



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



MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA



Ricerca di Sistema elettrico

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

Costruzione del modello di assessment e studio dei settori
manifatturieri del vetro e del cemento
A. Cantini F. De Carlo, L. Leoni, M. Tucci



Report RdS/PTR2019/094

ASSESSMENT TECNOLOGICO PER LA CARATTERIZZAZIONE ENERGETICA DEI MACCHINARI E DELLA MATURITÀ TECNOLOGICA DI ALCUNI SETTORI MANIFATTURIERI:

Costruzione del modello di assessment e studio dei settori manifatturieri del vetro e del cemento

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

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

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

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo : N.1 - Tecnologie

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

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

Linea di attività: LA4.14 - Validazione, e svolgimento dell'assessment tecnologico per le aziende dei 2 settori selezionati: studio di fattibilità dell'improvement tecnologico

Responsabile del Progetto: Miriam Benedetti, ENEA

Responsabile del Work package: Fabrizio Martini, ENEA

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

Responsabile scientifico ENEA: Fabrizio Martini

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

Si ringraziano le associazioni di categoria che hanno partecipato ai tavoli di lavoro ENEA, in particolare relativamente all'attività riportata in questa pubblicazione: ASSOVETRO e FEDERBETON

Indice

1	INTRODUZIONE	5
2	ANALISI DELLA BIBLIOGRAFIA CONCERNENTE LE METODOLOGIE DI VALUTAZIONE DELLA MATURITÀ ENERGETICA DELLE TECNOLOGIE DI UN IMPIANTO PRODUTTIVO	6
2.1	REFERENCE PROCESS METHOD	6
2.2	SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION METHOD.....	6
2.3	COMPONENT BENCHMARK METHOD	7
2.4	THERMAL EFFICIENCY	7
2.5	LABELING PROCEDURE.....	7
2.6	POTENTIAL EFFICIENCY (PE)	11
2.7	MODELLO DI ASSESSMENT PER LA RACCOLTA DI DATI E INFORMAZIONI E PER LA VALUTAZIONE DEL LIVELLO DI MATURITÀ.....	12
2.7.1	<i>Il metodo AHP – descrizione del metodo di applicazione e utilizzo.....</i>	14
2.7.2	<i>Individuazione delle tecnologie disponibili.....</i>	16
2.7.3	<i>Definizione dimensioni di valutazione.....</i>	22
2.7.4	<i>Valutazione delle prestazioni.....</i>	23
2.7.5	<i>Definizione dei parametri decisionali.....</i>	23
2.7.6	<i>Applicazione del metodo e valutazione dei risultati</i>	25
2.7.7	<i>Scelta dell'alternativa migliore</i>	26
2.7.8	<i>Sintesi del funzionamento del modello di assessment.....</i>	26
3	VETRENERIE	27
3.1	PROCESSO DI PRODUZIONE DEL VETRO: INTRODUZIONE	27
3.2	PREPARAZIONE ALLA FUSIONE	28
3.2.1	<i>Tecnologie installate nell'impianto per effettuare le operazioni di preparazione alla fusione.....</i>	29
3.2.2	<i>Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di preparazione alla fusione</i>	29
3.2.3	<i>Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di preparazione alla fusione</i>	32
3.3	FUSIONE E AFFINAGGIO	32
3.3.1	<i>Tecnologie installate nell'impianto per effettuare le operazioni di fusione e affinaggio.....</i>	38
3.3.2	<i>Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di fusione e affinaggio.....</i>	38
3.3.3	<i>Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di fusione e affinaggio.....</i>	47
3.4	CONDIZIONAMENTO E FORMATURA	48
3.4.1	<i>Formatura nel caso di contenitori di vetro (vetro cavo, casalingo o bianco di qualità).....</i>	49
3.4.2	<i>Formatura nel caso di vetro piano.....</i>	50
3.4.3	<i>Formatura nel caso di fibra di vetro.....</i>	51
3.4.4	<i>Tecnologie installate nell'impianto per effettuare le operazioni di condizionamento e formatura</i>	52
3.4.5	<i>Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di condizionamento e formatura</i> <i>53</i>	
3.4.6	<i>Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di condizionamento e formatura.....</i>	53
3.5	FINITURA.....	54
3.5.1	<i>Tecnologie installate nell'impianto per effettuare le operazioni di finitura.....</i>	55
3.5.2	<i>Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di finitura.....</i>	55
3.5.3	<i>Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di finitura</i>	63
3.6	MOTORI.....	64
3.6.1	<i>Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di finitura</i>	65
3.7	SISTEMI AUSILIARI A PRESSIONE	66

3.7.1	<i>Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di preparazione alla fusione</i>	68
3.8	MISURE ALTERNATIVE	68
3.8.1	<i>Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di preparazione alla fusione</i>	68
3.9	RISULTATI DERIVANTI DALLO STUDIO DELLE VETRERIE	69
4	CEMENTIFICI	69
4.1	PROCESSO DI PRODUZIONE DEL CEMENTO: INTRODUZIONE	69
4.2	PREPARAZIONE DELLE MATERIE PRIME	72
4.2.1	<i>Frantumazione</i>	72
4.2.2	<i>Tecnologie installate nell'impianto per effettuare le operazioni di frantumazione</i>	72
4.2.3	<i>Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di frantumazione</i>	72
4.2.4	<i>Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di frantumazione</i>	75
4.2.5	<i>Pre-omogeneizzazione</i>	75
4.2.6	<i>Tecnologie installate nell'impianto per effettuare le operazioni di pre-omogeneizzazione</i>	75
4.2.7	<i>Essiccazione</i>	75
4.2.8	<i>Tecnologie installate nell'impianto per effettuare le operazioni di essiccazione</i>	75
4.2.9	<i>Macinazione materie prime</i>	76
4.2.10	<i>Tecnologie installate nell'impianto per effettuare le operazioni di macinazione materie prime</i>	76
4.2.11	<i>Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di macinazione</i>	76
4.2.12	<i>Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di macinazione materie prime</i>	79
4.2.13	<i>Omogeneizzazione</i>	79
4.2.14	<i>Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di omogeneizzazione</i>	79
4.2.15	<i>Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di omogeneizzazione</i>	80
4.2.16	<i>Controllo qualità delle materie prime</i>	80
4.2.17	<i>Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di controllo</i>	80
4.2.18	<i>Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di produzione melma</i>	81
4.2.19	<i>Trasporto e movimentazione delle materie prime nella fase di preparazione delle materie prime</i>	81
4.3	COTTURA E RAFFREDDAMENTO	82
4.3.1	<i>Preriscaldamento</i>	82
4.3.2	<i>Tecnologie installate nell'impianto per effettuare le operazioni di preriscaldamento</i>	82
4.3.3	<i>Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di preriscaldamento</i>	82
4.3.4	<i>Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di preriscaldamento</i>	83
4.3.5	<i>Cottura</i>	83
4.3.6	<i>Tecnologie installate nell'impianto per effettuare le operazioni di macinazione</i>	84
4.3.7	<i>Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di cottura</i>	84
4.3.8	<i>Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di cottura</i>	86
4.3.9	<i>Raffreddamento</i>	86
4.3.10	<i>Tecnologie installate nell'impianto per effettuare le operazioni di raffreddamento</i>	87
4.3.11	<i>Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di raffreddamento</i>	87
4.4	MACINAZIONE FINALE	88
4.4.1	<i>Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di macinazione finale</i>	88
4.4.2	<i>Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di macinazione finale</i>	89
4.5	MACINAZIONE COMBUSTIBILE	89
4.5.1	<i>Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di macinazione combustibile</i>	89
4.5.2	<i>Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di macinazione combustibile</i>	89
4.6	TRATTAMENTO E DEPOLVERIZZAZIONE DEI GAS DI SCARICO	89
4.6.1	<i>Tecnologie installate nell'impianto per effettuare le operazioni di trattamento dei fumi</i>	90

4.6.2	<i>Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di trattamento dei fumi</i>	90
4.6.3	<i>Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di depolverizzazione</i>	90
4.6.4	<i>Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di depolverizzazione</i>	91
4.7	RECUPERO CALORE	91
4.7.1	<i>Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di depolverizzazione</i>	92
4.8	COMBUSTIBILI ALTERNATIVI.....	92
4.9	MOTORI.....	93
4.9.1	<i>Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti ai motori elettrici</i>	93
4.10	SISTEMI AUSILIARI A PRESSIONE	93
4.10.1	<i>Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti ai motori elettrici</i>	94
4.11	MISURE ALTERNATIVE	94
4.11.1	<i>Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti ai motori elettrici</i>	94
4.12	RISULTATI DERIVANTI DALLO STUDIO DEI CEMENTIFICI	94
5	CONCLUSIONI.....	96
6	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	98
7	CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO IMPEGNATO NELL'ATTIVITÀ.....	103
7.1	FILIPPO DE CARLO.....	103
7.2	MARIO TUCCI.....	103
7.3	ALESSANDRA CANTINI	104
7.4	LEONARDO LEONI.....	104

1 Introduzione

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

Tale attività è stata definita dopo che è stato delineato l'obiettivo che UNIFI dovrà raggiungere nel triennio dal 2019 al 2021: "sviluppo di un modello di assessment tecnologico per la valutazione del gap tra stato attuale della tecnologia e stato dell'arte delle Best Available Technologies per l'efficienza energetica di prodotti e processi industriali". Per raggiungere l'obiettivo appena descritto ed espletare i propri compiti nei modi e nei tempi prestabiliti, UNIFI ha declinato l'attività principale in varie sotto-attività da svolgere anno dopo anno. Dopo aver svolto le attività previste per il 2020, UNIFI ha redatto il presente documento per centrare uno degli output attesi per il 2020, ovvero la stesura di un report di fine attività annuale. Nel presente documento sono riassunti i risultati operativi conseguiti nell'anno 2020 e le modalità con cui tali risultati sono stati ottenuti. Di seguito, si riportano in ordine i seguenti contenuti:

- Breve review delle metodologie di valutazione della maturità energetica delle tecnologie di un generico impianto produttivo (Capitolo 2)
- Descrizione del modello di assessment delle tecnologie sviluppato (Capitolo 3)
- Descrizione delle tecnologie e dei risultati relativi al settore del vetro (Capitolo 4)
- Descrizione delle tecnologie e dei risultati relativi al settore del cemento (Capitolo 5)
- Conclusioni sui risultati dell'anno 2020 (Capitolo 6)

Assieme ai partner di progetto è stato stabilito per l'anno 2020 di concentrarsi solo su aziende produttrici di vetro e cemento, pertanto il proseguo del presente report farà riferimento solo a tali aziende.

2 Analisi della bibliografia concernente le metodologie di valutazione della maturità energetica delle tecnologie di un impianto produttivo

Una delle attività da svolgere nell'anno 2019 era la costruzione di un modello di assessment per la raccolta di dati e informazioni e per la valutazione del livello di maturità delle aziende di processo italiane ad alto consumo energetico. UNIFI nel 2019 ha avviato l'attività di costruzione di un modello per la raccolta di dati e informazioni e per la valutazione del livello di maturità delle tecnologie relative alle aziende ad alto consumo energetico. L'attività in questione ha richiesto, prima di tutto, di svolgere un'analisi della letteratura tecnico-scientifica riguardante i metodi di valutazione e auto-valutazione dello stato di avanzamento tecnologico delle aziende manifatturiere. In questo capitolo vengono descritti i principali metodi di valutazione energetica delle macchine industriali riscontrati nella letteratura. L'analisi operata ha permesso di identificare i principali indicatori di performance suggeriti per comprendere quanto efficientemente operi una specifica tecnologia e quale sia il gap rispetto alle altre.

2.1 Reference process method

Il "reference process method" [1] descrive la misurazione del consumo di energia di una macchina utensile per un profilo di utilizzo predefinito (ad esempio, per processi di riferimento oppure periodi di tempo definiti per ogni stato). È simile al "reference part method", ma differisce nel fatto che valuta il consumo totale di energia in un intero processo di riferimento e non per un singolo pezzo. Questo fatto implica che viene valutato il consumo totale in uno specifico processo produttivo e, successivamente, tale consumo viene confrontato con quello di altri macchinari per stabilire quale sia più efficiente. Il vantaggio principale di questo metodo rispetto al precedente è la considerazione di tutti i principali stati operativi del macchinario (spento, standby, pronto ed elaborazione) in base alle loro quote di tempo durante un periodo lavorativo rappresentativo. Ciò porta a uno scenario di utilizzo più realistico, che si traduce in un'analisi più completa. Tuttavia, i test richiedono più tempo e permane lo svantaggio di una comparabilità delle macchine utensili limitata, dato che ogni tecnologia industriale è costruita e ottimizzata per una determinata applicazione che non sempre può essere valutata e comparata attraverso uno specifico processo rappresentativo. Inoltre, il consumo di energia della macchina utensile dipende anche fortemente sia dalla scala di produzione (produzione su piccola, media o grande scala) sia dalle dimensioni delle parti per le quali è previsto il lavoro della macchina.

2.2 Specific energy consumption method

Lo "specific energy consumption method" (SEC) [2], [3] è un approccio che descrive la relazione empirica tra il consumo di energia immessa nella macchina utensile e una specifica variabile in uscita misurata in unità fisiche (ad esempio, la velocità di rimozione del materiale o la velocità di taglio per una macchina laser). Scegliendo come variabile di uscita la velocità di asportazione del materiale, lo Specific Energy Consumption (SEC) del macchinario si esprime secondo la seguente formula:

$$SEC = \frac{E}{V_{material}}$$

Durante un processo di taglio meccanico, il SEC può essere riscritto in funzione della potenza in ingresso nella macchina (P) e del tasso di rimozione del materiale (MRR - Material Removal Rate):

$$SEC = \frac{P * T}{MRR * T} = \frac{P}{MRR}$$

Mediante il SEC, non solo si possono confrontare le differenze di efficienza energetica tra macchine utensili durante lo stesso processo di lavorazione, ma si possono anche paragonare l'intensità energetica e le differenze di produttività tra processi di lavorazione differenti. Per questo motivo, tale metodo è spesso utilizzato nei casi applicativi [3]. I principali svantaggi del SEC sono un metodo dispendioso in termini di tempo e che nel calcolo sono trascurati tutti gli stati operativi dei macchinari differenti dallo stato di lavorazione.

2.3 Component benchmark method

Il “component benchmark method” [1] è un metodo di test e valutazione di tipo “bottom up”: la macchina utensile è suddivisa in componenti, che vengono valutati in base alla loro efficienza energetica e confrontati con quelli di altri macchinari. Il component benchmark method si basa sul concetto che componenti ad alta efficienza energetica, combinati in modo orientato ai bisogni, portano a una progettazione di macchine utensili ad alta efficienza energetica. Gontarz et al. [4] hanno sviluppato un dispositivo di misurazione che consente di creare profili di potenza a livello dei componenti, al fine di consentirne un'indagine approfondita. Eisele et al. [5] hanno dettagliato il modello di Kordonowy [6] - che suddivide il consumo di energia delle macchine utensili in una parte variabile ed una fissa - introducendo un comportamento ciclico del consumo energetico dipendente dal tempo e un comportamento non proporzionale al carico dei componenti, così da descrivere la condotta e l'efficienza dei vari elementi.

Tale metodo non richiede né un pezzo di riferimento, né una specifica dell'utensile. La considerazione dell'interconnessione dei componenti consente la valutazione della progettazione della macchina utensile (dato che il livello di efficienza della macchina deve essere in linea con quello delle sue parti) e indirettamente degli stati operativi. Il metodo, dunque, risulta adatto per l'applicazione in fase di progettazione o per il confronto tra diverse macchine in base alle loro componenti. Tuttavia, è un metodo che richiede tempo per poter essere applicato poiché è necessario misurare e confrontare tutti gli elementi. Inoltre, non è stata ancora eseguita una mappatura energetica dell'intero assemblaggio di una macchina utensile e la valutazione del collegamento dei vari elementi non è sufficientemente coperta dalla ricerca odierna. Tutto sommato, vi è una grande sfida che deve essere superata per l'eventuale standardizzazione del suddetto metodo: il “grado di necessità” deve essere determinato, poiché l'utilizzo di componenti efficienti non significa necessariamente che il sistema di controllo (la macchina utensile) sia efficiente dal punto di vista energetico.

2.4 Thermal efficiency

L'indice “thermal efficiency” [3], [7] è un indicatore termodinamico che definisce il rapporto fra l'energia in ingresso e quella in uscita in uno specifico macchinario. Esso esprime la percentuale di energia immessa che viene convertita in energia utile dal processo e si rappresenta con la seguente formula:

$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{in}}$$

La differenza tra l'energia in input e quella in output corrisponde alle perdite totali del sistema. Perciò, la thermal efficiency può essere anche riscritta secondo la seguente forma:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P} = \frac{1}{1 + \left(\frac{P_{loss}}{P_{out}}\right)}$$

dove P , P_{out} e P_{loss} rappresentano rispettivamente la potenza immessa nella macchina, la potenza in uscita e le varie perdite di potenza avute durante la lavorazione del pezzo. “Thermal efficiency” è un indicatore relativamente semplice da calcolare e perciò molto utilizzato. Tuttavia, presenta alcune problematiche: non è adatto per i processi in cui l'output ha un contenuto energetico trascurabile, ad esempio il trasporto o l'assemblaggio, poiché E_{out} tende a zero; inoltre, non è applicabile neppure quando si hanno scarse indicazioni sul fabbisogno energetico di un processo, ovvero quando l'energia utile non è determinabile attraverso leggi fisiche che regolano la trasformazione [7].

2.5 Labeling procedure

La “labeling procedure” [8] è una metodologia di autovalutazione energetica di macchine utensili che si basa su due variabili:

1. un indicatore di efficienza energetica indipendente dal processo (ϵ) (in questo caso rappresentato dalla variabile P_{RFO} (potenza nella fase “pronto per il funzionamento”)); una funzione normalizzata dei parametri delle macchine utensili (Φ), ottenuta sperimentalmente, la quale permette di ricavare ϵ di riferimento (*reference line*) in funzione di un determinato numero di parametri ad esso correlati.

La dipendenza di ε da Φ è rappresentata dalla linea tratteggiata detta "reference line": se esiste una macchina con ε al di sotto di tale linea, questa macchina viene valutata come efficiente dal punto di vista energetico. Al contrario, una macchina con un valore ε al di sopra della linea di riferimento è classificata come inefficiente dal punto di vista energetico (Figura 1).

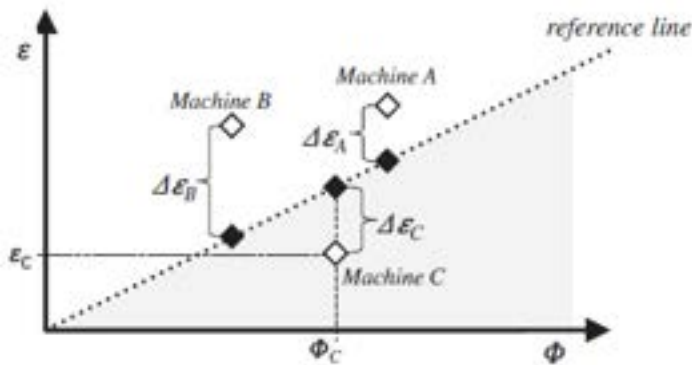


Figura 1. Principio dell'etichettatura energetica delle macchine utensili basata su un indicatore di efficienza energetica "ε" e su una funzione normalizzata dei parametri delle macchine utensili "Φ".

Questo approccio è sviluppato basandosi su un set di dati riguardanti 30 centri di fresatura e, essendo Φ una funzione ottenuta sperimentalmente, è applicabile ad un range limitato di macchinari, tra cui, ad esempio, i centri di tornitura. Tale metodo si basa sull'applicazione delle formule presentate di seguito ([1] e [2]) e, in base ai valori ottenuti a seguito dei calcoli, è possibile definire in che zona di efficienza si trovi la macchina utensile, senza doverla necessariamente confrontare con quella di altre tecnologie.

$$\Delta P_{RFO} = P_{rfo}^{measur} - P_{rfo}^{ref} \quad [1]$$

$$P_{rfo}^{ref} = -1.43 + 0.157 * P_{sp} + 0.108 * P_{ip} - 0.0036 * P_{sp} * P_{ip} \quad [2]$$

I valori P_{rfo}^{measur} , P_{rfo}^{ref} , P_{sp} e P_{ip} indicano rispettivamente il consumo di energia misurato nello stato "pronto all'uso", il consumo di energia di riferimento nello stato "pronto all'uso", la potenza elettrica installata e la potenza del mandrino. Di seguito sono riportati i vari *step* che hanno permesso di arrivare ad ottenere tali espressioni. Il "primo step" da eseguire ha riguardato la definizione dei parametri indipendenti dal processo; a partire da un campione di 30 centri di fresatura, sono stati analizzati statisticamente i macchinari e sono stati misurati 47 parametri (Tabella 1).

Tabella 1. Parametri nella raccolta dati.

No.	Description	
1	number of servo axes	
2	installed electrical power [kVA]	
3	age (basic year 2015)	
4	maximum work piece mass [kg]	
5	machine mass [kg]	
6-10	table size	x, y, z, geometric mean, table area, table area ratio
11-19	linear axis travel [mm]	x, y, z, arithmetic mean, geometric mean, rms, work area, work area ratio, work volume
20-25	rapid feed (m·min ⁻¹)	x, y, z, arithmetic mean, geometric mean, rms
26-31	feed rate (m·min ⁻¹)	x, y, z, arithmetic mean, geometric mean, rms
32-37	maximum acceleration in linear axes [m·s ⁻²]	x, y, z, arithmetic mean, geometric mean, rms
38	Chip-to-chip-Time [s]	
39	tool storage capacity	
40	maximum tool mass [kg]	
41-42	maximum spindle power [kW]	40% ED (= duty cycle S6), 100% ED (= duty cycle S1)
43-44	maximum spindle torque [Nm]	40% ED, 100% ED
45	nominal spindle speed [min ⁻¹]	
46	maximum spindle speed [min ⁻¹]	
47	maximum coolant pressure	

Nel “secondo step” è stato selezionato un indice per quantificare il consumo di energia delle macchine; poiché il tempo di non lavorazione, comparato a quello di lavorazione, è significativamente dominante e che l’impatto dei processi di taglio sui consumi energetici è molto limitato, è stato utilizzato il consumo di potenza nella fase “pronto per il funzionamento” (P_{RFO}) per rappresentare tale indice. Durante il “terzo step” il set di dati è stato valutato statisticamente: sono state valutate le relazioni tra tutte le coppie di parametri per vedere come si comportava una determinata variabile al crescere dell’altra (Figura 2). In caso di esistenza di interdipendenze significative tra due parametri, ciò significava che esistevano delle correlazioni tra loro e che, perciò, questi due parametri non producevano un numero maggiore di informazioni rispetto ad uno solo.



Figura 2. Matrice del diagramma a dispersione di un campione di parametri per identificare le interdipendenze.

Inoltre, per alcuni parametri non è stata riconosciuta una tendenza evidente nel diagramma a dispersione: poiché gli istogrammi sotto i grafici a dispersione indicano la distribuzione dei valori di un parametro nell’intervallo esaminato, nel caso ideale avremmo dovuto avere un variabile il cui valore cresceva al crescere di quello della P_{RFO} e, di conseguenza, avremmo dovuto avere una distribuzione costante; perciò, laddove in un istogramma è stata individuata una barra fortemente dominante, ciò significava che tale variabile e la P_{RFO} non erano strettamente collegate e perciò il parametro corrispondente è stato ignorato (Figura 3).

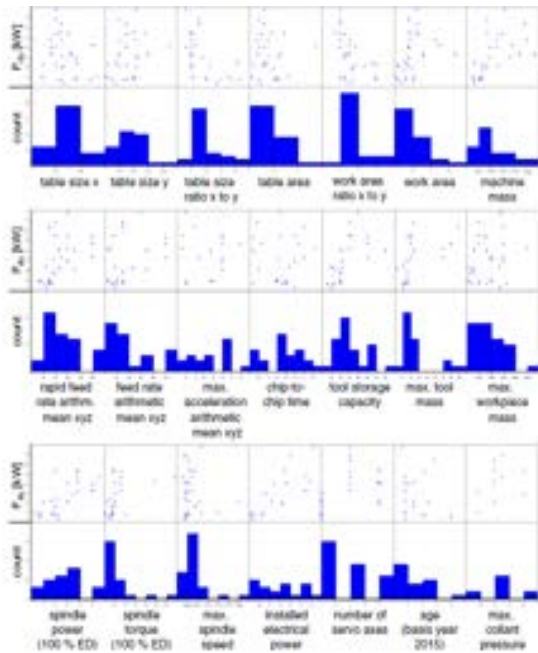


Figura 3. Grafici a dispersione ed istogrammi dei 21 parametri rimanenti e dell'indicatore di efficienza energetica PRFO.

A valle del “terzo step”, solamente due parametri sono stati riconosciuti come appropriati per le analisi di regressione:

1. la potenza del mandrino;
2. la potenza elettrica installata.

Nel “quarto step” è stato possibile calcolare la ΔP_{RFO} , rappresentante la variazione tra consumo di potenza misurato nella fase “pronto per il funzionamento” e quello di riferimento; basandosi sulle informazioni ricavate, è stato possibile riscrivere P_{rfo}^{ref} in funzione dei due parametri rimanenti, ottenendo, tramite l’analisi di regressione mostrata in figura (Figura 4), la formula [2].

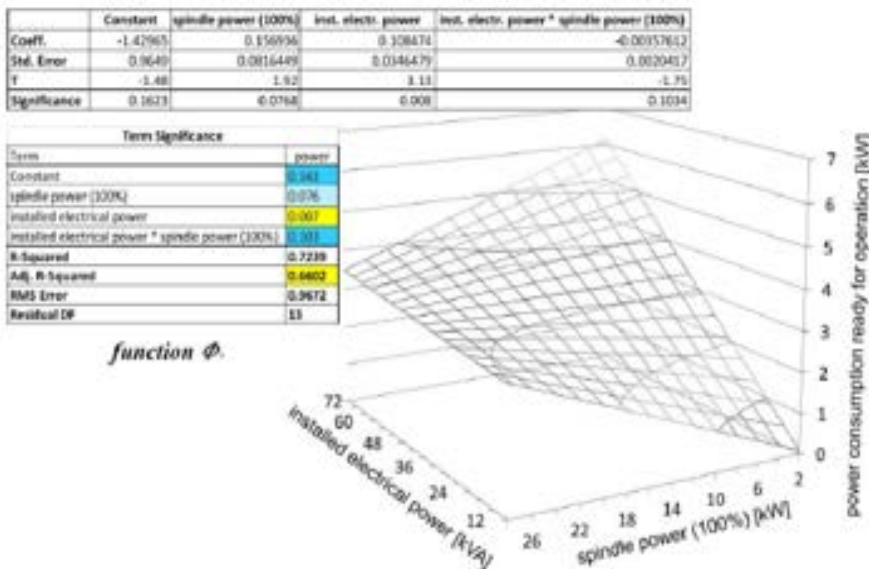


Figura 4. Analisi di regressione per ricavare P_{rfo}^{ref} .

A questo punto, è possibile tracciare un grafico frazionato in 4 fasce in base al livello di efficienza calcolato: la suddivisione viene effettuata basandosi sulla P_{RFO} di riferimento ed è tale che la zona A sia la più efficiente, mentre la D sia la più inefficiente (Figura 5); se, ad esempio, il ΔP_{RFO} ottenuto (indicato nel grafico come $\Delta \epsilon$)

è positivo e maggiore di $0.5 \cdot P_{rf0}^{ref}$, allora ci troviamo in una regione altamente inefficiente, indicata nel grafico con il colore rosso.

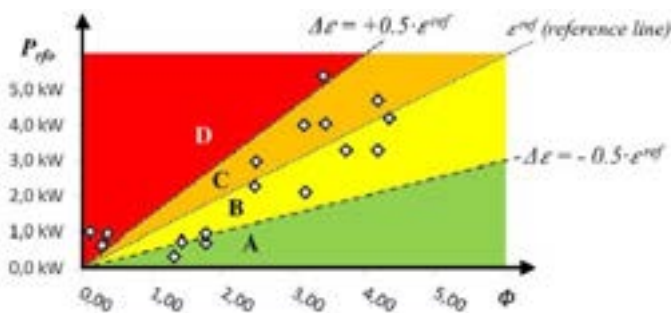


Figura 5. Grafico per la valutazione energetica con 4 categorie (A, B, C, D).

Questo tipo di valutazione fornisce un'etichettatura energetica indipendente dal processo, ovvero non si basa su determinati processi di riferimento, e ciò la rende estremamente più semplice da determinare. Infatti, il calcolo diretto della ΔP_{RFO} permette di valutare istantaneamente a che livello di efficienza operi la macchina, senza dover necessariamente confrontare l'indice ottenuto con quello di altri macchinari. Tale metodo però, essendo conseguito tramite un processo empirico, è relativo ai centri di fresatura e può essere applicato solamente ad un ristretto numero di altri macchinari, come, ad esempio, i centri di tornitura; tutto ciò ne limita notevolmente le possibilità di utilizzo.

2.6 Potential Efficiency (PE)

Il metodo "potential efficiency" [9] si attua nella fase di approvvigionamento delle macchine utensili, nella quale non possono essere eseguiti test per stabilire le varie funzioni statistiche che legano i diversi parametri di lavorazione all'efficienza energetica, né si hanno informazioni sufficienti sui componenti delle macchine utensili considerate. Nella fase di acquisto di un macchinario è necessario considerare l'influenza dei componenti e dei casi di applicazione sull'efficienza energetica della macchina utensile stessa. Infatti, i fattori relativi al macchinario considerato sono definiti dalla struttura e dai componenti che lo costituiscono, mentre i fattori relativi al processo di lavorazione sono determinati dai parametri del pezzo da produrre (pezzi diversi hanno parametri di lavorazione diversi). Nella fase di approvvigionamento, allora, si possono ottenere i seguenti tipi di informazioni per la valutazione dell'efficienza energetica del macchinario in analisi:

- 1) **Dati di base** sul consumo di energia della macchina utensile, ottenuti da fornitori e costruttori, che normalmente misurano le prestazioni della nuova macchina (nuova generazione/versione) dopo averla costruita; esempi di dati di base sono la potenza di standby e la potenza di scarico.
- 2) **Informazioni di base** sulle attività di lavorazione dal reparto produzione nel quale si intende installare la macchina acquistata; ad esempio, si possono reperire informazioni circa la geometria, le dimensioni e le caratteristiche del pezzo che dovrebbe essere lavorato dalla macchina utensile.

Pertanto, la metodologia PE per la valutazione dell'efficienza energetica nella fase di acquisizione di un nuovo macchinario può essere sviluppata come mostrato in figura (Figura 6).

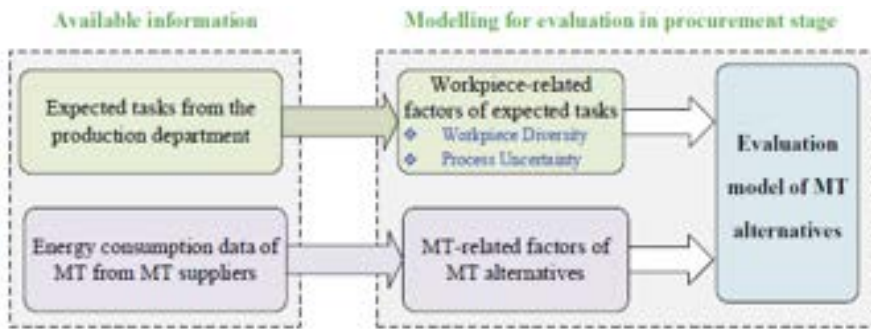


Figura 6. Metodologia per la valutazione dell'efficienza energetica delle macchine utensili in fase di approvvigionamento.

Basandosi sui dati di consumo energetico di base delle varie tipologie di macchina utensile è possibile modellare i fattori riguardanti ciascuna di esse, come la potenza di standby e quella di scarico, il consumo di energia in fase di avvio o i coefficienti di perdite di carico. Allo stesso modo, con l'aiuto dei reparti produttivi, i fattori relativi ai compiti previsti da svolgere sul pezzo possono essere modellati prendendo in considerazione la diversità dei vari pezzi, le differenti tipologie con cui il pezzo può essere lavorato e l'incertezza del processo. Tale approccio, dunque, si riassume in tre passaggi:

1. *Modellazione dei fattori relativi a ciascuna tipologia di macchina utensile presa in considerazione per l'acquisto*
2. *Modellazione dei fattori relativi ai pezzi da lavorare secondo le attività previste dal processo produttivo*
3. *Calcolo dell'efficienza energetica attraverso la seguente formula:*

$$\eta = \frac{\sum_1^L \sum_1^I E_{cl}^i e_l^i}{\sum_1^L \sum_1^I E_l^i e_l^i}$$

Dove "l" (compreso tra 1 e L) rappresenta l_{th} pezzo atteso da lavorare, mentre "i" (compreso tra 1 e I) raffigura la i_{th} configurazione attuabile sulla macchina utensile; inoltre, E_{cl}^i e E_l^i descrivono rispettivamente il consumo efficiente di taglio e il consumo specifico per l_{th} pezzo atteso usando la i_{th} configurazione della macchina; infine, e_l^i rappresenta il coefficiente atteso e riflette le diversità dei vari pezzi e l'incertezza del processo. Tali variabili, insieme ai loro parametri ed alle loro formulazioni, vengono descritte nel dettaglio da Liu et al. [9] nel terzo capitolo. Tale metodo è in grado di fornire un livello di accuratezza più elevato rispetto ad altri metodi utilizzati nella fase di approvvigionamento, quali il "component benchmark method" o valutazioni basate sull'esperienza, dato che quest'ultimi non tengono conto delle attività di lavorazione previste. Inoltre, non è richiesto alcun test e perciò questo, unito ad un livello di praticabilità e accuratezza per la valutazione dell'efficienza energetica in fase di approvvigionamento più elevato, porta ad una sostanziale riduzione del consumo di energia e dei costi. Tuttavia, il metodo PE implica l'esecuzione di un processo complesso e oneroso in termini di tempo e richiede una stretta comunicazione con i fornitori ed una forte cooperazione tra il reparto acquisti e il reparto di produzione dell'azienda; pertanto può essere eseguito facilmente per la produzione di massa e altri tipi di produzione che sono prevedibili in termini di tipologia e dimensioni (sia del pezzo che del processo), mentre è più difficile da applicare nel caso di officine che lavorino quotidianamente parti diverse. In questo secondo caso, l'accuratezza del metodo PE può essere compromessa.

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

Le metodologie di misurazione dei consumi energetici reperite in letteratura non si adattano facilmente a qualsiasi tipo di macchinario produttivo e a qualsiasi tipo di impianto (vetrerie, cementifici, acciaierie, ecc). Inoltre, prevedono che tutte le aziende i cui macchinari sono analizzati dispongano di dati quantitativi sufficienti a valutare ogni tecnologia sotto molteplici aspetti (economici, operativi, di sicurezza e di sostenibilità ambientale). Un altro aspetto che emerge consultando approfonditamente la letteratura scientifica illustrata in bibliografia, è non solo che tali dati quantitativi non sono disponibili, ma che, addirittura, all'interno di uno specifico processo produttivo e di una specifica fase, tecnologie alternative per

completare il medesimo compito vengono valutate dagli autori scientifici secondo parametri diversi e paragonate a benchmark diversi. Pertanto, basandosi sulla sola letteratura non è possibile valutare e paragonare tra loro le diverse soluzioni tecnologiche di riduzione dei consumi energetici. Per questo motivo, si ritiene che l'adozione degli indici di misura illustrati nel paragrafo precedente non si confaccia con gli obiettivi di progetto e che sia preferibile sviluppare un **modello di analisi multi-criterio** che possa tenere conto **sia di dati quantitativi (laddove presenti), sia di dati qualitativi** e che possa **avvalersi sia dello studio della letteratura, sia della consultazione di esperti di settore**.

La necessità di fare scelte ottimali tra una moltitudine di alternative ha portato negli anni allo sviluppo di un gran numero di modelli di valutazione che supportassero i decisori nelle loro scelte, fornendogli strumenti adeguati ad analizzare il problema e giungere alla soluzione migliore. Questi strumenti vengono chiamati modelli decisionali multicriterio, proprio per il fatto che forniscono un supporto nell'individuazione della decisione migliore da prendere, tenendo in considerazione molteplici criteri di valutazione. Il processo decisionale multicriterio può essere schematizzato come riportato in figura 7 [10].

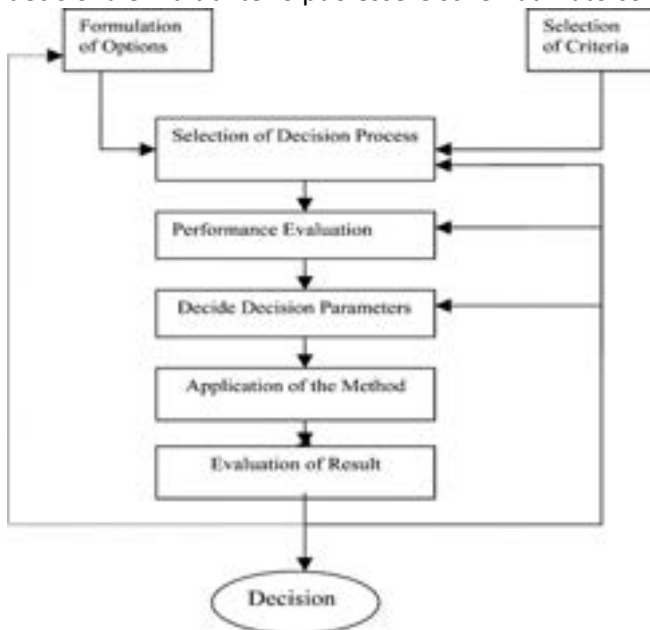


Figura 7. Linee guida per progettare e costruire un modello decisionale multi-criterio [10].

Il processo di costruzione del modello multi-criterio si compone di varie fasi, indicate in Figura 7. Una volta definito il problema che si vuole analizzare, la prima cosa da fare è individuare le opzioni disponibili ("formulation of options") che, in questo caso, sono le alternative tecnologiche applicabili. Oltre a questo, altre due importanti operazioni devono essere svolte: la scelta dei criteri di valutazione ("selection of criteria") e la scelta del processo decisionale ("selection of decision process").

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

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

A questo punto siamo in possesso dei dati e dei parametri necessari per svolgere l'analisi. Quindi, è possibile applicare il metodo decisionale multicriterio ("application of the method"), fare le opportune verifiche per accertarsi della validità dei risultati ("evaluation of result") e, infine, prendere la decisione che risulta essere la migliore per il problema ("decision"). Complessivamente, la procedura appena descritta è comune a tutti i metodi decisionali multicriterio, la vera differenza nei risultati è dovuta al metodo stesso e alle sue caratteristiche. Esistono innumerevoli metodi decisionali multicriterio, ognuno con le sue proprietà e i suoi vantaggi e svantaggi. Una review dei principali metodi di letteratura è offerta da [10]. Ogni metodo elabora i dati che gli vengono forniti in ingresso in modo peculiare, seguendo un proprio algoritmo e basandosi su determinate formule e concetti matematici. Tra i principali metodi di valutazione multi-criterio ci sono:

- weighted sum method (WSM)
- weighted product method (WPM)
- analytical hierarchy process (AHP)
- preference ranking organization method for enrichment evaluation (PROMETHEE)
- the elimination and choice translating reality (ELECTRE)
- the technique for order preference by similarity to ideal solutions (TOPSIS)
- compromise programming (CP)
- multi-attribute utility theory (MAUT)

Tra questi metodi il più popolare è il metodo AHP, seguito dai metodi PROMETHEE ed ELECTRE [10]. Il metodo AHP risulta spesso preferibile rispetto agli altri strumenti di valutazione visti i suoi vantaggi in termini di flessibilità di applicazione e possibilità di adattamento a molteplici situazioni con eterogenee informazioni in ingresso. Visti i suoi punti di forza, tale modello ha trovato ampia diffusione in svariati ambiti quali la pianificazione, la scelta dell'alternativa migliore, l'allocazione delle risorse e la risoluzione di conflitti [11]. La letteratura offre anche applicazioni del modello in campi specifici quali il marketing [12], la medicina e cura della persona [13], la ricerca e sviluppo, l'allocazione di risorse e la selezione di progetti [14] e, infine, anche il settore dell'energia [10]. Data la flessibilità del modello AHP, per lo sviluppo del presente progetto, si è deciso di utilizzarlo per effettuare la valutazione multi-criterio delle soluzioni tecnologie di risparmio energetico. Nei sottoparagrafi a seguire si fornisce una descrizione dettagliata del funzionamento e delle modalità di implementazione del metodo di valutazione proposto.

2.7.1 Il metodo AHP – descrizione del metodo di applicazione e utilizzo

L'Analytic Hierarchy Process (AHP) è uno dei più popolari metodi decisionali multicriterio. Il suo principale sviluppatore è il Prof. Thomas L. Saaty. Tale modello si pone come strumento di supporto nell'analisi e valutazione di situazioni che presentano numerose alternative applicabili e che necessitano di essere valutate secondo molteplici criteri [11]. L'AHP permette l'utilizzo in input di dati esclusivamente quantitativi, quali-quantitativi o esclusivamente qualitativi, producendo comunque valutazioni e risultati affidabili [15]. L'AHP si basa sui seguenti principi [8]:

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

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

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

Il terzo principio riguarda l'indipendenza dei giudizi e degli elementi tra i vari livelli gerarchici e presuppone che essa sia presente a tutti i livelli. Mentre i primi due principi sono del tutto coerenti con le applicazioni nel

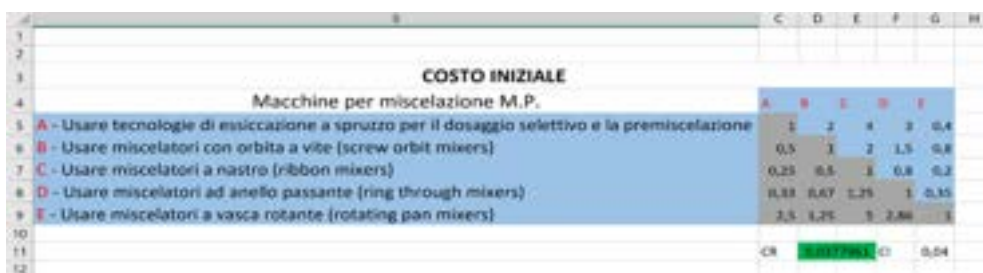
mondo reale, per il terzo principio è necessaria maggiore attenzione perché non è raro che venga violato. [25]

Il confronto a coppie è la principale metodologia con cui vengono acquisiti i giudizi sia riguardo le prestazioni delle varie alternative sia riguardo i pesi relativi tra le dimensioni di valutazione stesse. Nel modello progettato da UNIFI, i **pesi relativi tra le dimensioni di valutazione** vengono assegnati da una persona o da un panel di persone sufficientemente informate da poterli esprimere in maniera corretta. Ad esempio, è possibile consultare membri della dirigenza dell'azienda stessa che vogliono svolgere la valutazione e assegnare i punteggi d'importanza ai vari criteri di valutazione, in modo tale da rispecchiare quelle che sono le priorità dell'azienda. Mediante un apposito questionario che viene descritto di seguito e presentato in ALLEGATO 6, potranno essere analizzate aziende che danno maggior importanza al criterio del risparmio energetico, prediligendo le soluzioni che ottimizzano al massimo i consumi anche necessitando di investimenti economici notevoli; oppure, al contrario, potranno essere analizzate aziende che daranno maggior importanza al criterio economico, prediligendo soluzioni poco costose, seppur meno performanti in base ad aspetti energetici. Maggiori dettagli su queste affermazioni verranno forniti nel paragrafo 1.1.5.

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

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

Un esempio di tali valutazioni è fornito in Figura 8. Altre matrici dei giudizi sono visibili nei fogli excel dell'ALLEGATO 5. L'allegato in questione contiene dei file editabili che possono essere usati dalle aziende per ottenere la valutazione delle tecnologie. L'ALLEGATO 5 si riferisce al settore del vetro, riportando un file excel per ogni macro-fase di processo. Tuttavia, il file può essere facilmente esteso alle fasi e alle tecnologie di qualunque altro settore manifatturiero.



COSTO INIZIALE						
Macchine per miscelazione M.P.		A	B	C	D	E
A	- Usare tecnologie di essiccazione a spruzzo per il dosaggio selettivo e la premiscelazione	1	2	4	3	0,4
B	- Usare miscelatori con orbita a vite (screw orbit mixers)	0,5	1	2	1,5	0,8
C	- Usare miscelatori a nastro (ribbon mixers)	0,25	0,5	1	0,8	0,2
D	- Usare miscelatori ad anello passante (ring through mixers)	0,33	0,67	1,25	1	0,35
E	- Usare miscelatori a vasca rotante (rotating pan mixers)	2,5	1,25	1	2,00	1
CR						0,04

Figura 8. Esempio di matrice dei giudizi.

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

Dato che, però, i giudizi dei confronti sono espressi da una persona, esiste il rischio che essi presentino dei tratti di soggettività che portino le varie valutazioni ad essere non del tutto coerenti tra loro. Immaginiamo,

ad esempio, che nell’ultimo confronto C venga giudicato preferibile rispetto ad A, questo fa sì che non ci sia coerenza tra le valutazioni relative tra le varie opzioni, rendendo così la matrice inconsistente. Man mano che le alternative da valutare aumentano, dunque aumentando le dimensioni della matrice, il rischio di inconsistenza diventa sempre più concreto. Per verificare che questo problema non accada e che le varie matrici siano consistenti, il metodo AHP prevede di calcolare per ogni matrice un “Indice di Consistenza - CI”:

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

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

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

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

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

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

Nel caso meno restrittivo, per poter considerare la matrice A consistente, viene posto come vincolo $CR < 0.1$ (10%) [16]. Volendo determinare in modo più preciso e in funzione della dimensione di A la soglia entro la quale considerare consistente la matrice, possiamo utilizzare i valori presenti in Tabella 3.

