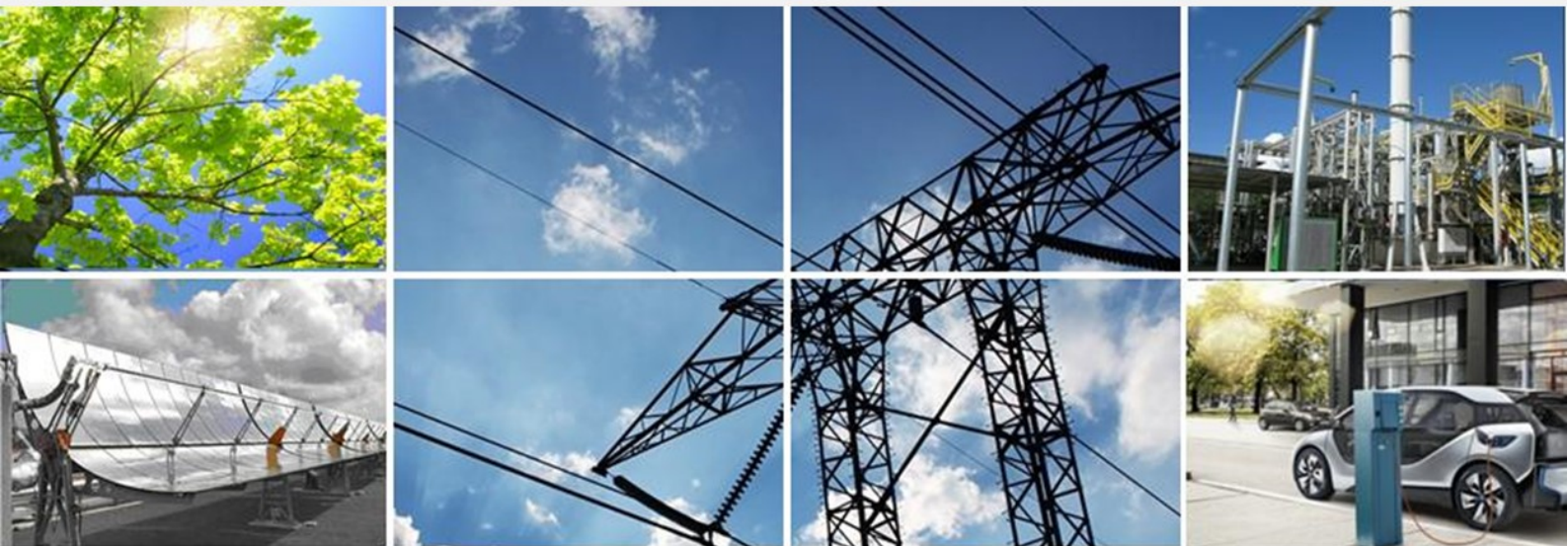




Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA



Ricerca di Sistema elettrico

SVILUPPO E APPLICAZIONE DI INDICATORI DI CONSUMO IDEALI PER I SETTORI FARMACEUTICO, DELL'INCENERIMENTO DEI RIFIUTI E DELLE FONDERIE

Santolamazza A., Rubino G., Scungio M., Facci A. L.



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DELLA
TUSCIA

Report RdS/PTR2021/182

SVILUPPO E APPLICAZIONE DI INDICATORI DI CONSUMO IDEALI PER I SETTORI FARMACEUTICO, DELL'INCENERIMENTO DEI RIFIUTI E DELLE FONDERIE

Santolamazza A., Rubino G., Scungio M., Facci A. L.
(CINTEST)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

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

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo : N.1 - Tecnologie

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

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

Linea di attività:LA4.12 - Applicazione di metodologie di benchmark ideali dei consumi energetici e definizione di strategie per il miglioramento dell'efficienza energetica

Responsabile del Progetto: Miriam Benedetti, ENEA

Responsabile del Work package: Fabrizio Martini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *“Determinazione analitica dei consumi energetici ideali per unità di prodotto dei principali settori energivori italiani”*

Responsabile scientifico ENEA: Fabrizio Martini

Responsabile scientifico CINTEST: Andrea Luigi Facci

Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE.....	6
2 FORMULAZIONI DI INDICI DI RIFERIMENTO PER IL SETTORE FARMACEUTICO.....	8
2.1 DESCRIZIONE DEL SETTORE ANALIZZATO	8
2.1.1 HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning).....	9
2.1.2 LAF (Laminar Air Flow).....	12
2.1.3 Impianti frigoriferi.....	12
1.1.1. Impianti a compressione di vapore	13
1.1.2. Impianti ad assorbimento.....	14
2.1.4 Compressori d'aria.....	14
2.2 FORMULAZIONE DELL'INDICI DI PRESTAZIONE ENERGETICA IDEALE PER IL SISTEMA HVAC.....	17
2.2.1 Formulazione dell'indice di prestazione elettrica ideale	17
2.2.2 Formulazione dell'indice di prestazione termica ideale	17
1.1.2.1. REGIME INVERNALE	18
1.1.2.2. REGIME ESTIVO.....	19
2.3 FORMULAZIONE DELL'INDICE DI PRESTAZIONE ENERGETICA IDEALE PER IL SISTEMA LAF.....	20
2.3.1 Formulazione dell'indicatore di prestazione elettrica ideale	21
2.3.2 Formulazione dell'indicatore di prestazione termica ideale	21
2.4 FORMULAZIONE DELL'INDICE DI PRESTAZIONE ENERGETICA IDEALE PER IL SISTEMA FRIGORIFERO.....	22
2.4.1 Formulazione dell'indicatore di prestazione elettrica ideale per gli impianti frigoriferi a compressione di vapore	22
2.4.2 Formulazione dell'indicatore di prestazione termica ideale per gli impianti frigoriferi ad assorbimento	22
2.5 FORMULAZIONE DELL'INDICE DI PRESTAZIONE ENERGETICA IDEALE PER I COMPRESSORI D'ARIA.....	23
2.6 RIEPILOGO INFORMAZIONI RICHIESTE DAL CALCOLO	24
2.7 INTERVENTI DI RIDUZIONE DEI CONSUMI SULLA BASE DEGLI INDICI DI CONSUMO IDEALE	26
2.8 CONCLUSIONI DEL CAPITOLO.....	31
3 FORMULAZIONI DI INDICI DI RIFERIMENTO PER IL SETTORE DELL'INCENERIMENTO DEI RIFIUTI.....	32
3.1 DESCRIZIONE DEL SETTORE ANALIZZATO	32
3.1.1 Forno/Generatore di vapore	33
3.1.2 Ciclo termico	33
3.1.3 Processo di trattamento fumi	33
3.2 FORMULAZIONE DEGLI INDICI IDEALI PER FORNO/GENERATORE DI VAPORE	36
3.2.1 Indice di prestazione termica ideale globale per Forno/Generatore di vapore.....	36
3.2.2 Indice di prestazione termica ideale per Forno/Generatore di vapore relativo all'aggiunta di combustibile ausiliario in camera di combustione	36
3.3 FORMULAZIONE DEGLI INDICI IDEALI PER IL CICLO TERMICO	37
3.3.1 Indice di prestazione elettrica ideale	37
3.3.2 Indice di prestazione termica ideale.....	37
3.4 FORMULAZIONE DEGLI INDICI IDEALI PER IL PROCESSO DI TRATTAMENTO FUMI	37
3.4.1 Indice di prestazione termica ideale.....	37
3.5 RIEPILOGO INFORMAZIONI RICHIESTE DAL CALCOLO	38
3.6 INTERVENTI DI RIDUZIONE DEI CONSUMI SULLA BASE DEGLI INDICI DI CONSUMO IDEALE	39
3.7 CONCLUSIONI DEL CAPITOLO.....	42
4 FORMULAZIONI DI INDICI DI RIFERIMENTO PER IL SETTORE DELLE FONDERIE.....	43
4.1 DESCRIZIONE DEL SETTORE ANALIZZATO	43
4.2 DESCRIZIONE DEL PROCESSO DI FUSIONE	43
4.2.1 Forno a cubilotto.....	44
4.2.2 Forni elettrici.....	45
4.2.3 Rappresentazione del processo.....	46

4.3	FORMULAZIONE DEGLI INDICI IDEALI PER IL PROCESSO DI FUSIONE	47
4.3.1	<i>Indice di prestazione termica ideale</i>	47
4.4	RIEPILOGO INFORMAZIONI RICHIESTE DAL CALCOLO	50
4.5	INTERVENTI DI RIDUZIONE DEI CONSUMI SULLA BASE DEGLI INDICI DI CONSUMO IDEALE	51
4.6	CONCLUSIONI DEL CAPITOLO.....	54
5	CONCLUSIONI.....	55
6	APPENDICE	55
6.1	RIFERIMENTI AGGIUNTIVI PER LA FORMULAZIONE DEGLI INDICATORI IDEALI RELATIVI AL SETTORE FARMACEUTICO	55
6.1.1	<i>Formule psicrometriche</i>	55
6.1.2	<i>Equazioni di bilancio (nel sottosistema ambiente da trattare)</i>	56
6.1.3	<i>Calcolo regime estivo</i>	57
6.1.4	<i>Calcolo regime invernale</i>	57
7	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	59
8	ATTIVITÀ DI DISSEMINAZIONE	61
9	BREVE CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO	62

Sommario

Il lavoro di ricerca della presente linea di attività si inquadra in un più ampio progetto triennale che ha l'obiettivo finale di sviluppare degli indicatori che possano essere assunti come riferimento di eccellenza in termini di prestazione energetica all'interno di specifici settori produttivi di interesse per il panorama nazionale.

Durante la terza annualità del progetto, si è proceduto ad approfondire, specializzare e applicare la metodologia di definizione degli indici di prestazione ideali definita nel primo anno di lavoro per tre settori specifici.

A partire dall'analisi bibliografica e dalla metodologia generale per la definizione di indici di prestazione di riferimento precedentemente sviluppata anno sono stati analizzati tre settori molto significativi dal punto di vista energetico, identificati in accordo con ENEA: settore farmaceutico, dell'incenerimento dei rifiuti e delle fonderie.

Gli obiettivi del terzo anno per il progetto sono stati quindi i seguenti:

- Applicazione della metodologia per lo sviluppo di indicatori di prestazione di riferimento teorici per i tre settori.
- Validazione dei risultati attraverso contatti con le imprese e con le associazioni di categoria.

Il gruppo di ricerca si è inizialmente concentrato sullo studio del processo produttivo, analizzando le fasi principali e le caratteristiche più importanti in termini di parametri di influenza e vettori energetici utilizzati, studiandone le caratteristiche fisiche, termodinamiche e chimiche.

È stata poi avviata un'analisi della letteratura tecnico-scientifica a supporto della definizione di indicatori di prestazione energetica di riferimento ideale per le principali fasi ritenute più significative, selezionate in concordanza con le analisi condotte dall'Università di Salerno.

In particolare, per il settore farmaceutico sono stati analizzati i processi relativi ai sistemi ausiliari, di particolare rilevanza nel settore. Andando ad approfondire l'analisi sono state quindi identificate delle formulazioni matematiche per gli indicatori di prestazione ideale per i seguenti sistemi:

- HVAC
- Impianti frigoriferi
- Compressori d'aria

Allo stesso modo, sono stati analizzati i processi relativi all'incenerimento dei rifiuti e sono state identificate delle formulazioni matematiche per gli indicatori di prestazione ideale per i seguenti processi:

- Forno/generatore di vapore
- Ciclo termico
- Processo di trattamento fumi

In ultimo, è stato analizzato anche il settore delle fonderie, identificando la formulazione matematica per l'indicatore di prestazione ideale per il processo di fusione.

Entrambe le analisi e le conseguenti formulazioni definite dal gruppo di lavoro per gli indicatori di prestazione sono state condotte con il supporto e il riscontro fornito dalle associazioni di categoria Farindustria, Utilitalia e Assofond, interpellate grazie alla collaborazione di ENEA.

1 Introduzione

Il lavoro presentato in questa relazione è relativo ad una specifica linea di attività per il 2021, terzo e ultimo anno di un progetto di ricerca triennale inquadrato nel Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021, che vede la collaborazione tra l'Unità Tecnica Efficienza Energetica dell'ENEA e il Centro per l'Innovazione Tecnologica e lo Sviluppo del Territorio (CINTEST) a cui afferiscono l'Università degli studi della Tuscia e l'Università di Roma "Tor Vergata".

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

Il lavoro di ricerca della presente linea di attività si inquadra quindi in un più ampio progetto triennale che ha l'obiettivo finale di sviluppare degli indicatori che possano essere assunti come riferimento di eccellenza in termini di prestazione energetica, e che possano essere applicati dalle aziende all'interno di specifici settori produttivi per poter confrontare le proprie prestazioni, valutare margini di miglioramento e definire adeguate strategie di efficientamento energetico.

Gli indicatori di riferimento ricercati, affiancati agli indicatori di prestazione valutati con i dati raccolti dalle diagnosi del 2019, consentiranno inoltre di avere un quadro di riferimento delle prestazioni energetiche di alcuni importanti settori produttivi italiani.

Gli obiettivi, da conseguire in tre anni, dell'attività di ricerca prevedono:

- Lo studio dello stato dell'arte per quanto riguarda l'utilizzo degli indicatori di prestazione energetica e la determinazione analitica dei consumi energetici industriali;
- Lo sviluppo di un metodo per la definizione indicatori di prestazione di riferimento specifici, utili per stabilire le prestazioni energetiche di ciascun settore industriale;
- Lo sviluppo di indicatori di prestazione energetica di riferimento specifici per i principali settori produttivi, stabiliti in collaborazione con ENEA;

Nel suo sviluppo integrale, l'attività vuole quindi fornire alle aziende, degli indicatori di prestazione con cui poter confrontare le proprie prestazioni ed utili per sviluppare una strategia volta al miglioramento dell'efficienza energetica.

A partire dall'analisi bibliografica e dalla metodologia generale per la definizione di indici di prestazione di riferimento precedentemente sono stati analizzati tre settori molto significativi dal punto di vista energetico, identificati in accordo con ENEA: il settore **farmaceutico**, il settore delle **fonderie** e il settore dell'**incenerimento dei rifiuti**.

Gli obiettivi del terzo anno per il progetto sono quindi i seguenti:

- Applicazione della metodologia per lo sviluppo di indicatori di prestazione di riferimento ideali per i tre settori.
- Validazione dei risultati attraverso contatti con le imprese e con le associazioni di categoria.

Per raggiungere questi obiettivi, l'attività della terza annualità ha quindi seguito i seguenti step in maniera parallela per i tre settori farmaceutico, fonderie e trattamento rifiuti:

- 1 Studio del settore per identificare le caratteristiche delle fasi e i parametri di influenza relativi al consumo energetico del processo
- 2 Definizione interna dei processi da selezionare in collaborazione con l'Università di Salerno e scambio con l'associazione di categoria
- 3 Individuazione dei contributi energetici delle fasi esaminate

- 4 Definizione delle potenziali formulazioni degli indici ideali
- 5 Validazione dei risultati attraverso condivisione con le imprese e con le associazioni di categoria

2 Formulazioni di indici di riferimento per il settore farmaceutico

2.1 Descrizione del settore analizzato

Il settore farmaceutico comprende tutte le attività relative alla ricerca, alla produzione e alla vendita di farmaci e prodotti destinati alla medicina umana e veterinaria.

La produzione farmaceutica si divide in due tipologie: produzione farmaceutica primaria e produzione farmaceutica secondaria.

La *produzione primaria* riguarda la produzione del principio attivo in bulk ("Bulk pharmaceutical chemical" - BPC), mentre la *produzione secondaria* riguarda la trasformazione di quest'ultimo nel medicinale finale [1].

Questo settore dell'industria farmaceutica ha molto in comune con la produzione di prodotti chimici ad alto contenuto tecnologico, tanto che molti produttori di prodotti farmaceutici intermedi sono produttori di prodotti chimici ad elevato contenuto tecnologico e prodotti chimici speciali.

La produzione primaria utilizza tre metodologie principali:

- *Sintesi chimica* attraverso reazioni di complessità variabile
- *Biotecnologia e azioni microbiche* attraverso l'utilizzo delle biotecnologie basate sulla coltivazione dei microrganismi
- *Estrazione* di materiali naturali sia da fonte animale che vegetale

La produzione secondaria si occupa dello sviluppo del farmaco finale, caratterizzato da differenti metodi di somministrazione possibile che quindi andranno a richiedere processi produttivi diversi:

- Pillole
- Compresse
- Capsule
- Sciroppi, elisir e sospensioni
- Emulsioni
- Creme unguenti e altri semi solidi
- Supposte
- Gocce e spray orali, nasali, auricolari
- Iniezioni
- Aerosol

Il settore farmaceutico rappresenta uno dei settori industriali più importanti dal punto di vista dei consumi energetici [2], arrivando a costituire, insieme ad altri 7 settori, l'80% dei consumi totali di energia nella comunità europea [3].

Nella produzione farmaceutica, l'impatto delle condizioni dell'ambiente sulla qualità del prodotto è di importanza fondamentale. Di conseguenza, i sistemi deputati al trattamento e al condizionamento dell'aria rappresentano uno degli usi di energia più significativi in un impianto farmaceutico [2], [3].

La refrigerazione è un altro uso significativo nell'industria farmaceutica a causa della sua importanza in diverse applicazioni. La generazione del freddo, infatti, consente di lavorare nelle rigide condizioni necessarie per garantire l'efficienza dei processi produttivi, oltre all'adeguato controllo della temperatura per preservare i principi attivi e garantire la stabilità dei processi [2].

Sempre al fine di garantire la corretta gestione dei processi di produzione ed evitare contaminazioni, anche il consumo legato all'aria compressa è rilevante in questo settore, per i sistemi di trasporto in pressione o

sottovuoto, per l'azionamento di valvole, cilindri pneumatici, nonché per la produzione di antibiotici (al fine di fornire ossigeno ai batteri nella reazione) [4].

2.1.1 HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning)

I sistemi HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) sono impianti deputati al riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria negli ambienti al fine di mantenere uno spazio in predefinite condizioni termo-igrometriche.

Gli impianti di climatizzazione sono classificati in base al posizionamento delle unità terminali interne, deputate al mantenimento delle condizioni imposte per l'ambiente. In base a ciò, è possibile distinguere gli impianti in [5]:

- **Impianti ad aria:** l'unità terminale viene posizionata all'esterno dell'ambiente da climatizzare. L'aria in ingresso scambia energia con quella in ambiente, portandola alle condizioni imposte a progetto;
- **Impianti ad acqua:** l'unità terminale viene posizionata all'interno dell'ambiente da climatizzare. L'acqua del circuito idraulico scambia energia direttamente in ambiente;
- **Impianti misti:** parte dell'energia viene fornita dai terminali all'interno e parte dalle canalizzazioni entranti in ambiente.

Una seconda classificazione può essere fatta in funzione al tipo di fluido che alimenta le batterie di scambio termico dei terminali, distinguendo tra:

- **Impianti a fluido intermedio:** il fluido termovettore separa il circuito frigorifero e l'ambiente da climatizzare;
- **Impianti ad espansione diretta:** le batterie di scambio dei terminali sono alimentate dal refrigerante del circuito frigorifero.

Gli impianti ad aria trovano grande applicazione in ambienti con elevati volumi e caratterizzati da continue variazioni di carico sia sensibile che latente dal momento che sono in grado di controllare sia la temperatura ambiente che l'umidità relativa.

Gli elementi principali per tale sistema sono:

- la sezione di filtraggio dell'aria;
- la camera di miscela;
- le batterie di scambio termico per le trasformazioni termo-igrometriche;
- gli umidificatori;
- i deumidificatori;
- i ventilatori.

Un aspetto critico nel trattamento dell'aria in ingresso all'ambiente, soprattutto nel settore farmaceutico, è la deumidificazione.

Per ridurre l'umidità specifica si possono utilizzare due metodi:

- il primo è raffreddare l'aria al di sotto della temperatura di rugiada, operando quindi attraverso la batteria di raffreddamento;
- il secondo è il trattamento chimico dell'aria con sostanze deumidificanti ("desiccant system"), attraverso diverse modalità: torre di deumidificazione con liquidi igroscopici nebulizzati ("liquid spray-tower"), torre di deumidificazione con solidi igroscopici impaccati ("solid packed tower"), letto rotante orizzontale ("rotating horizontal bed"), letto verticale multiplo ("multiple vertical bed") e ruote essiccanti ("rotating wheel").

Di seguito, in Figura 1 si riporta una rappresentazione schematica di una configurazione generale di HVAC in un impianto farmaceutico con deumidificazione chimica attraverso ruota di materiale adsorbente.

