms"*. *Appl. Energy*, vol. 217.
- [27]. Seow, Y., & Shahin, R. (2011). A framework for modelling energy consumption within manufacturing systems. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 258-264.
- [28]. UNI CEI EN ISO 50001:2018. (s.d.). *Sistemi di gestione dell'energia - Requisiti e linee guida per l'uso*.
- [29]. UNI CEI EN ISO 50006:2014. (s.d.). *Energy management systems - Measuring energy performance using energy baselines (EnB) and energy performance indicators (EnPI) - General principles and guidance*.
- [30]. V. Introna, V. C. (2014). *Energy Management Maturity Model: An organizational tool to foster the continuous reduction of energy consumption in companies*. *J. Clean. Prod.*, vol. 83, no. 1994, pp. 108-117.
- [31]. W. Cai, F. L. (2018). *Energy benchmarking rules in machining systems*. *Energy*, vol. 142, pp. 258-263.

## 4. Analisi di scenario

In questa ultima parte del lavoro si è voluto proporre una funzionalità aggiuntiva dello strumento di monitoraggio che, partendo dai risultati ottenuti in termini di performance energetica delle fasi analizzate, permettesse di effettuare valutazioni sulla base di analisi di scenario del tipo *What-If*.

Più precisamente l'obiettivo è stato quello di permettere al decisore o al manager energetico, di variare alcuni parametri del sistema produttivo e valutare l'effetto di tali modifiche sulle prestazioni energetiche complessive del sistema. Il tutto ovviamente senza alterare in alcun modo i risultati reali invece ottenuti sulla base dei calcoli relativi all'andamento effettivo dell'impianto.

Per ottenere questo è stato predisposto un ulteriore cruscotto che sia in grado di porre a diretto confronto gli indici di prestazione energetica realmente ottenuti (Situazione "As Is") con gli stessi indici che si sarebbero in via ipotetica potuti ottenere se le modifiche testate si fossero realizzate sull'impianto o sul processo (Situazione "To Be").

Il cruscotto per l'analisi di scenario legge in input i dati forniti da un foglio Excel di raccolta opportunamente modificato, come mostrato in un esempio nella figura 4.1, di seguito riportata:

Month	Dati statici		DEFINIZIONE REGIME				X ricircolo Analisi_Scenario	X ricircolo	Pompa di calore	Pompa di calore Analisi_Scenario
	N°ricambi Analisi_Scenario [1/h]	N°ricambi [1/h]	T target Analisi_Scenario	T target	Umidità relativa interna Analisi_Scenario	Umidità relativa interna				
gen-20	15	12	21	20	60%	50%	0,7	0,5	NO	SI
feb-20	15	12	21	20	60%	50%	0,7	0,5		
mar-20	15	12	21	20	60%	50%	0,7	0,5		
apr-20	15	12	21	20	60%	50%	0,7	0,5		
mag-20	15	12	21	20	60%	50%	0,7	0,5		
giu-20	15	12	21	20	60%	50%	0,7	0,5		
lug-20	15	12	21	20	60%	50%	0,7	0,5		
ago-20	15	12	21	20	60%	50%	0,7	0,5		
set-20	15	12	21	20	60%	50%	0,7	0,5		
ott-20	15	12	21	20	60%	50%	0,7	0,5		
nov-20	15	12	21	20	60%	50%	0,7	0,5		
dic-20	15	12	21	20	60%	50%	0,7	0,5		

Figura 4.1: Esempio di foglio di raccolta dati per l'analisi di scenario

In figura sono state evidenziate in giallo le colonne del foglio di tabella che permettono di inserire valori dei parametri di settaggio del processo differenti da quelli reali, senza che questi ultimi risultino in alcun modo alterati. Infatti, come si può vedere nell'immagine, accanto ad ogni colonna relativa all'analisi di scenario (modificabile a piacere) vi è la colonna dei corrispondenti valori effettivi del processo, che invece rimane immutata e perfettamente aderente a quando inserito in input durante la raccolta dati del processo. Nell'esempio specifico sono state mostrate delle modifiche possibili ad alcuni parametri di settaggio del sistema HVAC relativo al settore Farmaceutico. I parametri che possono essere modificati in questo caso sono il numero di ricambi d'aria orari per gli ambienti climatizzati, la temperatura target di tali ambienti, l'umidità relativa impostata per gli stessi ambienti, la percentuale di aria di ricircolo che viene immessa dall'impianto di condizionamento ed infine la possibilità di utilizzare oppure no i sistemi di condizionamento anche come pompa di calore.