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

Soglia	n
0.05	3
0.08	4
0.10	≥5

Una volta ottenute le matrici dei giudizi (sia dei criteri di valutazione sia delle prestazioni delle varie alternative tecnologiche) e verificata la consistenza di quest’ultime, è possibile calcolare i punteggi di tutte le alternative e individuare tra di esse la migliore per gli scopi prefissati [15]. Per fare ciò, per ogni alternativa tecnologica, è necessario calcolare una somma pesata dei punteggi ottenuti valutando l’alternativa sulla base delle varie dimensione di analisi e dei relativi pesi che rappresentano l’importanza di quella specifica dimensione rispetto alle altre. Ad esempio, per calcolare il punteggio finale dell’alternativa A dovremo utilizzare la seguente formula:

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

Tra tutte le alternative, quella con il punteggio più alto sarà la soluzione preferibile [15].

Dopo aver descritto come si costruisce un modello decisionale AHP e averne illustrato il funzionamento, di seguito, seguendo la procedura delineata in Figura 7, si mostra come è stato costruito il modello di classificazione delle tecnologie. Con questa descrizione rispondiamo anche all’ultimo obiettivo del 2019 (“Sviluppare un modello di assessment da sottoporre alle aziende italiane”), che era rimasto in sospeso nel precedente anno di progetto. Un prototipo di modello è stato sviluppato relativamente al settore del vetro (può però essere facilmente esteso al settore del cemento), ed è riportato nell’ALLEGATO 5 e nell’ALLEGATO 6. L’ALLEGATO 5 contiene 4 file Excel (uno per ogni fase di processo produttivo del vetro) e per ogni file sono riportati i confronti a coppie delle soluzioni tecnologiche rispetto a diversi criteri così come descritto in dettaglio nei paragrafi a seguire. L’ALLEGATO 6, invece, riporta la struttura del questionario che è stato costruito su Google Moduli e che serve per ottenere la classificazione finale delle tecnologie in base alle specifiche esigenze dell’azienda in analisi. I paragrafi a seguire descrivono come è stato ottenuto il prototipo di modello e come funziona. Pertanto, ne costituiscono anche il manuale d’uso.

2.7.2 Individuazione delle tecnologie disponibili

Per poter sviluppare un modello in grado di valutare e classificare le tecnologie disponibili nella produzione del vetro o del cemento siamo, innanzitutto, partiti dall'individuazione delle varie alternative tecnologiche descritte nella letteratura tecnico-scientifica internazionale (reperita mediante analisi bibliografica) o proposte da aziende del territorio italiano attraverso le diagnosi energetiche. A tale scopo UNIFI, oltre a consultare database scientifici quali Scopus e Google Scholar, ha anche letto e analizzato approfonditamente 103 diagnosi energetiche relative al settore del vetro e 48 relative al settore del cemento.

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

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

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

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

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

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

Nella prima colonna del file partendo da sinistra (Figura 9), il processo di produzione del vetro è stato suddiviso nelle sue 4 **principali fasi** (preparazione alla fusione, fusione e raffinazione, condizionamento e

formatura, finitura). Oltre alle fasi di processo, è stata inserita in questa colonna un’ulteriore categoria, quella delle soluzioni tecnologiche inerenti ai servizi ausiliari. A questa voce sono state associate tutte quelle opportunità tecnologiche atte a diminuire i consumi energetici di motori elettrici, trasformatori, turbomacchine e altri servizi ausiliari comuni a diverse fasi dell’impianto.

In generale, il filtro nella prima cella consente di selezionare il contenuto del file focalizzandosi solo sulla fase produttiva che si vuole analizzare, ad esempio quella caratterizzata da maggiori consumi energetici e criticità legate alla sostenibilità d’impianto. Informazioni più dettagliate sui consumi energetici delle varie fasi sono state analizzate all’interno di questo progetto dalle Università degli studi di Salerno e della Toscana. Le informazioni da loro reperite possono essere utilizzate come input per il lavoro dell’Università di Firenze.

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

Figura 9. File di riepilogo delle soluzioni tecnologiche e delle informazioni reperite in letteratura e nelle diagnosi.

Continuando verso destra, troviamo la colonna dove sono riportate le varie **sottofasi** in cui si sono divise le fasi principali. Ad esempio, considerando la fase “preparazione alla fusione”, le sottofasi dell’elenco sono: pesatura, macinazione e miscelazione. Anche questa colonna offre l’opportunità di filtrare le sottofasi in modo da poter focalizzare l’attenzione e gli sforzi di miglioramento solo sull’operazione d’interesse. Successivamente troviamo la colonna dove sono riportate le vere e proprie **alternative tecnologiche** che possono essere implementate nel processo produttivo, anch’esse raggruppate in base alla sottofase di cui fanno parte (Figura 9).

Le successive 7 colonne, Figura 10, riguardano le **dimensioni di valutazione** prese in considerazione per giudicare le prestazioni delle varie tecnologie. In esse sono riportati i **dati sulle performance** acquisiti tramite la letteratura. Come si evince da Figura 10, la letteratura non ha fornito dati sufficientemente esaustivi su tutte le alternative tecnologiche riscontrate. Per questo motivo, come già ampiamente discusso, si è optato per la costruzione di un modello di analisi AHP.

	E	F	G	H	I	J	K
	costo iniziale	costi operativi	consumi energetici	qualità del vetro	emissioni inquinanti	payback period	velocità di produzione
1							aumenta
2							
3							
4							
5							
6			riduzione 10-20%			2-3 anni	
7							
8							
9			riduzione 20-30%				aumento 50%
10			riduzione 10 Kwh/t				
11			riduzione 30Kwh/t				
12			riduzione 20Kwh/t				
13			riduzione 20Kwh/t				
14			riduzione 10-15%			5 mesi	
15							
16							
17							
18							
19			riduzione 20-25%			5-6 mesi	
20							
21							
22			22%, riduzione perdita energetiche 8% ogni bar			3-4 mesi	
23			10-15%			3 mesi	

Figura 10. Esempio di dati quantitativi reperiti in letteratura relativamente a ogni soluzione tecnologica. Per migliorare la leggibilità dell’ALLEGATO 1, tali colonne sono state nascoste, ma sono consultabili espandendo il foglio Excel.

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

Figura 11. Elenco delle soluzioni reperite in letteratura o nelle diagnosi energetiche sotto le rispettive voci degli interventi già effettuato dalle aziende o suggeriti come intervento di sviluppo futuro.

In Figura 11 sono mostrate le tre colonne nelle quali sono state inserite informazioni riguardo la **provenienza** delle soluzioni tecnologiche identificate. La prima delle tre colonne indica se la soluzione è stata individuata consultando la letteratura (1) oppure no (0). La seconda colonna indica se la soluzione è stata realizzata negli ultimi 4 anni da una o più delle aziende delle diagnosi. La terza colonna infine indica se la soluzione è stata proposta dalle aziende campione come possibile intervento migliorativo da effettuare nei prossimi 4 anni. Per completare la prima colonna sono stati consultati i database Scopus e Google Scholar, mentre per completare le altre due colonne UNIFI si è servita delle diagnosi energetiche.

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

Figura 12. Vantaggi o limiti di applicabilità delle soluzioni e fonti bibliografiche consultate.

In ultima istanza, nel file Excel sono stati riepilogati i **vantaggi o i limiti di applicabilità** delle diverse soluzioni e le **fonti bibliografiche** consultate per reperire le informazioni (Figura 12). A proposito delle caratteristiche di applicabilità delle soluzioni, una distinzione visiva fatta tramite diverse colorazioni ha consentito di mettere in evidenza:

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

Oltre a questo file, sono stati realizzati anche dei diagrammi di flusso che, riferendosi a titolo di esempio al processo di produzione del vetro, sintetizzassero il processo di utilizzo del modello AHP e della procedura di valutazione delle tecnologie. Analogamente al file Excel, anche i diagrammi realizzati si pongono come

supporto alle imprese nell'individuazione delle possibili soluzioni tecnologiche implementabili nella sottofase produttiva di loro interesse. Sono costruiti con una struttura flowchart dove è l'utente stesso a dover prendere decisioni e, in base ad esse, seguire un ramo piuttosto che un altro. Il loro utilizzo parte dal primo diagramma, Figura 13, dove l'utente individua la fase di lavorazione per la quale vuole ridurre i consumi energetici.

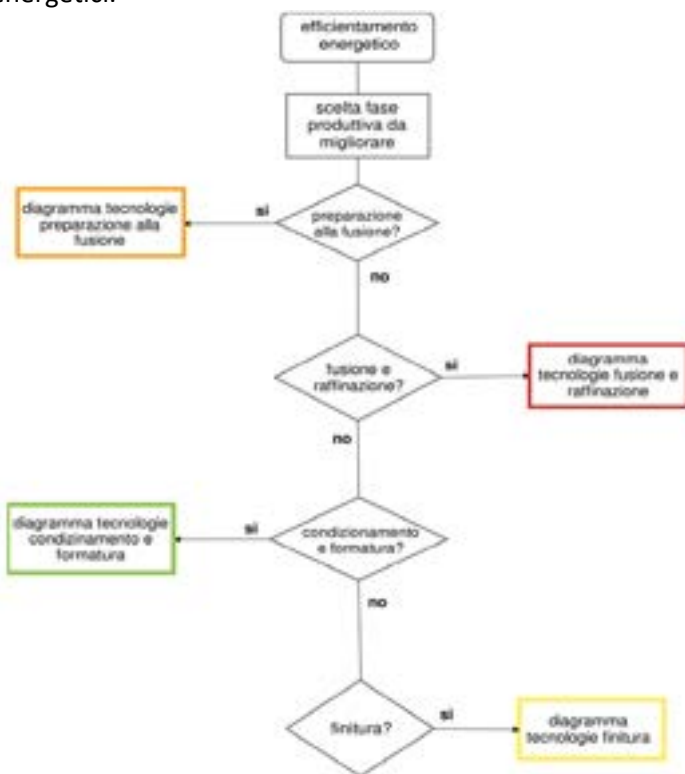


Figura 13. Primo diagramma di flusso. L'utente seleziona la fase di processo da ottimizzare.

Successivamente, si passa al diagramma della fase scelta. A titolo d'esempio si mostra il diagramma relativo alla preparazione alla fusione (Figura 14). Qui l'utente viene guidato all'interno del diagramma fino ad arrivare ad una lista delle possibili alternative tecnologiche applicabili nel caso di suo interesse.

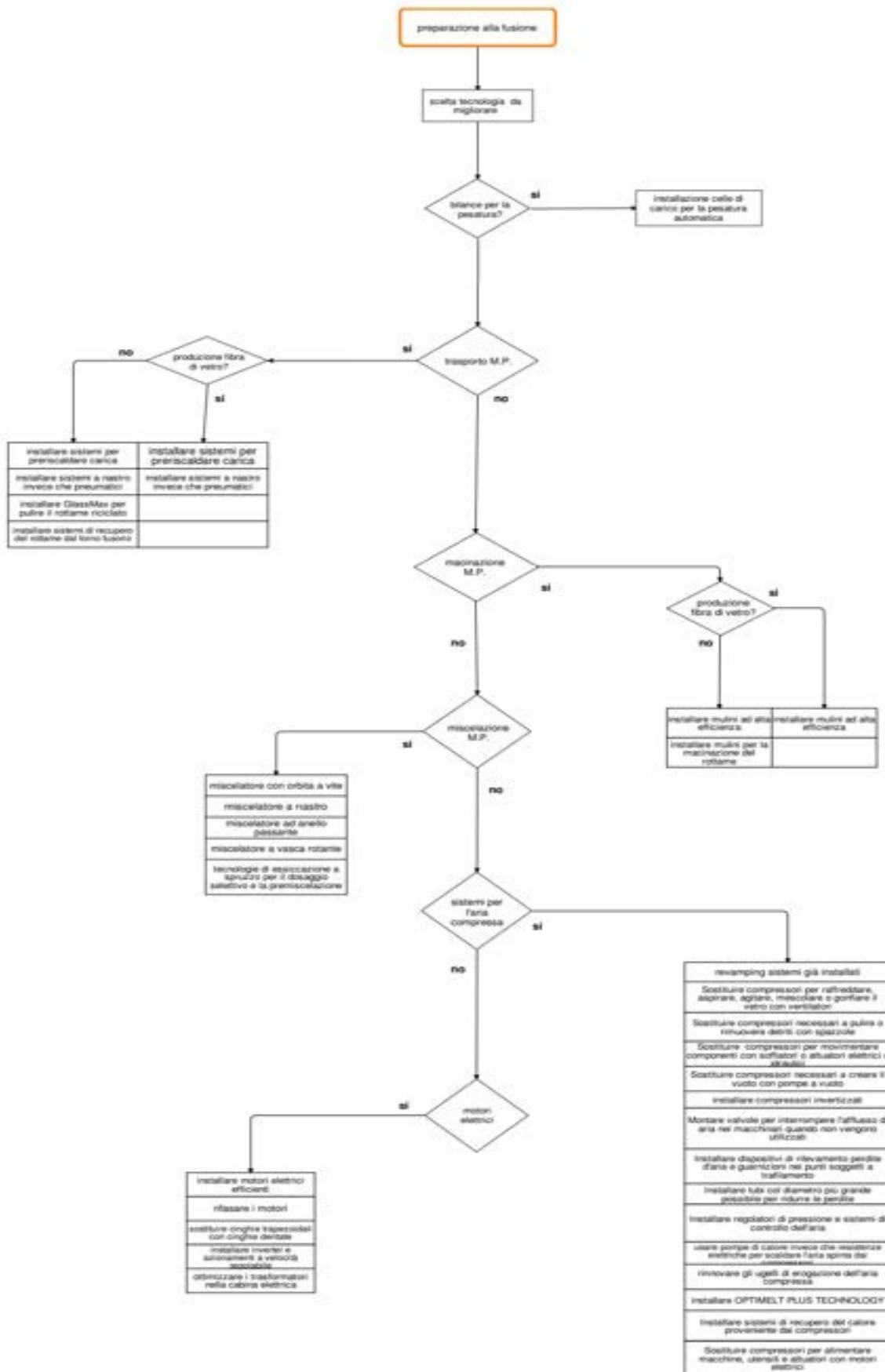


Figura 14. Diagramma di flusso della sottofase di preparazione alla fusione. Riepilogo delle soluzioni tecnologiche in base alla sottofase e al macchinario di cui si vogliono limitare i consumi.

2.7.3 Definizione dimensioni di valutazione

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

Si è ovviamente presa in considerazione la dimensione che riguarda il consumo energetico indotto da ciascuna tecnologia, infatti questo progetto è rivolto verso i settori industriali più energivori e mira a ridurre i consumi specifici. Oltre al consumo energetico, sono anche stati inclusi altri **parametri di valutazione** utili a valutare in modo completo le eterogenee tecnologie presenti nelle varie fasi del processo di lavorazione. Figura 15 riepiloga i parametri riferendosi al settore del vetro.



Figura 15. Dimensioni del modello di valutazione delle tecnologie energy-saving

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

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

ancora una volta il confronto a coppie, che viene somministrato all'azienda tramite un questionario realizzato con Google moduli. A titolo di esempio ne riportiamo un'immagine nelle Figure 17-18. Il questionario completo è mostrato nell'ALLEGATO 6.

The image shows a Google Form with three questions, each with a 9-point Likert scale. The questions are:

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

Each question has a scale from 1 to 9, with 'uguale importanza' at 1 and 'estremamente più importante' at 9. A vertical toolbar on the right contains icons for adding, deleting, and duplicating questions.

Figura 17. Questionario da sottoporre all'azienda in analisi, parte 1.

The image shows a Google Form with three open-ended questions:

- 1. Quali tipi di vetro vengono prodotti nell'impianto? (Testo risposta breve)
- 2. Che tipo di forno è presente nell'impianto e che tipo di alimentazione utilizza? (Testo risposta breve)
- 3. Sono presenti dei vincoli tecnologici all'interno dell'impianto? (Testo risposta lunga)

A vertical toolbar on the right contains icons for adding, deleting, and duplicating questions.

Figura 18. Questionario da sottoporre all'azienda in analisi, parte 2

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

2.7.6 Applicazione del metodo e valutazione dei risultati

Grazie ai passaggi precedentemente svolti e alle informazioni reperite in essi, si è in grado di applicare il modello AHP ed ottenere una classificazione delle alternative. Per fare ciò abbiamo realizzato dei file Excel dove fosse possibile inserire le valutazioni ottenute con i questionari, e che calcolassero in automatico i punteggi finali verificando al tempo stesso l'eventuale inconsistenza delle valutazioni. In ogni file Excel (uno per ogni fase di processo, visibili nell'ALLEGATO 5), il primo foglio racchiude i punteggi finali e le classifiche delle varie soluzioni tecnologiche in ogni sottofase o sottocategoria (Figura 19). I restanti fogli, invece, contengono le matrici utilizzate per calcolare autovettori e autovalori delle soluzioni (Figura 20).

Come si può notare in Figura 19, i punteggi e le classifiche presentano una colorazione basata su una scala di colori che mostra in verde i punteggi più alti e in rosso i punteggi più bassi. La colorazione delle celle, come il calcolo dei punteggi stessi, avviene in automatico in base ai punteggi in input inseriti nelle matrici delle valutazioni.

Category	Solution	Score
Macchine per miscelazione M.P.	Usare tecnologie di essiccazione a spruzzo per il dosaggio selettivo e la premiscelazione	0,27
	Usare miscelatori con orbita a vite (screw orbit mixers)	0,18
	Usare miscelatori a nastro (ribbon mixers)	0,08
	Usare miscelatori ad anello passante (ring through mixers)	0,11
	Usare miscelatori a vasca rotante (rotating pan mixers)	0,37
Motori elettrici	Installare motori elettrici efficienti	0,27247
	Rifasare i motori	0,17987
	Sostituire le cinghie di trasmissione trapezoidali con cinghie dentate per ottimizzare le tensioni	0,09448
	Installare inverter e azionamenti a velocità regolabile	0,10533
	Ottimizzare i trasformatori nella cabina elettrica	0,3626
Compressori	Sostituire compressori, sistemi d'adduzione aria e sistemi frigoriferi con macchinari più avanzati	0,2298
	Sostituire compressori necessari a raffreddare, aspirare, agitare, mescolare o gonfiare il vetro con ventilatori	0,11076
	Sostituire compressori necessari a pulire o rimuovere detriti con spazzole	0,08458
	Sostituire compressori necessari a pompare il vetro con pompe a vuoto	0,08458

Figura 19. Esempio del foglio di calcolo dei punteggi finali delle soluzioni relative al settore del vetro.

Category	Solution	A	B	C	D	E
COSTO INIZIALE	A - Usare tecnologie di essiccazione a spruzzo per il dosaggio selettivo e la premiscelazione	1	2	4	3	0,4
	B - Usare miscelatori con orbita a vite (screw orbit mixers)	0,5	1	2	1,5	0,8
	C - Usare miscelatori a nastro (ribbon mixers)	0,25	0,5	1	0,8	0,2
	D - Usare miscelatori ad anello passante (ring through mixers)	0,33	0,67	1,25	1	0,35
	E - Usare miscelatori a vasca rotante (rotating pan mixers)	2,5	1,25	5	2,84	1
	CR	0,037296	0	0,04		
COSTI OPERATIVI	A - Usare tecnologie di essiccazione a spruzzo per il dosaggio selettivo e la premiscelazione	1	2	4	3	0,4
	B - Usare miscelatori con orbita a vite (screw orbit mixers)	0,5	1	2	1,5	0,8
	C - Usare miscelatori a nastro (ribbon mixers)	0,25	0,5	1	0,8	
	D - Usare miscelatori ad anello passante (ring through mixers)	0,33	0,67	1,25	1	
	E - Usare miscelatori a vasca rotante (rotating pan mixers)	2,5	1,25	5	2,84	1

Figura 20. Esempio di foglio di calcolo degli autovettori, autovalori e indici di consistenza delle matrici.

Per evitare errori nella compilazione delle matrici, è stata prevista una colorazione condizionale delle celle della matrice che le colora quando è presente un punteggio, mentre le lascia bianche se i valori devono essere ancora inseriti (ciò è stato fatto per dare un supporto visivo alla compilazione delle matrici stesse). Oltre a questo, per ogni matrice viene verificata in automatico la consistenza della matrice stessa, infatti come si può

vedere dalla figura 20, sotto alla matrice è presente una cella che riporta il rapporto di consistenza (CR), che assume colorazione verde o rossa in base al fatto che la consistenza della matrice sia verificata o meno.

2.7.7 Scelta dell'alternativa migliore

Una volta ottenuti i punteggi finali delle alternative tecnologiche compatibili con l'impianto che stiamo trattando è possibile individuare la soluzione che viene ritenuta la migliore. I punteggi dell'analisi AHP sono ordinati in modo decrescente con una scala cromatica che va dal verde, al rosso (Figura 19). L'alternativa con il punteggio più alto rappresenta la soluzione tecnologica migliore secondo le dimensioni di valutazione scelte e le preferenze dell'azienda in analisi. Il risultato indica all'azienda l'alternativa di rinnovamento tecnologico per essa ottimale.

2.7.8 Sintesi del funzionamento del modello di assessment

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

1. Si prendono i risultati delle analisi dei flussi energetici effettuate dalle altre università sull'azienda campione. Da questi risultati o direttamente consultando il personale dell'azienda in analisi, si individua la/e fase/i e la/e sottofase/i critica dell'impianto.
2. Si utilizza il file Excel realizzato (ALLEGATI 1 e 2) per filtrare le alternative ed individuare le soluzioni tecnologiche applicabili al nostro caso.
3. Si somministra il questionario Google Moduli (ALLEGATO 6) all'azienda in analisi e si valuta l'importanza reciproca dei criteri e delle dimensioni di analisi illustrate in Figura 15.
4. Basandosi sui risultati dei questionari e sulla valutazione qualitativa delle tecnologie effettuata da esperti di settore, si applica l'analisi AHP e si classificano gli interventi (ALLEGATO 5). La differenza di punteggio tra soluzioni tecnologiche all'interno della classifica consente alle aziende di valutare il gap tra lo stato attuale delle loro tecnologie e quello dei macchinari energy-saving potenzialmente disponibili. Nell'esempio in Figura 19, ad esempio, partendo da una tecnologia con punteggio 0.08 (miscelatori a nastro), ed essendo la migliore tecnologia di quella tipologia di asset quella con punteggio 0.37 (miscelatori a vasca rotante), si parametrizza la differenza di $0.37-0.08=0.29$ come massimo gap recuperabile, ovvero 100%. Conseguentemente, se un'azienda passasse dalla tecnologia attuale (0.08) alla tecnologia con punteggio 0.18 (miscelatori con orbita a vite), coprirebbe soltanto un gap di risparmio energetico pari a $(0.18-0.08)/0.29=0.10/0.29=30\%$.
5. Si suggerisce all'azienda di implementare la soluzione tecnologica che risulterà vincente rispetto alle altre dal punto di vista energetico, economico e della sostenibilità ambientale. La soluzione ottenuta sarà costruita su misura in base alle specifiche esigenze e al peso dei criteri espresso dal personale dell'azienda analizzata.

Avendo illustrato in dettaglio il funzionamento del modello di assessment progettato, si mostra lo studio dei settori del vetro e del cemento svolto. Nel capitolo 3 si riepilogano le soluzioni tecnologiche identificate per migliorare i consumi energetici del processo di produzione del vetro. Mentre nel capitolo 4 si illustrano le soluzioni tecnologiche definite per il processo di produzione del cemento.

I risultati dei capitoli 3 e 4 vengono messi a disposizione delle aziende per effettuare una valutazione delle opportunità di miglioramento ottimali secondo quanto appena riportato nel capitolo 2.

3 Vetriere

Il presente capitolo mostra il processo di produzione del vetro, illustrando per ogni singola fase di processo le seguenti informazioni:

- funzionamento della fase di processo;
- tecnologie necessarie per realizzare tali operazioni produttive;
- soluzioni tecnologiche proposte in letteratura per ridurre i consumi energetici di tale fase;
- altre soluzioni tecnologiche emerse consultando le diagnosi e le aziende italiane di produzione del vetro.

3.1 *Processo di produzione del vetro: introduzione*

Negli ultimi anni la domanda di vetro è cresciuta di quasi il 4% all'anno. Circa 0,5-0,8 EJ di energia sono utilizzati per la produzione di vetro in tutto il mondo, e l'energia utilizzata nella produzione di contenitori e vetro piano comporta emissioni di circa 50-60 Mt di CO₂ all'anno [17].

Adottando le migliori tecnologie disponibili, l'efficienza energetica del settore può migliorare fino al 40% nei paesi in via di sviluppo e fino al 35% in quelli industrializzati, presentando collettivamente un potenziale di risparmio energetico di circa 0,6 EJ/anno [18].

Al fine di individuare le tecnologie più avanzate dal punto di vista energetico, che possono essere installate in un impianto di produzione del vetro per ridurre i consumi, è prima necessario riprendere il funzionamento di un generico impianto di produzione del vetro e analizzarlo in dettaglio. La Figura 21 schematizza le fasi del processo di produzione del vetro.

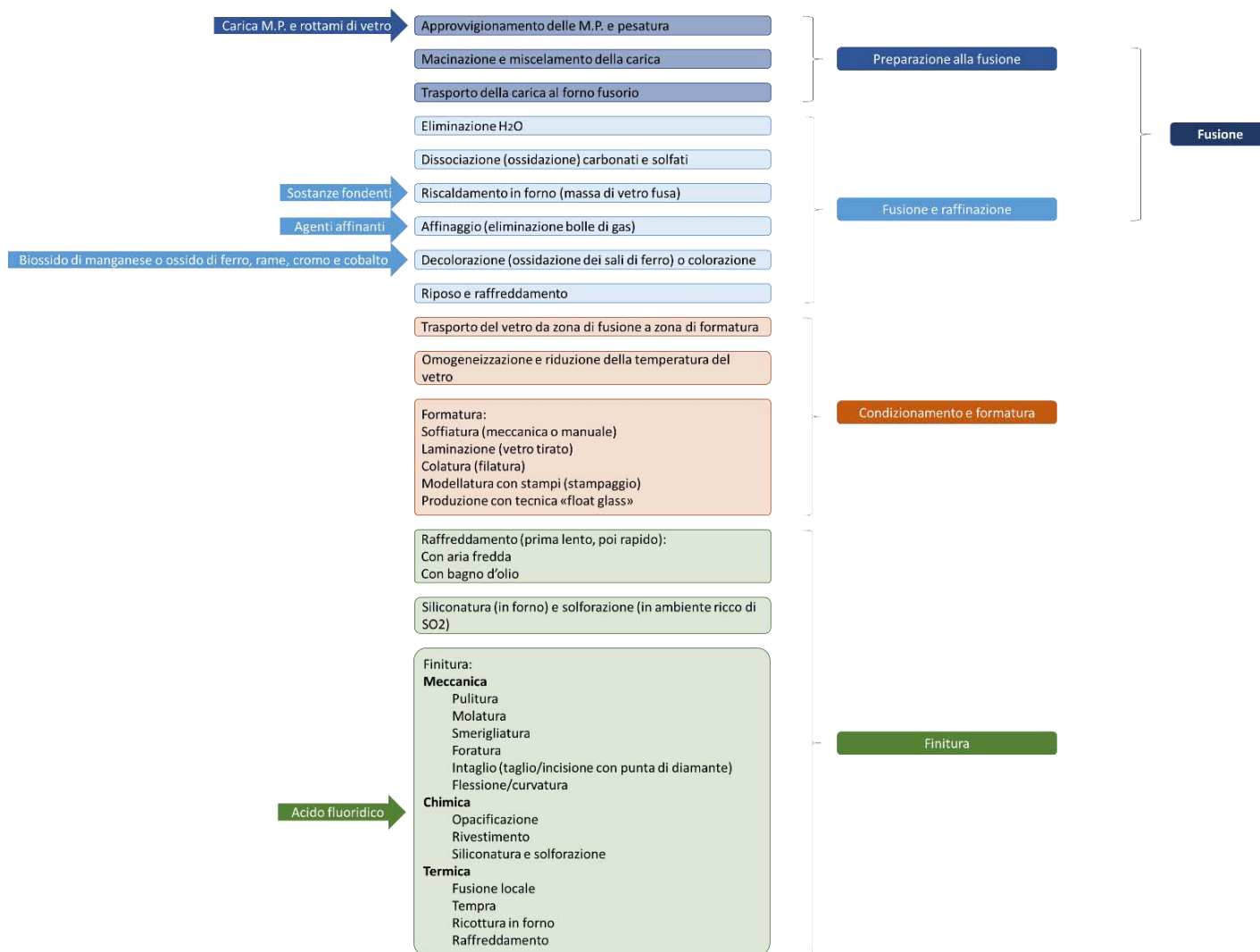


Figura 21. Fasi del processo di lavorazione del vetro.

Qualsiasi tipo di vetro si produca, infatti, nel processo di produzione del vetro si riscontrano quattro macro-fasi in sequenza:

1. Preparazione alla fusione
2. Fusione e raffinazione
3. Condizionamento e formatura
4. Ricottura
5. Finitura

Talvolta le operazioni 1. e 2. vengono accorpate entrambe in un'unica macro-attività definita col termine generico "fusione". Nei sotto-paragrafi a seguire si descrivono le macro-attività e, per ciascuna di esse, si indicano quali tecnologie saranno presumibilmente installate nell'impianto affinché il processo produttivo possa avere luogo e quali azioni si possono intraprendere per migliorare i consumi energetici di tali tecnologie. Oltre alle fasi mostrate in Figura 21, al termine della finitura, si possono effettuare le operazioni di ispezione sui prodotti finiti e le operazioni di imballaggio, che assumono caratteristiche diverse a seconda che gli articoli in vetro siano destinati a clienti esterni o interni all'azienda. L'ispezione e l'imballaggio vengono escluse dalla presente trattazione perché non fanno parte del vero e proprio ciclo produttivo del vetro, ma sono attività successive a esso. Si escludono anche dalla trattazione impianti di produzione del vetro manuali e di piccola taglia, considerando solo gli impianti manifatturieri automatizzati.

3.2 Preparazione alla fusione

Il processo di produzione del vetro parte dopo che sono state approvvigionate le materie prime (M.P.). La principale materia prima usata per produrre il vetro è la sabbia (soprattutto silice). Alla sabbia vengono aggiunti limestone, polvere di soda, rottami di vetro e altre sostanze chimiche necessarie per colorare il vetro. Tutti i materiali in input al processo vengono preparati alla fusione nel seguente modo: si pesano le materie prime, si macinano (se necessario), si mescolano e, infine, si trasporta la carica con appositi nastri e sollevatori in ingresso al forno fusorio. Solitamente, a causa della sua natura abrasiva e delle maggiori dimensioni delle particelle, il rottame viene trattato separatamente rispetto alle altre materie prime fino al suo ingresso nel forno fusorio.

L'operazione di macinazione della carica viene effettuata solo quando le materie prime non possono essere acquistate già sotto forma di terra, ma devono essere macinate in loco. La macinazione è un processo intrinsecamente inefficiente e, soprattutto quando deve essere effettuata a granulometria molto fine, può essere ad alta intensità energetica [19]. Essa può avvenire in quattro diversi modi:

- Macinazione semplice
- Polverizzazione con classificazione ad aria incorporata
- Essicca-macinazione
- Macinazione in circuito inertizzato

Il processo che va dall'estrazione delle materie prime alla movimentazione verso il forno implica il consumo dei seguenti vettori energetici: l'energia elettrica e, in parte minore, i combustibili fossili (carbone, olio e/o gas) necessari per l'autotrazione. Il consumo energetico che si riscontra dopo aver effettuato queste operazioni, solitamente, non supera il 4-5% del consumo energetico totale dell'impianto.

In fase di preparazione alla fusione l'elettricità è usata per i sollevatori, i nastri trasportatori, i miscelatori e i processi di agglomerazione dei materiali. I miscelatori sono le tecnologie più impattanti sul consumo energetico della fase di preparazione alla fusione [19].

3.2.1 Tecnologie installate nell'impianto per effettuare le operazioni di preparazione alla fusione

- Bilance per pesare le materie prime
- Sollevatori, nastri trasportatori e altre tecnologie che costituiscono l'impianto di trasporto delle materie prime
- Mulini per la macinazione
- Macchine miscelatrici
- Compressore e sistemi di iniezione di aria compressa per alimentare le macchine
- Motori elettrici che movimentano i macchinari, i nastri trasportatori e i sistemi ad aria compressa.

3.2.2 Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di preparazione alla fusione

Per abbassare i consumi energetici in questa fase si può agire sulla macchina per la macinazione oppure sull'apparato che trasporta le materie prime in input al macinatore e i semilavorati dall'uscita del macinatore al forno fusorio. Tuttavia, come detto, il consumo energetico dovuto alle operazioni di approvvigionamento, pesatura, macinazione, miscelazione e movimentazione delle materie prime non supera il 5% del consumo totale dell'impianto. Per questo motivo, pur installando tecnologie e macchinari avanzati, in questa fase produttiva non si potranno ottenere grandi miglioramenti sui consumi energetici globali dell'azienda.

Di seguito si riepilogano per ciascuna tecnologia le accortezze che si possono adottare per migliorare i consumi energetici delle tecnologie nelle fasi che vanno dall'approvvigionamento all'infornaggio delle materie prime.

- **Soluzioni riguardanti le bilance**
 - Installare sistemi efficienti di dosaggio della carica in ingresso al forno fusorio e, se possibile (soprattutto nei grandi impianti), effettuare la **pesatura computerizzata** dei componenti, ossia utilizzare **celle di carico per** pesare le materie prime direttamente sul nastro trasportatore che alimenta il miscelatore di solidi. Infatti, la pesatura non automatizzata è un metodo meno efficiente dal punto di vista energetico [20].
- **Soluzioni riguardanti i sistemi di trasporto delle materie prime**

- Sostituire sistemi di **trasporto delle materie prime** di tipo pneumatico o a vite (pneumatic conveyors e screw conveyors) con **sistemi di tipo "a nastro"** (conveyor belts) [21]. Tali sistemi, infatti, sono meno energivori rispetto ai sistemi di trasporto pneumatici o di altra natura [19].
- Installare **sistemi per preriscaldare i rottami e le materie prime** (batch and cullet preheating), al fine di ridurre i tempi di fusione e, di conseguenza, i consumi energetici [19], [20], [22]. Tali sistemi possono recuperare il calore dei gas di scarico della fusione e impiegarli per preriscaldare la carica di materie prime.
- **Soluzioni riguardanti i mulini da macinazione**
 - Comprare **mulini da macinazione avanzati** e ad alta efficienza energetica (revamping). I migliori dal punto di vista energetico sono quelli che, a parità di produttività, macinano la carica attraverso apparecchiature rotanti che si muovono a velocità di rotazione basse, ma velocità di avanzamento alte [23].
 - Installare tecnologie che effettuino **contemporaneamente la macinazione e la miscelazione** (ad es. tecnologie MaxxMill) [23], [24].
- **Soluzioni riguardanti i sistemi di recupero e macinazione dei rottami**
 - Usare **sistemi di recupero del rottame** e incrementare il riciclaggio dei rottami di vetro provenienti dal proprio impianto o da fornitori esterni. Infatti, i rottami richiedono minor energia per essere preriscaldati e fusi dato che le reazioni endotermiche associate alla formazione del vetro sono già state completate. Inoltre, usando rottami, si riduce l'apporto di materie prime e, dunque, diminuisce il consumo energetico causato dalla produzione di tali sostanze. Si stima una riduzione dei consumi energetici pari al 2,5-3% ogni 10% in più di rottame utilizzato nella carica. I rottami possono essere utilizzati in qualsiasi tipo di impianto (sia esso dotato di fornace a combustibile fossile, a riscaldamento elettrico o a ossicombustione), ad eccezione degli impianti che producono fibre di vetro continue. Tuttavia, la percentuale di rottame che si può utilizzare nella carica di partenza varia in funzione del tipo di prodotto che si intende ottenere perché, soprattutto se si acquista rottame da fornitori esterni, non si conosceranno in modo esatto né la composizione, né le caratteristiche fisiche del materiale di partenza e sarà difficile controllare la qualità del prodotto finale. Ad ogni modo, laddove si riutilizza il rottame, per poter effettuare il riciclaggio, è necessario che il rottame sia pulito dai contaminanti e separato dalle particelle coloranti. Queste operazioni possono essere effettuate con la **tecnologia "GlasMax"**, nella quale il rottame di vetro colorato viene macinato in modo autogeno e si vanno a diminuire unicamente le dimensioni delle particelle di vetro, filtrando via altre sostanze coloranti o contaminanti. Impiegando tecnologia GlasMax, si effettuano in contemporanea le operazioni di pulizia e macinatura del rottame di vetro. Pertanto, un'ulteriore soluzione di abbattimento dei consumi energetici è la seguente.
 - Utilizzare sistemi che effettuino contemporaneamente la macinazione e la pulitura del rottame di vetro (ad es. tecnologia GlasMax).
 - Talvolta il rottame di vetro, inoltre, non può essere riciclato a causa della dimensione eccessiva delle proprie particelle. Installando dei **macinatori dedicati alla polverizzazione del rottame**, si può incentivare il processo di riciclaggio e recuperare anche quei rottami che altrimenti andrebbero scartati. Come conseguenza si ottiene una riduzione del consumo energetico dell'impianto. Una soluzione opportuna è, dunque, installare macchine per la **macinazione dei rottami** che riducano il vetro **in particelle più fini (12-20mm)**. Ridurre la dimensione delle particelle di rottame consente di fondere più rapidamente e in modo più uniforme la miscela di carica e vetro recuperato inserita nel forno [19].
 - Installare sistemi alternativi per effettuare **decolorazione di rottame** così da aumentare la percentuale di rottame (green cullet) da poter inserire per produrre vetro trasparente (si passa da 0,5% a 3%). Di seguito si propongono quattro soluzioni possibili [19]:

- "phase separation" [25], [26, pag.]. Sfruttando l'immiscibilità di due sostanze liquide si separa il vetro da altri elementi coloranti.
- "reductive melting" [27]. Il rottame viene frantumato e setacciato fino a una granulometria < 1 mm. La polvere ottenuta viene essiccata (riscaldandola ad una temperatura superiore ai 100 °C per 24 ore) e successivamente miscelata in quantità opportune con reagenti chimici (ad esempio Na₂CO₃ e carbone attivo). La miscela viene usata per alimentare un crogiolo di allumina che poi viene riscaldato per un tempo compreso tra 30 e 120 minuti all'interno di un forno elettrico a 900-1200 °C. La temperatura del forno viene aumentata secondo una certa velocità di riscaldamento (circa 8 °C/min). Infine, dopo aver superato il tempo di fusione, il prodotto ottenuto viene lasciato raffreddare a temperatura ambiente e si procede alla separazione del vetro prodotto dagli oligoelementi inerti mediante schiacciamento.
- "electrochemistry". Applicare l'elettrochimica attraverso il vetro può suonare come un ossimoro, perché il vetro è comunemente usato come materiale isolante nella fabbricazione di elettrodi. Tuttavia, strati di vetro spessi 100 nm possono essere sufficientemente conduttivi per consentire la propagazione di un segnale, l'esecuzione di misurazioni elettrochimiche e il rilevamento di grandezze nel vetro quali la permeabilità all'acqua, lo spessore o altro [28].
- "wet chemical extraction". Usando reagenti chimici miscelati in quantità opportune a rottame fuso è possibile per indicare la presenza di una specifica sostanza chimica nella soluzione sconosciuta di partenza. I reagenti provocano una reazione unica basata sulla sostanza chimica con cui reagisce, permettendo di sapere quale sostanza chimica è presente nella soluzione. La sostanza individuata può poi essere estratta rispetto al vetro rimanente.
- Impiegare sistemi di **colorazione alternativi**, per rendere più facile la decolorazione del rottame e poterlo riusare più facilmente [19].
- Impiegare **sistemi di separazione dei rottami di vetro in base al loro colore**, per facilitarne la successiva decolorazione e rendere meno energivoro e difficile il processo di recupero del vetro [29].
- **Soluzioni riguardanti le macchine per la miscelazione delle materie prime**
 - Effettuare il **dosaggio selettivo** (selective batching) [19], [22] usando **tecnologie di essiccazione a spruzzo** per pre-miscelare tra loro le diverse materie prime, diminuire la reazione chimica dei carbonati alcalini e alcalino-terrosi, dunque eliminare la formazione di liquidi eutettici a bassa viscosità nelle prime fasi di fusione e ridurre i tempi di fusione e il conseguente consumo energetico. Per essiccare a spruzzo il materiale, il materiale deve essere macinato molto finemente, quindi è necessario installare **macinatori che riducano le dimensioni delle particelle di carica**. Questi macinatori, di solito, sono già presenti negli impianti che producono fibra di vetro; pertanto, questo approccio di riduzione dei consumi energetici è, in primo luogo, suggerito per tali impianti.
 - Usare **macchine di miscelazione efficienti**, ossia quelle definite "non intensive", ad esempio:
 - i **miscelatori con orbita a vite** ("screw orbit mixers")
 - i **mixer a nastro** ("ribbon mixers")
 - i **mixer ad anello passante** ("ring through mixers")
 - o i **miscelatori a vasca rotante** ("rotating pan mixers", ad esempio le tecnologie MaxxMill [23], [24]).

Screw orbit mixer e ribbon mixers hanno un consumo di energia specifico di 10 KWh/ton, ring through mixers e rotating pan mixers hanno consumo di energia specifico di 20 KWh/ton. Tutte le soluzioni elencate sono migliori rispetto ai miscelatori di tipo "insensitive" che, tipicamente, hanno consumo di energia specifico di 50 KWh/ton [19].

3.2.3 Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di preparazione alla fusione

Oltre agli interventi migliorativi proposti dalla letteratura, in questa fase di processo non si sono reperiti altri interventi mediante le diagnosi energetiche effettuate negli anni da ENEA.

3.3 Fusione e affinaggio

Le materie prime pesate, macinate, mescolate e trasportate all'interno della fornace, vengono ora riscaldate fino ad una temperatura di circa 1500°C. Il processo di fusione e affinaggio del vetro, che è la fase centrale dell'intero processo produttivo, non avviene in modo istantaneo, ma, al contrario, vengono effettuati gradualmente i passaggi di:

1. Eliminazione dell'acqua dalla carica in ingresso al forno.
2. Dissociazione (ossidazione) dei carbonati e solfati.
3. Riscaldamento della carica e fusione vera e propria (si trasforma la carica in una massa di vetro fusa).
4. Affinaggio della massa di vetro fusa (eliminazione delle bolle di gas presenti).
5. Decolorazione o colorazione del vetro mediante l'introduzione di sostanze decoloranti o coloranti nel forno.
6. Riposo e raffreddamento della massa di vetro fusa.

Mentre la fase 3) corrisponde alla vera e propria fusione del vetro, le altre fasi corrispondono alle cosiddette operazioni di affinaggio del vetro ("fining"). L'affinaggio è necessario per preriscaldare il vetro, liberarlo da eventuali bolle e omogeneizzarlo. Sia le operazioni di, sia la fusione vera e propria avvengono all'interno della camera di fusione della fornace.

La maggior parte delle aziende effettua la fusione del vetro in forni fusori a **funzionamento continuo** ("glass melting tank" o più semplicemente "tank furnace" [30]), chiamati anche serbatoi di fusione o "melting tanks". Più rari da trovare sono, invece, i **forni a fusione discontinua** ("pot furnaces" [30]), che tipicamente vengono usati per la produzione di prodotti in vetro speciale [19]. I forni a fusione continua differiscono da quelli a fusione discontinua perché in essi la miscela di materie prime e rottame viene continuamente caricata nel forno in modo da compensare il vetro prelevato e mantenere costante il livello di vetro nelle camere di combustione.

Qualsiasi tipo di fornace si scelga, essa sarà costituita da una **camera di combustione** a seguito della quale il vetro fuso raggiunge la zona del forno adibita all'affinaggio (detta "**working chamber**") mediante canali detti "**neck**" se si produce float glass e "**throat**" in tutti gli altri casi.

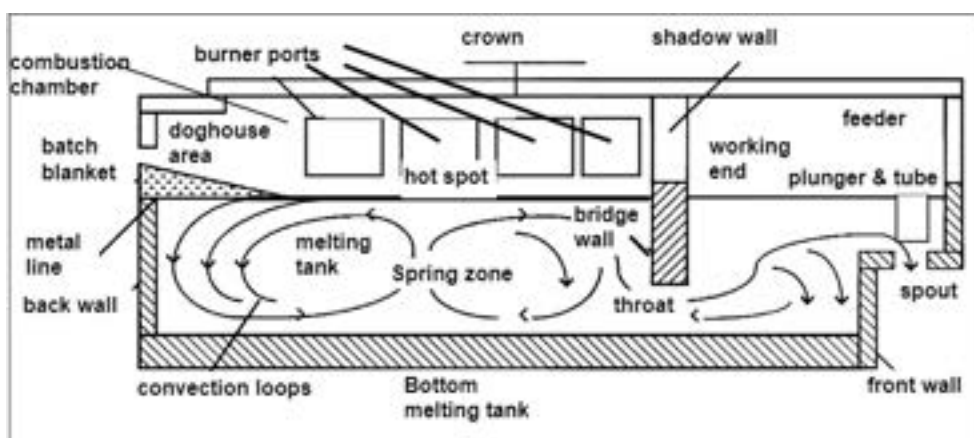


Figura 22. conformazione interna di una generica fornace a funzionamento continuo [21].

Inoltre, qualsiasi tipo di fornace si scelga, il riscaldamento del vetro all'interno del forno fusorio può avvenire secondo uno dei tre metodi seguenti [31], [32]:

- **riscaldamento a combustione.** In questo tipo di riscaldamento la combustione può essere effettuata usando gas naturale o olio combustibile. Il combustibile può presentarsi in forma solida (grezza o

polverizzata), semi-solida, liquida o gassosa. Se l'adduzione di combustibile nella camera avviene mediante una lancia, si parla di **fuel lancing**.

La combustione viene generalmente innescata attraverso bruciatori e, in base al tipo di comburente iniettato, si parla di:

- **Combustione semplice** (air-fuel combustion) se si usa solo aria compressa come comburente. Le prime fornaci delle aziende produttrici di vetro funzionavano secondo questo tipo di reazione.