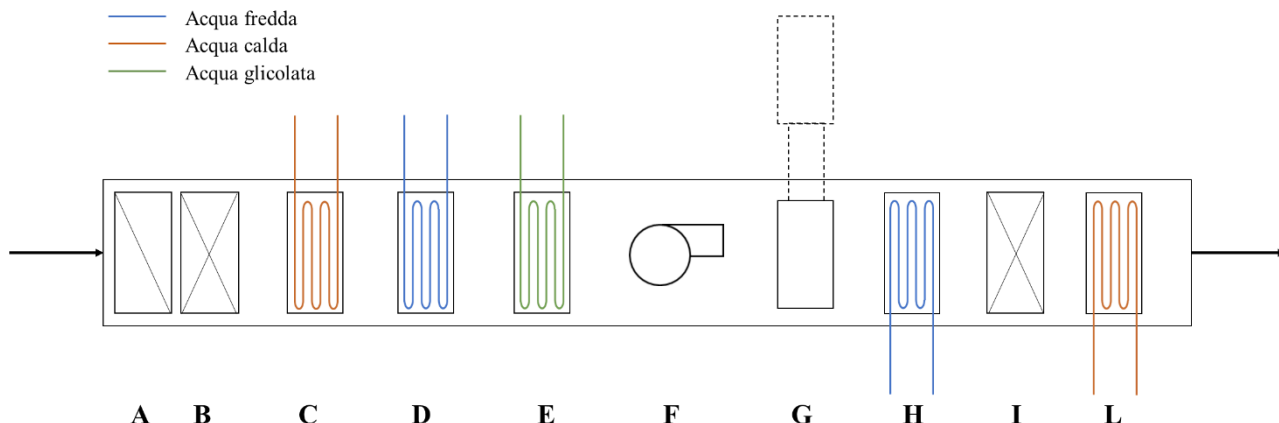


Figura 1. rappresentazione schematica di un impianto HVAC con deumidificazione chimica attraverso ruota di materiale adsorbente

Qualora le caratteristiche dell'ambiente servito lo consentano, nel sistema HVAC può essere introdotta una miscela di aria di ricircolo e di aria prelevata dall'esterno al fine di ridurre il consumo energetico del sistema.

Seguendo lo schema si può osservare i diversi componenti:

- A – primo filtro;
- B – secondo filtro;
- C – batteria di riscaldamento (acqua calda);
- D – batteria di raffreddamento (acqua fredda);
- E – batteria di raffreddamento (acqua glicolata);
- F – ventilatori per scongiurare le perdite di carico e mantenere l'ambiente servito in pressione al fine di prevenire contaminazioni verso l'interno;
- G – ruota di materiale adsorbente per la deumidificazione;
- H – batteria di raffreddamento (acqua fredda);
- I – filtro;
- L – batteria di riscaldamento (acqua calda).

L'aria trattata viene poi immessa nell'ambiente produttivo per il quale sarà necessario garantire uno specifico valore di ricambi orari.

A valle dell'ambiente servito la parte di aria che non viene ricircolata dovrà essere filtrata per poi essere espulsa verso l'ambiente.

I componenti del sistema HVAC non sono tutti in funzione contemporaneamente perché il loro funzionamento dipende dalle condizioni che l'aria in ingresso presenta rispetto alle condizioni target dell'ambiente servito. In generale, si può distinguere tra due regimi di funzionamento dell'impianto: il regime estivo e il regime invernale. In Figura 2 è rappresentato lo schema precedente con indicazione dei componenti in funzione nelle due condizioni.

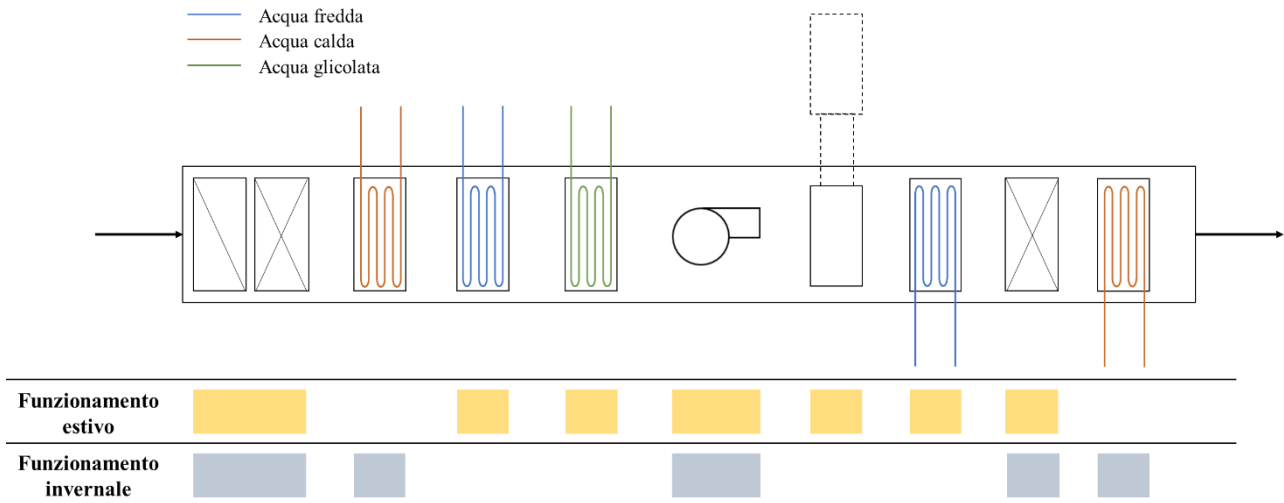


Figura 2. Rappresentazione dei componenti in funzione nelle due condizioni di funzionamento: estivo e invernale

In Figura 3 e in Figura 4 sono mostrate le trasformazioni subite dall'aria miscelata in ingresso al sistema (M) per essere portata alle condizioni di immissione nell'ambiente (I), rispettivamente per il funzionamento invernale ed estivo.

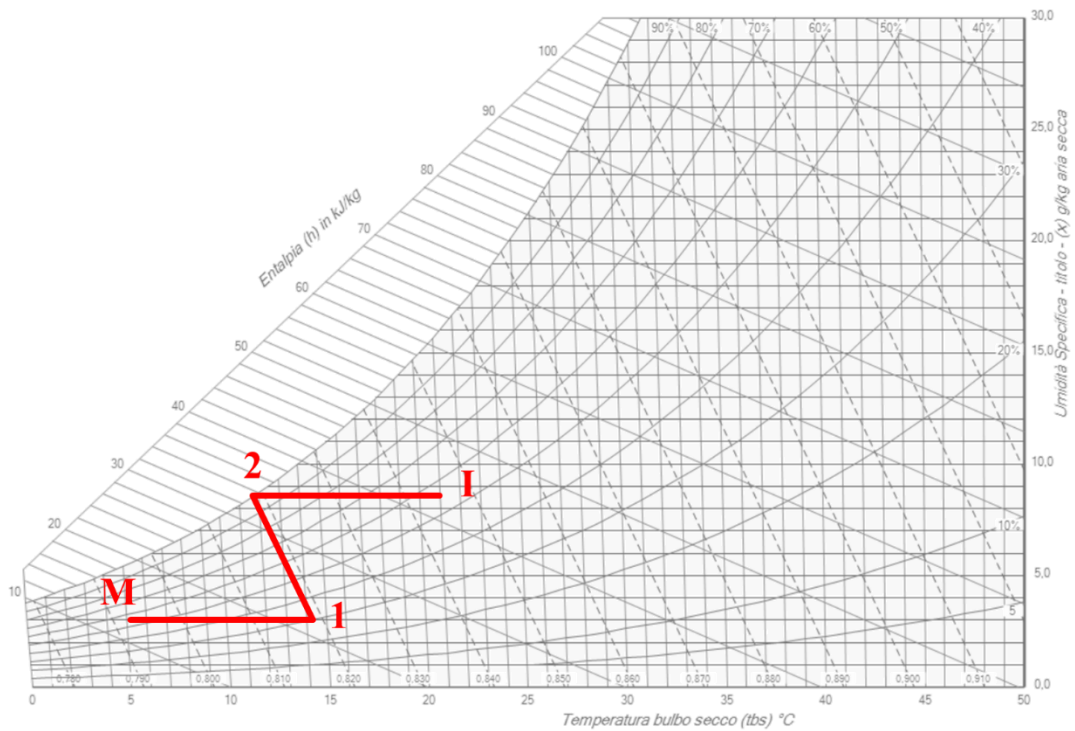


Figura 3. Rappresentazione del processo di riscaldamento + umidificazione sul diagramma psicrometrico (regime invernale)

Figura 3 rappresenta il processo di condizionamento invernale. Si possono distinguere tre fasi principali:

- Primo riscaldamento (M-1);
- Umidificazione (1-2);
- Post-riscaldamento (2-I).

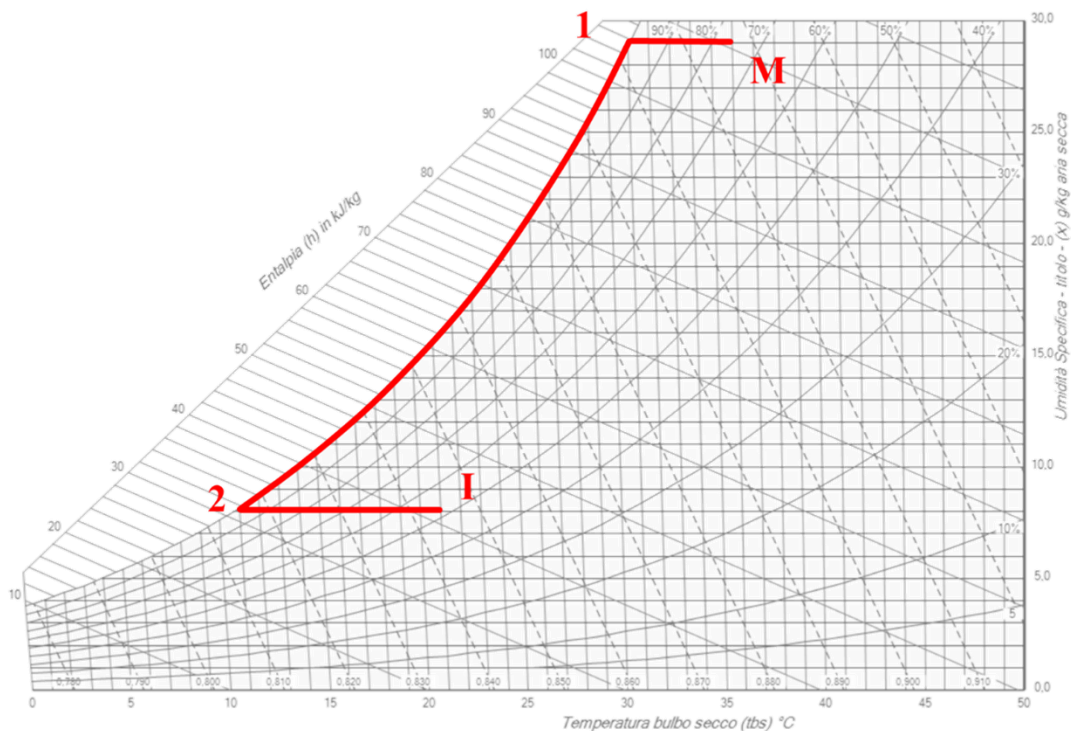


Figura 4. Rappresentazione del processo di raffreddamento con deumidificazione + riscaldamento sul diagramma psicrometrico (regime estivo)

Figura 4 rappresenta il processo di condizionamento estivo. Si possono distinguere due fasi principali:

- Raffreddamento con deumidificazione (M–1–2);
- Post-riscaldamento (2–I).

2.1.2 LAF (Laminar Air Flow)

Un altro uso significativo è rappresentato dai sistemi LAF (Laminar Air Flow). Una stazione di lavoro a flusso d'aria laminare permette di mantenere un'area di lavoro priva di particolato grazie alla presenza di un flusso unidirezionale di aria pulita a velocità specifica.

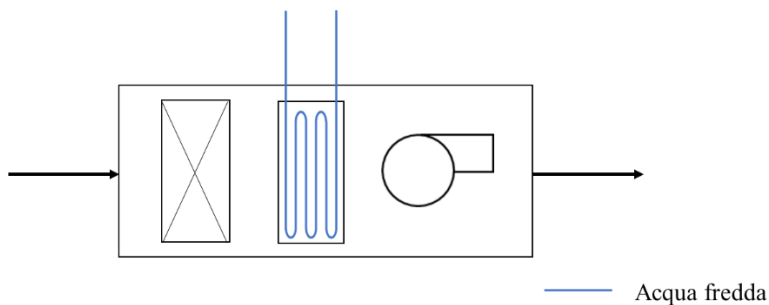


Figura 5. Rappresentazione sistema LAF

Il flusso di aria in entrata al LAF è prelevato dall'ambiente di servizio e subisce un primo filtraggio, un raffreddamento e poi viene processata dai ventilatori per essere restituita all'ambiente di servizio.

2.1.3 Impianti frigoriferi

Lo scopo di un sistema di refrigerazione è mantenere una regione fredda a una temperatura inferiore alla temperatura dell'ambiente circostante. I sistemi normalmente diffusi per raggiungere questo scopo sono di due tipologie:

- Impianti a compressione di vapore;

- Impianti ad assorbimento.

1.1.1. Impianti a compressione di vapore

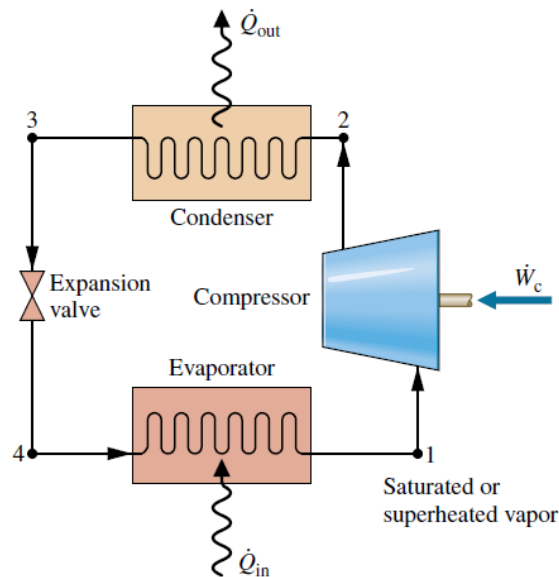


Figura 6. Schematizzazione di un impianto frigorifero a compressione di vapore [6]

I componenti principali dell'impianto frigorifero a compressione di vapore sono illustrati in Figura 6:

- Evaporatore;
- Condensatore;
- Compressore;
- Valvola di laminazione.

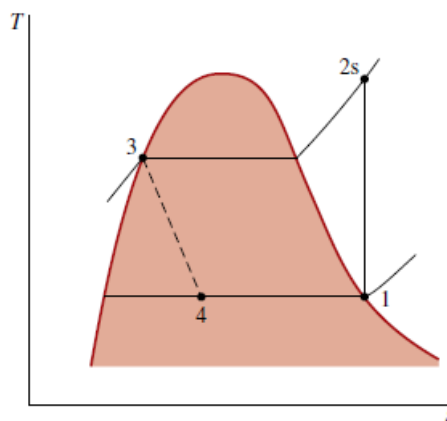


Figura 7. Schema del ciclo frigorifero a compressione di vapore ideale [6]

Il ciclo è composto dalle seguenti serie di trasformazioni:

- 1–2s: compressione isoentropica del refrigerante dallo stato 1 alla pressione del condensatore allo stato 2s;
- Processo 2s–3: trasferimento di calore dal refrigerante mentre scorre a pressione costante attraverso il condensatore. Il refrigerante esce come liquido allo stato 3;
- Processo 3–4: laminazione dallo stato 3 a una miscela liquido-vapore in 4;

- Processo 4-1: trasferimento di calore al refrigerante mentre scorre a pressione costante attraverso l'evaporatore per completare il ciclo.

Tutti i processi del ciclo mostrato nel diagramma $T-s$ in Figura 7 sono internamente reversibili ad eccezione della laminazione. Il ciclo lavora fra due pressioni, quella superiore (dei punti 2 e 3) e quella inferiore, dei punti 4 e 1.

1.1.2. Impianti ad assorbimento

A differenza dai sistemi frigoriferi a compressione di vapore, in un sistema frigorifero ad assorbimento si fornisce energia nella forma termica, mentre la potenza elettrica/meccanica è notevolmente inferiore in quanto assorbita da una pompa (Figura 8).

Nell'impianto frigorifero ad assorbimento in sostituzione al compressore degli impianti tradizionali, viene inserita una sezione comprendente nuovi componenti:

- Generatore;
- Pompa;
- Assorbitore.

Il vapore frigorifero viene inviato all'assorbitore, dove viene assorbito in una soluzione liquida per poi essere portato alla pressione superiore da una pompa. Nel generatore la soluzione liquida viene riscaldata provocandone la separazione.

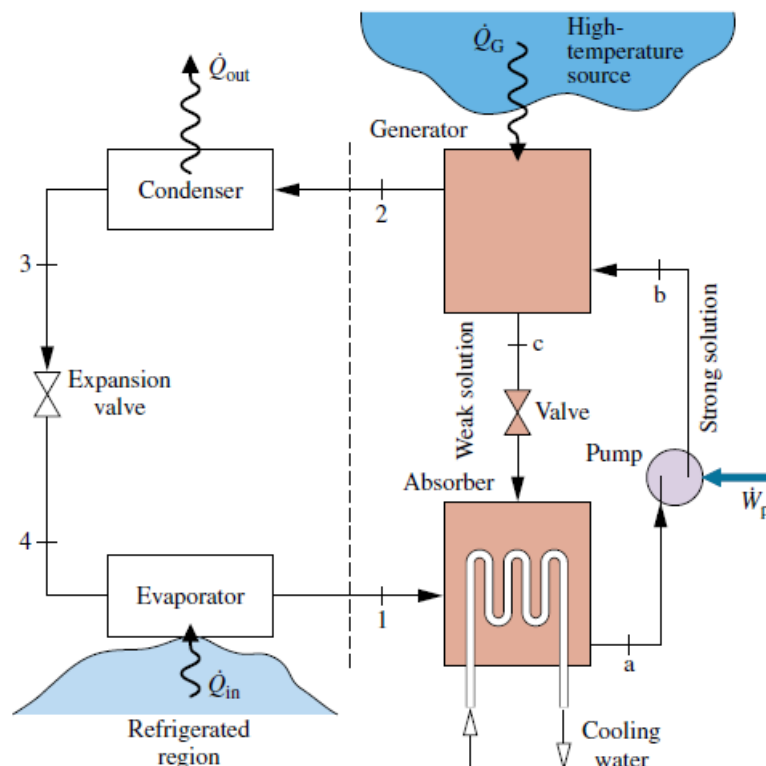


Figura 8. Schematizzazione di un impianto frigorifero ad assorbimento [6]

2.1.4 Compressori d'aria

Lo scopo di un compressore ad aria è fornire una determinata portata di aria compressa alla pressione prestabilita necessaria a portare a condurre le operazioni all'interno dell'impianto.

L'energia necessaria per il processo di compressione è energia meccanica, e viene fornita da un motore elettrico.

Gli utilizzi dell'aria compressa nel settore industriale sono diversi e al variare del settore d'impiego o dello specifico utilizzo variano alcune delle caratteristiche degli impianti di compressione dell'aria, come la pressione d'esercizio, la potenza installata nelle sale compressori e il grado di purezza.

La qualità dell'aria compressa è stabilita nella norma ISO 8573-1 ed è una caratteristica di importanza particolarmente rilevante nei settori alimentare e farmaceutico.

CLASSI DI PUREZZA	Polveri/Particelle solide			Acqua		Olio (liquido, aerosol, vapore)
	Numero di particelle per m ³			Punto di rugiada in pressione		Concentrazione
	0.1 < d* ≤ 0,5 μm	0.5 < d* ≤ 1,0 μm	1.0 < d* ≤ 5,0 μm	°C	°F	mg/m ³
0	Definita dall'utilizzatore o dal fornitore dell'apparecchiatura e più rigorosa della Classe 1					
1	≤ 20.000	≤ 400	≤ 10	≤ -70	≤ -94	≤ 0,01
2	≤ 400.000	≤ 6.000	≤ 100	≤ -40	≤ -40	≤ 0,1
3	-	≤ 90.000	≤ 1.000	≤ -20	≤ -4	≤ 1
4	-	-	≤ 10.000	≤ 3	≤ 37,4	≤ 5
5	-	-	≤ 100.000	≤ 7	≤ 44,6	-
6		≤ 5 mg/m ³		≤ 10	≤ 50	-

* d = diametro della particella.

Figura 9. Definizione delle diverse classi di qualità [7]

I compressori possono essere classificati, a seconda delle loro caratteristiche e del loro funzionamento, come rappresentato in Figura 10.