Le scelte espresse all'interno di foglio di raccolta dati vengono quindi caricate nel database dello strumento Power BI e collegate alle altre variabili per il calcolo dei valori di performance sia reali che simulati. La Figura 4.2 mostra i collegamenti tra i database per il calcolo degli indicatori integrati.

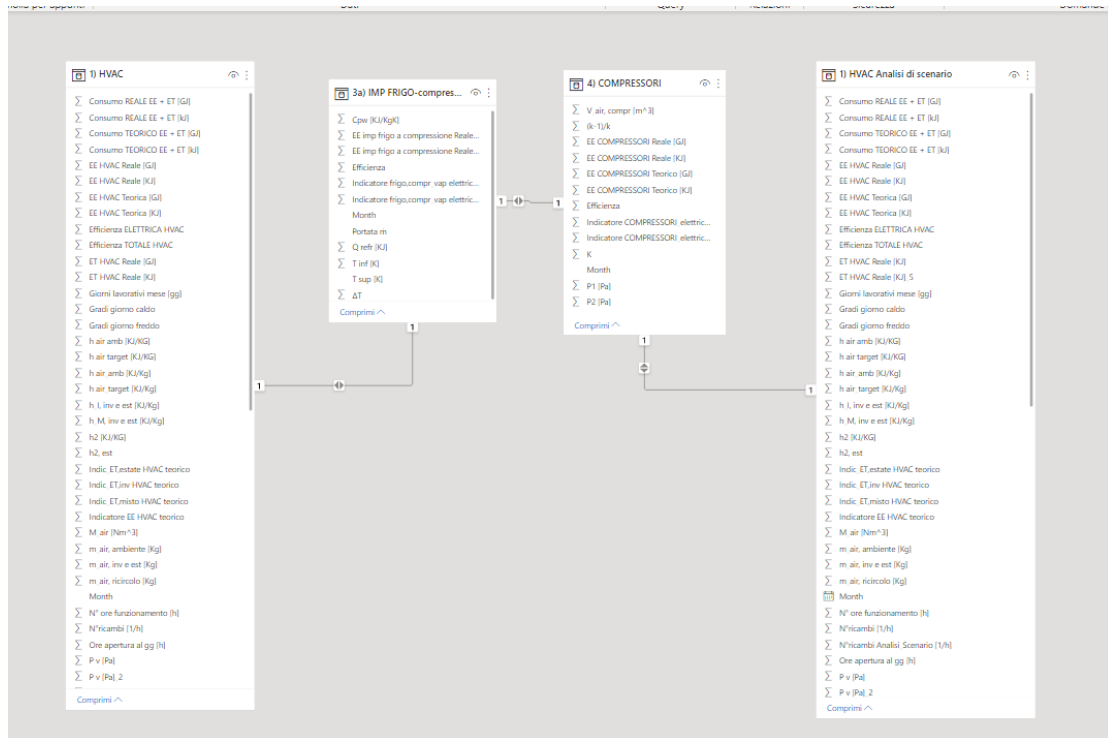


Figura 4.2: Collegamento tra i database per il cruscotto di Analisi di Scenario

Una volta caricati i dati, sia reali che simulati, il cruscotto permette la visualizzazione comparativa dei risultati, fornendo in modalità affiancata e per ogni indicatore il valore reale, individuato dalla situazione “As Is”, e il valore ipotetico nel caso di implementazione delle modifiche proposte, corrispondente quindi alla situazione “To Be”. In questo modo il decisore può valutare in maniera diretta e immediata l’effetto possibile di una eventuale modifica al processo sulle prestazioni energetiche attese.

La funzionalità dello strumento è mostrata a titolo di esempio dalle figure seguenti, nelle quali vengono mostrati gli indicatori di consumo elettrico, di consumo termico e globale per il sistema HVAC nell’ipotesi di aver modificato i dati così come riportato nella Figura 4.1.

La Figura 4.3 evidenzia come per il consumo elettrico siano riportati due indicatori e conseguentemente due valori di efficienza, dove quello di sinistra è il valore reale mentre quello di destra, di colore verde è il risultato simulato, conseguente alle modifiche imposte al processo.