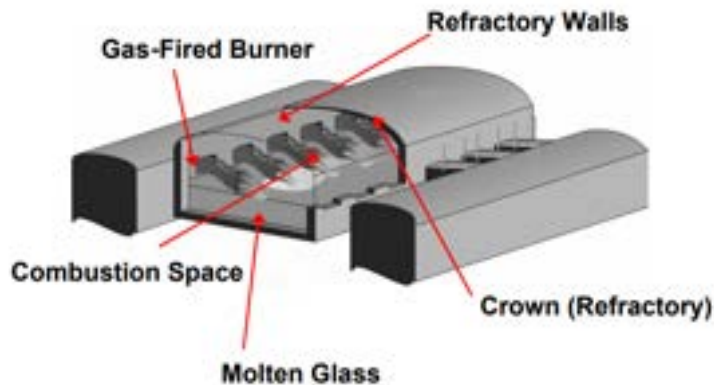


Figura 23. schema di funzionamento di un forno a combustione tradizionale [31].

- **Ossicombustione** (oxy-fuel combustion) se, anziché usare aria, si impiega come comburente ossigeno puro almeno al 90%.
- **Combustione arricchita a ossigeno (enriched air stage)** se si effettua una combustione utilizzando ossigeno in quantità maggiore rispetto a quello presente nell'aria, ma minore del 90% (considerando il volume complessivo di comburente). Se anziché partire con un comburente già ad alto contenuto di ossigeno, si aggiunge O_2 in un secondo momento, si parla di
 - **Oxygen lancing** se si inietta ossigeno direttamente dentro alla fiamma di combustione ottenuta accendendo la miscela di aria e combustibile.
 - **Oxy-air-fuel** se fin da subito si iniettano separatamente aria e ossigeno nella fiamma del bruciatore.
- **Combustione con boosting a ossigeno** se nelle fasi finali della combustione si effettua un'ulteriore aggiunta non solo di comburente (ossigeno puro), ma anche di combustibile (e si effettua una sorta di post-combustione) [33].

Una combustione che oltre all'aria si avvale anche dell'ossigeno produce i seguenti vantaggi: aumenta l'efficienza di combustione riducendo le perdite di calore nei gas di scarico, abbassa le emissioni usando bruciatori opportunamente progettati, migliora la stabilità della temperatura mediante una combustione più stabile, infine, a parità della quantità di combustibile immesso può aumentare anche la produttività grazie alla maggior temperatura di fiamma, al maggior calore trasferito alla carica di vetro e ai ridotti gas di scarico.

- **Riscaldamento elettrico diretto.** In questo metodo degli elettrodi posti a contatto con il vetro lo riscaldano. Il vetro, infatti, si comporta come un conduttore elettrico [34]. Questo metodo è conveniente per aumentare i tassi di produzione dell'impianto e/o per aumentare la flessibilità della produzione. Attualmente, si ricorre a fusione elettrica principalmente per la produzione di fibra di vetro, in quanto il riscaldamento elettrico diretto consente di ottenere un prodotto molto omogeneo e di alta qualità [19].
- **"Boosting elettrico"**, che è una combinazione dei due metodi precedenti. Nella camera di combustione si trovano sia il processo di combustione (il vetro è in parte riscaldato dalle fiamme di combustione), sia gli elettrodi (il vetro è riscaldato in parte da energia elettrica mediante conduzione e irraggiamento).

Il processo complessivo di fusione del vetro implica il consumo dei seguenti vettori energetici: l'energia elettrica, i combustibili fossili (carbone, olio combustibile BTZ e/o gas tecnici, necessari a meno che il forno non sia totalmente elettrico), metano, ossigeno (se il forno utilizza ossicombustione o boosting a ossigeno) ed eventuali altri elementi quali vapore, acqua calda o gasolio.

Tale processo è ad alta intensità energetica, infatti il consumo energetico che si riscontra a valle delle operazioni di fusione e affinaggio, tipicamente, corrisponde al 60-70% del consumo energetico totale dell'impianto (talvolta può raggiungere addirittura il 75%) [20]. Pertanto, al fine di migliorare i consumi energetici, è fondamentale focalizzare gli sforzi sulle tecnologie che costituiscono questa fase del processo produttivo.

Per quanto riguarda il riscaldamento a combustione, nel caso in cui si voglia utilizzare come comburente ossigeno puro o aria ad alto contenuto di ossigeno (enriched air), le tecniche per ottenere l'ossigeno desiderato sono quelle illustrate in Figura 24.

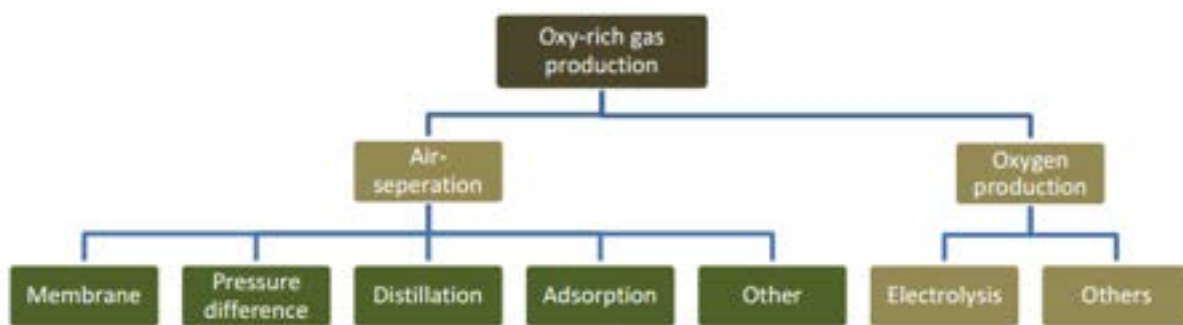


Figura 24. tecniche per estrarre ossigeno puro o aria arricchita di ossigeno da usare come comburenti nei forni che funzionano con riscaldamento a combustione [31]

A monte della camera di combustione vera e propria possono essere eseguiti una pre-miscelazione di comburente e combustibile, un preriscaldamento della miscela, e “staged combustion” (Figura 25). Le operazioni di Figura 25 non si escludono vicendevolmente, quindi possono essere usate anche in modo congiunto nello stesso impianto produttivo.

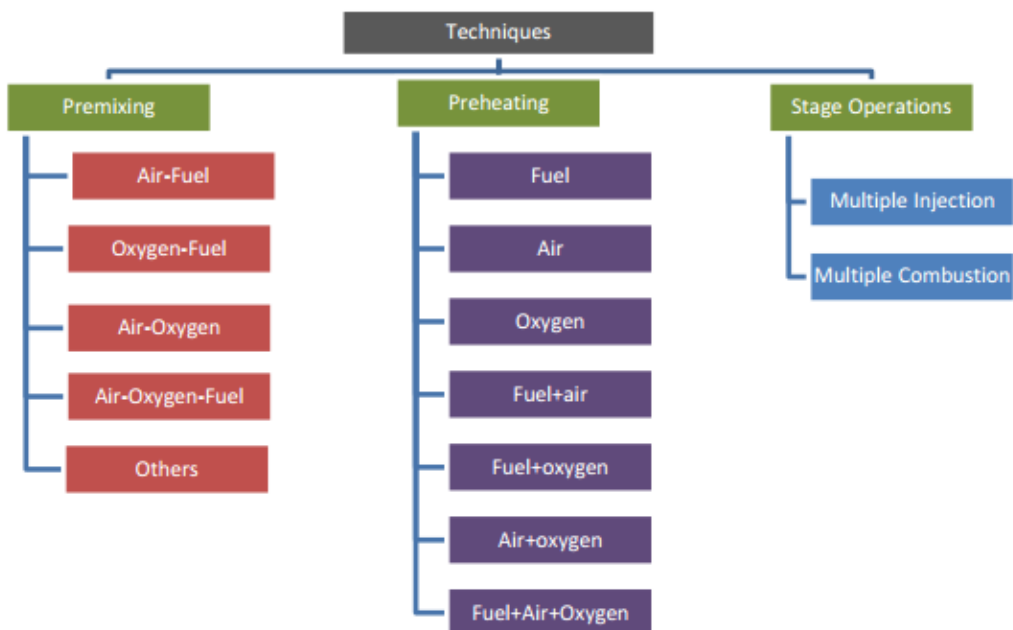


Figura 25. tipologie di pre-miscelamento, di preriscaldamento e di svolgimento delle operazioni per avviare la reazione di combustione [31].

Il pre-miscelamento aiuta a ridurre le emissioni di NO_x ma, soprattutto nel caso di premiscele ossigeno-combustibile, introduce la possibilità di esplosioni a causa dell'alta reattività dell'ossigeno nel combustibile. Il pre-miscelamento comburente-combustibile viene necessariamente effettuato nel caso in cui il combustibile richieda un mezzo per viaggiare, ad esempio se si usa un combustibile solido polverizzato. In generale, il pre-miscelamento semplifica il flusso del combustibile e mantiene uniforme la temperatura nella camera. Il pre-miscelamento aria-ossigeno è effettuato per portare la percentuale di ossigeno al livello necessario e rendere il processo cost-effective. Inoltre, premiscele di aria arricchita di ossigeno vengono usate per ridurre la lunghezza della fiamma.

Preriscaldare i flussi di input, invece, è importante nel ridurre il consumo di carburante e rendere il processo cost-effective. Il recupero di calore mediante preriscaldamento è comune per processi con alte temperature di servizio, ai fini di aumentare l'efficienza termica. Il preriscaldamento di aria o ossigeno ha però lo svantaggio di aumentare le emissioni di NO_x , che dovranno poi essere trattate nelle ultime fasi della combustione.

Il riscaldamento a combustione può essere a più fasi (multi-stage). In particolare, si possono avere fusioni di tipo multi-combustion se oltre alla fiamma primaria esiste una fiamma secondaria e, dunque, avviene una post-combustione. Il processo può essere anche multi-injection se oltre alla miscela aria-combustibile di partenza si iniettano in camera di combustione (primaria, secondaria o entrambe) ulteriori quantità di combustibile e/o comburente. Un esempio di combustioni multi-injection è il processo di oxygen-lancing.

Per generare la combustione si utilizza un bruciatore, che innesca una fiamma riscaldando i prodotti mediante combustibili (liquidi, solidi o gassosi). Nel caso di combustibile liquido, esso viene atomizzato sottoforma di spray, solitamente tramite un passaggio sotto pressione in un ugello. L'accensione dello spray è solitamente innescata da una scintilla elettrica. I bruciatori vengono distinti secondo il loro design e la loro posizione all'interno della camera di combustione (Figura 26), entrambi fattori fondamentali per aumentare l'efficienza di processo e il throughput rate. Come regola generale, i bruciatori devono essere posizionati e regolati in modo che la lunghezza della loro fiamma non sia tale da battere sulle pareti opposte del forno, così da non danneggiare i materiali refrattari che costituiscono la camera. Il posizionamento dei bruciatori è preferibile sulle pareti se si vuole ottenere una distribuzione più uniforme di temperatura nella camera. Al contrario, è preferibile agli angoli se si vogliono ottenere zone a temperature maggiori in specifiche zone della camera.

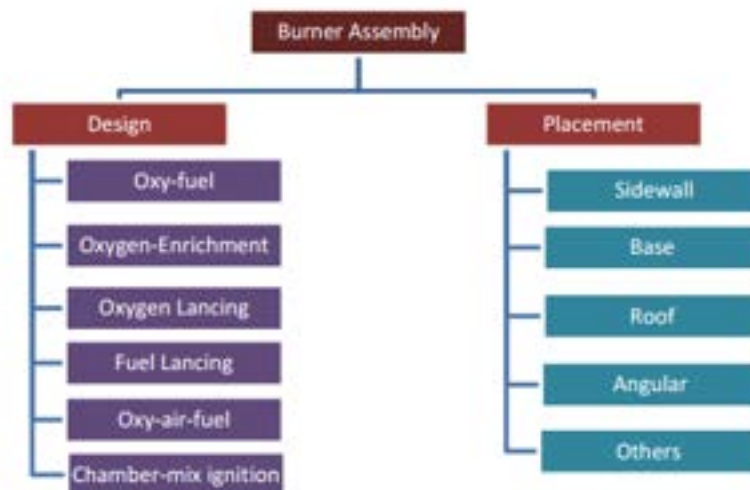


Figura 26. tipologie di bruciatori (da usare in base al processo di combustione selezionato) e possibili disposizioni del bruciatore all'interno della camera di combustione [31].

Per quanto concerne i gas di scarico del processo, si possono adottare strategie suddivisibili in due macro-categorie: attività di trattamento e successivo smaltimento dei gas o attività di riutilizzo dei gas. Il trattamento dei gas avviene in modo diverso in base alla sostanza chimica da eliminare. Invece, il riutilizzo di gas può avvenire in sole due modalità. Si possono riciclare i fluidi reinserendoli in input al processo, nella camera di combustione o in altre fasi produttive, oppure si possono sottoporre i fluidi a operazioni di recupero di calore e, successivamente, si possono smaltire i gas. Dal punto di vista energetico, le operazioni

di trattamento e smaltimento dei gas sono energivore, mentre le operazioni di riutilizzo dei fluidi costituiscono un risparmio energetico e, dunque, sono preferibili.

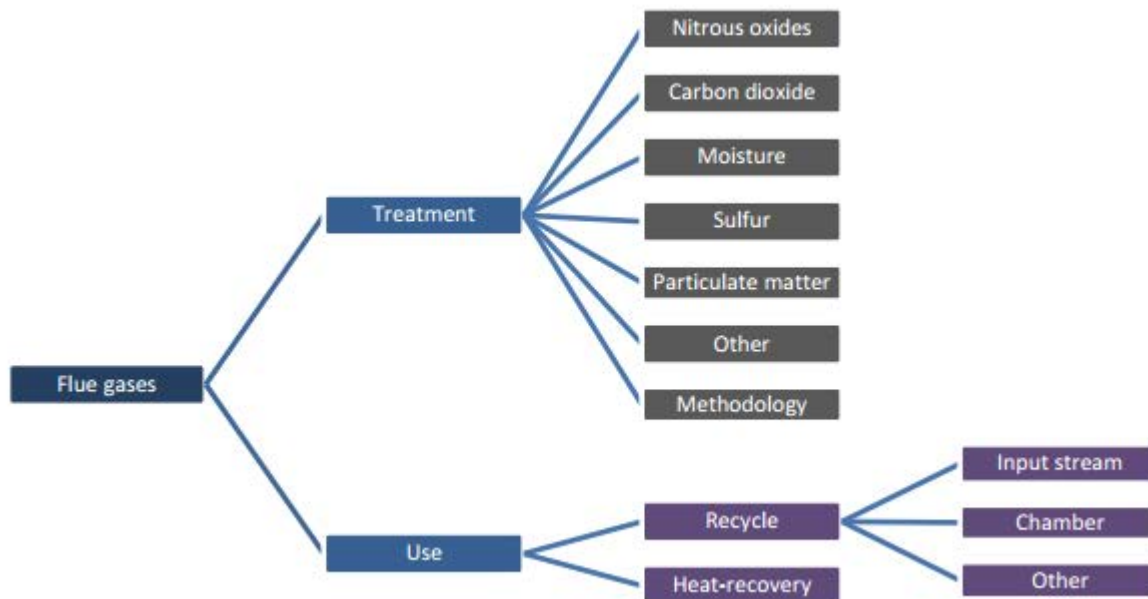


Figura 27. strategie per il trattamento dei gas di scarico [31].

Nel caso di riscaldamento a combustione o a boosting elettrico, per recuperare il calore dei gas di scarico della combustione, è possibile utilizzare i seguenti tipi di forni:

- Cross-fired regenerative furnaces.** A lato della camera di combustione, i gas di scarico vengono convogliati in una zona di rigenerazione. In tale zona sono presenti dispositivi di materiale refrattario detti “**checkerworks**” o semplicemente “**checkers**”, che consentono di trasferire il calore dei gas di scarico all’aria in ingresso alla camera di combustione. In questo modo, in un primo momento i gas di scarico riscaldano i checkers, poi in un secondo momento (dopo 20-30 minuti), il checker trasferisce energia termica al comburente che viene preriscaldato prima della combustione effettiva (Figura 28). Questo tipo di fornace può presentare da 4 a 8 bruciatori per ogni lato della camera di combustione, che funzionano in modo alternativo. Infatti, ogni 20 minuti circa, si spegne la fiamma per qualche secondo (30-60 secondi) e si inverte il funzionamento della fornace passando dall’attivazione dei bruciatori sul lato destro della camera di combustione all’attivazione dei bruciatori sul lato sinistro.

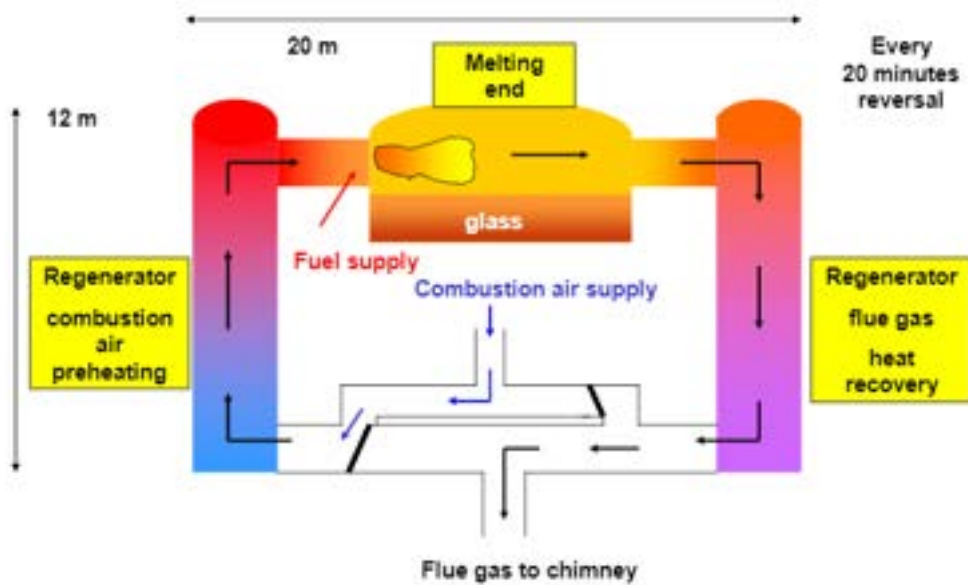


Figura 28. schema di funzionamento di una cross-fired regenerative furnace [30].

- End-fired regenerative furnaces** (o regenerative end-port o U-flame furnace). In questo tipo di forno, dei bruciatori (tipicamente da 2 a 4) emettono una fiamma che viene proiettata lungo tutta la camera di combustione, fino a raggiungere la parete di uscita del vetro fuso. Lo sviluppo della fiamma è tale che quest'ultima, giunta alla sua massima lunghezza, ricircola su se stessa formando una "U". I gas di scarico, dunque, percorrono vortici che li spingono verso la parete dove sono situati i rigeneratori (back wall side). In corrispondenza di tale parete, si convogliano i gas di scarico, che scambiano il loro calore con del materiale refrattario. In un secondo momento, il materiale refrattario rigenera il calore trasferendolo all'aria in ingresso alla camera di combustione (Figura 29). Queste fornaci determinano minori perdite di calore rispetto alle cross-fired regenerative furnaces, ma avendo un tempo di residenza dei gas di combustione nella camera maggiore, generano più NO_x .

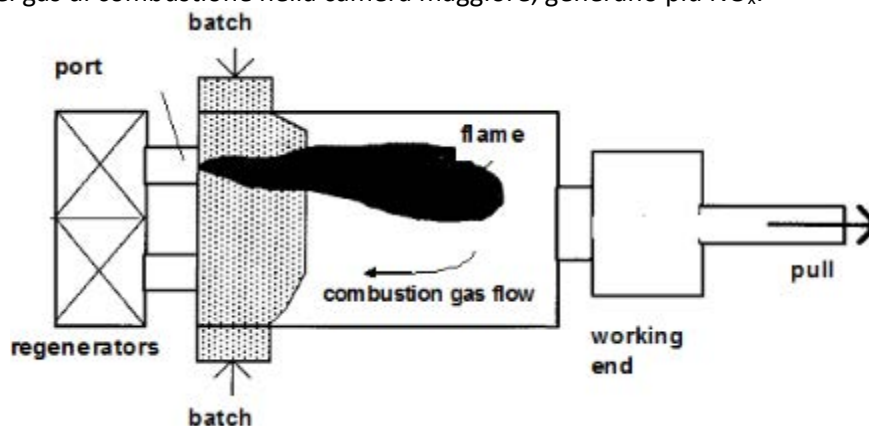


Figura 29. schema di funzionamento di una end-fired regenerative furnace [30]

- Recuperative furnaces.** I gas di combustione caldi vengono inviati direttamente ad uno scambiatore di calore situato nella zona posteriore della camera di combustione (dove si trovano i bruciatori). A differenza della rigenerazione, i fumi di combustione trasferiscono in real-time la loro energia termica all'aria comburente. In questo scenario, infatti, non c'è materiale refrattario che divide i due mezzi e, dunque, non c'è ritardo temporale tra il recupero termico dai gas caldi e il suo trasferimento ai gas freddi (Figura 30). Questa soluzione ha costi di investimento relativamente bassi, ma ha efficienza minore in termini di recupero termico rispetto alle soluzioni rigenerative.

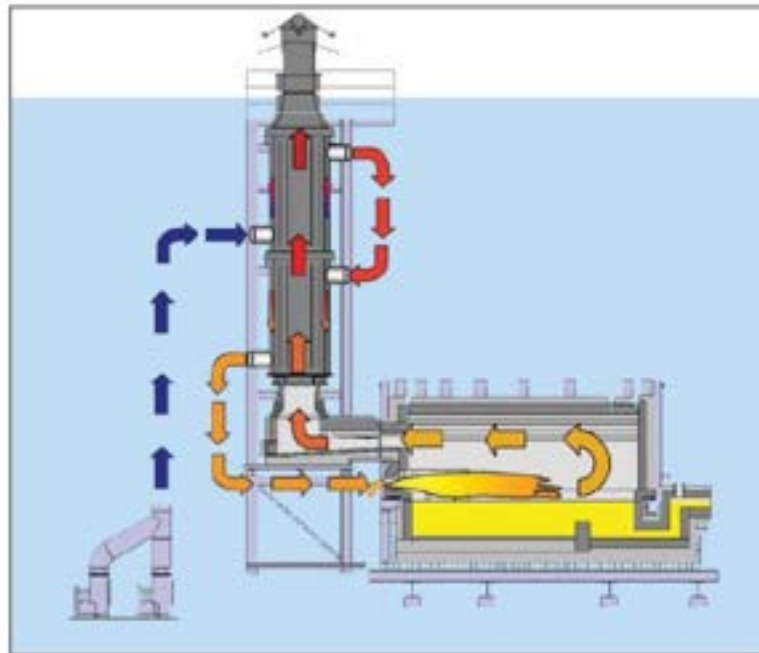


Figura 30. schema di funzionamento di una recuperative fornace [30].

3.3.1 Tecnologie installate nell'impianto per effettuare le operazioni di fusione e affinaggio

- Forni fusori
- Bruciatori per riscaldare i forni a combustione
- Elettrodi per riscaldare i forni elettrici
- Nastri trasportatori per muovere la massa di vetro fusa da una zona del forno all'altra
- Bruciatori per riscaldare i nastri trasportatori
- Sistemi di recupero dei gas di scarico dai forni
- Sistemi di recupero del rottame dai forni
- Impianti di raffreddamento forni (tipicamente scambiatori di calore ad acqua)
- Impianto di prelievo, trattamento e riciclo dell'acqua
- Impianto di iniezione di comburente e combustibile nei forni (compressori)
- Impianto di filtrazione delle emissioni inquinanti in atmosfera (ventilatori, filtri, cicloni, ESP, ecc.)
- Motori elettrici che movimentano i macchinari, i nastri trasportatori, i sistemi ad aria compressa, le pompe per l'acqua di raffreddamento, i soffiatori d'aria per forni, i ventilatori e i fan.

3.3.2 Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di fusione e affinaggio

È noto che, rispetto al consumo energetico totale del processo di fusione e affinaggio, solo una ridotta parte (meno della metà) è innescata dal processo vero e proprio di combustione e riscaldamento del vetro, mentre la restante quota è causata dalle perdite attraverso la struttura del forno e dalle perdite legate ai gas di scarico [17], [35]. Di conseguenza, per ridurre i consumi energetici, si possono adottare i seguenti accorgimenti:

- **Soluzioni riguardanti forni fusori, bruciatori ed elettrodi:**
 - Effettuare un **revamping** dei forni già presenti in impianto, modificandoli per renderli più efficienti o sostituendoli con forni della stessa tipologia, ma **tecnologicamente più avanzati** (caratterizzati da bassi consumi energetici). In questo caso, acquistare forni la cui forma della camera di combustione sia stata progettata in modo da ottimizzarne le prestazioni e ridurre al minimo le perdite [19].
 - Installare appositi **sigilli nei bruciatori** del forno per ridurre le perdite d'aria ed impedire trafile che ridurrebbero la temperatura interna. I bruciatori sono dispositivi costituiti da tubi in acciaio che convogliano il gas aria-comburente nella fornace ad una specifica angolazione. In molti casi è presente uno spazio aperto tra il tubo del bruciatore e la parete

refrattaria del forno; tale spazio è lasciato per consentire all'aria fredda di entrare nel forno raffreddandone le pareti. Questo flusso di aria fredda impatta negativamente sulla distribuzione di temperature di fiamma nel forno, riducendo l'efficienza di processo [36, pag.]. L'installazione di sigilli tra bruciatori e parete refrattaria ovvia a questo problema, riducendo i consumi energetici e anche la quantità di NO_x prodotta. In questo modo aumenta anche la vita utile del sistema di produzione delle fiamme (**burner block**), riducendo così le attività di manutenzione richieste dall'apparato. Lo svantaggio è che, installando tali sigilli, potrebbe essere necessario adottare **maggiori sistemi di raffreddamento** nel forno. I sigilli possono ridurre le perdite fino al 2-3% e abbassare i costi operativi e costi del combustibile di 1,75 e 1,0 punti percentuali rispettivamente. Il payback period di questa soluzione tecnologica è stimato essere pari a circa 4 mesi [19].

- Ridurre perdite di aria e trafilemediante **guarnizioni e sigilli nella struttura esterna** del forno. Questa soluzione può ridurre le perdite fino al 10% [19].
- **Coibentare** il forno per ridurre le perdite di calore che abbasserebbero la temperatura interna, scegliendo inoltre appositi materiali resistenti all'usura. In sostanza si isola termicamente il forno per impedire sprechi di calore ed energia. La coibentazione del forno può ridurre le perdite fino al 55-65% e ridurre i costi del combustibile di 1,0-1,5 punti percentuali. Il payback period relativo a questa tecnologia è stimato essere inferiore a 2 anni [19]. Lo svantaggio della coibentazione dei forni è che tanto più riduce le perdite di calore e tanto più le pareti refrattarie del forno tenderanno a corrodarsi e la vita utile del macchinario sarà ridotta. Pertanto, nell'isolare il forno è necessario ricercare il giusto compromesso tra la riduzione delle perdite di energia e la riduzione della vita utile della macchina [34].
- Installare **sistemi termofotovoltaici (TPV) nelle pareti del forno** per recuperare le perdite di calore e convertirle in energia elettrica (in letteratura NON ci sono casi applicativi di questa soluzione) [34]. I TPV sono sistemi che sfruttano l'effetto fotovoltaico per generare elettricità da una sorgente ad alta temperatura (tra 1574 °C e 2274 °C). Le celle fotovoltaiche convertono parte del calore (le radiazioni aventi lunghezza d'onda inferiore ad un certo limite) in elettricità, mentre le restanti radiazioni vengono riflesse e restituite alla sorgente di calore. Il materiale usato per costruire TPV può essere Ga, GaSb, Si o InGaAs e, rispettivamente, può assorbire radiazioni di lunghezza inferiore a 1,7 μm, 1,1 μm o tra 0,9 μm e 3,5 μm. Sapendo che in un forno coibentato la superficie che separa il materiale refrattario interno al forno e il materiale isolante si trova a temperature superiori ai 1000 °C, incorporando TPV dentro alle pareti del forno è possibile consentire al sistema termofotovoltaico di funzionare. Tuttavia, il problema principale di questa soluzione è che, tipicamente, le perdite di calore di un forno ben isolato sono ridotte (0,1÷0,3 W/cm²) rispetto al flusso di calore necessario ai TPV per funzionare. In questo senso, la soluzione proposta può essere applicata soltanto in due modi: o si isola meno bene il forno, accettando grandi perdite di calore in modo da far al meglio i TPV, oppure si effettua un buon isolamento del forno e si accettano minori densità di potenza dei TPV. La letteratura propone l'utilizzo di questa soluzione di recupero energetico solo a livello teorico, ma **non** si riscontrano casi applicativi di utilizzo di TPV nei forni di impianti reali, pertanto non si hanno dati numerici che confermino la bontà di questo tipo di intervento migliorativo.
- Forni con bruciatori che pre-miscelano aria e combustibile (**premix burners**), per ridurre le perdite d'aria e gli sprechi di energia, impedendo contemporaneamente le infiltrazioni di aria in eccesso. Questa soluzione può portare ad un risparmio energetico fino all'11% in base alla riduzione di aria in eccesso raggiunta [19].
- Installare nei forni dei **gorgogliatori** (bubblers) che, insufflando ossigeno in camera di combustione, migliorino lo scambio termico, uniformino la qualità del prodotto finito e riducano il tempo necessario a completare la fusione. Inoltre, riducono il posizionamento negativo degli elettrodi nel forno. I gorgogliatori non solo devono essere installati, ma il loro posizionamento deve essere studiato ed ottimizzato. Questa soluzione è preferibile quando

- si usa ossigeno (oxygen bubblers) in quanto si minimizza la creazione di NO_x. Si ha un aumento di efficienza del processo compreso tra il 10 ed il 15%
- **Ottimizzare la posizione dei bruciatori** all'interno della camera di combustione. In particolar modo, occorre ottimizzare l'angolo che la fiamma forma con la superficie del vetro, in quanto suddetto angolo influenza non solo lo scambio di calore, ma anche la formazione di NO_x e di polvere [19], [31], [32]
 - Installare **vertically fired furnace**. In questi forni, i bruciatori sono posizionati in modo da dirigere le fiamme quasi verticalmente verso il basso sulla superficie della carica. Rispetto ad un sistema a fiamma orizzontale, questo sistema di fusione fornisce più energia per piede quadrato di superficie della carica, senza aumentare le temperature refrattarie oltre i normali limiti di funzionamento. Pertanto, il forno verticale può fondere più vetro, produrre vetro di qualità superiore e/o aumentare la velocità del processo di fusione (anche del 50%) [19], [31], [32].
 - Installare **forno a cottura finale** (end-fired furnace), che è più efficiente rispetto al forno di tipo cross-fired, suddetto forno è caratterizzato da una capacità inferiore [19].
 - Installare forni con camere di combustione caratterizzate da stadi ad aria arricchita di ossigeno (**Oxygen Enriched Air Staging**). Con tali forni si riduce la temperatura della fiamma e si uniforma la distribuzione delle temperature di fusione mediante la diminuzione della quantità di ossigeno nella zona a maggior temperatura di fiamma. Preferire soluzioni ad aria arricchita, rispetto all'ossigeno puro fa diminuire le emissioni di NO_x dal 40 al 70% [19].
 - Installare **forno a ossi-combustione (oxy-fuel furnace o hot-oxy furnace)** [19], [20], [31]. Questo forno comporta la sostituzione dell'aria di combustione con l'ossigeno (> 90% di purezza). La tecnica può essere utilizzata sia con il gas naturale che con il petrolio come combustibile e determina un risparmio energetico perché elimina la necessità di riscaldare l'azoto atmosferico alla temperatura delle fiamme. Meno aria di combustione deve essere riscaldata e quindi si perde meno energia con i gas di scarico del forno. Interessanti sono i forni a ossi-combustibile di tipo "Tall Crown" e i **forni a ossi-combustibile ad aria sintetica**. Questi forni possono essere installati solo se si adotta anche il relativo sistema di rigenerazione dei fumi di scarico dal forno fusorio. Questi ultimi forni sono tipici della produzione di vetro piano (float glass). I vantaggi di usare forni ad ossi-combustione sono principalmente minor rumorosità del processo, tempi di fusione ridotti e maggior qualità del vetro prodotto. Gli svantaggi possono includere maggiore usura dei materiali refrattari con conseguente aumento dei costi dei materiali da sostituire (questo comporta anche una riduzione della qualità del vetro a causa della contaminazione di particelle dei refrattari), riduzione della vita utile del forno e maggiori costi operativi legati all'approvvigionamento di ossigeno puro.
 - Installare **forni a boosting di ossigeno** [19].
 - Installare **forni con bruciatori ad alta luminosità**. Questa tipologia di bruciatore effettua una preventiva bruciatura di una parte di combustibile per generare fuliggine, la quale viene poi bruciata in una seconda fase per generare una fiamma ad alta luminosità. Avendo temperature di fiamma più bassa si ottengono meno emissioni di NO_x, maggior vita utile del forno e maggiore efficienza termica di circa il 4% [19].
 - Installare **forni a combustione oscillante**, che attraverso il movimento reciproco tra combustibile e bruciatore, dà origine a zone ricche di combustibile alternate a zone a miscela magra e, di conseguenza aumenta il trasferimento del calore incrementando la luminosità della fiamma e i fenomeni di turbolenza. Tale forno può essere realizzato anche riadattando l'impianto già presente e, in particolare, montando una **valvola oscillante** sulla linea di alimentazione di ciascun bruciatore già presente nell'impianto e un **controllore elettronico** che gestisca le diverse valvole contemporaneamente [19].
 - Installare **forni a combustione sommersa** (Submerged Combustion Melters - SCM, anche detti Submerged Burner Melters – SBM) [19], [22], [37]. Il forno SCM si basa sul

miglioramento del trasferimento di calore miscelando i combustibili e l'ossidante con le materie prime. Lo scambio di calore avviene generando la fiamma di combustione direttamente dentro e sotto la superficie del materiale fuso. La combustione può avvenire considerando come comburente sia aria che ossigeno puro. Posizionando i bruciatori sul fondo del forno per vetro si ottiene un migliore trasferimento di calore e moti convettivi turbolenti nella massa fusa. La riduzione dell'intensità energetica si ottiene principalmente attraverso una riduzione del tempo di permanenza nel forno. Si stimano risparmi energetici pari al 5-7,5% rispetto ai tradizionali forni a ossi-combustione. Tra i vantaggi di questo sistema si annoverano: un avvio ed uno spegnimento più rapido (2-3 ore), la possibilità di combinare la fusione sommersa con un approccio di fusione segmentato, la possibilità di cambiare più rapidamente la composizione della carica e la ricetta del vetro, la maggior superficie di contatto tra la fiamma e le particelle di carica da fondere, l'ottenimento di una composizione chimica più uniforme del vetro fuso, basse emissioni di NO_x, la possibilità di fondere particelle di vetro di varie dimensioni (più o meno fini), le minori dimensioni complessive del forno (che risulta più compatto), bassi costi d'impianto, una vita utile del forno lunga (non si usano mattoni ceramici refrattari costosi in questo sistema) e, infine, la maggior sicurezza del forno (esso ha pareti fredde, quindi non servono sistemi di protezioni dal calore). Questa tecnologia ha, però, i seguenti svantaggi: può essere utilizzata solo se il combustibile è gas naturale, genera vetro di scarsa qualità a causa dell'eccessiva formazione di bolle, usura più rapidamente il forno, rende difficile effettuare controlli visivi sullo sviluppo del processo di fusione e, infine, determina il raggiungimento di temperature molto alte (1350°C se il comburente usato è aria, 1550°C se il comburente è ossigeno puro) e più sono alte le temperature raggiunte, più si ottengono perdite cospicue di calore nella vasca dell'acqua di raffreddamento.

- Installare **forni a combustione con mezzi porosi** (porous media combustion PMC, o porous burners). In questi forni, il processo di combustione non avviene a fiamma libera, ma, al contrario, si controlla la reazione facendola avvenire all'interno di un mezzo poroso in grado di resistere alle alte temperature [38]. Un materiale poroso è un materiale avente "vuoti connessi", attraverso i quali un fluido può penetrare nel mezzo [39]. I forni PMC lavorano in un ambiente a eccesso di entalpia, mantenendo la combustione all'interno del mezzo poroso con elevate proprietà di trasmissione di calore e comportando ricircoli interni di energia termica. Grazie alla stabilità di combustione (che contrasta le fluttuazioni della qualità del combustibile in ingresso), al maggior scambio termico per radiazione, alla capacità di controllare la temperatura di combustione evitando che sia troppo alta e, infine, alla capacità di ottenere una distribuzione più uniforme dell'ossigeno che fa da comburente, questi forni consentono miglior controllabilità del processo di fusione e, dunque, una combustione con bassi tassi di emissioni di NO_x e CO₂, un ridotto consumo energetico e prodotti in vetro di alta qualità [40]. Questo tipo di forno è applicabile solo utilizzando il gas naturale come combustibile.



Figura 31. schema di funzionamento di un forno a fusione sommersa [40].

- Installare **forni a fusione elettrica**. In base alle capacità produttive e ai volumi di vendita dell'impianto, talvolta, può convenire sostituire l'utilizzo di combustibili fossili con l'utilizzo di energia elettrica. Di solito i forni a fusione elettrica offrono una maggiore efficienza termica diretta rispetto ai forni a combustibile fossile e, pertanto, determinano una maggior velocità di fusione. In alcuni casi, inoltre, l'energia elettrica costituisce una materia prima con costo inferiore rispetto al combustibile fossile. In aggiunta, non sfruttando la combustione i forni elettrici non producono né NOx, né particolato e pertanto sono da ritenersi superiori ai forni a combustione dal punto di vista della sostenibilità ambientale. I forni elettrici sono usati tipicamente per bassi volumi produttivi, inferiori circa a 70 Ton/day, tuttavia fornaci più grandi (ovvero che consentono volumi produttivi maggiori), potrebbero essere preferibili rispetto ai tradizionali forni a combustione in base al rapporto tra i prezzi locali di elettricità e combustibile. La produzione di fibra, di cristalleria o di manufatti speciali in vetro è il campo in cui i forni elettrici sono maggiormente impiegati [19], [31], [41].
- In analogia ai forni a combustione, **ottimizzare la posizione degli elettrodi** nei forni a combustione elettrica, regolando l'angolo che essi formano con la superficie del vetro fuso. Questa soluzione consente di uniformare la temperatura del forno, oppure al contrario di ottenere zone più calde e più fredde [19], [42].
- In analogia ai forni a combustione, installare **top-heating electric furnace** (posizionando gli elettrodi in verticale sul tetto del forno) ai fini aumentare gli scambi termici tra elettrodi e vetro fuso [19].
- Installare **forni a boosting elettrico** [19], [32].
- Installare **forni di combustione "a segmenti"**. Questo forno viene così chiamato in quanto il processo di fusione è segmentato in 4 zone: preriscaldamento della carica, fusione primaria, fusione secondaria e affinaggio. In tali forni, mentre la carica principale viene fusa nel forno elettrico, il rottame viene introdotto in una zona del forno separata dalla restante carica e fuso mediante ossi-combustione. Questo forno produce poche emissioni ed ha alta efficienza termica, tuttavia necessita di un'intensa attività manutentiva e ha altissimi costi operativi [19], [22], [43]. Un esempio di questo forno è il P-10 Process sviluppato dall'azienda PPG. Come riportato da, visti gli eccessivi costi operativi, l'azienda PPG ha smesso di produrre questo forno.
- Installare **forni di fusione al plasma** [19], [20], [22]. Le particelle che costituiscono la carica di vetro vengono disperse e fuse dentro ad un getto di plasma termico, che è ottenuto

bruciando ossigeno puro in un ambiente soggetto a un forte campo elettromagnetico. Il plasma trasferisce grandi quantità di calore al vetro, fondendo rapidamente le particelle di carica [44]. La struttura del forno, inoltre, può essere conformata in modo che le reazioni di decomposizione dei gas di carbonato sia rimossa durante il trattamento in volo, ossia direttamente durante il processo di fusione. In questo modo, la durata del processo risulta notevolmente ridotta sia perché il plasma fonde più rapidamente il vetro rispetto ad un tradizionale forno a combustione aria-combustibile o ossigeno-combustibile, sia perché l'operazione di affinaggio del vetro e rimozione dei gas viene effettuata assieme alla vera e propria fusione (Figura 32).

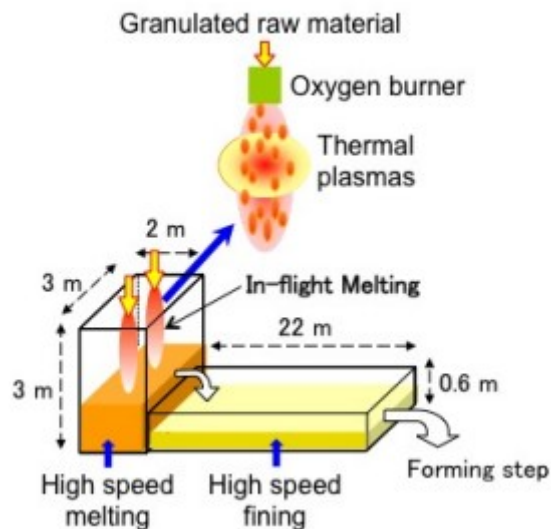


Figura 32. schema di funzionamento di un forno di fusione al plasma [44].

- Sostituire la fusione in forno con la produzione di vetro mediante **processo chimico "sol-gel"** [45]. Un approccio chimico per produrre vetro e il processo sol-gel, mediante cui il vetro è generato a temperature poco più alte di quella ambiente, eliminando la necessità di effettuare operazioni di fusione ad alte temperature e, conseguentemente, riducendo il consumo di energia d'impianto. Il processo inizia quando una soluzione costituita da acqua, un acido organico e TMS (tetramethoxysilane) viene preparata all'interno di un vassoio leggermente riscaldato (tra 23°C e 80°C). Durante il miscelamento delle sostanze, si verificano sia le reazioni di idrolisi, sia le reazioni di condensazione polimerica. Con l'idrolisi il silicone e l'acqua danno origine a molecole di idrossido di silicone. Poi, durante la fase di condensazione le molecole vengono rotte per formare una soluzione di acqua e polimeri di ossido di silicone (sol stage). La soluzione viene inserita in uno stampo a temperatura ambiente, quindi aumentando la temperatura a circa 70° e mantenendola tale per 2 min, si fa avvenire la reazione di gelificazione (sol-gel stage). Infine, si fa solidificare il gel inserendolo in forno a temperature che variano tra 70°C e 200°C circa per 1-3 giorni (in base alla densità desiderata). Il processo sol-gel è "energy-saving" perché avviene a temperature poco superiori alla temperatura ambiente e genera prodotti "near-net shape". Tuttavia, ad oggi è poco utilizzato perché è difficile da utilizzare in impianti ad alte capacità e alti ritmi produttivi e perché genera vetro fragile che facilmente si rompe in cristalli granulari [36].

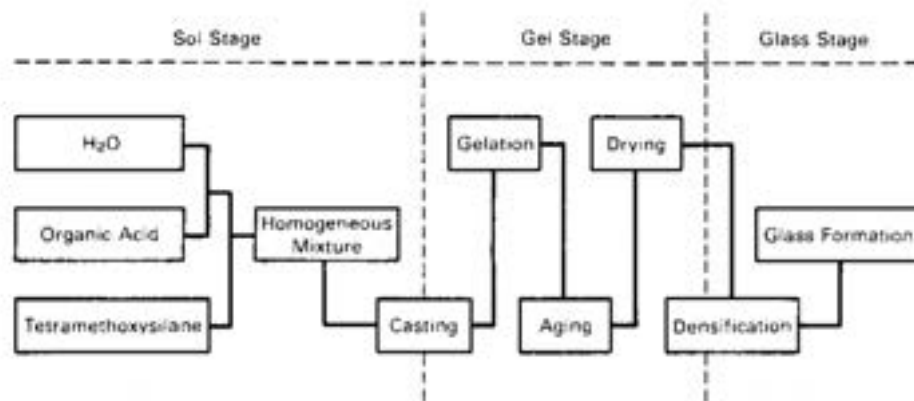


Figura 33. reazione chimica sol-gel di formazione del vetro [36].

● **Soluzioni riguardanti i sistemi di recupero o rigenerazione dei gas di scarico:**

- Installare **forni recuperativi** (“recuperative furnaces”) e **bruciatori recuperativi** (“recuperative burners”) quali il SORG Flex Melter, soprattutto se alimentati da ossi-combustione. Tali forni permettono di preriscaldare l'aria comburente in ingresso alla camera di combustione con il calore recuperato dai fumi di scarico. Le temperature di preriscaldamento dell'aria sono limitate a circa 600-800°C per i recuperatori metallici, e il calore recuperato da questo sistema è quindi inferiore a quello dei forni rigenerativi. Tuttavia, questi forni tendono ad avere una distribuzione più uniforme di calore (fusione migliore) in quando non ci sono variazioni continue della temperatura dei checkers. Per il funzionamento di tali forni è necessario installare nell’impianto appositi **scambiatori di calore**. I bruciatori recuperativi sono utilizzati principalmente per la produzione di fibra di vetro, in forni di dimensioni piccole, oppure in processi di fusione che avvengono a basse temperature (tra i 700 °C e i 1100 °C). Questi forni possono essere impiegati solo per riscaldamento a combustibile o a boosting elettrico [19], [30], [46].
- Installare **forni rigenerativi** (“regenerative furnaces”), soprattutto se alimentati da ossi-combustione [19], [43]. Anche tali forni (come quelli recuperativi) servono per preriscaldare l’aria comburente sfruttando il calore dei gas di scarico. Essi, tuttavia, hanno un diverso principio di funzionamento e si basano sull’accumulo di calore su breve termine attraverso rigeneratori ceramici. I forni rigenerativi sono in grado di recuperare l’85-90% del calore contenuto nei fumi e forniscono temperature di preriscaldamento dell’aria maggiori e più uniformemente distribuite rispetto ai forni recuperativi. Tali forni, dunque, sono adatti per processi che si sviluppano a temperature elevate (800-1500 °C) e, per poter funzionare, richiedono l’installazione di **rigeneratori ceramici**. Come già anticipato si può optare per due soluzioni di rigenerazione:
 - **Side-fired furnaces** (o **cross-fired furnaces**), che sono il sistema più comune, ma meno efficiente.
 - **End-fired furnaces**

In entrambe le casistiche è possibile adottare più strati di mattone refrattario, detti “multi-pass regenerators”.