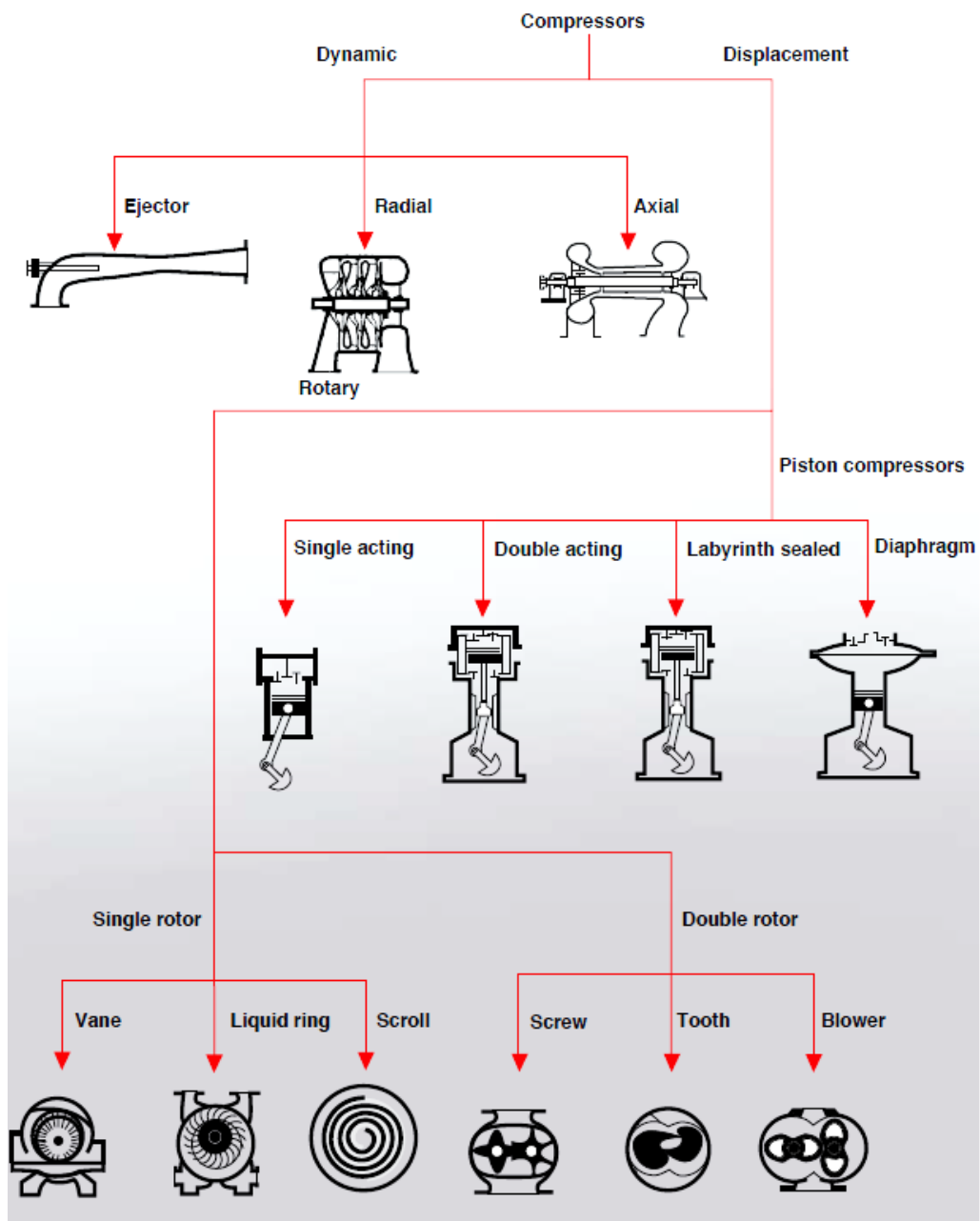


Figura 10. Tipi di compressori più comuni, suddivisi in base ai loro principi di funzionamento [8]

2.2 Formulazione dell'indici di prestazione energetica ideale per il sistema HVAC

In riferimento all'impianto HVAC possono essere definiti due indicatori ideali:

- indicatore di prestazione elettrica ideale;
- indicatore di prestazione termica ideale, che a sua volta sarà suddiviso a seconda che il sistema stia operando in assetto invernale (quindi fornendo calore all'ambiente) o in assetto estivo (quindi sottraendo calore all'ambiente).

2.2.1 Formulazione dell'indice di prestazione elettrica ideale

$$I_{HVAC,el} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{Nm}^3} \right) = \frac{EE_{HVAC}}{M_{air}} \quad (1)$$

dove EE_{HVAC} rappresenta l'energia elettrica consumata dal sistema HVAC in kJ, mentre M_{air} rappresenta la massa di aria processata nel tempo t^* espressa in Nm^3 (in condizioni normali cioè 0°C e $1,01325\text{bar}$).

Il termine EE_{HVAC} riguarda il consumo relativo ai ventilatori necessari a garantire la differenza di pressione prestabilita tra ambiente servito e ambiente esterno. EE_{HVAC} sarà quindi pari al lavoro necessario per fornire l'aria all'ambiente servito alle condizioni richieste.

$$EE_{HVAC}(\text{kJ}) = |\Delta p_{HVAC}| V_{air} \quad (2)$$

Dove $|\Delta p_{HVAC}|$ rappresenta il delta di pressione, in valore assoluto, esistente tra l'ambiente da servire ed ambiente esterno per evitare rischi di contaminazione interna o esterna e V_{air} rappresenta il volume (in m^3) occupato dalla massa M_{air} per cui vale la relazione seguente dove ρ_N e ρ_{air} sono rispettivamente la densità normale ($1,225 \text{ kg/m}^3$) e la densità effettiva dell'aria:

$$V_{air}(\text{m}^3) = M_{air} (\text{Nm}^3) \frac{\rho_N}{\rho_{air}} \quad (3)$$

2.2.2 Formulazione dell'indice di prestazione termica ideale

In Figura 11 è rappresentata una rappresentazione schematica della relazione tra ambiente servito HVAC, delle portate entranti ed uscenti da entrambi.

La trattazione seguente è eseguita per un impianto ad aria [9] distinguendo i due possibili regimi invernale ed estivo.

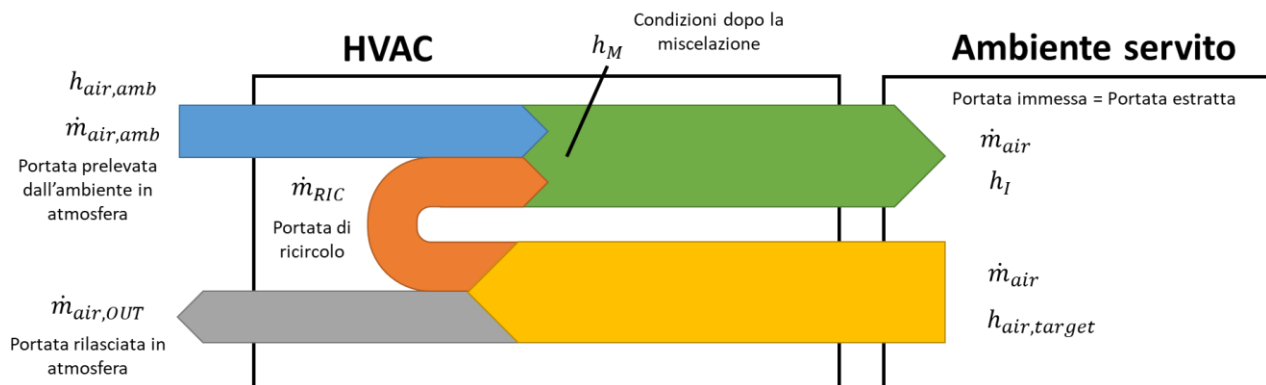


Figura 11. Rappresentazione dei flussi di aria entranti e uscenti dall'ambiente servito e del volume di controllo dell'analisi

1.1.2.1. REGIME INVERNALE

$$I_{HVAC,t,inv} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{Nm}^3} \right) = \frac{Q_{HVAC,inv}}{M_{air}} \tag{4}$$

dove $Q_{HVAC,inv}$ rappresenta l'energia termica consumata dal sistema HVAC in kJ in regime invernale, ossia il carico termico dell'ambiente da servire.

In regime invernale questo valore risulta scomponibile in due componenti: il carico termico speso sulla batteria calda di pre-riscaldamento quello speso sulla batteria calda di post-riscaldamento (Figura 12).

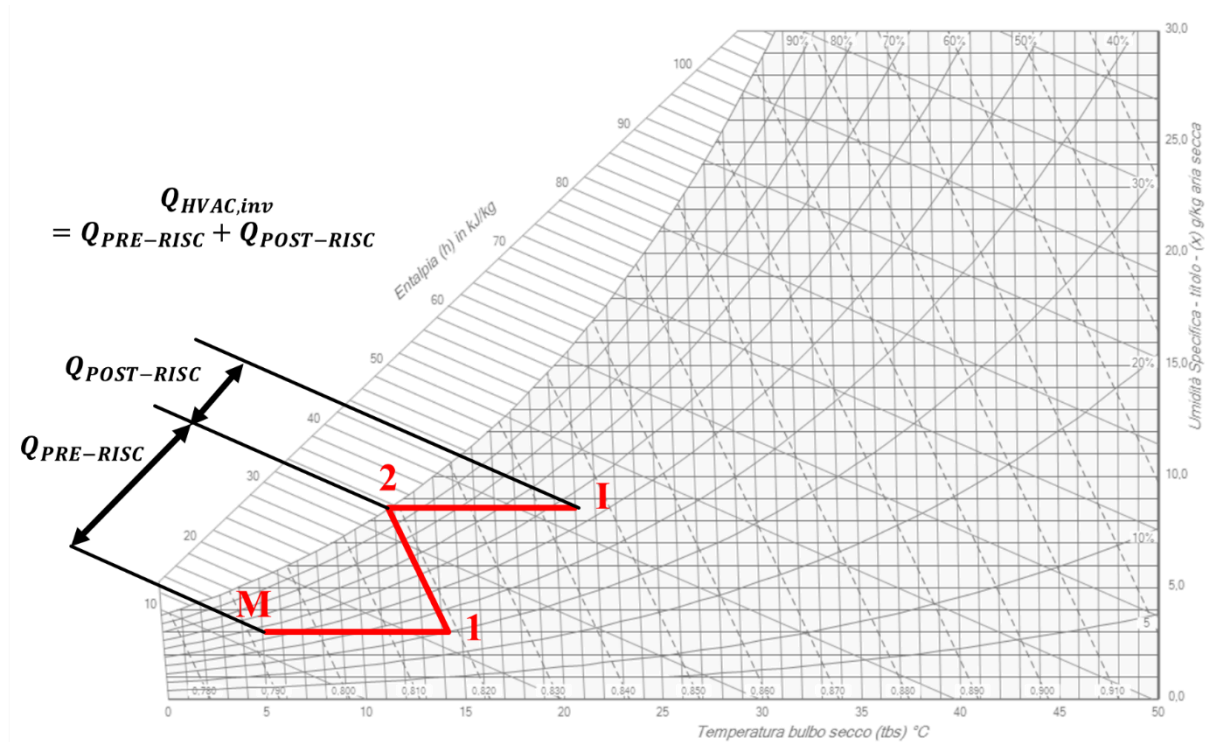


Figura 12. Rappresentazione carico invernale

$Q_{HVAC,inv}$ può essere quindi espresso come nella seguente equazione:

$$Q_{HVAC,inv} = m_{air,inv} (h_{I,inv} - h_{M,inv}) \tag{5}$$

dove $m_{air,inv}$ rappresenta la massa di aria introdotta ed estratta dall'ambiente servito, $h_{M,inv}$ rappresenta l'entalpia della miscela di aria di ricircolo e aria ambiente trattata dal sistema HVAC e $h_{I,inv}$ rappresenta l'entalpia dell'aria immessa nell'ambiente.

$h_{M,inv}$ sarà quindi desumibile dalle condizioni dell'aria esterna e della portata d'aria di ricircolo:

$$h_{M,inv}^1 = \frac{m_{air,RIC} h_{air,target,inv} + m_{air,amb} h_{air,amb}}{m_{air,RIC} + m_{air,amb}} \tag{6}$$

dove $m_{air,RIC}$ rappresenta la massa di aria di ricircolo, $h_{air,target}$ rappresenta l'entalpia dell'ambiente da servire (corrispondente quindi all'entalpia dell'aria estratta dall'ambiente), $m_{air,amb}$ è la massa di aria prelevata dall'esterno (in kg), $h_{air,amb}$ è l'entalpia dell'aria prelevata dall'esterno. $m_{air,amb}$ sarà influenzata dal numero di ricambi d'aria necessari all'ambiente servito, funzione delle condizioni di lavoro imposto:

¹ $m_{air,inv} h_{M,inv} = m_{air,RIC} h_{air,target,inv} + m_{air,amb} h_{air,amb}$
 $h_{M,inv} = X_{RIC} h_{air,target,inv} + (1 - X_{RIC}) h_{air,amb}$

$$m_{air,amb} = V_{target} \rho_{air,inv} N_{RICAMBI} \quad (7)$$

dove $N_{RICAMBI}$ è il numero di ricambi d'aria necessari all'ambiente servito (s^{-1}), $\rho_{air,inv}$ è la densità dell'aria dell'ambiente servito e V_{target} è il volume dell'ambiente servito.

$$m_{air,inv} = m_{air,amb} + m_{air,RIC} \quad (8)$$

$$m_{air,RIC} = X_{RIC} m_{air,inv} \quad (9)$$

dove X_{RIC} è la percentuale di aria di ricircolo.

1.1.2.2. REGIME ESTIVO

$$I_{HVAC,t,est} \left(\frac{kJ}{Nm^3} \right) = \frac{Q_{HVAC,est}}{V_{air}} \quad (10)$$

dove $Q_{HVAC,est}$ rappresenta l'energia termica consumata dal sistema HVAC in kJ in regime invernale, ossia il carico termico dell'ambiente da servire, che sarà quindi la somma del carico termico sensibile e di quello latente associato all'umidità presente.

In regime estivo questo valore risulta scomponibile in due componenti: il carico termico speso sulla batteria fredda per effettuare il raffreddamento con deumidificazione e quello speso sulla batteria calda di post-riscaldamento (Figura 13).

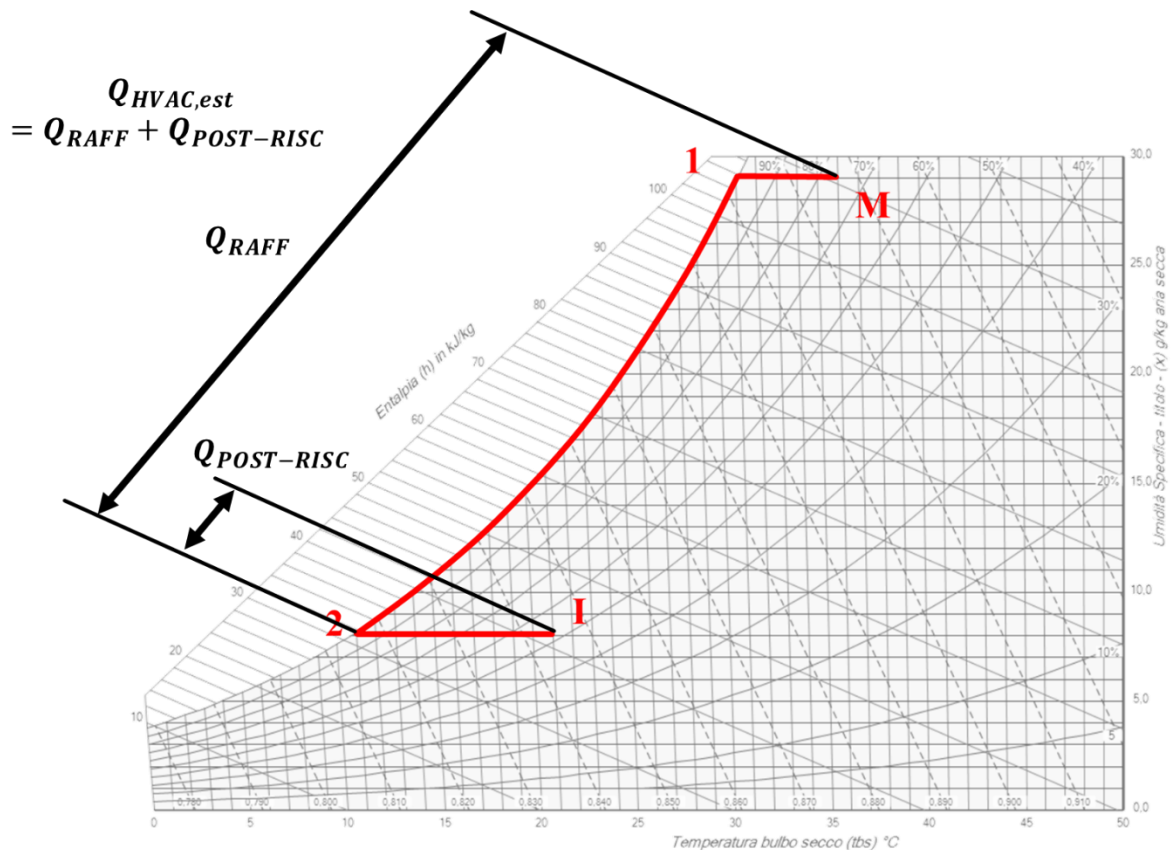


Figura 13. Rappresentazione carico estivo

$Q_{HVAC,est}$ può essere quindi espresso come nella seguente equazione:

$$Q_{HVAC,est} = Q_{RAFF,est} + Q_{POST-RISC,est} \quad (11)$$

dove $Q_{RAFF,est}$ rappresenta il carico termico consumato dalla batteria fredda e $Q_{POST-RISC,est}$ rappresenta il carico termico consumato dalla batteria calda.

$$Q_{RAFF,est} = m_{air,est} (h_{M,est} - h_{2,est}) \quad (12)$$

$$Q_{POST-RISC,est} = -m_{air,est} (h_{2,est} - h_{1,est}) \quad (13)$$

dove $m_{air,est}$ rappresenta la portata di aria introdotta ed estratta dall'ambiente servito, $h_{M,est}$ rappresenta l'entalpia della miscela di aria di ricircolo e aria ambiente trattata dal sistema HVAC, $h_{1,est}$ rappresenta l'entalpia dell'aria immessa nell'ambiente $h_{2,est}$ rappresenta l'entalpia dell'aria dopo il raffreddamento, prima del passaggio nella batteria calda per il post-riscaldamento.

$h_{M,est}$ sarà quindi desumibile dalle condizioni dell'aria esterna e della portata d'aria di ricircolo:

$$h_{M,est}^2 = \frac{m_{air,RIC} h_{air,target,est} + m_{air,amb} h_{air,amb}}{m_{air,RIC} + m_{air,amb}} \quad (14)$$

dove $m_{air,RIC}$ rappresenta la massa di aria di ricircolo, $h_{air,target}$ rappresenta l'entalpia dell'ambiente da servire (corrispondente quindi all'entalpia dell'aria estratta dall'ambiente), $m_{air,amb}$ è la massa di aria prelevata dall'esterno, $h_{air,amb}$ è l'entalpia dell'aria prelevata dall'esterno. $m_{air,amb}$ sarà influenzata dal numero di ricambi d'aria necessari all'ambiente servito, funzione delle condizioni di lavoro imposto:

$$m_{air,amb} = V_{target} \rho_{air,est} N_{RICAMBI} \quad (15)$$

dove $N_{RICAMBI}$ è il numero di ricambi d'aria necessari all'ambiente servito (s^{-1}), $\rho_{air,est}$ è la densità dell'aria dell'ambiente servito e V_{target} è il volume dell'ambiente servito. per cui vale anche la seguente equazione:

$$m_{air,est} = m_{air,amb} + m_{air,RIC} \quad (16)$$

$$m_{air,RIC} = X_{RIC} m_{air,est} \quad (17)$$

2.3 Formulazione dell'indice di prestazione energetica ideale per il sistema LAF

In riferimento all'impianto LAF possono essere definiti due indicatori ideali:

- indicatore di prestazione elettrica ideale;
- indicatore di prestazione termica ideale.

² $m_{air,est} h_{M,est} = m_{air,RIC} h_{air,target,est} + m_{air,amb} h_{air,amb}$
 $h_{M,est} = X_{RIC} h_{air,target,est} + (1 - X_{RIC}) h_{air,amb}$

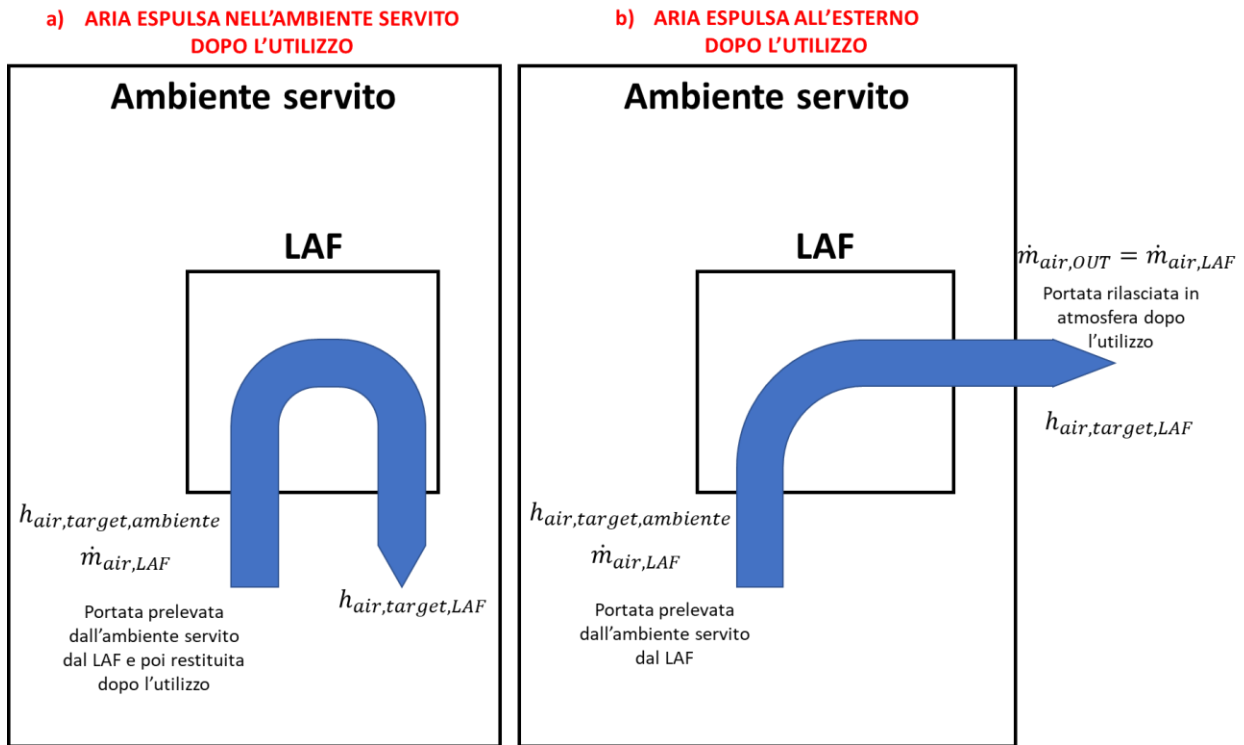


Figura 14. Rappresentazione dei flussi di aria entranti e uscenti dal LAF: a) dopo l'utilizzo l'aria è restituita all'ambiente in cui è presente il LAF; b) dopo l'utilizzo l'aria non viene restituita all'ambiente in cui è presente il LAF per evitare contaminazioni, ma invece espulsa all'esterno.

