



Università Politecnica delle Marche
Scuola di Dottorato di Ricerca in Scienze dell'Ingegneria
Corso di Dottorato in Ingegneria Industriale

Analisi energetica di sistemi per la refrigerazione industriale

Ph.D. Dissertation of:

Anna Lauri

Supervisor:

Prof. Fabio Polonara

Assistant Supervisor:

Prof. Alessia Arteconi

Ph.D. Course coordinator:

Prof. G. Di Nicola

XVIII edition - new series



Università Politecnica delle Marche
Scuola di Dottorato di Ricerca in Scienze dell'Ingegneria
Corso di Dottorato in Ingegneria Industriale

Analisi energetica di sistemi per la refrigerazione industriale

Ph.D. Dissertation of:

Anna Lauri

Supervisor:

Prof. Fabio Polonara

Assistant Supervisor:

Prof. Alessia Arteconi

Ph.D. Course coordinator:

Prof. G. Di Nicola

XVIII edition - new series

Università Politecnica delle Marche
Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche
Via Brecce Bianche — 60131 - Ancona, Ita

A chi mi ha sempre sostenuta
anche quando ero la prima a non crederci

Sommario

I magazzini refrigerati per alimenti rappresentano una grande parte della domanda di energia nel settore della refrigerazione.

Nel seguente studio sono state analizzate le influenze di diverse configurazioni e tecnologie nei sistemi di refrigerazione industriale.

Dallo studio della letteratura emerge l'assenza di una chiara metodologia per valutare le prestazioni energetiche dei sistemi di refrigerazione industriali e una base di riferimento per quantificare l'effetto delle azioni per migliorare tali prestazioni. L'obiettivo di questo lavoro è quello di contribuire ad accrescere la consapevolezza del ruolo di alcune funzionalità di progettazione sul comportamento generale del sistema e di definire una metodologia per il miglioramento degli indici di prestazione energetica di aziende operanti nel settore della catena del freddo alimentare attraverso la modellazione e la simulazione degli impianti.

Un sondaggio tra le aziende italiane in questo specifico settore insieme all'analisi di simulazione sono utilizzati per presentare lo stato dell'arte nei sistemi di refrigerazione industriale e per quantificare l'effetto di potenziali miglioramenti tecnologici.

Lo studio, a partire dalle simulazioni effettuate attraverso i dati forniti dall'azienda, mira a stabilire una possibile correlazione tra gli indicatori di prestazione energetica e un numero limitato di parametri dei sistemi energetici, in termini di produzione, volumi e consumo di energia.

La valutazione comparativa delle misure di risparmio energetico fornisce una metodologia per valutare l'effettivo risparmio energetico in funzione di un numero limitato di parametri.

Indice

Sommario.....	iii
Lista delle figure.....	vi
Lista delle tabelle	viii
Introduzione	1
Stato dell'arte.....	3
1. Panoramica sullo stato dell'arte.....	3
1.1. La refrigerazione ed il consumo energetico.....	3
1.1.1. La refrigerazione e gli effetti sull'ambiente.....	5
1.1.2. La refrigerazione nel settore alimentare.....	5
1.1.3. Tipologie di impianti di refrigerazione	8
1.1.4. Valutazione dell'efficienza energetica nei sistemi di refrigerazione.	12
1.1.5. Efficienza energetica e normativa.....	17
Indagine	23
2.1. Realizzazione del questionario somministrato alle aziende	23
2.1.1 Realizzazione questionario somministrato alle aziende.....	23
2.1.2 Questionario generale	24
2.1.3 Questionario con approfondimenti	27
Metodologia per il miglioramento degli indici di prestazione energetica di	
aziende	31
3.1 Definizione dati prestazionali	31
3.1.1 Definizione IPE.....	31
3.1.2 Metodologia di valutazione.....	32
3.2 Analisi tecnologica	35

3.2.1	Impostazione del modello di simulazione.....	35
3.3	Incremento efficienza energetica	37
3.3.1	Impostazione del modello di simulazione.....	37
	Descrizione casi studio.....	38
4.1.	Modellazione del sistema	40
4.2.	Modellazione e simulazione degli impianti di riferimento attuali.....	45
4.3.	Modellazione e simulazione degli impianti di riferimento modificati	59
4.4.	Calcolo dei consumi energetici in base alle categorie di refrigerazione.....	73
	Conclusioni	75
	Bibliografia	78

Lista delle figure

Figura 1 Distribuzione del consumo di elettricità del settore della refrigerazione globale (%) (IIR 2015).....	4
Figura 2 Confronto del consumo di elettricità del settore della refrigerazione globale con quello di altri settori (%) (IIR 2015).....	4
Figura 3 Utilizzo dell'energia in un supermercato (IIR 2015).	6
Figura 4 Schema di un impianto mono-stadio (Frigo Tecnica Internazionale SpA n.d.).....	8
Figura 5 Schema di un impianto mono-stadio economizzato di tipo "chiuso" (Frigo Tecnica Internazionale S.P.A).....	9
Figura 6 Schema di un impianto mono-stadio economizzato di tipo "aperto" (Frigo Tecnica Internazionale S.P.A).....	9
Figura 7 Schema di un impianto bi-stadio con economizzatore di tipo "chiuso" (Frigo Tecnica Internazionale S.P.A).	10
Figura 8 Schema di un impianto bi-stadio con economizzatore di tipo "aperto" (Frigo Tecnica Internazionale S.P.A).	10
Figura 9 Schema di un impianto bi-stadio con separatore di liquido e condensazione intermedia (Frigo Tecnica Internazionale S.P.A).	11
Figura 10 Schema di un impianto in cascata (Frigo Tecnica Internazionale S.P.A).....	11
Figura 11 Rapporto tra volume del negozio e consumo totale di energia all'anno (kWh / anno) per i magazzini congelati (regressione non lineare) (Evans et al. 2015).	14
Figura 12 R Rapporto tra volume del negozio e consumo totale di energia (kWh / anno) per magazzini misti (regressione non lineare) (Evans et al. 2015).	15
Figura 13 Rapporto tra volume del negozio e consumo totale di energia all'anno (kWh / anno) per i magazzini refrigerati (Evans et al. 2015).....	15
Figura 14 Esempio di struttura energetica aziendale (Ministero Sviluppo Economico 2016).	19
Figura 15 Questionario somministrato alle aziende Italiane, parte 1.....	25
Figura 16 Questionario somministrato alle aziende Italiane, parte 2.....	26

Figura 17 Schemi di cicli di refrigerazione: monofase (a sinistra) a due stadi (a destra) (Cavallini and Mattarolo 1992)	43
Figura 18 Flusso dei dati nel sistema di simulazione.	44
Figura 19 Ciclo termodinamico del sistema monostadio per il caso A.....	50
Figura 20 Ciclo termodinamico del sistema monostadio per il caso D.....	51
Figura 21 Ciclo termodinamico del sistema monostadio per il caso F.	51
Figura 22 Ciclo termodinamico del sistema monostadio per il caso B.....	53
Figura 23 Ciclo termodinamico del sistema monostadio per il caso C.....	54
Figura 24 Ciclo termodinamico del sistema monostadio per il caso E.	56
Figura 25 Ciclo termodinamico del sistema monostadio per il caso H.....	58
Figura 26 Ciclo termodinamico del sistema doppio stadio per il caso A.....	60
Figura 27 Ciclo termodinamico del sistema doppio stadio per il caso D.....	60
Figura 28 Ciclo termodinamico del sistema doppio stadio per il caso F	61
Figura 29 Ciclo termodinamico del sistema doppio stadio per il caso B.....	62
Figura 30 Ciclo termodinamico del sistema doppio stadio per il caso C.....	64
Figura 31 Ciclo termodinamico del sistema doppio stadio per il caso E.	66
Figura 32 Ciclo termodinamico del sistema doppio stadio per il caso G.....	68
Figura 33 Ciclo termodinamico del sistema doppio stadio per il caso H.....	70

Lista delle tabelle

Tabella 1	Approfondimenti sulla struttura dello stabilimento	27
Tabella 2	Approfondimenti sul sistema di refrigerazione.....	28
Tabella 3	Approfondimenti sulla struttura e sull'immagazzinamento degli alimenti.....	29
Tabella 4	Approfondimenti sui circuiti dell'impianto	30
Tabella 5	dati principali delle Aziende oggetto di studio	39
Tabella 6	Temperature di Febbraio relative al sito geografico di uno stabilimento preso in esame	41
Tabella 7	Tabella riassuntiva temperature di condensazione relative al sito geografico di uno stabilimento preso in esame.....	42
Tabella 8	Tabella riassuntiva temperature di condensazione relative ai casi A, D, F e G ..	46
Tabella 9	Tabella riassuntiva temperature di condensazione relative al caso B	46
Tabella 10	Tabella riassuntiva temperature di condensazione relative al caso C	47
Tabella 11	Tabella riassuntiva temperature di condensazione relative al caso E	48
Tabella 12	Tabella riassuntiva temperature di condensazione relative al caso H.....	49
Tabella 13	Analisi parametrica del COP nel sistema monostadio al variare della Temperatura di condensazione nel caso A, D e F.....	52
Tabella 14	Analisi parametrica del COP al variare della Temperatura di condensazione nel caso B	53
Tabella 15	Analisi parametrica del COP al variare della Temperatura di condensazione nel caso C	55
Tabella 16	Analisi parametrica del COP al variare della Temperatura di condensazione nel caso E.	57
Tabella 17	Analisi parametrica del COP al variare della Temperatura di condensazione nel caso H.....	58
Tabella 18	Analisi parametrica del COP nel sistema doppio stadio al variare della Temperatura di condensazione nel caso A, D e F.....	61
Tabella 19	Analisi parametrica del COP nel sistema doppio stadio al variare della Temperatura di condensazione nel caso B.....	63

Tabella 20 Analisi parametrica del COP nel sistema doppio stadio al variare della Temperatura di condensazione nel caso C.....	65
Tabella 21 Analisi parametrica del COP nel sistema doppio stadio al variare della Temperatura di condensazione nel caso E.....	67
Tabella 22 Analisi parametrica del COP nel sistema doppio stadio al variare della Temperatura di condensazione nel caso G.	69
Tabella 23 Analisi parametrica del COP nel sistema doppio stadio al variare della Temperatura di condensazione nel caso H.	71
Tabella 24 COP dei casi considerati (compressione monostadio e doppio stadio), variazione percentuale del COP e variazione dell'energia elettrica legata alla tecnologia introdotta a scopo migliorativo.....	72
Tabella 25 Dati necessari per il calcolo dei consumi energetici	74
Tabella 26 Valori dei consumi energetici espressi in kWh/kg e kWh/m ³ per azienda.....	74

Introduzione

Il settore della refrigerazione, in particolare per la conservazione degli alimenti, è uno dei settori industriali ad alta intensità energetica e la riduzione del consumo di energia in questo settore ha un'importanza fondamentale.

Pertanto questa tesi si concentra sulla definizione di una metodologia per il miglioramento degli indici di prestazione energetica di aziende operanti nel settore della catena del freddo alimentare attraverso la modellazione e la simulazione degli impianti di refrigerazione a partire da una quantità limitata di dati.

Il manoscritto è diviso in cinque capitoli. Lo stato dell'arte è presentato nel capitolo 1 che inquadra il settore della refrigerazione nel panorama della letteratura. In questo capitolo vengono descritte le relazioni del settore della refrigerazione con gli effetti sull'ambiente e sul conseguente consumo energetico, le varie tipologie di impianti di refrigerazione industriale, in particolare nel settore alimentare, e quello che la normativa di settore offre per quanto riguarda l'efficienza energetica. A questo proposito, dallo studio della letteratura emerge l'assenza di una metodologia che valuti le prestazioni energetiche negli impianti di refrigerazione industriale, principalmente perché le aziende sono restie alla condivisione di dati sensibili.

Il secondo capitolo descrive l'indagine statistica che è stata condotta tra le aziende italiane operanti nel settore della catena del freddo alimentare. A tal proposito è stato sviluppato un questionario informativo -riguardante nello specifico le caratteristiche dell'impianto di refrigerazione – con lo scopo di definire le prestazioni effettive dei sistemi esistenti, identificare le aree con i problemi più comuni e dove è possibile risparmiare gran parte dell'energia elettrica.

Il link al questionario è stato inviato alle aziende tramite mail, dopo questo primo contatto sono stati inviati ulteriori fogli di lavoro approfonditi per ricevere informazioni più dettagliate. Gli audit sono stati selezionati per coprire diverse località, dimensioni, tipi e usi in modo tale da avere a disposizione una più vasta quantità di dati.

Successivamente è stata proposta, nel capitolo 3, una metodologia volta a definire e migliorare gli indici di prestazione energetica dei sistemi di refrigerazione industriale.

Lo scopo è quello di contribuire ad accrescere la consapevolezza del ruolo di alcune funzionalità di progettazione sul comportamento generale del sistema e di definire una metodologia per il miglioramento degli indici di prestazione energetica di aziende operanti nel settore della catena del freddo alimentare attraverso la modellazione e la simulazione degli impianti di refrigerazione. Attraverso la simulazione, a partire da una disponibilità limitata di dati in input, l'azienda ha la possibilità di conoscere e verificare l'efficienza energetica del proprio sistema di refrigerazione ed investigare, attraverso la modifica di alcuni parametri, soluzioni volte al miglioramento dell'efficienza dell'impianto.

In questo lavoro è stata proposta, come miglioria all'intero impianto, la sostituzione del ciclo di refrigerazione monostadio, principalmente utilizzato dalle aziende operanti nel settore della catena del freddo alimentare, con un sistema bistadio, di base più efficiente, ma con lo scopo di poter verificare attraverso il modello l'effettivo risparmio in termini di coefficiente di prestazione.

Il capitolo 4 riporta i casi studio relativi alle aziende italiane che hanno aderito all'indagine statistica rispondendo alle domande del questionario proposto.

Sono stati modellati inizialmente i sistemi di refrigerazione attualmente installati nelle aziende con lo scopo di definire le prestazioni effettive dei sistemi esistenti, in seguito gli stessi impianti sono stati simulati tenendo conto delle modifiche e dei miglioramenti apportati al modello di riferimento.

Infine, il capitolo 5 riporta alcune conclusioni critiche e i futuri progressi del lavoro presentato.

Capitolo 1.

Stato dell'arte

1. Panoramica sullo stato dell'arte

Generalmente, quando si parla di refrigerazione si pensa ai frigoriferi domestici, ai surgelatori e le vetrine refrigerate dei supermercati. Tuttavia queste applicazioni non sono altro che un piccolo frammento visibile dell'industria della refrigerazione che è presente in innumerevoli settori che vanno dall'industria alimentare all'aria condizionata e svolge un ruolo importante per la sanità, l'energia e l'ambiente (IIR, 2015).

La refrigerazione svolge un ruolo chiave nella conservazione post-raccolta e post-macellazione dei prodotti alimentari dal momento che conserva le qualità nutrizionali e organolettiche e di conseguenza, la sicurezza alimentare.

Da qualche anno ormai, per settori come la refrigerazione, si è diffusa in modo più incalzante la necessità di sopperire in qualche modo agli alti consumi adeguandosi e aggiornandosi in termini di efficienza a livello energetico.

1.1. La refrigerazione ed il consumo energetico

Per la vastità delle sue applicazioni oggi, il consumo di elettricità per la refrigerazione e il condizionamento dell'aria è aumentato negli ultimi anni sia nei Paesi sviluppati che in quelli in via di sviluppo. Si stima che circa il 17% dell'elettricità complessiva utilizzata in tutto il mondo sia consumata dal settore della refrigerazione (IIR, 2015).

Questa quota rappresenta un dato importante considerando che l'efficienza energetica delle apparecchiature refrigerate è in costante progresso. Focalizza l'importanza del settore della refrigerazione che dovrebbe crescere ulteriormente nei prossimi anni a causa dell'aumento della domanda di refrigerazione in numerosi settori e del riscaldamento globale.

La crescita stimata della domanda globale di elettricità per il raffreddamento entro il 2030 potrebbe equivalere a tre volte l'attuale capacità di generazione del Regno Unito. (IEA, 2015).

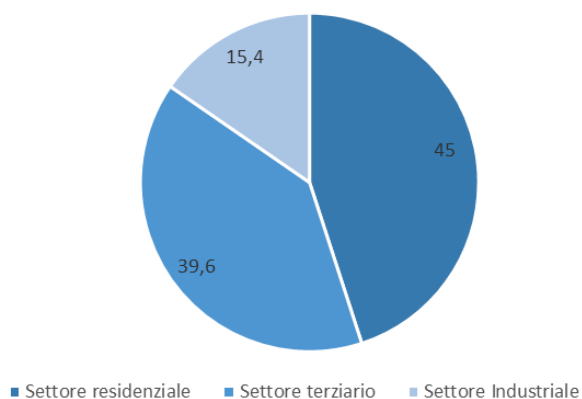


Figura 1 Distribuzione del consumo di elettricità del settore della refrigerazione globale (%) (IIR, 2015).

La figura 1 mostra la distribuzione del consumo di elettricità del settore della refrigerazione globale tra usi residenziali, terziari e industriali. Il settore residenziale ricopre quasi la metà dei consumi globali di elettricità con il 45%, a seguire il settore terziario con il 39,6% di elettricità consumata mentre il restante 15,4% è occupato dal settore industriale (come stimato dall'IIR).

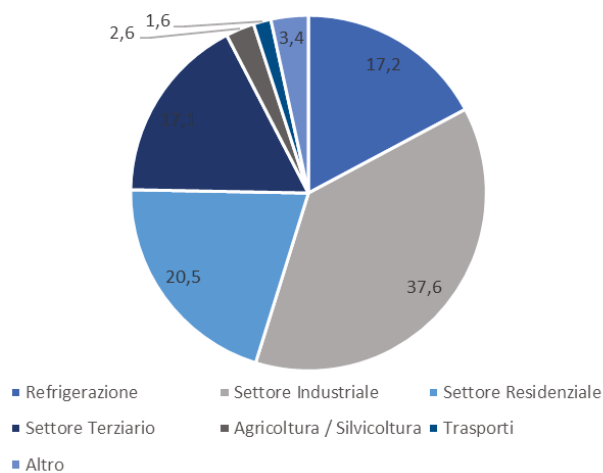


Figura 2 Confronto del consumo di elettricità del settore della refrigerazione globale con quello di altri settori (%) (IIR, 2015).

La figura 2 confronta il consumo di elettricità legato alla refrigerazione (17,2%) rispetto al consumo di elettricità di altri settori, come quello industriale che occupa una maggior fetta (37,6%) o quello dell'agricoltura e silvicoltura che occupa invece il 2,6% del consumo globale sulla base dei dati IEA e delle stime IIR.

1.1.1. La refrigerazione e gli effetti sull'ambiente

Nonostante sia uno dei settori in via di sviluppo per quanto riguarda il progresso nel campo dell'efficienza energetica, la refrigerazione -sia commerciale che industriale- produce effetti ambientali negativi.

Circa il 20% dell'impatto del riscaldamento globale dei sistemi di refrigerazione è dovuto alle emissioni dirette (perdite) di fluorocarburi (CFC, HCFC e HFC), mentre il restante 80% è dovuto alle emissioni indirette derivanti dalla produzione di elettricità necessaria per alimentare i sistemi dalle centrali elettriche a combustibile fossile.

Pertanto, le azioni attuate dalle parti interessate della refrigerazione per combattere il riscaldamento globale si concentrano su due obiettivi:

- riduzione delle emissioni dirette di fluorocarburi nell'atmosfera attraverso un migliore contenimento dei refrigeranti, riduzione della carica di refrigerante, sviluppo di refrigeranti alternativi con impatto climatico trascurabile o assente, sviluppo di tecnologie alternative che forniscono alternative adeguate alla compressione del vapore e formazione / certificazione di tecnici.
- riduzione del consumo di energia primaria aumentando l'efficienza energetica degli impianti di refrigerazione. (IIR, 2007).

Negli ultimi anni infatti, a causa della preoccupazione del cambiamento climatico i sistemi di refrigerazione naturale ricevono molta più attenzione (Bansal, 2012; Cecchinato et al, 2012; Sawalha 2008; Suamir, 2012). Si stanno facendo sempre più strada i nuovi refrigeranti HFO, di quarta generazione con un basso impatto ambientale, le cui applicazioni dimostrano la loro efficacia.

1.1.2. La refrigerazione nel settore alimentare

Nell'industria alimentare la refrigerazione è una delle applicazioni più delicate poiché rallenta la proliferazione batterica negli alimenti e permette di preservarne intatte le proprietà organolettiche, prolungando il tempo di conservazione e fornendo ai consumatori prodotti sani e sicuri.