- **Sostituire i mattoni refrattari** nei rigeneratori con materiali opportunamente conformati. Questa soluzione aumenta l’intensità di scambio termico del rigeneratore, consentendo risparmi energetici di circa il 7%. Ad esempio, possono essere impiegati i cosiddetti “**corrugated cruciforms**”, ovvero mattoni in materiale refrattario altamente performante a forma di croce [19].

- Adottare dei bruciatori a bassa produzione di NO_x (**Low NO_x burners**, come ad esempio Sorg LoNO_x®) **per i forni a rigenerazione o a recupero**. Infatti, suddetti forni necessitano di avere fiamme specifiche che consentano il corretto funzionamento. Questi bruciatori bruciano meglio la fuliggine nella fiamma, aumentano il tasso di scambio termico e riducono le temperature di fiamme, garantendo un aumento dei tassi di produzione del forno e dell'efficienza termica. Impiegando i bruciatori NO_x e dunque riducendo l'utilizzo di combustibile e di NO_x (eliminando nitrogeno), i fumi di scarico possono essere ridotti fino all'80% [19].
- **Aumentare le dimensioni del rigeneratore** in quanto un rigeneratore più grande consentirà un maggior recupero di calore dei gas di scarico, rilasciandoli in ambiente a temperatura minore [19].
- Effettuare una combustione usando **aria sintetica**, quindi una miscela di ossigeno (comburente) e gas di scarico derivanti dalla rigenerazione, che vengono opportunamente trasformati in combustibile [19]. Questo sistema si può pertanto implementare solo nelle fornaci in cui viene immesso anche l'ossigeno. L'aria sintetica ha composizione simile al comburente utilizzato nei sistemi tradizionali, quindi al fine di utilizzare aria sintetica nella combustione non è necessario modificare né i bruciatori del forno ad ossi-combustione, né il design del forno. I sistemi ad aria sintetica hanno anche una combustione che può essere controllata con maggiore facilità, ma possono causare maggiore usura dei materiali refrattari. La tecnologia **OPTIMELT** illustrata in [47] costituisce un esempio di applicazione della soluzione ad aria sintetica proposta. Il sistema OPTIMELT utilizza il calore proveniente dai gas di scarico per preriscaldare l'ossigeno in ingresso alla combustione mediante un sistema di rigenerazione chiamato "Thermo-Chemical Regenerator – TCR". In un secondo momento, una parte dei gas di scarico freddi viene fatta ricircolare nel sistema e viene portata in un secondo rigeneratore già preriscaldato. Qui i gas freddi vengono miscelati a combustibile (solitamente CH₄) e i checker caldi del secondo rigeneratore riscaldano la miscela ottenuta. Quando la miscela raggiunge una certa temperatura, si verificano alcune reazioni chimiche endotermiche che danno origine ad un nuovo gas (detto "syngas"). Il syngas viene miscelato a ossigeno e reintrodotta nel forno per dare origine a una nuova combustione.
- **Recuperare il calore residuo nei gas di scarico e usarlo per preriscaldare il vapore, i rottami o le materie prime** in ingresso ai forni [19]. Il vapore caldo può essere usato per generare energia con turbine a vapore, alimentare compressori o fan o preriscaldare la carica in ingresso all'impianto. Invece, preriscaldare direttamente la carica, anziché introdurla a freddo, genera risparmio energetico perché diminuisce il tempo necessario a far avvenire la fusione completa. Come risultato, aumenta la capacità produttiva della fornace. Al fine di preriscaldare la carica si possono adottare tecnologie dirette, indirette o ibride:
 - I **preriscaldatori diretti** si ottengono depositando il rottame in una zona a contatto diretto con i fumi di scarico, in una disposizione a flusso incrociato. In tal caso, occorre prevedere dei sistemi di **bypass** nel caso in cui non si voglia o non si possa effettuare il preriscaldamento. Un esempio di preriscaldatori diretti è costituito dai "**raining bed batch/cullet preheaters**". In questi sistemi di scambio termico si inserisce la carica o il rottame nella parte superiore del preriscaldatore. Le particelle di carica/rottame cascano a pioggia e vengono investite dai fumi di scarico caldi che salgono in senso opposto. Dei deflettori interni deviano appositamente le particelle di carica/rottame e li tengono a contatto diretto coi gas di scarico. Con questa tecnica, nel caso di ossicombustione, si può ridurre il consumo. Il preriscaldamento diretto è in grado di far raggiungere ai rottami 400 °C
 - I **preriscaldatori indiretti** sono costituiti da scambiatori di calore a piastre a flusso incrociato. Il preriscaldamento indiretto può scaldare i rottami fino a 300°C. Tra questi, innovativi sono quelli che sfruttano recupero di calore dai fumi di

combustione mediante sistema ORC e utilizzo dell'energia recuperata per il teleriscaldamento delle strutture aziendali.

- I **preriscaldatori diretti combinati con filtri ciclone o precipitatori elettrostatici** sono sistemi che sfruttano la rimozione di particolato dalle fornaci (con filtri o precipitatori elettrostatici) per preriscaldare il rottame (Figura 34).

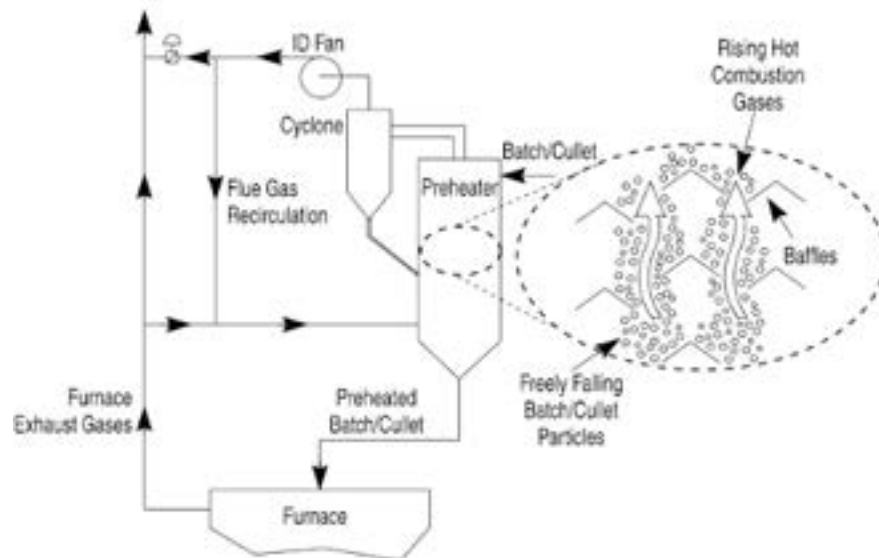


Figura 34. schema di un preriscaldatore che sfrutta il funzionamento congiunto di ciclone e riscaldamento diretto.

Effettuare preriscaldamento consentirà di ridurre le emissioni di NO_x e nel caso di preriscaldatore diretto saranno anche ridotte le emissioni di SO_2 , HF e HCL. Installando un preriscaldatore, inoltre, la capacità della fornace aumenta del 10-15% senza comprometterne la vita utile. Nel preriscaldamento, possono verificarsi problemi con i rottami molto fini, che, a causa del calore e della pressione del letto di rottame, possono legarsi tra loro il calore e formare grumi. Essi, inoltre, danno origine ad un letto di rottame caldo che, se si muove troppo lentamente, riduce la sezione del canale di fuoriuscita dei fumi e limita il flusso dei gas di scarico.

- Installare apposite **caldaie a recupero di calore** per recuperare il calore contenuto nei fumi di scarico dei forni e usarlo per generare vapore [19], [48]. La temperatura dei gas di scarico in uscita dal rigeneratore è solitamente compresa tra 300 e 600°C. La cattura del calore residuo può essere effettuata prima o dopo la pulizia dei fumi e la quantità di calore che può essere recuperata dipende dalle temperature di uscita dalla caldaia (che sono limitate a circa 200°C per evitare la condensazione sui tubi della caldaia stessa). Il vapore prodotto può essere usato per generare energia (mediante turbine a vapore), per azionare soffianti o compressori e/o per preriscaldare e asciugare il rottame secco. Uno svantaggio di questa soluzione è che in molti casi, la quantità di energia recuperabile è bassa per una produzione efficiente di energia elettrica, dunque può essere necessaria una cottura supplementare per generare vapore surriscaldato necessario ad azionare le turbine. Le caldaie a calore residuo sono in uso industriale principalmente in impianti che producono vetro float e, solo raramente in impianti che realizzano contenitori in vetro. Tra le caldaie più consigliate ci sono:
 - **Caldaie a condensazione**
 - **Caldaie con bruciatori "premix burners"**
 - **Caldaie con bruciatori "sealed burners"**
 - **Caldaie con bruciatori "low NOx burners"**
 - **Caldaie con bruciatori "recuperative burners"**

- **Caldaje con bruciatori "high luminosity burners (oxy-fuel)"**

- Se già presenti, operare un revamping delle caldaie d'impianto. Le caldaie devono essere selezionate ottimizzandone la taglia.
- Installare **sistemi termofotovoltaici (TPV) nel sistema di rigenerazione del forno** per recuperare le perdite di calore e convertirle in energia elettrica (in letteratura NON ci sono casi applicativi di questa soluzione) [34]. I TPV sono sistemi che sfruttano l'effetto fotovoltaico per generare elettricità da una sorgente ad alta temperatura (tra 1574 °C e 2274 °C). Le celle fotovoltaiche convertono parte del calore (le radiazioni aventi lunghezza d'onda inferiore ad un certo limite) in elettricità, mentre le restanti radiazioni vengono riflesse e restituite alla sorgente di calore. Il materiale usato per costruire TPV può essere Ga, GaSb, Si o InGaAs e, rispettivamente, può assorbire radiazioni di lunghezza inferiore a 1,7 μm, 1,1 μm o tra 0,9 μm e 3,5 μm.

Un rigeneratore può recuperare fino al 58% del calore contenuto nei gas di scarico. Tuttavia, tipicamente la percentuale di energia recuperata dal rigeneratore si attesta su valori pari al 50% e i gas di scarico escono dal forno a temperature pari a circa 550-650 °C. Resta a disposizione una certa quantità di energia (circa il 30%) che può essere recuperata incorporando TPV dentro al sistema di rigenerazione del forno. Con il calore recuperato dai TPV si può produrre una quantità di energia elettrica corrispondente a circa il 3% del consumo d'impianto. Tuttavia, l'estrazione di calore da parte dei TPV può originare un abbassamento di temperatura dei checker e, conseguentemente, questo tipo d'intervento può richiedere che si aumenti la taglia del rigeneratore.

La letteratura propone l'utilizzo di TPV per il recupero energetico solo a livello teorico [34], ma **non** si riscontrano casi applicativi di utilizzo di TPV nei forni di impianti reali, pertanto non si hanno dati numerici che confermino la bontà di questo intervento migliorativo.

- **Soluzioni riguardanti gli impianti di trattamento dell'acqua e delle emissioni inquinanti.**

- Sostituire gli impianti di **trattamento dell'acqua** con impianti più avanzati (**revamping**).

3.3.3 Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di fusione e affinaggio

Oltre agli interventi migliorativi proposti dalla letteratura, si sono reperiti altri interventi mediante le diagnosi energetiche effettuate negli anni da ENEA. Di seguito un riepilogo di tali soluzioni riscontrate nella fase di processo corrispondente alla fusione e affinaggio:

- **Soluzioni riguardanti i sistemi di recupero o rigenerazione dei gas di scarico.**

- Sostituire i sistemi di recupero dei gas di scarico indiretti a ciclo a vapore con **sistemi di recupero indiretti a ciclo "Organic Rankine Cycle – ORC"** (che sfruttano metano o altri fluidi organici al posto dell'acqua). I fumi vengono miscelati con aria esterna ed inviati ad appositi scambiatori che consentono il trasferimento di calore ad un circuito, generalmente, ad olio diatermico. Per questo intervento si prevede un investimento economico iniziale di circa 7,05 M€, ma si prevedono risparmi energetici pari a circa 1.150 tep di gas naturale per il teleriscaldamento dei magazzini, circa 360 tep di energia elettrica per produrre aria compressa e circa 550 tep di energia elettrica per alimentare il ciclo ORC stesso (auto-consumo). I vantaggi di questo sistema di recupero sono: bassa temperatura operativa, alta temperatura di condensazione (che semplifica le necessità impiantistiche), nessuno scarico in atmosfera in quanto il ciclo ORC è un ciclo chiuso, loop di connessione ad acqua surriscaldata che evita i rischi connessi all'uso di oli diatermici, bassa rumorosità, accoppiamento diretto turbina-generatore senza perdite di efficienza, possibilità d'impiego di cuscinetti ceramici per garantire una lunga vita operativa non-stop.
- Installare un **assorbitore atto alla produzione di energia frigorifera** (in ausilio ai chiller attuali), che **accumuli l'energia del vapore** in eccesso (già riscaldato, ma non utilizzato per la produzione di vetro) per il raffreddamento di processo. Questa soluzione funziona

- particolarmente bene in estate, quando il fabbisogno di vapore dello stabilimento è ridotto rispetto al vapore prodotto.
- Sostituire le caldaie presenti nell’impianto con pompe di calore ad alto rendimento (COP>4,5).
 - **Soluzioni riguardanti gli impianti di prelievo, trattamento e riciclo di acqua, aria ed emissioni inquinanti**
 - Installare **elettrofiltri avanzati per trattare i fumi** e ripulirli prima di immetterli in atmosfera. I filtri più avanzati in ambito di trattamento di aria e sistemi di ventilazione sono quelli conformi alla norma EN ISO 16890. I principali vantaggi apportati dall’installazione di questa tipologia di filtri sono: maggior longevità operativa (con conseguente riduzione dei costi di gestione e manutenzione), perdite di carico ridotte (con conseguente risparmio energetico), nessun costo di ricambio filtro, elevata riduzione della carica batterica e dei virus nell’aria, ottima soluzione contro l’inquinamento outdoor da PM10, PM2,5 e PM1, elevata efficienza di filtrazione su particelle 0,3 ÷ 0,4 micron, paragonabile alle classi E10, E11 secondo la normativa EN 1822:2009 e alle classi ePM1, ePM2,5, ePM10 secondo la EN ISO 16890.
 - **Recuperare il calore residuo a valle del sistema di filtraggio e trattamento fumi.** Il calore recuperato può essere usato per produrre vapore per scopi di riscaldamento dell’ambiente o produrre aria compressa per le esigenze di processo.
 - **Installare sistemi avanzati di abbattimento degli ossidi di azoto nella ciminiera dei fumi** posta a valle del forno.
 - **Sostituire e rinnovare le UTA** (Unità di trattamento dell’aria) nelle clean room, utilizzando UTA inverterizzate, in modo che siano in grado di regolare la quantità di aria immessa in ambiente tramite rilevatori di temperatura interna e di concentrazione di CO₂. Questo permetterebbe di risparmiare energia elettrica per la ventilazione e per la produzione di energia frigorifera.
 - **Sostituire gli spurghi di condensa manuali con spurghi automatici più efficienti.**

3.4 Condizionamento e formatura

Dopo che la massa di vetro fusa e raffinata si è in parte raffreddata e ha riposato, esce dal forno fusorio mediante canali (detti “neck” se si produce float glass e “throat” in tutti gli altri casi). A questo entra negli “**avanforni**” (in inglese “forehearts”), ossia i canali principali che trasportano il vetro fuso alle macchine formatrici. L’unico processo che non richiede avanforni è quello che produce vetro float [34].

Una volta attraversati i canali, il vetro entra nelle macchine da formatura dove assume la forma finale.

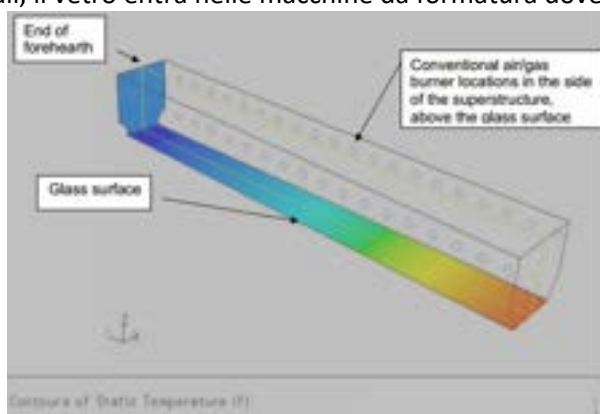


Figura 35. rappresentazione di un avanforno e della distribuzione di temperatura statica al suo interno [49]

I canali degli avanforni sono costituiti da materiale refrattario e vengono riscaldati per evitare che il vetro trasportato si raffreddi più del necessario. La funzione principale degli avanforni è quella di condizionare il vetro, in modo da trasportarlo alla formatura (a velocità costante, detta anche “pull rate”) portandolo contemporaneamente nelle condizioni ideali per il processo di formatura stesso. Al termine delle operazioni

di condizionamento, gli avanfori forniscono un vetro stabile e caratterizzato da temperatura uniformemente distribuita (sia verticalmente che lateralmente) e pari a quella ideale per la formatura.

L'operazione di condizionamento è cruciale affinché non si abbiano gradienti di temperatura nella massa di vetro fusa, che potrebbero dare origine a zone a diversa viscosità e, dunque, generare difetti visibili nel semilavorato ottenuto dopo la formatura.

Gli avanfori possono essere **riscaldati a gas** (mediante bruciatori), **elettronicamente** (mediante elettrodi) o in modo ibrido (sia con combustibile fossile che con energia elettrica). Le prestazioni degli avanfori dipendono dagli intervalli di pull rate e di temperatura del vetro trasportato per i quali il sistema è in grado di assicurare che la produzione mantenga caratteristiche di qualità accettabili. Pertanto, gli avanfori sono tanto migliori quanto più sono capaci di reagire velocemente e mantenere stabile e uniforme la temperatura dentro alla massa di vetro (garantendo un grado sufficiente di condizionamento), anche se quest'ultimo esce dal forno fusorio con temperature della goccia elevate e scorrendo nei canali con alta velocità di tiro. Solitamente, gli avanfori elettrici o nuovi sono più efficienti dal punto di vista energetico rispetto ai vecchi modelli (tipicamente a gas). Completata la condizionatura, il vetro giunge alle macchine da formatura. La forma e il funzionamento della macchina formatrice cambiano a seconda del tipo di processo e del tipo di prodotto finito che si desidera ottenere [19]:

1. **Contenitore di vetro**
 - a. **vetro cavo** (produzione di contenitori per il settore di food e beverage)
 - b. **vetro casalingo e vetro bianco di qualità** (produzione di articoli per la casa, profumeria e contenitori per il settore farmaceutico)
2. **Vetro piano** (produzione di articoli per il settore automotive e building)
3. **Fibra di vetro** (produzione del filamento continuo e della lana di vetro).

Solitamente, quando si ha a che fare con la produzione di fibra di vetro o vetro piano ("processo "float glass"), si attua un processo di formatura tale che la massa di vetro viene modellata in continuo. Quando, invece, si desidera produrre contenitori di vetro, si attua un processo di formatura discontinuo tale che la massa di vetro fusa viene prima tagliata in gocce di peso e forma costante ("gobs") e successivamente consegnata alla macchina formatrice e deformata secondo le geometrie desiderate. Di seguito si distingue la trattazione del processo di formatura in base al tipo di prodotto finito che si vuole ottenere. Prima, però, si ricorda che qualsiasi tipo di processo di formatura si applichi, si effettueranno operazioni ad alta intensità energetica, che implicano il consumo dei seguenti vettori energetici: energia elettrica, combustibili fossili (carbone, olio combustibile BTZ e/o gas tecnici), metano, ossigeno, aria compressa ed eventuali altri elementi quali vapore, acqua calda o gasolio.

3.4.1 Formatura nel caso di contenitori di vetro (vetro cavo, casalingo o bianco di qualità)

Nella produzione di vetro per contenitori, il flusso di vetro fuso lascia l'avanforno attraverso un orificio a forma di anello (fuoriuscendo a velocità costante). Mediante mezzi meccanici, poi, viene tagliato in porzioni di peso e forma definiti, noti come "gobs" (o gocce).

I gobs vengono fatti cadere su uno scivolo detto "gob feeder" che, a sua volta, consegna le gocce alle macchine formatrici. Più gocce alla volta vengono distribuite a più stazioni di formatura. Le macchine formatrici conferiscono ai gobs la forma del prodotto finito attraverso uno o più processi automatizzati quali la pressatura, la soffiatura, la presso-soffiatura o lo stampaggio [19]. Come regola generale, la pressatura viene utilizzata per la produzione di articoli a "bocca larga" (vassoi, coppe, ecc.). Il processo soffio-soffio, invece, essendo il processo più versatile tra quelli disponibili, viene preferito per produrre contenitori standard e con forme complesse. Infine, il presso-soffio viene utilizzato per produrre vasellame e bottiglie. In generale, le macchine di formatura standard sono in grado di produrre più di 200 articoli in vetro al minuto.

Nel caso di **pressatura semplice**, i gobs cadono dentro ad uno stampo preriscaldato avente forma pari al negativo della geometria che si desidera ottenere. A questo punto, il vetro fuso viene pressato da un punzone caldo fino a raggiungere la forma desiderata.

Nel **soffio-soffio**, invece, si fanno cadere le gocce in uno stampo dove vengono prima sottoposte a preliminari operazioni di soffiatura in modo da essere preformate, poi vengono sottoposte ad una seconda soffiatura che, iniettando aria dentro alle gocce, spinge il vetro a aderire alle pareti dello stampo e gli conferisce la forma finale.

Nel **presso-soffio**, infine, si fanno cadere le gocce in uno stampo dove vengono prima sottoposte a preliminari operazioni sia di pressatura che di soffiatura in modo da essere preformate, poi vengono sottoposte ad una seconda soffiatura che, iniettando aria dentro alle gocce, spinge il vetro a aderire alle pareti dello stampo e gli conferisce la forma finale.

3.4.2 Formatura nel caso di vetro piano

Il vetro piano può essere prodotto con tre processi diversi:

- 1) il processo di vetro galleggiante, noto come “float glass process”
- 2) la laminazione continua
- 3) la trafilatura continua (updraw, downdraw, overflow fusion)

Di seguito si descrivono i tre processi.

1) Ad oggi, il 90% del **vetro piano** viene prodotto con la tecnica **float glass**. Questo processo non prevede l'utilizzo di avanfori. Infatti, secondo questa tecnica, il vetro fuso e condizionato viene direttamente versato ad un'estremità di un bagno di stagno fuso in atmosfera controllata [34].

Il vetro galleggia e scorre sulla superficie costituita dalla lega di stagno, dove avanza espandendosi perché viene continuamente tirato (dall'altra estremità del bagno). Il vetro non è miscibile con lo stagno fuso, né tantomeno è da quest'ultimo bagnabile, pertanto il risultato è la formazione sulla lastra di due superfici (una in contatto con lo stagno, e una con l'atmosfera del bagno float) perfettamente piane e parallele, prive di rugosità superficiali. La temperatura all'ingresso della camera di galleggiamento è abbastanza alta (circa 980°C) da permettere al vetro di stendersi sul bagno di metallo liquido e formare un film piatto, impedendo la formazione di irregolarità superficiali.

Lo stagno fuso viene continuamente riscaldato mediante elementi radianti elettrici e l'atmosfera controllata (inerte/riducente) nella quale il processo avviene è prodotta miscelando azoto e idrogeno in specifiche quantità (sulla base della composizione del vetro da formare).

Man mano che avanza (trainato e disteso alle estremità da ruote dentate dette “top rolls”), il vetro galleggiante entra in una camera di raffreddamento (tunnel di raffreddamento), dove viene raffreddato fino a una temperatura di circa 590°C. A questo punto, si solidifica e forma un nastro continuo sufficientemente rigido da poter essere sollevato dal bagno di galleggiamento senza deformazioni e danni superficiali da parte dei rulli trasportatori (conveyor rollers).

Il nastro di vetro trasportato dai rulli viene sottoposto ad un nuovo riscaldamento dentro a un forno detto *lehr* di ricottura, che serve a effettuare la cosiddetta “lucidatura a fuoco” e a eliminare eventuali sollecitazioni interne al semilavorato.

Infine, in ultima istanza, il vetro viene tagliato e squadrato in lamine della forma desiderata. Se si vuole che il vetro si rompa in pezzi arrotondati, allora prima della fase di taglio si esegue un'operazione di tempra.

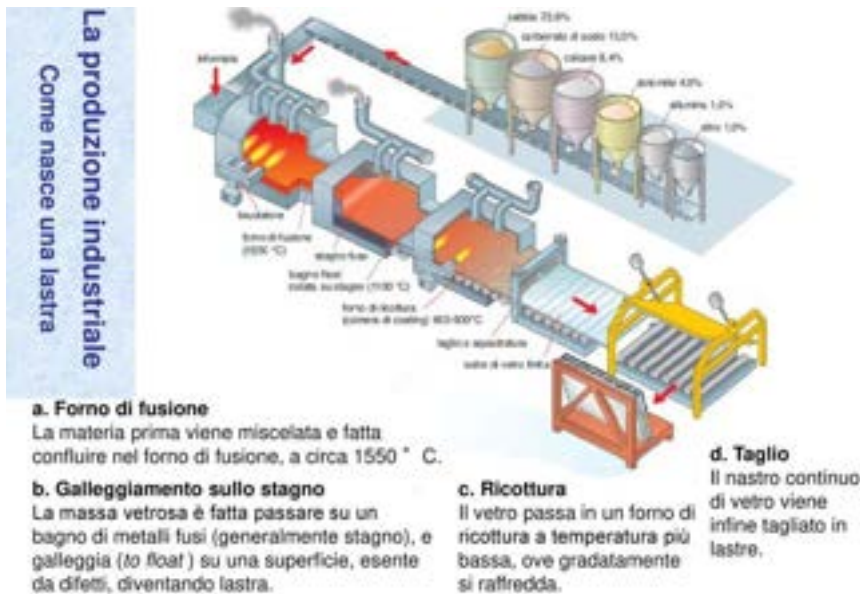


Figura 36. forno fusorio e macchina formatrice usate per produrre il vetro con tecnica "float glass".

Il processo float consente di produrre lamine di vetro con spessori che possono variare tra 2,5 mm a 25 mm, con un throughput rate tipico che supera le 5000 tonnellate di vetro prodotte settimanalmente [19].

2) Nel caso di laminatura continua si realizza **vetro piano**. Questo processo viene preferito al processo float nel caso in cui si vogliano modellare in qualche modo le lastre di vetro prodotte. Un flusso continuo di vetro ad alta temperatura (1040°C) proveniente dal forno fusorio e trasportato dagli avanfori viene versato tra due rulli di ghisa o di acciaio inossidabile che contemporaneamente ruotano e vengono raffreddati ad acqua. I rulli conferiscono al vetro la forma finale, deformandolo solo su un lato o su entrambi e portandolo a 850°C. Per deformare il vetro solo su un lato, si utilizza un rullo inferiore più grande di quello superiore e inciso con il negativo del motivo da imprimere.

Una volta formato, il nastro continuo di vetro laminato viene condotto da rulli trasportatori (conveyor rollers) al forno (lehr) di ricottura. Infine, completata la ricottura, il nastro di vetro viene tagliato. Il processo di laminatura continua può generare lastre con spessori variabili tra 4 mm e 15 mm in base alla distanza reciproca imposta tra rulli e al diametro dei rulli scelto. Visto il ridotto intervallo di spessori ottenibili, la scarsa flessibilità del processo di laminazione continua fa sì che ad oggi, a meno che non si vogliano modellare le lastre di vetro prodotte, sia più spesso utilizzato il processo di tipo float. In generale, comunque, il processo di laminatura continua viene scelto nel caso in cui si vogliano produrre lastre di vetro sottili [19].

3) Nel caso di trafilatura continua si realizza **vetro a filo**. Il processo è del tutto analogo a quello di laminazione continua (sopra descritto), ma anziché far passare il nastro di vetro fuso tra due rulli rotanti, lo si cola in una macchina da trafilatura (Figura 37). All'uscita di tale macchina il vetro fuso viene tirato e forzato ad attraversare una matrice che conferisce al prodotto la forma filamentosa [19].

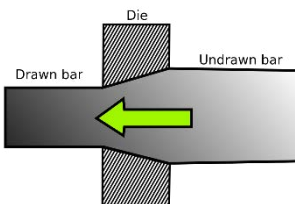


Figura 37 rappresentazione grafica del processo di trafilatura.

3.4.3 Formatura nel caso di fibra di vetro

Per fibra di vetro si intendono i prodotti del processo di produzione del vetro costituiti da fibra di vetro continua (spesso usata per i materiali compositi e per i tessuti), lana di vetro (usata per l'isolamento) e fibra ottica (usata per trasferire segnali ottici).

La **fibra di vetro continua** è un filo continuo, a sua volta costituito da un gran numero di singoli filamenti di vetro. Il processo di formatura parte quando gli avanfori tirano la massa di vetro in uscita dal forno di fusione e la forzano ad attraversare una serie di matrici forate (trafilatura). Ciascuna matrice dispone di numerosi fori (da 1600 a 4000) opportunamente dimensionati. All'uscita della matrice fuoriescono i sottili filamenti di vetro che sono stati trafilati meccanicamente verso il basso ad alta velocità. Appena i fili fuoriescono, vengono avvolti fra di loro a formare la fibra di vetro continua. Infine, si lascia raffreddare il prodotto ottenuto [19].

La **lana di vetro**, invece, viene prodotta nel seguente modo. Innanzitutto, gli avanfori forzano un grosso filamento di vetro a passare attraverso una matrice nella quale, per gravità, viene realizzata la trafileatura. Successivamente, si fa scorrere per gravità il grosso filo di vetro all'interno di un piatto in lega di acciaio (a forma di corona), che ruota rapidamente e ha diverse centinaia di fori sottili intorno alla sua periferia. Il vetro fuso viene, così, espulso attraverso i fori del piatto per mezzo della forza centrifuga e, a seguito di tale processo, si originano filamenti più piccoli. I filamenti più piccoli vengono ulteriormente stesi in fibre più sottili da un getto di gas caldo che soffia ad alta velocità. Le fibre sottili vengono spruzzate con un apposito agente legante, quindi vengono aspirate e raccolte su una superficie in movimento (conveyor) posizionata sotto al piatto rotante. Su tale superficie le fibre di vetro formano un tappeto di fibre aggrovigliate. Il tappeto viene inserito in un forno, dove viene seccato mediante il processo di polimerizzazione dell'agente legante. Infine, il tappeto viene secondo le forme e le dimensioni desiderate [19].

Le **fibre ottiche** sono prodotti che richiedono vetro estremamente puro. Esse sono costituite da un nucleo di vetro altamente rifrangente circondato da una seconda guaina di vetro avente indice di rifrazione più basso. Esistono diversi processi per la produzione di fibra di vetro, tuttavia il più usato è la formatura per estrusione, perché può generare fibre di dimensioni estremamente precise e profili interni ed esterni complicati. I principali vantaggi dell'estrusione sono che utilizza basse temperature di processo e che, rispetto ai metodi di formatura tradizionali come la trafileatura o la soffiatura, può essere effettuata anche su vetro fuso avente viscosità insolitamente elevata [19]. Come riportato nel capitolo 4.3, attualmente la produzione di fibra di vetro è il principale utilizzatore della fusione elettrica, in quanto permette di produrre un prodotto molto omogeneo e di alta qualità.

3.4.4 Tecnologie installate nell'impianto per effettuare le operazioni di condizionamento e formatura

- Avanfori (nastri trasportatori che movimentano e condizionano la massa di vetro fusa)
- Rulli trasportatori (conveyor rollers) da una lavorazione di formatura alla successiva
- Bruciatori per riscaldare i nastri trasportatori
- Macchine per la formatura
 - Pressatura
 - Soffiaggio
 - Presso-soffiatura
 - Stampaggio
 - Laminazione
 - Trafileatura
 - Estrusione
 - Macchine per avvolgere le fibre di vetro tra loro
 - Forno (lehr) di ricottura
 - Taglio
 - ecc.
- Camera float di galleggiamento del vetro sullo stagno (se si produce vetro float)
- Macchine per l'addizione dell'agente legante (se si produce lana di vetro)
- Macchine per la polimerizzazione dell'agente legante (se si produce lana di vetro)

- Bruciatori per riscaldare le macchine da formatura
- Elettrodi
- Compressore e sistemi di iniezione di aria compressa per alimentare le macchine da formatura
- Forni di preriscaldamento degli stampi
- Sistemi di scivolatura dei macchinari da formatura
- Tunnel di raffreddamento e impianti di raffreddamento macchinari (tipicamente scambiatori di calore ad acqua)
- Impianto di prelievo, trattamento e riciclo dell'acqua
- Impianto di iniezione di comburente e combustibile nei forni (compressori)
- Impianto di filtrazione delle emissioni inquinanti in atmosfera (ventilatori, filtri, cicloni, ESP, ecc.)
- Motori elettrici che movimentano i macchinari, i nastri trasportatori, i sistemi ad aria compressa, le pompe per l'acqua di raffreddamento, i soffiatori d'aria per forni, i ventilatori e i fan.

3.4.5 Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di condizionamento e formatura

La maggior parte delle azioni per migliorare e ridurre i consumi energetici, nel caso del processo di formatura, riguarda il funzionamento degli avanfori. Infatti, soprattutto nel processo di produzione di fibre di vetro, gli avanfori sono la seconda causa di consumo dell'energia dopo il forno fusorio e possono usare fino al 40% del combustibile totale impiegato nel processo [19], [49].

Per ridurre i consumi energetici nella zona dell'impianto destinata a condizionamento e formatura si può:

- **Soluzioni riguardanti gli avanfori** [19].
 - Effettuare un **revamping degli avanfori**, installandone di più avanzati. Nel migliorare o sostituire gli avanfori, occorre ottimizzarne il numero, la forma e la posizione, nonché la dimensione dei loro scarichi per aumentare l'efficienza energetica nella zona dell'impianto adibita al condizionamento.
 - Sostituire gli avanfori riscaldati con combustione ad aria con avanfori a ossi-combustione (**oxy-fuel fired foreheart**) [19], [49]. Analogamente a quanto visto nei forni fusori (Paragrafo 4.3), usare ossigeno anziché aria come comburente può ridurre il consumo di combustibile, diminuire le emissioni e aumentare la produttività d'impianto, rendendo più efficiente il processo di riscaldamento degli avanfori.
 - Sostituire gli avanfori a gas con **avanfori elettrici** [19], caratterizzati da minori consumi energetici. Una tecnologia efficiente sono gli avanfori elettrici con "indirect cooling". In essi, degli elettrodi a diretto contatto con il vetro fuso lo riscaldano. Il raffreddamento, invece, avviene per irraggiamento indiretto, inserendo aria fresca nell'avanforno mediante condotti. L'applicazione congiunta di riscaldamento diretto e raffreddamento indiretto (entrambi gestiti da un sistema di controllo) mantiene il vetro alla temperatura necessaria.
- **Soluzioni riguardanti le macchine da formatura.**
 - Sostituire una o più **macchine da formatura** con macchine più avanzate (**revamping**) [19].
 - Isolare termicamente gli estrusori e le altre macchine da formatura per impedire sprechi di calore ed energia (**coibentazione**) [19].
- **Soluzioni riguardanti gli impianti di trattamento dell'acqua e delle emissioni inquinanti.**
 - Sostituire gli impianti di **trattamento dell'acqua** con impianti più avanzati (**revamping**) [19].

3.4.6 Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di condizionamento e formatura

Oltre agli interventi migliorativi proposti dalla letteratura, si sono reperiti altri interventi mediante le diagnosi energetiche effettuate negli anni da ENEA. Di seguito un riepilogo di tali soluzioni riscontrate nella fase di processo corrispondente a condizionamento e formatura:

- **Soluzioni riguardanti le macchine da formatura**
 - Effettuare le operazioni di formatura usando tecniche a vuoto (sinergia tra sistemi a vuoto e ad aria compressa). L'utilizzo del vuoto in sinergia con l'utilizzo di aria compressa in fase di

formatura consente di ridurre i consumi energetici perché velocizza il processo di formatura e contribuisce a ottenere una distribuzione omogenea del vetro.

- **Soluzioni riguardanti i sistemi di recupero dei gas di scarico.**
 - **Recuperare calore dalla ciminiera di scarico del raffreddamento** nella fase dell'impianto adibita al condizionamento del vetro. Questa soluzione ha comportato un investimento economico totale di 81 k€, ma ha generato un risparmio energetico di 219.000 kWh/anno.
- **Soluzioni riguardanti gli impianti di prelievo, trattamento e riciclo di acqua, aria ed emissioni inquinanti**
 - Installare **elettrofiltri avanzati per trattare i fumi** e ripulirli prima di immetterli in atmosfera. I filtri più avanzati in ambito di trattamento di aria e sistemi di ventilazione sono quelli conformi alla norma EN ISO 16890. I principali vantaggi apportati dall'installazione di questa tipologia di filtri sono: maggior longevità operativa (con conseguente riduzione dei costi di gestione e manutenzione), perdite di carico ridotte (con conseguente risparmio energetico), nessun costo di ricambio filtro, elevata riduzione della carica batterica e dei virus nell'aria, ottima soluzione contro l'inquinamento outdoor da PM10, PM2,5 e PM1, elevata efficienza di filtrazione su particelle 0,3 ÷ 0,4 micron, paragonabile alle classi E10, E11 secondo la normativa EN 1822:2009 e alle classi ePM1, ePM2,5, ePM10 secondo la EN ISO 16890.
 - **Recuperare il calore residuo a valle del sistema di filtraggio e trattamento fumi.** Il calore recuperato può essere usato per produrre vapore per scopi di riscaldamento dell'ambiente o produrre aria compressa per le esigenze di processo.
 - **Sostituire e rinnovare le UTA** (Unità di trattamento dell'aria) nelle clean room, utilizzando UTA inverterizzate, in modo che siano in grado di regolare la quantità di aria immessa in ambiente tramite rilevatori di temperatura interna e di concentrazione di CO₂. Questo permetterebbe di risparmiare energia elettrica per la ventilazione e per la produzione di energia frigorifera.

3.5 Finitura

Una volta che si è data la forma desiderata al prodotto di vetro, si possono applicare diversi trattamenti di finitura (seconde o addirittura terze lavorazioni) per influenzare ulteriormente le caratteristiche del risultato finale. Tra i trattamenti più ricorrenti in questa fase del processo di lavorazione si hanno:

- Finitura meccanica
 - Pulitura (lavaggio ed eventuale asciugatura)
 - Molatura
 - Smerigliatura
 - Foratura
 - Intaglio
 - Flessione
 - Assemblaggio
- Finitura chimica
 - Opacificazione
 - Rivestimento (ad esempio la verniciatura)
 - Manganatura
 - Siliconatura
 - Solforazione
- Finitura termica
 - Fusione locale
 - Tempra
 - Ricottura in forno (spesso seguita da riposo e/o tempra, ad esempio l'operazione di autoclavatura)
 - Raffreddamento (con aria fredda, bagno d'acqua o bagno d'olio)

La **ricottura** (già anticipata nel paragrafo 4.4) mira a ridurre le eventuali tensioni interne al vetro riscaldandolo lentamente in un forno, chiamato “lehr”. Il prodotto in vetro viene prima riscaldato ad una temperatura elevata, compresa tra 400°C e 500°C a seconda del prodotto, e poi viene gradualmente raffreddato in modo controllato da un ventilatore fino a raggiungere la temperatura ambiente (temperatura alla quale non possono essere indotte ulteriori tensioni). Come il forno fusorio, anche il lehr può essere alimentato a combustione (tipicamente con gas naturale) o a elettricità. Il processo di ricottura solitamente viene completato in meno di un'ora, anche se i tempi effettivi cambiano in base alle dimensioni del prodotto e al suo spessore di parete.

La **tempra** comprende il riscaldamento uniforme del prodotto in vetro fino ad una temperatura poco più alta della temperatura di deformazione e il successivo brusco raffreddamento delle superfici mediante getti d'aria. Il raffreddamento rapido di tutte le superfici del semilavorato porta all'accumulo di uno stato di sollecitazione (compressione) che nasce se lo strato più esterno si è già completamente raffreddato, mentre il cuore interno è ancora deformabile e sta subendo il ritiro termico tipico del raffreddamento. Il rafforzamento dato dalla tempra può essere applicato al vetro piano o a forme semplici come parabrezza di auto. Affinché il rinforzo termico sia applicabile, il vetro deve avere uno spessore minimo e uniforme su tutto il prodotto (per ridurre al minimo le tensioni interne di compressione) e la forma dell'articolo deve essere tale che tutte le superfici possano essere raffreddate in modo uniforme nello stesso arco di tempo. Per queste ragioni, le bottiglie e i contenitori di vetro non possono essere temprati e richiedono altri processi (perlopiù chimici) per essere rafforzati.

Il **rivestimento superficiale** viene applicato soprattutto a prodotti quali specchi, bottiglie, contenitori e altri oggetti costituiti da spessori molto sottili di vetro. Esso è utilizzato per rinforzare, colorare o conferire nuove proprietà fisiche, chimiche e ottiche ai semilavorati. Il rivestimento, nei contenitori di vetro leggero, di solito viene effettuato con composti organici, che servono per dare alle superfici un certo grado di lubrificazione e prevenire, così, l'abrasione dei prodotti durante la loro manipolazione [19].

In generale, la fase di finitura prevede il consumo dei seguenti vettori energetici: energia elettrica, combustibili fossili (carbone, olio combustibile BTZ e/o gas tecnici), metano, ossigeno (se il forno utilizza ossicombustione) ed eventuali altri elementi quali vapore, acqua calda o gasolio. Questa fase del processo produttivo solitamente non è ad alta intensità energetica, per questo motivo agendo sui macchinari e le tecnologie adibite alla rifinitura si potranno ridurre i consumi dell'intero impianto, ma non in modo particolarmente significativo. Visti i limitati miglioramenti in termini energetici ottenibili in questa fase di processo, la letteratura scientifica non consiglia molti interventi da applicare.

3.5.1 Tecnologie installate nell'impianto per effettuare le operazioni di finitura

- Nastri trasportatori e rulli per la movimentazione dei semilavorati dalla formatura alla finitura
- Macchine per effettuare la finitura (forno da ricottura, vasche per il raffreddamento in acqua o in olio, macchine e camere per il rivestimento superficiale, ecc.)
- Bruciatori per alimentare gli eventuali forni da ricottura o da tempra
- Compressore e sistemi di iniezione di aria compressa per alimentare le macchine
- Motori elettrici che movimentano i macchinari, i nastri trasportatori, i sistemi ad aria compressa, le pompe per l'acqua di raffreddamento, i soffiatori d'aria per forni, i ventilatori e i fan.

3.5.2 Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di finitura

- **Soluzioni riguardanti i rulli e i nastri che trasportano il vetro formato alle fasi di rifinitura.**
 - Riprogettare il **layout** d'impianto per evitare lunghe distanze di trasporto interno del materiale, che potrebbero far raffreddare il vetro e richiedere più energia per riscaldarlo nuovamente. In particolare, si dovrebbe minimizzare la distanza tra il forno fusorio e il forno lehr di ricottura, riducendo più possibile le lunghezze dei nastri trasportatori [19].
 - Ridurre le perdite di energia **isolando i rulli o nastri che trasportano il materiale ai forni da rifinitura** utilizzando materiali a bassa massa termica [19].

- Sostituire sistemi di **trasporto delle materie prime** di tipo pneumatico o a vite (pneumatic conveyors e screw conveyors) con **sistemi di tipo "a nastro"** (conveyor belts) [21]. Tali sistemi, infatti, sono meno energivori rispetto ai sistemi di trasporto pneumatici o di altra natura [19].
- **Soluzioni riguardanti forni lehr, la tempratura e bruciatori ed elettrodi:**
 - Effettuare un **revamping** dei forni già presenti in impianto, modificandoli per renderli più efficienti o sostituendoli con forni della stessa tipologia, ma **tecnologicamente più avanzati** (caratterizzati da bassi consumi energetici). In questo caso, acquistare forni la cui forma della camera di combustione sia stata progettata in modo da ottimizzarne le prestazioni e ridurre al minimo le perdite [19].
 - Installare appositi **sigilli nei bruciatori** del forno per ridurre le perdite d'aria ed impedire trafileamenti che ridurrebbero la temperatura interna. I bruciatori sono dispositivi costituiti da tubi in acciaio che convogliano il gas aria-comburente nella fornace ad una specifica angolazione. In molti casi è presente uno spazio aperto tra il tubo del bruciatore e la parete refrattaria del forno; tale spazio è lasciato per consentire all'aria fredda di entrare nel forno raffreddandone le pareti. Questo flusso di aria fredda impatta negativamente sulla distribuzione di temperature di fiamma nel forno, riducendo l'efficienza di processo [36]. L'installazione di sigilli tra bruciatori e parete refrattaria ovvia a questo problema, riducendo i consumi energetici e anche la quantità di NO_x prodotta. In questo modo aumenta anche la vita utile del sistema di produzione delle fiamme (**burner block**), riducendo così le attività di manutenzione richieste dall'apparato. Lo svantaggio è che, installando tali sigilli, potrebbe essere necessario adottare **maggiori sistemi di raffreddamento** nel forno. I sigilli possono ridurre le perdite fino al 2-3% e abbassare i costi operativi e costi del combustibile di 1,75 e 1,0 punti percentuali rispettivamente. Il payback period di questa soluzione tecnologica è stimato essere pari a circa 4 mesi [19].
 - Installare **guarnizioni, sigilli e "tende" isolanti nella struttura esterna** del forno per ridurre al minimo le perdite d'aria in uscita e, soprattutto, per evitare l'ingresso di aria fredda dall'esterno. L'aria fredda può penetrare nella lehr di ricottura, disturbando la distribuzione del calore e impattando negativamente sull'uso di energia e sulla qualità del prodotto (raffreddamento non uniforme). Per evitare ciò, si può installare una **"tenda" isolante** che minimizza il trafileamento di aria nella lehr [19].
 - **Coibentare il forno** per ridurre le perdite di calore che abbasserebbero la temperatura interna, **rinnovando inoltre i materiali refrattari** sostituendoli con materiali più resistenti all'usura e alla corrosione per aumentare la vita utile della macchina [20]. In sostanza si isola termicamente il forno per impedire sprechi di calore ed energia. La coibentazione del forno può ridurre le perdite fino al 55-65% e ridurre i costi del combustibile di 1,0-1,5 punti percentuali. Il payback period relativo a questa tecnologia è stimato essere inferiore a 2 anni [19]. Lo svantaggio della coibentazione dei forni è che tanto più riduce le perdite di calore e tanto più le pareti refrattarie del forno tenderanno a corrodersi e la vita utile del macchinario sarà ridotta. Pertanto, nell'isolare il forno è necessario ricercare il giusto compromesso tra la riduzione delle perdite di energia e la riduzione della vita utile della macchina [34].
 - Installare **sistemi termofotovoltaici (TPV) nelle pareti del forno** per recuperare le perdite di calore e convertirle in energia elettrica (in letteratura NON ci sono casi applicativi di questa soluzione) [34]. I TPV sono sistemi che sfruttano l'effetto fotovoltaico per generare elettricità da una sorgente ad alta temperatura (tra 1574 °C e 2274 °C). Le celle fotovoltaiche convertono parte del calore (le radiazioni aventi lunghezza d'onda inferiore ad un certo limite) in elettricità, mentre le restanti radiazioni vengono riflesse e restituite alla sorgente di calore. Il materiale usato per costruire TPV può essere Ga, GaSb, Si o InGaAs e, rispettivamente, può assorbire radiazioni di lunghezza inferiore a 1,7 μm, 1,1 μm o tra 0,9 μm e 3,5 μm. Sapendo che in un forno coibentato la superficie che separa il materiale refrattario interno al forno e il materiale isolante si trova a temperature superiori ai 1000 °C,

incorporando TPV dentro alle pareti del forno è possibile consentire al sistema termofotovoltaico di funzionare. Tuttavia, il problema principale di questa soluzione è che, tipicamente, le perdite di calore di un forno ben isolato sono ridotte ($0,1 \div 0,3 \text{ W/cm}^2$) rispetto al flusso di calore necessario ai TPV per funzionare. In questo senso, la soluzione proposta può essere applicata soltanto in due modi: o si isola meno bene il forno, accettando grandi perdite di calore in modo da far al meglio i TPV, oppure si effettua un buon isolamento del forno e si accettano minori densità di potenza dei TPV. La letteratura propone l'utilizzo di questa soluzione di recupero energetico solo a livello teorico, ma **non** si riscontrano casi applicativi di utilizzo di TPV nei forni di impianti reali, pertanto non si hanno dati numerici che confermino la bontà di questo tipo di intervento migliorativo.