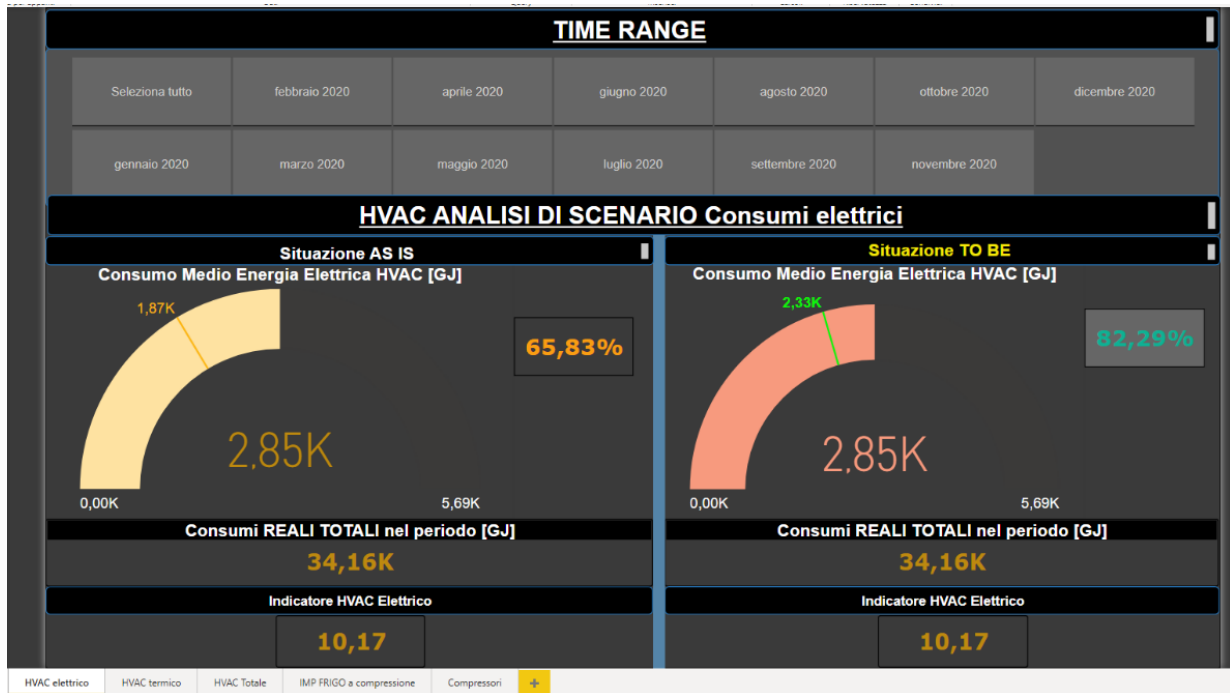


Figura 4.3: Confronto As Is – To Be per i consumi elettrici HVAC

Nella Figura 4.4 sono invece riportati i valori comparati per i consumi termici della stessa unità impiantistica. Anche in questo caso sono facilmente visibili i risultati differenti, sulla sinistra quelli reali e sulla destra quelli simulati.