La produzione alimentare globale comprende circa un terzo dei prodotti deperibili che richiedono conservazione. Nel 2010, su una produzione alimentare globale totale (prodotti agricoli, pesce, carne e prodotti lattiero-caseari) di 6,300 milioni di tonnellate, è stato stimato

che solo 400 milioni di tonnellate sono state conservate grazie alla refrigerazione (refrigerata o congelata), mentre almeno 2000 milioni di tonnellate prevedevano processi di refrigerazione (FAO, 2013, 2015; IIR, 2009). Ciò comporta enormi perdite per il settore alimentare che è uno dei settori industriali ad alta intensità energetica. La quantità di energia per la coltivazione, la lavorazione, l'imballaggio e il trasporto del cibo sulle tavole dei cittadini europei rappresenta rispettivamente circa il 17% e il 26% dei consumi energetici lordi e finali dell'UE, le cui industrie alimentari sono soggette a importanti ristrutturazioni per rendere le loro attività più sostenibili, sia attraverso maggiori investimenti nelle energie rinnovabili che miglioramenti dell'efficienza energetica. Dal 2005 il consumo di energia dell'industria alimentare ha iniziato a diminuire in termini sia di quantità assoluta sia di intensità energetica in grado di produrre di più con l'uso di meno energia (JRC, 2015).

Nei supermercati, circa il 45% dell'energia elettrica consumata viene utilizzata dalle apparecchiature di refrigerazione che forniscono freddo alle vetrine refrigerate e alle celle frigorifere per la conservazione di alimenti refrigerati e congelati (Schönenberger et al. 2014)(EnergyStar 2008) come mostrato in Figura 3. È quindi impensabile che piccoli negozi, ristoranti, bar e hotel possano funzionare senza apparecchiature di refrigerazione.

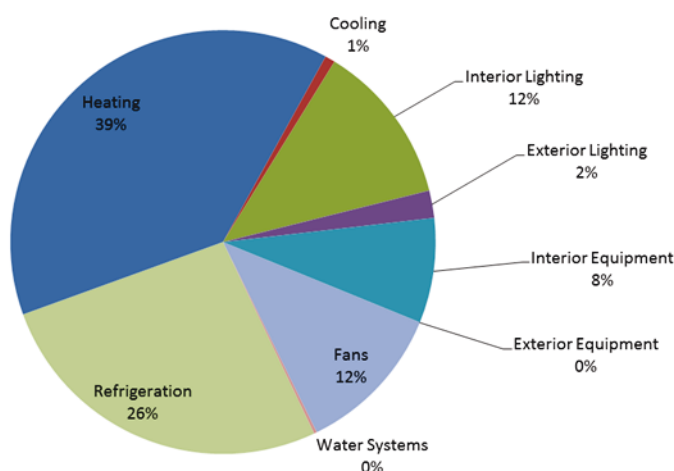


Figura 3 Utilizzo dell'energia in un supermercato (IIR 2015).

Circa 1,5 miliardi di frigoriferi e congelatori domestici sono in servizio in tutto il mondo (Clodic et al, 2013; UNEP, 2010). Sulla base del numero di apparecchi refrigerati installati e del loro consumo di elettricità, l'IIR, stima che i frigoriferi e i congelatori domestici consumino quasi il 4% dell'elettricità globale.

Ciò nonostante, l'efficienza energetica nei frigoriferi è in costante aumento, come evidenziato dall'evoluzione qualitativa delle etichette energetiche. Il consumo di un tipico frigorifero domestico è diminuito di circa il 65% in 15 anni (25).

Nel 2012, in Europa c'erano circa 1,6 milioni di celle frigorifere, di cui il 67% erano piccoli magazzini con un volume inferiore a 400 m³ (Mudgal et al. 2011).

Negli impianti di stoccaggio a freddo, il 60-70% dell'energia elettrica viene utilizzata per la refrigerazione, pertanto vi è un forte interesse nel ridurre tale consumo di energia (Evans et al. 2014). Nel loro progetto ICE-E (Evans et al. 2014) hanno identificato diverse azioni per aumentare l'efficienza energetica in questo settore mediante un sondaggio tra celle frigorifere in Europa.

Nel 2002, l'Istituto Internazionale di Refrigerazione (IIR) ha stimato che le celle frigorifere utilizzano tra 30 e 50 kWh / m³ / anno (Duiven J.E. e Binard P.)

Precedenti audit energetici dettagliati effettuati da altri ricercatori (Evans, J. A. e Gigiel 2010; Evans et al. 2007) su un piccolo numero di celle frigorifere hanno dimostrato che il consumo di energia può superare notevolmente i valori sopra riportati. Questi audit hanno anche dimostrato che era possibile ottenere un risparmio energetico del 30-40% ottimizzando l'uso dei negozi, riparando le apparecchiature attuali e aggiornando le apparecchiature ad alta efficienza energetica.

Tuttavia, i consumatori possono vedere solo una piccola parte dell'attrezzatura refrigerata che costituisce la catena del freddo alimentare. La trasformazione di alimenti refrigerati, la conservazione a freddo, il trasporto e la distribuzione refrigerati rimangono invisibili per il cliente, ma costituiscono altri collegamenti che devono essere presi in considerazione in quanto sono elementi chiave della catena (insieme alla movimentazione al dettaglio e domestica di prodotti refrigerati e congelati).

I magazzini refrigerati, come le celle frigorifere industriali o commerciali rappresentano tutta quella fetta della catena del freddo alimentare che impiega una gran quantità di energia.

Effettuando una prima distinzione delle temperature utilizzate nella conservazione alimentare ci si può rendere conto della grande quantità di energia utilizzata nelle industrie che operano nel settore della catena del freddo.

I magazzini refrigerati, per quanto riguarda la refrigerazione industriale, generalmente immagazzinano alimenti a temperatura di refrigerazione (in genere tra 0 °C e -10 °C), temperatura di congelamento o surgelazione (in genere fino a -42 °C) e temperatura di conservazione o stoccaggio (in genere fino a -35 °C). Mentre nei primi due casi è prevista una trasformazione del prodotto dall'ingresso all'uscita della cella, nell'ultimo caso le celle frigorifere forniscono solo la scorta alimentare.

1.1.3. Tipologie di impianti di refrigerazione

Gli impianti di refrigerazione industriale adottano generalmente alcune tipologie di schemi di funzionamento tipiche, la cui scelta è generalmente dipendente da:

- fluido utilizzato (costo, pericolosità, caratteristiche termodinamiche, ecc.);
- distribuzione necessaria del fluido refrigerante nei vari punti di utilizzo.

Gli schemi più utilizzati sono i seguenti:

1. Impianto mono-stadio: è lo schema più semplice, molto utilizzato in particolare quando il rapporto di compressione richiesto non è particolarmente alto e quindi non sono giustificabili economicamente sistemi più complessi a più stadi di compressione. Di seguito nella Figura 4 viene riportato uno schema semplificato dell'impianto.

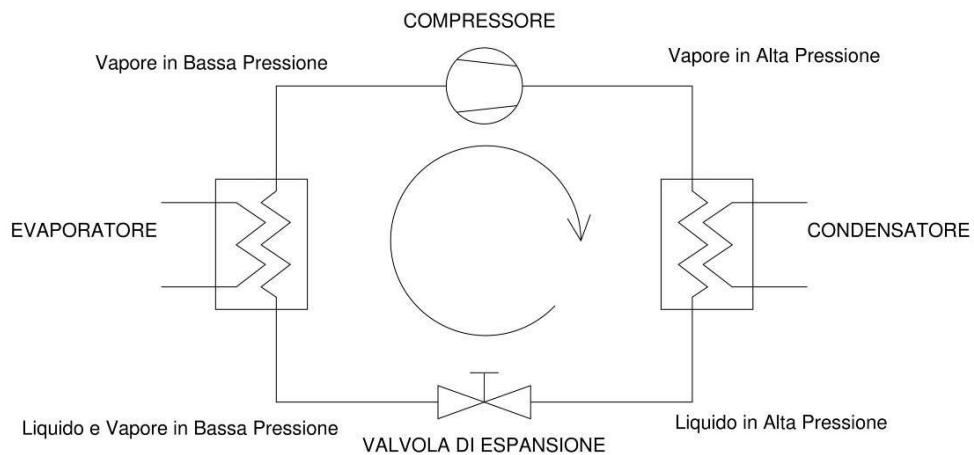


Figura 4 Schema di un impianto mono-stadio (Frigo Tecnica Internazionale SpA n.d.)

2. Impianto economizzato: è una tipologia di impianto generalmente utilizzato quando il salto di pressione è elevato, in quanto permette di avere una maggiore efficienza del ciclo termodinamico. È tuttavia più complesso, in quanto introduce un elemento funzionale, l'economizzatore, attraverso il quale una porzione di liquido proveniente dal condensatore evapora ad una pressione intermedia, permettendo di avere una più bassa temperatura del liquido in ingresso alla valvola di espansione. Il risultato netto della somma dell'energia spesa per la compressione della quota di vapore evaporato nell'economizzatore, e del maggior effetto utile come capacità frigorifera all'evaporatore, è sempre vantaggioso, migliorando l'efficienza del ciclo tanto più

quanto più alto è il salto di pressione. In particolare gli impianti economizzati si distinguono per il tipo di economizzatore utilizzato che può essere:

- 2.1 di tipo 'chiuso': il flusso della quota di refrigerante evaporato e quella della porzione di liquido da raffreddare sono separate, e per il raffreddamento si utilizza uno scambiatore di calore. Il liquido che entra nella valvola di espansione è alla pressione di condensazione, ma sottoraffreddato. Viene riportato di seguito in Figura 5 lo schema semplificato dell'impianto.

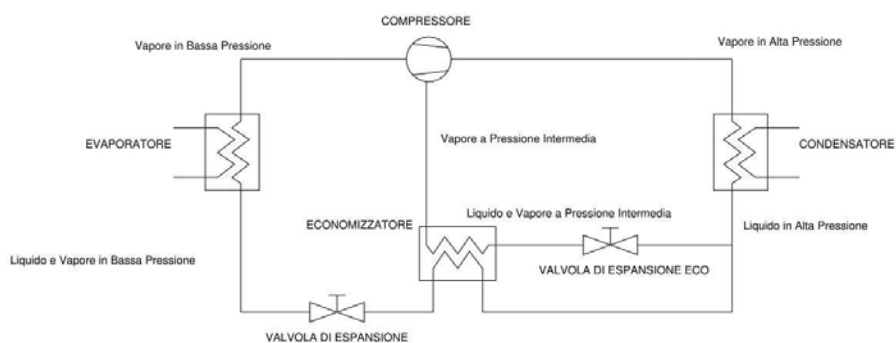


Figura 5 Schema di un impianto mono-stadio economizzato di tipo "chiuso" (Frigo Tecnica Internazionale S.P.A).

- 2.2 di tipo 'aperto': tutto il flusso di refrigerante proveniente dal condensatore evapora ad una pressione intermedia; attraverso un separatore di liquido la frazione di vapori viene separata per essere compressa, mentre il liquido a più bassa temperatura va alla valvola di espansione. Il liquido che entra nella valvola di espansione è alla pressione intermedia, saturo. In genere questo sistema permette una maggiore efficienza rispetto all'economizzazione di tipo chiuso. Viene riportato di seguito in Figura 6 lo schema semplificato dell'impianto.

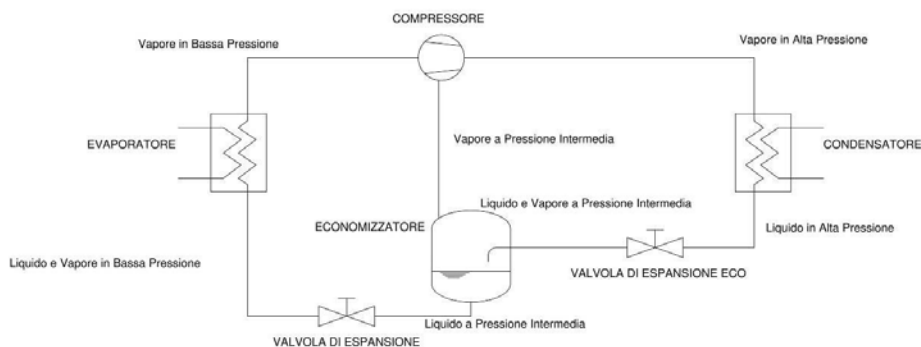


Figura 6 Schema di un impianto mono-stadio economizzato di tipo "aperto" (Frigo Tecnica Internazionale S.P.A).

- 3 Impianto bi-stadio: gli impianti bi-stadio si caratterizzano per avere la compressione divisa su due compressori, uno di bassa pressione (chiamato 'booster' appunto) ed uno di alta, e ciò permette di aumentare le prestazioni dell'impianto. Esistono diverse modalità per realizzare un impianto bi-stadio:
- 3.1 bi-stadio con economizzatore di tipo chiuso: si utilizza principalmente quando non si hanno carichi frigoriferi alla temperatura intermedia. Viene riportato di seguito in Figura 7 lo schema semplificato dell'impianto.

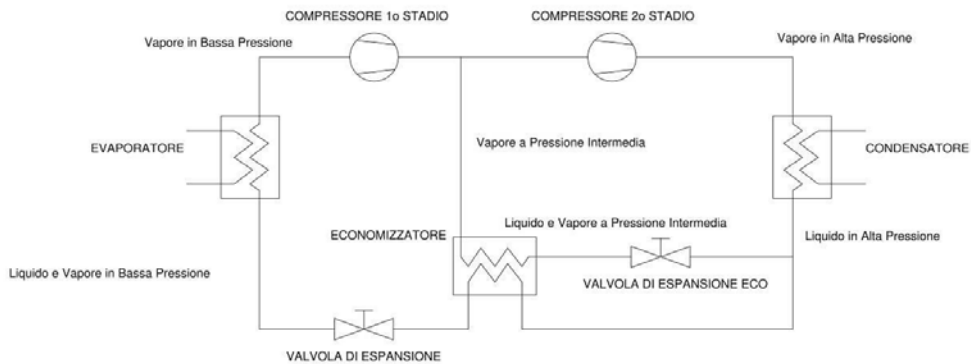


Figura 7 Schema di un impianto bi-stadio con economizzatore di tipo "chiuso" (Frigo Tecnica Internazionale S.P.A).

- 3.2 bi-stadio con economizzatore di tipo aperto: può essere usato anche con carichi frigoriferi alla temperatura intermedia; ha performance migliori del tipo "chiuso". Viene riportato di seguito in Figura 8 lo schema semplificato dell'impianto.

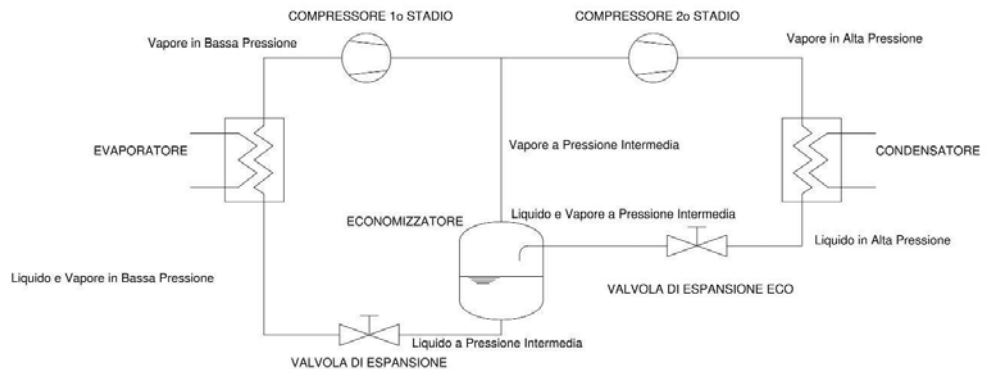


Figura 8 Schema di un impianto bi-stadio con economizzatore di tipo "aperto" (Frigo Tecnica Internazionale S.P.A).

3.3 bi-stadio con separatore di liquido e condensazione intermedia: si utilizza principalmente quando si hanno carichi frigoriferi significativi alla temperatura intermedia; ha performance equivalenti a quelle del tipo bi-stadio economizzato 'open flash'. Viene riportato di seguito in Figura 9 lo schema semplificato dell'impianto.

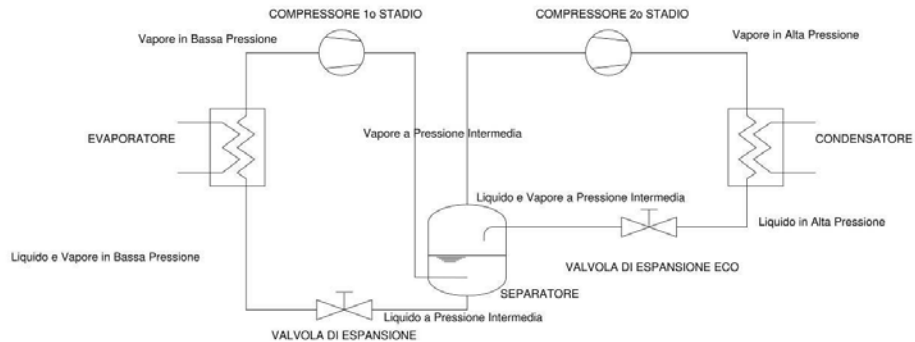


Figura 9 Schema di un impianto bi-stadio con separatore di liquido e condensazione intermedia (Frigo Tecnica Internazionale S.P.A).

4 Impianto in cascata: un impianto in cascata è sostanzialmente un impianto bi-stadio, simile al tipo descritto al par. 3.3, ma con la differenza che il circuito condensante del 1° stadio è separato dal circuito evaporante del 2° stadio, e lo scambio termico avviene per mezzo di uno scambiatore di calore. Il suo utilizzo è limitato ai casi in cui si debbano utilizzare per varie ragioni due fluidi diversi tra 1° e 2° stadio: un esempio tipico è quello dell'uso di anidride carbonica nel 1° stadio, abbinato ad ammoniaca nel 2° stadio. Viene riportato di seguito in Figura 10 lo schema semplificato dell'impianto

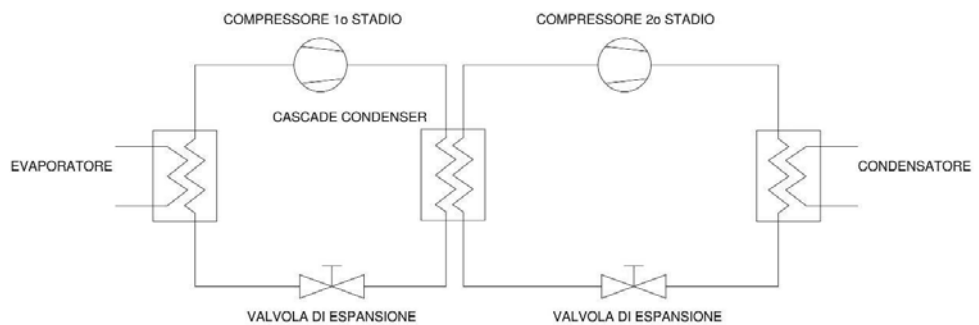


Figura 10 Schema di un impianto in cascata (Frigo Tecnica Internazionale S.P.A).

1.1.4. Valutazione dell'efficienza energetica nei sistemi di refrigerazione.

Una metodologia mirata all'aumento dell'efficienza energetica dei supermercati è stata sviluppata da un gruppo di ricercatori (Acha et al. 2016). Il loro lavoro mira a definire un indicatore di prestazione energetica (EPI) collegato alla refrigerazione, agli orari di apertura dei magazzini e alla temperatura esterna. Utilizzando tale indicatore, è possibile identificare i sistemi con scarso rendimento da un portafoglio immobiliare e quindi selezionare siti adatti per misure di risparmio energetico.

Lo studio parte con una caratterizzazione della domanda di energia di refrigerazione specificando i principali fattori che la guidano, come gli orari di apertura e l'intensità degli scambi. Sono stati quindi analizzati i fattori per la correlazione con la domanda di energia di refrigerazione e sono stati scelti i più rilevanti per costruire l'Energy Performance Indicator (EPI), che è stato quindi utilizzato per classificare un gruppo di negozi appartenenti alla stessa catena di supermercati.

Attualmente, l'indicatore più comune utilizzato per caratterizzare le prestazioni energetiche nei supermercati è l'indicatore di consumo energetico (EUI), ovvero il consumo totale di energia per area di vendita.

$$\text{Indicatore consumo energetico (EUI)} = \frac{\text{Consumo totale di energia (TEC)}}{\text{Area di vendita (SFA)}}$$

Per il settore della refrigerazione è spesso adottato il consumo totale di energia per area alimentare (TEC / FA) (Chung et al. 2006; Spyrou et al. 2014; Tassou et al. 2011).

$$\text{Indicatore consumo energetico (EUI)} = \frac{\text{Consumo totale di energia (TEC)}}{\text{Area alimentare (FA)}}$$

Questi indicatori sono di solito scelti perché si ritiene che l'area del piano di vendita e l'area alimentare rappresentino la dimensione dell'area dedicata alle cabine refrigerate, ulteriormente suddivisa in fattori che possono essere stabiliti solo quando si lavora in un nuovo edificio o si aggiorna un sito e quelli che possono essere condotti quando il sito è già in funzione.

Per questo lavoro (Acha et al. 2016) è stato scelto il carico collegato (CL). CL è il carico aggregato di refrigerazione, espresso in kW in condizioni di prova (25 °C, umidità del 60%) in tutti gli armadi del negozio e questo approccio non è stato applicato finora in letteratura.