- Forni con bruciatori che pre-miscelano aria e combustibile (**premix burners**), per ridurre le perdite d'aria e gli sprechi di energia, impedendo contemporaneamente le infiltrazioni di aria in eccesso. Questa soluzione può portare ad un risparmio energetico fino all'11% in base alla riduzione di aria in eccesso raggiunta [3].
- Installare nei forni dei **gorgogliatori** (bubblers) che, insufflando ossigeno in camera di combustione, migliorino lo scambio termico, uniformino la qualità del prodotto finito e riducano il tempo necessario a completare la fusione. Inoltre, riducono il posizionamento negativo degli elettrodi nel forno. I gorgogliatori non solo devono essere installati, ma il loro posizionamento deve essere studiato ed ottimizzato. Questa soluzione è preferibile quando si usa ossigeno (oxygen bubblers) in quanto si minimizza la creazione di NO_x . Si ha un aumento di efficienza del processo compreso tra il 10 ed il 15%
- **Ottimizzare la posizione dei bruciatori** all'interno della camera di combustione. In particolar modo, occorre ottimizzare l'angolo che la fiamma forma con la superficie del vetro, in quanto suddetto angolo influenza non solo lo scambio di calore, ma anche la formazione di NO_x e di polvere [19], [30], [31]
- Installare **vertically fired furnace**. In questi forni, i bruciatori sono posizionati in modo da dirigere le fiamme quasi verticalmente verso il basso sulla superficie della carica. Rispetto ad un sistema a fiamma orizzontale, questo sistema di fusione fornisce più energia per piede quadrato di superficie della carica, senza aumentare le temperature refrattarie oltre i normali limiti di funzionamento. Pertanto, il forno verticale può fondere più vetro, produrre vetro di qualità superiore e/o aumentare la velocità del processo di fusione (anche del 50%) [19], [30].
- Installare **forno a cottura finale** (end-fired furnace), che è più efficiente rispetto al forno di tipo cross-fired, suddetto forno è caratterizzato da una capacità inferiore [19].
- Installare forni con camere di combustione caratterizzate da stadi ad aria arricchita di ossigeno (**Oxygen Enriched Air Staging**). Con tali forni si riduce la temperatura della fiamma e si uniforma la distribuzione delle temperature di fusione mediante la diminuzione della quantità di ossigeno nella zona a maggior temperatura di fiamma. Preferire soluzioni ad aria arricchita, rispetto all'ossigeno puro fa diminuire le emissioni di NO_x dal 40 al 70% [19].
- Installare **forno a ossi-combustione (oxy-fuel furnace o hot-oxy furnace)** [19], [22], [31]. Questo forno comporta la sostituzione dell'aria di combustione con l'ossigeno (> 90% di purezza). La tecnica può essere utilizzata sia con il gas naturale che con il petrolio come combustibile e determina un risparmio energetico perché elimina la necessità di riscaldare l'azoto atmosferico alla temperatura delle fiamme. Meno aria di combustione deve essere riscaldata e quindi si perde meno energia con i gas di scarico del forno. Interessanti sono i forni a ossi-combustibile di tipo "**Tall Crown**" e i **forni a ossi-combustibile ad aria sintetica**. Questi forni possono essere installati solo se si adotta anche il relativo sistema di rigenerazione dei fumi di scarico dal forno fusorio. Questi ultimi forni sono tipici della produzione di vetro piano (float glass). I vantaggi di usare forni ad ossi-combustione sono principalmente minor rumorosità del processo, tempi di fusione ridotti e maggior qualità del vetro prodotto. Gli svantaggi possono includere maggiore usura dei materiali refrattari con

conseguente aumento dei costi dei materiali da sostituire (questo comporta anche una riduzione della qualità del vetro a causa della contaminazione di particelle dei refrattari), riduzione della vita utile del forno e maggiori costi operativi legati all'approvvigionamento di ossigeno puro.

- Installare **forni a boosting di ossigeno** [31].
- Installare **forni con bruciatori ad alta luminosità o ad alta efficienza**. Questa tipologia di bruciatore effettua una preventiva bruciatura di una parte di combustibile per generare fuliggine, la quale viene poi bruciata in una seconda fase per generare una fiamma ad alta luminosità. Avendo temperature di fiamma più bassa si ottengono meno emissioni di NO_x, maggior vita utile del forno e maggiore efficienza termica di circa il 4% [19].
- Installare **forni da tempra a convezione ad alta velocità** (high speed convection). Un esempio di tali forni è stato proposto dall'azienda finlandese Tamglass. In essi è presente un riscaldatore che, mediante un sistema longitudinale di elementi riscaldanti, trasferisce calore per convezione. Il soffiaggio è diretto da entrambi i lati della superficie del vetro per garantire un riscaldamento uniforme. Questo tipo di forni dovrebbe aumentare la percentuale di calore scambiata con il vetro (oltre il 50%) e, dunque, rendere il processo di tempra più rapido (aumentando la produttività d'impianto). Questo sistema permette anche di ottenere distribuzione di calore più uniforme e miglior controllo della temperatura, generando prodotti dalla maggior qualità. Oltre a ciò, Tamglass dichiara minori costi energetici e maggiore affidabilità di processo [19].
- Se si usano forni per la ricottura, si possono adottare alcune tecnologie, quali i **forni a combustione oscillante**, già descritti nel caso della fusione (paragrafo 4.3.2) per ridurre le emissioni di NO_x e aumentare lo scambio di calore (incrementando la luminosità delle fiamme dei bruciatori e la turbolenza dei moti di combustione), riducendo conseguentemente i consumi energetici [19]. Questa soluzione può essere applicata solo se si effettuano riscaldamenti del vetro (ad esempio nel forno di ricottura) e solo se il forno è riscaldato a combustione ad aria, ad aria arricchita o a ossigeno (non a elettricità).
- Installare **forni a combustione sommersa** (Submerged Combustion Melters - SCM, anche detti Submerged Burner Melters – SBM) [19], [22], [37]. Il forno SCM si basa sul miglioramento del trasferimento di calore miscelando i combustibili e l'ossidante con le materie prime. Lo scambio di calore avviene generando la fiamma di combustione direttamente dentro e sotto la superficie del materiale fuso. La combustione può avvenire considerando come comburente sia aria che ossigeno puro. Posizionando i bruciatori sul fondo del forno per vetro si ottiene un migliore trasferimento di calore e moti convettivi turbolenti nella massa fusa. La riduzione dell'intensità energetica si ottiene principalmente attraverso una riduzione del tempo di permanenza nel forno. Si stimano risparmi energetici pari al 5-7,5% rispetto ai tradizionali forni a ossi-combustione. Tra i vantaggi di questo sistema si annoverano: un avvio ed uno spegnimento più rapido (2-3 ore), la possibilità di combinare la fusione sommersa con un approccio di fusione segmentato, la possibilità di cambiare più rapidamente la composizione della carica e la ricetta del vetro, la maggior superficie di contatto tra la fiamma e le particelle di carica da fondere, l'ottenimento di una composizione chimica più uniforme del vetro fuso, basse emissioni di NO_x, la possibilità di fondere particelle di vetro di varie dimensioni (più o meno fini), le minori dimensioni complessive del forno (che risulta più compatto), bassi costi d'impianto, una vita utile del forno lunga (non si usano mattoni ceramici refrattari costosi in questo sistema) e, infine, la maggior sicurezza del forno (esso ha pareti fredde, quindi non servono sistemi di protezioni dal calore). Questa tecnologia ha, però, i seguenti svantaggi: può essere utilizzata solo se il combustibile è gas naturale, genera vetro di scarsa qualità a causa dell'eccessiva formazione di bolle, usura più rapidamente il forno, rende difficile effettuare controlli visivi sullo sviluppo del processo di fusione e, infine, determina il raggiungimento di temperature molto alte (1350°C se il comburente usato è aria, 1550°C se il comburente è ossigeno puro) e più sono

alte le temperature raggiunte, più si ottengono perdite cospicue di calore nella vasca dell'acqua di raffreddamento.

- Installare **forni a combustione con mezzi porosi** (porous media combustion PMC, o porous burners, Figura 31). In questi forni, il processo di combustione non avviene a fiamma libera, ma, al contrario, si controlla la reazione facendola avvenire all'interno di un mezzo poroso in grado di resistere alle alte temperature [38]. Un materiale poroso è un materiale avente "vuoti connessi", attraverso i quali un fluido può penetrare nel mezzo [30]. I forni PMC lavorano in un ambiente a eccesso di entalpia, mantenendo la combustione all'interno del mezzo poroso con elevate proprietà di trasmissione di calore e comportando ricicli interni di energia termica. Grazie alla stabilità di combustione (che contrasta le fluttuazioni della qualità del combustibile in ingresso), al maggior scambio termico per radiazione, alla capacità di controllare la temperatura di combustione evitando che sia troppo alta e, infine, alla capacità di ottenere una distribuzione più uniforme dell'ossigeno che fa da comburente, questi forni consentono miglior controllabilità del processo di fusione e, dunque, una combustione con bassi tassi di emissioni di NO_x e CO₂, un ridotto consumo energetico e prodotti in vetro di alta qualità [31]. Questo tipo di forno è applicabile solo utilizzando il gas naturale come combustibile.
- Installare **forni a fusione elettrica**. In base alle capacità produttive e ai volumi di vendita dell'impianto, talvolta, può convenire sostituire l'utilizzo di combustibili fossili con l'utilizzo di energia elettrica. Di solito i forni a fusione elettrica offrono una maggiore efficienza termica diretta rispetto ai forni a combustibile fossile e, pertanto, determinano una maggior velocità di fusione. In alcuni casi, inoltre, l'energia elettrica costituisce una materia prima con costo inferiore rispetto al combustibile fossile. In aggiunta, non sfruttando la combustione i forni elettrici non producono né NO_x, né particolare e pertanto sono da ritenersi superiori ai forni a combustione dal punto di vista della sostenibilità ambientale. I forni elettrici sono usati tipicamente per bassi volumi produttivi, inferiori circa a 70 Ton/day, tuttavia fornaci più grandi (ovvero che consentono volumi produttivi maggiori), potrebbero essere preferibili rispetto ai tradizionali forni a combustione in base al rapporto tra i prezzi locali di elettricità e combustibile. La produzione di fibra, di cristalleria o di manufatti speciali in vetro è il campo in cui i forni elettrici sono maggiormente impiegati [19], [31], [41]
- In analogia ai forni a combustione, **ottimizzare la posizione degli elettrodi** nei forni a combustione elettrica, regolando l'angolo che essi formano con la superficie del vetro fuso. Questa soluzione consente di uniformare la temperatura del forno, oppure al contrario di ottenere zone più calde e più fredde [19], [42].
- In analogia ai forni a combustione, installare **top-heating electric furnace** (posizionando gli elettrodi in verticale sul tetto del forno) ai fini aumentare gli scambi termici tra elettrodi e vetro fuso [19].
- Installare **forni a boosting elettrico** [19], [32].
- Installare **forni di combustione "a segmenti"**. Questo forno viene così chiamato in quanto il processo di fusione è segmentato in 4 zone: preriscaldamento della carica, fusione primaria, fusione secondaria e affinaggio. In tali forni, mentre la carica principale viene fusa nel forno elettrico, il rottame viene introdotto in una zona del forno separata dalla restante carica e fuso mediante ossi-combustione. Questo forno produce poche emissioni ed ha alta efficienza termica, tuttavia necessita di un'intensa attività manutentiva e ha altissimi costi operativi [19], [22], [43]. Un esempio di questo forno è il P-10 Process sviluppato dall'azienda PPG. Come riportato da, visti gli eccessivi costi operativi, l'azienda PPG ha smesso di produrre questo forno.
- Installare **forni al plasma** [19], [22]. Le particelle che costituiscono la carica di vetro vengono disperse e fuse dentro ad un getto di plasma termico, che è ottenuto bruciando ossigeno puro in un ambiente soggetto a un forte campo elettromagnetico. Il plasma trasferisce grandi quantità di calore al vetro, fondendo rapidamente le particelle di carica [44]. La struttura del

forno, inoltre, può essere conformata in modo che le reazioni di decomposizione dei gas di carbonato sia rimossa durante il trattamento in volo, ossia direttamente durante il processo di fusione. In questo modo, la durata del processo risulta notevolmente ridotta sia perché il plasma fonde più rapidamente il vetro rispetto ad un tradizionale forno a combustione aria-combustibile o ossigeno-combustibile, sia perché l'operazione di affinaggio del vetro e rimozione dei gas viene effettuata assieme alla vera e propria fusione (Figura 32).

● **Soluzioni riguardanti i sistemi di recupero o rigenerazione dei gas di scarico:**

- Installare **forni recuperativi** (“recuperative furnaces”) e **bruciatori recuperativi** (“recuperative burners”) quali il SORG Flex Melter, soprattutto se alimentati da ossi-combustione. Tali forni permettono di preriscaldare l'aria comburente in ingresso alla camera di combustione con il calore recuperato dai fumi di scarico. Le temperature di preriscaldamento dell'aria sono limitate a circa 600-800°C per i recuperatori metallici, e il calore recuperato da questo sistema è quindi inferiore a quello dei forni rigenerativi. Tuttavia, questi forni tendono ad avere una distribuzione più uniforme di calore (fusione migliore) in quando non ci sono variazioni continue della temperatura dei checkers. Per il funzionamento di tali forni è necessario installare nell'impianto appositi **scambiatori di calore**. I bruciatori recuperativi sono utilizzati principalmente per la produzione di fibra di vetro, in forni di dimensioni piccole, oppure in processi di fusione che avvengono a basse temperature (tra i 700 °C e i 1100 °C). Questi forni possono essere impiegati solo per riscaldamento a combustibile o a boosting elettrico [19], [30], [46].
- Installare **forni rigenerativi** (“regenerative furnaces”), soprattutto se alimentati da ossi-combustione [19], [43]. Anche tali forni (come quelli recuperativi) servono per preriscaldare l'aria comburente sfruttando il calore dei gas di scarico. Essi, tuttavia, hanno un diverso principio di funzionamento e si basano sull'accumulo di calore su breve termine attraverso rigeneratori ceramici. I forni rigenerativi sono in grado di recuperare l'85-90% del calore contenuto nei fumi e forniscono temperature di preriscaldamento dell'aria maggiori e più uniformemente distribuite rispetto ai forni recuperativi. Tali forni, dunque, sono adatti per processi che si sviluppano a temperature elevate (800-1500 °C) e, per poter funzionare, richiedono l'installazione di **rigeneratori ceramici**. Come già anticipato si può optare per due soluzioni di rigenerazione:
 - **Side-fired furnaces** (o **cross-fired furnaces**), che sono il sistema più comune, ma meno efficiente.
 - **End-fired furnaces**

In entrambe le casistiche è possibile adottare più strati di mattone refrattario, detti “multi-pass regenerators”.

- **Sostituire i mattoni refrattari** nei rigeneratori con materiali opportunamente conformati. Questa soluzione aumenta l'intensità di scambio termico del rigeneratore, consentendo risparmi energetici di circa il 7%. Ad esempio, possono essere impiegati i cosiddetti “**corrugated cruciforms**”, ovvero mattoni in materiale refrattario altamente performante a forma di croce [19].
- Adottare dei bruciatori a bassa produzione di NO_x (**Low NO_x burners**, come ad esempio Sorg LoNO_x®) **per i forni a rigenerazione o a recupero**. Infatti, suddetti forni necessitano di avere fiamme specifiche che consentano il corretto funzionamento. Questi bruciatori bruciano meglio la fuliggine nella fiamma, aumentano il tasso di scambio termico e riducono le temperature di fiamme, garantendo un aumento dei tassi di produzione del forno e dell'efficienza termica. Impiegando i bruciatori NO_x e dunque riducendo l'utilizzo di combustibile e di NO_x (eliminando nitrogeno), i fumi di scarico possono essere ridotti fino all'80% [19].

- **Aumentare le dimensioni del rigeneratore** in quanto un rigeneratore più grande consentirà un maggior recupero di calore dei gas di scarico, rilasciandoli in ambiente a temperatura minore [19].
- Effettuare una **combustione usando aria sintetica**, quindi una miscela di ossigeno (comburente) e gas di scarico derivanti dalla rigenerazione, che vengono opportunamente trasformati in combustibile [19]. Questo sistema si può pertanto implementare solo nelle fornaci in cui viene immesso anche l'ossigeno. L'aria sintetica ha composizione simile al comburente utilizzato nei sistemi tradizionali, quindi al fine di utilizzare aria sintetica nella combustione non è necessario modificare né i bruciatori del forno ad ossi-combustione, né il design del forno. I sistemi ad aria sintetica hanno anche una combustione che può essere controllata con maggiore facilità, ma possono causare maggiore usura dei materiali refrattari. La tecnologia **OPTIMELT** illustrata in [47] costituisce un esempio di applicazione della soluzione ad aria sintetica proposta. Il sistema OPTIMELT utilizza il calore proveniente dai gas di scarico per preriscaldare l'ossigeno in ingresso alla combustione mediante un sistema di rigenerazione chiamato "Thermo-Chemical Regenerator – TCR". In un secondo momento, una parte dei gas di scarico freddi viene fatta ricircolare nel sistema e viene portata in un secondo rigeneratore già preriscaldato. Qui i gas freddi vengono miscelati a combustibile (solitamente CH_4) e i checker caldi del secondo rigeneratore riscaldano la miscela ottenuta. Quando la miscela raggiunge una certa temperatura, si verificano alcune reazioni chimiche endotermiche che danno origine ad un nuovo gas (detto "syngas"). Il syngas viene miscelato a ossigeno e reintrodotta nel forno per dare origine a una nuova combustione.
- **Recuperare il calore residuo nei gas di scarico** e usarlo, ad esempio, per preriscaldare le materie prime in ingresso ai forni, il vapore oppure l'aria nell'ambiente del capannone [19]. Il vapore caldo può essere usato per generare energia con turbine a vapore, alimentare compressori o fan o preriscaldare la carica in ingresso all'impianto. Invece, preriscaldare direttamente la carica, anziché introdurla a freddo, genera risparmio energetico perché diminuisce il tempo necessario a far avvenire la fusione completa. Come risultato, aumenta la capacità produttiva della fornace. Al fine di preriscaldare la carica si possono adottare tecnologie dirette, indirette o ibride:
 - I **preriscaldatori diretti** si ottengono depositando il rottame in una zona a contatto diretto con i fumi di scarico, in una disposizione a flusso incrociato. In tal caso, occorre prevedere dei sistemi di **bypass** nel caso in cui non si voglia o non si possa effettuare il preriscaldamento. Un esempio di preriscaldatori diretti è costituito dai "**raining bed batch/cullet preheaters**". In questi sistemi di scambio termico si inserisce la carica o il rottame nella parte superiore del preriscaldatore. Le particelle di carica/rottame cascano a pioggia e vengono investite dai fumi di scarico caldi che salgono in senso opposto. Dei deflettori interni deviano appositamente le particelle di carica/rottame e li tengono a contatto diretto coi gas di scarico. Con questa tecnica, nel caso di ossicombustione, si può ridurre il consumo. Il preriscaldamento diretto è in grado di far raggiungere ai rottami $400\text{ }^\circ\text{C}$
 - I **preriscaldatori indiretti** sono costituiti da scambiatori di calore a piastre a flusso incrociato. Il preriscaldamento indiretto può scaldare i rottami fino a $300\text{ }^\circ\text{C}$. Tra queste soluzioni, una delle più recenti prevede di recuperare il calore dai fumi di combustione mediante sistemi ORC e poi sfruttare il calore recuperato per il teleriscaldamento degli edifici aziendali.
 - I **preriscaldatori diretti combinati con filtri ciclone o precipitatori elettrostatici** sono sistemi che sfruttano la rimozione di particolato dalle fornaci (con filtri o precipitatori elettrostatici) per preriscaldare il rottame (Figura 34).

Effettuare preriscaldamento consentirà di ridurre le emissioni di NO_x e nel caso di preriscaldatore diretto saranno anche ridotte le emissioni di SO_2 , HF e HCL. Installando un

preriscaldatore, inoltre, la capacità della fornace aumenta del 10-15% senza comprometterne la vita utile. Nel preriscaldamento, possono verificarsi problemi con i rottami molto fini, che, a causa del calore e della pressione del letto di rottame, possono legarsi tra loro il calore e formare grumi. Essi, inoltre, danno origine ad un letto di rottame caldo che, se si muove troppo lentamente, riduce la sezione del canale di fuoriuscita dei fumi e limita il flusso dei gas di scarico.

- Installare apposite **caldaie a recupero di calore** per recuperare il calore contenuto nei fumi di scarico dei forni e usarlo per generare vapore [19], [48]. La temperatura dei gas di scarico in uscita dal rigeneratore è solitamente compresa tra 300 e 600°C. La cattura del calore residuo può essere effettuata prima o dopo la pulizia dei fumi e la quantità di calore che può essere recuperata dipende dalle temperature di uscita dalla caldaia (che sono limitate a circa 200°C per evitare la condensazione sui tubi della caldaia stessa). Il vapore prodotto può essere usato per generare energia (mediante turbine a vapore), per azionare soffianti o compressori e/o per preriscaldare e asciugare il rottame secco. Uno svantaggio di questa soluzione è che in molti casi, la quantità di energia recuperabile è bassa per una produzione efficiente di energia elettrica, dunque può essere necessaria una cottura supplementare per generare vapore surriscaldato necessario ad azionare le turbine. Le caldaie a calore residuo sono in uso industriale principalmente in impianti che producono vetro float e, solo raramente in impianti che realizzano contenitori in vetro. Tra le caldaie più consigliate ci sono:

- **Caldaie a condensazione**
- **Caldaie con bruciatori “premix burners”**
- **Caldaie con bruciatori “sealed burners”**
- **Caldaie con bruciatori “low NOx burners”**
- **Caldaie con bruciatori “recuperative burners”**
- **Caldaie con bruciatori “high luminosity burners (oxy-fuel)”**

- Se già presenti, operare un revamping delle caldaie d’impianto. Le caldaie devono essere selezionate ottimizzandone la taglia.
- Installare **sistemi termofotovoltaici (TPV) nel sistema di rigenerazione del forno** per recuperare le perdite di calore e convertirle in energia elettrica (in letteratura NON ci sono casi applicativi di questa soluzione) [34]. I TPV sono sistemi che sfruttano l’effetto fotovoltaico per generare elettricità da una sorgente ad alta temperatura (tra 1574 °C e 2274 °C). Le celle fotovoltaiche convertono parte del calore (le radiazioni aventi lunghezza d’onda inferiore ad un certo limite) in elettricità, mentre le restanti radiazioni vengono riflesse e restituite alla sorgente di calore. Il materiale usato per costruire TPV può essere Ga, GaSb, Si o InGaAs e, rispettivamente, può assorbire radiazioni di lunghezza inferiore a 1,7 µm, 1,1 µm o tra 0,9 µm e 3,5 µm.

Un rigeneratore può recuperare fino al 58% del calore contenuto nei gas di scarico. Tuttavia, tipicamente la percentuale di energia recuperata dal rigeneratore si attesta su valori pari al 50% e i gas di scarico escono dal forno a temperature pari a circa 550-650 °C. Resta a disposizione una certa quantità di energia (circa il 30%) che può essere recuperata incorporando TPV dentro al sistema di rigenerazione del forno. Con il calore recuperato dai TPV si può produrre una quantità di energia elettrica corrispondente a circa il 3% del consumo d’impianto. Tuttavia, l’estrazione di calore da parte dei TPV può originare un abbassamento di temperatura dei checker e, conseguentemente, questo tipo d’intervento può richiedere che si aumenti la taglia del rigeneratore.

La letteratura propone l’utilizzo di TPV per il recupero energetico solo a livello teorico [34], ma **non** si riscontrano casi applicativi di utilizzo di TPV nei forni di impianti reali, pertanto non si hanno dati numerici che confermino la bontà di questo intervento migliorativo.

- **Soluzioni riguardanti le macchine da finitura**

- Sostituire una o più macchine da finitura con macchine più nuove ed efficienti (revamping) [19].
- Se si applica il rivestimento del vetro (operazione tipica per vetri float), è preferibile adottare **sistemi di rivestimento a microonde**. Il vantaggio di tali sistemi è che le microonde riscaldano solo il vetro e non l'atmosfera nel forno, quindi si riduce il consumo di energia [19].
- Se si effettua raffreddamento e asciugatura, preferire **sistemi che funzionano ad aria (o al più evaporativi)**, piuttosto che a bagno d'acqua. Infatti, in questi ultimi sistemi, il vetro caldo viene immerso e raffreddato con una tempra in un bagno d'acqua, la quale successivamente deve essere rimossa e smaltita con conseguente spreco di energia. Impiegando sistemi ad aria, invece, sfruttando la gravità, i filtri e l'evaporazione forzata dell'aria possono ridurre i tempi di asciugatura, ridurre il consumo di combustibile e aumentare la produttività d'impianto [19].
- **Soluzioni riguardanti gli impianti di trattamento dell'acqua e delle emissioni inquinanti.**
 - Sostituire gli impianti di **trattamento dell'acqua** con impianti più avanzati (revamping) [19].

3.5.3 Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di finitura

Oltre agli interventi migliorativi proposti dalla letteratura, si sono reperiti altri interventi mediante le diagnosi energetiche effettuate negli anni da ENEA. Di seguito un riepilogo di tali soluzioni riscontrate nella fase di processo corrispondente alla finitura:

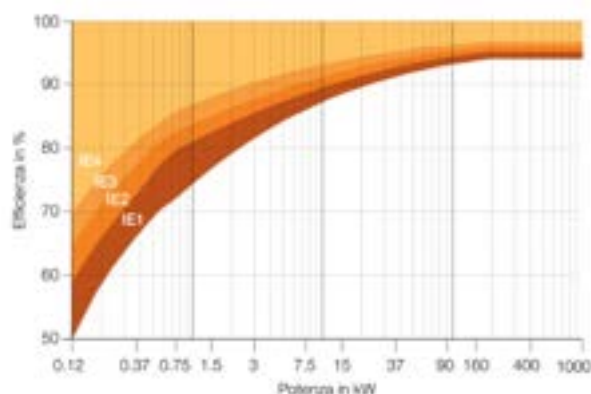
- **Soluzioni riguardanti i sistemi di recupero/rigenerazione del calore nei forni**
 - Sostituire i sistemi di recupero dei gas di scarico indiretti a ciclo a vapore con **sistemi di recupero indiretti a ciclo "Organic Rankine Cycle – ORC"** (che sfruttano metano o altri fluidi organici al posto dell'acqua). I fumi vengono miscelati con aria esterna ed inviati ad appositi scambiatori che consentono il trasferimento di calore ad un circuito, generalmente, ad olio diatermico. Per questo intervento si prevede un investimento economico iniziale di circa 7,05 M€, ma si prevedono risparmi energetici pari a circa 1.150 tep di gas naturale per il teleriscaldamento dei magazzini, circa 360 tep di energia elettrica per produrre aria compressa e circa 550 tep di energia elettrica per alimentare il ciclo ORC stesso (auto-consumo). I vantaggi di questo sistema di recupero sono: bassa temperatura operativa, alta temperatura di condensazione (che semplifica le necessità impiantistiche), nessuno scarico in atmosfera in quanto il ciclo ORC è un ciclo chiuso, loop di connessione ad acqua surriscaldata che evita i rischi connessi all'uso di oli diatermici, bassa rumorosità, accoppiamento diretto turbina-generatore senza perdite di efficienza, possibilità d'impiego di cuscinetti ceramici per garantire una lunga vita operativa non-stop.
 - Installare un **assorbitore atto alla produzione di energia frigorifera** (in ausilio ai chiller attuali), che **accumuli l'energia del vapore** in eccesso (già riscaldato, ma non utilizzato per la produzione di vetro) per il raffreddamento di processo. Questa soluzione funziona particolarmente bene in estate, quando il fabbisogno di vapore dello stabilimento è ridotto rispetto al vapore prodotto.
 - Sostituire le caldaie presenti nell'impianto con pompe di calore ad alto rendimento (COP>4,5).
- **Soluzioni riguardanti le macchine da finitura**
 - Installare lavatrici e macchine da lavoro dotate di **sistemi automatici di stand-by** per interrompere le lavorazioni quando non sono richieste. Alcune macchine da rifinitura come lavatrici, intensificatori di pressione, ecc. presentano un funzionamento discontinuo durante i diversi cicli di lavoro. Tuttavia, anche quando non sono usate, tali macchine restano attive. Installando macchine dotate di sistemi di stand-by o riduzione della velocità di lavoro, è possibile fermare le macchine dopo un periodo di tempo in cui non sono state utilizzate.

- Se presenti più stazioni di lavoro o più reparti affini, **accorpate tutto in un'unica macchina** per ridurre i consumi energetici specifici (kWh/pezzo). Nello specifico, la diagnosi fa riferimento all'unione di due reparti di assemblaggio di elementi in vetro.
- Sostituire le celle elettrolitiche per la produzione di idrogeno con celle più efficienti
- **Soluzioni riguardanti gli impianti di prelievo, trattamento e riciclo di acqua, aria ed emissioni inquinanti**
 - Installare **elettrofiltri avanzati per trattare i fumi** e ripulirli prima di immetterli in atmosfera. I filtri più avanzati in ambito di trattamento di aria e sistemi di ventilazione sono quelli conformi alla norma EN ISO 16890. I principali vantaggi apportati dall'installazione di questa tipologia di filtri sono: maggior longevità operativa (con conseguente riduzione dei costi di gestione e manutenzione), perdite di carico ridotte (con conseguente risparmio energetico), nessun costo di ricambio filtro, elevata riduzione della carica batterica e dei virus nell'aria, ottima soluzione contro l'inquinamento outdoor da PM10, PM2,5 e PM1, elevata efficienza di filtrazione su particelle 0,3 ÷ 0,4 micron, paragonabile alle classi E10, E11 secondo la normativa EN 1822:2009 e alle classi ePM1, ePM2,5, ePM10 secondo la EN ISO 16890.
 - **Recuperare il calore residuo a valle del sistema di filtraggio e trattamento fumi.** Il calore recuperato può essere usato per produrre vapore per scopi di riscaldamento dell'ambiente o produrre aria compressa per le esigenze di processo.
 - **Installare sistemi avanzati di abbattimento degli ossidi di azoto nella ciminiera dei fumi** posta a valle del forno.
 - **Sostituire e rinnovare le UTA** (Unità di trattamento dell'aria) nelle clean room, utilizzando UTA inverterizzate, in modo che siano in grado di regolare la quantità di aria immessa in ambiente tramite rilevatori di temperatura interna e di concentrazione di CO₂. Questo permetterebbe di risparmiare energia elettrica per la ventilazione e per la produzione di energia frigorifera.
 - **Sostituire gli spurghi di condensa manuali con spurghi automatici più efficienti.**

3.6 Motori

I motori elettrici costituiscono un'importante parte di un impianto di produzione del vetro ed è pertanto possibile agire su questi per ottenere una riduzione dei consumi energetici. Sono disponibili le seguenti soluzioni:

- Installare **motori elettrici ad alta efficienza (di classe IE2, IE3 o IE4)**, dimensionati correttamente e movimentati a velocità corrispondenti ai carichi da vincere. In questo modo, l'efficienza dei sistemi a motore elettrico (EMDS) può essere migliorata, in termini di costi, in media tra il 20 e il 30%. Infatti, i motori più efficienti hanno minori perdite meccaniche per attrito e per ventilazione, minori perdite per isteresi e per correnti parassite e minori perdite per effetto Joule. Questi vantaggi sono stati ottenuti progettando motori con nucleo realizzato con lamierini a basse perdite (che diminuiscono la perdita a vuoto), sezioni maggiorate dei conduttori dello statore e del rotore e un'attenta scelta del numero di cave e della loro geometria.



- **Figura 46: rendimenti motori classi EFF1-EFF3. Secondo la norma IEC 60034-30:2008, nel caso di motori trifase a bassa tensione con potenza da 0,75 kW a 375 kW, i codici di Efficienza Internazionale (IE) sono i seguenti: IE1 motori a rendimento standard, IE2 motori a rendimento elevato, IE3 motori a rendimento premium e IE4 motori a rendimento super-premium.**

- Riavvolgere (“rewind”) i motori elettrici già presenti nell’impianto (se sono già sufficientemente efficienti), anziché installare nuovi motori. Come regola generale, se i costi di riavvolgimento superano il 60% dei costi di acquisto di un nuovo motore, questa soluzione non è da preferire [19].
- Installare motori correttamente dimensionati rispetto alle potenze richieste dall’impianto. In particolare, occorre scegliere motori che siano sufficientemente potenti per coprire le richieste dell’impianto, ma non troppo per limitare i consumi a quelli indispensabili [19].
- **Rifasare i motori** per ripristinare le condizioni di funzionamento al design e migliorare il fattore di potenza dei motori. Il rifasamento viene effettuato inserendo in parallelo al carico elettrico una batteria di condensatori. I vantaggi del rifasamento sono una riduzione delle perdite di energia, un aumento della potenza dell’impianto e un miglioramento della tensione.
- Utilizzare **approcci di ottimizzazione delle tensioni**, adottando motori azionati con cinghie dentate (preferibilmente ad alta coppia) o con altre cinghie ad alta efficienza, anziché con cinghie trapezoidali standard. Le cinghie dentate, infatti, sono più fredde, più durature, non scivolano, non si allungano, non si piegano né si comprimono e richiedono meno manutenzione, dunque hanno un’efficienza maggiore rispetto alle cinghie trapezoidali.
- Installare **motori e azionamenti a velocità regolabile con inverter**, ottenendo “Adjustable Speed Drives (ASDs)” o “Variable Speed Drives (VSDs)”, utili a regolare e ottimizzare le tensioni e le velocità del motore elettrico in funzione dei carichi [50], [51]. Un esempio di motore ASD per ridurre i consumi energetici nella fase di trasporto delle materie prime è il “MagnaDrive system” [19], [52].
- Installare inverter nei motori già presenti in impianto per rendere il sistema a velocità variabile.

3.6.1 Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di finitura

- Installare **sistemi per migliorare la qualità della potenza elettrica e l’alimentazione del sistema. Un esempio possibile è il sistema brevettato “E-Power System”**, che ha grande effetto sulle apparecchiature dotate d’inverter e sui sistemi con alta presenza elettronica. La Power Quality (qualità della potenza elettrica) viene definita in base agli aspetti caratterizzanti la tensione di rete: continuità della tensione, ovvero mancanza di disservizio totale o parziale e qualità della tensione, in termini di frequenza, valore efficace e forma d’onda. Una bassa Power Quality può comportare numerosi disturbi (es. armoniche, cali o buchi di tensione, sovratensioni, interruzioni etc.) che si traducono in un aumento delle perdite lungo i principali componenti dell’impianto elettrico (cavi, trasformatori etc.) ed in un funzionamento non ottimale degli impianti collegati. Negli ultimi anni si sono diffusi sul mercato diversi sistemi che, collegati agli impianti elettrici delle aziende, promettono di ottenere risparmi anche di diversi punti percentuali sul consumo di

Energia Elettrica prelevata da rete. E-Power System mira a ridurre la suscettibilità d'impianto, aumentando il grado di affidabilità e la vita utile dell'intero sistema (minor deterioramento degli apparati e diminuzione degli interventi di manutenzione richiesti), mediante una **regolazione dinamica dell'induttanza** in modo da adattarla all'assorbimento di potenza richiesto dal sistema. Si eliminano le fluttuazioni transitorie delle tensioni di alimentazione (come picchi e flicker), che possono essere fonti di blocco o danni per i carichi collegati e si riduce la produzione di sorgenti armoniche. In questo modo si riducono le perdite di energia per effetto Joule e l'energia reattiva assorbita dal sistema, allungando la vita media degli utilizzatori elettronici. E-Power System è costituito da un filtro passivo induttivo con caratteristiche di tipo ibrido, date dalla sua capacità di immettere nel flusso di energia una serie di vettori elettromagnetici in opposizione di fase, utilizzando una parte dell'energia in ingresso e provocando una caduta di tensione proporzionale al livello di filtraggio selezionato. L'induttanza quindi non è costante, ma cambia dinamicamente il suo valore adattandosi all'assorbimento di potenza presente nell'impianto e massimizzando così la sua efficacia. Grazie alla sola presenza di componenti reattivi e di interruttori/contattori, le perdite introdotte dall'installazione del sistema possono considerarsi nulle, a differenza di quanto avviene nei filtri attivi con resistori e dispositivi di potenza a commutazione. Il risparmio ottenibile è pari a circa 1.164 MWh/anno (circa 120.000 €/anno) con un investimento complessivo di 400.000 € per acquisto e installazione.

3.7 Sistemi ausiliari a pressione

Così come i motori elettrici, anche i compressori, le pompe, le ventole e tutti i sistemi ausiliari a pressione costituiscono un'importante parte di un impianto di produzione del vetro ed è pertanto possibile agire su questi per ottenere una riduzione dei consumi energetici. Sono disponibili le seguenti soluzioni:

- Soluzioni riguardanti i sistemi ad aria compressa [27]. Se si usa aria compressa, essa può rappresentare fino al 3% del consumo energetico complessivo dell'impianto. Infatti, a causa della sua efficienza estremamente bassa (circa il 10% di efficienza dal punto di generazione al punto di utilizzo), è una delle forme di energia più costose e richiede una particolare attenzione per l'ottimizzazione.

Le cause di inefficienza dei sistemi ad aria compressa possono essere di natura gestionale (perdite sulla rete di distribuzione o usi impropri dell'aria compressa), tecnica (motori a bassa efficienza o cali prestazionali dovuti a inefficienza degli stadi di compressore) o progettuale (motori funzionanti a carico parziale per buona parte del tempo di utilizzo, errato dimensionamento del gruppo compressore-motore o produzione di aria compressa a pressioni più elevate di quelle richieste). Di seguito si riepilogano le soluzioni per migliorare i consumi dei compressori, successivamente si riepilogano le soluzioni per migliorare i consumi dei motori elettrici.

Per quanto concerne i compressori, si può:

- installare **compressori efficienti e avanzati** (preferibilmente piccoli e multistadio, anziché a singolo stadio), quindi operare un revamping dell'impianto [26].
- Selezionare il compressore adeguato alle richieste di impianto [20].
- Installare **compressori** alimentati **a corrente elettrica**, aventi minori costi di manutenzione, vita utile maggiore e minori downtime [19].
- Installare **compressori** alimentati **a gas**, per cui è più facile ottenere macchine a velocità variabile e per cui si ottengono minori costi operativi d'impianto [19].
- Montare **valvole nei sistemi di distribuzione** per interrompere l'afflusso di aria nei macchinari in cui essa non viene utilizzata [19].
- **Sostituire l'aria compressa con fonti alternative**. Ad esempio:
 - per raffreddare, aspirare, agitare, mescolare o gonfiare semilavorati in vetro, si possono usare dei **ventilatori** al posto di aria compressa. Una soluzione "energy-saving" per raffreddare le teste dei bruciatori è installare dei **soffianti** anziché dei compressori.



● **Figura 47: schema di funzionamento di un soffiante a canale laterale.**

- I soffianti sono preferibili rispetto ai compressori perché hanno massima semplicità d'installazione, rumorosità contenuta, vibrazioni nulle (completa stabilità), assenza di pulsazioni nel gas trattato e minima manutenzione richiesta. I soffianti, inoltre, possono essere installati sia nei bruciatori dei forni fusori, che nei bruciatori adibiti a mantenere caldi i semilavorati trasportati con nastri e rulli da una zona dell'impianto produttivo all'altra.
 - Per pulire o rimuovere detriti, si possono usare **spazzole, pompe a vuoto o soffiatori**.
 - Per movimentare componenti si possono usare **soffiatori o attuatori elettrici o idraulici**.
 - Infine, per alimentare macchine, utensili e attuatori si possono usare **motori elettrici**, anziché aria compressa (ricordando però che i motori sono meno precisi e meno sicuri) [19], [53].
- Nelle applicazioni in cui è necessario creare il vuoto, sostituire i compressori con **pompe a vuoto** [19].
 - Ridurre al minimo le perdite d'aria compressa (perdite di carico), installando **dispositivi (quali guarnizioni)** nei punti più soggetti a trafileamenti (giunti, raccordi, tubi flessibili, regolatori di pressione, valvole di intercettazione, filtri, ugelli, ecc.) [19], [54].
 - Sostituire e **rinnovare gli ugelli** di erogazione dell'aria compressa, che potrebbero essere usurati, otturati o corrosi.
 - **Dimensionare correttamente tubi, raccordi, filtri e manichette** per minimizzare le perdite d'aria [54]. L'utilizzo di superfici lisce e il minor numero di cambi di direzione evita turbolenze nel flusso e una riduzione delle resistenze, con conseguente aumento dello scambio termico (utile nei sistemi di refrigerazione).
 - Installare, inoltre, **tubi aventi le massime dimensioni (diametri) possibili** nei sistemi di distribuzione dell'aria per ridurre le perdite [55].
 - Usare acqua calda (pompe di calore) anziché resistenze elettriche per riscaldare l'aria spinta dai compressori.
 - Montare **valvole e regolatori di pressione** nei sistemi di distribuzione dell'aria compressa per regolare l'afflusso di aria o interromperlo quando non viene usato dai macchinari. In questo modo si eroga a utensili e macchinari solo la quantità di aria compressa necessaria.
 - Installare **serbatoi e sistemi per il recupero dell'aria compressa** in eccesso. L'aria compressa viene assorbita dai macchinari in maniera non continuativa. Ci sono numerose fluttuazioni nella domanda di aria. Un dispositivo di stoccaggio consente di utilizzare l'aria compressa in eccesso per alimentare un'operazione successiva, facendo fronte a eventuali fluttuazioni e picchi di richiesta e generando una domanda più regolare di energia elettrica [20].
 - Installare **sistemi di recupero del calore** proveniente dai compressori (più adatti per compressori non raffreddati ad acqua). Infatti, in un compressore d'aria industriale fino al 90% dell'energia elettrica utilizzata viene convertita in calore. Recuperando tale energia termica, la si può riutilizzare per il riscaldamento degli ambienti, il riscaldamento di processo, il riscaldamento dell'acqua, il riscaldamento dell'aria di reintegro, il preriscaldamento dell'acqua di reintegro della caldaia e le applicazioni delle pompe di calore. Poiché l'energia recuperata ha temperature basse ed è in quantità limitata, il calore recuperato si presta bene a riscaldare ambienti, ma non a essere reintegrato nel processo produttivo [53], [54].

3.7.1 Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di preparazione alla fusione

- Installare **sistemi di raffreddamento dell'aria compressa** (ad esempio mediante acqua di torre) per ridurre il consumo energetico degli essiccatori.
- Usare sistemi dry-cooler anziché chiller (frigoriferi) per raffreddare l'acqua.

3.8 Misure alternative

Di seguito si riportano ulteriori misure alternative individuate per ridurre i consumi energetici di un impianto di produzione del vetro:

- Ottimizzare o rinnovare i **trasformatori** nella cabina elettrica dell'impianto. La rete elettrica nazionale spesso fornisce una tensione superiore a quella nominale generando sovra-consumi. Le sovratensioni sono inoltre la principale causa di guasto o cattivo funzionamento delle apparecchiature elettriche ed elettroniche, riducendone la vita utile. Installando un ottimizzatore delle tensioni è possibile ottenere una stabilizzazione dinamica della tensione in uscita, un miglioramento del fattore di potenza e una riduzione delle armoniche di corrente e della domanda di picco, migliorando complessivamente la qualità della fornitura elettrica e i consumi energetici.