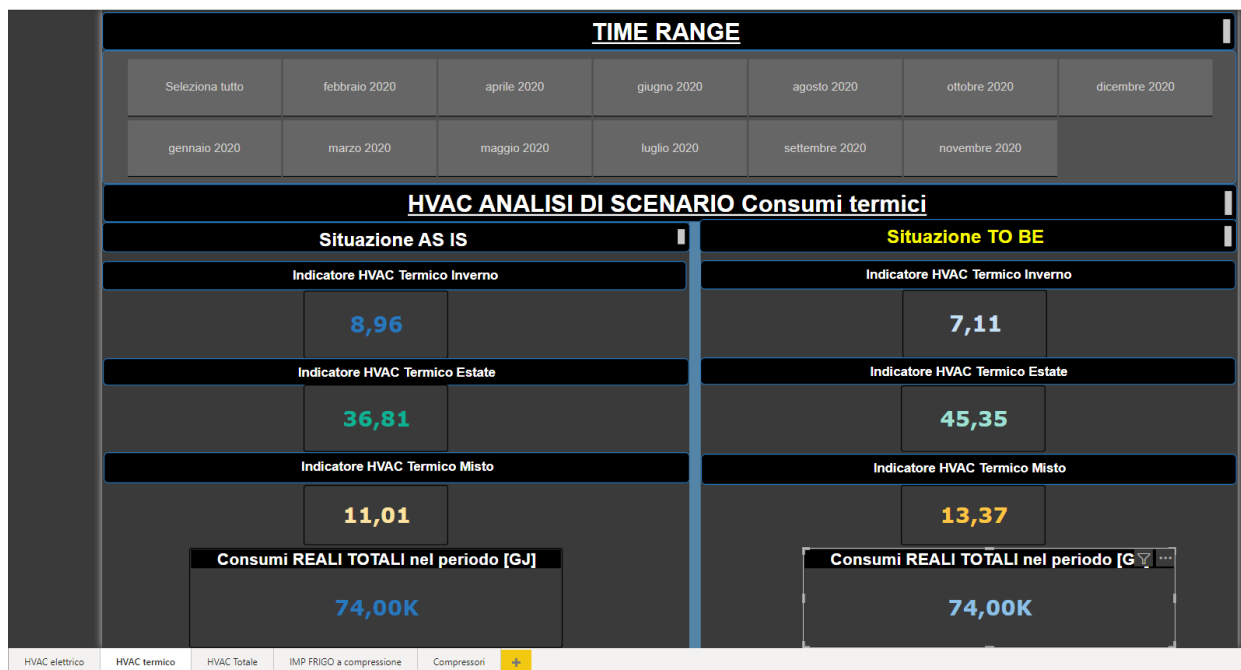


Figura 4.4: Confronto As Is – To Be per i consumi termici HVAC

Infine la Figura 4.5 mostra per la stessa modifica i valori comparativi dei consumi totali. Le modalità di visualizzazione dei risultati sono le medesime delle schermate precedenti.