Per giustificare il metodo legato a CL è stato utilizzato un campione di 25 supermercati della stessa azienda (siti di refrigerazione CO₂) per confrontare l'accuratezza della correlazione dei diversi indicatori. I dati di consumo energetico semestrali storici sono stati ottenuti dal sistema di monitoraggio energetico on-line dell'azienda mentre il carico aggregato dei pacchetti di refrigerazione per ogni negozio è stato ottenuto dal database di archivio ingegneristico.

Sulla base di questa analisi è stato sviluppato un indicatore di consumo energetico che comprende parametri come il carico connesso, gli orari di apertura e il CCD (cooling degree days, ovvero i giorni di raffreddamento). L'utilizzo totale di energia annuo per l'impianto di raffreddamento è stato normalizzato da un'equazione, calcolando il fattore di consumo energetico C_x per negozio.

$$C_x = \frac{E_{A,x}}{CL_x \times \{1 + (H_{T,x} - 14) \times 0,94\% \} \times \{1 + (CDD_x - 20,1) \times 2,8\% \}}$$

Dove $E_{A,x}$ (kWh) rappresenta il consumo annuale di refrigerazione ed è normalizzato da:

- CL_x (kW), il carico aggregato del sistema di refrigerazione
- $\{1 + (H_{T,x} - 14) \times 0,94\% \}$ la normalizzazione per l'orario di apertura, dove $H_{T,x}$ sono le ore di apertura settimanali del negozio x e 14 sono le ore di apertura giornaliera del negozio test
- $\{1 + (CDD_x - 20,1) \times 2,8\% \}$, la normalizzazione del CDD, dove CDD_x è il CDD medio annuale e 20,1 è il CDD medio annuo presso il negozio test.

L'indicatore di consumo di energia I_x è ottenuto confrontando C_x per il negozio x contro lo stesso valore del negozio test C_{test} secondo la seguente equazione:

$$I_x = \frac{C_x}{C_{test}}$$

Questo indicatore, permette agli ingegneri di effettuare un confronto energetico più equo tra i negozi, considerando tre variabili non gestibili come il carico di refrigerazione, gli orari di apertura e le condizioni atmosferiche. Si è scoperto che per ogni ora di apertura supplementare in un supermercato, vi è un aumento dello 0,94% del consumo di energia. Allo stesso modo, per ogni aumento di grado della temperatura esterna si riscontra un aumento di consumo di energia di refrigerazione del 2,8%.

Questa metodologia di valutazione dell'efficienza energetica rappresenta indubbiamente un esempio e uno spunto da cui poter partire per ricavare una classificazione energetica degli impianti di refrigerazione.

Esistono altri esempi in letteratura che individuano i parametri che svolgono un ruolo importante per il consumo energetico finale dei supermercati.

(Mossad 2011) sottolinea la grande rilevanza delle fasi di progettazione, messa in servizio e manutenzione per ridurre il consumo di energia nelle celle frigorifere. (Evans et al. 2015) ha calcolato, attraverso un'indagine, il rapporto tra il volume del negozio e l'energia totale utilizzata per anno sia per i negozi refrigerati, sia per i negozi per cibi surgelati e negozi misti. I dati dell'indagine hanno dimostrato differenze di consumi tra celle frigorifere refrigerate, congelate e ad uso misto.

Il volume di stoccaggio era il fattore dominante legato all'energia utilizzata dalle celle frigorifere. È stato riscontrato che il volume della cella frigorifera ha la più grande relazione con il consumo di energia. Per le celle frigorifere refrigerate, il 93% della variazione di energia era correlata al volume massimo. Per i negozi congelati, 56% e per i negozi misti, il 67% della variazione del consumo di energia era correlata al volume dei negozi. I risultati hanno anche dimostrato la grande variabilità nelle prestazioni delle celle frigorifere. Ciò potrebbe essere stato dovuto a una serie di fattori che influenzano il consumo di energia, che a loro volta avevano un'elevata correlazione con il volume. Le seguenti figure, tratte dalla ricerca di Evans et al.2015 mostrano il rapporto tra il volume del negozio e l'utilizzo totale di energia per anno (kWh/anno) per i negozi congelati, misti e refrigerati.

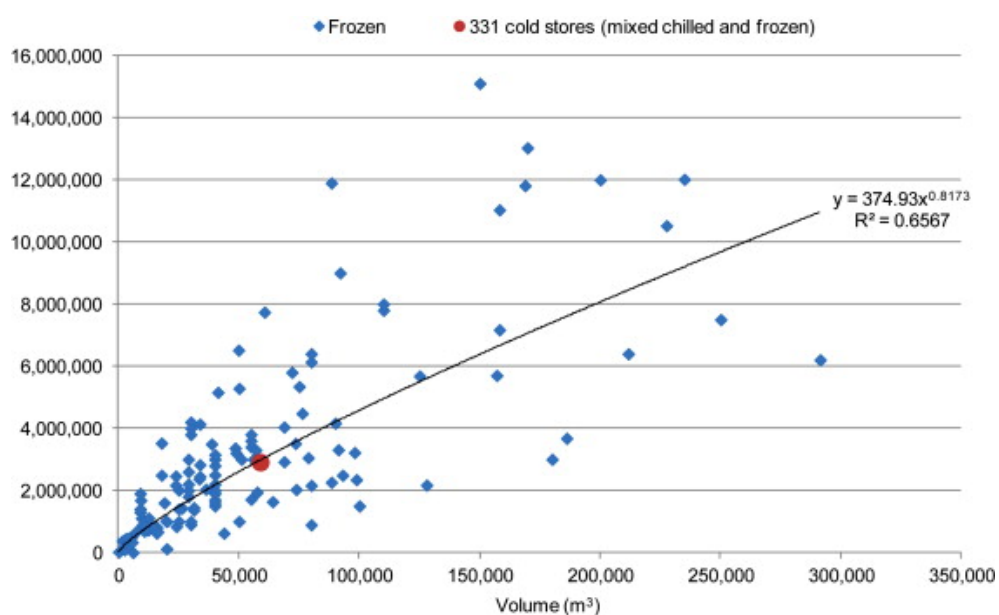


Figura 11 Rapporto tra volume del negozio e consumo totale di energia all'anno (kWh / anno) per i magazzini congelati (regressione non lineare) (Evans et al. 2015).

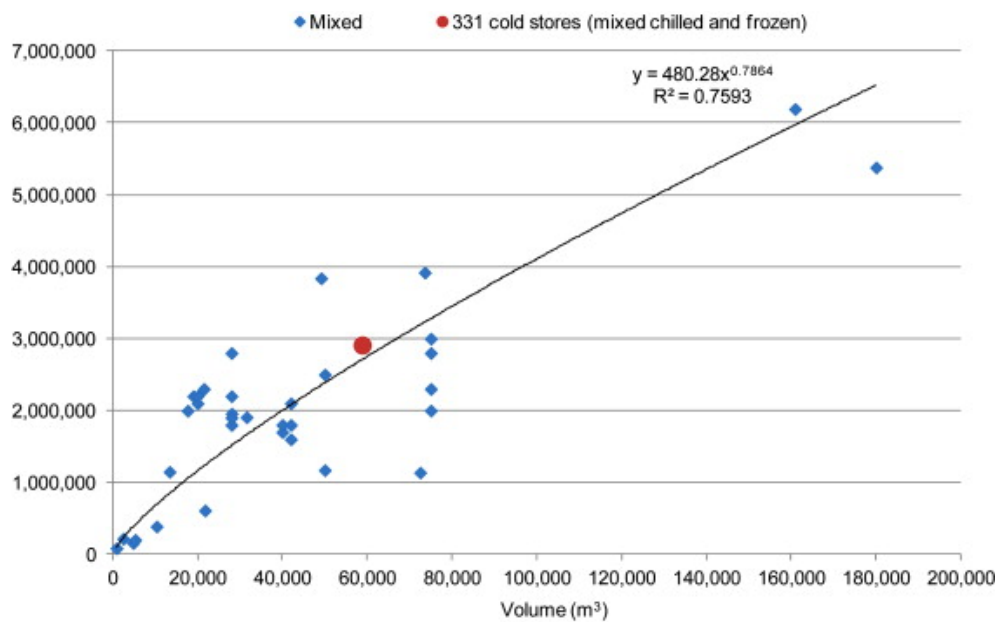


Figura 12 R Rapporto tra volume del negozio e consumo totale di energia (kWh / anno) per magazzini misti (regressione non lineare) (Evans et al. 2015).

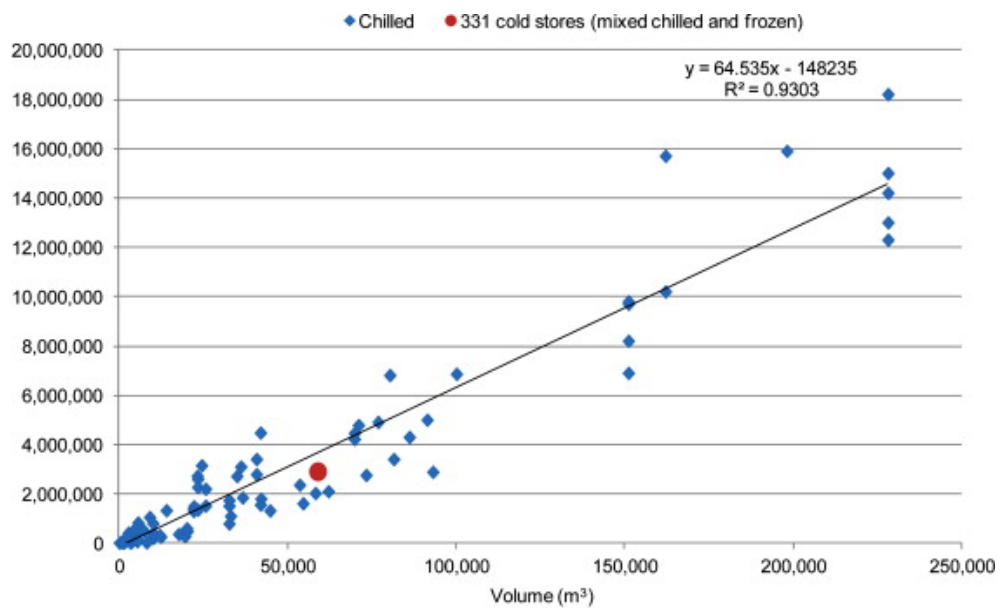


Figura 13 Rapporto tra volume del negozio e consumo totale di energia all'anno (kWh / anno) per i magazzini refrigerati (Evans et al. 2015)

Sempre in ambito europeo, il tema dei risparmi energetici nei magazzini frigoriferi, è stata affrontata per mezzo del progetto ICE-E (miglioramento delle attrezzature di stoccaggio a freddo in Europa)(Foster et al. 2016), che, affiancato da 8 partners provenienti da tutta Europa ha esaminato i metodi per ridurre il consumo di energia migliorando le prestazioni dei magazzini frigoriferi.

Lo scopo iniziale del progetto era quello di raccogliere dati, per mezzo di un questionario, per valutare le prestazioni delle celle frigorifere in Europa. Da questo sono state selezionate una serie di celle frigorifere per un controllo dettagliato per determinare quanta energia poteva essere risparmiata, aree con problemi comuni e le iniziative che potevano essere attuate per risparmiare energia. Ventotto audit energetici dettagliati sono stati effettuati dai partner ICE-E. I siti di audit sono stati selezionati per fornire una vasta gamma di celle frigorifere in termini di impostazione della temperatura, volume, prodotti conservati, refrigeranti e ubicazione.

Gli audit effettuati hanno dimostrato che i risparmi erano realizzabili in tutti i negozi esaminati. Il livello di risparmio variava considerevolmente senza che nessun problema prevalesse. I potenziali risparmi energetici variano ampiamente con le questioni relative al controllo del sistema di refrigerazione, dell'illuminazione, dell'isolamento e della manutenzione, garantendo il massimo risparmio energetico. Il ventiquattresimo per cento dei risparmi potrebbe essere identificato da un gestore di magazzini frigoriferi ragionevolmente capace e un ulteriore 43% dal loro energy manager. Ciò ha evidenziato la necessità di verifiche periodiche del funzionamento del sistema di refrigerazione per verificare i punti di regolazione, il surriscaldamento, il sottoraffreddamento e i controlli.

Alcuni di questi potrebbero essere automatizzati e molti dei problemi identificati negli audit potrebbero essere semplicemente evidenziati ai gestori di magazzini frigoriferi attraverso sistemi di monitoraggio automatizzati.

Di gran lunga la maggior parte dei risparmi identificati ha avuto ritorni minori di 3 anni. Tuttavia, il periodo di recupero per ciascun problema identificato variava considerevolmente e poteva variare dall'essere un'opzione molto economica al non essere economicamente fattibile.

Pertanto non è stato possibile affermare inequivocabilmente che alcune tecnologie fossero economicamente più interessanti di altre poiché era necessario un uso continuo per quantificare pienamente i risparmi energetici che si potevano ottenere. Il risultato complessivo di questo studio dimostra che la consulenza generica è di uso limitato agli operatori dei magazzini frigoriferi. Ogni cella frigorifera deve essere valutata singolarmente per ottimizzare completamente le prestazioni e massimizzare il risparmio energetico.

(Kolokotroni et al. 2019) nel loro lavoro hanno esaminato e riepilogato i dati recenti disponibili nel Regno Unito e li hanno confrontati poi con i dati della letteratura del Regno Unito e di altri Paesi.

I recenti dati sui supermercati nel Regno Unito indicano una riduzione del consumo di energia, e questo è attribuito a una gamma di installazioni ad alta efficienza energetica per la refrigerazione, l'illuminazione, i sottosistemi di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria (HVAC) e la progettazione degli involucri edilizi.

I dati aggregati indicano un'intensità energetica di 565 kWh/m²/anno per i grandi supermercati; questo potrebbe essere inferiore a 400 kWh /m²/anno. L'analisi dei dati delle

singole catene e negozi indica tendenze simili con ulteriori riduzioni negli ultimi 3-4 anni. I piccoli supermercati (che consumano più energia) sono stati modellati come un caso-studio, dimostrando che la scelta del sistema di refrigerazione ha un impatto significativo sull'energia consumata da altri sottosistemi, che potrebbe condizionare la scelta del combustibile utilizzato per il riscaldamento in relazione ai costi. La relazione tra i prodotti congelati / refrigerati / a temperatura ambiente e la posizione del supermercato (urbano / rurale) influisce sul consumo di energia a seconda del sistema di refrigerazione. È stato dimostrato quindi che l'intensità energetica è stata ridotta nei grandi supermercati (> 750 m²) negli ultimi anni, il che è coerente con le riduzioni in altri paesi a causa dell'installazione di tecnologie ad alta efficienza energetica per tutti i sottosistemi (refrigerazione, HVAC, illuminazione ed edilizia).

(Foster et al. 2019) nel loro lavoro hanno analizzato i dati sul consumo di energia di 190 supermercati di un rivenditore nel Regno Unito integrando uno studio precedente su negozi più grandi (Foster et al. 2018).

In questo lavoro è stata studiata la relazione tra consumo di energia e dimensioni del negozio. L'intensità energetica media definita dalla relazione tra il consumo di elettricità attraverso la superficie di vendita è stata di 866 kWh.m⁻²a⁻¹ per un'area di vendita media di 469 m². Tracciare l'intensità energetica rispetto alle dimensioni del negozio ha mostrato che i negozi più piccoli avevano un'intensità energetica maggiore. La misurazione dell'intensità energetica utilizzando il consumo di elettricità, il consumo totale di energia, le vendite o l'area lorda, l'area perimetrale del negozio e il volume del negozio hanno tutti mostrato una tendenza simile. Il consumo di elettricità è ben correlato alla capacità di refrigerazione ($r^2 = 0,779$), tuttavia presenta una correlazione leggermente migliore con l'area del piano di vendita ($r^2 = 0,833$). Quando si includono questi dati con altri dati di studi precedenti, si può vedere che i grandi magazzini (supermercati) avevano un'intensità energetica approssimativamente costante (diminuendo leggermente con l'aumentare della superficie) e i negozi più piccoli (convenienza) avevano un'intensità energetica molto più alta che aumenta fortemente con la riduzione della superficie del pavimento.

1.1.5. Efficienza energetica e normativa.

Nel campo dell'efficienza energetica dell'industria e nel settore dei servizi l'Unione Europea si è adoperata attraverso strumenti innovativi per il miglioramento dell'efficienza energetica, necessari per raggiungere l'obiettivo di una riduzione del 20% del consumo di energia primaria entro il 2020 (UE 2012).

In Italia, la direttiva 2012/27/UE è stata recepita con un decreto legislativo, 102/2014 (DL 102/2014 2014), che definisce una serie di misure per la promozione ed il miglioramento dell'efficienza energetica volte a ridurre il consumo finale di energia sul territorio nazionale. Per raggiungere tale obiettivo introduce una serie di misure e identifica alcuni strumenti come Energy Audit (EA) e Energy Management Systems (EMS).

L'EA è una procedura sistematica in grado di fornire una conoscenza adeguata del contatore di energia di un edificio, di un gruppo di edifici di un'azienda, di un impianto industriale o di

servizi pubblici / privati e quindi identificare e quantificare le opportunità di risparmio energetico secondo un'analisi costi-benefici.

Lo scopo di EA è quello di fornire una descrizione del sistema energetico di un'organizzazione e quindi evidenziare i possibili interventi per migliorare l'efficienza e elaborare l'effettivo risparmio.

Il decreto 102/2014 rende obbligatoria la diagnosi energetica (o audit energetico) per due tipologie di organizzazioni industriali:

- aziende che impiegano più di 250 dipendenti (calcolati in base alle indicazioni contenute nel Dm 18 aprile 2005) oppure che hanno un fatturato annuo superiore a 50 milioni di euro o un bilancio annuale di oltre 43 milioni di euro. Il calcolo di questi parametri deve tener conto anche delle aziende associate o collegate. Un'impresa è "associata" quando detiene, da sola o con più imprese collegate, una partecipazione uguale o superiore al 25% del capitale (o dei diritti di voto) di un'altra impresa e/o è partecipata da altra impresa per le medesime percentuali. Per valutare se un'impresa è soggetta obbligato, essa deve sommare ai propri dati (dipendenti, fatturato, totale di bilancio) i medesimi dati dell'impresa associata in proporzione alla percentuale della partecipazione. Un'impresa è invece "collegata" se controlla, direttamente o indirettamente, un'altra impresa, poiché ne detiene la maggioranza dei diritti di voto o ne esercita un'influenza dominante. In questo caso per valutare se l'impresa è soggetta obbligato, deve sommare ai propri dati (dipendenti, fatturato, totale di bilancio) a quelli dell'impresa collegata
- aziende energivore, cioè ad alta intensità energetica comprese nella lista CSEA (Cassa per i Servizi Energetici Ambientali) delle imprese energivore, in quanto rispondenti ai seguenti tre criteri:
 - utilizzo di almeno 2,4 GWh di energia elettrica nell'anno di riferimento;
 - rapporto tra costo effettivo dell'energia elettrica e fatturato pari almeno al 2%;
 - un codice Ateco prevalente riferito ad attività manifatturiera.Si tratta di oltre 6.900 aziende italiane: 5.300 grandi imprese e 1.600 aziende ad alta intensità energetica. Quasi tutte (circa il 95%) hanno svolto l'audit energetico del 2015. Sono esonerate dall'obbligo le aziende che hanno implementato un Sistema di Gestione conforme a Emas, ISO 50001 o En ISO 14001 che include un audit energetico conforme al d.lgs. n. 102/2014.

Sebbene le PMI (Piccole e Medie Imprese) siano esentate ai sensi del presente decreto: possono ottenere incentivi per l'EA e per l'adozione delle certificazioni EMS e ISO 50001 attraverso la pubblicazione di un avviso specifico da parte del MSE (Ministero dello sviluppo economico),(Bonacina et al. 2015).

L'EA dovrebbe essere programmato secondo le seguenti 4 fasi da eseguire in ordine sequenziale: razionalizzazione dei flussi di energia; identificazione di tecnologie di risparmio energetico; recupero di energia sprecata; ottimizzazione dei contratti di fornitura di energia. Nella pianificazione di EA devono essere presi in considerazione i seguenti aspetti: costo specifico dell'energia risparmiata; dimensioni delle attrezzature; ore all'anno di utilizzo di capacità; durata prevista delle apparecchiature; negligenza progettuale, realizzazione,

gestione di impianti e attrezzature; costo del denaro e budget disponibile. Il primo passo, in preparazione al raggiungimento di qualsiasi obiettivo di razionalizzazione, budget di costruzione e modelli di energia elettrica / termica adeguati al contesto. Per costruire un modello energetico per effettuare un'indagine, è necessario un censimento di tutte le apparecchiature elettriche (termiche). Per ogni utente è necessario trovare informazioni su: numero di unità di equipaggiamento; potenza installata; valutazione del carico di base; ore / giorno, giorno / mese e mese / anno di funzionamento.

La diagnosi energetica è eseguita attraverso la messa a punto della struttura energetica aziendale distinta per ogni vettore energetico che, attraverso un percorso strutturato a più livelli, consente di avere un quadro completo ed esaustivo della realtà dell'impresa. La realtà aziendale viene strutturata in diverse parti, o aree funzionali secondo le linee proposte dal Ministero dello Sviluppo Economico. (Ministero Sviluppo Economico 2016).