3.8.1 Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di preparazione alla fusione

- **Rinnovare i trasformatori nella cabina elettrica**, installando preferibilmente **trasformatori k-factor**. Questi particolari trasformatori risolvono o attenuano la presenza di armoniche e di distorsioni armoniche nella rete elettrica generate soprattutto da carichi non lineari e, in maniera ridotta, dalla rete stessa. La presenza di armoniche potrebbe generare cadute di tensione e, conseguentemente, inefficienze o danni agli impianti, i cui componenti si trovano a funzionare a tensioni, correnti e frequenze per i quali non erano stati dimensionati. I trasformatori k-factor determinano una maggior resistenza dell'impianto all'effetto delle armoniche.
- **Ottimizzare le perdite dei trasformatori** nella cabina elettrica.
- **Sostituire trasformatori ad olio con trasformatori a resina**. Essi, infatti hanno meno perdite, garantiscono maggior sicurezza perché hanno basso rischio di incendio, emettono minima quantità di gas tossici e fumi opachi, possono funzionare in ambienti umidi, polverosi, salini o inquinati e offrono un'elevata resistenza a shock termici. Risultano anche più sovraccaricabili rispetto ai trasformatori in liquido isolante e, pertanto, garantiscono più flessibilità in fase di utilizzo, al contrario dei trasformatori a olio che vanno sorvegliati per garantire il livello e le caratteristiche dielettriche del liquido isolante. I trasformatori a resina, infine, hanno minori costi di manutenzione e una maggior facilità di installazione perché hanno ingombri e peso inferiori e, a differenza dei trasformatori a olio, non necessitano di pozzetti di raccolta e barriere di separazione resistenti a fuoco.
- **Installare una centralina di rifasamento** di tutto l'impianto elettrico e rifasare l'impianto.
- **Installare UPS** nell'impianto elettrico. Gli UPS sono sistemi che garantiscono qualità e continuità dell'energia elettrica assicurando una costante forma d'onda sinusoidale e proteggendo il carico da possibili micro-interruzioni, buchi di tensione, armoniche e sovratensioni, che potrebbero pregiudicare o addirittura interrompere i processi in corso, con relative perdite economiche, talvolta considerevoli. Sul mercato esistono due tipi di UPS, gli UPS statici e quelli rotanti (o dinamici). Gli UPS statici sono costituiti principalmente da un raddrizzatore, un inverter ed un gruppo batterie. Il raddrizzatore effettua la trasformazione AC/DC per la ricarica delle batterie e l'inverter provvede al passaggio inverso per l'alimentazione dell'utenza finale. L'efficienza energetica in questi sistemi si misura come il rapporto tra la potenza elettrica in uscita e quella in entrata, misurata in kVA. Gli UPS rotanti hanno, invece, un volano che al momento del blackout (nell'attesa che si avvii il gruppo elettrogeno) trasforma l'energia cinetica in energia elettrica che cede verso rete; questa soluzione dà moltissimi vantaggi rispetto allo statico, soprattutto gli ingombri ridotti e i minori costi di manutenzione, a fronte di costi di acquisto più alti. La tendenza attuale è quella di installare gruppi

di UPS modulari che possano adeguarsi alle condizioni di carico richieste e lavorare nella parte di curva a più alto rendimento.

3.9 Risultati derivanti dallo studio delle vetrerie

Gli obiettivi principali del progetto afferenti all'anno 2020 erano: 1) creare una lista con le soluzioni tecnologiche implementabili per ridurre i consumi energetici e 2) valutare lo stato di applicazione delle tecnologie reperite in letteratura all'interno del panorama italiano. In risposta a questi obiettivi:

1. La descrizione delle tecnologie sopra riportate (tutto il capitolo 3) adempie al primo obiettivo. Tale lista è anche sintetizzata nell'ALLEGATO 4. In quest'ultimo allegato per ogni fase di processo sono riportate le tecnologie adottabili per ridurre i consumi energetici e i commenti ricevuti da esperti di Assovetro sull'applicabilità di ciascuna di esse. Tramite i commenti forniti da Assovetro e ottenute a valle di numerosi meeting con esperti, è possibile individuare dei gap tra ciò che viene proposto in letteratura e ciò che è attualmente implementabile con efficacia e nel rispetto delle leggi nel territorio italiano.
2. Relativamente all'applicazione attuale delle tecnologie individuate al punto precedente, consultando le diagnosi energetiche forniteci da ENEA e rappresentanti un campione di 103 siti produttivi italiani, sono state estratte informazioni su il numero e il tipo di interventi migliorativi effettuati dalle aziende negli ultimi 4 anni e proposti per i futuri 4 anni. I risultati di questa analisi sono visibili in dettaglio in ALLEGATO 1. Il primo foglio di questo allegato riporta per ciascuna soluzione individuata le rispettive colonne "conteggio interventi effettuati" e "conteggio interventi proposti".

4 Cementifici

Il presente capitolo mostra il processo di produzione del cemento, illustrando per ogni singola fase di processo le seguenti informazioni:

- funzionamento della fase di processo;
- tecnologie necessarie per realizzare tali operazioni produttive;
- soluzioni tecnologiche proposte in letteratura per ridurre i consumi energetici di tale fase;
- altre soluzioni tecnologiche emerse consultando le diagnosi e le aziende italiane di produzione del vetro.

4.1 Processo di produzione del cemento: introduzione

Nel 2014 l'industria del cemento si è resa responsabile di un consumo energetico pari a 10,6 EJ, corrispondente al 7% dell'intero consumo energetico derivante dal settore industriale [56]. I cementifici risultano essere inoltre il secondo settore produttivo in termini di emissioni, contribuendo per il 6% alle emissioni globali di CO₂ [57].

Come riportato da Federbeton nel 2018 i consumi mondiali di cemento hanno superato la soglia delle 4 miliardi di tonnellate e si stima che la produzione globale di cemento sia destinata a crescere del 12-23% entro il 2050 [58], [59]. Date le maggiori esigenze in termini di emissioni ambientali e risparmio energetico richieste dal mercato attuale, l'intero settore produttivo del cemento ha focalizzato i propri sforzi verso questi aspetti, con lo scopo di individuare e realizzare soluzioni migliorative atte a ridurre i consumi energetici di impianto ed incrementare l'efficienza dei sistemi produttivi.

Al fine di individuare le tecnologie più avanzate dal punto di vista energetico, che possono essere installate in un impianto di produzione del cemento per ridurre i consumi, è prima necessario riprendere il funzionamento di un generico impianto di produzione del cemento e analizzarlo in dettaglio. La produzione del cemento può essere realizzata mediante 4 tipologie di processo: il processo secco, il processo semi-secco, il processo semi-umido ed il processo umido. La scelta del tipo di processo produttivo è guidata principalmente dalla disponibilità e dalla composizione delle materie prime estratte dalle cave, con una particolare influenza del contenuto di acqua [60]. Maggiore è la percentuale di acqua all'interno della materia prima e più il processo avrà una tendenza ad essere umido:

- se il contenuto di acqua è compreso tra il 17% e il 22% si adotta un processo semi-umido
- per percentuali superiori al 20% un processo umido è preferibile

- per contenuti di acqua inferiori è possibile utilizzare un processo secco o semi-secco in base alle capacità di essiccazione delle materie prime dell’impianto.

Poiché il processo di produzione del cemento richiede la completa evaporazione dell’acqua, maggiore è il contenuto di acqua all’interno delle materie prime, maggiore sarà l’apporto termico necessario a farlo evaporare, determinando un maggiore consumo energetico. Di contro la presenza di una maggiore quantità di acqua agevola sia la miscelazione, che l’omogeneizzazione delle materie prime. Ne consegue che i processi secco e semi-secco hanno notevoli vantaggi in termini di risparmio energetico rispetto ai processi umido e semi-umido, pur necessitando di un maggior apporto energetico nelle fasi di trattazione delle materie prime [61].

In Figura 38 ed in Figura 39 sono riportati gli schemi delle varie fasi per le diverse tipologie di processo esistenti.

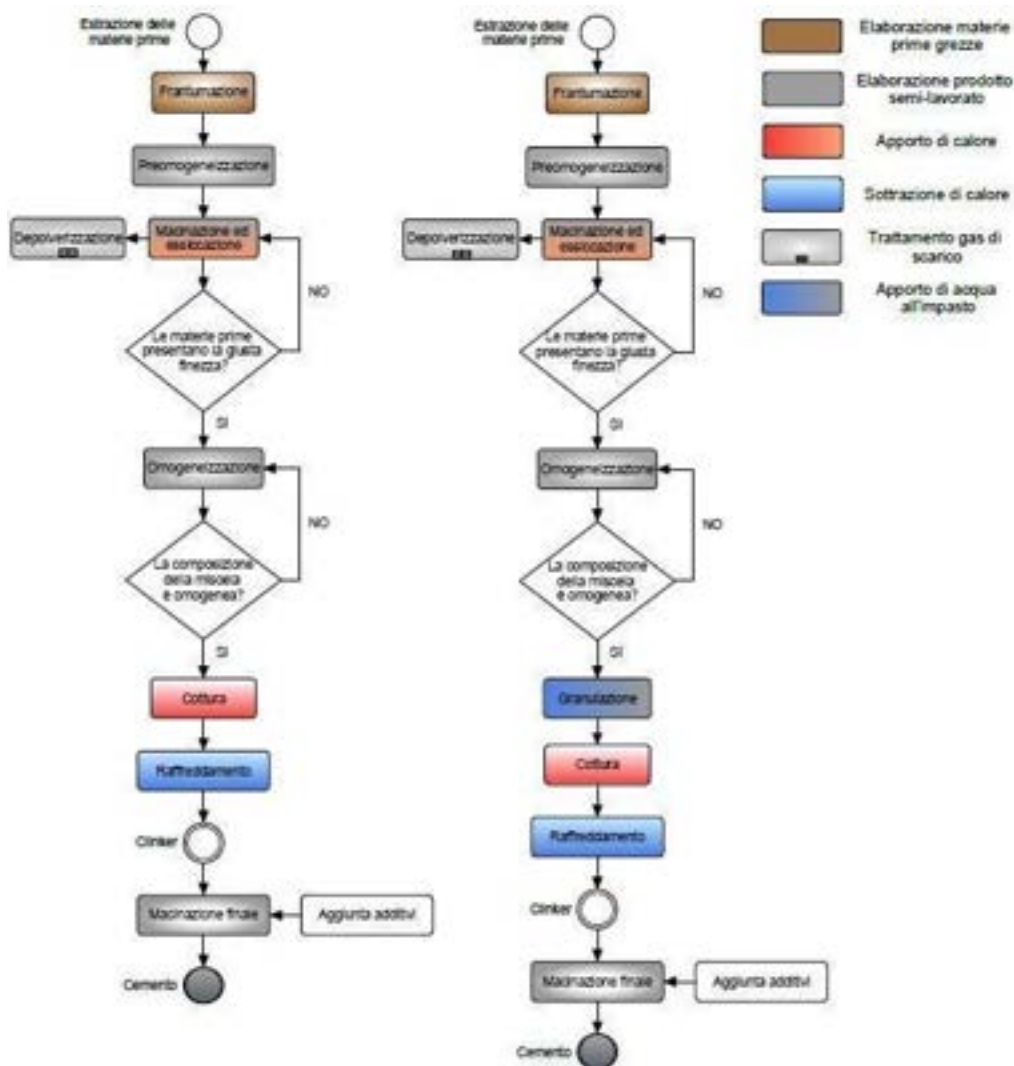


Figura 38. Fasi del processo di lavorazione del cemento per il processo secco (sx) e semi-secco (dx).

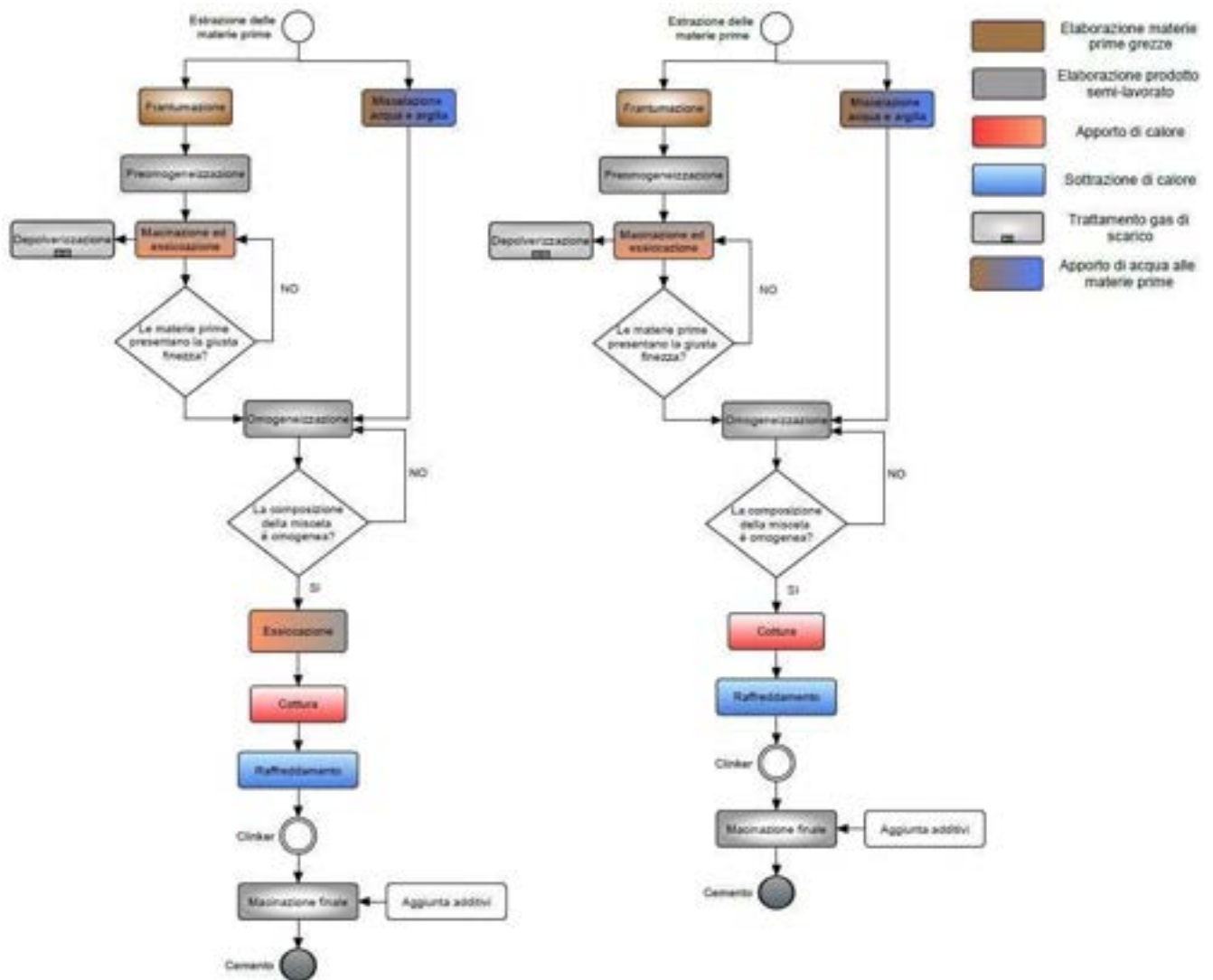


Figura 39. Fasi del processo di lavorazione del cemento per il processo semi-umido (sx) ed umido (dx).

I diversi processi produttivi sono caratterizzati da 6 macro-fasi:

1. Preparazione delle materie prime, suddivisibile in
 - frantumazione
 - macinazione
 - pre-omogeneizzazione
 - miscelazione di acqua e argilla
 - omogeneizzazione
 - controllo qualità
 - granulazione
 - essiccazione ed eventuale pre-essiccazione
2. Cottura e raffreddamento, tra le quali si evidenzia la fase di preriscaldamento
3. Macinazione finale a cui si aggiungono
 - dosaggio degli additivi
 - controllo della qualità finale
4. Depolverizzazione
5. Trattamento dei gas di scarico
6. Preparazione del combustibile

Le ultime tre fasi non concorrono direttamente alla produzione del cemento, ma risultano indispensabili per il corretto funzionamento dell'impianto.

4.2 Preparazione delle materie prime

La preparazione delle materie prime prevede la riduzione delle dimensioni delle materie prime provenienti dalle cave e la successiva miscelazione per ottenere un impasto omogeneo e garantire così la giusta composizione chimica richiesta per la produzione del clinker e quindi del cemento. Le materie prime necessarie ad ottenere il cemento sono materie naturali contenenti carbonato di calcio (come calcare e gesso) e silicati di alluminio (come l'argilla). Questa fase è responsabile per circa il 4% dei consumi di energia totali e del 70% dei consumi di energia elettrica in un cementificio [61]

4.2.1 Frantumazione

Il primo processo a cui vengono sottoposte le materie prime è la frantumazione, infatti le materie prime provenienti dalle cave hanno dimensioni comprese tra i 50 ed i 100 mm [62] e dovranno pertanto inizialmente essere ridotte di dimensioni ai fini di essere sottoposte ad ulteriori processi. Per poter ottenere materie prime di dimensioni appropriate si impiegano macchine denominate frantoi, che tramite l'applicazione di forza di compressione riducono le dimensioni della materia prima in ingresso. Si possono avere più fasi di frantumazione, distinguendo così frantoi di riduzione primaria da quelli di riduzione secondaria o terziaria. Interessante è evidenziare come nel caso in cui i materiali impiegati siano caratterizzati da un'elevata percentuale di acqua le superfici di lavoro dovranno essere riscaldate per impedire la formazione di agglomerati di materiale e conseguenti intasamenti.

Nella stragrande maggioranza dei casi la frantumazione avviene nelle vicinanze delle cave estrattive ai fini di limitare i costi di trasporto della materia prima [63]. Oltre ai frantoi in questa fase vi sono altri macchinari che determinano un cospicuo impiego di energia elettrica tra cui screening vibranti, vagli, nastri pesatori e nastri trasportatori.

4.2.2 Tecnologie installate nell'impianto per effettuare le operazioni di frantumazione

- Frantoi
- Motori elettrici che movimentano i macchinari e i nastri trasportatori
- Eventuali dispositivi di screening preliminare

4.2.3 Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di frantumazione

Per abbassare i consumi energetici in questa fase è possibile agire sui frantoi, sui motori di azionamento dei frantoi, sui sistemi di trasporto delle materie prime o sulla fase di screening/separazione. La scelta del frantoio dipende principalmente dalle dimensioni del materiale in ingresso, dai costi operativi e da considerazioni di carattere ambientale [64]. Di seguito si riepilogano per ciascuna tecnologia le accortezze che si possono adottare per migliorare i consumi energetici delle tecnologie nella fase di frantumazione:

- Installare **frantoio a martelli** (Figura 40), in cui le materie prime sono inserite dall'alto e frantumate mediante l'energia cinetica sprigionata dall'impatto con i "martelli" rotanti. Inoltre, parte della frantumazione è effettuata dall'impatto delle materie prime con il "piano di frantumazione" e dallo sfregamento autogeno dei frammenti di roccia[65]. Quando il frantumato è sufficientemente fine passa attraverso una grata (che determina anche la massima grandezza delle particelle), finendo nella sezione di omogeneizzazione e scarico, per essere poi inviato alla fase di processo successiva. Al fini di evitare intasamenti delle grate è preferibile avere un'umidità delle materie in ingresso inferiore al 10% [65]. I frantoi a martello sono caratterizzati da un alto rapporto di frantumazione (solitamente compreso tra 10 e 25, ma che può raggiungere anche valori intorno a 50). Inoltre, hanno una struttura semplice, compatta, leggera e semplice da mantenere. Infine, garantiscono un basso consumo energetico e prodotti in uscita uniformi. Di contro le parti che entrano in contatto con la materia da frantumare, ovvero martelli e grate filtranti, tendono a rompersi spesso, generando maggiori costi legati ai downtime e alle parti di ricambio. Da sottolineare inoltre che questi frantoi tendono ad intasarsi soprattutto nel caso in cui vi si inseriscano materie fortemente umide o con larga concentrazione di argilla [65].

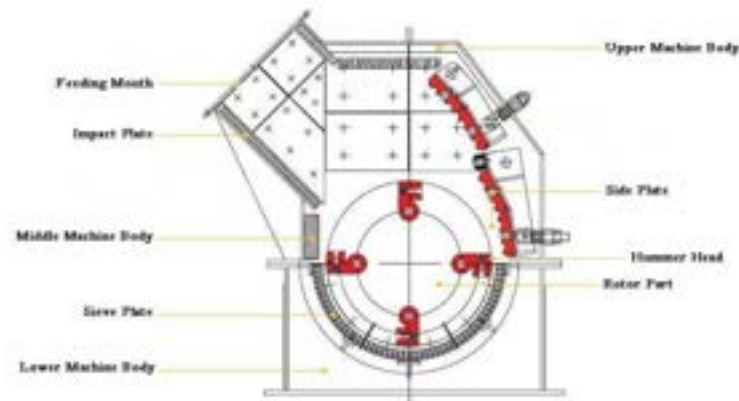


Figura 40. Schema raffigurante un frantoio a martelli.

- Installare **frantoio a martelli birotore** [66]
- Installare **frantoio a impatto** (o ad urto) **birotore**, utilizzato principalmente per la sua alta efficienza e le sue prestazioni in termini di sicurezza, sia per la frantumazione primaria, che secondaria. In questo frantoio vi sono due fasi di frantumazione. Inizialmente il materiale in ingresso viene inserito spinto da delle barre contro le pareti esterne da cui poi verrà reindirizzato nuovamente verso la zona di frantumazione fino a che non uscirà dalla zona di scarico una volta raggiunte le dimensioni desiderate. La materia prima subisce poi una successiva frantumazione mediante un processo analogo a quello appena descritto. Il prodotto finito ha forma cubica, evitando la presenza di tensioni residue. A differenza del frantoio a martelli, il frantoio a impatto è in grado di utilizzare tutta l'energia cinetica sprigionata dal rotore. Tuttavia, il pannello di frantumazione esterno è facilmente usurabile e pertanto l'impiego di questi frantoi è limitato a materiali meno duri. Nonostante siano caratterizzati da maggiori costi operativi, questi frantoi vengono impiegati soprattutto per l'uniformità del materiale che si ottiene in uscita.
- Installare **frantoio a impatto compatto** ("compound impact crusher") detto anche **a monorotore**, rispetto al caso appena descritto le due fasi di frantumazione sono accorpate nello stesso spazio, mediante l'utilizzo di un doppio rotore, anziché di un rotore singolo.
- Installare **frantoio a mascelle** o **a ginocchiera**, caratterizzato da alti rapporti di frantumazione, prodotto in uscita di granularità uniforme, struttura semplice, facilità di manutenzione e bassi costi operativi. Viene utilizzato principalmente quando sono richieste pressioni inferiori ai 320Mpa [67]. Questi frantoi vengono spesso utilizzati per la frantumazione primaria di materiali molto duri ed approvvigionata in dimensioni grossolane [65]. Le due mascelle vengono spinte l'una contro l'altra, esercitando un forte pressione sulla materia prima compresa tra di esse. In base al tipo di frantoio impiegato le mascelle possono muoversi anche dall'alto verso il basso e viceversa. Questi frantoi sono estremamente sensibili all'umidità presente nelle materie prime usate e le dimensioni in uscita dei prodotti vengono influenzate dalle pressioni esercitate (se si lavora con carichi più bassi le materie saranno più grossolane).
- Installare **frantoio a doppia ginocchiera** [66]
- Installare **frantoio rotativo** ("giratory crusher") detto anche **frantoio a cono** ("cone crusher"), mostrato in Figura 41. Questo frantoio, particolarmente adatto per la frantumazione primaria con alti feed rate, consiste in un cono esterno cavo fisso ed un cono interno rotante. La frantumazione avviene mediante la compressione tra le pareti dei due coni. Il cono interno è montato in modo eccentrico rispetto al precedente e compie anche un moto dall'alto verso il basso. Rispetto al frantoio a mascelle questo macchinario accetta in ingresso dimensioni più piccole di materiale a parità di capacità. Così come il frantoio a mascella è fortemente influenzato dall'umidità delle materie prime in ingresso, che possono portarlo all'intasamento. I maggiori vantaggi di questo frantoio sono l'insensibilità ai sovraccarichi e la facilità di alimentazione delle materie prime in ingresso.

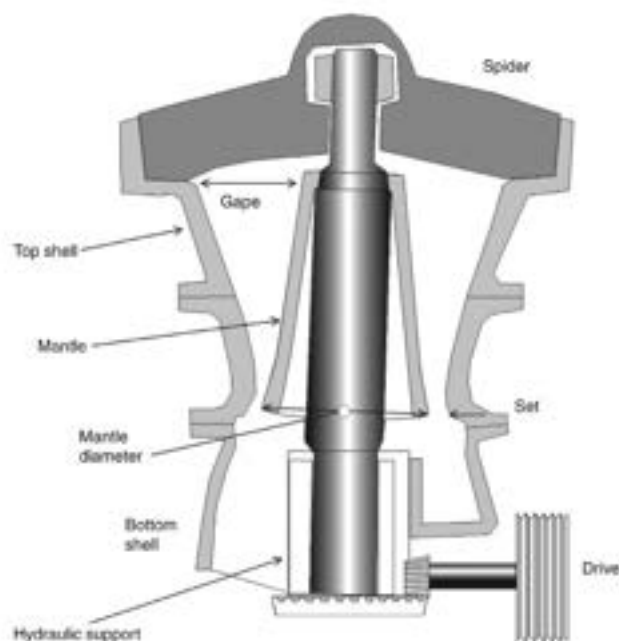


Figura 41. Schema di un frantoio conico [68]

- Installare **frantoio a rulli** (Figura 42) che viene utilizzato principalmente per la riduzione primaria di materie prime umide e dure. La pietra in ingresso è soggetta all'azione di due rulli rotanti che, esercitando una forte pressione, ne riducono le dimensioni. I rulli possono essere lisci, oppure eventualmente provvisti di "denti", che garantiscono una migliore concentrazione delle forze in gioco. La dimensione delle pietre in ingresso può essere addirittura pari a quella del diametro dei rulli stessi, conferendo quindi un grande vantaggio a questo macchinario, tuttavia il rapporto di frantumazione caratteristico è sensibilmente basso (nell'ordine di 1:3 o 1:5). I rulli sono azionati separatamente mediante cinghie a V il cui consumo specifico è stimato essere pari a 0,2-0,3 kWh/ton.
- Installare **frantoio a rulli dentato**, ovvero provvisti di "denti", che garantiscono una migliore concentrazione delle forze in gioco [66].
- Installare **frantoio mono-rullo dentato** [66]

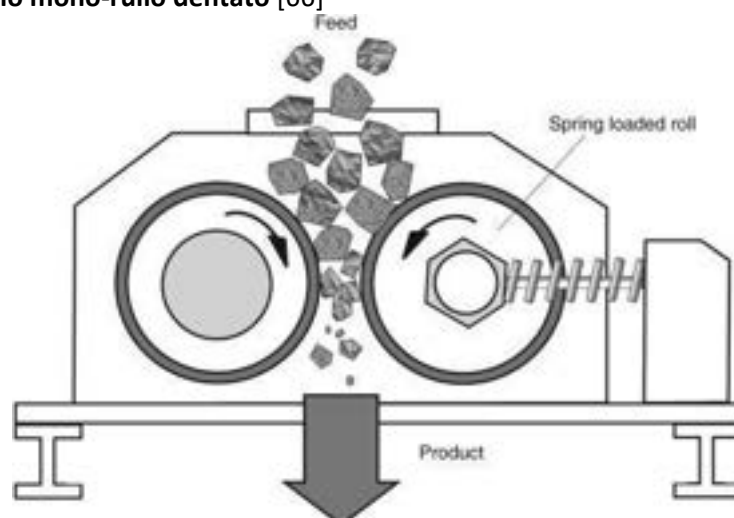


Figura 42. Schema di un frantoio a rulli.

- Installare **frantoio semi-mobile o mobile** che può essere spostato in più punti del sito in base all'evoluzione temporale del sito stesso, garantendo quindi maggiore flessibilità. Questi frantoi sono composti da moduli, che possono essere facilmente spostati, riducendo al minimo i downtime. Spostare il frantoio consente di avere un impiego di camion ed altri mezzi ridotto [69].
- Installare macchine per uno **screening preliminare**, per separare particelle più fini dalla roccia grezza prima di inserire le materie prime all'interno del frantoio. Nella maggior parte dei casi la pietra viene

passata sopra una griglia, cosicché si possano filtrare le pietre di più piccole dimensioni. Questo approccio consente di caricare meno il frantoio, migliorando la qualità del materiale processato in uscita. Generalmente usare grate vibranti o rulli di vario genere per effettuare lo screening consente di migliorare le prestazioni del frantoio stesso [65].

- Migliorare l'efficienza delle fasi di **screening** mediante design efficienti, che consentono quindi un risparmio in termini energetici e maggiori prestazioni dei macchinari [69].

4.2.4 Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di frantumazione

Dallo studio delle diagnosi è emersa una soluzione tecnologica in più per ridurre i consumi energetici:

- Installazione di moderni dosatori gravimetrici e bilance per efficientare l'adduzione delle materie prime nel frantoio

4.2.5 Pre-omogeneizzazione

La pre-omogeneizzazione è una fase di produzione tipica dei processi secchi e semi-secchi, che viene effettuata nel caso in cui le materie prime vengano lavorate separatamente in diversi frantoi. Questa fase ha pertanto lo scopo di garantire una farina il più omogenea ed uniforme possibile per le fasi successive. Le varie materie in uscita dai diversi frantoi vengono stoccate impilando ciascun materiale sopra l'altro in modo tale che, nel momento in cui vengono estratte dal sito di stoccaggio, la loro miscela risulti il più omogenea possibile per poi essere inviata ai mulini della fase di macinazione. I macchinari impiegati per l'impilamento sono definiti "stacker", mentre quelli per il richiamo della miscela di materie prime sono detti "reclaimer". La tipologia di entrambi dipende strettamente dal metodo di impilaggio utilizzato, che può essere sia lineare che circolare. In entrambi i casi, però, il sito di stoccaggio presenta una struttura con un profilo triangolare. La fase di pre-omogeneizzazione spesso non viene analizzata dal punto di vista energetico e ambientale sebbene i macchinari coinvolti (viste anche le loro dimensioni) richiedano un buon apporto di energia elettrica per essere movimentati. Si è potuto constatare che l'impilaggio lineare garantisce un'omogeneizzazione costante ma è affetto dall'effetto "fine-pila", a causa del quale il materiale estratto per ultimo risulta ben poco omogeneo. L'impilaggio circolare, invece, non presenta l'effetto fine-pila a scapito però di un'omogeneizzazione in generale meno efficace e costante. Ciò potrebbe ripercuotersi sulla fase di omogeneizzazione, che segue la fase di macinazione, richiedendo un maggior impiego di energia per la realizzazione di un impasto abbastanza omogeneo da garantire la corretta composizione del clinker prodotto.

4.2.6 Tecnologie installate nell'impianto per effettuare le operazioni di pre-omogeneizzazione

- Installare uno **stacker circolare**
- Installare uno **stacker longitudinale**
- Installare un **reclaimer circolare**
- Installare un **reclaimer longitudinale**

4.2.7 Essiccazione

Tipica del processo a secco. Può avvenire separatamente, oppure all'interno del mulino di macinazione. In quest'ultimo caso si utilizzano i gas derivanti dal processo di cottura ed è per questo che i mulini necessitano di una sezione trasversale più ampia. Separare le due fasi ciascuna operazione risulta più efficace ed efficiente, garantendo un minor consumo energetico [65].

4.2.8 Tecnologie installate nell'impianto per effettuare le operazioni di essiccazione

- Installare **essiccatore rotante** ("rotatory o drum dryer") che consiste in un cilindro rotante, all'interno di cui vi sono dei sollevatori, per sollevare e disperdere la farina, facilitando lo scambio di calore tra i gas caldi e la farina stessa. L'inclinazione di un essiccatore rotante varia tra 3° e 6°, mentre la sua velocità di rotazione è compresa tra 2 e 3 giri al minuto. Tra gli essiccatori rotanti possiamo distinguere [65]:
 - **Essiccatore a flusso parallelo**: in cui i gas caldi e la farina si muovono nella stessa direzione. In questo la maggiore intensità di essiccazione si ha nella parte iniziale dell'essiccatore. Questo essiccatore genera maggiori polveri rispetto all'essiccatore a flusso contrapposto.
 - **Essiccatore a flusso contrapposto**: in cui i gas caldi e la farina si muovono in direzioni opposte. L'efficienza di questo essiccatore è più bassa rispetto al precedente in quanto la differenza di temperatura tra la farina ed i gas di scarico del forno è più basso.

- Installare un **essiccatore rapido** [65], che a differenza di un essiccatore rotante è fisso e consiste principalmente in un cilindro di acciaio sigillato. Nella parte bassa del cilindro vi sono due alberi motori che fanno ruotare delle palette. Quest'ultime hanno il compito di disperdere il materiale, esponendolo al flusso dei gas caldi, che porteranno così a termine il processo di essiccazione. Gas e farina si muovono nella stessa direzione. I gas in ingresso a questo essiccatore provengono generalmente dal processo di cottura e possono avere in ingresso una temperatura di circa 600°C.
- Installare un **pre-essiccatore** prima di un mulino a sfere o di un mulino a tubo tipica di processi secchi e semi-secchi [65].
- Installare un **separatore ad aria meccanico**. Adottando questa tecnologia l'aria calda non entra nel mulino. La farina viene prima addotta ad un separatore in cui le particelle vengono classificate e deumidificate grazie a flussi di aria calda provenienti dal forno. Eventualmente è possibile aggiungere anche un ulteriore riscaldatore [65].
- Installare **essiccatori ad impatto**, ovvero addurre un flusso di aria calda ad un frantoio ad impatto presente nell'impianto. Nel frantoio le particelle di farina vengono ridotte considerevolmente in termini di dimensioni e questo rende particolarmente favorevole lo scambio termico. Infatti, durante la frantumazione aumenta la superficie di scambio, permettendo un maggior passaggio di calore dai gas alla materia prima stessa [65].
- Installare un mulino a sfere ventilato in successione ad un mulino a martelli.
- Installare un **dryer-pulverizer** ("mulino a martelli ET"), progettato appositamente per frantumare ed essiccare materia prima non abrasiva e morbida, con un alto contenuto di umidità [61].
- Installare un **filtro-prensa** per il processo semi-umido
- Installazione di un **essiccatore solare** [65]

4.2.9 Macinazione materie prime

La macinazione ha lo scopo di ridurre in polvere il materiale proveniente dai frantoi ed è pertanto una delle fasi con il maggior consumo di energia elettrica [61]. La macinazione riduce le materie fino a farle diventare polvere, con un diametro massimo di 30 mm [70]. Il principale macchinario impiegato in questa fase è denominato mulino. Spesso non è possibile ottenere la finezza desiderata delle varie materie prime mediante un unico passaggio di riduzione all'interno di un mulino, pertanto si predispongono 2 o 3 mulini in serie in base al loro rapporto di riduzione. Talvolta in serie a 1 o 2 mulini può essere disposta anche una pressa a rulli, che ha il compito di pre-macinare le sostanze in ingresso al mulino, aumentando così le prestazioni del mulino stesso.

4.2.10 Tecnologie installate nell'impianto per effettuare le operazioni di macinazione materie prime

- Mulini
- Motori elettrici che movimentano i macchinari e i nastri trasportatori
- Eventuale nastro pesatore delle materie prime in ingresso
- Eventuali dispositivi di sollevamento per addurre le materie prime ai mulini

4.2.11 Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di macinazione

- Installazione **mulino tubolare** ("tube mill"), mostrato in Figura 43, in cui il materiale viene inserito all'interno di un cilindro rotante, contenente materiale abrasivo (solitamente sfere o barre). La rotazione del cilindro comporta uno sfregamento del materiale contro le pareti del cilindro stesso e con i dispositivi abrasivi, inoltre si esercitano forze di compressione che coadiuvano il processo di macinazione. Il mulino è costituito da più camere e passando di camera in camera le dimensioni del materiale vengono ridotte sempre di più, per il mulino di macinazione delle materie prime 2 camere sono sufficienti. Il materiale in ingresso al mulino deve avere un contenuto di umidità inferiore al 2% se non viene utilizzata aria calda per l'essiccazione [63].

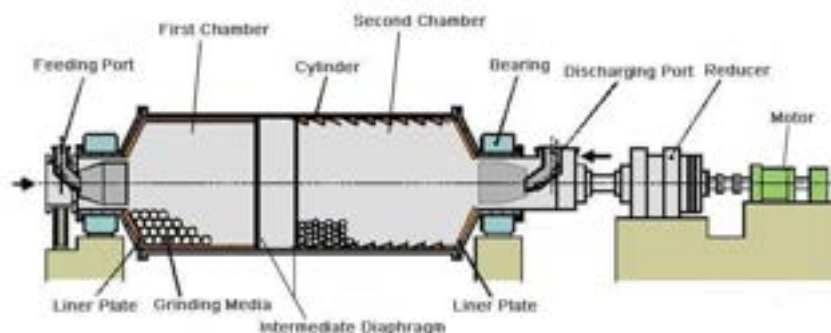


Figura 43. Schema rappresentante un mulino tubolare.

- Installazione **mulino tubolare ventilato** in cui la materia grezza viene riscaldata da i fumi in uscita dal forno, opportunamente diluiti con aria a temperatura ambiente per non surriscaldare i cuscinetti del forno stesso [70]. I gas verranno poi filtrati successivamente e dispersi nell'ambiente. Il materiale in ingresso deve avere un contenuto di umidità inferiore al 2% se non viene utilizzata aria calda per l'essiccazione [63].
- Installazione **mulino tubolare a scarico finale** con circuito chiuso, simile al precedente mulino a sfere, ma in questo caso il materiale macinato viene scaricato ad una periferia del mulino.
- Installare **mulino a sfere**, che ha un funzionamento analogo al mulino tubolare solo con un maggior rapporto diametro/lunghezza [63].
- Installare **mulino a sfere ventilato** [63]
- Installare **mulino a sfere a scarico finale con circuito chiuso** [63]
- Installare **mulino a sfere a scarico centrale** [63]
- Installazione **mulino a rulli orizzontale** [63], in cui la materia prima in ingresso viene macinata mediante la pressione esercitata da due o più rulli sul piano di lavoro (Figura 44). Nel corso degli anni numerose soluzioni tecnologiche sono state sviluppate, che in particolar modo prevedevano l'inclinazione dei rulli rispetto alla superficie di appoggio ai fini di aumentare la pressione grazie all'applicazione della forza centrifuga. I mulini a rulli orizzontale consentono un risparmio di energia elettrica ed una riduzione della CO₂ pari rispettivamente a 10,17 kWh/t e 10,45 kgCO₂/t, richiedendo un costo di installazione stimato di 58,85 RMB/t [71], [72].

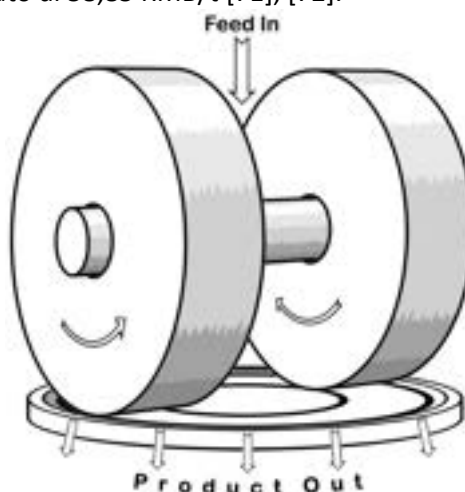


Figura 44. Semplice schema di funzionamento di un mulino a rulli orizzontale [70].

- Installazione **mulino autogeno** in cui il processo di macinazione viene effettuato dalla roccia stessa ed è proprio da questa caratteristica che nasce il suo nome. Questi mulini hanno in genere un alto rapporto diametro/lunghezza rispetto a quelli precedentemente citati e possono talvolta essere posti a monte rispetto ad un mulino a sfere ed in questo caso si parla di mulino a 2 stadi, tuttavia i mulini ad uno stadio sono preferibili vista la maggiore semplicità di funzionamento. Per questi mulini è possibile assumere un consumo energetico pari a 12–14 kWh/t [73].

- Installazione **mulino a rulli verticale** in cui i rulli si trovano su assi fissati e poggiano su un tavolo rotante (detto "pista"). I rulli applicano la pressione sul materiale presente tra di essi ed il piano rotante mediante un dispositivo esterno che aggiusta la tensione in base alle necessità del processo. Tramite l'immissione di aria calda (proveniente dal forno) nella parte bassa del macchinario, la polvere viene sollevata e condotta nella parte superiore del mulino, dove un separatore lascia passare solo le particelle sufficientemente fini, mentre quelle ritenute eccessivamente grandi ricadono sul piano di lavoro per un'ulteriore macinazione. Questi mulini hanno un consumo energetico pari a circa la metà rispetto ai mulini a sfere precedentemente visti [70], [74]. Questi mulini consentono un risparmio di energia elettrica compreso tra 5-14 kWh/t ed una riduzione di CO₂ emessa stimata di 2,6-6,8 kgCO₂/t. Ai fini di poter impiegare questi mulini il materiale in ingresso deve avere un contenuto di umidità inferiore al 20%

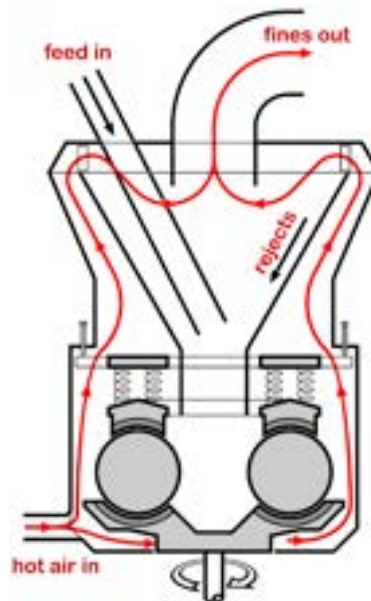


Figura 45. Schema di funzionamento di un mulino a rulli verticale.

- Installazione **pressa a rulli** in aggiunta ad un **mulino a sfere**, così da avere un'ulteriore fase di macinazione in ingresso al mulino a sfere e di conseguenza aumentarne l'efficienza riducendo il rapporto di riduzione che esso dovrà applicare [75]. La pressa a rulli può essere usata anche in sostituzione al mulino a sfere e consente un risparmio di 17 TWh in termini di energia elettrica ed una riduzione delle emissioni di CO₂ pari a 10Mton.
- Installare **mulino ventilato** [65]
- Installare un **mulino Polysius Aereofall**, che viene usato principalmente per la macinazione autogena. Questa tecnologia presenta una forma cilindrica con un alto rapporto diametro/lunghezza (solitamente compreso tra 3:1 e 5:1). All'interno del mulino vi sono dei sollevatori, che espongono l'aria al flusso dei gas. In base all'intensità dei gas le particelle sono portate verso l'uscita del mulino e addotte a dei separatori [65].
- Installare **mulino verticale a sfere** che ha lo stesso funzionamento di un mulino a rulli verticale, con la sola differenza riguardante a forma dei corpi che svolgono la macinazione.
- Migliorare il **materiale abrasivo** usato per le sfere o le barre del mulino a sfere. Questa soluzione consente di risparmiare fino a 10 TWh, riducendo le emissioni di CO₂ di una quantità stimata di 1,2Mton [75].
- Macinare separatamente i vari materiali in ingresso al mulino in base alla durezza. Necessari 2 o più mulini e dei silos in grado di gestire stoccaggi separati. Con questa soluzione si stimano risparmi energetici compresi tra 0,8 e 1,7 kWh/ton e riduzione delle emissioni di CO₂ nel range di 0,4-0,9 kgCO₂/ton [76].
- Macinare separatamente i vari materiali in ingresso al mulino in base alla finezza finale richiesta. Necessari 2 o più mulini e dei silos in grado di gestire stoccaggi separati. Con questa soluzione si

stimano risparmi energetici compresi tra 1,4 e 3,2 kWh/ton e riduzione delle emissioni di CO₂ nel range di 0,7-1,6 kgCO₂/ton [76].

- Installare un sistema a 3 ventole più una ventola dedicata alle operazioni del mulino a rulli verticale. Questa soluzione porta ad un risparmio di energia elettrica pari a 1,86 kWh/ton e ad una riduzione delle emissioni di CO₂ stimata in 0,967kg CO₂/ton. Il costo di investimento stimato è pari a 0,959\$/ton [71].
- Installare un **separatore a griglia statica** [65] a valle del mulino, in modo tale da classificare il materiale appena macinato. La farina viene indirizzata verso un cono in cui si inserisce un flusso d'aria dal basso verso l'alto, così facendo le particelle di più grandi dimensioni si accumulano nella parte del cono, separate dalle particelle più piccole. Cambiando l'intensità del flusso d'aria varia il controllo e la classificazione delle particelle in ingresso al separatore. Il principale vantaggio di questa tecnologia è che non vi sono al suo interno parti mobili, ma va ispezionata frequentemente.
- Installare un **separatore ad aria** ad alta efficienza a valle del mulino, in modo tale da classificare il materiale appena macinato. Questi vengono utilizzati prevalentemente per processi secchi. Tramite questo separatore si creano due flussi di aria di cui uno veicola le particelle più piccole e l'altro veicola le particelle più grosse. Esistono varie tipologie di separatore ad aria utilizzabili:
 - Turboseparator, in cui è presente un'ulteriore ventola [65].
 - Cyclone air separator in cui a differenza degli altri separatori ad aria, una corrente di aria esterna viene tramite un circuito chiuso e le particelle sono separate da vari cicloni posti in serie [65].
- Installare un **separatore a gabbia rotante** ad alta efficienza a valle del mulino, in modo tale da classificare il materiale appena macinato. Adottando questa tecnologia le particelle di diverse dimensioni vengono separate tramite la forza centrifuga.