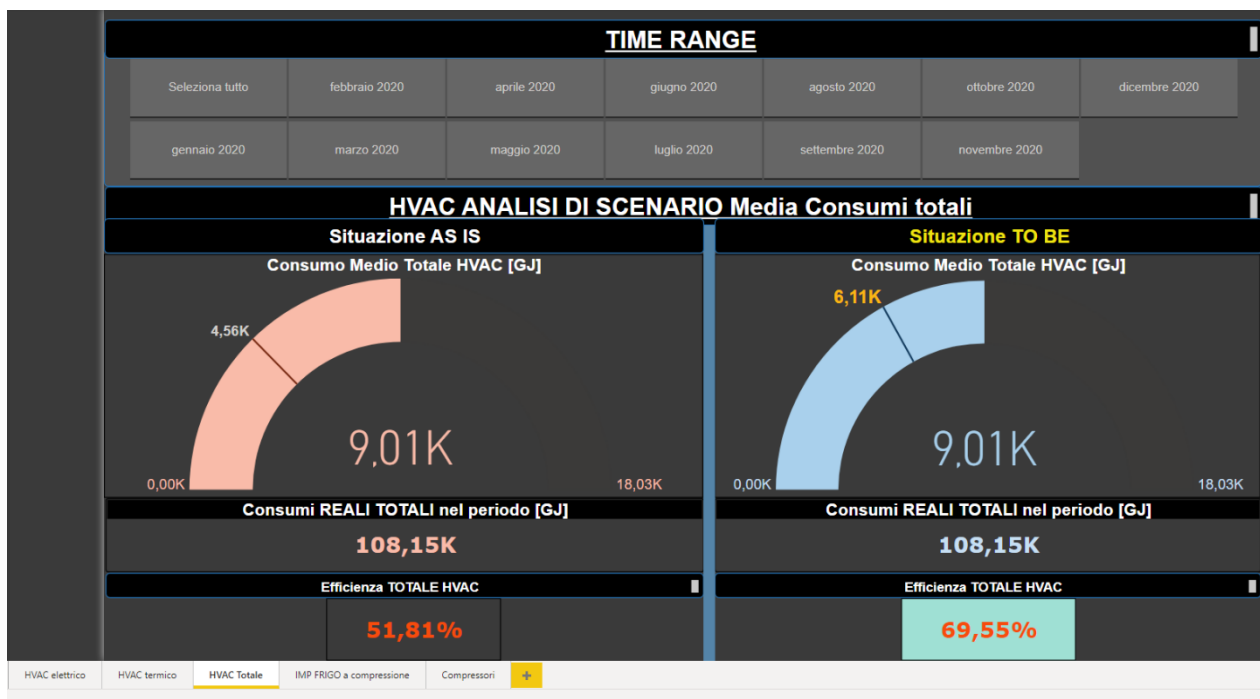


Figura 4.5: Confronto As Is – To Be per i consumi totali HVAC

È importante far notare che lo strumento misura esclusivamente l’impatto atteso sulle prestazioni energetiche, senza fornire valutazioni economiche conseguenti alle scelte di modifica effettuate sul processo. La possibilità di aggiungere valutazioni di convenienza economica relative alle singole ipotesi di modifica del processo può essere considerata tra gli sviluppi futuri dello strumento.



## 5. Attività di disseminazione

Le attività condotte durante questa terza annualità del progetto e sintetizzate nel presente report hanno beneficiato di un confronto continuo con le parti interessate, principalmente con le associazioni rappresentative dei tre settori oggetto degli approfondimenti dello studio.

In particolare il confronto si è concretizzato con delle occasioni di incontro in cui, da una parte sono stati presentati i risultati intermedi delle attività in corso di svolgimento e dall'altra si sono ottenuti importantissimi feedback utili a chiarire eventuali dubbi relativi alle realtà produttive analizzate e soprattutto a validare i contenuti del lavoro, accertandosi che fossero quanto più aderenti possibile alla realtà (nei limiti del rispetto della riservatezza dei dati delle singole aziende).

Più nello specifico le occasioni di confronto/disseminazione sono state le seguenti:

- *14 maggio 2021*: Presentazione generale degli obiettivi del progetto e delle attività avviate all'Associazione Farindustria, rappresentativa del settore farmaceutico, e agli altri partner del progetto;
- *21 maggio 2021*: Presentazione generale degli obiettivi del progetto e delle attività avviate all'Associazione Assofond, rappresentativa del settore delle fonderie, e agli altri partner del progetto;
- *8 luglio 2021*: Incontro con esperti del settore fonderie appartenenti all'Associazione Assofond per confronto e richiesta di informazioni su specificità dei processi produttivi relativi alle fonderie;
- *12 luglio 2021*: Presentazione generale degli obiettivi del progetto e delle attività avviate all'Associazione Utilitalia, rappresentativa del settore dell'Incenerimento rifiuti, e agli altri partner del progetto;
- *14 settembre 2021*: presentazione, in presenza di tutti i partner di progetto, all'Associazione Assofond dei risultati preliminari riguardanti l'analisi e la mappatura energetica condotta relativamente al settore Fonderie;
- *17 settembre 2021*: Incontro con esperti del settore farmaceutico appartenenti all'Associazione Farindustria per confronto e richiesta di informazioni su specificità dei processi produttivi e dei servizi ausiliari, nonché presentazione dei risultati preliminari relativi all'analisi e alla mappatura energetica dei processi farmaceutici;
- *20 settembre 2021*: Incontro con esperti del settore incenerimento rifiuti appartenenti all'Associazione Utilitalia per confronto e richiesta di informazioni su specificità dei processi produttivi e dei servizi ausiliari, nonché presentazione dei risultati preliminari relativi all'analisi e alla mappatura energetica dei processi di incenerimento;
- *25 ottobre 2021*: presentazione ai partner del progetto e ai rappresentanti dell'Associazione Assofond del cruscotto di analisi e di monitoraggio delle prestazioni energetiche relative al settore fonderie. Richiesta dati all'associazione per la validazione dei risultati;
- *5 novembre 2021*: presentazione ai partner del progetto e ai rappresentanti dell'Associazione Utilitalia del cruscotto di analisi e di monitoraggio delle prestazioni energetiche relative al settore incenerimento rifiuti;
- *30 novembre 2021*: presentazione ai partner del progetto e ai rappresentanti dell'Associazione Assofond della versione finale del cruscotto di analisi e di monitoraggio delle prestazioni energetiche relative al settore fonderie.
- *13 dicembre 2021*: presentazione ai partner del progetto e ai rappresentanti dell'Associazione Farindustria della versione finale del cruscotto di analisi e di monitoraggio delle prestazioni energetiche relative al settore farmaceutico