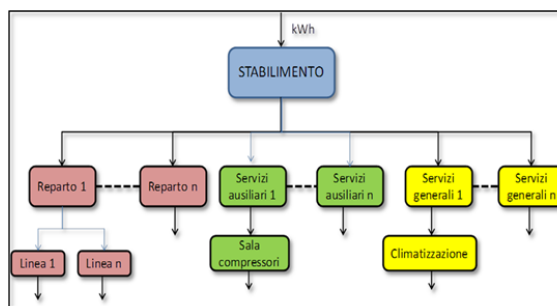


Figura 14 Esempio di struttura energetica aziendale (Ministero Sviluppo Economico 2016).

La diagnosi energetica individua i seguenti dati e informazioni (valori aggregati annuali):

- dati generali dell'azienda (denominazione sociale, P.IVA, ubicazione sede, numero dipendenti, fatturato, ecc.)
- consumi energetici (espressi in kWh e in tep) per ogni vettore energetico utilizzato, e in particolare:
 - i) per le aziende produttive:
 - produzione distinta per macro tipologia di prodotto ed espressa secondo la grandezza predefinita per specifico settore merceologico;
 - peso energetico comparativo tra le varie tipologie di prodotto;
 - ii) per le aziende di servizi:
 - dati identificativi del servizio offerto secondo i criteri predefiniti per specifico settore merceologico;
- indice prestazionale aziendale dato dal rapporto tra i consumi complessivi e la media della specifica destinazione d'uso dell'azienda, ovvero produzione o servizio;

- organizzazione dell'attività aziendale, evidenziando le attività principali (ovvero reparti produttivi per le realtà industriali), servizi ausiliari (attività asservite a quelle principali) e servizi generali (attività non strettamente correlate a quelle principali) con annesse prescrizioni (es. livelli di luminosità, condizioni di climatizzazione);
- planimetria aziendale con indicazione logistica delle varie aree funzionali.

La diagnosi energetica individua inoltre, per ogni area funzionale in cui è stata articolata la struttura energetica aziendale, i seguenti dati e informazioni (valori aggregati annuali):

- consumi energetici (espressi in kWh e in tep) per ogni vettore energetico utilizzato;
- caratterizzazione della destinazione d'uso della specifica area funzionale;
- indice prestazionale di area (Ipa1) dato dal rapporto tra i consumi di area e la specifica destinazione d'uso;
- indice prestazionale di area (Ipa2) dato dal rapporto tra i consumi di area e la destinazione d'uso dell'azienda;

Nota a margine:

l'acquisizione degli indici Ipa1 e Ipa2 consente di avere indicazioni sul livello di prestazionale della specifica area funzionale e il suo peso energetico rispetto al totale dell'azienda, nonché della correlazione della specifica destinazione d'uso su quella complessiva.

Esempio: area funzione coincidente con la sala compressori di una realtà industriale

- Ipg (indice prestazionale generale) = 100 kWh/ton
- Ipa1 = 0,160 kWh/Nmc
- Ipa2 = 20 kWh/ton
- Ipa3 = Ipa2/Ipa1 = 125 Nmc/ton

Le considerazioni che ne scaturiscono sono le seguenti:

- la sala compressori ha un livello prestazionale non allineato con il mercato (valore BAT = 0,130 kWh/Nmc)
- il peso energetico della sala compressore è rilevante (20% del totale);
- il fabbisogno di aria compressa (125 Nmc/ton) va verificato con le varie utenze asservite dalla sala compressori.

- mappatura dei macchinari e degli impianti che caratterizzano la specifica area funzionale;
- confronto delle tecnologie utilizzate con lo standard di mercato

Il livello di dettaglio della struttura energetica aziendale, ovvero la suddivisione in aree funzionali, dipende dalla dimensione energetica della specifica area funzionale. In altri termini l'analisi di dettaglio si ferma quando la dimensione energetica dell'area funzionale in esame è inferiore al 5% dei consumi energetici totali dell'azienda. Nel caso di non disponibilità dei dati di monitoraggio di dettaglio, la ripartizione dei consumi oppure la determinazione delle grandezze energetiche intermedie sarà fatta in base ai dati tecnici e di utilizzo dei vari impianti e/o attività di monitoraggio con strumentazione portatile. Una volta definito l'insieme delle aree funzionali e determinato il peso energetico di ognuna di esse a

mezzo di valutazioni progettuali e strumentali, si dovrà definire l'implementazione del piano di monitoraggio permanente in modo sia da tener sotto controllo continuo i dati significativi del contesto aziendale, che per acquisire informazioni utili al processo gestionale e dare il giusto peso energetico allo specifico prodotto realizzato o al servizio erogato. In relazione al fatto che la struttura energetica aziendale permette di individuare le aree funzionali più efficienti o di spreco, la diagnosi energetica si completa con la messa a punto di un percorso virtuoso, in termini di interventi di efficienza energetica, tale da ridurre i fabbisogni energetici a parità di destinazione d'uso, e quindi creare i presupposti per una maggiore competitività dei prodotti e per l'erogazione di servizi migliori.

Il lavoro condotto da (Tallini, A. e Cedola 2016), è incentrato - sulla base dell'efficientamento energetico promosso dal (DL 102/2014 2014) - sulla valutazione degli Ipe (Indici di prestazione energetica), a partire dalle valutazioni di fattibilità e mira a stabilire una correlazione tra Ipe e un numero limitato di parametri dei sistemi energetici, in termini di produzione, funzionamento e consumo di energia.

Il campione analizzato, tra i supermercati italiani, ha dimensioni comprese tra 700 e 5.000 m² di area di vendita (supermercati medi). Sotto i 700 m² si trovano spesso contatori freschi autonomi, con una potenza specifica più elevata e per i quali vi è una sostituzione impraticabile dei motori del compressore, sia per i vincoli tecnici che per il basso ritorno economico. È stata rilevata una dipendenza tra la potenza dei gruppi di compressione delle apparecchiature di refrigerazione installate e le aree di vendita dei suoi supermercati.

Il COP di ciascun gruppo di compressione è considerato uguale a 2.6 (valore costante). Per ogni supermercato sono stati considerati 4 tipi di sistemi di raffreddamento, relativamente allo studio del legame tra la superficie del supermercato e la potenza dei compressori: celle frigorifere per temperatura positiva (CRPT), celle frigorifere per temperatura negativa (CRNT), temperatura normale impianti di refrigerazione (NTRP) e impianti di refrigerazione a bassa temperatura (LTRP). L'analisi si concentra su un supermercato di 1.500 m². Per ogni azione proposta e secondo gli Ipe stimati secondo la metodologia, lo strumento di simulazione energetica (EST), fornisce un valore stimato della capacità di raffreddamento e del consumo energetico annuale. Per i sistemi di refrigerazione vengono valutati 4 diversi Ipe: CRPT (9,59 kWh / m² / anno); CRNT (21,71 kWh / m² / anno); NTRP (257,60 kWh / m² / anno); LTRP (116,59 kWh / m² / anno).

Partendo dal presupposto che ogni centrale elettrica viene adattata e dimensionata in base all'attività svolta e conforme alle attuali norme tecniche, l'algoritmo è in grado di valutare gli Ipe inserendo il valore di alcuni parametri quali: destinazione d'uso; tipo e dimensioni dell'edificio. Dall'elaborazione dei dati, sono stati determinati la potenza installata e il fattore di utilizzo delle installazioni. I valori di Ipe, ottenuti attraverso procedure deduttive, approssimazioni, considerazioni tecniche e statistiche, sono stati inevitabilmente influenzati da errori. Tramite lo strumento di simulazione energetica (EST), il consumo di energia può essere previsto sulla base di un numero limitato di parametri.

Sulla base della letteratura esistente, l'obiettivo del lavoro affrontato in questo documento è quello di definire una metodologia per il miglioramento degli indici di prestazione energetica di aziende operanti nel settore della catena del freddo alimentare attraverso la modellazione e la simulazione degli impianti di refrigerazione.

A tale proposito è stata condotta un'indagine statistica tra le aziende italiane operanti nel settore della catena del freddo alimentare, attraverso un questionario informativo, riguardante

nello specifico le caratteristiche dell'impianto di refrigerazione con lo scopo di definire le prestazioni effettive dei sistemi esistenti. L'indagine statistica mira a stabilire una baseline delle tecnologie presenti oggi nel panorama industriale nazionale e definire una soglia sopra la quale un sistema si consideri efficiente.

Successivamente è stata proposta una metodologia per la modellazione e la simulazione degli impianti di refrigerazione industriale e per la definizione degli indicatori di prestazione energetica (IPE) avendo a disposizione solo una quantità relativa di dati in input.

La definizione degli indicatori di prestazione energetica è il primo passo per definire il consumo di energia di un impianto e fornire un'indicazione generale delle prestazioni energetiche e consentire di identificare le aree di inefficienza da integrare e riqualificare.

La stessa metodologia permette di investigare eventuali soluzioni tecnologiche innovative per migliorare l'efficienza energetica soprattutto in termini di consumi in bolletta.

Nel capitolo finale, a validazione della metodologia, sono stati inseriti 8 casi studio. I casi sono stati modellati con i dati delle otto aziende italiane operanti nel settore della catena del freddo ottenuti per mezzo dell'indagine descritta nel secondo capitolo di questo documento.

Gli impianti delle otto aziende sono stati simulati utilizzando la metodologia proposta, sia nella condizione attuale che nella condizione di miglioramento tecnologico, evidenziando di conseguenza l'effettiva riduzione dei consumi di energia elettrica.

Capitolo 2.

Indagine

2.1. Realizzazione del questionario somministrato alle aziende

2.1.1 Realizzazione questionario somministrato alle aziende

Come accennato nel capitolo precedente, è stata condotta un'indagine tra le aziende italiane operanti nel settore della catena del freddo alimentare con lo scopo di definire le prestazioni effettive dei sistemi esistenti ed identificare le aree con i problemi più comuni e dove è possibile risparmiare gran parte dell'energia elettrica. Queste azioni hanno lo scopo di incoraggiare i proprietari delle industrie ad intraprendere iniziative di efficienza energetica, come l'installazione di nuove tecnologie e attrezzature.

A tal fine, un questionario simile a quello utilizzato nel progetto ICE-E (Foster et al. 2016) sull'efficienza energetica è stato proposto alle aziende italiane sopra indicate. Poiché l'interesse principale del presente lavoro è stato quello di stabilire una base per le configurazioni degli impianti della catena del freddo in Italia e i relativi gradi di miglioramento, alcune domande del questionario originale sono state modificate di conseguenza.

L'audit è iniziato a luglio 2018 ed è stato sviluppato utilizzando un'applicazione web di Google Modules. I dati acquisiti per mezzo di questa indagine sono stati utilizzati esclusivamente ai fini della ricerca accademica, aggregati, trattati in forma anonima e salvati in un database di Google. Il sondaggio ha permesso ai partecipanti, proprietari di celle frigorifere, di registrare inizialmente i propri dati e quindi di inserire i dati relativi a tutti i sistemi di refrigerazione desiderati in modo tale da poter raccogliere informazioni per singolo sistema di refrigerazione.

Il questionario è stato progettato per essere semplice da utilizzare, quindi anche in assenza di energy manager all'interno dell'azienda, un operatore di celle frigorifere attraverso una quantità limitata di dati dovrebbe impiegare poco tempo per completarlo.

Il link al questionario è stato inviato alle aziende tramite mail, dopo questo primo contatto sono stati inviati ulteriori fogli di lavoro approfonditi per ricevere informazioni più dettagliate. Gli audit sono stati selezionati per coprire diverse località, dimensioni, tipi e usi in modo tale da avere a disposizione una più vasta quantità di dati.

2.1.2 Questionario generale

Il primo questionario inviato alle aziende, come accennato precedentemente, è composto da alcune domande generiche ed altre più specifiche, riguardanti sia lo stabilimento industriale che il sistema di refrigerazione.

L'ubicazione dello stabilimento è fondamentale non solo per inquadrare l'azienda ma soprattutto per definire in maniera più precisa la temperatura esterna dell'ambiente ai fini della modellazione degli scambiatori di calore.

Altre informazioni come il volume, la superficie e la temperatura delle varie aree occorrono per differenziare i vari ambienti all'interno dello stabilimento, come l'area dedicata alla produzione e quella dedicata allo stoccaggio e alla conservazione dei cibi.

Lo stoccaggio medio annuo e la movimentazione in ingresso e in uscita dei vari prodotti alimentari nelle diverse temperature considerate nello studio, sono legate alle differenti aree sopra indicate e occorrono ad identificare i diversi carichi negli impianti di refrigerazione e le temperature di evaporazione stabilite.

Per incoraggiare i proprietari delle aziende ad intraprendere iniziative di efficienza energetica è necessario avere una chiara idea sullo stato dello stabilimento, in particolare l'età della struttura, e sulla quota che i proprietari sarebbero disposti ad investire, in proporzione al fatturato, per innovazioni tecnologiche all'impianto di refrigerazione e ai suoi componenti.

La prima sezione del questionario riguarda l'acquisizione di informazioni sulla struttura dello stabilimento mentre, la seconda sezione, verte sul sistema di refrigerazione e le sue caratteristiche.

Le domande sono state studiate e scelte al fine di ottenere una qualità e una quantità di dati necessari per identificare l'impianto di refrigerazione nelle sue caratteristiche basilari e nei suoi consumi annuali in termini di kWh/anno.

Informazioni come:


- La potenza elettrica nominale fornita dalla compagnia elettrica;
- La potenza elettrica installata per l'intero impianto frigorifero;
- La potenza elettrica installata per i compressori;
- L'elettricità totale utilizzata nell'impianto di refrigerazione.

Sono necessarie per avere una percezione della grandezza dell'impianto e per conoscere i consumi annuali in termini di bolletta del solo impianto frigorifero, distinto dai consumi elettrici generali dello stabilimento.

Le caratteristiche dell'impianto di refrigerazione sono ricavabili da questa serie di quesiti:

- Fluidi refrigeranti utilizzati, tra ammoniaca, HFC da specificare (etc.);
- Quantità indicativa del refrigerante primario;
- Fluidi refrigeranti secondari;
- Tipo di condensazione, se ad aria, ad acqua di pozzo, torre evaporativa o condensatore evaporativo;
- Tipologia di ciclo frigorifero, a singolo stadio, a doppio stadio, a singolo stadio economizzato o ciclo in cascata;
- Eventuale presenza di pompe di calore integrate con il ciclo frigorifero;
- Potenza termica dell'evaporatore.

Le figure riportate di seguito mostrano il primo questionario inviato alle aziende con le relative domande, diviso in due parti.



**UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE**

EFFICIENZA ENERGETICA PER LA REFRIGERAZIONE

In questa sezione verranno trattate le informazioni base sulla struttura dello stabilimento

Informazioni base sulla struttura dello stabilimento

Anna Lauri
dottoranda di ricerca @ UNIVPM
a.lauri@pm.univpm.it

1. IDENTIFICAZIONE DELLO STABILIMENTO

2. UNITA' PRODUTTIVA

3. REGIONE

4. Volume d'affari annuo (mln)
Contrassegna solo un ovale.

2 mln

< 10 mln

< 50 mln

>50 mln

5. Superficie totale stabilimento (mq)

6. Volume totale stabilimento (mc)

7. Area dello stabilimento dedicata alla produzione (mq)

8. Volume dello stabilimento dedicato alla produzione (mc)

9. Temperatura ambiente dello stabilimento dedicato alla produzione (°C)

10. Area dello stabilimento dedicata allo stoccaggio (mq)

12. Temperatura ambiente dello stabilimento dedicato allo stoccaggio (°C)

13. Numero e tipologia dei surgelatori installati
Seleziona tutte le voci applicabili.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	>10
a spirale	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
a piastre	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
statico	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
a letto fluido	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

14. Età dello stabilimento (anni)
Contrassegna solo un ovale.

5 - 10

10 - 20

> 20

15. Quota investimenti nei prossimi 5 anni in proporzione al fatturato *Contrassegna solo un ovale.*

0-3%

4%-6%

>6%

16. Movimentazione ingresso materie prime alimentari e finiti [t/anno a temp. ambiente]

17. Movimentazione ingresso materie prime alimentari e finiti [t/anno di fresco (0/+4°C)]

18. Movimentazione ingresso materie prime alimentari e finiti [t/anno di congelato (-18°C)]

19. Stoccaggio medio annuo [t/anno di fresco (0/+4°C)]

Figura 15 Questionario somministrato alle aziende Italiane, parte 1

Informazioni base sul sistema di refrigerazione

20. Stoccaggio medio annuo [t/anno di congelato (-18°C)]
- _____
21. Movimentazione uscita prodotti alimentari [t/anno a temp. ambiente]
- _____
22. Movimentazione uscita prodotti alimentari [t/anno di fresco (0/+4°C)]
- _____
23. Movimentazione uscita prodotti alimentari [t/anno di congelato (-18°C)]
- _____
24. Potenza elettrica nominale fornita dalla compagnia elettrica (kWe)
- _____
25. Potenza elettrica installata per l'intero impianto frigorifero (kWe)
- _____
26. Potenza elettrica installata per i compressori (kWe)
- _____
27. Elettricità totale utilizzata nell'impianto di refrigerazione (kWh/anno)
- _____
28. Nello stabilimento è presente una sala macchine frigorifere o si utilizza un sistema distribuito? Indicare il numero di sale macchine e di unità motocondensanti presenti.
- _____
29. Fluidi refrigeranti utilizzati
Contrassegna solo un ovale.
- Ammoniaca
- CO2
- HFC
- Altro: _____
30. Quantità indicativa del refrigerante primario (kg)
- _____
31. Fluidi refrigeranti secondari
Contrassegna solo un ovale.
- nessuno
- acqua
- acqua con glicole (PG)
- acqua con glicole (EG)
- Altro: _____
32. Tipo di condensazione
Contrassegna solo un ovale.
- ad aria
- ad acqua di pozzo
- torre evaporativa
- condensatore evaporativo
33. Tipologia di ciclo frigorifero
Contrassegna solo un ovale.
- singolo stadio
- doppio stadio booster
- singolo stadio economizzato
- ciclo in cascata
34. Sono presenti pompe di calore integrate con il ciclo frigorifero? *Contrassegna solo un ovale.*
- sì
- no
- non lo so
35. Potenza termica all'evaporatore?
- _____

Figura 16 Questionario somministrato alle aziende Italiane, parte 2

2.1.3 Questionario con approfondimenti

Una volta ricevuto il primo questionario compilato dalle aziende riguardante le informazioni generali dello stabilimento e del sistema di refrigerazione, è stato inviato, per mail, un secondo questionario in formato Excel con approfondimenti riguardanti in maniera specifica:

- La struttura dello stabilimento;
- Il sistema di refrigerazione;
- Immagazzinamento degli alimenti;
- Circuiti dell'impianto.

L'intento è stato quello di ottenere il maggior numero di informazioni possibili al fine di condurre un'analisi tecnologica maggiormente dettagliata e corrispondente alla realtà. Di seguito sono mostrate, in forma di tabella le domande riguardanti gli approfondimenti che sono state inviate alle aziende italiane che hanno collaborato all'indagine.