4.2.12 Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di macinazione materie prime

Dalle diagnosi energetiche sono emerse due ulteriori soluzioni per la riduzione dei consumi energetici della fase di macinazione:

- Installazione di un mulino con separatore dinamico e cicloni con filtro di processo
- Sostituzione delle caldaie con caldaie più recenti ed avanzate
- Eliminazione di due cicloni dopo aver introdotto un elettrofiltro per il mulino

4.2.13 Omogeneizzazione

Il processo di omogeneizzazione è comune a tutti gli impianti di produzione del cemento e si rende necessario per ottenere in ingresso al forno una miscela il più uniforme possibile [65]. Fondamentale è infatti assicurare ai clienti che il cemento abbia sempre le stesse caratteristiche e proprietà a prescindere dal lotto acquistato. Una farina non uniforme in ingresso al forno genererebbe, inoltre, maggior costi legati al processo di cottura stesso in quanto si registra un aumento del combustibile necessario alla combustione, con conseguente maggiore usura dei materiali refrattari tipici del forno.

La fase di omogeneizzazione assume connotazioni fortemente diverse a seconda del tipo di processo di produzione del cemento a cui si fa riferimento. Per processi secchi o semi-secchi si utilizzano dei silos, all'interno di cui le materie prime vengono miscelate tramite dei flussi di aria. Nel caso in cui il processo sia umido o semi-umido invece le materie prime vengono omogeneizzate all'interno di appositi serbatoi mediante agitatori meccanici.

4.2.14 Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di omogeneizzazione

Dapprima saranno elencate le soluzioni individuate per i processi secco e semi-secco:

- Rimuovere qualsiasi **perdita d'aria** all'interno del sistema di aria compressa [61], in modo tale che il sistema di circolazione dell'aria sia il più efficiente possibile senza alcuna perdita [77].
- Dimensionare correttamente il circuito dell'aria in base alla quantità di farina da miscelare. Utilizzare sistemi sotto o sovradimensionati porta ad inefficienze prestazionali (non si lavora alle condizioni di design) e a maggiori consumi energetici [77].

- Ripristinare l'integrità strutturale del silo e rimuovere eventuali perdite, che comportano sempre maggiori consumi energetici: la farina non è miscelata come dovrebbe essere e pertanto questo genera una maggiore richiesta di energia.
- Installare **silo di miscelazione a turbolenza**, il quale può operare sia in modo continuo sia a lotti. Adottando questa tecnologia la farina all'interno del silo viene miscelata mediante l'iniezione di un elevato volume di aria tramite appositi dispositivi posti alla base del silo. Il consumo stimato di una miscelazione di questo tipo è pari a 1,5-2,5 kWh/ton [65].
- Installare **silo di miscelazione a flusso controllato a cono**, in cui flussi di aria meno forti rispetto al silo precedente miscelano il materiale grazie alle differenze dei tassi di discesa. La farina viene scaricata per mezzo di un'unica uscita posta alla base del cono. Il consumo stimato di una miscelazione di questo tipo è pari a 0,25-0,5 kWh/ton [65].
- Installare **silo di miscelazione a flusso controllato multi-uscita**, che è simile al precedente silo, ma con più uscite della farina omogeneizzata. Il consumo stimato di una miscelazione di questo tipo è pari a 0,1-0,13 kWh/ton [65].

Di seguito si riportano invece le soluzioni individuate per i processi umido e semi-umido

- Installare **serbatoio di miscelazione**
- Sostituire gli agitatori esistenti con agitatori ad alta efficienza che consentono di avere maggiori prestazioni e minor consumi energetici.

4.2.15 Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di omogeneizzazione

Dalle diagnosi energetiche è emersa un'ulteriore soluzione per ridurre i consumi energetici della fase di omogeneizzazione:

- Sostituire i soffianti con compressori a vite dotati di inverter

4.2.16 Controllo qualità delle materie prime

Prima di inserire la materia prima all'interno del forno, l'impasto presente all'interno dei silos e dei serbatoi di omogeneizzazione viene sottoposto a controlli di qualità per verificarne la corretta uniformità e composizione chimica. Oltre a questa fase di controllo, nella maggior parte degli impianti produttivi, vengono effettuati ulteriori controlli intermedi alle varie fasi di processo (frantumazione, macinazione e così via). Per suddetti controlli è possibile adottare vari sistemi tecnologici con diverse prestazioni e consumi energetici. Principalmente vengono impiegati a questo scopo spettrometri a raggi x o raggi γ . Si differenzia inoltre un controllo di tipo continuo da un controllo di tipo discontinuo [78].

4.2.17 Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di controllo

- Installare un laboratorio **a raggi x a fluorescenza** ("x-ray fluorescence-XRF") [78]. Questa tipologia di controllo può essere effettuata in vari punti del processo, ad esempio in corrispondenza del trasporto al mulino, oppure prelevando campioni dalle catoste di stoccaggio. Con questa tecnologia si va a studiare lo spettro delle radiazioni che bypassano il campione. I vantaggi di questa tecnologia sono: ottenimento immagini su pellicola (recettore raggi x) definite, la sorgente non è soggetta a decadimento, la potenza ed il tempo di esposizione dei semilavorati ai raggi può essere regolata dall'operatore. Tra gli svantaggi si annoverano: la necessità di corrente per alimentare la sorgente radiogena e poter emettere un fascio di raggi, il maggior ingombro della strumentazione rispetto a quella necessaria per i controlli a raggi gamma, complicazioni derivanti da controllo di soggetti con spessori elevati (i raggi x possono oltrepassare solo se il soggetto ha spessore limitato) e limitazioni nell'esecuzione di controlli sui campioni legate al ridotto spazio di manovra dei macchinari.
- Installare un **laboratorio XRF automatizzato**, che incrementa la produttività del controllo, ma che necessita di ulteriori macchinari per preparare il campione da analizzare [78].
- Installare un controllo di tipo **energy dispersive XRF** (EDXRF) in prossimità del mulino. Si tratta di un controllo automatizzato di tipo "near-online", difatti è possibile avere un controllo del campione ogni 3 minuti circa. Una delle tecnologie utilizzate è sviluppata da General Electric e prende il nome di **x-ray emission gage** (XEG), che è in grado di effettuare un controllo ogni 3 minuti circa [78].
- Installare uno spettrometro EDXRF di tipo **Cross-Belt XRF** sul nastro trasportatore dal sito di pre-omogeneizzazione al mulino [78].

- Installare un **laboratorio con spettrometro a raggi gamma** [78] che rispetto ai raggi x hanno potenze maggiori e necessitano di uno spessore maggiore per essere fermati. I vantaggi di questa tecnologia sono che la sorgente radioattiva è autonoma e non necessita di corrente, la strumentazione presenta ingombro minimo e i raggi gamma sono in grado di oltrepassare soggetti con spessore maggiori. Di contro questa tecnologia comporta ottenere immagini meno definite rispetto a quelle dei raggi x, la sorgente è soggetta a decadimento radioattivo, la potenza del macchinario non può essere regolata dall'operatore che può controllare solo il tempo di esposizione. Esistono vari approcci all'uso di questa tecnologia:
 - Chute γ -ray in cui la farina in uscita dal frantoio, scorre attraverso un apposito scivolo verticale, in cui si effettua il controllo. Si possono controllare fino a 1000 tph.
 - Batch γ -Ray in cui si ha un funzionamento simile ad i laboratori a raggi x e che può analizzare maggiori quantità di cemento per volta e più velocemente, senza bisogno di preparazione. Questa tipologia di controllo non è molto utilizzata, ma potrebbe prendere campo in futuro.
 - Slurry γ -Ray che è molto simile al processo chute, solo relativa al controllo della melma tipica dei processi umido e semi-umido.
 - Cross-Belt γ -Ray che un'evoluzione del Chute γ -Ray atta a migliorare la facilità di installazione e l'affidabilità del controllo. Questa tecnologia effettua un controllo del materiale movimentato dal nastro trasportatore ogni minuto.

4.2.18 Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di produzione melma

Questa fase di produzione è tipica solamente dei processi umidi e semi-umidi, in cui la farina cruda in uscita dal mulino viene successivamente miscelata insieme ad acqua ed argilla. L'aggiunta di acqua all'impasto comporta una maggiore facilità di miscelazione e trasporto, oltre a ridurre la volatilità delle polveri. Di contro ha lo svantaggio di rendere il processo maggiormente energivoro, in quanto in fase di cottura l'umidità aggiunta in questa fase dovrà rimossa, richiedendo pertanto un maggior apporto di calore [63]. Oggigiorno, proprio per le maggiori necessità di calore da apportare per il processo, la maggior parte dei cementifici si stanno convertendo a processi secchi o semi-secchi [61].

- Installare **lavatoio a circuito chiuso** stimato avere dei risparmi energetici compresi tra 8 ed 11,9 kWh/ton ed una riduzione di emissioni di CO₂ pari a circa 2-2,7 kgCO₂/ton [63].
- Installazione **mulino tubolare** per processi umidi e semi-umidi [63]
- Installazione **mulino a sfere** per processi umidi e semi-umidi [63]

4.2.19 Trasporto e movimentazione delle materie prime nella fase di preparazione delle materie prime

I sistemi di movimentazione e trasporto delle materie prime costituiscono un'importante parte di un impianto di produzione del cemento ed è pertanto possibile agire su questi per ottenere una riduzione dei consumi energetici. Sono disponibili le seguenti soluzioni:

- Installare **efficienti sistemi di trasporto** del materiale in ingresso ed in uscita dal frantoio. Questo consente di ridurre i consumi energetici fino a 2 kWh/ton [79], i costi e le emissioni di CO₂
- Installazione **un sollevatore a tazza** per alimentazione materie prime al mulino così da poter rendere più efficiente l'adduzione delle materie prime al mulino stesso. Questo macchinario ha un costo stimato di 1,56 RMB/ton, giustificato da un risparmio di energia elettrica pari a 2,35kWh/ton ed una riduzione di emissione di CO₂ dell'ordine di 2,42 kgCO₂/ton [72].
- Installazione **nastro pesatore** per le materie prime in ingresso al mulino, in questo modo è possibile avere una misurazione precisa e veloce delle materie prime approvvigionate al mulino. Questo consente un processo più efficiente in quanto è possibile controllare meglio la quantità di materiale addotto all'interno della fase di macinazione [63].
- Installare un **sollevatore a tazza** [63] per alimentare le materie prime al silo così da poter rendere più efficiente l'adduzione delle materie prime al silo stesso
- Installare **nastro trasportatore** per l'alimentazione materie prime al serbatoio [63]
- Installazione nastro trasportatore per alimentazione argilla al lavatoio/mulino
- Installare dei **sistemi di trasporto automatizzato** dei campioni dal punto di prelievo al laboratorio di analisi per il controllo [78].

- Installazione **nastro trasportatore** per alimentazione essiccatore [63].

4.3 Cottura e raffreddamento

4.3.1 Preriscaldamento

L'impasto ottenuto durante le precedenti lavorazioni subisce un progressivo riscaldamento per far evaporare l'acqua presente al suo interno, innescando poi i processi di calcinazione e de-carbonatazione. Una volta raggiunta una temperatura di circa 1400-1500°C, ha inizio il processo di sinterizzazione, che trasforma l'impasto in clinker. La fase di cottura viene preceduta da un preriscaldamento per i processi secchi, semi-secchi e semi-umidi. In questi processi l'impasto viene riscaldato mediante flusso di aria calda in uscita dal forno.

4.3.2 Tecnologie installate nell'impianto per effettuare le operazioni di preriscaldamento

- Torre di preriscaldamento o preriscaldatore a cicloni
- Preriscaldatore a griglia
- Calcinatore
- Bruciatori
- Fan per spingere i gas di scarico
- Nastri trasportatori per la movimentazione dell'impasto
- Motori per la movimentazione dei macchinari e dei nastri di trasporto

4.3.3 Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di preriscaldamento

Il preriscaldamento può avvenire in vari modi in base alla tipologia di processo di produzione adottato ed in base alla tecnologia adottata diversi saranno i consumi energetici.

- Per il processo secco installare una **torre di preriscaldamento** (Figura 46) costituita generalmente da più stadi. I gas caldi provenienti dal forno risalgono gli stadi della torre, raffreddando l'impasto in ingresso, che invece si muove controcorrente. Gli stadi vengono definiti cicloni e sono solitamente compresi tra 4 e 6 in base al contenuto di acqua presente all'interno dell'impasto.

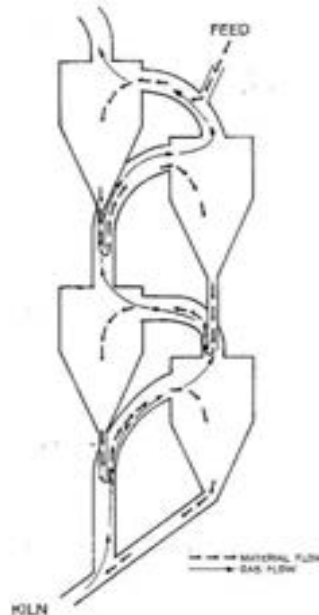


Figura 46. Schema di una torre di preriscaldamento a più stadi.

- Installare una torre di preriscaldamento con un maggior numero di stadi (5 o 6) per ottenere un maggior recupero di energia termica [63]. Questo comporta però che negli stadi finali, i gas fortemente raffreddati non hanno sufficiente temperatura per far evaporare il contenuto di acqua. Adottando questa soluzione si ha un risparmio di energia termica di 111 MJ/ton ed una riduzione di CO₂ stimata di 9,8 kg/ton [72]. Aumentare il numero di stadi aumenta anche l'efficienza del forno posto a valle.

- Installare stadi a **bassa caduta di pressione**, che consente di avere un risparmio energetico pari a 2,9 kWh/ton ed una riduzione della CO₂ emessa nell'ambiente fino a 2,67 kgCO₂/ton [72]. Il sistema di ventilazione dei gas di scarico del preriscaldatore deve essere con motori a velocità variabile.
- Installare una torre di preriscaldamento con un minor numero di stadi. Maggiore è il contenuto di acqua dell'impasto e minore dovrà essere il numero di stadi affinché si possa ottenere la completa evaporazione dell'acqua durante la fase di preriscaldamento. In questo modo i gas presenteranno infatti sufficiente energia termica per il processo di essiccazione. In questo modo si avrà però un minor recupero di energia termica dai gas in uscita dal forno.
- Porre alla base della torre di preriscaldamento un **calcinatore**, ovvero un ulteriore stadio di bruciatori che forniscono calore alla base della torre. Il calore necessario viene distribuito in modo più uniforme, facilitando il successivo scambio termico tra impasto e gas, garantendo così un maggior recupero energetico [63].
- Per i processi semi-secco e semi-umido installare un **preriscaldatore a griglia** (Figura 47) in cui l'impasto muovendosi verso il forno scambia calori con i gas caldi in uscita da quest'ultimo. I gas si muovono in controcorrente rispetto all'impasto e dall'alto verso il basso, attraversando la griglia. Il preriscaldatore a griglia ammette un contenuto di acqua maggiore rispetto al preriscaldatore a cicloni, ma lo scambio termico ed il recupero di calore risultano essere inferiori [63].
- Installare un **calcinatore** nella zona limitrofa al forno quando si adotta un preriscaldatore a griglia. Si ottengono gli stessi vantaggi del riscaldatore a cicloni.

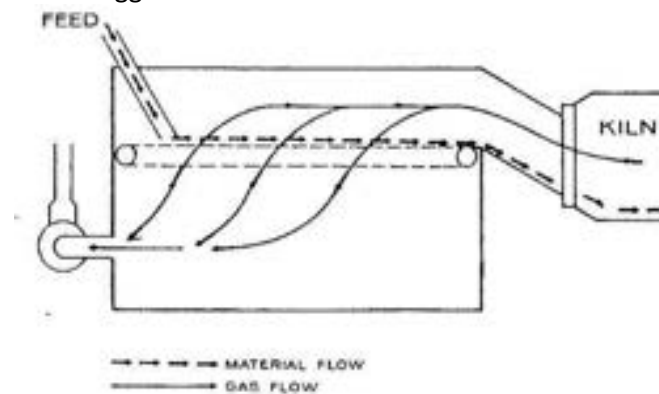


Figura 47. Schema di funzionamento di un preriscaldatore a griglia.

- Sostituzione dei **bruciatori del calcinatore** [63].
- Installare un **calcinatore ad alto rapporto solido/gas**, in particolare con un rapporto solido/gas pari a circa 2, così che la successiva fase di fusione abbia un consumo di energia termica simile a quello teorico. A seguito del precalcinatore vi sono 5 stadi ognuno caratterizzato da 2 cicloni posti in parallelo [79].
- Sostituire i calcinatori esistenti con calcinatori più moderni, così da migliorare sia l'efficienza che le prestazioni energetiche, generando fino ad un risparmio di 430 MJ/ton in base alla tipologia di calcinatore adottato [61].
- Installare di un **sistema di recupero della potenza** (slip power recovery system) per la ventola del calcinatore. Con questa soluzione si stima un risparmio di energia elettrica pari a 0,503 kWh/ton, una riduzione delle emissioni dell'ordine di 0,261 kgCO₂/ton ed un costo di investimento di 0,068 \$/ton [71].
- Ottimizzare il numero di stadi dei cicloni in relazione alle caratteristiche ed alle proprietà di materie prime e combustibile [63].

4.3.4 Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di preriscaldamento

Dalle diagnosi sono emerse tre ulteriori soluzioni tecnologiche per ridurre i consumi dei sistemi di preriscaldamento:

- Ridurre il numero di cicloni da 16 a 12 per il preriscaldatore a griglia Leopol

4.3.5 Cottura

La cottura è la fase principale del processo di produzione del cemento ed avviene per mezzo di un forno. Esistono due tipologie principali di forno denominate forno a condotto orizzontale e forno a condotto verticale. Il forno è responsabile per circa il 90% del consumo di gas naturale dell'intera industria del cemento, anche se il gas naturale viene usato come combustibile di supporto al carbone [61]. Il rimanente 10% di gas naturale viene impiegato per il riscaldamento di materiale o l'azionamento di motori, che sono in prevalenza caratterizzati dall'impiego di energia elettrica.

Il forno rappresenta l'organo più energivoro dell'impianto produttivo e ad esso si riconduce circa il 90% di energia (86% derivante da carbone e 4% derivante dalla rete elettrica) consumata dall'intero sito produttivo [61]. Si può quindi intuire come una corretta progettazione e adozione di soluzioni costruttive mirate al risparmio energetico sia fondamentale per questo macchinario.

I forni a condotto verticale sono caratterizzati da una limitata capacità produttiva ed è per questo che vengono impiegati nei cementifici di piccole dimensioni in quanto permettono una maggiore compattezza dato il loro sviluppo verticale [63]. Visto l'incremento progressivo della domanda di cemento, la maggior parte degli impianti ha iniziato ad usare forni rotanti più performanti e con maggior capacità produttiva. Essi, infatti, garantiscono una cottura più efficace ed efficiente. I forni rotanti hanno tuttavia necessità di più spazio a causa della loro conformazione orizzontale e questo comporta anche un maggior consumo di energia termica. Infatti, il consumo di un forno è influenzato principalmente dalla lunghezza del forno stesso. Il processo umido in particolar modo, non potendo disporre di un preriscaldatore, è caratterizzato da forni rotanti particolarmente lunghi, viceversa per le altre tipologie di processo, nel caso in cui si adotti un sistema di preriscaldamento, la lunghezza del forno può essere relativamente contenuta. La lunghezza del forno rotante determina anche il fabbisogno di energia elettrica necessario a farlo ruotare intorno al proprio asse, difatti maggiore è la sua lunghezza, maggiore sarà il suo peso e di conseguenza la potenza richiesta a movimentarlo. Inoltre, all'aumentare della lunghezza aumentano anche le perdite di carico, comportando così una maggiore potenza richiesta dei sistemi di ventilazione.

4.3.6 Tecnologie installate nell'impianto per effettuare le operazioni di macinazione

- Forno
- Bruciatori per riscaldare il forno
- Sistemi di ventilazione come fan per spingere i gas di scarico
- Nastri trasportatori per la movimentazione dell'impasto
- Motori per la movimentazione dei macchinari e dei nastri di trasporto
- Compressori per l'iniezione di combustibile ed aria comburente
- Pompe per l'iniezione di combustibile
- Sistemi di sollevamento dell'impasto in ingresso

4.3.7 Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di cottura

- Installazione **forno rotante** ("rotatory kiln"), mostrato in Figura 48. Rispetto al forno verticale, il forno rotante consente di avere un processo più efficace ed efficiente, proprio grazie alla rotazione del forno stesso. Inoltre, questo forno si adatta a capacità di impianto superiori [63]. Il forno consiste in un tubo metallico allineato ad un condotto di materiale refrattario. Il forno ruota alla velocità di 30-250 rivoluzioni all'ora e presenta un'inclinazione compresa tra 1° e 4°. L'impasto ottenuto dalle precedenti fasi di lavorazione viene immesso nella parte alta del forno e gradualmente scende verso la parte opposta dove è posto il bruciatore.

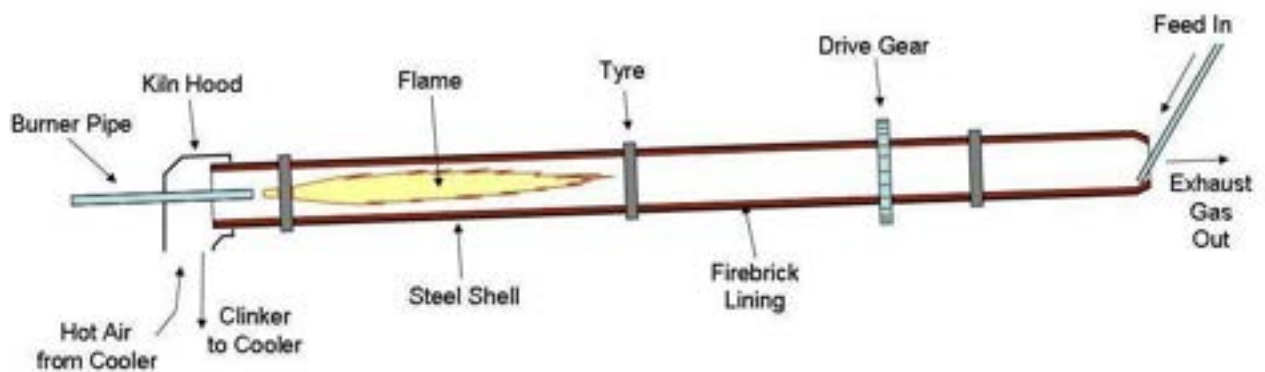


Figura 48. Schema di funzionamento di un forno rotante.

- Installazione **forno a condotto verticale** ("vertical shaft kiln"), mostrato in Figura 49. Grazie alle sue ridotte dimensioni limita sia in consumi energetici, che le necessità di spazio all'interno dell'impianto. Inoltre, questo forno è caratterizzato da bassi costi di investimento iniziali. Questa tipologia di forno ha però numerosi svantaggi come la necessità di molta manodopera, impossibilità di usare combustibili alternativi, maggiori emissioni e difficoltà di adattare in uscita dei sistemi di rimozione della polvere dai gas di scarico [80]. In questo forno il materiale viene addotto dalla parte superiore, mediante l'utilizzo di nastri e sollevatori. All'interno del forno vi sono poi vari comparti caratterizzati da diversa temperatura, fino ad arrivare all'uscita (parte inferiore del forno) in cui avviene il raffreddamento. Trattandosi di un processo principalmente statico non vi è sfregamento e rotolamento dell'impasto immesso all'interno, rendendo più difficile la sinterizzazione.

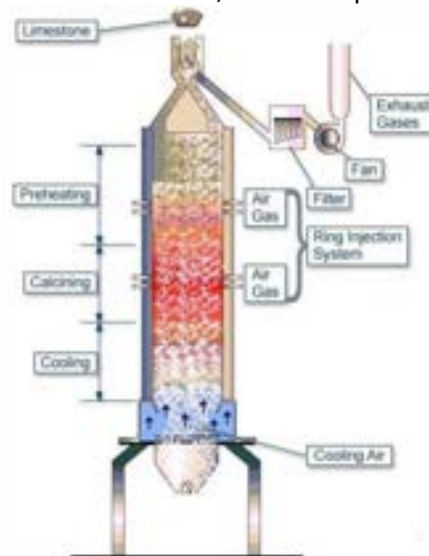


Figura 49. Schema di funzionamento di un forno a condotto verticale.

- Installazione **bruciatori a singolo canale** in base al profilo di temperature desiderato questa soluzione può risultare conveniente in termini di consumi energetici [63].
- Installazione **bruciatori multicanale** in base al profilo di temperature desiderato questa soluzione può risultare conveniente in termini di consumi energetici [63]. In base alla temperatura dell'aria utilizzare moderni bruciatori multicanale può portare ad un risparmio di energia termica compreso tra 0,05 e 0,08 GJ/ton. Il fabbisogno di energia elettrica rimane tuttavia inalterato [79].
- Migliorare il **rivestimento refrattario** del forno, che permette di avere una minore dispersione di energia termica. Una soluzione di questo tipo porta ad un risparmio di combustibile pari a 0,26GJ/ton e ad una riduzione delle emissioni di CO₂ stimata di 24,6kgCO₂/ton. Il costo di investimento per questa tecnologia risulta pari a 1,71 RMB/ton [72].
- Adottare **migliorie del sistema di combustione**, in particolare legate alla forma della fiamma, alla miscela di aria-combustibile e alla riduzione dell'aria in eccesso. Per i forni rotatori la tecnologia Gyro-Therm consente contemporaneamente la riduzione della quantità di NO_x generata (dal 30% al 70%),

migliorando la qualità della fiamma. Inoltre, la tecnologia fornisce un risparmio di combustibile dal 2 al 10% in base alla tipologia di forno ed aumenta la produttività del 5% [79].

- Installare **forni per cemento a letto fluido** (“Fluidized Bed Advanced Cement Kiln System”). Con questa tecnologia il cemento viene prodotto mediante un letto fluido e l’iniezione di materiale grezzo. Il materiale grezzo viene ridotto fino a delle dimensioni specifiche e poi raffreddato tramite due fasi successive. I vantaggi di questa nuova tecnologia sono molteplici, tra tutti la riduzione delle emissioni di CO₂, la maggiore efficienza termica raggiungibile con i sistemi di raffreddamento (20% in più rispetto ai sistemi di raffreddamento tradizionali), ridotti costi di costruzione e manutenzione vista l’assenza di parti rotanti, un miglior controllo della temperatura ed una riduzione delle emissioni di NO_x in quanto la combustione avviene nel letto liquido senza generare una fiamma. Questa tecnologia è tuttavia ancora in fase di sviluppo e pertanto non adattabile a grandi produzioni [79].
- Stabilizzare il **rivestimento esterno** del forno in modo da ridurre le perdite di calore e proteggere contemporaneamente il materiale refrattario al suo interno.
- Installare **sistemi di fiamma indiretti** (“indirect firing system”), in cui né il combustibile, né l’aria sono immessi direttamente nel forno. Tutta l’umidità estratta dall’essiccazione del carbone viene ventilata ed il carbone polverizzato viene trasportato ai bruciatori con una piccola quantità di aria. Soprattutto nel caso in cui si adottino bruciatori multicanale, la percentuale di aria è fortemente ridotta (di solito del 5-10%) e di conseguenza la quantità di NO_x prodotta risulterà inferiore. Inoltre, un sistema di questo tipo consente di ridurre le perdite di energia ed avere una maggiore flessibilità in termini di tipologia di combustibile utilizzato. Una soluzione di questo tipo consente un risparmio di energia termica compreso tra 0,15 e 0,22 GJ/ton [79].
- Installazione **ventole** nel forno con un diametro in ingresso maggiore. Questa soluzione ha un basso costo di investimento, ma è utile nel diminuire le perdite di attrito e le cadute di pressione caratteristiche [61].
- Sostituzione del forno esistente con un forno a capacità doppia [74].
- Installazione **sistema di alimentazione gravimetrico** per bruciatori combustibile solido [63].
- Installazione pompe per bruciatori combustibile liquido ad alta efficienza [63].
- Installazione **turbina** per recupero energia di pressione combustibile gassoso in arrivo da rete internazionale ad alta pressione [63].
- Installazione di **dosatori gravimetrici** per efficientare l’alimentazione della farina al forno [63].
- Minimizzare il **flusso di bypass** [79].
- Installazione di **sistemi di combustione indiretta** [79].
- Stabilizzare il rivestimento esterno del forno [79].

4.3.8 Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di cottura

Dalle diagnosi sono emerse ulteriori soluzioni tecnologiche per ridurre i consumi relativi alle attrezzature del processo di cottura:

- Sostituire il ventilatore afferente al processo di estrazione del forno con un ventilatore a giri variabili.
- Sostituzione del ventilatore intermedio del forno con un ventilatore dotato di inverter.
- Installare esaustori intermedi dotati di inverter, ai fini di ottimizzare la potenza erogata durante il processo di cottura.
- Installare un sistema di conduzione automatica per il forno.

4.3.9 Raffreddamento

In uscita dal forno il clinker viene raffreddato mediante uno o più refrigeratori, fino a raggiungere temperature comprese tra 120 e 200°C. Questo passaggio si rende necessario per consolidare la microstruttura del clinker e recuperare la maggior quantità possibile di calore. Per refrigerare il clinker si utilizza generalmente un flusso d’aria, che, spostandosi controcorrente rispetto al clinker, scambia calore con quest’ultimo. In uscita al refrigeratore l’aria riscaldata può essere poi utilizzata come comburente per i vari bruciatori del forno o dei precalcinatori (se presenti), oppure per preriscaldare l’impasto prima dell’ingresso nel forno. La quantità di aria che passa per i refrigeratori è solitamente determinata dalla quantità di aria comburente che serve al processo di combustione.

4.3.10 Tecnologie installate nell'impianto per effettuare le operazioni di raffreddamento

- Refrigeratore
- Sistemi di ventilazione per spingere l'aria
- Nastri trasportatori per la movimentazione dell'impasto
- Motori per la movimentazione dei macchinari e dei nastri di trasporto
- Compressori
- Pompe

4.3.11 Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di raffreddamento

- Installare **refrigeratore a tubi** ("tube cooler" [63]) il quale usa lo stesso principio del forno rotante, ma con uno scambio di calore inverso (il clinker nel forno viene riscaldato, mentre nel refrigeratore la temperatura del forno diminuisce). Questo refrigeratore è solitamente situato in uscita al forno con una configurazione opposta rispetto a quest'ultimo. All'interno del refrigeratore vi sono dei sollevatori per disperdere il materiale nel flusso d'aria e facilitare il raffreddamento.
- Installare **refrigeratore a planetario** ("planetary cooler" [63]), che è formato da 9-11 tubi disposti all'uscita del forno. Il forno presenta dei fori di uscita in corrispondenza degli attacchi di ciascun tubo e tramite cui il clinker caldo passa dal forno al refrigeratore. Anche in questo caso la presenza di sollevatori risulta essenziale per favorire l'abbassamento di temperatura del clinker.
- Installare **refrigeratore a grata itinerante** [63] in cui il clinker, appoggiato su una grata permeabile all'aria, viene investito da un flusso d'aria fresca direzionato dall'alto verso il basso. Questa grata ha un funzionamento simile alla grata di preriscaldamento dell'impasto prima dell'immissione all'interno del forno. Una soluzione tecnologica di questo tipo porta però delle complessità meccaniche ed è per questo che è caduta in disuso.
- Installare **refrigeratore a grata oscillante** [63]. Anche in questo caso, così come nel precedente, il clinker viene posizionato sopra una grata permeabile all'aria e raffreddato mediante un flusso di aria che si muove dall'alto verso il basso. Con questa soluzione il clinker si muove a step lungo il refrigeratore, passando da un piano al successivo della grata mediante l'azione esercitata da appositi motori. All'interno di questo refrigeratore si trovano due zone distinte: la zona di recupero in cui l'aria calda ottenuta viene inviata ai bruciatori del forno o del calcinatore e la zona di post-raffreddamento in cui ulteriore aria fredda viene addotta all'interno del refrigeratore.
- Installare **refrigeratore a grata di terza generazione** [63], ovvero refrigeratori più compatti, che utilizzano meno aria di raffreddamento e sistema di rimozione delle polveri più piccoli. L'idea di base di questa soluzione tecnologica è quella di separare il trasporto del clinker dal flusso di aria. In un refrigeratore a grata di terza generazione si ha una grata fissa ed inclinata ed il clinker si muove mediante dispositivi come "pavimenti mobili" ("walking floors"). Queste tipologie di refrigeratori si adattano molto bene ad impianti con alte capacità di produzione. Rispetto ad un refrigeratore planetario, i refrigeratori di terza generazione consentono un risparmio di energia termica compreso tra 100 e 300 MJ/ton ed una riduzione delle emissioni di CO₂ nel range di 18-26kgCO₂/ton [60], [71].
- Installare **refrigeratore verticale** [63], denominato anche "gravity cooler" o "G-cooler". Questo tipo di refrigeratore viene installato solitamente in successione ad un refrigeratore planetario o un refrigeratore a grata relativamente corto. L'aria non entra mai in contatto con il clinker, infatti quest'ultimo discende sopra dei condotti all'interno di cui passa aria fresca.
- Sostituire griglie esistenti con griglie più moderne così da avere un vantaggio sia in termini economici che di consumi energetici [74].
- Sostituire i refrigeratori a griglia esistenti, con refrigeratori a griglia ad alta efficienza [79]. Un refrigeratore a griglia caratterizzato da una maggiore efficienza porta vari vantaggi tra cui una riduzione dei consumi di energia termica e di combustibile, che potrà pertanto essere impiegato per altre necessità dell'impianto. Inoltre, i refrigeratori ad alta efficienza permettono di recuperare maggior calore dal clinker caldo, in quanto la temperatura di quest'ultimo viene abbassata fino ad 83°C. Il costo legato al passaggio a refrigeratori più efficienti è stimato tra 0.44 e 5,5 (\$/capacità impianto), con un payback period di 1-2 anni circa. Inoltre, il consumo di combustibile può essere ridotto fino all'8%, ma un aumento dei consumi di energia elettrica.

- Sostituire **piastre della griglia** di un refrigeratore a grata itinerante per ottenere un sistema funzionante alle condizioni di design.
- Sostituire **sistema di ventilazione** refrigeratore a grata itinerante con uno nuovo in modo da ripristinare le condizioni iniziali di funzionamento.
- Aggiunta di **griglia statica** a refrigeratore a grata itinerante di seconda generazione [63].
- Installare un **refrigeratore rapido** [63] nel caso in cui si produca cemento bianco. Questi refrigeratori sono realizzati ad hoc per l'impianto in modo tale da raggiungere le specifiche di prodotto richieste. Adottando questa soluzione tecnica il clinker viene raffreddato spruzzando acqua, ottenendo così un miglioramento del bianco del cemento. In caso si produca cemento bianco, infatti, la fase di cottura richiede una maggior apporto di energia termica, mentre la fase di raffreddamento deve essere eseguita tramite l'utilizzo di appositi refrigeratori ad acqua in cui si crea un'atmosfera priva di ossigeno al fine di evitare eventuali contaminazioni da parte dei gas combustibili.
- Installare un **disco rotante di raffreddamento** ("revolving disc cooling"). Questa tecnologia è nota da molti anni nel settore della produzione di acciaio ed è stata recentemente trasformata per applicazioni nei cementifici. La grata tipica di molti refrigeratori viene sostituita da un disco, che impiega circa 30 minuti per compiere un'intera rotazione su sé stesso. Il clinker viene posizionato sul disco per mezzo di una grata fissa e leggermente inclinata, che a sua volta viene posta in uscita dal forno. La tecnologia non è ancora stata impiegata effettivamente in veri siti produttivi.
- Ottimizzare il recupero di calore del refrigeratore, ad esempio installando una griglia statica nei pressi dell'estremità calda del refrigeratore [79].

4.4 Macinazione finale

La macinazione finale rappresenta una fase cruciale della produzione di qualsiasi tipo di cemento, infatti in quest'ultima parte il clinker in uscita dal refrigeratore viene macinato assieme a degli additivi per ottenere il cemento con le caratteristiche desiderate. In questa fase vengono usati macchinari e tecnologie simili alla precedente fase di macinazione dell'impasto delle materie prime, infatti, i vari additivi vengono inseriti in dosi precise (sotto forma di particelle di diametro compreso tra 3 e 25mm) all'interno dei mulini con il clinker. A differenza della precedente macinazione, la macinazione finale non richiede alcun apporto di calore in quanto il contenuto di acqua all'interno delle varie sostanze è trascurabile ed i mulini provvedono in autonomia all'essiccazione.

Esistono varie tipologie di additivi che possono essere aggiunte al clinker:

- loppe di altoforno
- fumi di silice
- pozzolana
- ceneri volanti
- scisto calcinato
- ulteriore calcare che è già presente all'interno del clinker

Sia le loppe di altoforno, che le ceneri volanti possono essere aggiunte durante la prima fase di macinazione in quanto grazie al proprio potere calorifico, contribuiscono ad abbassare l'energia termica richiesta dal processo di riscaldamento [74]. In generale tanto più il cemento è composto da clinker e tanto maggiore sarà l'energia richiesta al processo produttivo, difatti la maggior parte dell'energia viene impiegata proprio per la formazione del clinker stesso.

Uno dei principali costituenti secondari del cemento è il gesso, che viene utilizzato per ottenere un determinato colore finale. In particolar modo, nel caso di produzione di cementi bianchi, la percentuale in massa di gesso sarà più elevata se confrontata con la quantità di gesso usata per i cementi comuni.

La macinazione finale è responsabile per circa il 40% del consumo complessivo di energia elettrica all'interno dell'impianto. La tecnologia più utilizzata è il mulino a sfere, anche se il mulino a rulli verticali sta iniziando ad affermarsi sempre di più [79].

4.4.1 Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di macinazione finale

- Installare un **mulino a sfere a circuito chiuso**.
- Installare un **mulino a sfere a scarico finale con circuito chiuso** [63].
- Installare un **mulino a sfere a scarico finale con circuito aperto**.

- Installare un **nastro pesatore** per ciascun materiale in ingresso al mulino.
- Installare un **mulino a rulli verticale** [63], [71], [74].
- Installare un **mulino a rulli orizzontale**.
- Installare un mulino a rulli verticale prima del mulino a sfere
- Installare una pressa a rulli prima del mulino a sfere [63]
- Installare un **regolatore del flusso** di clinker in ingresso al mulino a tubo, in modo tale da assicurare la corretta quantità di clinker in ingresso al mulino stesso. Si stima una riduzione dei consumi di energia elettrica compresa tra 2 e 3 kWh/ton [79].
- Installare un **liner di classificazione** per il mulino a sfere in ingresso alla seconda camera, cosicché le sfere di diversa dimensione rimangono separate nelle due camere e alla seconda camera possa accedere solo il materiale sufficientemente macinato. Una soluzione di questo tipo porta ad un risparmio di energia elettrica stimato di 1-2 kWh/ton [79].
- Usare un **aiuto alla macinazione** per il mulino a sfere, che porta ad un aumento in termini di efficienza del processo di macinazione. In sostanza si inserisce all'interno del mulino un'apposita sostanza che previene la formazione di agglomerati [79].
- Installare **tecnologia al plasma**, in cui si creano all'interno di un liquido delle scariche elettriche in grado di macinare il clinker [79].
- Installare **tecnologia ad ultrasuoni**. In questa tecnologia si utilizzano due dischi contro-rotanti, che mediante delle superfici appositamente progettate generano ultrasuoni. Gli ultrasuoni così generati generano pressioni sulle particelle di clinker che sono così polverizzate efficientemente [79].
- Migliorare il **materiale abrasivo** usato per le sfere di un mulino a sfere o sostituire le sfere attualmente impiegate con sfere più performanti [71] [79].

4.4.2 Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di macinazione finale

Dalle diagnosi sono emerse le seguenti soluzioni tecnologiche per migliorare i consumi energetici della fase di macinazione finale:

- Installare ponderosatori per il dosaggio delle materie in ingresso al mulino.
- Installare un sistema di conduzione automatica per i mulini a sfere.
- Ottimizzare il feeding system.

4.5 Macinazione combustibile

La macinazione del combustibile è un processo che sfrutta tecnologie simili ai processi di macinazione delle materie prime e del clinker. La differenza principale rispetto ai due processi già descritti deriva dal fatto che in questa fase viene macinato il combustibile necessario alla combustione del processo di cottura.

4.5.1 Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di macinazione combustibile

- Installazione di un **separator/classificatore** ad alta efficienza [71], [72], [74].
- Installazione di un **mulino a sfere ventilato** per combustibile solido[60], [63].
- Installazione di un **mulino a rulli verticale** per combustibile solido[60], [63].
- Installazione di un **mulino a impatto** per combustibile solido[60], [63].
- Installazione di una **pressa a rulli** per combustibile solido [60], [63].
- Installazione di un **nastro pesatore** per le materie prime in ingresso al mulino [63].

4.5.2 Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di macinazione combustibile

Dalle diagnosi è emersa un'ulteriore soluzione tecnologica per ridurre i consumi delle tecnologie afferenti al processo di macinazione del combustibile:

- Installazione di un sistema di controllo scuotimenti per ottimizzare i consumi di aria compressa.

4.6 Trattamento e depolverizzazione dei gas di scarico

I gas di scarico in uscita dal forno, dal refrigeratore, dal preriscaldatore o dai mulini di macinazione delle materie prime hanno al loro interno sia ceneri che prodotti sviluppati nella combustione e pertanto non possono essere scaricati direttamente nell'ambiente in quanto produrrebbero un forte impatto ambientale. Prima di poter disperdere i fumi nell'ambiente è necessario trattarli rimuovendo le polveri e le sostanze inquinanti. Ai fini di rimuovere tutto ciò che nuocerebbe all'ambiente si possono usare vari dispositivi, come

sistemi di filtraggio che trattengono le ceneri e le polveri dei combustibili, oppure precipitatori elettrostatici, che applicando forti campi magnetici rimuovono alcune parti dei gas di scarico. Inoltre, si impiegano riduttori catalitici e non catalitici per eliminare altri elementi inquinanti come gli ossidi di azoto.

La principale fonte di energia usata per questa fase del processo è energia elettrica, che viene impiegata sia per l'azionamento dei dispositivi di depolverizzazione e trattamento dei gas di scarico, sia per il funzionamento del sistema di ventilazione necessario a spingere i fumi stessi.

4.6.1 Tecnologie installate nell'impianto per effettuare le operazioni di trattamento dei fumi

- Sistemi di ventilazione per spingere l'aria
- Torre di raffreddamento
- Motori per la movimentazione dei macchinari
- Compressori
- Pompe
- Selective non-catalytic reduction system
- Selective catalytic reduction system
- Sistemi a scrubber umido
- Sistemi a carboni attivi
- Sistemi di riscaldamento

4.6.2 Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di trattamento dei fumi

- Installare **scrubber umido** ("wet scrubber" [63]), che rappresenta la tecnica più utilizzata per la desolfurazione dei gas di scarico in tutti gli impianti in cui il carbone viene utilizzato come combustibile. Gli SO_x vengono assorbiti mediante il carbonato di calcio, che è spruzzato appositamente all'interno di una torre di nebulizzazione. La sostanza assorbente è spruzzata in controcorrente rispetto al moto dei gas e raccolta nella parte bassa della torre.
- Installare tecnologie per la **riduzione non catalitica selettiva** ("selective non-catalytic reduction-SNCR [63]), che consistono nell'iniettare acqua contenente ammoniaca o precursori dell'ammoniaca per trasformare gli ossidi di azoto in molecole di azoto puro. Questa tecnologia è tuttavia difficile da sfruttare quando nell'impianto è presente un forno particolarmente lungo.
- Sostituire gli SNCR presenti nell'impianto con **SNCR ad alta efficienza** [63]. In questa tecnologia l'ammoniaca è spruzzata tramite ugelli ad alta precisione, ottimizzando i consumi energetici e le prestazioni.
- Installare tecnologie per la **riduzione catalitica selettiva** ("selective catalytic reduction-SCR" [63]) di tipo "**high dust**" ("selective catalytic reduction-SCR"), che riducono gli NO_x mediante l'uso di NH₃ ed un catalizzatore portato ad una temperatura compresa tra 300°C e 400°C. Tramite questa tecnologia è possibile ottenere una riduzione degli NO_x fino all'95%. La tecnologia SCR high dust è posizionata tra il preriscaldatore e gli apparati di depolverizzazione.
- Installare tecnologie per la **riduzione catalitica selettiva** ("selective catalytic reduction-SCR" [63]) di tipo "**low dust**" ("selective catalytic reduction-SCR"), che riducono gli NO_x mediante l'uso di NH₃ ed un catalizzatore portato ad una temperatura compresa tra 300°C e 400°C. Gli SCR di tipo low dust sono posti a valle dei sistemi di depolverizzazione ed è per questo che i gas necessitano di un ulteriore riscaldamento prima del loro ingresso all'interno di questi dispositivi. È proprio a causa di questa ulteriore necessità di energia termica che gli SCR di tipo high dust sono generalmente preferibili e di conseguenza maggiormente utilizzati.
- Installare una **torre di raffreddamento** [63] prima della depolverizzazione per ridurre il volume dei gas e per aumentare la tendenza alla precipitazione, che è fondamentale per il funzionamento dei precipitatori elettrostatici. La torre di raffreddamento aiuta anche a ridurre le emissioni di sostanze come SO_x.
- Sostituire il sistema di riscaldamento dei gas di scarico in ingresso ad un SCR di tipo low dust con uno più moderno ed efficiente.
- Installare sistemi di riduzioni delle emissioni basati su **carboni attivi** ("activated carbon" [63]). Questi sistemi sono in grado di ridurre le emissioni di vari composti quali NO_x o SO_x.