Inoltre il gruppo ha partecipato all'evento finale di presentazione delle attività e dei risultati del progetto, organizzato da ENEA il giorno 2 dicembre 2021 a Roma. Tale evento, dal titolo "**Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali - Risultanze dei WP3 e WP4 del Progetto 1.6 del Piano Triennale di realizzazione 2019-2021 della Ricerca di Sistema elettrico nazionale (RdS)**", ha previsto un intervento a cura dell'Università di Salerno dal titolo: "ANALISI E CARATTERIZZAZIONE ENERGETICA DEI SETTORI ENERGETICI DEI SETTORI PRODUTTIVI", nel quale sono stati presentati al pubblico in sala e a quello collegato a distanza tramite evento Youtube, la metodologia seguita nel corso del progetto e lo strumento per il monitoraggio delle prestazioni messo a punto e proposto alle imprese dei settori coinvolti.

## 6. Conclusioni

La schematizzazione energetica di un sistema di produzione industriale per l'analisi dei consumi di ogni singola fase al fine di calcolarne le prestazioni energetiche è molto complessa ed è fortemente influenzata dal tipo di sistema in esame. La presenza di un elevato numero di componenti, sistemi, fonti energetiche e prodotti all'interno di un impianto industriale conferma la possibilità di intervento per l'ottimizzazione delle prestazioni e la riduzione dei consumi.

Nel presente lavoro è stata proposta una metodologia per la caratterizzazione dei consumi e la valorizzazione della produzione attraverso alcuni indici di prestazione energetica di riferimento per tre importanti settori industriali italiani: fonderie, incenerimento rifiuti e farmaceutico. Le analisi condotte ed in calcoli degli indicatori proposti permettono da un lato di poter analizzare le prestazioni e dall'altro di quantificare i margini di miglioramento dei processi, indagando le cause che comportano una riduzione delle prestazioni; l'obiettivo finale, dunque, è quello di supportare gli addetti alla gestione dell'energia nella definizione di una strategia di intervento per eliminare o quantomeno ridurre i gap prestazionali emersi.

Grazie agli studi condotti nelle precedenti annualità del progetto e mirati all'approfondimento delle metodologie di analisi e schematizzazione dei processi, si è riusciti ad ottenere un quadro completo degli approcci disponibili nell'ambito della mappatura dei flussi energetici che mirano all'efficientamento dei processi produttivi. Ciò ha fornito una valida base di partenza per poter definire un metodo da adottare per ciascun settore energivoro scelto al fine di ottenere una corretta definizione degli indicatori.

Partendo da tali approcci, è stata sviluppata una metodologia che prevede sei passaggi fondamentali: 1) Individuazione del settore di analisi; 2) Studio preliminare del settore; 3) Sopralluogo o interazione con le associazioni rappresentative del settore; 4) Definizione dei confini di analisi; 5) Layout e mappatura dei flussi; 6) Raccolta dei dati.

Grazie alla stretta collaborazione con il CINTEST, che si è occupata dell'elaborazione di un metodo di valutazione delle prestazioni sulla base del confronto tra indicatori teorici e operativi e nella proposta di un approccio strutturato per arrivare alla definizione degli indicatori di riferimento, è stato possibile proporre uno strumento utile per supportare le scelte da dover condurre per ogni fase e le alternative disponibili.

Ottenute dal CINTEST le formulazioni matematiche di tutti gli indicatori analizzati, è stato necessario reperire i valori necessari al calcolo effettivo degli indicatori teorici e i valori di consumo effettivi per poterli confrontare. Questa fase del lavoro è stata possibile grazie alla collaborazione con le associazioni di categoria, che hanno messo a disposizione la loro conoscenza e i loro dati tramite dei questionari preparati ad hoc, al fine di completare il lavoro ed ottenere uno strumento affidabile.

Nei capitoli relativi a tre casi di studio (come detto, Fonderie, Incenerimento rifiuti e Farmaceutico) si sono presentati i cruscotti di monitoraggio dei consumi appositamente realizzati per ognuno dei settori. Tali applicativi, tarati sulla base delle analisi condotte, hanno lo scopo di mettere a disposizione delle singole aziende di ogni settore uno strumento "entry-level" per la gestione energetica e l'auto-diagnosi dell'efficienza dei processi.