2.3.1 Formulazione dell'indicatore di prestazione elettrica ideale

$$I_{LAF,el} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{Nm}^3} \right) = \frac{EE_{LAF}}{M_{air}} \quad (18)$$

dove EE_{LAF} rappresenta l'energia elettrica consumata dal sistema LAF in kJ, mentre M_{air} rappresenta la massa di aria processata espressa in Nm^3 (in condizioni normali cioè 0°C e $1,01325\text{bar}$).

Il termine EE_{LAF} comprende il consumo elettrico riferito alla ventilazione del sistema LAF.

EE_{LAF} sarà quindi pari al lavoro necessario per fornire l'aria all'ambiente di produzione alle condizioni richieste.

$$EE_{LAF}(\text{kJ}) = |\Delta p_{LAF}| V_{air,LAF} \quad (19)$$

Dove Δp_{LAF} rappresenta il delta di pressione necessario a sconfiggere le perdite di carico nel sistema, $V_{air,LAF}$ rappresenta il volume di aria introdotta nell'ambiente dal LAF (m^3).

2.3.2 Formulazione dell'indicatore di prestazione termica ideale

$$I_{LAF,t} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{Nm}^3} \right) = \frac{Q_{LAF}}{M_{air,LAF}} \quad (20)$$

dove Q_{LAF} rappresenta l'energia termica consumata dal sistema LAF per raffreddare l'aria in kJ.

$$Q_{LAF} = V_{air,LAF} \rho_{air} (h_{air,target,LAF} - h_{target,ambiente}) \quad (21)$$

dove ρ_{air} è la densità dell'aria dell'ambiente servito, $V_{air,LAF}$ è il volume (in m³) dell'aria processata dal sistema, $h_{air,target,LAF}$ rappresenta l'entalpia corrispondente alle condizioni di emissione dell'aria dal sistema LAF e $h_{target,ambiente}$ rappresenta l'entalpia corrispondente all'aria dell'ambiente servito (quindi alle condizioni predefinite per l'ambiente).

In caso l'ambiente servito dal LAF sia lo stesso servito anche dal sistema HVAC, $h_{target,ambiente}$ sarà uguale a $h_{air,target}$ presente nelle equazioni precedenti.

2.4 Formulazione dell'indice di prestazione energetica ideale per il sistema frigorifero

2.4.1 Formulazione dell'indicatore di prestazione elettrica ideale per gli impianti frigoriferi a compressione di vapore

In riferimento agli impianti a compressione di vapore viene definito l'indicatore di prestazione elettrica ideale.

$$I_{REF,compr} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kJ}} \right) = \frac{\int_0^{t^*} P_C dt}{\int_0^{t^*} \dot{m}_W c_{PW} (\Delta T_W) dt} = \frac{EE_C}{Q_{REFR}} \quad (22)$$

Q_{REFR} è il carico termico da asportare dall'acqua refrigerata dello stabilimento (\dot{m}_W rappresenta la portata di acqua refrigerata del sistema, c_{PW} è il calore specifico dell'acqua e (ΔT_W) è la differenza di temperatura dell'acqua refrigerata tra ingresso e uscita dall'evaporatore).

$$I_{REF,compr,orario} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kJ}} \right) = \frac{\overline{T_{sup}}}{\overline{T_{inf}}} - 1 \quad (23)$$

dove $\overline{T_{sup}}$ rappresenta la temperatura assoluta media oraria della sorgente termica superiore (in K) e $\overline{T_{inf}}$ rappresenta la temperatura assoluta media oraria della sorgente termica inferiore (in K).

Per ottenere una valutazione rappresentativa della prestazione del sistema frigorifero durante il proprio funzionamento è necessario mediare l'indicatore nell'intervallo di tempo che si vuole valutare.

2.4.2 Formulazione dell'indicatore di prestazione termica ideale per gli impianti frigoriferi ad assorbimento

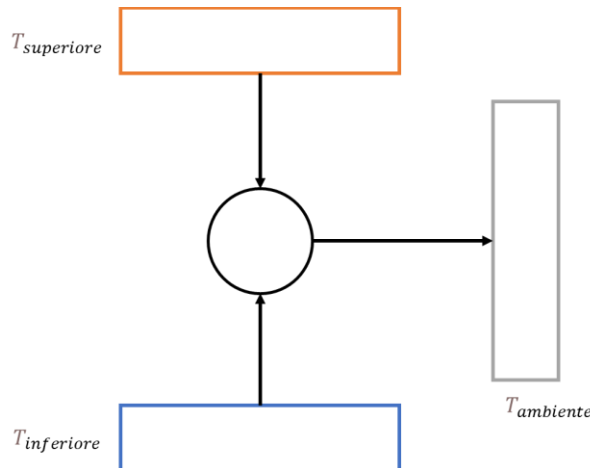


Figura 15. Rappresentazione ciclo ad assorbimento ideale (tritermico)

Il consumo termico relativo a un sistema frigorifero ad assorbimento è costituito dalla potenza termica ceduta al generatore.

$$I_{REF,ass,th} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kJ}} \right) = \frac{Q_{gen}}{Q_{REFR}} \quad (24)$$

$$I_{REF,ass,orario} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kJ}} \right) = \frac{\overline{T_{inf}}}{\overline{T_0} - \overline{T_{inf}}} \frac{\overline{T_{sup}} - \overline{T_0}}{\overline{T_{sup}}} \quad (25)$$

dove Q_{gen} rappresenta la potenza termica ceduta al generatore, $\overline{T_{sup}}$ rappresenta la temperatura assoluta media oraria della sorgente termica superiore (in K), $\overline{T_{inf}}$ rappresenta la temperatura assoluta media oraria della sorgente termica inferiore (in K) e $\overline{T_0}$ rappresenta la temperatura assoluta media oraria ambiente (in K).

Per ottenere una valutazione rappresentativa della prestazione del sistema frigorifero durante il proprio funzionamento è necessario mediare l'indicatore nell'intervallo di tempo che si vuole valutare.

2.5 Formulazione dell'indice di prestazione energetica ideale per i compressori d'aria

Per quanto concerne i compressori d'aria l'indice di prestazione elettrica ideale è il seguente:

$$I_{COMPR,el} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right) = \frac{EE_{COMPR}}{V_{air,compr}} \quad (26)$$

dove EE_{COMPR} rappresenta l'energia elettrica consumata dai compressori in kJ, mentre $V_{air,compr}$ rappresenta il volume di aria processata nel tempo t^* espressa in m^3 .

$$EE_{COMPR}(\text{kJ}) = V_{air,compr} \frac{k}{k-1} p_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (27)$$

Dove k rappresenta il coefficiente di dilatazione adiabatica, pari al rapporto tra i calori specifici a pressione e volume costante $\left(k = \frac{c_p}{c_v} \right)$, p_1 rappresenta la pressione iniziale prima della compressione e quindi è pari alla pressione ambiente mentre p_2 è la pressione di utilizzo a cui deve essere fornita l'aria compressa.

2.6 Riepilogo informazioni richieste dal calcolo

Tabella 1. Riepilogo delle informazioni necessarie per il calcolo degli indici di prestazione energetica ideale per il settore farmaceutico

	Informazioni necessarie al calcolo
HVAC	<ul style="list-style-type: none"> ❖ V_{air} = volume di aria processata nel tempo t^* espressa in m^3 ❖ M_{air} = massa di aria processata nel tempo t^* espressa in Nm^3 (in condizioni normali cioè $0^\circ C$ e $1,01325bar$) <li style="text-align: center;">oppure ❖ $\rho_{air,(inv\ o\ est)}$ = densità dell'aria dell'ambiente servito (kg/m^3) <li style="text-align: center;">oppure ❖ $m_{air,(inv\ o\ est)}$ = massa di aria processata nel tempo t^* espressa in kg ❖ Δp_{HVAC} = differenza di pressione assoluta (in Pa) esistente tra l'ambiente da servire ed ambiente esterno per evitare rischi di contaminazione interna o esterna ❖ $h_{air,target}$ = entalpia dell'ambiente da servire (corrispondente quindi all'entalpia dell'aria estratta dall'ambiente) (kJ/kg) ❖ $h_{air,amb}$ = l'entalpia dell'aria prelevata dall'esterno (kJ/kg) ❖ $N_{RICAMBI}$ = numero di ricambi d'aria necessari all'ambiente servito (s^{-1}) ❖ V_{target} = volume dell'ambiente servito (m^3) ❖ X_{RIC} = percentuale di aria di ricircolo (%)
LAF	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Δp_{LAF} = delta di pressione necessario a sconfiggere le perdite di carico nel sistema (Pa) ❖ $V_{air,LAF}$ = volume dell'aria processata dal sistema (in m^3) ❖ $h_{air,target,LAF}$ = entalpia corrispondente alle condizioni di emissione dell'aria dal sistema LAF (kJ/kg) ❖ $h_{target,ambiente}$ = entalpia corrispondente all'aria dell'ambiente servito (quindi alle condizioni predefinite per l'ambiente). (kJ/kg) ❖ ρ_{air} = densità dell'aria dell'ambiente servito (kg/m^3)
Impianti Frigo a compressione	<ul style="list-style-type: none"> ❖ $\overline{T_{sup}}$ = temperatura assoluta media oraria della sorgente termica superiore (in K) per ogni ora considerata nell'analisi ❖ $\overline{T_{inf}}$ = temperatura assoluta media oraria della sorgente termica inferiore (in K) per ogni ora considerata nell'analisi

<p>Impianti Frigo ad assorbimento</p>	<ul style="list-style-type: none"> ❖ $\overline{T_{sup}}$ = temperatura assoluta media oraria della sorgente termica superiore (in K) per ogni ora considerata nell'analisi ❖ $\overline{T_{inf}}$ = temperatura assoluta media oraria della sorgente termica inferiore (in K) per ogni ora considerata nell'analisi ❖ $\overline{T_0}$ rappresenta la temperatura assoluta media oraria ambiente (in K) per ogni ora considerata nell'analisi
<p>Compressori d'aria</p>	<ul style="list-style-type: none"> ❖ $V_{air,compr}$ = volume di aria processata nel tempo t^* espressa (m^3) ❖ k = coefficiente di dilatazione adiabatica dell'aria ❖ p_1 = pressione iniziale prima della compressione (pari alla pressione ambiente, a meno di indicazioni diverse) (Pa) ❖ p_2 = pressione di utilizzo a cui deve essere fornita l'aria compressa (Pa)

2.7 Interventi di riduzione dei consumi sulla base degli indici di consumo ideale

Gli indici di prestazione ideali ricavati in questo capitolo hanno permesso di identificare le principali linee d'azione per la riduzione dei consumi energetici nel settore farmaceutico:

- *Riduzione del volume d'aria processato dal sistema HVAC* (in termini di riduzione numero di ricambi d'aria, definizione di una gestione individuale delle richieste dei singoli ambienti e/o di aumento della portata di ricircolo utilizzata). Tale riduzione dovrà essere naturalmente compatibile con le effettive richieste dell'impianto produttivo e con le limitazioni imposte dalle norme tecniche e legislative per il settore.
- *Riduzione della pressione alla quale viene erogata l'aria compressa e/o del volume stesso di aria processata*, al fine di diminuire l'energia consumata dai compressori ad aria. Tali riduzioni dovranno essere naturalmente compatibili con le effettive richieste dell'impianto produttivo. A tal riguardo, in caso di presenza di richieste di differenti livelli di pressione da parte di utenze diverse, potrebbe essere anche valutata una differenziazione dei circuiti di distribuzione dell'aria compressa. Rientra in questa tipologia di intervento anche la ricerca di perdite nel circuito di distribuzione dell'aria compressa o l'eventuale riduzione di portata richiesta dovuta a efficientamenti nella gestione della richiesta (es. installazione di valvole sugli utilizzatori finali per impedire dispersioni quando i macchinari non sono in funzionamento).
- *Riduzione del carico termico da trattare Q (somma di carico sensibile Q_{SEN} e carico latente Q_{LAT})*, al fine di diminuire l'energia termica richiesta all'impianto HVAC. Tali riduzioni dovranno essere naturalmente compatibili con le effettive richieste tecniche dell'impianto produttivo (es. interventi di coibentazione per fonti di calore o freddo).
- *Riduzione della temperatura della sorgente termica superiore e/o aumento della temperatura della sorgente termica inferiore*, al fine di aumentare il rendimento de ciclo frigorifero.

Al fine di completare l'analisi degli indicatori di riferimento ideali definiti sono stati studiati alcuni interventi identificati dal gruppo di lavoro dell'Università di Firenze come tra i più rappresentativi per questo settore.

Tra gli interventi più rappresentativi in relazione alla produzione principi attivi:

- Installazione di inverter sui motori elettrici
- Sostituzione dei motori elettrici con motori elettrici più efficienti [10]
- Installazione di un impianto fotovoltaico (intervento identificato dallo studio delle diagnosi energetiche)
- Sostituzione del gruppo frigo con elemento più efficiente (intervento identificato dallo studio delle diagnosi energetiche)
- Installazione di un cogeneratore (MCI + recupero calore) (intervento identificato dallo studio delle diagnosi energetiche)

Tra gli interventi più rappresentativi in relazione alla produzione farmaci (identificati dallo studio delle diagnosi energetiche):

- Installazione di un impianto fotovoltaico
- Installazione di un impianto di generazione contemporanea di energia elettrica, frigorifera e termica
- Installazione di un cogeneratore - Energia elettrica e termica
- Sostituzione del gruppo frigo con elemento più efficiente

Ognuno degli interventi segnalati dall'Università di Firenze viene quindi analizzati in relazione al suo impatto sull'indicatore di prestazione energetica ideale definito in precedenza (Tabella 2, Tabella 3,

Tabella 4).

Tabella 2. Descrizione dell’impatto sugli indici di prestazione energetica ideale per HVAC degli interventi più rappresentativi identificati

Interventi più rappresentativi		Impatto sugli indici di prestazione energetica ideale per HVAC
1)	Installazione di inverter sui motori elettrici	<p>Questa tipologia di intervento consiste nell’installazione di inverter, dispositivo elettronico utilizzato per variare la frequenza della corrente di alimentazione di un motore elettrico e, di conseguenza, la sua velocità di rotazione.</p> <p>Considerando che il valore EE_{HVAC}, che compare nell’indicatore di prestazione elettrica ideale $J_{HVAC,el}$, rappresenta il consumo ideale di energia elettrica consumata dai ventilatori, espresso come $\Delta p_{HVAC} V_{air}$ (con Δp_{HVAC} differenza di pressione tra ambiente servito e ambiente esterno), e che la variazione della velocità di rotazione provoca una variazione della portata, questa tipologia di intervento ha quindi impatto sull’indicatore di prestazione elettrica ideale $J_{HVAC,el}$.</p>
2)	Sostituzione dei motori elettrici con motori elettrici più efficienti	<p>Questa tipologia di intervento consiste nell’utilizzo di motori elettrici con un’efficienza di targa superiore a quelli presenti nell’impianto, caratteristica che va quindi a modificare il valore del consumo elettrico dei ventilatori nel sistema HVAC a parità di aria trattata.</p> <p>Considerando che il valore EE_{HVAC}, che compare nell’indicatore di prestazione elettrica ideale $J_{HVAC,el}$, rappresenta il consumo ideale di energia elettrica consumata dai ventilatori, espresso come $\Delta p_{HVAC} V_{air}$ (con Δp_{HVAC} differenza di pressione tra ambiente servito e ambiente esterno), questa tipologia di intervento non ha quindi impatto sull’indicatore di prestazione elettrica ideale $J_{HVAC,el}$.</p>
3)	Installazione di un impianto fotovoltaico	<p>Queste tipologie di intervento non riguardano la prestazione energetica del sistema HVAC, quindi, non ha impatto sull’indicatore di prestazione elettrica ideale $J_{HVAC,el}$ né sull’indicatore di prestazione termica ideale $J_{HVAC,t}$</p>
4)	Sostituzione del gruppo frigo con elemento più efficiente	

5)	Installazione di un cogeneratore (con o senza aggiunta di frigorifero ad assorbimento per la generazione aggiuntiva di freddo)	
----	---	--

Tabella 3. Descrizione dell'impatto sugli indici di prestazione energetica ideale per frigoriferi a compressione o ad assorbimento degli interventi più rappresentativi identificati

Interventi più rappresentativi		Impatto sull'indice di prestazione energetica ideale per frigoriferi a compressione o ad assorbimento
1)	Installazione di inverter sui motori elettrici	<p>Queste tipologie di intervento non riguardano la prestazione energetica dei frigoriferi, quindi, non hanno impatto sull'indicatore di prestazione elettrica ideale $J_{REF,comp}$, né sull'indicatore di prestazione termica ideale $J_{REF,ass}$.</p>
2)	Sostituzione dei motori elettrici con motori elettrici più efficienti	
3)	Installazione di un impianto fotovoltaico	
4)	Sostituzione del gruppo frigo con elemento più efficiente	<p>Questa tipologia di intervento consiste nell'utilizzo di sistemi frigoriferi con un'efficienza di targa superiore a quelli presenti nell'impianto, caratteristica che va quindi a modificare il valore del consumo elettrico dei frigoriferi a parità di temperature delle sorgenti termiche utilizzate.</p> <p>Considerando che il valore delle temperature delle sorgenti termiche utilizzate non subisce variazioni, questa tipologia di intervento non ha impatto sull'indicatore di prestazione elettrica ideale $J_{REF,comp}$.</p>
5)	Installazione di un cogeneratore (con o senza aggiunta di frigorifero ad assorbimento per la	<p>Questa tipologia di intervento consiste nell'installazione di un impianto di cogenerazione o di trigenerazione, nel caso di presenza aggiuntiva di produzione di freddo.</p> <p>Considerando che il valore l'indicatore di prestazione elettrica ideale $J_{REF,ass}$ è legato al valore delle temperature delle sorgenti,</p>

<p>generazione aggiuntiva di freddo)</p>	<p>in questo caso una modifica alla temperatura della sorgente calda avrebbe impatto sull'indicatore di prestazione termica ideale $J_{REF,ass}$.</p> <p>Se $\overline{T_{sup}}$ aumenta il valore di $J_{REF,ass}$ diminuisce.</p>
---	--

Tabella 4. Descrizione dell'impatto sugli indici di prestazione energetica ideale per compressori d'aria degli interventi più rappresentativi identificati

Interventi più rappresentativi	Impatto sull'indice di prestazione energetica ideale per compressori d'aria
<p>1) Installazione di inverter sui motori elettrici</p>	<p>Questa tipologia di intervento può essere trasferita anche nell'ambito dei compressori ad aria.</p> <p>In questo caso, questa tipologia di intervento consiste nell'installazione di inverter, dispositivo elettronico utilizzato per variare la frequenza della corrente di alimentazione di un motore elettrico e, di conseguenza, la sua velocità di rotazione.</p> <p>Considerando che il valore EE_{COMPR}, che compare nell'indicatore di prestazione elettrica ideale $J_{COMPR,el}$, rappresenta il consumo ideale di energia elettrica consumata dai compressori, espresso $V_{air,compr} \frac{k}{k-1} p_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$, e che la variazione della velocità di rotazione provoca una variazione della portata, questa tipologia di intervento ha quindi impatto sull'indicatore di prestazione elettrica ideale $J_{COMPR,el}$.</p>
<p>2) Sostituzione dei motori elettrici con motori elettrici più efficienti</p>	<p>Questa tipologia di intervento può essere trasferita anche nell'ambito dei compressori ad aria.</p> <p>In questo caso, l'intervento consisterà nell'utilizzo di compressori con un'efficienza di targa superiore a quelli presenti nell'impianto, caratteristica che va quindi a modificare il valore del consumo elettrico dei compressori, a parità di aria compressa prodotta.</p> <p>Considerando che il valore EE_{COMPR}, che compare nell'indicatore di prestazione elettrica ideale $J_{COMPR,el}$, rappresenta il consumo ideale di energia elettrica consumata dai compressori, espresso $V_{air,compr} \frac{k}{k-1} p_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$, questa tipologia di intervento non ha quindi impatto sull'indicatore di prestazione elettrica ideale $J_{COMPR,el}$.</p>

3)	Installazione di un impianto fotovoltaico	<p>Queste tipologie di intervento non riguardano la prestazione energetica dei compressori ad aria, quindi, non ha impatto sull'indicatore di prestazione elettrica ideale $J_{COMPR,el}$.</p>
4)	Sostituzione del gruppo frigo con elemento più efficiente	
5)	Installazione di un cogeneratore (con o senza aggiunta di frigorifero ad assorbimento per la generazione aggiuntiva di freddo)	

2.8 Conclusioni del capitolo

In questo capitolo sono stati formulati degli indicatori di riferimento ideale per la prestazione energetica nel settore farmaceutico.