Tabella 1 Approfondimenti sulla struttura dello stabilimento

APPROFONDIMENTI SULLA STRUTTURA DELLO STABILIMENTO				
<i>Anno di fabbricazione delle parti principali dell'impianto frigorifero</i>	anno			
<i>Anno dell'ultimo ammodernamento/ampliamento significativo dell'impianto frigo</i>	anno			
<i>Personale d'ufficio</i>	n°			
<i>Quota personale d'ufficio dedicato ad ufficio tecnico/ingegneria</i>	n°			
<i>Personale per la produzione</i>	n°			
<i>Personale per la logistica</i>	n°			
<i>Quota di manutentori</i>	n°			
<i>Manutentori/Conduuttori per gli impianti di refrigerazione</i>	n°			

Tabella 2 Approfondimenti sul sistema di refrigerazione

INFORMAZIONI SUL SISTEMA DI REFRIGERAZIONE							
<i>Consumo annuo di gas metano</i>	Smc/anno						
<i>Quantità di reintegro dei fluidi refrigerati * indicare la percentuale annua</i>	trascurabile	1 - 5%	6% - 10%	11% - 15%	> 15%		
<i>Temperatura minima/massima di condensazione annua</i>	°C min /°C max	eventualmente indicare la pressione min/max di condensazione					
<i>Sono presenti pompe di calore integrate con il ciclo frigorifero?</i>	si	no	non lo so				
<i>Sono presenti UTA per il ricambio di aria negli ambienti di produzione?</i>	Se si, indicare la capacità totale in m ³ /ora						
<i>Le UTA sono dotate di sistemi di recupero di calore mandata in missione/estrazione?</i>	descrivere						
<i>L'impianto è dotato di sistemi di misura dell'efficienza energetica (COP)</i>	si	no	non lo so	Se si descrivere il sistema e l'efficienza raggiunta			

Tabella 3 Approfondimenti sulla struttura e sull'immagazzinamento degli alimenti

INFORMAZIONI SULLA STRUTTURA E SULL'IMMAGAZZINAMENTO DEGLI ALIMENTI					
<i>Quante celle frigorifere separate offre il sistema?</i>	n° _____				
<i>Superficie di una cella frigorifera</i>	m ²				
<i>Volume di una cella frigorifera</i>	m ³				
<i>Trasmittanza delle pareti perimetrali delle celle</i>	W/m ² K _____				
<i>Composizione delle pareti della cella</i>					
<i>Quante porte (totali) sono presenti nel locale?</i>	n° _____				
<i>Dimensioni delle porte di accesso alle celle</i>	L/H _____ / _____				
<i>Quante volte, in media ogni porta sarà aperta al giorno?</i>	n°				
<i>Le porte sono dotate di protezione?</i>	non lo so	nessuna protezione	tende a strisce	porta automatica	altro
<i>Il prodotto viene caricato automaticamente o manualmente nel locale?</i>	non lo so	automaticamente (mano o levatore a forche)	automaticamente (gru robotizzate)		
<i>Come è immagazzinato il cibo nei locali?</i>	non lo so	pallets	containers	riposti sugli scaffali	
<i>Quanto cibo può essere immagazzinato nell'area immagazzinamento?</i>	kg				
<i>Quanti pallets/containers possono essere immagazzinati nell'area?</i>	n°				
<i>Dimensione e peso medio di un pallet/container?</i>	L/H/P _____/_____ _____/_____ peso medio kg				

Tabella 4 Approfondimenti sui circuiti dell'impianto

CIRCUITI		<i>Circuito 1</i>	<i>Circuito 2</i>	<i>Circuito 3</i>
<i>T. evaporazione [°C]</i>				
<i>T. condensazione [°C]</i>				
<i>Portata del refrigerante [kg/s]</i>				
<i>T. evaporazione</i>				
<i>N° compressori installati</i>				
<i>Tipologia di compressori</i>				
<i>Capacità frigorifera installata (kW)</i>				
<i>Potenza installata motori (kW)</i>				
<i>Tipo di alimentazione</i>	<i>a espansione diretta</i>			
	<i>a pompa</i>			
	<i>a termosifone</i>			
<i>Somma di: potenza motore elettrico x numero ore lavoro; per tutti i compressori del circuito (kWh)</i>				

Capitolo 3

Metodologia per il miglioramento degli indici di prestazione energetica di aziende

In questo capitolo è stata proposta una metodologia per la modellazione e la simulazione degli impianti di refrigerazione industriale e per la definizione degli indicatori di prestazione energetica (IPE) avendo a disposizione solo una quantità relativa di dati in input.

La definizione degli indicatori di prestazione energetica è il primo passo per definire il consumo di energia di un impianto, fornire un'indicazione generale delle prestazioni energetiche e consentire di identificare le aree di inefficienza da integrare e riqualificare.

Gli indicatori possono essere definiti tramite la misurazione diretta degli impianti di refrigerazione industriale, avendo quindi a disposizione dati specifici di input e output provenienti da ogni singola parte dell'impianto, oppure possono essere semplici parametri, in mancanza di alcuni dati specifici, e avendo a disposizione solo una quantità relativa di dati a disposizione.

In questo lavoro verranno definiti gli IPE in funzione di un numero limitato di parametri a disposizione, la maggior parte di questi provenienti dalle informazioni e dai dati ottenuti per mezzo dell'indagine statistica.

La proposta offre una metodologia che consente alle aziende operanti nel settore della catena del freddo alimentare, di definire l'efficienza degli impianti ed il coefficiente di prestazione stagionale, con una quantità limitata di dati in input.

Nei paragrafi che seguono, vedremo come la stessa metodologia verrà utilizzata al fine di investigare eventuali soluzioni tecnologiche innovative per migliorare l'efficienza energetica soprattutto in termini di consumi in bolletta.

3.1 Definizione dati prestazionali

3.1.1 Definizione IPE

La definizione degli IPE può richiedere la valutazione di una grande quantità di dati disponibili nel momento in cui è possibile attuare misurazioni in loco o se la stessa azienda è in grado di fornire dati specifici non sempre disponibili. Come ad esempio:

- Bollette energetiche degli anni precedenti;
- Valori di temperature e pressioni all'ingresso e all'uscita di ogni elemento dell'impianto;

- Movimentazione esatta dei carichi annuali per tipologie di conservazione o di produzione degli alimenti;
- Numero, anno e tipologia (comprensiva di scheda tecnica) di tutti i compressori installati nell'impianto;
- COP reali di tutti i compressori installati nell'impianto;
- Capacità frigorifera installata nei compressori (kWh);
- Portata del refrigerante;
- Numero di circuiti installati per impianto.

Attraverso una campagna di misurazione dei principali parametri energetici e ambientali è possibile realizzare un database completo e strutturato di dati relativi al consumo di energia. La disponibilità di questi dati consente una valutazione dettagliata dello stato energetico attuale, una più precisa valutazione di un eventuale efficientamento energetico dell'impianto e di conseguenza un confronto reale in termini di consumo energetico e quindi di risparmio.

3.1.2 Metodologia di valutazione

Di seguito si propone una metodologia per identificare indici di prestazione energetica a partire dalla conoscenza di alcuni parametri facili da identificare e reperire. In questo modo, pur avendo a disposizione un numero limitato di parametri, sarà possibile stimare il valore dei parametri non disponibili analizzando, elaborando e simulando pochi dati raccolti. Parallelamente allo sviluppo del metodo verrà assemblato uno strumento di simulazione (EES) che consentirà l'immediata applicazione delle migliorie all'impianto e la valutazione dei principali IPE.

I dati principali e necessari per una efficace valutazione che le aziende interessate sono tenute a rilasciare anche in forma aggregata sono:

I. Informazioni generali sullo stabilimento:

- Posizione geografica;
- Volume d'affari annuo (EUR);
- Superficie totale dello stabilimento;
- Area dello stabilimento dedicata alla produzione (m²);
- Temperatura ambiente dello stabilimento dedicato alla produzione (°C);
- Area dello stabilimento dedicata allo stoccaggio (m²);
- Temperatura ambiente dello stabilimento dedicato allo stoccaggio (°C);
- Età dello stabilimento (anni);
- Volume totale stabilimento (m³);
- Volume dello stabilimento dedicato alla produzione (m³);
- Volume dello stabilimento dedicato allo stoccaggio (m³);

II. Informazioni sul sistema di refrigerazione:

- Potenza elettrica nominale fornita dalla compagnia elettrica (kWe);
- Potenza elettrica installata per l'intero impianto frigorifero (kWe);
- Potenza elettrica installata per i compressori (kWe)
- Elettricità totale utilizzata nell'impianto di refrigerazione (kWh/anno)
- Tipo di condensazione;
- Fluidi refrigeranti utilizzati;
- Quantità indicativa del refrigerante primario (kg);
- Fluidi refrigeranti secondari;
- Tipologia di ciclo frigorifero;
- Tipologia di compressori utilizzati;

III. Informazioni sulle movimentazioni dei carichi:

- Movimentazione ingresso materie prime alimentari e finiti (t/anno a temp. ambiente);
- Movimentazione ingresso materie prime alimentari e finiti [t/anno di fresco (0/+4 °C)];
- Movimentazione ingresso materie prime alimentari e finiti [t/anno di congelato (-18 °C)];
- Stoccaggio medio annuo [t/anno di fresco (0/+4 °C)]
- Stoccaggio medio annuo [t/anno di congelato (-18 °C)]
- Movimentazione uscita prodotti alimentari [t/anno a temp. ambiente]
- Movimentazione uscita prodotti alimentari [t/anno di fresco (0/+4 °C)]

Questi dati consentono una definizione il più possibile realistica in assenza dei dati definiti nel paragrafo precedente.

Le informazioni base dello stabilimento consentono di determinare le temperature ambiente, di evaporazione e le differenti aree a seconda di quali siano gli alimenti conservati:

- Freschi (in genere tra 0 °C e -10 °C);
- Temperatura congelata (in genere fino a -42 °C);
- Temperatura di stoccaggio (in genere fino a -35 °C).

Le informazioni sul sistema di refrigerazione consentono di definire le caratteristiche principali dell'impianto come la tipologia di ciclo frigorifero, la tipologia di condensazione (se a condensatore evaporativo o torre evaporativa, etc.), i fluidi refrigeranti utilizzati, le potenze installate per i compressori e quella installata per l'intero impianto frigorifero.

Le movimentazioni dei carichi e gli stoccaggi occorrono invece a distinguere la diversa tipologia di azienda e la quantità di carico espressa in tonnellate (t) che l'impianto deve mantenere ad una data temperatura.

Una volta considerati tutti i dati, questi vengono modellati e simulati per mezzo del software EES. Stimato il COP dell'impianto relativo al caso di studio di riferimento (COP_{rif}), è possibile valutare l'efficienza dell'impianto attraverso un indicatore di efficienza energetica moltiplicando il valore del COP simulato per l'energia elettrica reale consumata dall'azienda di riferimento (EE_{rif} dato in input), ottenendo l'energia frigorifera utile asportata in un anno nel caso di riferimento (EF_{rif}).

$$EF_{rif} = COP_{rif} \times EE_{rif}$$

È possibile applicare questa metodologia apportando modifiche e migliorie all'impianto attuale. Modificando infatti i dati in input alla simulazione come tipologia di compressori o tipologia di ciclo frigorifero (sostituendo un bistadio ad un semplice impianto monostadio con economizzatore), si può calcolare il COP dell'impianto modificato (COP_{new}) e ottenere la relativa energia elettrica consumata in un anno che, in caso di COP migliorativo, condurrà ad un risparmio energetico mentre invece a rimanere invariata è l'energia frigorifera utile sia nel caso di riferimento che nel nell'impianto modificato.

$$EE_{new} = \frac{EF_{rif}}{COP_{new}}$$

In questo modo è possibile stimare la variazione del COP in funzione della variazione di energia elettrica legata alla tecnologia che è stata introdotta a scopo migliorativo e, la variazione percentuale che questo tipo di variazione tecnologica ha portato ad incidere sia sul COP del sistema di refrigerazione che sul consumo di energia elettrica.

$$\Delta EE(\%) = \frac{EE_{new} - EF_{rif}}{EE_{rif}}$$

L'azienda quindi, ha la possibilità di valutare sia il risparmio in termini di consumo energetico sia in termini di dispendio economico in bolletta

3.2 Analisi tecnologica

Definiti gli Indici di prestazione energetica da individuare in un determinato impianto, ossia gli elementi che indicano quanto un sistema sia più o meno efficiente, è necessaria un'analisi sulle tecnologie che questi sistemi presentano.

L'analisi tecnologica è una parte importante della metodologia perché definisce quelli che sono i dati da tenere in considerazione nella modellazione e nella simulazione del sistema di refrigerazione, sia allo stato attuale, che, come vedremo in seguito, nello stato di incremento dell'efficienza energetica così da incoraggiare i proprietari delle industrie ad intraprendere iniziative di efficienza energetica, come l'installazione di nuove tecnologie e attrezzature.

La disponibilità, la qualità e la quantità dei dati provenienti dalle aziende è fondamentale per la riuscita di una simulazione che rispetti nella maniera più reale possibile l'andamento dell'impianto.

3.2.1 Impostazione del modello di simulazione

Il modello di simulazione dei sistemi di refrigerazione delle aziende di cui si vuole determinare il livello di efficienza è stato impostato per mezzo del software EES (Engineering Equation Solver).

I dati, forniti dalle aziende, riguardanti le caratteristiche del sistema di refrigerazione, dello stabilimento e dell'impianto, rappresentano gli input del modello di simulazione.

In questo modo è possibile determinare, attraverso il modello, l'efficienza dell'impianto nelle condizioni di funzionamento attuale. Ed è per questo motivo, che i dati messi a disposizione dalle aziende devono considerarsi attendibili in modo tale da non dover ricorrere ad eventuali approssimazioni che porterebbero ad una imprecisa simulazione, e di conseguenza a risultati che non corrisponderebbero alla realtà.

Affinché il modello risulti preciso è necessario avere a disposizione, per ogni impianto, dati fondamentali per l'impostazione del modello di simulazione come:

- Temperatura di condensazione;
- Temperatura di evaporazione;
- Presenza di torre evaporativa o condensatore evaporativo;
- Numero e modello dei compressori;
- Eventuale surriscaldamento e sottoraffreddamento;
- Potenza elettrica installata per i compressori (kWe);
- Tipo di condensazione;
- Fluidi refrigeranti utilizzati;
- Quantità indicativa del refrigerante primario (kg);
- Fluidi refrigeranti secondari;

- Tipologia di ciclo frigorifero;
- Tipologia di compressori utilizzati;

Definiti questi dati è possibile procedere con la modellazione del sistema di refrigerazione, impostando le temperature di condensazione ed evaporazione insieme agli altri dati espressi precedentemente, definire il ciclo di refrigerazione con le rispettive equazioni di equilibrio, impostare il diagramma pressione-entalpia a seconda del fluido refrigerante e far partire la simulazione ottenendo quindi il COP reale dell'impianto nelle condizioni attuali (COP_{rif}).

La simulazione e la definizione di quelle che sono le efficienze nei sistemi esistenti hanno permesso di inquadrare quali siano oggi, le tecnologie preseti nelle aziende che operano nel settore del freddo alimentare, con lo scopo di identificare le aree con maggiori inefficienze da riqualificare.

3.3 Incremento efficienza energetica

La metodologia propone una possibile soluzione per il miglioramento dell'efficienza energetica degli impianti di refrigerazione industriale.

A partire dai modelli di simulazione impostati per la verifica dell'efficienza allo stato attuale, è possibile, modificando determinati parametri, investigare soluzioni integrative per migliorare l'efficienza dell'impianto.

In questo lavoro, il miglioramento dell'efficienza energetica dell'impianto avviene per mezzo della sostituzione del ciclo di refrigerazione, da monostadio (comunemente utilizzato dalle aziende italiane che operano nel settore del freddo alimentare) a doppio stadio (o bistadio) con un miglioramento di prestazioni, cioè un aumento della quantità di freddo prodotta per unità di portata in massa.

3.3.1 Impostazione del modello di simulazione

Nell'impostazione del modello di simulazione allo stato migliorato, molti dei dati input descritti nel paragrafo precedente rimangono invariati, come le temperature di evaporazione e condensazione, il carico all'evaporatore e il modello del compressore.

A variare è il sistema di refrigerazione monostadio che viene sostituito con un sistema bistadio, quindi si passa da un unico compressore a due compressori che lavorano nello stesso sistema.

In questo modo, è possibile investigare eventuali soluzioni migliorative e verificare quali siano le possibili integrazioni a livello impiantistico che porterebbero ad un aumento dell'efficienza dell'impianto, a parità di carico di refrigerazione e alle stesse temperature dello stato attuale.

Capitolo 4.

Descrizione casi studio

In questo capitolo verranno riportati i casi studio relativi alle aziende italiane, per la maggior parte dei casi operanti nel settore della catena del freddo alimentare, che hanno aderito all'indagine statistica descritta nel capitolo 2.

Ad oggi, sono state 8 le aziende che hanno partecipato al progetto rispondendo al sondaggio. Al fine di mantenere l'anonimato dei dati sensibili, le aziende sono state identificate con codici (A, B, C, D, E, F, G, ed H per il presente studio). La tabella 5 fornisce le principali informazioni delle società studiate.

Fluidi refrigeranti utilizzati (primari)	Tipologia di compressori utilizzati	Tipologia di ciclo frigorifero	Volume stabilimento dedicato allo stoccaggio (m ³)	Volume stabilimento dedicato alla produzione (m ³)	Temperatur a ambiente dello stabilimento dedicato alla produzione (°C)	Movimentazio ne in ingresso materie prime alimentari e finiti (-18 °C)	Movimentazio ne in ingresso materie prime alimentari e finiti (0/+4 °C)	Movimentazio ne in ingresso materie prime alimentari e finiti (a temperatura ambiente)	Elettricità totale utilizzata nell' impia nto di refrigerazio ne (kWh/anno)	Potenza elettrica installata (kW)	Potenza elettrica installata per l' intero impianto frigorifero (kW)	Potenza elettrica nominale fornita dalla compagnia elettrica (kW)	Parametri
Ammoniac	a vite aperti raffreddati con iniezione di liquido	Singolo stadio economizza to	20076	25872	15	6300	1250	4300	2780601	1480	1800	900	A
HFC (R404A)	a vite aperti raffreddati con iniezione di liquido	Singolo stadio economizza to	9000	21000	25	100	100	700	1500000	500	200	900	B
Ammoniac	a vite aperti raffreddati con iniezione di liquido	Singolo stadio economizza to			15	5000	800		2800000	600	850		C
HFC (R404A)	a vite semi-ermetici	Singolo stadio	13000	0	25	9000			500000	220	240	310	D
Ammoniac	a vite aperti raffreddati con iniezione di liquido	Singolo stadio	24000	40000	18	0	0	8000	4500000	1000	1200	1400	E
HFC	a vite semi-ermetici	Singolo stadio	50544	88158	23	0	0	0	5490000	2010	2745	5000	F
Ammoniac	a vite semi-ermetici	Doppio stadio booster	58000	29400	20	126	0	43000	35000	200	30	800	G
Performax R.407 F	a vite aperti raffreddati con iniezione di liquido	Singolo stadio	170000	170000	-18	40000	0	0	5500000	1200	1600	1300	H

Tabella 5 dati principali delle Aziende oggetto di studio

Per 7 aziende su 8, il fatturato annuo è inferiore a 50 milioni di euro. L'età dell'impianto risulta essere maggiore di 20 anni per le aziende A, C, E, F, G e H; e tra 10 e 20 anni per le aziende B e D. Le aziende A, B, C ed E sono caratterizzate dallo stesso tipo di impianto per la conservazione e per la trasformazione del cibo. In particolare, sono composte da:

cellule di stoccaggio in cui la gestione dei carichi in entrata è la stessa dei carichi in uscita;

- trasformazione del prodotto fresco;
- trasformazione del prodotto congelato.

Tuttavia, a causa dell'imprecisione dei dati forniti, non è stato possibile stimare l'esatta quantità di carichi divisi tra congelati, refrigerati e conservazione degli alimenti, e di conseguenza l'efficienza nei tre casi. Le aziende D ed H invece offrono solo stoccaggio di cibi per conto terzi.

Le aziende F e G non sono esattamente consone alla ricerca, poiché la prima, pur possedendo impianti frigoriferi, non fa parte della catena del freddo alimentare bensì del settore chimico, mentre la seconda pur trattando alimenti lavora per una minima parte col freddo.

4.1. Modellazione del sistema

I dati ottenuti dalle aziende per mezzo del questionario riportati nella Tabella 7 sono stati considerati come input per la modellazione del sistema.

La temperatura di condensazione di tutti gli 8 impianti è stata stimata partendo dalla posizione geografica dello stabilimento.

È stato creato un database con gli storici delle temperature giornaliere relative all'anno 2018, per ogni stabilimento, tranne nei casi in cui le aziende si trovassero nella stessa area geografica.

La temperatura media giornaliera è stata ottenuta calcolando la media tra le temperature massime e minime giornaliere.

Lo stesso procedimento è stato utilizzato per ricavare la percentuale di umidità relativa media giornaliera.

A questo punto, attraverso il programma (EES Distributable: Psychrometric Properties) (EES 2019), i dati della temperatura ambiente e della percentuale di umidità relativa sono serviti come input per ricavare il valore giornaliero della temperatura a bulbo umido. Quest'ultimo specifico valore ha permesso di definire in maniera più precisa e dettagliata la temperatura di condensazione impostata nell'impianto dell'azienda.

Di seguito viene riportato lo stralcio della tabella che raccoglie i dati di uno stabilimento del quale sono stati calcolati i valori delle temperature sopra descritti nel mese di Febbraio 2018.

Tabella 6 Temperature di Febbraio relative al sito geografico di uno stabilimento preso in esame

<i>T. massima giornaliera</i>	<i>T. minima giornaliera</i>	<i>T. media giornaliera</i>	<i>T. umidità max %</i>	<i>T. umidità min %</i>	<i>T.umidità media %</i>	<i>T. bulbo umido °C</i>	<i>T.cond °C</i>
12	6	9	67	42	54,5	5,1	15,1
14	4	9	100	67	83,5	7,6	17,6
10	3	6,5	100	76	88	5,6	15,6
7	1	4	93	66	79,5	2,6	12,6
9	2	5,5	100	58	79	4	14
7	-1	3	100	76	88	2,2	12,2
5	1	3	93	81	87	2,2	12,2
11	3	7	100	66	83	5,7	15,7
10	1	5,5	93	50	71,5	3,4	13,4
7	2	4,5	100	71	85,5	3,5	13,5
6	2	4	93	53	73	2,2	12,2
6	2	4	93	46	69,5	1,9	11,9
5	-1	2	93	62	77,5	0,6	10,6
6	-2	2	87	49	68	-0,1	9,9
5	-1	2	81	46	63,5	1,5	11,5
9	-1	4	93	43	68	1,8	11,8
9	2	5,5	87	58	72,5	3,5	13,5
8	6	7	100	93	96,5	6,7	16,7
7	3	5	100	87	93,5	4,5	14,5
5	1	3	100	75	87,5	2,2	12,2
3	1	2	93	76	84,5	1	11
6	2	4	100	76	88	3,2	13,2
7	2	4,5	100	76	88	3,7	13,7
8	5	6,5	82	67	74,5	4,5	14,5
1	-1	0	87	60	73,5	-1,6	8,4
-1	-4	-2,5	100	64	82	-3,4	6,6
-3	-6	-4,5	100	93	96,5	-4,7	5,3
-1	-7	-4	93	64	78,5	-5	5
		T media mensile			Umidità media mensile %	T media bulbo mensile	T.cond °C
		3,63			79,80	2,30	12,30

Successivamente, tutti i dati e le temperature riferite ai singoli giorni dell'intero anno sono stati raggruppati per mese eseguendo una media matematica. L'intero procedimento è stato effettuato per tutte le aziende prese in esame nel lavoro. Segue la tabella riassuntiva con le temperature di condensazione che sono state utilizzate come input nel modello modellazione degli impianti frigoriferi analizzati.