4.6.3 Come ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di depolverizzazione

In questa fase le tecnologie predominanti sono precisi

- Installare un **precipitatore elettrostatico** (“electrostatic precipitator -ESP” [63]) il quale applica un campo elettrostatico intorno al flusso d’aria, generando particelle cariche negativamente. Quest’ultime, vista la loro carica negativa, migreranno verso dei piatti di raccolta positivi in cui si accumuleranno. I piatti di raccolta periodicamente vengono svuotati per mezzo di sistemi vibranti, facendo così cadere le particelle accumulate all’interno di apposite tramogge.
- Installare un sistema di filtraggio polveri con **filtri in tessuto a maniche cilindriche verticali** [63]. I filtri impiegati per queste applicazioni sono delle membrane caratterizzate contemporaneamente da permeabilità ai gas ed elevata capacità di trattenere le polveri. Le polveri si accumulano sul tessuto dei filtri, fino ad assumere esse stesse un comportamento filtrante. L’accumulo di polveri non può però essere eccessivo in quanto crea ostruzione al passaggio dei gas ed è per questo motivo che periodicamente i filtri devono essere puliti mediante, ad esempio, azioni vibranti o flussi di aria inversi. I filtri devono essere costituiti da vari comparti separati cosicché sia possibile intervenire sulle singole sezioni senza dover bloccare le operazioni. La tipologia di filtri scelta e la loro dimensione dipende da vari parametri dei gas di scarico, in particolar modo dalla portata volumetrica e dalla composizione di quest’ultimi.
- Installare un sistema di filtraggio polveri con **filtri in tessuto a tasca orizzontali** [63], il cui principio di funzionamento è analogo a quello dei filtri appena descritti, con la differenza principale che il tessuto dei filtri è disposto orizzontalmente, anziché verticalmente.
- Installare un **sistema di filtraggio ibrido** ovvero un sistema di filtraggio che prevede sia un precipitatore elettrostatico, sia filtri in tessuto. Solitamente l’applicazione di questa tecnologia si ha quando si vuole ottenere un miglioramento delle prestazioni di un precipitatore elettrostatico già esistente.
- Sostituire il **generatore del campo elettrostatico** [63] del precipitatore elettrostatico con uno più moderno ed efficiente, oppure con un modello nuovo. In questo modo è possibile sia aumentare le prestazioni, che abbassare i consumi energetici.
- Installare il **sistema di pulizia a getto di impulso** a bassa pressione per sistemi di filtraggio polveri con filtri in tessuto [63]. Generare impulsi di aria inversa è infatti una delle tecniche più comuni per rimuovere gli accumuli di polvere all’interno dei filtri in tessuto.
- Installare il **sistema di pulizia a vibrazione** per il precipitatore elettrostatico.
- Sostituire il sistema di pulizia a vibrazione per il precipitatore elettrostatico con un sistema più moderno o efficiente.
- Installazione **separatori ad aria** ad alta efficienza in corrispondenza dell’uscita dei gas di scarico dal refrigeratore [63]. Un separatore di questo tipo, applicando una forza centrifuga, direziona le polveri all’interno dei gas verso la parete esterna del separatore stesso. La forza centrifuga può essere ottenuta mediante l’impiego di un ciclone centrifugo, oppure mediante l’utilizzo di un apposito impeller.

4.6.4 Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di depolverizzazione

Dalle diagnosi è emersa un’ulteriore soluzione per ridurre i consumi energetici del processo di depolverizzazione:

- Installazione di un elettrofiltro

4.7 Recupero calore

Il calore presente nei gas di scarico in uscita dal forno viene generalmente impiegato per l’essiccazione dei materiali. In generale tanto maggiore è il contenuto di umidità all’interno dei materiali e tanto meno calore si avrà in uscita al processo. Nel caso in cui vi siano nelle vicinanze altri impianti che necessitano di una fonte di energia termica o elettrica, è possibile prevedere alcune ulteriori misure per recuperare il calore dei gas di scarico tramite l’installazione di varie tecnologie:

- Installare **scambiatore di calore** per separatori ad aria ad alta efficienza sull’uscita dei gas di scarico dal refrigeratore [63]

- Installazione **turbina a vapore** per produzione di energia elettrica tramite **ciclo Rankine** [76]. Questa tecnologia è la più adottata. I gas di scarico vengono utilizzati per alimentare una caldaia di un ciclo a vapore. I costi di investimento sono alti per la caldaia, la turbina ed il generatore di calore.
- Installazione **turbina Organic Ranking Cycle** (ciclo ORC [76]) per produzione di energia elettrica, adottabile anche per impianti di piccole e medie dimensioni. Si tratta di un sistema molto simile al precedente, con la differenza che all'interno del ciclo vengono utilizzati fluidi organici, tra cui n-pentani o toluene. Le sostanze impiegate nel ciclo hanno un basso punto di evaporazione e pertanto anche fonti di calore con più basso contenuto energetico possono funzionare. In generale quindi si può adottare una tecnologia di questo tipo nel caso in cui si debba lavorare con temperature in corrispondenza di cui il ciclo ad acqua non sarebbe efficiente.
- Installazione **turbina** per produzione energia elettrica tramite **ciclo Kalina** [76], in cui si utilizza NH₃ come fluido del ciclo. Avendo suddetta sostanza un punto di evaporazione più basso rispetto a quello dell'acqua, può essere impiegato con temperature più basse. La sostanza utilizzata è tuttavia altamente corrosiva e pertanto il costo dei macchinari sarà maggiore.
- Recuperare il calore dei cascami termici del refrigeratore per riscaldare gli uffici o per utilizzo nel processo di essiccazione [63].
- Installare **sistemi di recupero del calore** dai gas di scarico del forno. Il calore dei gas di scarico può essere usato per produrre energia elettrica, oppure per la fase di preriscaldamento dell'impasto in ingresso al kiln. Il recupero di calore è generalmente più efficace quando si lavora con forni lunghi ed un processo di tipo secco.

4.7.1 Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti al processo di depolverizzazione

Dalle diagnosi è stata identificata la seguente soluzione:

- Installare scambiatore in uscita dal forno per riscaldare l'olio diatermico.

4.8 Combustibili alternativi

Per ottenere dei vantaggi in termini di consumo energetico è possibile utilizzare fonti combustibili differenti rispetto a quelle standard:

- Sostituire carbone con **petrolio** [76].
- Sostituire carbone con **gas naturale** [76].
- Sostituire carbone con **petrolio e biomassa** (almeno 30%-40% di biomassa) [76].
- Sostituire carbone con **gas naturale e biomassa** (almeno 30%-40% di biomassa) [76].
- Usare **pneumatici** usati come combustibile per il forno. In base alla tipologia del forno e di impianto è possibile fornire al forno pneumatici usati come fonte del processo di combustione [79].
- Usare **olio usato** come combustibile [79].
- Usare **rifiuti plastici** come combustibile.
- Utilizzare **combustibile solido secondario (CSS)**. Il CSS viene ottenuto pre-processando rifiuti non pericolosi rispondenti alle specifiche definite nella norma UNI EN 15359 [81]. Tra le varie tipologie di CSS impiegabili all'interno di un cementificio è importante menzionare il cosiddetto **combustibile da recupero (CDR)** all'interno di cui rientrano i combustibili derivanti da rifiuti solidi urbani. Nel 2013, l'allora ministro dell'ambiente Corrado Clini, ha concesso ai cementifici la possibilità di impiegare CSS come combustibili alternativo [82]. L'utilizzo di CSS rappresenta infatti una fonte di energia molto interessante, in quanto ha un costo praticamente nullo, è presente in abbondanza e non richiede particolari cambiamenti al processo. Inoltre, contribuisce a ridurre i problemi di inquinamento in quanto l'impiego di CSS contribuisce alla riduzione di emissioni di CO₂. In base al rifiuto di partenza, l'impiego di questi combustibili alternativi può portare ad una riduzione delle emissioni di CO₂ compresa tra il 20% e il 60% [83]. Infine, sfruttare CDR e CSS come combustibile alternativo contribuisce allo smaltimento di rifiuti, la cui gestione è molto complessa, oltre a generare dei costi non indifferenti. Rispetto ad altri paesi dell'Unione Europea, l'Italia è ancora indietro nell'utilizzo di CSS e CDR come combustibile alternativo. Infatti, nel 2011 solo l'8.3% di energia termica è stata prodotta in modo alternativo, mentre la media europea di sostituzione calorica si attestava al 30% circa [84]. Cinque anni più tardi (2016) l'Italia continua a manifestare un tasso di sostituzione calorica

derivante dall'impiego di rifiuti pari al 16,5%, valore ben lontano rispetto alla media europea fatta registrare durante lo stesso anno (40%) [85].

4.9 Motori

I motori elettrici costituiscono un'importante parte di un impianto di produzione del cemento ed è pertanto possibile agire su questi per ottenere una riduzione dei consumi energetici. Sono disponibili le seguenti soluzioni:

- Sostituzione delle **cinghie dei motori** che possono essere usurate, generando maggiori consumi rispetto agli standard [86]. Possibilmente usare cinghie dentate ai fini di avere una migliore trasmissione della potenza.
- Controllo del **pretensionamento delle cinghie dei motori** [86]. Le cinghie, infatti, tendono ad "allentarsi" nel tempo, non garantendo più la coppia necessaria ed aumentando gli sprechi energetici. Ristabilire la tensione delle cinghie è fondamentale per assicurare una corretta trasmissione della coppia.
- Sostituzione dei motori con cinghie con motori idraulici e riduttori per nastri trasportatori in modo tale da avere una trasmissione di coppia e di potenza più efficiente, evitando gli slittamenti e le perdite per attrito tipiche delle cinghie.
- Installare **motori efficienti ed altamente performanti (IE2, IE3, IE4)**. I motori, infatti, azionano molti macchinari e pertanto usufruire di motori ad alto tasso prestazionale permette di risparmiare energia elettrica fino ad un massimo di 8 punti percentuali [61].
- Installare **motori a velocità variabile** ("Adjustable or variable speed drives") con **inverter** in modo da poter avere un maggior controllo sul loro funzionamento e di conseguenza ottimizzare il consumo di energia, considerando anche le possibili variazioni di carico richieste ai vari macchinari presenti in un cementificio. Sono stati raggiunti risparmi di energia termica ed elettrica rispettivamente compresi tra 0,09-0,102 GJ/ton e 0,08-9,15 kWh/ton mediante l'uso di motori a velocità variabile [61]. Questi motori sono utili a regolare e ottimizzare le tensioni e le velocità del motore elettrico in funzione dei carichi.
- Sostituzione dei motori a cinghia di mulini o frantoi con **motori idraulici e riduttori**.
- **Rifasare** i motori (trifase) per ribilanciare i carichi di ogni fase mediante l'uso di condensatori.
- Sostituire le cinghie di trasmissione trapezoidali con cinghie più efficienti, ad esempio con **cinghie dentate** (preferibili per alte copie) ai fini di ottimizzare le tensioni.
- **Ricablare** i motori per ripristinare le condizioni di funzionamento iniziali.
- Installare **inverter** così da poter ottimizzare i consumi energetici.
- Installare motori correttamente dimensionati rispetto alle caratteristiche richieste dall'impianto [61].
- **Riavvolgere** i motori elettrici ("rewind motors") già presenti in impianto [60].

4.9.1 Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti ai motori elettrici

Dalle diagnosi sono emerse le seguenti soluzioni tecnologiche ai fini di poter ridurre i consumi energetici derivanti dall'utilizzo dei motori elettrici:

- Installazione di motori funzionanti in assetto cogenerativo per la produzione di energia elettrica.
- Installazione di un inverter rigenerativo in grado quindi di recuperare energia in frenata.

4.10 Sistemi ausiliari a pressione

Così come i motori elettrici, anche i compressori e le pompe costituiscono un'importante parte di un impianto di produzione del cemento ed è pertanto possibile agire su questi per ottenere una riduzione dei consumi energetici. Sono disponibili le seguenti soluzioni:

- **Ottimizzazione** del sistema di aria compressa ai fini di ridurre i consumi energetici [72].
- Sostituire i compressori, sistemi d'adduzione aria e sistemi frigoriferi con macchinari più avanzati (revamping) ed efficienti (ad esempio compressori **multistadio** anziché a singolo stadio)
- Installazione di guarnizioni o altri dispositivi per ridurre le perdite d'aria nelle giunzioni dei tubi e nei punti soggetti a trafileamento.
- Dimensionare correttamente raccordi, filtri e manichette per minimizzare le perdite d'aria.

- Sostituire i compressori necessari a pulire o rimuovere detriti con **spazzole, pompe a vuoto o soffiatori**.
- Sostituire i compressori necessari a movimentare componenti con **attuatori elettrici o idraulici**.
- Sostituire i compressori necessari a creare il vuoto con **pompe a vuoto**.
- Sostituire i compressori per alimentare macchine, utensili e attuatori con motori elettrici.
- Selezionare il compressore adeguato alle richieste di impianto [79].
- Sostituire i compressori con **compressori a velocità variabile con inverter** (che regola la sua curva di funzionamento rispetto alle richieste d'impianto).
- Montare le **valvole e regolatori di pressione** nei sistemi di distribuzione dell'aria compressa per regolare l'afflusso di aria o interromperlo quando non viene usato dai macchinari.
- Installazione di tubi col diametro più grande possibile nei sistemi di distribuzione dell'aria per ridurre le perdite [79].
- Installazione di compressori alimentati a corrente elettrica (aventi minori costi di manutenzione, vita utile maggiore e minori downtime).
- Installazione di compressori alimentati a gas (per cui è più facile ottenere macchine a velocità variabile e per cui si ottengono minori costi operativi d'impianto).
- Installazione di **compressori a giri variabili**.
- Sostituire e rinnovare gli **ugelli di erogazione** dell'aria compressa (che potrebbero essere usurati, otturati o corrosi)
- Installazione di **scambiatori** o altri **sistemi di recupero** del calore proveniente dai compressori
- Installare **ventole ad alta efficienza** che può portare ad un risparmio di energia elettrica pari a 0,7 kWh/ton e ad una riduzione delle emissioni di CO₂ dell'ordine di 0,72 kgCO₂/ton [72].

4.10.1 Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti ai motori elettrici

Dalle diagnosi sono state individuate le seguenti soluzioni:

- Sostituire le pompe con rotocelle
- Installare delle valvole di chiusura per il flusso delle pompe quando non vengono utilizzate

4.11 Misure alternative

Di seguito si riportano ulteriori misure alternative per ridurre i consumi energetici emerse dall'analisi delle diagnosi energetiche disponibili:

- Ottimizzare le perdite del trasformatore.
- Rifasamento del trasformatore di aggancio alla rete elettrica.
- Installazione di un impianto di rifasamento.
- Coibentare in modo efficace le apparecchiature come tubazioni, condotti, pompe, valvole etc.

4.11.1 Altre soluzioni, emerse dalle diagnosi energetiche, per ridurre i consumi energetici delle tecnologie afferenti ai motori elettrici

Dalle diagnosi sono emerse le seguenti soluzioni:

- Sostituzione del trasformatore ad olio con un trasformatore a resina (ha meno perdite).
- Installare nuovi trasformatori, in particolare **k-factor transformer**.

4.12 Risultati derivanti dallo studio dei cementifici

Gli obiettivi principali del progetto afferenti all'anno 2020 erano: 1) creare una lista con le soluzioni tecnologiche implementabili per ridurre i consumi energetici e 2) valutare lo stato di applicazione delle tecnologie reperite in letteratura all'interno del panorama italiano. In risposta a questi obiettivi:

1. La descrizione delle tecnologie sopra riportate (tutto il capitolo 4) adempie al primo obiettivo. Tale lista è anche sintetizzata nell'ALLEGATO 3 (Paper pubblicato su peer reviewed Journal "Sustainability"). In questo documento vengono sintetizzate sia le tecnologie trovate in letteratura, sia le tecnologie reperite nelle diagnosi energetiche messe a disposizione da ENEA e relative a un campione di 48 siti produttivi. I commenti di esperti di Federbeton in merito all'impiego delle tecnologie individuate sono stati utilizzati per la realizzazione del paper sopracitato, come da specifiche indicazioni riportate nell'ALLEGATO 3. La lista di tecnologie è stata prodotta a valle di

numerosi meeting con esperti di Federbeton e a valle di un sopralluogo presso lo stabilimento di Rassina (Colacem) ed è stata più volte revisionata da personale del settore del cemento, pertanto propone le soluzioni che hanno una fattibilità di implementazione, rispettando le attuali leggi in vigore. Per queste soluzioni proposte non emerge un gap con la letteratura, in quanto sono tutte e sole le soluzioni implementabili in contesti reali. Tuttavia, è possibile reperire le tecnologie ormai obsolete e pertanto capire se su determinati aspetti si è ancora indietro rispetto allo stato dell'arte attuale.

2. Relativamente all'applicazione attuale delle tecnologie individuate al punto precedente, consultando le diagnosi energetiche forniteci da ENEA e rappresentanti un campione di 48 siti produttivi italiani, sono state estratte informazioni su il numero e il tipo di interventi migliorativi effettuati dalle aziende negli ultimi 4 anni e proposti per i futuri 4 anni. I risultati di questa analisi sono ancora visibili in dettaglio in ALLEGATO 3. Nel paper è possibile anche trovare degli indici legati ad alcuni KPI energetici ed economici utili per avere indicazioni sui motivi di implementazione di una tecnologia piuttosto che un'altra.

5 Conclusioni

Tutte le opportunità tecnologiche di miglioramento dei consumi energetici sono state suddivise per fase di processo e per tipologia di asset produttivo considerato. Si è, quindi, stilata una lista di tali tecnologie che può essere di supporto alle aziende nella scelta della soluzione di miglioramento da implementare.

La lista di soluzioni sviluppata per ogni settore è stata sottoposta a esperti provenienti dalle associazioni di categoria del vetro (Assovetro) e del cemento (Federbeton). In questo modo, il contenuto delle tabelle è stato validato in due modi: mediante letteratura scientifica (dove presenti articoli specifici sulla tecnologia proposta) e mediante la consultazione di plant manager esperti che quotidianamente lavorano nel settore considerato e ricercano soluzioni tecnologiche di miglioramento.

A partire dalla lista di tecnologie, si è redatto un file Excel nel quale è stato realizzato il modello di analisi AHP multi-criterio per ciascuno dei due settori produttivi analizzati (vetro e cemento). Nel presente report si è mostrato il file relativo al vetro

Per il momento, non è stato possibile applicare il modello ad un caso studio per motivi di privacy. Infatti, nessuna associazione di categoria si è mostrata disposta a compilare il file realizzato, né alcuna azienda del settore si è mostrata disponibile a sottoporsi al questionario. Pertanto, non è stato possibile stilare una classifica delle soluzioni tecnologiche. Tuttavia, il file Excel è funzionante e può essere applicato agli specifici settori di interesse, pertanto si è completato l'obiettivo di realizzazione del modello di analisi delle tecnologie che era stato prefissato.

Oltre al presente report, alleghiamo come documenti relativi al lavoro svolto anche i seguenti file:

- **La lista delle soluzioni tecnologiche energy-saving relativa al settore del vetro – ALLEGATO 1**
- **La lista delle soluzioni tecnologiche energy-saving relativa al settore del cemento – ALLEGATO 2**
- **Il paper scritto in collaborazione con ENEA e relativo al settore del cemento, comprensivo dei commenti ricevuti da Federbeton sulle voci della lista di tecnologie prodotta. Il paper è attualmente under review presso la rivista Sustainability e, pertanto, non è una versione pubblicata, dunque potrebbe subire modifiche – ALLEGATO 3**
- **Lista di tecnologie del vetro e commenti ricevuti da Assovetro sulle voci della lista prodotta – ALLEGATO 4**
- **File Excel coincidente con il prototipo del modello di classificazione sviluppato – ALLEGATO 5**
- **Prototipo di questionario da sottoporre alle aziende al fine di applicare il modello di classificazione delle soluzioni tecnologiche – ALLEGATO 6**

Il modello di valutazione è stato costruito basandosi su un'analisi AHP che, grazie alla sua flessibilità, ci ha permesso di effettuare una valutazione multi-criterio (secondo 7 parametri chiave) e di utilizzare informazioni qualitative, lasciando al contempo spazio per una successiva implementazione di dati quantitativi o di più dimensioni di analisi. Per alimentare il modello sono necessari in input due tipi di giudizi qualitativi: quelli espressi dall'azienda in questione che deve esprimere l'importanza che hanno le varie dimensioni di valutazione e quelli di esperti di categoria che giudicano a coppie le alternative tecnologiche. Le prime informazioni sono raccolte tramite dei questionari con dei confronti a coppie su Google Moduli, le seconde, invece, sono raccolte mediante un file Excel. Oltre a questi output sono state predisposte delle liste di soluzioni tecnologiche e dei diagrammi di flusso che permettono di visualizzare le alternative tecnologiche disponibili in modo sintetico, permettendo di filtrarle in base alla fase o al macchinario d'interesse. Per elaborare tutte le informazioni ed arrivare ad una classifica finale, tarata sui pesi relativi assegnati ai criteri di valutazione, abbiamo realizzato quattro file excel, uno per ogni fase del processo produttivo. In ognuno di essi è presente un foglio di calcolo per ogni sottofase, dove sono riportate le matrici dove si inseriscono i giudizi raccolti e viene verificata la loro inconsistenza. Nel primo foglio di calcolo di ogni file sono riportate le classifiche dei punteggi finali delle tecnologie appartenenti a quella fase, calcolate in modo automatico in base ai giudizi inseriti nelle matrici. I punteggi sono inoltre rappresentati secondo una scala cromatica che va dal verde, per i punteggi più alti, al rosso, per quelli più bassi. Vista la grande adattabilità del metodo AHP che abbiamo utilizzato per costruire il nostro modello, pensiamo che esso, in futuro, potrebbe essere adattato per il suo utilizzo anche in altri settori produttivi ad alto consumo energetico oltre a quello del vetro e del cemento. Modificando le soluzioni disponibili inserendone le relative prestazioni, adattando le matrici

e modificando alcuni criteri di valutazione in base al settore in questione, crediamo che si possano ottenere risultati utili alle aziende nel loro processo decisionale di rinnovamento tecnologico volto all'efficienza energetica e alla sostenibilità ambientale

Tra i possibili sviluppi futuri del modello si annoverano l'applicazione del modello ad un caso studio (se le aziende si renderanno disponibili), l'introduzione di dati quantitativi che misurino le prestazioni dei vari macchinari al fine di ottenere una maggiore accuratezza nelle valutazioni e nei risultati e l'ampliamento delle dimensioni di analisi.

Oltre agli output fin qui presentati, all'interno di questo progetto l'Università di Firenze in collaborazione con ENEA e Federbeton ha anche realizzato un paper che è attualmente in corso di revisione presso la rivista internazionale "Sustainability".

6 Riferimenti bibliografici

- [1] T. Schudeleit, S. Züst, L. Weiss, e K. Wegener, «The total energy efficiency index for machine tools», *Energy*, vol. 102, pagg. 682–693, 2016.
- [2] K. Tanaka, «Assessment of energy efficiency performance measures in industry and their application for policy», *Energy Policy*, vol. 36, n. 8, pagg. 2887–2902, 2008.
- [3] L. Zhou, J. Li, F. Li, Q. Meng, J. Li, e X. Xu, «Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review», *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pagg. 3721–3734, 2016.
- [4] A. Gontarz, L. Weiss, e K. Wegener, «Energy Consumption Measurement with a Multichannel Measurement System on a machine tool», in *Proceedings of International Conference on Innovative Technologies: IN-TECH 2010*, 2010, pagg. 499–502.
- [5] C. Eisele, S. Schrems, e E. Abele, «Energy-efficient machine tools through simulation in the design process», in *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*, Springer, 2011, pagg. 258–262.
- [6] D. N. Kordonowy, «A power assessment of machining tools», PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- [7] E. Giacone e S. Mancò, «Energy efficiency measurement in industrial processes», *Energy*, vol. 38, n. 1, pagg. 331–345, 2012.
- [8] J. Paetzold, M. Kolouch, V. Wittstock, e M. Putz, «Methodology for process-independent energetic assessment of machine tools», *Procedia Manuf.*, vol. 8, pagg. 254–261, 2017.
- [9] P. Liu, J. Tuo, F. Liu, C. Li, e X. Zhang, «A novel method for energy efficiency evaluation to support efficient machine tool selection», *J. Clean. Prod.*, vol. 191, pagg. 57–66, 2018.
- [10] S. D. Pohekar e M. Ramachandran, «Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 8, n. 4, pagg. 365–381, 2004.
- [11] E. H. Forman e S. I. Gass, «The analytic hierarchy process—an exposition», *Oper. Res.*, vol. 49, n. 4, pagg. 469–486, 2001.
- [12] M. Davies, «Adaptive AHP: a review of marketing applications with extensions», *Eur. J. Mark.*, 2001.
- [13] M. J. Liberatore e R. L. Nydick, «The analytic hierarchy process in medical and health care decision making: A literature review», *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 189, n. 1, pagg. 194–207, 2008.
- [14] K. Heidenberger e C. Stummer, «Research and development project selection and resource allocation: a review of quantitative modelling approaches», *Int. J. Manag. Rev.*, vol. 1, n. 2, pagg. 197–224, 1999.
- [15] N. Subramanian e R. Ramanathan, «A review of applications of Analytic Hierarchy Process in operations management», *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 138, n. 2, pagg. 215–241, 2012.
- [16] E. W. Cheng, H. Li, e D. C. Ho, «Analytic hierarchy process (AHP): A defective tool when used improperly», *Meas. Bus. Excell.*, 2002.
- [17] International Energy Agency (IEA), «Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 Emissions», pag. 168, 2007.
- [18] A. Boly, «Industrial Energy Efficiency for Sustainable Wealth Creation; Capturing Environmental, Economic and Social Dividends», *Ind. Dev. Rep.*, 2011.
- [19] E. Worrell, C. Galitsky, E. Masanet, e W. Graus, «Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the glass industry», *Berkeley Natl. Lab.*, 2008.
- [20] B. M. Scalet, M. Garcia Munoz, A. Sissa, S. Roudier, e L. Delgado Sancho, «Best Available Techniques (BAT) Reference Document:for:Manufacture of Glass:Industrial Emissions Directive 2010/75/EU:(Integrated Pollution Prevention and Control)», 2012, doi: 10.2791/69502.
- [21] Y. Pang e G. Lodewijks, «Improving energy efficiency in material transport systems by fuzzy speed control», in *3rd IEEE International Symposium on Logistics and Industrial Informatics*, 2011, pagg. 159–164.
- [22] E. Levine, M. Greenman, e K. Jamison, «The Development of a Next Generation Melting System for Glass Production: Opportunities and Progress», 2003.
- [23] Y. Wang, E. Forssberg, e J. Sachweh, «Dry fine comminution in a stirred media mill—MaxxMill®», *Int. J. Miner. Process.*, vol. 74, pagg. S65–S74, 2004.

- [24] S. Gerl e J. Sachweh, «Plant concepts for ultrafine dry grinding with the agitated media mill MaxxMill®», *Miner. Eng.*, vol. 20, n. 4, pagg. 327–333, 2007.
- [25] T. Abe, M. Shimono, K. Hashimoto, K. Hono, e H. Onodera, «Phase separation and glass-forming abilities of ternary alloys», *Scr. Mater.*, vol. 55, n. 5, pagg. 421–424, set. 2006, doi: 10.1016/j.scriptamat.2006.05.020.
- [26] P. F. James, «Liquid-phase separation in glass-forming systems», *J. Mater. Sci.*, vol. 10, n. 10, pagg. 1802–1825, 1975.
- [27] Y. Jani e W. Hogland, «Reduction-melting extraction of trace elements from hazardous waste glass from an old glasswork’s dump in the southeastern part of Sweden», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 24, n. 34, pagg. 26341–26349, dic. 2017, doi: 10.1007/s11356-017-0243-4.
- [28] V. Velmurugan, S. Karthik, e S. Thanikaikarasan, «Investigation and implementation of new methods in machine tool production using lean manufacturing system», *Mater. Today Proc.*, apr. 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.654.
- [29] J. Reindl, «Reuse/recycling of glass cullet for non-container uses», 1992.
- [30] M. Hubert, «IMI-NFG Course on Processing in Glass: Lecture 3: Basics of industrial glass melting furnaces». CelSian Glass & Solar, Eindhoven, The Netherlands, 2015.
- [31] LexInnova, «Oxy-fuel combustion system (OCS) - technology landscape». giu. 2013.
- [32] R. Stormont, «Electric melting and boosting for glass quality improvement», *Glass Worldw.*, n. 25, 2009.
- [33] N. G. Simpson, «Oxygen technologies for recovery and boosting of glass furnaces», *Glass Redhill*, vol. 81, n. 9, pagg. 290–293, 2004.
- [34] T. Bauer, I. Forbes, R. Penlington, e N. Pearsall, «The potential of thermophotovoltaic heat recovery for the glass industry», in *AIP conference proceedings*, 2003, vol. 653, n. 1, pagg. 101–110.
- [35] «United States Department of Energy (DOE) (2004a). Glass Industry Analysis Brief. Energy Information Administration, Washington, D.C. <http://www.eia.doe.gov/emeu/mecs/iab98/glass/index.html>. .
- [36] B. A. Garrett-Price, A. G. Fassbender, e G. A. Bruno, «Potential for energy conservation in the glass industry», Pacific Northwest Lab., Richland, WA (USA), 1986.
- [37] Combustion Consulting, «Consulting and training services for you. Expertise in combustion, savings in thermal and electrical energy: Submerged Combustion Melter», 2019. <http://combustion-consulting.com/en/SBM-Furnace/>.
- [38] J. J. do Rosário, R. P. M. Guimarães, M. A. Leite, A. P. N. de Oliveira, e M. C. Fredel, «Porous media of LZSA glass-ceramic for burner applications», in *Materials Science Forum*, 2012, vol. 727, pagg. 686–690.
- [39] A. A. Mohamad, «Combustion in porous media: fundamentals and applications», in *Transport phenomena in porous media III*, Elsevier, 2005, pagg. 287–304.
- [40] M. Wersch, E. Reusse, D. Trimis, B. Fleischmann, e N. Gerlach, «Innovative natural gas-fired porous burners for industrial high temperature applications», Estoril, Portugal, apr. 2011, pag. 10.
- [41] J. Kuenen *et al.*, «NFR: 2. A. 3 Glass production, SNAP: 040613 Glass (decarbonizing), ISIC: 2610 Manufacture of glass and glass products.», vol. Version Guidebook 2019, pagg. 1–27, 2019.
- [42] C. W. Hibscher, P. R. Davies, M. P. Davies, e D. H. Davis, «A designer’s insight into all-electric melting», 2004.
- [43] R. Beerkens, «Analysis of elementary process steps in industrial glass melting tanks—some ideas on innovations in industrial glass melting», *Ceram.-Silikáty*, vol. 52, n. 4, pagg. 206–217, 2008.
- [44] K. Watanabe, T. Okuma, e T. Takenaka, «Evolutionary design framework for Smart PSS: Service engineering approach», *Adv. Eng. Inform.*, vol. 45, pag. 101119, ago. 2020, doi: 10.1016/j.aei.2020.101119.
- [45] C. J. Brinker e G. W. Scherer, «Sol→ gel→ glass: I. Gelation and gel structure», *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 70, n. 3, pagg. 301–322, 1985.

- [46] S. Karellas, D. Giannakopoulos, C.-S. Hatzilau, I. Dolianitis, G. Skarpetis, e T. Zitounis, «The potential of WHR/batch and cullet preheating for energy efficiency in the EU ETS glass industry and the related energy incentives», *Energy Effic.*, vol. 11, n. 5, pagg. 1161–1175, 2018.
- [47] A. Gonzalez *et al.*, «OPTIMELT™ regenerative thermo-chemical heat recovery for oxy-fuel glass furnaces», in *75th conference on glass problems: ceramic engineering and science proceedings*, 2015, vol. 36, pag. 113.
- [48] K. Yazawa, A. Shakouri, e T. J. Hendricks, «Thermoelectric heat recovery from glass melt processes», *Energy*, vol. 118, pagg. 1035–1043, 2017.
- [49] S. Mighton, «Development/Demonstration of an Advanced Oxy-Fuel Front-End System», Owens Corning, 2007.
- [50] S. Nadel, *Energy-efficient motor systems: a handbook on technology, program, and policy opportunities*. Amer Council for an Energy, 1991.
- [51] A. De Almeida *et al.*, «VSDs for electric motor systems», *Final Rep. SAVE Programme Eur. Comm. Bruss.*, 2001.
- [52] J.-C. Martin, P. Millington, B. Campbell, L. Barron, e S. Fisher, «On-board generation of hydrogen to improve in-cylinder combustion and after-treatment efficiency and emissions performance of a hybrid hydrogen–gasoline engine», *Spec. Issue Sel. Contrib. Eur. Hydrog. Energy Conf. 2018 Málaga Spain March 14th - 16th*, vol. 44, n. 25, pagg. 12880–12889, mag. 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.12.164.
- [53] M. Benedetti, I. Bertini, V. Introna, e S. Ubertini, «Explorative study on compressed air systems' energy efficiency in production and use: First steps towards the creation of a benchmarking system for large and energy-intensive industrial firms», *Appl. Energy*, vol. 227, pagg. 436–448, 2018.
- [54] P. Radgen e E. Blaustein, «Compressed air systems in the European Union», *Stuttg. LOGX*, 2001.
- [55] R. Dindorf, «Estimating potential energy savings in compressed air systems», *Procedia Eng.*, vol. 39, pagg. 204–211, 2012.
- [56] K. Kermeli *et al.*, «The scope for better industry representation in long-term energy models: Modeling the cement industry», *Appl. Energy*, vol. 240, pagg. 964–985, apr. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.252.
- [57] T. Abergel *et al.*, *Energy technology perspectives 2017: Catalysing energy technology transformations*. OECD, 2017.
- [58] F. Confindustria, *Rapporto di Filiera. 2019*. .
- [59] Associazione Italiana Tecnico Economica Cemento, «Rapporto Annuale 2017 AITEC». 2017, [Online]. Disponibile su: https://www.aitecweb.com/Portals/1/Repository/Pubblico/Area%20Economica/Pubblicazioni%20AIT EC/Rapporto_Annuale_2017.pdf?ver=2018-06-26-151502-207.
- [60] E. Worrell, N. Martin, e L. Price, «Potentials for energy efficiency improvement in the US cement industry», *Energy*, vol. 25, n. 12, pagg. 1189–1214, 2000.
- [61] N. A. Madloul, R. Saidur, N. A. Rahim, e M. Kamalisarvestani, «An overview of energy savings measures for cement industries», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pagg. 18–29, mar. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.10.046.
- [62] A. Zegna, «Le malte di cemento con inerti polimerici= The cement mortars with polymer aggregates», PhD Thesis, Politecnico di Torino, 2017.
- [63] European Commission, «Best Available Techniques Reference Documents (BREF) for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide.», pagg. 1–506, 2013.
- [64] J. Wilson, «RECYCLING OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE: THE DUTCH EXPERIENCE», *Quarry Manag.*, vol. 23, n. 12, 1996.
- [65] Cement Equipment corp, «INFINITY FOR CEMENT EQUIPMENT», *cementequipment.org*, 2021. <https://www.cementequipment.org/home-page/> (consultato gen. 11, 2021).
- [66] A. Pozzetti, *Appunti di tecnologie industriali. Rielaborazione delle lezioni del prof. Pozzetti*. CUSL (Milano), 2002.

- [67] Z. Youcai e H. Sheng, «Recycling Technologies and Pollution Potential for Contaminated Construction and Demolition Waste in Recycling Processes», in *Pollution Control and Resource Recovery*, Butterworth-Heinemann, 2017, pagg. 195–331.
- [68] E. B. Symons, «Gyratory cone crusher», mag. 12, 1925.
- [69] S. Moray, N. Throop, J. Seryak, C. Schmidt, C. Fisher, e M. D’Antonio, «Energy efficiency opportunities in the stone and asphalt industry», in *Proceedings of the Twenty-Eighth Industrial Energy Technology Conference*, 2006, pagg. 71–83.
- [70] D. Moore, «Cement kilns: size reduction and grinding», mar. 10, 2019.
<https://www.cementkilns.co.uk/grinding.html>.
- [71] A. Hasanbeigi, C. Menke, e A. Therdyothin, «The use of conservation supply curves in energy policy and economic analysis: the case study of Thai cement industry», *Energy Policy*, vol. 38, n. 1, pagg. 392–405, 2010.
- [72] A. Hasanbeigi, L. Price, H. Lu, e W. Lan, «Analysis of energy-efficiency opportunities for the cement industry in Shandong Province, China: A case study of 16 cement plants», *Energy*, vol. 35, n. 8, pagg. 3461–3473, ago. 2010, doi: 10.1016/j.energy.2010.04.046.
- [73] A. Gupta e D. Yan, «Autogenous and semi-autogenous mills», *Miner. Process. Des. Oper.*, pagg. 263–285, 2006.
- [74] J.-C. Brunke e M. Blesl, «Energy conservation measures for the German cement industry and their ability to compensate for rising energy-related production costs», *J. Clean. Prod.*, vol. 82, pagg. 94–111, 2014.
- [75] A. Hasanbeigi, W. Morrow, E. Masanet, J. Sathaye, e T. Xu, «Energy efficiency improvement and CO2 emission reduction opportunities in the cement industry in China», *Energy Policy*, vol. 57, pagg. 287–297, 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2013.01.053.
- [76] European Cement Research Academy (ECRA), «Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead», in *CSI/ECRA-Technology Papers 2017*, Dusseldorf, Geneva, mar. 2017, pagg. 1–190, [Online]. Disponibile su: <https://www.wbcscement.org/index.html>.
- [77] G. Lynskey, «Blending/Homogenizing Silos—All They’re Cracked up to Be?», in *2019 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Conference (IAS/PCA)*, 2019, pagg. 1–4.
- [78] J. E. Bond, R. Coursaux, e R. L. Worthington, «Blending systems and control technologies for cement raw materials», *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 6, n. 6, pagg. 49–59, nov. 2000, doi: 10.1109/2943.877840.
- [79] Institute for Industrial Productivity, «Explore energy efficiency technologies across the industrial sectors.», *iipinetwork.org*, 2016. <http://www.iipinetwork.org/> (consultato gen. 11, 2021).
- [80] SIME Ingenieros S.A., «Vertical shaft kilns (VSK) vs. Rotary kilns», 2021.
http://www.simeingenieros.com/site/?page_id=897&lang=en.
- [81] Ente Italiano di Normazione, ‘UNI EN 15359:2011 Combustibili solidi secondari - Classificazione e specifiche’. 2011.
- [82] Benfante Relife Group, ‘Produrre il “carbone di plastica”, Css Combustibile solido secondario è una opportunità per le aziende italiane: il combustibile da rifiuti plastici è utilizzato per accendere i forni dei cementifici italiani per la produzione del cemento.’, Benfante.it.
<https://www.benfante.it/news/item/combustibile-da-rifiuti-plastici-per-cementifici/> (accessed Apr. 09, 2021).
- [83] M. Merlini, ‘Combustibili Solidi Secondari: un’opportunità per il futuro’. AITEC, 2013, Accessed: Apr. 09, 2021. [Online]. Available:
https://www.aitecweb.com/Portals/1/Repository/Pubblico/Area%20Tecnica/Pubblicazioni/Combustibili_Solidi_Secondari_un'opportunit%C3%A0_per_il_futuro.pdf?ver=2018-06-18-163752-647.
- [84] Associazione Italiana Tecnico Economica Cemento, ‘L’utilizzo dei Combustibili Solidi Secondari (CSS) nell’industria del cemento’. AITEC, 2013, Accessed: Apr. 09, 2021. [Online]. Available:
https://www.aitecweb.com/Portals/1/Repository/Pubblico/Area%20Tecnica/Pubblicazioni/L'utilizzo_dei_Combustibili_Solidi_Secondari_CSS_nell'industria_del_cemento.pdf?ver=2013-11-08-151205-243.

- [85] R. Filippini, 'Circolare è bello, ma solo a parole'. *l'Astrolabio*, Sep. 26, 2018, Accessed: Apr. 09, 2021. [Online]. Available: https://www.aitecweb.com/Portals/1/RassegnaStampa/Pubblica/2018/20180926_Circolare_%C3%A8_bello_ma_solo_a_parole_CSS_nei_cementifici_perch%C3%A9_no.pdf?ver=2018-09-26-183314-027
- [86] R. T. Fischer, «Crusher and Screen Drives for the Mining, Aggregate and Cement Industries», in *IEEE Cement Industry Technical Conference*, Dallas, USA, mag. 1992, pagg. 108–147, doi: 10.1109/CITCON.1992.687613.

7 Curriculum scientifico del gruppo di lavoro impegnato nell'attività

Il gruppo di ricerca impegnato nel progetto è composto da professori e ricercatori con competenze avanzate nell'ambito dell'ingegneria meccanica e, in particolare, degli impianti industriali. Di seguito si riporta il curriculum scientifico del gruppo di lavoro impegnato nell'attività.

7.1 Filippo De Carlo

Filippo De Carlo si è laureato con lode il 22 aprile 1998 in ingegneria meccanica presso l'Università degli Studi di Firenze, discutendo la tesi dal titolo: Valutazione tecnico economica di metodologie FMECA nella gestione della manutenzione degli impianti di servizio.

Dal 1998 è iscritto nell'albo professionale degli Ingegneri della provincia di Firenze al n.4006.

Nel 1999 è stato titolare di un assegno di ricerca in "Ingegneria dell'affidabilità, manutenzione e logistica".

Nel 2003 è stato nominato Dottore di Ricerca discutendo la tesi dal titolo: "un approccio integrato ai problemi affidabilistico-manutentivi: un caso di studio relativo all'etr500".

Dal 2006 al 2017 è Professore Associato di Impianti Industriali presso il Dipartimento DIEF.

È autore di oltre 50 pubblicazioni scientifiche su congressi e riviste internazionali.

Le aree di interesse della attività di ricerca riguardano l'impiantistica industriale, la manutenzione, la sicurezza e il rischio industriale e la gestione dell'energia.

7.2 Mario Tucci

Nato a Firenze il 14 novembre 1958, Laureatosi con il massimo dei voti e lode nel 1985 presso l'Università di Firenze in Ingegneria meccanica, con un curriculum di studi indirizzato all'automazione e all'uso della simulazione di ricerca operativa per la progettazione e la gestione degli impianti industriali, ha successivamente conseguito il titolo di Dottore di Ricerca nel 1989. È stato prima ricercatore presso il Dipartimento di Energetica Sergio Stecco è dell'Università di Firenze per le discipline di impiantistica industriale, svolgendo seminari ed esercitazioni sui corsi corrispondenti e seguendo numerose tesi sulla gestione della produzione e della logistica. Dal 1992 è stato professore associato presso lo stesso Dipartimento. Dal 2000 è stato prima professore Straordinario, e dal 2003 Professore Ordinario. Ha la titolarità della cattedra di "Gestione degli impianti industriali" per i corsi di laurea in Ingegneria Gestionale. Attualmente insegna anche "Sicurezza degli impianti industriali", Gestione della Qualità e Sistemi di Gestione Ambientale.

È stato membro e componente del consiglio nazionale dell'ANIMP (Associazione Nazionale di Impiantistica Industriale) fino al 2007, membro del board del WG5.7 di IFIP (Internation Federation for Information Processing). È autore di numerosi lavori pubblicati su riviste nazionali ed internazionali per larga parte riguardanti tematiche di impiantistica, simulazione, gestione della produzione, logistica, affidabilità e manutenzione, ricerca operativa.

È docente del Master in Enginerring and Contracting, e del Master Executive in Gestione della Manutenzione Industriale presso il MIP del Politecnico di Milano.

È stato coordinatore del Dottorato in Ingegneria Industriale e dell'Affidabilità, all'interno della Scuola di Dottorato in Ingegneria Industriale dell'Università di Firenze, ed è ora coordinatore dell'indirizzo omonimo nel Dottorato in Ingegneria Industriale che è nato dalla scuola.

È stato direttore e docente del Master di primo livello in Project Management, che nel 2007-2008 si è svolto su progetto Mercurio.

Dal settembre 2007 è presidente dei Corsi di Laurea Triennale e Specialistica in Ingegneria Gestionale

È direttore del Progetto triennale di Formazione per Safety Manager, che raggruppa i tre atenei toscani, la Regione Toscana e l'INAIL.

È coordinatore del Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale nato dalla scuola di Ingegneria.

7.3 *Alessandra Cantini*

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

Ha conseguito la Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica (curriculum gestionale e produttivo) con voto 110/110, lode e menzione alla carriera scolastica il 9 aprile 2019, presso la Scuola di Ingegneria dell'Università degli Studi di Firenze, discutendo la tesi dal titolo: "Spare parts management in the presence of multiple warehouses: proposal of a bi-criteria ABC model".

Da novembre 2018 a oggi lavora come ingegnere a prestazione occasionale presso l'azienda Smartoperations S.P.A, dove si occupa di progetti afferenti alle tematiche di logistica e gestione dei magazzini, manutenzione e affidabilità, layout planning e data mining.

A ottobre 2019 ha ottenuto l'abilitazione all'esercizio della professione di ingegnere.

Da novembre 2019 è iscritta al Dottorato di ricerca in Ingegneria Industriale (curriculum "Ingegneria Industriale e dell'affidabilità", ciclo XXXV) presso il Dipartimento DIF dell'Università di Firenze, dove approfondisce la seguente tematica: "Analisi di modelli strutturati di gestione dell'inventario e studio di un modello logistico avanzato per la gestione ottimale dei magazzini ricambi".

È autrice di 2 pubblicazioni scientifiche su riviste internazionali.

7.4 *Leonardo Leoni*

Leonardo Leoni ha conseguito la Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica (curriculum gestionale produttivo) con voto 110/110, lode e menzione alla carriera il 29 ottobre 2017, presso la Scuola di Ingegneria dell'Università degli Studi di Firenze, discutendo la tesi dal titolo: "Application of Monte Carlo Approach and Bayesian network to a regulation and measuring plant of methane gas".

Ha conseguito la Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica (curriculum gestionale e produttivo) con voto 110/110, lode ed encomio solenne il 26 febbraio 2020, presso la Scuola di Ingegneria dell'Università degli Studi di Firenze, discutendo la tesi dal titolo: "Comparison of risk-based maintenance approaches applied to a natural gas regulating and metering station".

Da settembre 2019 a dicembre 2019 ha svolto un tirocinio curricolare presso la Norwegian University of Science and Technology (NTNU-Trondheim). Durante il tirocinio si è occupato di tecniche manutentive atte a ridurre il rischio derivante dai processi in cui vengono gestite sostanze pericolose.

A settembre 2020 ha ottenuto l'abilitazione all'esercizio della professione di ingegnere industriale con voto 58/60.

Da novembre 2020 è iscritto al Dottorato di ricerca denominato “Smart Industry” organizzato congiuntamente dall’Università degli Studi di Pisa, dall’Università degli Studi di Firenze e dall’Università degli studi di Siena. Nel percorso di dottorato approfondisce la seguente tematica: “Risk and reliability analysis of hazardous plant adopting a Smart Industry Approach”.

È autore di 4 pubblicazioni scientifiche su riviste internazionali.