A valle dell'analisi è emerso che mentre per i primi due settori è stato possibile applicare il monitoraggio alle fasi principali del processo produttivo, per quanto riguarda il terzo settore, ossia il farmaceutico lo studio è stato leggermente più complesso a causa della vastità di farmaci prodotti (solidi, liquidi e semisolidi), mentre sono state analizzate tutte le fasi relative ai servizi ausiliari e generali. Ciò che è emerso è che, nonostante la

grande variabilità dei processi, le linee produttive rappresentano una percentuale non prevalente dei consumi mentre l'area maggiormente energivora risulta essere quella dei servizi ausiliari. Lo strumento creato è stato quindi sviluppato per monitorare le apparecchiature facenti parte di quest'area di stabilimento.

Lo strumento sviluppato nei tre settori ha fondamentalmente lo scopo di semplificare il lavoro di interpretazione dei dati e di permettere il confronto con i valori di riferimento che ogni azienda appartenente ad ognuno dei tre settori può fissare sulla base delle caratteristiche del proprio sistema produttivo. Tale confronto, soprattutto se corredato da un'analisi storica che lo strumento consente, permette di guidare efficacemente le scelte degli addetti alla gestione energetica in quanto fornisce indicazioni sugli interventi più importanti e soprattutto più mirati per il miglioramento delle prestazioni.

Lo strumento proposto è stato infine integrato con una nuova funzionalità implementando nel cruscotto una sezione "What-if", in cui dall'esterno è possibile modificare alcuni parametri del processo e/o variabili del sistema e vedere, in uno scenario ipotetico, quali sono le conseguenze attese in termini efficienza termica o elettrica. Lo strumento permette quindi di effettuare un'analisi di sensibilità per comprendere quali variabili incidano maggiormente sul dispendio energetico dello stabilimento e quali meno. L'utilizzo di questa funzionalità aggiuntiva può coadiuvare gli esperti delle aziende nella scelta di nuovi investimenti volti ad azioni di efficientamento energetico. Con delle formule ad hoc, non ancora implementate, si potrebbe infatti anche stimare il valore del risparmio che si otterrebbe ottimizzando un dato parametro, compararlo con l'investimento da fare, e realizzare così un'analisi costi-benefici.

## Elenco ALLEGATI al REPORT

Oltre al presente documento, si trovano in allegato i seguenti file:

- All. 1** File “Foglio Raccolta dati Farmaceutico” per raccolta e caricamento dati nel cruscotto (*Excel*)
- All. 2** Strumento di monitoraggio dei consumi per il settore Farmaceutico (*Power-BI*)
- All. 3** Foglio di raccolta dati Incenerimento Rifiuti (*Excel*)
- All. 4** Foglio “Database Incenerimento Rifiuti” caricamento dei dati nel cruscotto (*Excel*)
- All. 5** Strumento di monitoraggio dei consumi per il settore Incenerimento Rifiuti (*Power-BI*)
- All. 6** Foglio di raccolta dati Fonderie (*Excel*)
- All. 7** Foglio “Database Fonderie” per il caricamento dei dati nel cruscotto (*Excel*)
- All. 8** Strumento di monitoraggio dei consumi per il settore produttivo Fonderie (*Power-BI*)
- All. 9** Foglio di raccolta dati per Analisi di Scenario Farmaceutico (*Excel*)
- All. 10** Strumento per Analisi di Scenario - settore produttivo Farmaceutico (*Power-BI*)
- All. 11** Istruzioni per l’uso dello strumento Power BI (Pdf)