Tabella 7 Tabella riassuntiva temperature di condensazione relative al sito geografico di uno stabilimento preso in esame

<i>2018</i>	<i>T. media mensile °C</i>	<i>Umidità relativa media %</i>	<i>T. bulbo umido °C</i>	<i>T. Cond. °C</i>
<i>gennaio</i>	7,27	82,23	5,86	15,86
<i>febbraio</i>	3,63	79,80	2,30	12,30
<i>marzo</i>	7,52	74,68	6,81	16,81
<i>aprile</i>	15,47	71,98	12,45	22,45
<i>maggio</i>	18,50	74,48	15,61	25,61
<i>giugno</i>	21,42	64,16	16,52	26,52
<i>luglio</i>	24,89	54,63	18,45	28,45
<i>agosto</i>	24,55	63,82	19,61	29,61
<i>settembre</i>	20,85	72,77	17,55	27,55
<i>ottobre</i>	15,82	79,32	13,65	23,65
<i>novembre</i>	10,85	82,43	9,31	19,31
<i>dicembre</i>	6,53	84,18	5,35	15,35

Le temperature di evaporazione degli impianti, a differenza di quelle di condensazione sono state definite in base ai dati presenti nel questionario inviato online -mostrato nella tabella 5- e alle temperature generalmente utilizzate nel campo della refrigerazione industriale:

- temperatura di congelamento o surgelazione (in genere fino a -42 °C) e
- temperatura di conservazione o stoccaggio (in genere fino a -35 °C).

Mentre nei primi due casi è prevista una trasformazione del prodotto dall'ingresso all'uscita della cella, nell'ultimo caso le celle frigorifere forniscono solo la scorta alimentare. A causa della mancanza di alcuni dati fondamentali nelle risposte del questionario, come il modello, il numero dei compressori e la relativa capacità frigorifera, è stato necessario l'ausilio di un software come BITZER (BITZER 2018) per ricavare le specifiche tecniche dei compressori a partire da alcuni dati dell'impianto.

Sulla base dei dati forniti dall'indagine quindi, e dalle considerazioni descritte precedentemente, la potenza di raffreddamento del sistema di refrigerazione e le temperature di evaporazione / condensazione sono state utilizzate come input del software Bitzer che ha permesso di definire le dimensioni del compressore e determinare la potenza del compressore corretta da utilizzare per la simulazione.

La potenza del compressore stimata dal software Bitzer è stata quindi utilizzata come input di un modello EES che simula i sistemi di refrigerazione dello studio. Sono stati considerati due cicli di refrigerazione: un ciclo di compressione del vapore a uno stadio che è rappresentativo degli schemi di impianto considerati e un ciclo di compressione del vapore a due stadi che è stato considerato come un miglioramento del primo sistema.

La figura 17 mostra gli schemi dei cicli di refrigerazione (Cavallini and Mattarolo 1992) che sono stati utilizzati come modello per la simulazione degli impianti delle diverse aziende con il programma EES.

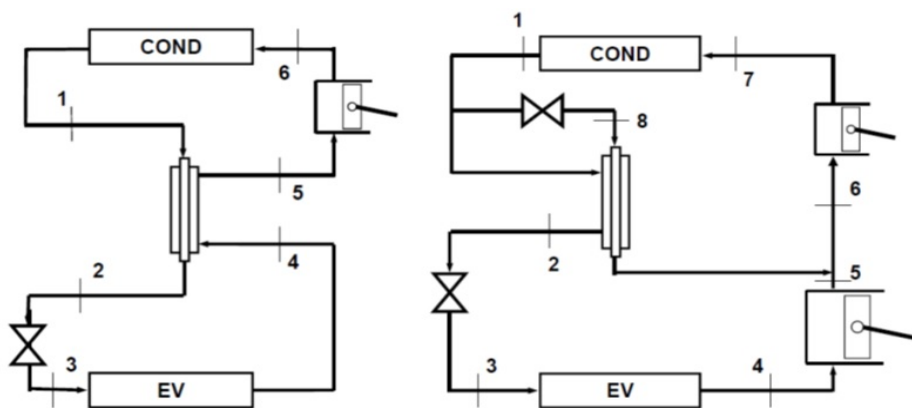


Figura 17 Schemi di cicli di refrigerazione: monofase (a sinistra) a due stadi (a destra) (Cavallini and Mattarolo 1992)

Entrambi gli schemi realizzano il sottoraffreddamento del refrigerante ($1\text{ }^{\circ}\text{C}$) mediante un economizzatore. È stato inoltre considerato un surriscaldamento di ($1\text{ }^{\circ}\text{C}$) per evitare l'aspirazione di refrigerante liquido allo stadio del compressore.

Una volta definita la potenza del compressore in relazione alle temperature di evaporazione e condensazione sopra indicate è stata effettuata, in simulazione, un'analisi parametrica sulla variazione del COP in relazione alla variazione mensile della temperatura di condensazione. La figura 18 sottostante illustra il flusso dei dati della modellazione del sistema descritta precedentemente, si differenzia dalla metodologia proposta nel capitolo 3 in quanto la mancanza di precisi dati richiesti nel questionario ha portato ad ipotizzare e approssimare alcuni elementi come le caratteristiche del compressore, la quantità di compressori presenti nell'impianto e la capacità frigorifera.

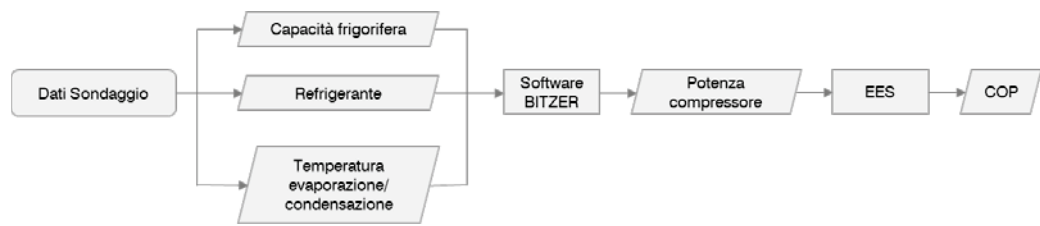


Figura 18 Flusso dei dati nel sistema di simulazione.

4.2. Modellazione e simulazione degli impianti di riferimento attuali

Sono stati modellati inizialmente i sistemi di refrigerazione attualmente installati nelle aziende con lo scopo di definire le prestazioni effettive dei sistemi esistenti. Il lavoro mira a stabilire una baseline delle tecnologie presenti oggi nel panorama industriale nazionale e definire una soglia sopra la quale un sistema si consideri efficiente.

Sono stati analizzati dati provenienti dalle risposte al questionario inviato alle aziende, che per motivi di privacy, sono state rinominate con le lettere dell'alfabeto, dalla A alla H.

Per quanto riguarda la temperatura di evaporazione, per la simulazione in esame è stato preso in considerazione un valore di -35 °C per tutti i casi tranne il D. Questo valore, infatti, ha permesso di determinare il COP del sistema di refrigerazione necessario per il congelamento, che rappresenta la condizione peggiore. Nel caso D, invece, è stata selezionata una temperatura evaporante di -40 gradi centigradi per prendere in considerazione un avvicinamento di 5 gradi centigradi negli evaporatori.

Per quanto riguarda la temperatura di condensazione, per ogni caso è stata impostata in base alla collocazione geografica, agli storici delle temperature per quel sito, all'umidità relativa e alla temperatura a bulbo umido.

Per le aziende A, D, F, e G che si trovano nello stesso sito geografico, il cui storico delle temperature risulta essere lo stesso, la temperatura di condensazione è di $21,95\text{ °C}$.

Tabella 8 Tabella riassuntiva temperature di condensazione relative ai casi A, D, F e G

2018	<i>T. media mensile</i> °C	<i>T. umidità media</i> %	<i>T. bulbo umido</i> °C	<i>T. condensazione</i> °C
<i>gennaio</i>	7,27	82,23	5,86	15,86
<i>febbraio</i>	3,63	79,80	2,30	12,30
<i>marzo</i>	7,52	74,68	6,81	16,81
<i>aprile</i>	15,47	71,98	12,45	22,45
<i>maggio</i>	18,50	74,48	15,61	25,61
<i>giugno</i>	21,42	64,16	16,52	26,52
<i>luglio</i>	24,89	54,63	18,45	28,45
<i>agosto</i>	24,55	63,82	19,61	29,61
<i>settembre</i>	20,85	72,77	17,55	27,55
<i>ottobre</i>	15,82	79,32	13,65	23,65
<i>novembre</i>	10,85	82,43	9,31	19,31
<i>dicembre</i>	6,53	84,18	5,35	15,35
				21,95

Per il caso B, la temperatura di condensazione è di 23,31°C.

Tabella 9 Tabella riassuntiva temperature di condensazione relative al caso B

2018	<i>T. media mensile</i> °C	<i>T. umidità media</i> %	<i>T. bulbo umido</i> °C	<i>T. condensazione</i> °C
<i>gennaio</i>	9,92	68,29	7,13	17,13
<i>febbraio</i>	7,52	67,38	4,91	14,91
<i>marzo</i>	10,34	67,92	7,50	17,50
<i>aprile</i>	17,67	58,32	12,80	22,80
<i>maggio</i>	20,42	68,40	16,49	26,49
<i>giugno</i>	24,02	57,91	18,13	28,13
<i>luglio</i>	26,87	61,44	21,25	31,25
<i>agosto</i>	26,44	61,27	20,85	30,85
<i>settembre</i>	23,45	62,42	18,54	28,54
<i>ottobre</i>	19,06	64,13	14,80	24,80
<i>novembre</i>	13,47	71,47	10,68	20,68
<i>dicembre</i>	9,48	66,87	6,65	16,65
				23,31

Per il caso C, la temperatura di condensazione è di 21,78 °C.

Tabella 10 Tabella riassuntiva temperature di condensazione relative al caso C

<i>2018</i>	<i>T. media mensile</i> °C	<i>T. umidità media</i> %	<i>T. bulbo umido</i> °C	<i>T. condensazione</i> °C
<i>gennaio</i>	6,40	78,05	4,72	14,72
<i>febbraio</i>	4,30	65,45	2,00	12,00
<i>marzo</i>	7,12	76,76	5,30	15,30
<i>aprile</i>	15,63	65,43	11,88	21,88
<i>maggio</i>	19,69	64,77	15,44	25,44
<i>giugno</i>	23,13	60,21	18,10	28,10
<i>luglio</i>	24,79	65,85	20,13	30,13
<i>agosto</i>	25,87	60,74	20,29	30,29
<i>settembre</i>	21,08	68,15	17,16	27,16
<i>ottobre</i>	16,58	72,44	13,57	23,57
<i>novembre</i>	11,60	80,60	9,88	19,88
<i>dicembre</i>	4,58	78,00	2,98	12,98
				21,78

Per il caso E, la temperatura di condensazione è di 22,75 °C.

Tabella 11 Tabella riassuntiva temperature di condensazione relative al caso E

<i>2018</i>	<i>T. media mensile</i> °C	<i>T. umidità media</i> %	<i>T. bulbo</i> <i>umido</i> °C	<i>T.</i> <i>condensazione</i> °C
<i>gennaio</i>	9,31	73,82	7,06	17,06
<i>febbraio</i>	6,75	72,74	5,49	15,49
<i>marzo</i>	9,52	69,18	6,81	16,81
<i>aprile</i>	15,68	66,40	12,07	22,07
<i>maggio</i>	19,10	68,52	15,38	25,38
<i>giugno</i>	22,13	62,73	17,26	27,26
<i>luglio</i>	26,44	57,27	20,17	30,17
<i>agosto</i>	25,10	65,47	20,27	30,27
<i>settembre</i>	22,02	62,75	17,31	27,31
<i>ottobre</i>	17,10	71,55	13,97	23,97
<i>novembre</i>	13,10	77,88	10,98	20,98
<i>dicembre</i>	8,58	71,77	6,26	16,26
				22,75

Per il caso H, la temperatura di condensazione è di 22,48 °C.

Tabella 12 Tabella riassuntiva temperature di condensazione relative al caso H

2018	<i>T. media mensile</i> °C	<i>T. umidità media</i> %	<i>T. bulbo umido</i> °C	<i>T. condensazione</i> °C
<i>gennaio</i>	8,45	70,68	5,99	15,99
<i>febbraio</i>	5,23	74,39	3,35	13,35
<i>marzo</i>	8,79	68,16	6,03	16,03
<i>aprile</i>	15,63	71,10	12,58	22,58
<i>maggio</i>	18,21	75,95	15,46	25,46
<i>giugno</i>	21,23	67,39	17,09	27,09
<i>luglio</i>	24,71	67,05	20,32	30,32
<i>agosto</i>	24,42	66,60	19,88	29,88
<i>settembre</i>	20,83	70,80	17,29	27,29
<i>ottobre</i>	16,32	75,90	13,72	23,72
<i>novembre</i>	11,78	80,08	9,97	19,97
<i>dicembre</i>	7,39	74,97	8,12	18,12
				22,48

Utilizzando la potenza di raffreddamento del sistema di refrigerazione e le temperature di evaporazione/condensazione definite precedentemente, il software Bitzer ha permesso di controllare le dimensioni del compressore e determinare la corretta potenza del compressore. Per i casi A e C, è stato verificato che il compressore adatto al sistema economizzato e l'ammoniaca è il modello OSNA8591-K, continuando con l'ammoniaca è stato verificato che per il caso E il modello è l'OSNA8571-K, mentre per il caso G il modello è l'OSNA5361-K. Per i casi B, D ed F invece, i risultati dell'indagine non hanno specificato il refrigerante effettivo utilizzato, ma solo il suo tipo (HFC); per questo motivo, in entrambi i casi è stato assunto R404A come refrigerante. In particolare, i compressore selezionati dal software Bitzer sono: per il caso B il modello è l'OSNA8571-K, per il caso D il modello è l' HSN7451-60-40P, per il caso F il modello è l' HSN5353-25-40P. A se stante è il caso H quale ha indicato

come refrigerante il “PERFORMAX R 407 F, non presente nel software, per cui dopo varie ricerche sono stati scelti due refrigeranti dalle caratteristiche simili, l’R22 e l’R404A ed entrambi hanno per modello l’OSN5361-K.

La potenza del compressore stimata da Bitzer è stata quindi utilizzata come input in un modello EES che simula i sistemi di refrigerazione in studio. Sono stati considerati i due cicli di refrigerazione di cui sono riportate le immagini nella figura 17. Come affermato nel paragrafo precedente, alcuni sistemi di raffreddamento realizzano un sottoraffreddamento del refrigerante di 1 °C (prioritariamente) altri di 5 °C nel caso 1 °C desse problemi, tramite un economizzatore; è stato anche preso in considerazione un surriscaldamento sempre di 1 °C o 5 °C (in base al caso) per evitare l’aspirazione di refrigerante liquido nella fase di compressione.

Una volta definito il modello nel programma EES con tutte le equazioni di equilibrio, sono state applicate nel programma inefficienze che tengono conto delle irreversibilità del vero ciclo termodinamico ed è stata avviata la simulazione dell’impianto per ricavarne il rendimento.

Il COP è stato determinato nella simulazione da un’analisi parametrica che considerava il variare del rendimento dell’impianto al variare delle temperature di condensazione mensili definite precedentemente per ogni stabilimento.

Sulla base degli input forniti dall’indagine e dal software Bitzer, il COP medio determinato da EES per il caso A è pari a 1,74, per il caso D 1,45 e per il caso F di 1,36.

Le figure che seguono mostrano il ciclo termodinamico associato al sistema monofase nelle condizioni di temperatura di condensazione media nei casi di riferimento, A, D e F.

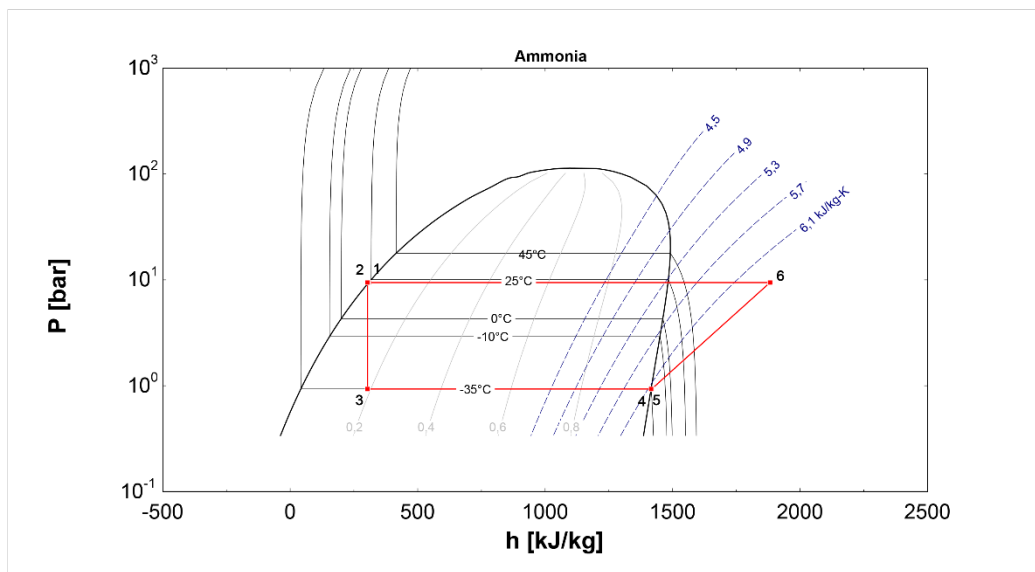


Figura 19 Ciclo termodinamico del sistema monostadio per il caso A.

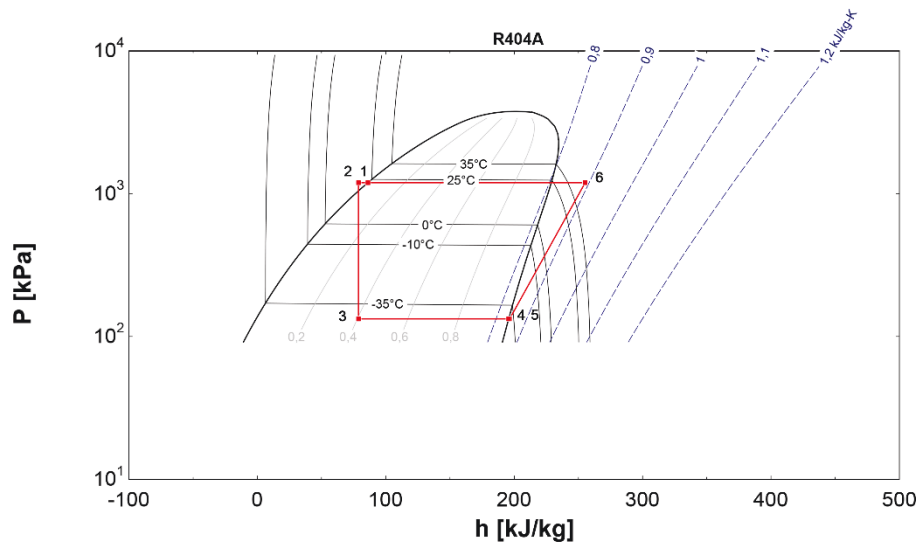


Figura 20 Ciclo termodinamico del sistema monostadio per il caso D.