In particolare, dopo una analisi globale del settore, la concentrazione del gruppo di ricerca si è focalizzata sull'analisi di alcune utenze ritenute più significativi per il settore specifico. La definizione di tali utenze è avvenuta in risultanza delle analisi condotte dall'Università di Salerno e ai riscontri avuti dai colloqui intercorsi con l'associazione di categoria **Farmindustria**.

I sistemi energetici analizzati sono stati:

- Sistemi HVAC;
- Sistemi frigoriferi (a compressione di vapore e ad assorbimento);
- Compressori ad aria.

È stata quindi condotta un'analisi della letteratura scientifica finalizzata all'identificazione delle caratteristiche più importanti in termini di parametri di influenza e vettori energetici utilizzati e all'indagine delle caratteristiche fisiche, termodinamiche e chimiche del processo.

Da questo lavoro sono poi state definite delle formulazioni per gli indicatori di prestazione energetica ideale per il settore:

- Indicatore ideale termico per il sistema HVAC;
- Indicatore ideale elettrico per il sistema HVAC;
- Indicatore ideale elettrico per i frigoriferi a compressione di vapore;
- Indicatore ideale termico per i frigoriferi ad assorbimento;
- Indicatore ideale elettrico per i compressori ad aria.

Le analisi condotte e le conseguenti formulazioni definite dal gruppo di lavoro per gli indicatori di prestazione sono state poi condivise con l'associazione di categoria **Farmindustria** per averne validazione.

Infine, i modelli sono stati utilizzati per valutare l'impatto dei più significativi interventi di efficientamento. In particolare sono stati discriminati gli interventi sulla base del loro effetto o meno sugli indici di prestazione ideale.

3 Formulazioni di indici di riferimento per il settore dell'incenerimento dei rifiuti

3.1 Descrizione del settore analizzato

Il settore dell'incenerimento dei rifiuti rappresenta un settore industriale fondamentale nel contesto dell'applicazione di una economia circolare. Infatti, la Commissione europea nella Comunicazione del 26/01/2017 n. 34, la considera da applicare per i soli rifiuti non riciclabili, nell'ambito dell'applicazione della gerarchia di gestione indicata dalla direttiva 2008/98/CE.

A differenza degli impianti di produzione di energia tradizionali, per un impianto d'incenerimento di rifiuti la funzione principale è il trattamento termico dei rifiuti stessi.

In Figura 16 vengono rappresentate le fasi principali del processo di incenerimento dei rifiuti:

- Alimentazione dei rifiuti;
- Forno/generatore di vapore;
- Ciclo termico;
- Trattamento fumi.

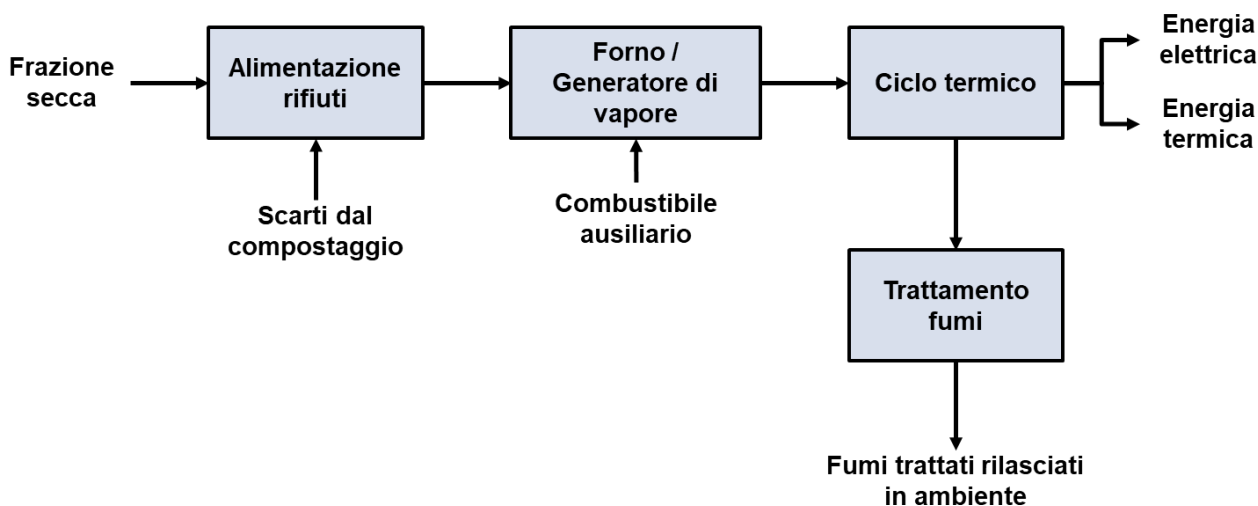


Figura 16. Principali fasi del processo di incenerimento dei rifiuti [11]

In Figura 17 vengono rappresentati gli indicatori definiti in diagnosi energetica per le principali fasi [11].

Fasi principali	Indicatore prestazionale in diagnosi	Unità di misura
Movimentazione / Alimentazione rifiuti	EE/quantità rifiuti alimentati al forno	kWh/t
Forno / Generatore di vapore	Consumo vettore/Apporto energetico dei rifiuti	(kWh)(Sm ³)(kg)/MWh
Ciclo termico	EE/(EE+ET) _{prodotta}	kWh/tep
Depurazione fumi	Consumo vettore/quantitativo fumi al camino	(kWh)(Sm ³)(kg)/kNm ³

Figura 17. Indici per attività principali definiti nelle linee guida per la redazione delle diagnosi energetiche

3.1.1 Forno/Generatore di vapore

Il trattamento termico (rappresentato nel blocco «Forno/Generatore di vapore» in Figura 17) varia a seconda delle diverse tipologie di rifiuti trattati.

Tra le tecnologie più comuni si trovano le seguenti:

- inceneritori a griglia;
- forni a tamburo rotante;
- letti fluidi;
- sistemi di pirolisi e gassificazione.

3.1.2 Ciclo termico

La maggior parte degli impianti effettua il recupero del calore dei fumi utilizzando una caldaia che ha due funzioni:

- raffreddare i fumi;
- trasferire il calore dai fumi ad un altro fluido, solitamente acqua (generatore di vapore).

I principali utilizzi dell'energia termica ceduta al fluido sono:

- produzione e fornitura di calore (come vapore o acqua calda);
- produzione e fornitura di energia elettrica;
- combinazioni dei due.

3.1.3 Processo di trattamento fumi

Dopo il trattamento termico i fumi risultanti devono essere depurati prima di poter essere immessi in atmosfera.

In particolare, la depurazione dei fumi prevede rimozione dei diversi tipi d'inquinanti:

- Polveri;
- Nox;
- Gas Acidi (es. HCl, HF and SO_x);
- Microinquinanti organici e inorganici.

In Tabella 5 vengono rappresentati i possibili componenti della linea di depurazione dei fumi.

Tabella 5. Componenti di trattamento dei fumi

Componenti di trattamento dei fumi	
Polveri	ESP (precipitatore elettrostatico)
	Cycloni
	Filtro a maniche
	Wet scrubber
NO_x	SNCR (tecnologie di riduzione non catalitica)
	High-Dust SCR
	Low-Dust SCR
	Tail-End SCR
Gas Acidi (es. HCl, HF and SO_x)	Sistemi a umido
	Sistemi a secco
	Sistemi a semi-secco
Micro inquinanti organici	Adsorbimento a carboni attivi
Micro inquinanti inorganici	Adsorbimento a carboni attivi o utilizzo SCR Tail-End

I singoli componenti sono combinati per fornire un efficace sistema per il trattamento degli inquinanti che si trovano nei fumi.

Esistono diversi componenti e layout possibili come rappresentato in Figura 18. Le diverse tipologie impiantistiche dei sistemi di trattamento dei fumi si dividono, a seconda dell'intervento o meno di fasi liquide, in:

- Sistemi a secco;
- Sistemi a semisecco;
- Sistemi a umido.

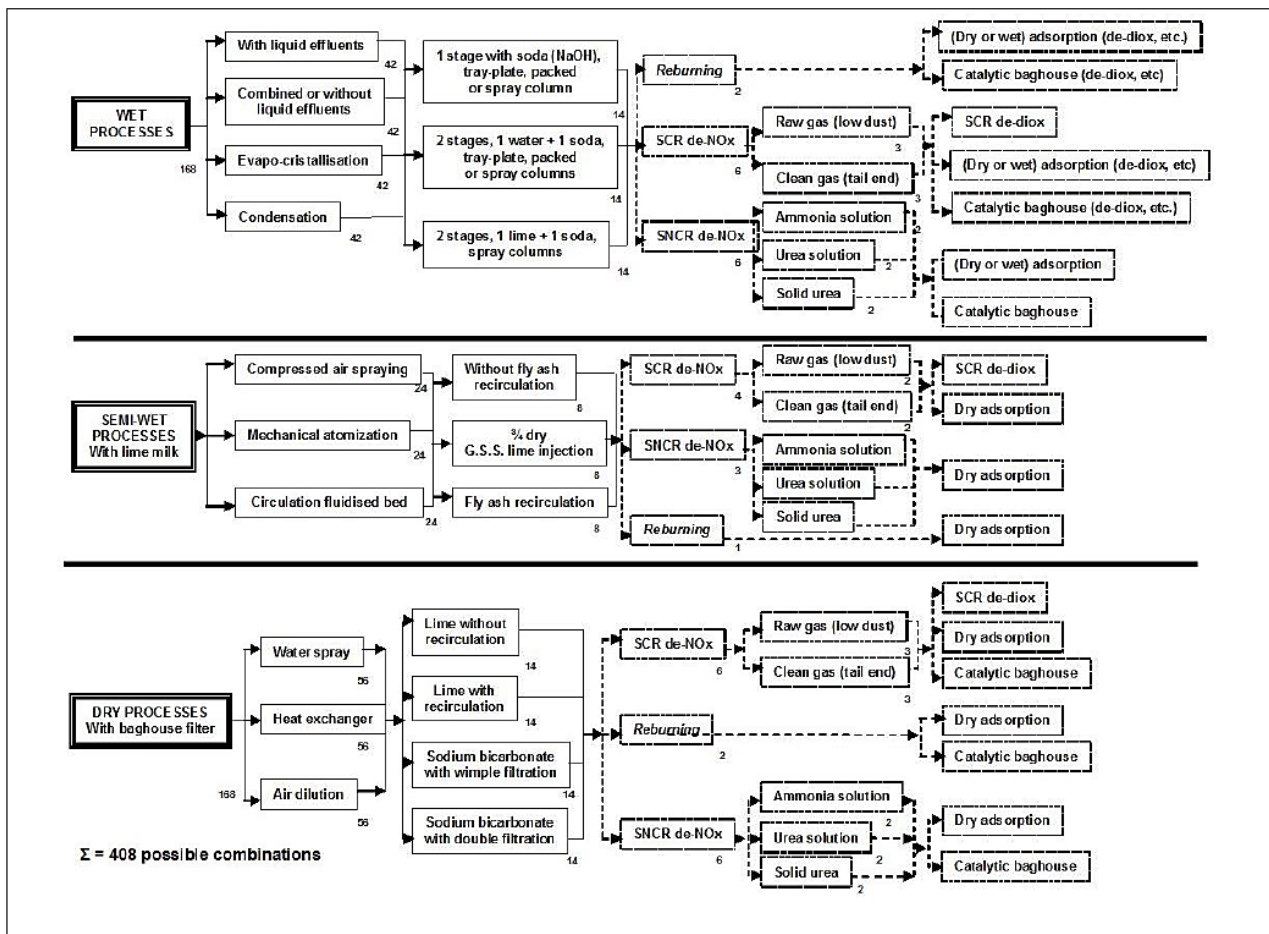


Figura 18. Rappresentazione delle diverse configurazioni possibili per la linea trattamento fumi [12]

A partire dalle informazioni raccolte nel “Rapporto sul recupero energetico da rifiuti in Italia” del 2019 è possibile verificare le configurazioni dei sistemi di depurazione dei fumi più adottate in Italia.

N.	Numero linee	DeNO _x	DeNO _x	Depolverazione	DeNO _x	Rimozione gas acidi	Rimozione gas acidi	DeNO _x
1	12			EP		DA+FF		SCR
2	6	SNCR				SD+FF		
3	5	SNCR				DA+FF	DA+FF	SCR
4	4	SNCR				DA+FF		
5	4	SNCR				DA+FF	WS	
6	4	SNCR		EP		DA+FF		
7	4	SNCR		EP		DA+FF	WS	
8	4	SNCR		CY		DA+FF		
9	3	SNCR		EP	SCR	WS	DA+FF	
10	3	SNCR	SCR			DA+FF		
11	3			O+EP		DA+FF		SCR
12	3					SD+FF	DA+FF	SCR

Legenda: EP = elettrofiltro; FF = filtro a maniche; CY = ciclone; DA = reattore a secco; SD = reattore a semisecco; WS = lavaggio ad umido; SNCR = riduzione selettiva NO_x non catalitica; SCR = riduzione selettiva NO_x catalitica; O= altro, il dettaglio è riportato in tabella A.2.2.
Elaborazione ISPRA

Figura 19. Le configurazioni dei sistemi di depurazione dei fumi più adottate [13]

In particolare, di seguito sono riportate le principali configurazioni adottate:

1) EP+DA+FF+SCR (12 linee)

Rimozione delle polveri con elettrofiltro; trattamento dei gas acidi attraverso assorbimento a secco e abbattimento polveri attraverso filtrazione su filtro a maniche; riduzione selettiva catalitica degli ossidi di azoto

2) SNCR+SD+FF+SCR (6 linee)

Riduzione selettiva non catalitica degli ossidi di azoto sui fumi grezzi; rimozione dei gas acidi attraverso assorbimento a semisecco e abbattimento delle polveri attraverso filtrazione su filtro a maniche

3) SNCR+DA+FF+DA+FF+SCR (5 linee)

Riduzione selettiva non catalitica degli ossidi di azoto sui fumi grezzi; doppia sequenza dei trattamenti di rimozione dei gas acidi attraverso assorbimento a secco e abbattimento delle polveri attraverso filtrazione su filtro a maniche; riduzione selettiva catalitica degli ossidi di azoto

4) SNCR+DA+FF (4 linee)

Riduzione selettiva non catalitica degli ossidi di azoto sui fumi grezzi; rimozione dei gas acidi attraverso assorbimento a secco e abbattimento delle polveri attraverso filtrazione su filtro a maniche

5) SNCR+DA+FF+WS (4 linee)

Riduzione selettiva non catalitica degli ossidi di azoto sui fumi grezzi; rimozione dei gas acidi attraverso assorbimento a secco e abbattimento delle polveri attraverso filtrazione su filtro a maniche; trattamento dei gas acidi attraverso lavaggio a umido

3.2 Formulazione degli indici ideali per Forno/Generatore di vapore

In relazione alla fase di trattamento termico dei rifiuti e generatore di vapore sono stati definiti due indicatori di prestazione ideale:

- Il primo relativo alla prestazione termica ideale globale per Forno/Generatore di vapore;
- Il secondo relativo alla necessità di combustibile aggiuntivo per l'esecuzione del processo Forno/Generatore di vapore.

3.2.1 Indice di prestazione termica ideale globale per Forno/Generatore di vapore

$$I_{GV} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kJ}} \right) = \frac{Q_{comb}}{Q_{rec}} = \frac{Q_{comb}}{Q_{comb} - Q_{fumi}} = \frac{1}{1 - \frac{Q_{fumi}}{Q_{comb}}} = \frac{1}{1 - \frac{m_f c_{p_f} (T_{f,rif,u} - T_o)}{m_{comb} H_i + m_{comb,AUX} H_{i,AUX}}} \quad (28)$$

dove Q_{comb} rappresenta l'energia termica prodotta bruciando i rifiuti e l'eventuale combustibile ausiliario aggiuntivo in kJ, mentre Q_{rec} rappresenta l'energia termica recuperata, Q_{fumi} rappresenta l'energia termica posseduta dai fumi all'uscita dal generatore di vapore, prima della loro depurazione, m_f rappresenta la massa di fumi prodotta, c_{p_f} rappresenta il calore specifico dei fumi $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right)$, $T_{f,rif,u}$ rappresenta la temperatura di uscita minima che i fumi possono avere compatibilmente con i limiti tecnici imposti dalle caratteristiche della linea di trattamento fumi e T_o è la temperatura ambiente.

$$Q_{comb}(\text{kg}) = m_{comb} H_i + m_{comb,AUX} H_{i,AUX} \quad (29)$$

dove m_{comb} e $m_{comb,AUX}$ rappresentano la massa di rifiuti bruciati e la massa dell'eventuale combustibile ausiliario aggiuntivo in kg, mentre H_i e $H_{i,AUX}$ rappresentano il potere calorifico inferiore del combustibile "rifiuto" e quello del combustibile ausiliario $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$.

3.2.2 Indice di prestazione termica ideale per Forno/Generatore di vapore relativo all'aggiunta di combustibile ausiliario in camera di combustione

$$I_{CC,AUX} \left(\frac{kJ}{kg \text{ rifiuto}} \right) = \frac{m_{comb,AUX} H_{i,AUX}}{m_{comb}} = \frac{m_f c_{p_f} (T_{rif,CC} - T_{adf})}{m_{comb}} \quad (30)$$

dove $T_{rif,CC}$ rappresenta la temperatura di riferimento che deve essere raggiunta in camera di combustione, mentre T_{adf} rappresenta la temperatura adiabatica di fiamma relativa ai rifiuti trattati. Di conseguenza, l'indicatore rappresenta il rapporto tra il calore aggiuntivo da dover fornire in camera di combustione per il corretto trattamento dei rifiuti e l'effetto utile prodotto (la massa di rifiuti bruciati).

3.3 Formulazione degli indici ideali per il ciclo termico

3.3.1 Indice di prestazione elettrica ideale

$$I_{CT,el} \left(\frac{kJ}{kJ} \right) = \frac{EE_{prod}}{Q_{rec}} = \eta_{CARNOT} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} \quad (31)$$

dove EE_{prod} rappresenta l'energia elettrica prodotta dal ciclo a vapore che utilizza il calore recuperato dai fumi in kJ. I_{CT} è quindi rappresentato dal rendimento di Carnot del ciclo che evolve tra le due temperature limite T_{max} e T_0 : T_{max} è la temperatura adiabatica di fiamma del combustibile o, qualora fissata per motivazioni tecnologiche legate al trattamento dei fumi, la temperatura da mantenere nella loro combustione, mentre T_{min} è la temperatura del refrigerante del condensatore.

3.3.2 Indice di prestazione termica ideale

L'indicatore di prestazione termica ideale del ciclo termico è definito come il complemento dell'indicatore elettrico.

$$I_{CT,t} \left(\frac{kJ}{kJ} \right) = 1 - \frac{EE_{prod}}{Q_{rec}} = 1 - \eta_{CARNOT} = \frac{T_{min}}{T_{max}} \quad (32)$$

3.4 Formulazione degli indici ideali per il processo di trattamento fumi

3.4.1 Indice di prestazione termica ideale

Durante il trattamento fumi, nella configurazione SCR «Tail-end» è necessario che i fumi siano riscaldati da appositi bruciatori a gas prima dell'ingresso fino ad una temperatura che consenta al catalizzatore di funzionare correttamente.

$$I_{TF,SCR} \left(\frac{kJ}{kg \text{ fumi}} \right) = \frac{m_f c_{p_f} (T_{SCR,rif,i} - T_{FF,rif,u})}{m_f} \quad (33)$$

Dove $T_{SCR,rif,i}$ rappresenta la temperatura che devono raggiungere i fumi per consentire di effettuare correttamente il processo di riduzione selettiva catalitica e $T_{FF,rif,u}$ rappresenta la temperatura dei fumi in uscita dal filtro a maniche (quindi la temperatura massima di riferimento consentita per il loro funzionamento).