## CV brevi degli autori

**Salvatore Miranda** - Professore Associato presso l'Università di Salerno – è Docente di Progettazione e Gestione degli Impianti Industriali, Servizi Generali d'Impianto e Gestione dei Progetti Industriali. Dal 2019 è Direttore Vicario del Dipartimento di Ingegneria Industriale. Da luglio 2018 è abilitato al ruolo di professore di I Fascia nel settore Scientifico Ing-Ind/17- Impianti Industriali Meccanici. Dal 2019 è responsabile scientifico per l'Università di Salerno del Progetto di ricerca di Rilevante Interesse Nazionale (PRIN)) dal titolo "SO4SIMS: Smart Operators 4.0 based on Simulation for Industry and Manufacturing Systems". Dal 2018 è Responsabile Scientifico di Ateneo per il progetto PON-MIUR Ricerca e Innovazione 2014- 2020 dal titolo "Processi Integrati e Connessi per l'Evoluzione Industriale nella Produzione"-Area FABBRICA INTELLIGENTE. Dal 2017 è delegato per il Dipartimento di Ingegneria Industriale alle tematiche di ricerca "Industria 4.0". Dal 2018 è Socio Fondatore, Amministratore Unico e Legale Rappresentante dello Spin-Off Universitario MONOLETO S.R.L. Innovativa, con oggetto lo sviluppo, la produzione e la commercializzazione di prodotti o servizi innovativi ad alto valore tecnologico. Dal 2013 ad oggi è Responsabile Scientifico del Laboratorio di Automazione Industriale e Operations Management del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Salerno. È coautore di oltre 120 pubblicazioni scientifiche su riviste internazionali e atti di convegni internazionali, è membro di Editorial Board di due riviste scientifiche internazionali nonché reviewer per numerose riviste scientifiche.

**Stefano Riemma** - Professore Ordinario presso Università di Salerno - è docente del corso di Progettazione e Gestione degli Impianti Industriali del Dipartimento di Ingegneria Industriale e del corso di Automazione e Gestione dei Sistemi Produttivi. È stato coordinatore del dottorato di Ingegneria ed economia dell'innovazione presso l'Università di Salerno, direttore del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Salerno, componente del Senato Accademico dell'Ateneo Salernitano. È Componente del consiglio direttivo dell'AIDI (Associazione Italiana Docenti Impianti Industriali). È responsabile scientifico di numerose convenzioni di ricerca con aziende private su temi di specifico interesse industriale. È consulente esperto dei Ministeri dell'Università e dello Sviluppo Economico sui temi riguardanti la ricerca, l'innovazione e l'industrializzazione dei processi di produzione di beni e servizi. I suoi interessi di ricerca comprendono la gestione delle operations, la pianificazione e il controllo della produzione, la pianificazione delle risorse, la logistica nella produzione e nei servizi, la gestione della sanità, la simulazione e i gemelli digitali, la valutazione del ciclo di vita.

**Alfredo Lambiase** - Professore Ordinario di Impianti Industriali dal 1994. Autore di numerose pubblicazioni nazionali ed internazionali. Responsabile di progetti di ricerca finanziati dal MIUR, dal CNR, dalla Regione Campania e dall'Università di Salerno. Le attività di ricerca sono state condotte soprattutto nelle seguenti aree: Aspetti tecnico-economici nell'automazione di processi industriali; Simulazione di processi manifatturieri; Ottimizzazione di tempi, costi e qualità nella gestione di sistemi industriali complessi; Impiego di costi parametrici per la stima dei costi di impianto; Manutenzione di impianti industriali; Programmazione e controllo della produzione in ambienti produttivi complessi; Analisi ergonomica con strumenti di Digital Factory; Applicazione della Digital Factory per l'ottimizzazione di attività produttive. Negli anni ha svolto numerosi incarichi accademici tra cui: Direttore del Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università di Salerno; Componente del Nucleo di Valutazione di Ateneo; Delegato del Rettore per il Personale; Delegato del Rettore per il Trasferimento Tecnologico, Direttore del Concorso regionale Start Cup Campania; Delegato del Rettore per il Placement; Consigliere di Amministrazione della Fondazione Universitaria dell'Università degli Studi di Salerno; Presidente della Commissione Spin-off di Ateneo.

**Raffale Iannone** - Professore Associato presso Università di Salerno – è docente di Modellazione dei Sistemi Produttivi e Logistici e di Progettazione e Gestione degli Impianti Industriali del Dipartimento di Ingegneria Industriale. Dal 2003 è membro della commissione web del DIIN. Dal 2016 partecipa al progetto europeo KIPAM "Knowledge Is Power, Age ain't Matter". Dal 2017 è membro della commissione per le attività di formazione dei dottorandi. È autore di numerose pubblicazioni su riviste internazionali. I suoi interessi di ricerca includono Supply Chain Management, Simulazione distribuita, Healthcare Management, Sistemi ERP, Gestione dell'inventario e sistemi ERP, Life Cycle Assessment.