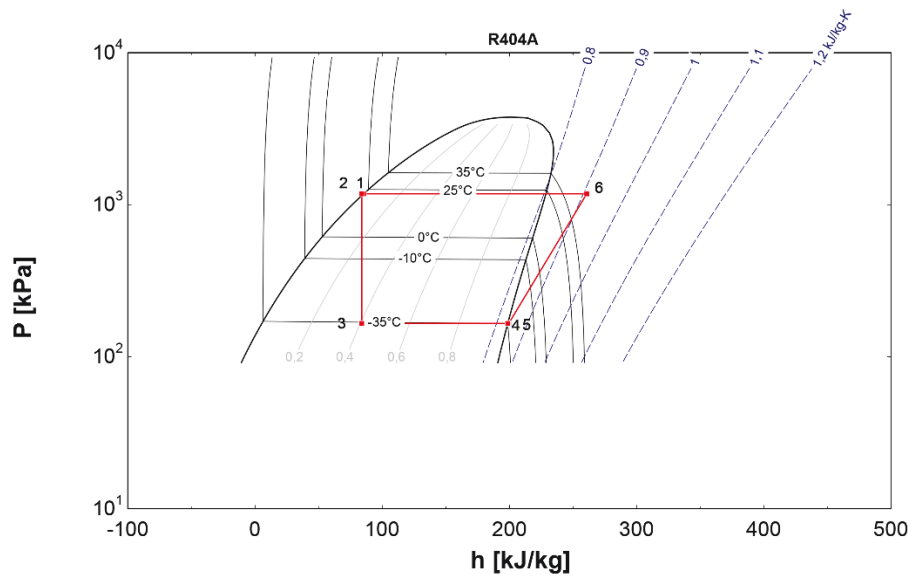


Figura 21 Ciclo termodinamico del sistema monostadio per il caso F.

Tabella 13 Analisi parametrica del COP nel sistema monostadio al variare della Temperatura di condensazione nel caso A, D e F.

2018	T. Condensazione °C	COP Mono stadio Caso A	COP Mono stadio Caso D	COP Mono stadio Caso F
<i>gennaio</i>	15,86	1,97	1,68	1,58
<i>febbraio</i>	12,30	2,16	1,84	1,75
<i>marzo</i>	16,81	1,93	1,64	1,54
<i>aprile</i>	22,45	1,70	1,42	1,32
<i>maggio</i>	25,61	1,59	1,31	1,21
<i>giugno</i>	26,52	1,56	1,28	1,19
<i>luglio</i>	28,45	1,50	1,22	1,13
<i>agosto</i>	29,61	1,46	1,19	1,09
<i>settembre</i>	27,55	1,53	1,25	1,15
<i>ottobre</i>	23,65	1,66	1,38	1,28
<i>novembre</i>	19,31	1,82	1,54	1,44
<i>dicembre</i>	15,35	2,00	1,70	1,61
	21,95	1,97	1,68	1,58
	media COP annua	1,74	1,45	1,36

La tabella 13 mostra come variano il COP degli impianti nei casi A, D e F al variare della temperatura esterna e di conseguenza, alla temperatura di condensazione impostata nel sistema.

Per quanto riguarda il caso B, il COP medio calcolato dal software EES per la condizione di temperatura di condensazione media di 23,91 °C è di 1,74.

La figura 22 mostra il ciclo termodinamico associato al sistema monofase nelle condizioni di temperatura di condensazione media, mentre la tabella mostra come varia il COP di un impianto al variare della temperatura esterna e di conseguenza, alla temperatura di condensazione impostata nel sistema.

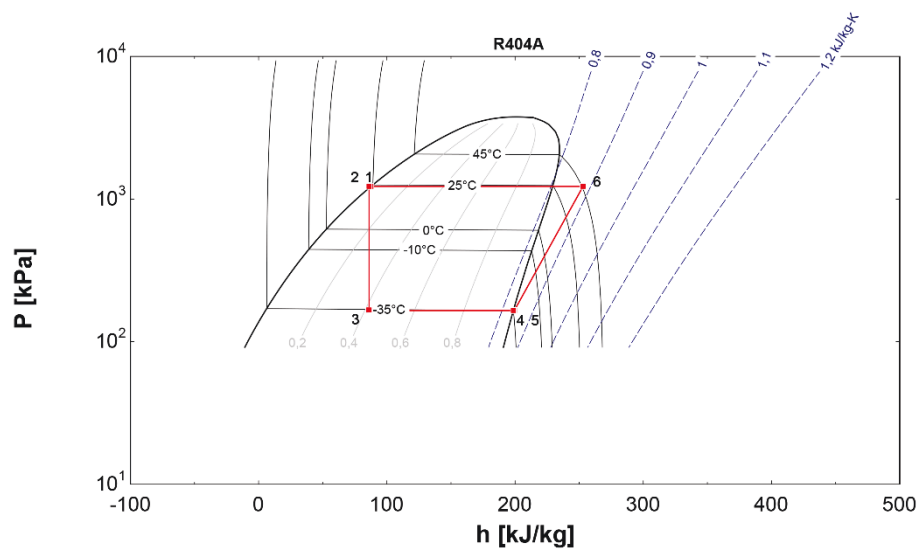


Figura 22 Ciclo termodinamico del sistema monostadio per il caso B.

Tabella 14 Analisi parametrica del COP al variare della Temperatura di condensazione nel caso B

2018	<i>T. Condensazione °C</i>	<i>COP Mono stadio</i>
<i>gennaio</i>	17,13	2,55
<i>febbraio</i>	14,91	2,71
<i>marzo</i>	17,50	2,53
<i>aprile</i>	22,80	2,19
<i>maggio</i>	26,49	1,98
<i>giugno</i>	28,13	1,90
<i>luglio</i>	31,25	1,74
<i>agosto</i>	30,85	1,76
<i>settembre</i>	28,54	1,88
<i>ottobre</i>	24,80	2,07
<i>novembre</i>	20,68	2,32
<i>dicembre</i>	16,65	2,59
	23,3	
	media COP annua	1,74

Il COP medio per il caso C nella condizione di temperatura di condensazione media di 21,78 °C è di 1,52.

La figura 23 mostra il ciclo termodinamico associato al sistema monofase nelle condizioni di temperatura di condensazione media, mentre la tabella mostra come varia il COP di un impianto al variare della temperatura esterna e di conseguenza, alla temperatura di condensazione impostata nel sistema.

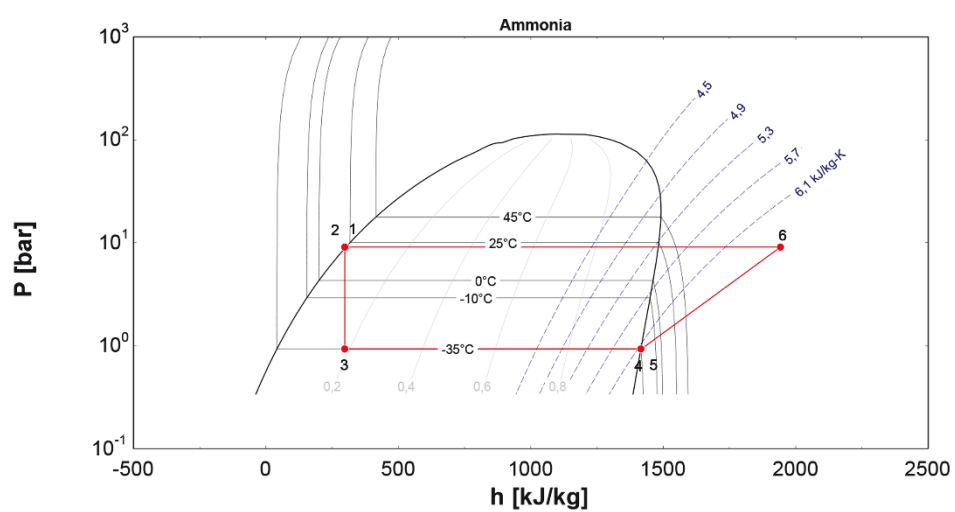


Figura 23 Ciclo termodinamico del sistema monostadio per il caso C

Tabella 15 Analisi parametrica del COP al variare della Temperatura di condensazione nel caso C

<i>2018</i>	<i>T. Condensazione °C</i>	<i>COP Mono stadio</i>
<i>gennaio</i>	14,72	1,76
<i>febbraio</i>	12,00	1,88
<i>marzo</i>	15,30	1,74
<i>aprile</i>	21,88	1,49
<i>maggio</i>	25,44	1,38
<i>giugno</i>	28,10	1,31
<i>luglio</i>	30,13	1,26
<i>agosto</i>	30,29	1,25
<i>settembre</i>	27,16	1,33
<i>ottobre</i>	23,57	1,44
<i>novembre</i>	19,88	1,56
<i>dicembre</i>	12,98	1,84
	21,786	
	media COP annua	1,52

Per quanto riguarda il caso E, il COP medio calcolato dal software EES per la condizione di temperatura di condensazione media di 22,75 °C è del valore di 1,48.

La figura che segue mostra il ciclo termodinamico monostadio nelle condizioni di temperatura di condensazione media.

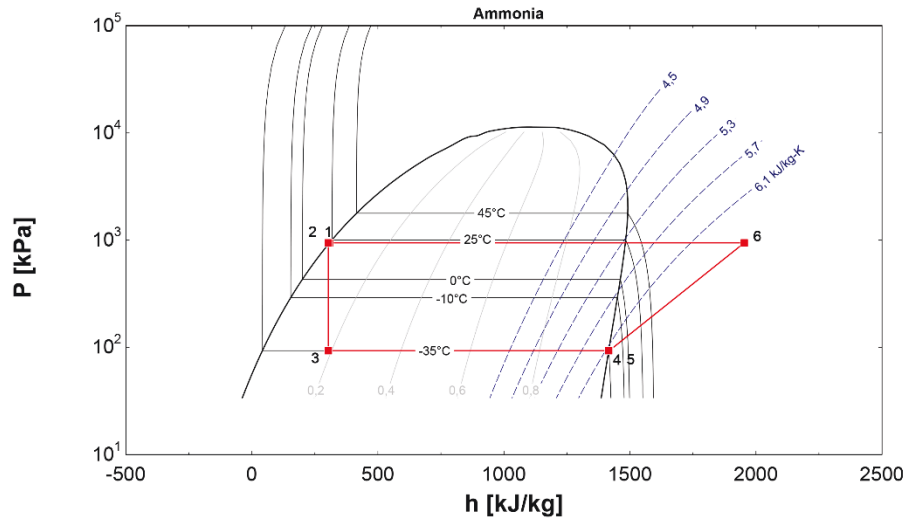


Figura 24 Ciclo termodinamico del sistema monostadio per il caso E.

La tabella mostra invece la variazione del COP in relazione alle temperature mensili, di conseguenza, alle temperature di condensazione impostate nell'impianto.

Tabella 16 Analisi parametrica del COP al variare della Temperatura di condensazione nel caso E.

<i>2018</i>	<i>T. Condensazione °C</i>	<i>COP Mono stadio</i>
<i>gennaio</i>	17,06	1,66
<i>febbraio</i>	15,49	1,73
<i>marzo</i>	16,81	1,67
<i>aprile</i>	22,07	1,49
<i>maggio</i>	25,38	1,38
<i>giugno</i>	27,26	1,33
<i>luglio</i>	30,17	1,26
<i>agosto</i>	30,27	1,25
<i>settembre</i>	27,31	1,33
<i>ottobre</i>	23,97	1,43
<i>novembre</i>	20,98	1,52
<i>dicembre</i>	16,26	1,70
	22,752	
	media COP annua	1,48

Infine, l'ultimo caso studio riguarda l'azienda rinominata con il codice H. Il valore del COP medio ottenuto mediante la simulazione dell'impianto alla temperatura media annuale di 22,48 °C è di 1,41.

Di seguito, la figura 25 illustra lo schema del ciclo termodinamico monostadio nelle condizioni di temperatura di condensazione media, mentre la tabella descrive l'analisi parametrica del COP al variare della temperatura esterna e di conseguenza della temperatura di condensazione.

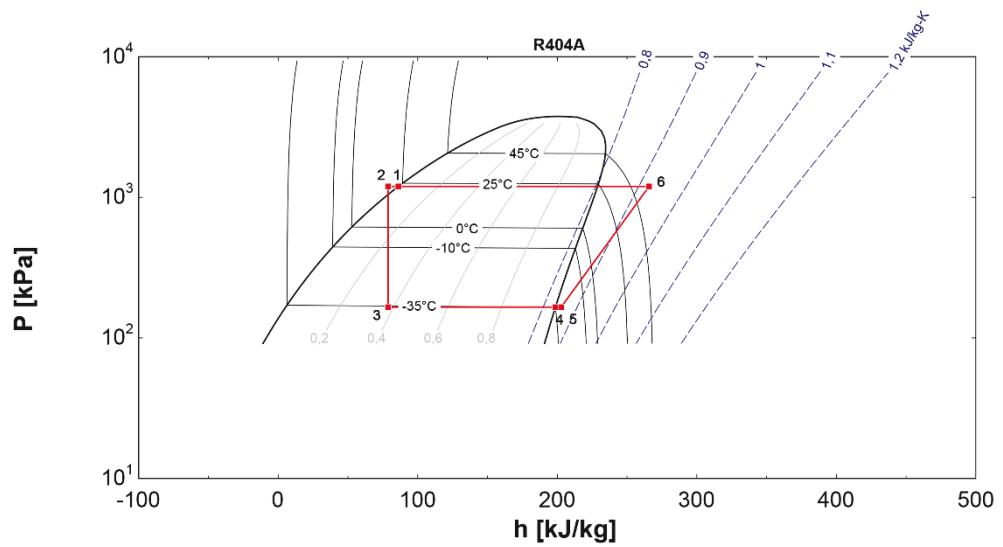


Figura 25 Ciclo termodinamico del sistema monostadio per il caso H.

Tabella 17 Analisi parametrica del COP al variare della Temperatura di condensazione nel caso H.

<i>2018</i>	<i>T. Condensazione °C</i>	<i>COP Mono stadio</i>
<i>gennaio</i>	15,99	1,65
<i>febbraio</i>	13,35	1,78
<i>marzo</i>	16,03	1,65
<i>aprile</i>	22,58	1,39
<i>maggio</i>	25,46	1,29
<i>giugno</i>	27,09	1,24
<i>luglio</i>	30,32	1,14
<i>agosto</i>	29,88	1,15
<i>settembre</i>	27,29	1,23
<i>ottobre</i>	23,72	1,35
<i>novembre</i>	19,97	1,49
<i>dicembre</i>	18,12	1,56
	22,482	
	media COP annua	1,41

4.3. Modellazione e simulazione degli impianti di riferimento modificati

La modellazione e la simulazione dei sistemi esistenti hanno permesso di definire un quadro generale di quali siano, ad oggi, le tecnologie presenti nel panorama industriale nazionale e di conseguenza, andare ad agire sulle inefficienze degli impianti per fornire un'indicazione generale delle prestazioni energetiche e consentire di identificare le aree di inefficienza da integrare e riqualificare.

La proposta offre una possibile soluzione per il miglioramento dell'efficienza energetica negli impianti frigoriferi esistenti di aziende italiane, operanti nel settore della catena del freddo, mediante una modifica del sistema di refrigerazione di riferimento.

La metodologia proposta, consente, una volta modellato il sistema attraverso una quantità limitata di dati in input, di andare ad integrare e modificare il modello con possibili soluzioni volte al miglioramento dell'efficienza energetica.

Il lavoro che segue mira quindi a migliorare l'efficienza degli impianti sopra simulati nella situazione attuale mediante una modifica dal sistema di riferimento monostadio ad un sistema bistadio.

Molti dei dati input descritti nel paragrafo precedente rimangono invariati, come le temperature di evaporazione e condensazione, il carico all'evaporatore e il modello del compressore. A variare è il sistema di refrigerazione monostadio che viene sostituito con un sistema bistadio.

Anche in questo caso il COP è stato determinato nella simulazione da un'analisi parametrica che considerava il variare del rendimento dell'impianto al variare delle temperature di condensazione mensili definite precedentemente per ogni stabilimento.

Di seguito sono descritti i miglioramenti del rendimento in seguito alle modifiche apportate agli impianti simulati precedentemente allo stato attuale.

Sulla base degli input forniti dall'indagine e dal software Bitzer, il COP medio determinato da EES per il caso A è pari a 1,81, per il caso D 1,78 e per il caso F di 1,64.

Le figure che seguono mostrano il ciclo termodinamico associato al sistema doppio stadio nelle condizioni di temperatura di condensazione media nei casi di riferimento, A, D e F, mentre la tabella mostra l'analisi parametrica del COP in funzione del variare della temperatura di condensazione.

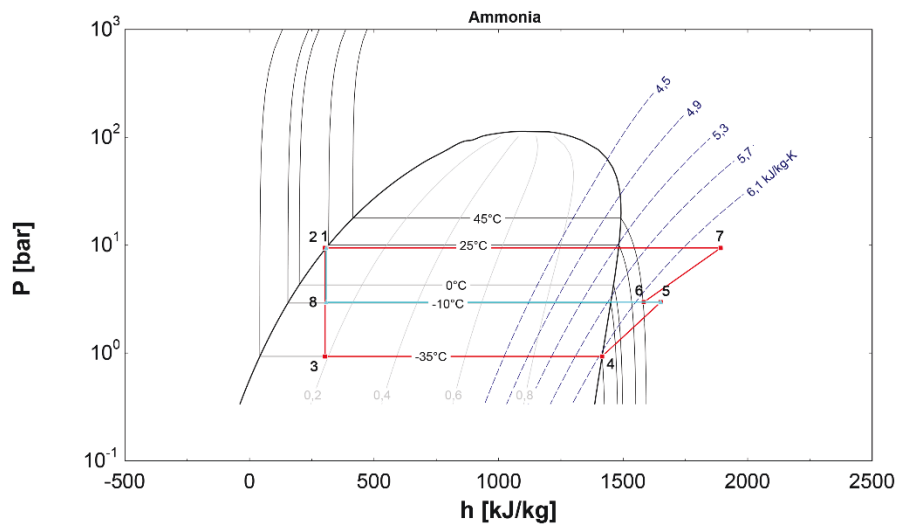


Figura 26 Ciclo termodinamico del sistema doppio stadio per il caso A

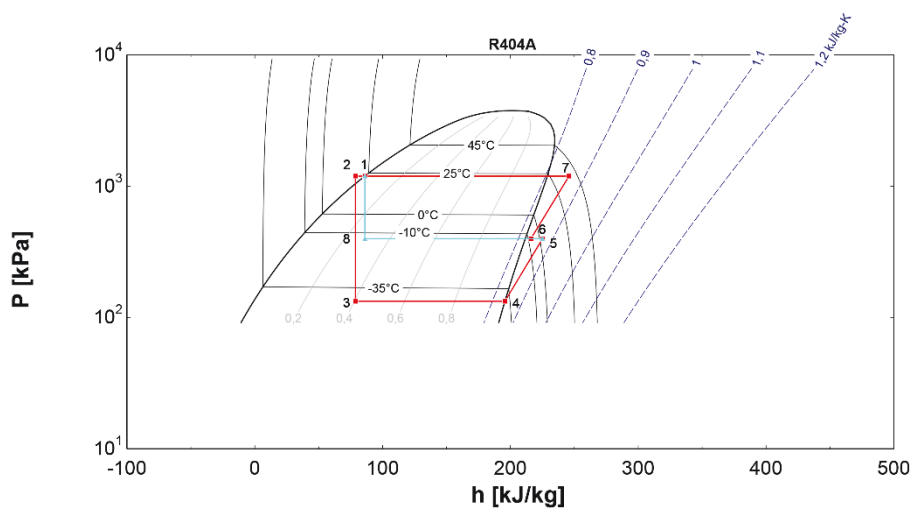


Figura 27 Ciclo termodinamico del sistema doppio stadio per il caso D

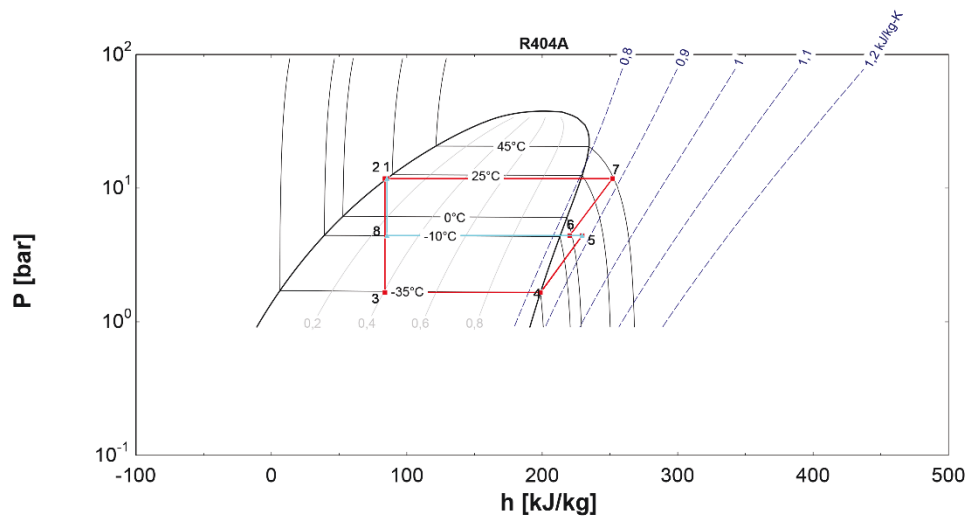


Figura 28 Ciclo termodinamico del sistema doppio stadio per il caso F

Tabella 18 Analisi parametrica del COP nel sistema doppio stadio al variare della Temperatura di condensazione nel caso A, D e F.