3.5 Riepilogo informazioni richieste dal calcolo

Tabella 6. Riepilogo delle informazioni necessarie per il calcolo degli indici di prestazione energetica ideale per il settore dell'incenerimento dei rifiuti

	Informazioni necessarie al calcolo
FORNO / GENERATORE DI VAPORE	<ul style="list-style-type: none"> ❖ m_{comb} = massa di rifiuti bruciati (kg) ❖ $m_{comb,AUX}$ = massa dell'eventuale combustibile ausiliario aggiuntivo (kg) ❖ m_f = massa di fumi prodotta (kg) ❖ c_{p_f} = calore specifico dei fumi $\left(\frac{kJ}{kg K}\right)$ ❖ $T_{f,rif,u}$ = temperatura di uscita minima che i fumi possono avere compatibilmente con i limiti tecnici imposti dalle caratteristiche della linea di trattamento fumi (°C) ❖ T_0 = temperatura ambiente (°C) ❖ H_i = potere calorifico inferiore del combustibile "rifiuto" $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$ ❖ $H_{i,AUX}$ = potere calorifico inferiore del combustibile ausiliario $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$ ❖ $T_{rif,CC}$ rappresenta la temperatura di riferimento da raggiungere in camera di combustione per il corretto processo (°C) ❖ T_{adf} rappresenta la temperatura adiabatica di fiamma relativa ai rifiuti (°C)
CICLO TERMICO	<ul style="list-style-type: none"> ❖ T_{max} = temperatura adiabatica di fiamma del combustibile o, qualora fissata per motivazioni tecnologiche legate al trattamento dei fumi, temperatura da mantenere nella loro combustione (°C) ❖ T_{min} = temperatura del refrigerante del condensatore (°C)
TRATTAMENTO FUMI	<ul style="list-style-type: none"> ❖ $T_{SCR,rif,i}$ = temperatura che devono raggiungere i fumi per consentire di effettuare correttamente il processo di riduzione selettiva catalitica (°C) ❖ $T_{FF,rif,u}$ = temperatura dei fumi in uscita dal filtro a maniche (quindi la temperatura massima di riferimento consentita per il loro utilizzo) (°C)

3.6 Interventi di riduzione dei consumi sulla base degli indici di consumo ideale

Gli indici di prestazione ideali ricavati in questo capitolo hanno permesso di identificare le principali linee d'azione per la riduzione dei consumi energetici nel settore dell'incenerimento dei rifiuti:

- *Riduzione al minimo tecnico della temperatura di uscita dei fumi di scarico dall'impianto* al fine di ridurre le perdite per calore sensibile al camino. Tale riduzione dovrà essere naturalmente compatibile con eventuali limiti tecnici legati sia a successive sezioni d'impianto (e.g. linee di trattamento fumi) che limitazioni legislative riguardanti la temperatura di emissione dei fumi in atmosfera.
- *Riduzione al minimo tecnico dell'eccesso d'aria*, al fine di ridurre le perdite per calore sensibile al camino.
- *Aumento della temperatura dei fumi in uscita dal filtro a maniche* al fine di ridurre la differenza di temperatura da fornitore ulteriormente ai fumi per consentire di effettuare correttamente il processo di riduzione selettiva catalitica. Tale aumento dovrà essere naturalmente compatibile con le specifiche tecniche del filtro stesso.

Si sottolinea che tali interventi sono stati indentificati sulla base di indicatori di prestazione ideali. Pertanto, le azioni di miglioramento identificate riguardano solamente i parametri che compaiono nella trasformazione ideale.

Al fine di completare l'analisi degli indicatori di riferimento ideali definiti sono stati studiati alcuni interventi identificati dal gruppo di lavoro dell'Università di Firenze come tra i più rappresentativi per questo settore.

Tra gli interventi più rappresentativi in relazione alla produzione principi attivi:

- Sostituzione dei motori elettrici con motori elettrici più efficienti [8];
- Installazione di un impianto fotovoltaico (intervento identificato dallo studio delle diagnosi energetiche);
- Installazione di inverter sui motori elettrici [14].

Ognuno degli interventi segnalati dall'Università di Firenze viene quindi analizzato in relazione al suo impatto sull'indicatore di prestazione energetica ideale definito in precedenza (Tabella 7, Tabella 8, Tabella 9).

Tabella 7. Descrizione dell'impatto sugli indici di prestazione energetica ideale per Forno/Generatore di vapore degli interventi più rappresentativi identificati

Interventi più rappresentativi		Impatto sugli indici di prestazione energetica ideale per il Forno/Generatore di vapore
1)	Sostituzione dei motori elettrici con motori elettrici più efficienti	Questa tipologia di intervento non riguarda la prestazione energetica del forno/generatore di vapore, quindi, non ha nessun impatto sull'indice di prestazione termica ideale I_{GV} , né sull'indice di prestazione termica ideale $I_{CC,AVX}$ relativo all'aggiunta ausiliaria di combustibile.
2)	Installazione di un impianto fotovoltaico	Questa tipologia di intervento non riguarda la prestazione energetica del forno/generatore di vapore, quindi, non ha nessun impatto sull'indice di prestazione termica ideale I_{GV} , né sull'indice di prestazione termica ideale $I_{CC,AVX}$ relativo all'aggiunta ausiliaria di combustibile.

3)	Installazione di inverter sui motori elettrici	Questa tipologia di intervento non riguarda la prestazione energetica del forno/generatore di vapore, quindi, non ha nessun impatto sull'indice di prestazione termica ideale J_{GV} , né sull'indice di prestazione termica ideale $J_{CC,AVX}$ relativo all'aggiunta ausiliaria di combustibile.
----	---	--

Tabella 8. Descrizione dell'impatto sugli indici di prestazione energetica ideale per Ciclo termico degli interventi più rappresentativi identificati

Interventi più rappresentativi		Impatto sugli indici di prestazione energetica ideale per il Ciclo termico
1)	Sostituzione dei motori elettrici con motori elettrici più efficienti	<p>Questa tipologia di intervento non riguarda la prestazione energetica del ciclo termico, quindi, non ha nessun impatto sull'indice di prestazione elettrica ideale $J_{CT,el}$ né sull'indice di prestazione termica ideale $J_{CT,t}$.</p> <p>La riduzione di energia elettrica prodotta da questa tipologia di intervento non provoca variazione degli indicatori ideali del ciclo termico che sono esclusivamente funzione delle temperature T_{max} (temperatura adiabatica di fiamma del combustibile o, qualora fissata per motivazioni tecnologiche legate al trattamento dei fumi, alla temperatura da mantenere nella loro combustione) e T_{min} (temperatura del refrigerante del condensatore).</p>
2)	Installazione di un impianto fotovoltaico	Questa tipologia di intervento non riguarda la prestazione energetica del ciclo termico, quindi, non ha nessun impatto sull'indice di prestazione elettrica ideale $J_{CT,el}$ né sull'indice di prestazione termica ideale $J_{CT,t}$.
3)	Installazione di inverter sui motori elettrici	<p>Questa tipologia di intervento non riguarda la prestazione energetica del ciclo termico, quindi, non ha nessun impatto sull'indice di prestazione elettrica ideale $J_{CT,el}$ né sull'indice di prestazione termica ideale $J_{CT,t}$.</p> <p>La riduzione di energia elettrica prodotta da questa tipologia di intervento non provoca variazione degli indicatori ideali del ciclo termico che sono esclusivamente funzione delle temperature T_{max} (temperatura adiabatica di fiamma del combustibile o, qualora fissata per motivazioni tecnologiche legate al trattamento dei fumi, alla temperatura da mantenere nella loro combustione) e T_{min} (temperatura del refrigerante del condensatore).</p>

Tabella 9. Descrizione dell’impatto sugli indici di prestazione energetica ideale per trattamento fumi degli interventi più rappresentativi identificati

Interventi più rappresentativi		Impatto sull’indice di prestazione energetica ideale per il Trattamento fumi
1)	Sostituzione dei motori elettrici con motori elettrici più efficienti	Questa tipologia di intervento non ha nessun impatto sull’indice di prestazione termica ideale $I_{TF,SCR}$, che riguarda esclusivamente la richiesta termica necessaria per portare i fumi ad una temperatura che consenta il corretto funzionamento del SCR.
2)	Installazione di un impianto fotovoltaico	Questa tipologia di intervento non riguarda la prestazione energetica del trattamento fumi, quindi, non ha nessun impatto sull’indice di prestazione termica ideale $I_{TF,SCR}$.
3)	Installazione di inverter sui motori elettrici	Questa tipologia di intervento non ha nessun impatto sull’indice di prestazione termica ideale $I_{TF,SCR}$, che riguarda esclusivamente la richiesta termica necessaria per portare i fumi ad una temperatura che consenta il corretto funzionamento del SCR.

3.7 Conclusioni del capitolo

In questo capitolo sono stati formulati degli indicatori di riferimento ideale per la prestazione energetica nel settore del trattamento dei rifiuti.

In particolare, dopo una analisi globale del settore, la concentrazione del gruppo di ricerca si è focalizzata sull'analisi dei tre processi ritenuti più significativi per il settore specifico. La definizione di tali processi è avvenuta in risultanza delle analisi condotte dall'Università di Salerno e ai riscontri avuti dai colloqui intercorsi con l'associazione di categoria **Utilitalia**.

I tre processi analizzati sono stati:

- Forno/generatore di vapore;
- Ciclo termico;
- Trattamento fumi.

È stata quindi condotta un'analisi della letteratura scientifica finalizzata all'identificazione delle caratteristiche più importanti in termini di parametri di influenza e vettori energetici utilizzati e all'indagine delle caratteristiche fisiche, termodinamiche e chimiche del processo.

Da questo lavoro sono poi state definite delle formulazioni per gli indicatori di prestazione energetica ideale per il settore:

- Indicatore ideale termico globale per forno/generatore di vapore;
- Indicatore ideale termico globale per forno/generatore di vapore relativo all'aggiunta di combustibile ausiliario in camera di combustione;
- Indicatore ideale elettrico per il ciclo termico;
- Indicatore ideale termico per il ciclo termico;
- Indicatore ideale termico per il trattamento fumi.

Le analisi condotte e le conseguenti formulazioni definite dal gruppo di lavoro per gli indicatori di prestazione sono state poi condivise con l'associazione di categoria **Utilitalia** per averne validazione.

Infine, i modelli sono stati utilizzati per valutare l'impatto dei più significativi interventi di efficientamento. In particolare sono stati discriminati gli interventi sulla base del loro effetto o meno sugli indici di prestazione idele.

4 Formulazioni di indici di riferimento per il settore delle fonderie

4.1 Descrizione del settore analizzato

Una prima grande suddivisione nel settore delle fonderie è eseguita in base al tipo di lega metallica elaborata (ferrosa o non ferrosa).

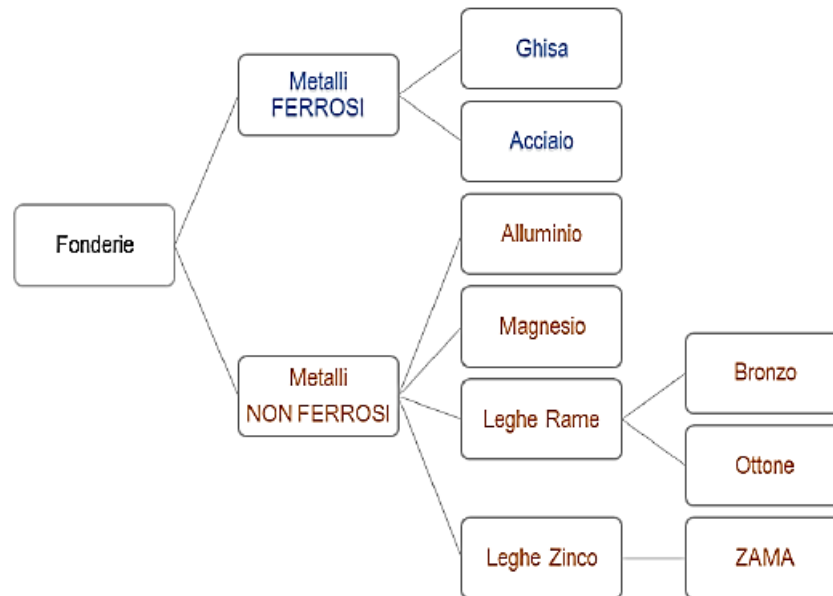


Figura 20. Specializzazione del settore della fonderia per tipo di leghe prodotte [15]

Nel progetto è stato deciso, d'accordo con ENEA e con il suggerimento dell'associazione di categoria ASSOFOND, di concentrare l'attenzione sui sottosettori relativi ai seguenti tre metalli:

- Ghisa;
- Acciaio;
- Alluminio.

Il processo di fonderia può essere scomposto in quattro sotto processi:

- fusione;
- formatura;
- colata;
- processo di finitura.

In accordo con ENEA ed in base alla sua importanza primaria, come segnalato anche dalla associazione di categoria Assofond, è stato deciso di focalizzare l'attenzione sul processo di fusione.

4.2 Descrizione del processo di fusione

La fusione avviene in appositi forni fusori che devono fornire alla carica la quantità di calore necessaria per fonderlo e surriscaldarlo allo scopo di renderlo sufficientemente fluido e scorrevole nella forma.

Tipologie di forni fusori principali:

- Cubilotto;
- Forni elettrici (ad arco elettrico diretto, ad induzione, a resistenza);
- Forno rotativo;

- Forni a crogiolo;
- Forno a bacino;
- Forno a tino.

Nella tabella successiva sono riportati i valori di riferimento provenienti dalle BREF e ripresi da ASSOFOND per le diverse prestazioni energetiche delle tecnologie appena citate.

Area Funzionale (Livello D)	Tipo di metallo	Macchina	Vettore energetico	IPE Specifico	Valore di Riferimento	Fonte	
Fusione di metalli FERROSI (Ghisa ed acciaio)	Acciaio	Forno elettrico ad arco	Energia elettrica	<u>Energia Elettrica (kWh)</u> Ton metallo fuso (ton)	500 – 700 kWh/ton	Rif. Foundry BREF 2005 Par. 3.2.1 "Properties of melting furnaces for steel and cast iron"	
	Ghisa/ Acciaio	Forno fusorio elettrico ad induzione	Energia elettrica	<u>Energia Elettrica (kWh)</u> Ton metallo fuso (ton)	520 – 800 kWh/ton		
	Ghisa	Forno fusorio rotativo	Ossigeno/Gas naturale		<u>Energia termica (kWh)</u> Ton metallo fuso (ton)		600 – 800 kWh/ton
		Forno cubilotto a vento freddo	Coke		<u>Consumo di Coke (kg)</u> Ton metallo fuso (ton)		90 – 120 ⁶ kg/ton
					<u>Energia termica (kWh)</u> Ton metallo fuso (ton)		950 – 1.200 kWh/ton
		Forno cubilotto a vento caldo	Coke		<u>Consumo di Coke (kg)</u> Ton metallo fuso (ton)		110 – 145 ⁶ ⁷ kg/ton
					<u>Energia termica (kWh)</u> Ton metallo fuso (ton)		800 – 900 kWh/ton
Forno cubilotto a vento caldo a lunga campagna	Coke		<u>Energia termica (kWh)</u> Ton metallo fuso (ton)	810 – 1.100 kWh/ton			
Fusione di metalli NON FERROSI (Alluminio)	Alluminio	Forno rotativo (Rotary furnace)	Gas Naturale	<u>Energia termica (kWh)</u> Ton metallo fuso (ton)	600 – 1.250 kWh/ton	Rif. Foundry BREF 2005 Par. 3.3.1 "Survey of melting furnaces for aluminium"	
		Forno a bacino (Hearth type furnace)	Gas Naturale	<u>Energia termica (kWh)</u> Ton metallo fuso (ton)	975 – 1.150 kWh/ton		
		Forno a tino (Forno tipo Shaft)	Gas Naturale	<u>Energia termica (kWh)</u> Ton metallo fuso (ton)	580 – 900 kWh/ton		
		Forno a crogiolo ad induzione	Energia elettrica	<u>Energia Elettrica (kWh)</u> Ton metallo fuso (ton)	475 - 640 kWh/ton		
		Forno a crogiolo a gas	Gas Naturale	<u>Energia termica (kWh)</u> Ton metallo fuso (ton)	900 – 1.200 kWh/ton		
		Forno a crogiolo a resistenza	Energia elettrica	<u>Energia Elettrica (kWh)</u> Ton metallo fuso (ton)	470 – 750 kWh/ton		

Figura 21. Valori di riferimento per indicatori di prestazione energetica in base alla tecnologia di forno utilizzato [16]

4.2.1 Forno a cubilotto

Questo forno è utilizzato per la fusione della ghisa.

Possono essere suddivisi in forni di tipo a «vento freddo» oppure a «vento caldo» dove per «vento» si fa riferimento all'aria comburente che immessa che può essere a temperatura ambiente o preriscaldata.

Se preriscaldata il calore può derivare dai gas provenienti dal cubilotto stesso che vengono recuperati a valle.

Si tratta di una macchina metallurgica: al suo interno si distinguono zone a temperatura diversa caratterizzate di conseguenza da reazioni chimiche differenti (Figura 22).

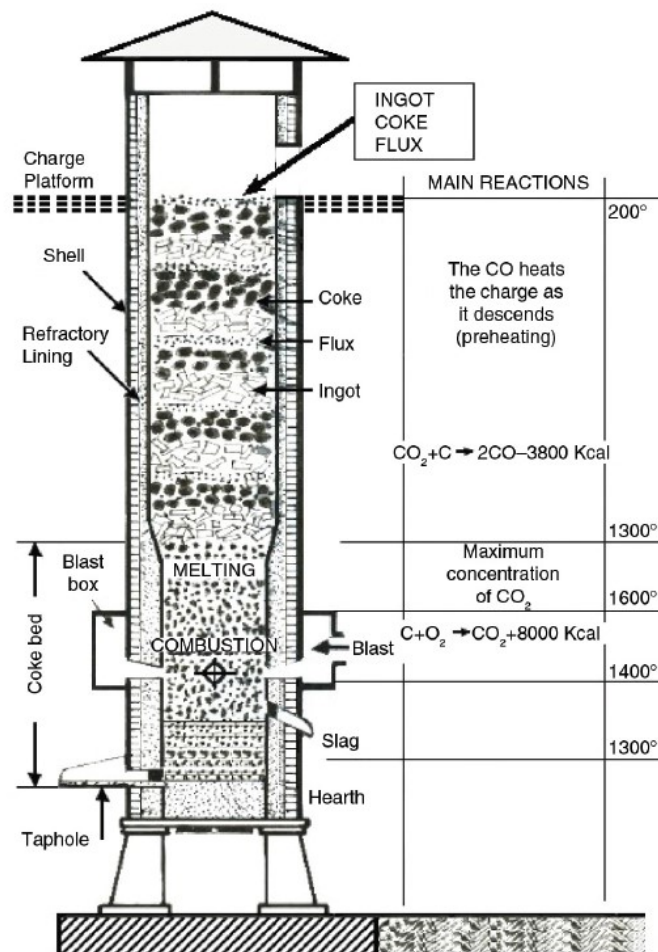


Figura 22. Rappresentazione schematica di un forno a cubilotto [17]

4.2.2 Forni elettrici

Questa tipologia di forni è caratterizzata dal raggiungimento di alte temperature e dalla assenza di reazione di combustione.

Si possono dividere in diverse tipologie, tra cui le seguenti:

- **FORNI AD ARCO ELETTRICO DIRETTO** - La sorgente di calore è l'arco elettrico che scocca tra gli elettrodi e la carica metallica (Figura 23).

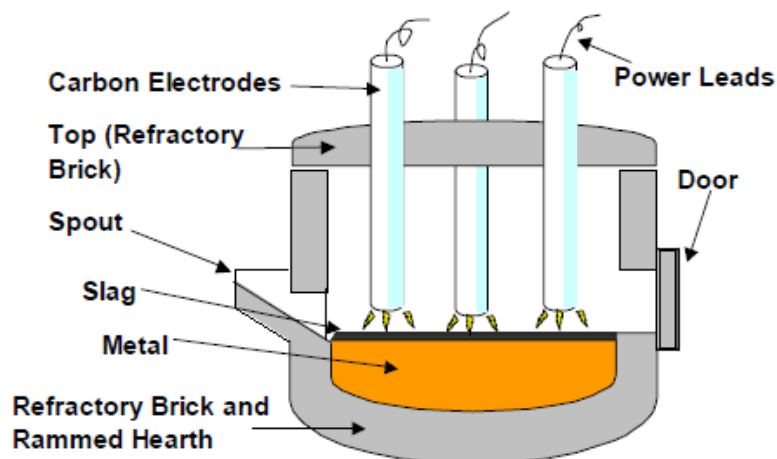


Figura 23. Rappresentazione forno ad arco elettrico [18]

- FORNO AD INDUZIONE - La fusione avviene per effetto Joule e si dividono in due categorie: con nucleo magnetico o senza nucleo magnetico (Figura 24).

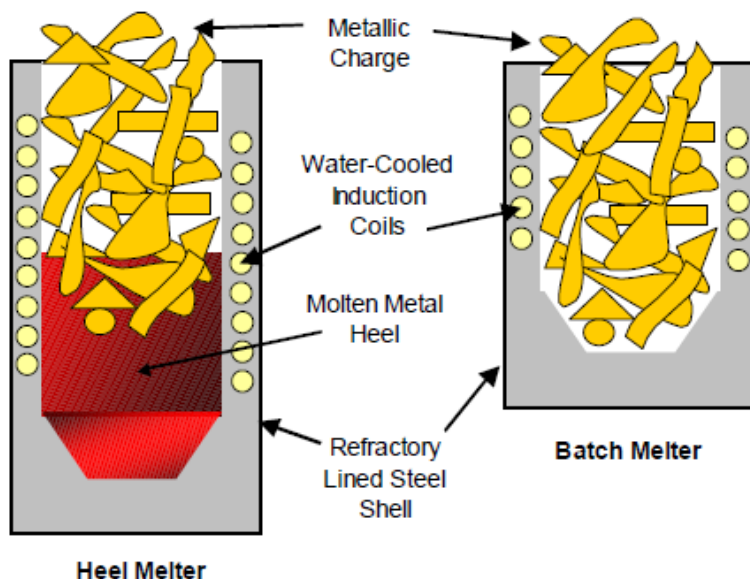


Figura 24. Rappresentazione forni a induzione [16]

- FORNI A RESISTENZA ELETTRICA – il crogiolo è circondato da resistenze elettriche, provocando la fusione del metallo per irraggiamento.

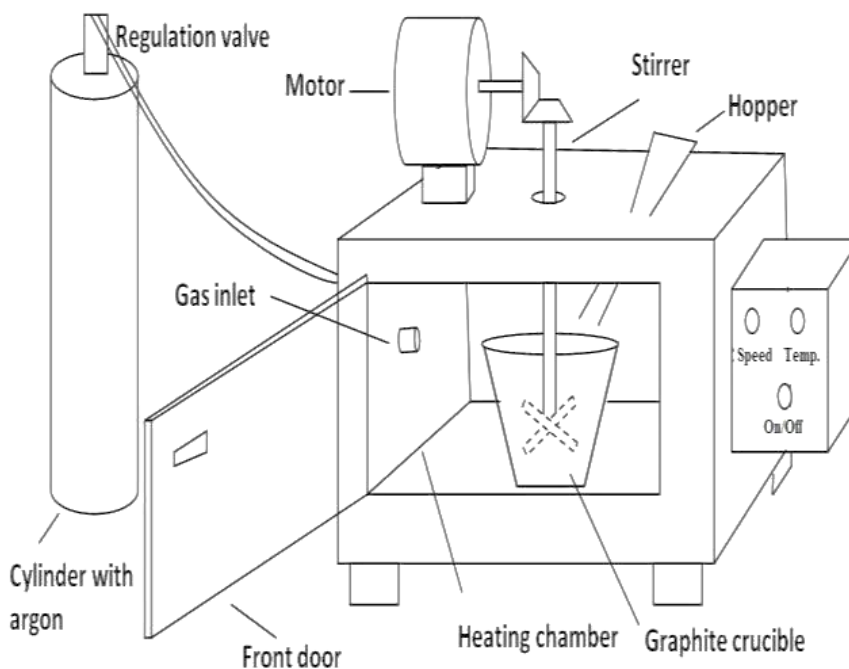


Figura 25. Rappresentazione forno a resistenza [19]

4.2.3 Rappresentazione del processo

In questo processo le materie prime metalliche vengono introdotte all'interno del forno fusorio al fine di riscaldarle per portarle a fusione.

In Figura 26 è raffigurata una rappresentazione schematica dei flussi di materiali in entrata ed uscita dal processo di fusione.

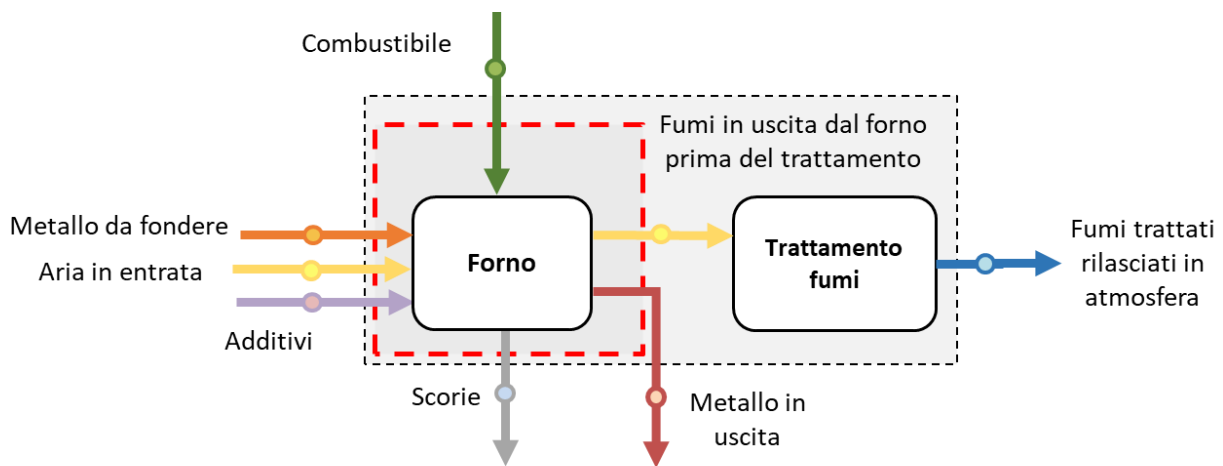


Figura 26. Rappresentazione schematica dei flussi materiali in entrata ed uscita dal processo di fusione

Andando a definire come volume di controllo dell'analisi come comprensivo del solo forno fusorio, escludendo la linea trattamento fumi (in Figura 26, delineato con linea tratteggiata rossa), possono essere evidenziati gli input:

- Metallo da fondere;
- Aria in ingresso;
- Additivi;
- Combustibile (se presente reazione di combustione).

Possono essere evidenziati anche gli output:

- Metallo fuso in uscita;
- Fumi in uscita dal forno;
- Scorie.

Andando, invece, a definire un volume di controllo dell'analisi come comprensivo anche della linea trattamento fumi (in Figura 26, delineato con linea tratteggiata grigia), gli input restano i medesimi, mentre gli output sono:

- Metallo fuso in uscita;
- Fumi trattati rilasciati in atmosfera;
- Scorie.

4.3 Formulazione degli indici ideali per il processo di fusione

4.3.1 Indice di prestazione termica ideale

La definizione della formulazione dell'indicatore ideale, riportata in Equazione (34) è stata condotta basandosi sulle seguenti ipotesi:

- nella rappresentazione ideale non si considerano perdite dovute a inefficienze;
- nella rappresentazione ideale il calore in perdite dovute a inefficienze;
- nella rappresentazione ideale non è considerata la presenza di eccesso d'aria.

$$I_{fusione,comb} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg metallo}} \right) = C_{ch} + C_{lat_{misc}} + C_{S_{scorie,u}} + C_{S_{met,u}} + C_{S_{gas,u}} - C_{S_{a,in}} \quad (34)$$

Di seguito vengono scomposti i termini presenti nell'Equazione (34).

- C_{ch} rappresenta il calore teorico necessario alla reazione chimica del metallo considerato.

Considerando quanto definito precedentemente sulla scelta dei sottosettori soggetto dello studio ci si concentra sui seguenti metalli:

- Ghisa
- Acciaio
- Alluminio

- $C_{lat_{misc}}$ rappresenta il calore latente posseduto dalla miscela del metallo considerato.
- C_{S_a} rappresenta il calore dell'aria in ingresso al forno (kJ/kg di metallo) e può essere calcolato come espresso nell'Equazione (35).

$$C_{S_a} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg metallo}} \right) = m_{aria,in} C_{p_{aria,in}} (T_{aria,in} - T_0) \quad (35)$$

Dove $m_{aria,in}$ rappresenta il rapporto tra l'aria minima possibile in ingresso in base alle caratteristiche del processo e metallo prodotto dal processo.

La sua temperatura ($T_{aria,in}$) è pari alla temperatura ambiente, il suo contributo energetico è quindi nullo. $C_{p_{aria,in}}$ rappresenta il calore specifico dell'aria all'ingresso del forno $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \right)$.

Si nota che l'eventuale trasferimento di calore dal flusso di gas caldi in uscita all'aria in ingresso avverrebbe comunque all'interno del volume di controllo considerato nell'analisi.

- $C_{S_{met,u}}$ rappresenta il calore sensibile del metallo in uscita dal forno (kJ/kg di metallo) e può essere calcolato tramite l'Equazione (36):

$$C_{S_{met,u}} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg metallo}} \right) = C_{p_{met,u}} \cdot (T_{met,u} - T_0) \quad (36)$$

Dove $m_{met,u}$ è pari a 1 dal momento che l'indicatore di prestazione è riferito all'unità di metallo prodotto.

La sua temperatura ($T_{met,u}$) è pari alla temperatura di uscita minima possibile che il metallo fuso può avere conservando le caratteristiche di fluidità necessarie al processo successivo. $C_{p_{met,u}}$ rappresenta il calore specifico del metallo fuso all'uscita dal forno $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \right)$.

- $C_{S_{scorie,u}}$ rappresenta il calore sensibile delle scorie in uscita dal forno (kJ/kg di metallo) e può essere calcolato tramite l'Equazione (37)

$$C_{S_{scorie,u}} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg metallo}} \right) = m_{scorie,u} C_{p_{scorie,u}} (T_{scorie,u} - T_0) \quad (37)$$

Dove $m_{scorie,u}$ rappresenta il rapporto tra scorie e metallo prodotto dal processo.

La sua temperatura ($T_{scorie,u}$) è pari alla temperatura $T_{met,u}$. $C_{p_{scorie,u}}$ rappresenta il calore specifico delle scorie all'uscita dal forno $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \right)$.

- C_{gas_u} rappresenta il calore sensibile dei gas in uscita dal forno per entrare nella linea trattamento fumi (kJ/kg di metallo) e può essere calcolato tramite l'Equazione (38):

$$C_{gas_u} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg metallo}} \right) = m_{ex,gas} C_{p_{ex,gas}} (T_{out,g} - T_0) \quad (38)$$

Dove, $T_{out,g}$ rappresenta la temperatura minima teorica dei gas in uscita nel rispetto dei limiti tecnologici e legislativi e dipende dalla scelta del volume di controllo dell'analisi:

- Qualora il volume di controllo comprenda solo il forno senza considerare la linea trattamento fumi $T_{out,g}$ sarà pari alla temperatura minima possibile dei fumi in uscita dal forno prima del trattamento;
- Qualora il volume di controllo comprenda anche la linea trattamento fumi $T_{out,g}$ sarà pari alla temperatura minima possibile di rilascio dei fumi in atmosfera.

$C_{p_{ex,gas}}$ rappresenta il calore specifico dei gas in uscita dal forno $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \right)$, mentre $m_{ex,gas}$ rappresenta il rapporto tra la quantità di gas in uscita e il metallo prodotto.

4.4 Riepilogo informazioni richieste dal calcolo

Tabella 10. Riepilogo delle informazioni necessarie per il calcolo degli indici di prestazione energetica ideale per il settore delle fonderie

	Informazioni necessarie al calcolo
FORNO	<ul style="list-style-type: none"> ❖ C_{chim} = calore necessario alla reazione chimica, funzione della materia prima e del metallo fuso $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$ ❖ $Clat_{miscela}$ = calore latente posseduto dalla miscela, funzione della materia prima $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$ ❖ m_{scorie} = rapporto tra le scorie in uscita e metallo prodotto dal processo $\left(\frac{\text{kg scorie}}{\text{kg metallo fuso}}\right)$ ❖ Cp_{scorie} = calore specifico del metallo fuso all'uscita dal forno $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right)$ ❖ T_{scorie} = temperatura di uscita minima delle scorie (pari a $T_{met,u}$) (°C) ❖ T_0 = temperatura ambiente (°C) ❖ $m_{aria,in}$ = rapporto tra l'aria minima possibile in ingresso, funzione delle caratteristiche del processo, della materia prima in ingresso e del metallo prodotto $\left(\frac{\text{kg aria}}{\text{kg metallo fuso}}\right)$ ❖ $Cp_{aria,in}$ = calore specifico dell'aria in ingresso al forno $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right)$ ❖ $T_{aria,in}$ = temperatura di ingresso dell'aria (°C) (se pari alla temperatura ambiente, il suo contributo energetico è nullo) ❖ $Cp_{met,u}$ = calore specifico del metallo fuso in uscita dal forno $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right)$ ❖ $T_{met,u}$ = temperatura di uscita minima possibile che il metallo fuso può avere conservando le caratteristiche di fluidità necessarie al processo successivo (°C) ❖ $m_{ex,gas}$ = il rapporto tra la quantità di gas in uscita e il metallo prodotto $\left(\frac{\text{kg gas in uscita}}{\text{kg metallo fuso}}\right)$ ❖ $Cp_{ex,gas}$ = calore specifico dei gas in uscita dal forno $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right)$ ❖ $T_{out,g}$ = temperatura minima teorica dei gas in uscita nel rispetto dei limiti tecnologici e legislativi (°C)

4.5 *Interventi di riduzione dei consumi sulla base degli indici di consumo ideale*

Gli indici di prestazione ideali ricavati in questo capitolo hanno permesso di identificare le principali linee d'azione per la riduzione dei consumi energetici nel settore delle fonderie:

- *Aumento della temperatura dell'aria in ingresso al forno* al fine di ridurre la quantità di energia termica necessaria alla fusione.
- *Riduzione al minimo tecnico della temperatura di uscita dei fumi di scarico dall'impianto* al fine di ridurre le perdite per calore sensibile al camino. Tale riduzione dovrà essere naturalmente compatibile con eventuali limiti tecnici legati sia a successive sezioni d'impianto (e.g. linee di trattamento fumi) che limitazioni legislative riguardanti la temperatura di emissione dei fumi in atmosfera.
- *Riduzione al minimo tecnico dell'eccesso d'aria*, al fine di ridurre le perdite per calore sensibile al camino. Tale riduzione dovrà essere naturalmente compatibile con eventuali limiti tecnici, in special modo per quanto concerne il caso dell'utilizzo di forno di tipologia "cubilotto", in cui l'aria rappresenta un input essenziale per il corretto procedimento del processo metallurgico.

Si sottolinea che tali interventi sono stati indentificati sulla base di indicatori di prestazione ideali. Pertanto, le azioni di miglioramento identificate riguardano solamente i parametri che compaiono nella trasformazione ideale.

Al fine di completare l'analisi degli indicatori di riferimento ideali definiti sono stati studiati alcuni interventi identificati dal gruppo di lavoro dell'Università di Firenze come tra i più rappresentativi per questo settore.

Tra gli interventi più rappresentativi in quanto maggiormente proposti si annoverano i seguenti:

- Sostituzione vecchio forno fusorio con nuovo [20]
- Recupero di calore dal processo di compressione dell'aria (intervento identificato dallo studio delle diagnosi energetiche)
- Installazione di cogenerazione (o tri-generazione) per il recupero di calore [21]

Tra gli interventi maggiormente proposti per i servizi ausiliari si annoverano:

- Ottimizzazione nel design dei condotti per minimizzare le perdite di aria compressa e installazione di guarnizioni e sigilli per il contenimento delle perdite rilevate o sostituzione dei tratti di condotto danneggiati (leak management) [22]
- Utilizzo di motori elettrici ad alta efficienza IE2 IE3 IE4 [23], [24]
- Sostituzione di inverter con nuovi e più efficienti o installazione di nuovi se non presenti [25]

Ognuno degli interventi segnalati dall'Università di Firenze viene quindi analizzato in relazione al suo impatto sull'indicatore di prestazione energetica ideale definito in precedenza (Tabella 11).

Tabella 11. Descrizione dell’impatto sugli indici di prestazione energetica ideale per il processo di fusione degli interventi più rappresentativi identificati

Interventi più rappresentativi	Impatto sull’indice di prestazione energetica ideale per il processo di fusione
<p>1) Sostituzione vecchio forno fusorio con nuovo</p>	<p>Questa tipologia di intervento consiste nella sostituzione del forno fusorio con un sistema differente a efficienza superiore.</p> <p>In particolare, alcune moderne modifiche apportate per ottenere livelli di efficienza energetica superiori riguardano il preriscaldamento della carica o dell’aria in ingresso attraverso soluzioni tecnologiche quali il recupero energetico dalle scorie.</p> <p>Questa tipologia di intervento può quindi andare a provocare una variazione di alcuni dei termini presenti nella formulazione dell’indicatore di prestazione termica ideale $I_{fusione,comb}$</p> $I_{fusione,comb} = C_{ch} + C_{lat,misc} + C_{s_{scorie,u}} + C_{s_{met,u}} + C_{s_{gas,u}} - C_{s_{a,in}}$ <p>In particolare, andando a ridurre il valore di $C_{s_{scorie,u}}$ e/o di $C_{s_{gas,u}}$, si diminuisce il valore di $I_{fusione,comb}$</p> <p>Di contro, andando ad aumentare la temperatura di ingresso dell’aria (e quindi $C_{s_{a,in}}$) e/o andando ad aumentare la temperatura della carica, si diminuisce il valore di $I_{fusione,comb}$</p>
<p>2) Recupero di calore dal processo di compressione dell’aria (intervento identificato dallo studio delle diagnosi energetiche)</p>	<p>Questa tipologia di intervento non riguarda la prestazione energetica del forno fusorio, quindi, non ha impatto sull’indicatore di prestazione energetica ideale $I_{fusione,comb}$</p>
<p>3) Installazione di cogenerazione (o tri-generazione) per il recupero di calore</p>	<p>Questa tipologia di intervento consiste nell’introduzione di un sistema di cogenerazione che sfrutti il calore disponibile a valle del processo di fusione o, al contrario, che fornisca calore per riscaldare l’ingresso della carica nel forno o per preriscaldare l’aria comburente del forno fusorio.</p> <p>Questa tipologia di intervento può quindi andare a provocare una variazione di alcuni dei termini presenti nella formulazione dell’indicatore di prestazione termica ideale $I_{fusione,comb}$</p> $I_{fusione,comb} = C_{ch} + C_{lat,misc} + C_{s_{scorie,u}} + C_{s_{met,u}} + C_{s_{gas,u}} - C_{s_{a,in}}$ <p>In particolare, andando a ridurre il valore di $C_{s_{gas,u}}$, si diminuisce il valore di $I_{fusione,comb}$</p> <p>Di contro, andando ad aumentare la temperatura di ingresso dell’aria (e quindi $C_{s_{a,in}}$) e/o andando ad aumentare la temperatura della carica, si diminuisce il valore di $I_{fusione,comb}$</p>

4)	<i>Ottimizzazione nel design dei condotti per minimizzare le perdite di aria compressa e installazione di guarnizioni e sigilli per il contenimento delle perdite rilevate o sostituzione dei tratti di condotto danneggiati (leak management)</i>	Questa tipologia di intervento non riguarda la prestazione energetica del forno fusorio, quindi, non ha impatto sull'indicatore di prestazione energetica ideale $J_{fusione,comb}$
5)	<i>Utilizzo di motori elettrici ad alta efficienza IE2 IE3 IE4</i>	
6)	<i>Sostituzione di inverter con nuovi e più efficienti o installazione di nuovi se non presenti</i>	Questa tipologia di intervento non riguarda la prestazione energetica del forno fusorio, quindi, non ha impatto sull'indicatore di prestazione energetica ideale $J_{fusione,comb}$

4.6 Conclusioni del capitolo

In questo capitolo è stato formulato un indicatore di riferimento ideale per la prestazione energetica nel settore del trattamento dei rifiuti.

In particolare, dopo una analisi globale del settore, la concentrazione del gruppo di ricerca si è focalizzata sull'analisi del processo di fusione, ritenuto il più significativo per il settore specifico. La definizione di tale processo è avvenuta in risultanza delle analisi condotte dall'Università di Salerno e ai riscontri avuti dai colloqui intercorsi con l'associazione di categoria **Assofond**.

È stata quindi condotta un'analisi della letteratura scientifica finalizzata all'identificazione delle caratteristiche più importanti in termini di parametri di influenza e vettori energetici utilizzati e all'indagine delle caratteristiche fisiche, termodinamiche e chimiche del processo.

Da questo lavoro è stata poi definita la formulazione per l'indicatore di prestazione energetica ideale per il settore: indicatore ideale termico per il processo di fusione.

Le analisi condotte e le conseguenti formulazioni definite dal gruppo di lavoro per l'indicatore di prestazione sono state poi condivise con l'associazione di categoria **Assofond** per averne validazione.

Infine, i modelli sono stati utilizzati per valutare l'impatto dei più significativi interventi di efficientamento. In particolare sono stati discriminati gli interventi sulla base del loro effetto o meno sugli indici di prestazione ideale.

5 Conclusioni

Nel corso della terza annualità del progetto la metodologia generale definita e proposta durante il 2019 è stata poi declinata nel dettaglio per alcuni settori industriali specifici definiti in collaborazione con ENEA: il settore farmaceutico, il settore dell'incenerimento dei rifiuti e il settore delle fonderie.

Il gruppo di ricerca si è infatti concentrato sullo studio del processo produttivo dei tre settori, analizzando le fasi principali del processo produttivo e le caratteristiche più importanti in termini di parametri di influenza e vettori energetici utilizzati e studiandone le caratteristiche fisiche, termodinamiche e chimiche.

È stata poi avviata un'analisi della letteratura tecnico-scientifica a supporto della definizione di indicatori di prestazione energetica di riferimento ideale per le principali fasi o usi energetici ritenuti più significative, selezionate in concordanza con le analisi condotte dall'Università di Salerno.

In particolare, per il settore farmaceutico sono stati analizzati i sistemi ausiliari, utilizzatori di primaria importanza in un settore in cui è fondamentale garantire delle operazioni in ambienti controllati e un preciso controllo delle temperature.

Andando ad approfondire l'analisi sono state quindi identificate delle formulazioni matematiche per gli indicatori di prestazione ideale per i seguenti sistemi energetici:

- Sistemi HVAC
- Sistemi frigoriferi (a compressione di vapore e ad assorbimento)
- Compressori ad aria

Allo stesso modo, sono stati analizzati i processi relativi all'incenerimento dei rifiuti. Andando ad approfondire l'analisi sono state identificate delle formulazioni matematiche per gli indicatori di prestazione ideale per i seguenti processi:

- Forno/generatore di vapore
- Ciclo termico
- Trattamento fumi

Infine, è stato analizzato il settore delle fonderie, concentrando l'attenzione sul processo di fusione. Andando ad approfondire l'analisi è stata dunque identificata la formulazione matematica per l'indicatore di prestazione ideale del processo di fusione.

Tutte le analisi e le conseguenti formulazioni definite dal gruppo di lavoro per gli indicatori di prestazione sono state condotte con il supporto e il riscontro fornito dalle associazioni di categoria **Farmindustria**, **Utilitalia** e **Assofond**, interpellate grazie alla collaborazione di ENEA.

Per tutti i settori sono stati analizzati i più diffusi interventi di efficientamento sulla base della metodologia sviluppata e degli indicatori formulati. In particolare si è messo in luce quali interventi abbiano un impatto effettivo sull'indicatore di prestazione ideale.

6 Appendice

6.1 Riferimenti aggiuntivi per la formulazione degli indicatori ideali relativi al settore farmaceutico

6.1.1 Formule psicrometriche

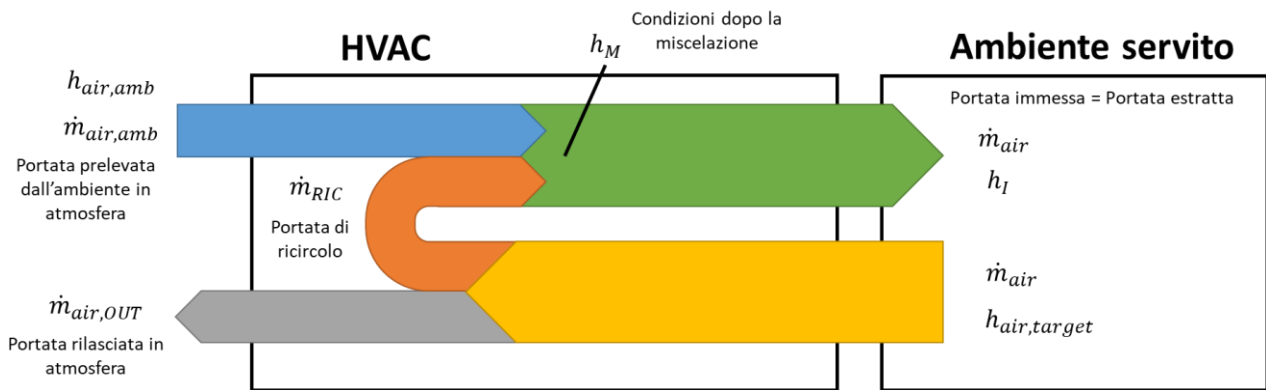


Figura 27. Rappresentazione dei flussi di aria entranti e uscenti dall'ambiente servito e del volume di controllo dell'analisi

Di seguito vengono riportate le principali formule psicrometriche [26]:

$$p_{v,sat} = 610,5 e^{\frac{17,269 \cdot T}{237,3+T}}$$

$$p_v = \varphi p_{v,sat}$$

Con φ che rappresenta l'umidità relativa.

$$p_a = p - p_v \text{ (legge di Dalton)}$$

$$x [kg_v/kg_a] = 0,622 \frac{p_v}{p - p_v}$$

Con $p = p_{amb}$

Il volume specifico, per unità di aria secca, è poi calcolabile tramite l'equazione:

$$v = \frac{R_a T}{p_a}$$

(la T va espressa in K).

Per quanto riguarda il calcolo dell'entalpia dell'aria umida, si può utilizzare la seguente approssimazione, valida per le temperature in gioco ($10^\circ\text{C} < T < 50^\circ\text{C}$):

$$h = h_a + x h_v = c_{p,a} T + x (h_{l,v} + c_{p,v} T)$$

$$c_{p,a} = 1,005 \text{ kJ/kg}_a\text{K}$$

$$c_{p,v} = 1,82 \text{ kJ/kg}_v\text{K}$$

$$h_{l,v} = 2501,3 \text{ kJ/kg}_v$$

6.1.2 Equazioni di bilancio (nel sottosistema ambiente da trattare)

1. Bilancio di massa aria secca

$$m_{air} = m_I = m_E \text{ (sarebbe } m_{air,est} \text{ in estate e } m_{air,inv} \text{ in inverno)}$$

Con m_I e m_E che rappresentano la massa di aria immessa e l'aria estratta dall'ambiente da trattare.

2. Bilancio di massa acqua

$$x_I m_I + m_v - x_{air,target} m_E = m_{air}(x_I - x_{air,target}) + m_v = 0$$

m_v rappresenta la massa di vapore prodotto nell'ambiente.

3. Bilancio di energia

$$m_I h_I - m_E h_{air,target} + Q = m_{air}(h_I - h_{air,target}) + Q = 0$$

Q rappresenta il carico termico da trattare (somma di carico sensibile Q_{SEN} e carico latente Q_{LAT})

In relazione al calcolo dell'indice di prestazione ideale, temperatura e umidità relativa ambiente ($T_{air,amb}$, $\varphi_{air,amb}$) e temperatura e umidità relativa target ($T_{air,target}$ e $\varphi_{air,target}$) devono essere tra i dati richiesti per poter calcolare le due entalpie $h_{air,target}$ e $h_{air,amb}$.

Per il calcolo dell'entalpia di immissione, h_I , ci sono due possibilità, condizionate dai dati posseduti:

1. Dati di partenza: **portata** (m_{air}) e **carico termico** (Q)

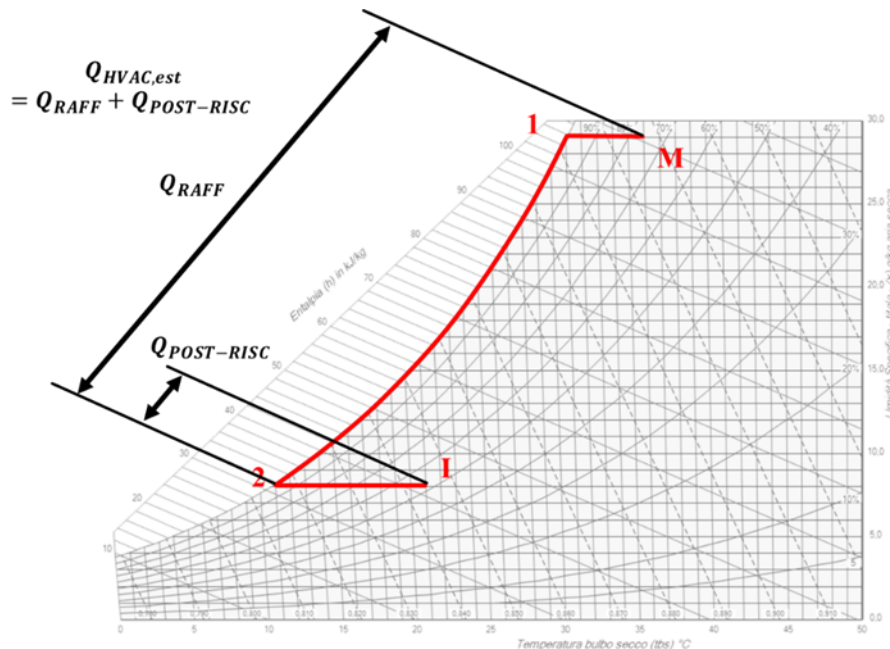
$$h_I = h_{air,target} - \frac{Q}{m_{air}}$$

2. Dati di partenza: **temperatura e umidità relativa immissione** (T_I e φ_I) e **carico termico** (Q)

Dopo aver calcolato h_I (conoscendo T_I e φ_I):

$$m_{air} = -\frac{Q}{(h_I - h_{air,target})}$$

6.1.3 Calcolo regime estivo



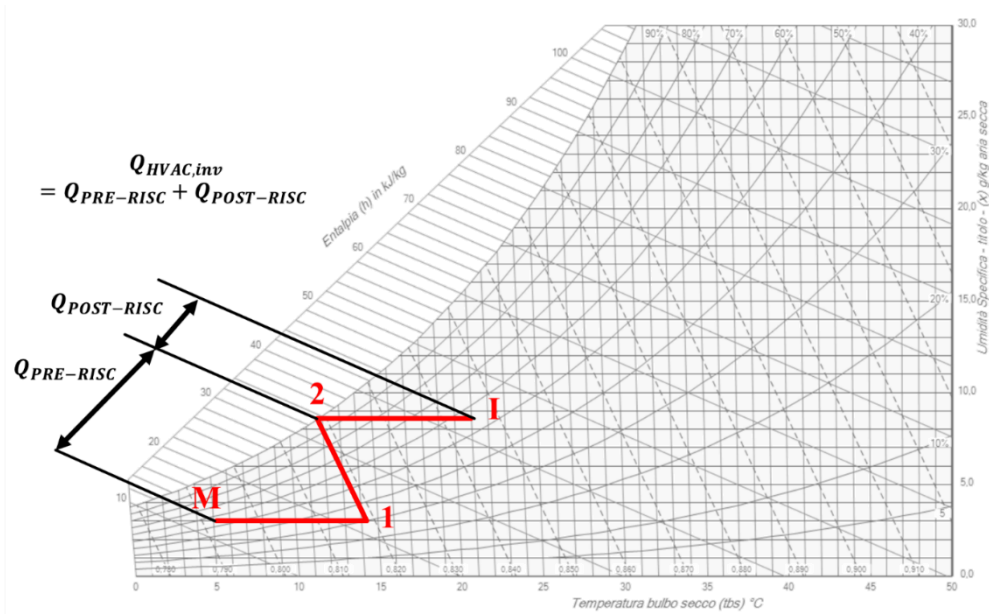
In relazione al calcolo in regime estivo:

- **Punto M** - h_M e x_M calcolati dai bilanci di massa ed energia relativi al miscelamento dell'aria esterna e della portata d'aria di ricircolo

$$x_{M,est} = \frac{m_{air,RIC} x_{air,target,est} + m_{air,amb} x_{air,amb}}{m_{air,est}}$$

- **Punto 1** - raffreddamento isotitolo dalla condizione M ($x_1 = x_M$) e $\varphi_1 = 100\%$
- **Punto 2** - deumidificazione dalla condizione 1 per raggiungere titolo pari alla condizione di immissione ($x_2 = x_I$) e $\varphi_2 = \varphi_1 = 100\%$
- **Punto I** - h_I e x_I calcolati dai bilanci di massa ed energia (vedi sopra) relativi al miscelamento dell'aria esterna e della portata d'aria di ricircolo

6.1.4 Calcolo regime invernale



In relazione al calcolo in regime invernale:

- **Punto M** - h_M e x_M calcolati dai bilanci di massa ed energia relativi al miscelamento dell'aria esterna e della portata d'aria di ricircolo

$$x_{M,inv} = \frac{m_{air,RIC} x_{air,target,inv} + m_{air,amb} x_{air,amb}}{m_{air,inv}}$$

- **Punto I** - h_I e x_I calcolati dai bilanci di massa ed energia (vedi sopra) relativi al miscelamento dell'aria esterna e della portata d'aria di ricircolo
- **Punto 2** - ($x_2 = x_I$) e $\varphi_2 = 100\%$

Da queste condizioni di titolo e umidità relativa si calcola p_v e $p_{v,sat}$ e di conseguenza T_2 e poi h_2

$$p_{v,2} = \frac{x_2}{0,622 + x_2} p$$

$$p_{v,sat,2} = \frac{p_{v,2}}{\varphi_2}$$

$$T_2 = \frac{237,3 \cdot \ln\left(\frac{p_{v,sat,2}}{610,5}\right)}{17,269 - \ln\left(\frac{p_{v,sat,2}}{610,5}\right)}$$

- **Punto 1** – visto che la trasformazione 1-2 è una trasformazione isoentalpica (l'umidificazione avviene attraverso una saturazione adiabatica), $h_1 = h_2$ e $x_1 = x_M$

7 Riferimenti bibliografici

1. B. Bennett, G. Cole, e Institution of Chemical Engineers (Great Britain), A c. di, *Pharmaceutical production: an engineering guide*. Rugby, Warwickshire: IChemE, 2003.
2. C. Galitsky, C. Galitsky, S. Chang, E. Worrell, e E. Masanet, «Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Pharmaceutical Industry. An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers», LBNL-57260-Revision, 929403, mar. 2008. doi: 10.2172/929403.
3. ICF, «Study on energy efficiency and saving potential in industry possible policy mechanisms». 2015. Consultato: lug. 04, 2021. [Online]. Disponibile su: https://ec.europa.eu/energy/studies/study-energy-efficiency-and-energy-saving-potential-industry-and-possible-policy-mechanisms_en
4. N. Anglani e P. Mura, «Opportunità di ottimizzazione dei consumi nella produzione, distribuzione, utilizzo dell'aria compressa nei settori industriali più sensibili». ENEA, 2010.
5. R. and A.-C. E. /American Society of Heating, *ASHRAE handbook 2020: heating, ventilating, and air-conditioning systems and equipment*. Atlanta, GA: ASHRAE, 2020.
6. M. J. Moran, Shapiro, Howard N, Boettner, Daisie D, e Bailey, Margaret B, *Fundamentals of engineering thermodynamics*. 2018.
7. ISO - International Organization for Standardization, «ISO 8573-1:2010». 2010.
8. A. Copco, «Atlas copco compressed air manual», 2010.
9. E. Bettanini e P. Brunello, *Lezioni di impianti tecnici vol.2*. 1990.
10. J. Wadibhasme, S. Zaday, e R. Somalwar, «Review of various methods in improvement in speed, power amp; efficiency of induction motor», in *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*, ago. 2017, pagg. 3293–3296. doi: 10.1109/ICECDS.2017.8390068.
11. Utilitalia, «Linea Guida per l'Esecuzione della Diagnosi Energetica ai sensi dell'articolo 8 del d.lgs 102/2014».
12. European Commission. Joint Research Centre., *Best Available Techniques (BAT) reference document for waste incineration: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)*. LU: Publications Office, 2019. Consultato: ott. 19, 2021. [Online]. Disponibile su: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/761437>
13. ISPRA, «Rapporto sul recupero energetico da rifiuti in Italia». 2019.
14. European Commission. Joint Research Centre., *Best available techniques (BAT) reference document for the management of waste from extractive industries :in accordance with Directive 2006/21/EC*. LU: Publications Office, 2018. Consultato: gen. 18, 2022. [Online]. Disponibile su: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/201200>
15. «IL PROCESSO DI FONDERIA», pag. 22.
16. ASSOFOND, «Linee Guida ASSOFOND».
17. J. L. Enríquez *et al.*, «Smelting in cupola furnace for recarburization of direct reduction iron (DRI)», *REVMETAL*, vol. 51, n. 4, pag. e052, dic. 2015, doi: 10.3989/revmetalm.052.
18. J. F. Schifo e J. T. Radia, «Theoretical/best practice energy use in metalcasting operations», 1216246, mag. 2004. doi: 10.2172/1216246.
19. N. Radhika, «Analysis of Tribological Behaviour of Functionally Graded LM13 Aluminium/TiS2 Composite Using Design of Experiments», vol. 38, n. 3, pag. 11, 2016.

20. Commission of the European Union. Joint Research Centre. Institute for Prospective Technological Studies., *Best available techniques (BAT) reference document for iron and steel production: industrial emissions Directive 2010/75/EU : integrated pollution prevention and control*. LU: Publications Office, 2013. Disponibile su: <https://data.europa.eu/doi/10.2791/97469>
21. E. Worrell, P. Blinde, M. Neelis, e E. Masanet, «Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the U.S. Iron and Steel Industry An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers», pag. 160.
22. J. J. Cabello Eras, A. Sagastume Gutiérrez, V. Sousa Santos, e M. J. Cabello Ulloa, «Energy management of compressed air systems. Assessing the production and use of compressed air in industry», *Energy*, vol. 213, pag. 118662, dic. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118662.
23. R. M. Lazzarin e M. Noro, «Energy efficiency opportunities in the production process of cast iron foundries: An experience in Italy», *Applied Thermal Engineering*, vol. 90, pagg. 509–520, nov. 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.07.028.
24. A. Abdel-Hadi, A. R. Salem, A. I. Abbas, M. Qandil, e R. S. Amano, «Study of Energy Saving Analysis for Different Industries», *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 143, n. 5, set. 2020, doi: 10.1115/1.4048249.
25. A. Trianni, E. Cagno, e D. Accordini, «Energy efficiency measures in electric motors systems: A novel classification highlighting specific implications in their adoption», *Applied Energy*, vol. 252, pag. 113481, ott. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113481.
26. S. C. Gupta, *Thermodynamics*. Pearson Education India, 2005.

8 Attività di disseminazione

Nel corso dell'annualità 2021 il gruppo di ricerca in collaborazione con ENEA e gli altri co-beneficiari del progetto è stato impegnato in attività di disseminazione scientifica.

In seguito, vengono riportate le principali attività condotte:

1. Intervento dal titolo "Sviluppo e applicazione di metodologie di benchmark ideali dei consumi energetici dei principali settori energivori italiani" all'evento "Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali - Risultanze dei WP3 e WP4 del Progetto 1.6 del Piano Triennale di realizzazione 2019-2021". Relatore Prof. Andrea Luigi Facci del Dipartimento di DEIM – Dipartimento di Economia, Ingegneria, Società e Impresa, dell'Università degli Studi della TUSCIA, 02 dicembre 2021 (Flyer dell'evento in Figura 28).

Sviluppo e applicazione di metodologie di benchmark ideali dei consumi energetici dei principali settori energivori italiani

Prof. Andrea L. Facci - Responsabile della ricerca

Università degli Studi della Tuscia

Centro Interuniversitario per l'innovazione Tecnologica e lo Sviluppo del Territorio



Roma, 2 Dicembre 2021



Accordo di Programma MISE- ENEA "Ricerca di Sistema Elettrico" PTR 2019-21



1

Figura 28 Flyer di presentazione all'evento

2. Incontri con associazioni di categoria:
 - Utilitalia – 4 incontri via teleconferenza (13/05/2021, 12/07/2021, 20/09/2021, 5/11/2021) e 1 incontro dal vivo con sopralluogo ad un impianto (25/11/2021)
 - Assofond – 6 incontri via teleconferenza (02/02/2021, 21/05/2021, 08/07/2021, 14/09/2021, 25/10/2021, 30/11/2021)
 - Farmindustria – 3 incontri via teleconferenza (14/05/2021, 17/09/2021, 13/12/2021)

9 Breve curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Il gruppo di ricerca coinvolto nelle attività relative al risparmio energetico è così composto:

- **Andrea Luigi Facci:** Professore Associato di Macchine a Fluido e sistemi energetici (ING-IND/08) presso l'Università degli Studi della Tuscia autore di più di 40 pubblicazioni scientifiche internazionali nell'ambito delle macchine e dell'efficienza energetica (H index = 18, 1070 Citazioni, I10 index = 27). Titolare dei corsi di Fluidodinamica delle Macchine, Macchine e Sistemi Energetici e Motori a Combustione Interna e Sistemi per la Propulsione presso i corsi di Ingegneria Industriale e Ingegneria Meccanica dell'Università degli Studi Della Tuscia. Coordinatore del corso di Laurea in Ingegneria Industriale e membro del collegio del Dottorato "Engineering for Energy and Environment".
- **Gianluca Rubino:** Professore Associato nel Settore Scientifico Disciplinare ING-IND/16 Tecnologie e Sistemi di Lavorazione presso l'Università degli Studi della Tuscia, autore di più di 43 pubblicazioni scientifiche internazionali nell'ambito delle Tecnologie ed i Sistemi di Lavorazione (H index = 13 Citazioni= 435). L'attività di ricerca scientifica è orientata verso i seguenti temi: lavorazioni non convenzionali, deposizione di rivestimenti duri e valutazione delle proprietà tribologiche, testing su rivestimenti e materiali organici ed inorganici e identificazione delle relazioni materiale-processo-prodotto, produzione e applicazioni di schiume metalliche e ceramiche. Titolare dei corsi di Tecnologie meccaniche, Tecnologie e lavorazione Speciali, Strumenti e tecnologie per la produzione additiva presso i corsi di Ingegneria Industriale e Ingegneria Meccanica dell'Università degli Studi Della Tuscia. Membro del collegio del Dottorato "Engineering for Energy and Environment".
- **Mauro Scungio:** Ricercatore di Fisica Tecnica Industriale (Ing-IND/10). Le attività di ricerca dell'Ing. Mauro Scungio sono legate principalmente a temi relativi alla metrologia per il monitoraggio ambientale e alla termo-fluidodinamica numerica (CFD) per la simulazione della dispersione di inquinanti indoor e outdoor e in emissione da impianti. In particolare, tali attività prevedono la progettazione e l'esecuzione di appropriate campagne di misura in emissione ed esposizione, utilizzando specifica strumentazione di misura delle concentrazioni e delle distribuzioni dimensionali del materiale particolato (PM e polveri ultrafini), nonché campionatori di CO₂, sensori di temperatura, pressione, umidità e portata. A supporto delle attività sperimentali di misura, le simulazioni numeriche CFD mediante tecniche innovative vengono utilizzate per la simulazione della dispersione e della deposizione di sostanze inquinanti emesse da sistemi energetici e per la valutazione della loro ricaduta nelle zone limitrofe
- **Annalisa Santolamazza:** Assegnista di ricerca di Impianti meccanici (ing-IND/17) presso l'Università degli Studi della Tuscia. L'attività di ricerca dell'Ing. Santolamazza è legata principalmente all'analisi e l'ottimizzazione delle performance operative ed energetiche degli impianti industriali. Ha conseguito un dottorato in "Ingegneria per la Progettazione e Produzione industriale", focalizzato al miglioramento della gestione della manutenzione attraverso tecniche di machine learning.