2018	T. Condensazione °C	COP Doppio stadio Caso A	COP Doppio stadio Caso D	COP Doppio stadio Caso F
gennaio	15,86	2,45	2,06	1,92
febbraio	12,30	2,68	2,26	2,13
marzo	16,81	2,39	2,01	1,87
aprile	22,45	2,10	1,74	1,60
maggio	25,61	1,96	1,60	1,47
giugno	26,52	1,92	1,57	1,43
luglio	28,45	1,84	1,49	1,36
agosto	29,61	1,80	1,45	1,31
settembre	27,55	1,88	1,53	1,39
ottobre	23,65	2,04	1,69	1,55
novembre	19,31	2,25	1,88	1,74
dicembre	15,35	2,48	2,09	1,95
	21,95	2,45	2,06	1,92
	media COP annua	2,15	1,78	1,64

Per quanto riguarda il caso B, il COP medio calcolato dal software EES per la condizione di temperatura di condensazione media di 23,91 °C è di 1,88.

La figura 29 mostra il ciclo termodinamico associato al sistema doppio stadio nelle condizioni di temperatura di condensazione media, mentre la tabella mostra come varia il COP di un impianto al variare della temperatura esterna e di conseguenza, alla temperatura di condensazione impostata nel sistema.

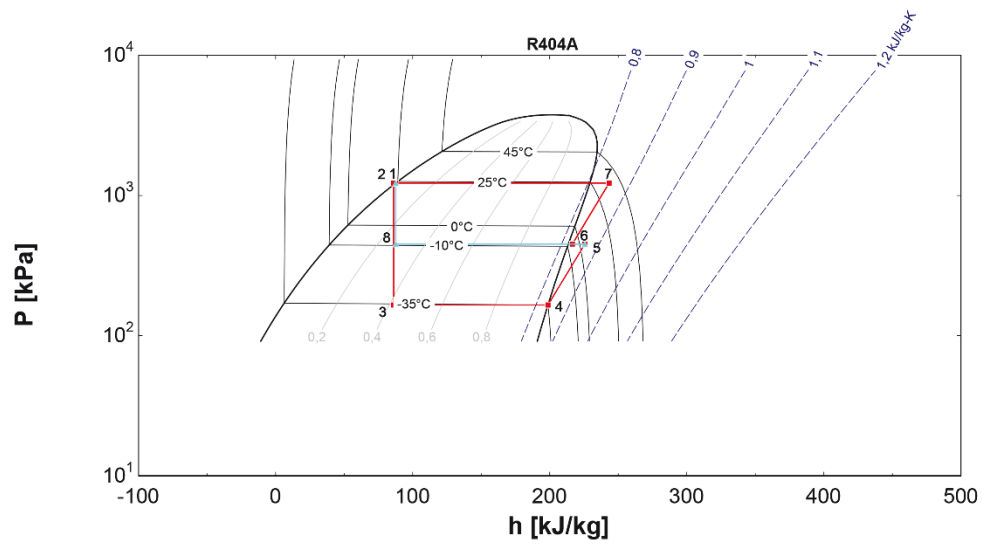


Figura 29 Ciclo termodinamico del sistema doppio stadio per il caso B.

Tabella 19 Analisi parametrica del COP nel sistema doppio stadio al variare della Temperatura di condensazione nel caso B

<i>2018</i>	<i>T. Condensazione °C</i>	<i>COP Doppio stadio</i>
<i>gennaio</i>	17,13	2,19
<i>febbraio</i>	14,91	2,33
<i>marzo</i>	17,50	2,17
<i>aprile</i>	22,80	1,88
<i>maggio</i>	26,49	1,70
<i>giugno</i>	28,13	1,63
<i>luglio</i>	31,25	1,50
<i>agosto</i>	30,85	1,51
<i>settembre</i>	28,54	1,61
<i>ottobre</i>	24,80	1,78
<i>novembre</i>	20,68	1,99
<i>dicembre</i>	16,65	2,22
	23,3	
	media COP annua	1,88

Il COP medio per il caso C per la condizione di temperatura di condensazione media di 21,78 °C è del valore di 1,83.

La figura 30 mostra il ciclo termodinamico associato al sistema doppio stadio nelle condizioni di temperatura di condensazione media, mentre la tabella mostra come varia il COP di un impianto al variare della temperatura esterna e di conseguenza, alla temperatura di condensazione impostata nel sistema.

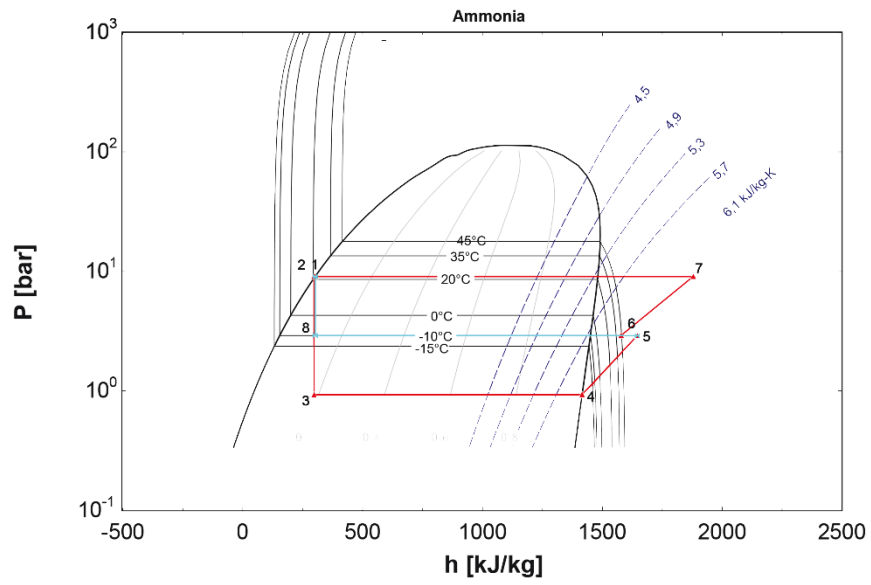


Figura 30 Ciclo termodinamico del sistema doppio stadio per il caso C.

Tabella 20 Analisi parametrica del COP nel sistema doppio stadio al variare della Temperatura di condensazione nel caso C.

<i>2018</i>	<i>T. Condensazione °C</i>	<i>COP Doppio stadio</i>
<i>gennaio</i>	14,72	2,13
<i>febbraio</i>	12,00	2,29
<i>marzo</i>	15,30	2,10
<i>aprile</i>	21,88	1,79
<i>maggio</i>	25,44	1,66
<i>giugno</i>	28,10	1,56
<i>luglio</i>	30,13	1,50
<i>agosto</i>	30,29	1,49
<i>settembre</i>	27,16	1,60
<i>ottobre</i>	23,57	1,73
<i>novembre</i>	19,88	1,88
<i>dicembre</i>	12,98	2,23
	21,786	
	media COP annua	1,83

Per quanto riguarda il caso E, il COP medio calcolato dal software EES per la condizione di temperatura di condensazione media di 22,75 °C.

La figura che segue mostra il ciclo termodinamico doppio stadio nelle condizioni di temperatura di condensazione media.

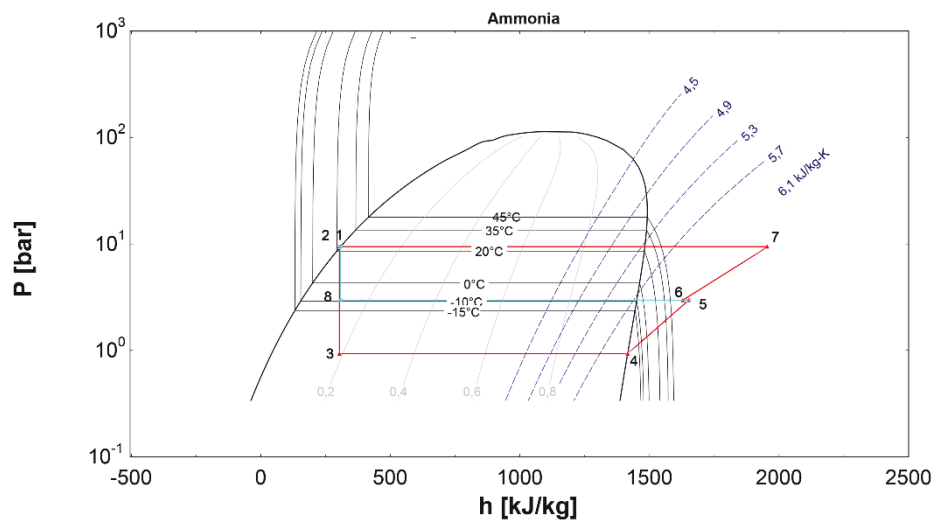


Figura 31 Ciclo termodinamico del sistema doppio stadio per il caso E.

La tabella mostra invece la variazione del COP in relazione alle temperature mensili, di conseguenza, alle temperature di condensazione impostate nell'impianto.

Tabella 21 Analisi parametrica del COP nel sistema doppio stadio al variare della Temperatura di condensazione nel caso E.

<i>2018</i>	<i>T. Condensazione °C</i>	<i>COP Mono stadio</i>
<i>gennaio</i>	17,06	2,01
<i>febbraio</i>	15,49	2,09
<i>marzo</i>	16,81	2,02
<i>aprile</i>	22,07	1,79
<i>maggio</i>	25,38	1,66
<i>giugno</i>	27,26	1,59
<i>luglio</i>	30,17	1,50
<i>agosto</i>	30,27	1,50
<i>settembre</i>	27,31	1,59
<i>ottobre</i>	23,97	1,71
<i>novembre</i>	20,98	1,83
<i>dicembre</i>	16,26	2,05
	22,752	
	media COP annua	1,78

Il caso G, allo stato attuale presenta già un sistema doppio stadio, e il COP medio calcolato dal software EES per la condizione di temperatura di condensazione media di 22,75 °C è del valore di 1,81.

La tabella mostra invece la variazione del COP in relazione alle temperature mensili, di conseguenza, alle temperature di condensazione impostate nell'impianto.

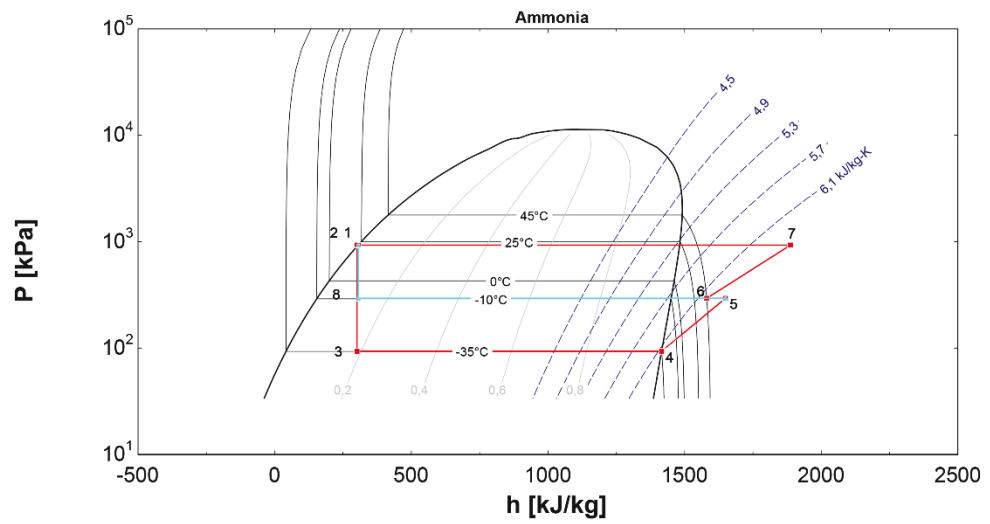


Figura 32 Ciclo termodinamico del sistema doppio stadio per il caso G.

Tabella 22 Analisi parametrica del COP nel sistema doppio stadio al variare della Temperatura di condensazione nel caso G.

<i>2018</i>	<i>T. Condensazione °C</i>	<i>COP Mono stadio</i>
<i>gennaio</i>	15,86	2,07
<i>febbraio</i>	12,30	2,27
<i>marzo</i>	16,81	2,02
<i>aprile</i>	22,45	1,77
<i>maggio</i>	25,61	1,65
<i>giugno</i>	26,52	1,62
<i>luglio</i>	28,45	1,55
<i>agosto</i>	29,61	1,52
<i>settembre</i>	27,55	1,58
<i>ottobre</i>	23,65	1,72
<i>novembre</i>	19,31	1,90
<i>dicembre</i>	15,35	2,10
	21,95	
	media COP annua	1,81

Il valore del COP medio dell'ultimo caso, nominato col codice H, è del valore di 1,62 e la tabella sottostante descrive l'analisi parametrica del COP al variare della temperatura di condensazione.

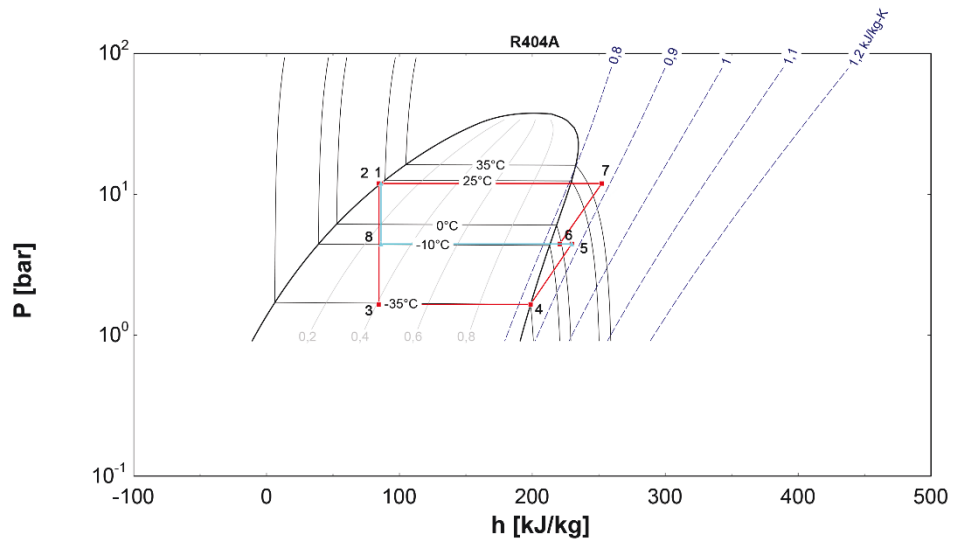


Figura 33 Ciclo termodinamico del sistema doppio stadio per il caso H.

Tabella 23 Analisi parametrica del COP nel sistema doppio stadio al variare della Temperatura di condensazione nel caso H.

2018	T. Condensazione °C	COP Mono stadio
<i>gennaio</i>	15,99	1,65
<i>febbraio</i>	13,35	1,78
<i>marzo</i>	16,03	1,65
<i>aprile</i>	22,58	1,39
<i>maggio</i>	25,46	1,29
<i>giugno</i>	27,09	1,24
<i>luglio</i>	30,32	1,14
<i>agosto</i>	29,88	1,15
<i>settembre</i>	27,29	1,23
<i>ottobre</i>	23,72	1,35
<i>novembre</i>	19,97	1,49
<i>dicembre</i>	18,12	1,56
	22,482	
	media COP annua	1,41

La tabella che segue riassume il valore dei COP ottenuti nei vari casi studiati sia nella condizione di compressione monostadio che doppio stadio e la variazione percentuale che questo tipo di variazione, in particolare sostituzione tecnologica ha portato ad incidere sul consumo di energia elettrica e sul COP.

Ad esempio nel caso dell'azienda A la variazione percentuale dell'energia elettrica è stata del 19% e l'equazione che segue ne descrive il risultato.

$$\Delta EE(\%) \text{ caso A} = \frac{2.250.346,85 \text{ (kWh/anno)} - 2.780.601 \text{ (kWh/anno)}}{2.780.601 \text{ (kWh/anno)}} = 19\%$$

Tabella 24 COP dei casi considerati (compressione monostadio e doppio stadio), variazione percentuale del COP e variazione dell'energia elettrica legata alla tecnologia introdotta a scopo migliorativo.

<i>aziende</i>	<i>COP Mono Stadio</i>	<i>COP Doppio Stadio</i>	$\Delta COP(\%)$	$\Delta EE(\%)$
<i>A</i>	1,74	2,15	23,56%	19%
<i>B</i>	1,53	1,88	22,87%	18,61%
<i>C</i>	1,52	1,83	20,39%	16,93%
<i>D</i>	1,45	1,78	22,75%	18,53%
<i>E</i>	1,48	1,78	20,27%	16,85%
<i>F</i>	1,36	1,64	20,58%	17,07%
<i>G</i>		1,81		
<i>H</i>	1,41	1,62	14,89%	12,96%

Questo lavoro ha cercato di far luce sul panorama italiano degli impianti di refrigerazione industriale. In particolare, stima che il COP può essere previsto nei vari sistemi refrigeranti installati dalle ditte operanti in tale settore.

Nonostante la limitata quantità di dati disponibili, è stato possibile modellare e simulare gli impianti in modo tale da rilevare quelle che potrebbero essere le inefficienze ed andare a agire direttamente sul sistema cambiando alcuni dati o sostituendolo con uno più efficiente. I dati di 8 aziende (A, B, C, D, E, F, G, H), ottenuti per mezzo di un'indagine statistica, sono stati utilizzati come input di modelli matematici sviluppati con i software Bitzer ed EES. Per i sistemi di refrigerazione delle 8 aziende sono stati trovati i seguenti COP: 1.74, 1.53, 1.52, 1.45, 1.48, 1.36 e 1.41 (mancante il caso G). Tutti questi COP si riferiscono ad un ciclo di compressione del vapore che opera secondo un sistema monostadio. Lo studio dimostra inoltre che è possibile ottenere efficienze più elevate in termini di COP adottando un sistema a due stadi. In questo caso, gli 8 sistemi di refrigerazione mostrano COP di 2.15, 1.88, 1.83, 1.78, 1.78, 1.64, 1.81 e 1.62, valori superiori di oltre il 20% per alcuni casi rispetto a quelli corrispondenti al ciclo monofase.

Si è stimato inoltre come la variazione e gli interventi sulla tecnologia esistente abbia influito sulla variazione di energia elettrica consumata annualmente dall'azienda.

4.4. Calcolo dei consumi energetici in base alle categorie di refrigerazione

Parallelamente allo studio precedentemente descritto, è stata condotta una seconda analisi riguardante i casi studio per verificare, nell'immediato, i valori dei consumi energetici espressi in kWh/kg e kWh/m³.

Uno degli indicatori utilizzato nell'analisi è il consumo totale di energia per volume alimentare che, nel caso di refrigerazione industriale si tratta del volume dell'area di stoccaggio.

Differente è invece l'approccio per il calcolo dell'indicatore di consumo energetico nelle aziende i cui sistemi di refrigerazione sono maggiormente legati alla produzione e alla lavorazione degli alimenti, come il congelamento e la produzione per l'appunto.

La prima differenziazione delle aziende avviene dividendole per categorie di refrigerazione:

- produzione;
- congelamento;
- stoccaggio.

La seconda differenziazione avviene per il calcolo dell'indicatore di consumo energetico:

- consumo totale di energia per area di stoccaggio (kWh/m³);
- consumo totale di energia per il carico di refrigerazione (kWh/kg) nelle categorie di congelamento e produzione.

Tra i casi studio, due sono le aziende che si occupano principalmente di stoccaggio alimentare (casi D e H), mentre le altre 6 (A, B, C, E, F e G) sono caratterizzate da sistemi di refrigerazione volti alla produzione del prodotto alimentare e al congelamento.

La tabella che segue mostra i vari casi analizzati e i dati, ottenuti per mezzo dell'indagine statistica, riguardanti l'elettricità totale utilizzata nell'impianto di refrigerazione, il volume dell'area di stoccaggio ed il carico di refrigerazione.

Tabella 25 Dati necessari per il calcolo dei consumi energetici

<i>aziende</i>	<i>Elettricità totale utilizzata nell'impianto di refrigerazione (kWh/anno)</i>	<i>Volume dello stabilimento dedicato allo stoccaggio (m³)</i>	<i>Movimentazione uscita prodotti alimentari [t/anno di congelato (-18 °C)]</i>
<i>A</i>	2780601	20076	6850
<i>B</i>	1500000	9000	3000
<i>C</i>	2800000		7000
<i>D</i>	500000	13000	9000
<i>E</i>	4500000	24.000	5.000
<i>F</i>	5490000	50544	0
<i>G</i>	35000	58.000	0
<i>H</i>	5500000	170.000	20.000

Come si evince dalla tabella, i dati necessari per il calcolo dei consumi energetici nei casi F e G non sono stati pervenuti, ed essendo aziende rivolte alla produzione dei prodotti alimentari non è stato possibile calcolare il consumo totale di energia per il carico di refrigerazione (kWh/kg).

Nella tabella sottostante sono divisi, per categoria di refrigerazione, i consumi totali di energia, sia per volume di stoccaggio, che per carico di refrigerazione nei differenti casi presi in esame.

Tabella 26 Valori dei consumi energetici espressi in kWh/kg e kWh/m³ per azienda

<i>aziende</i>	(kWh/m ³)	(kWh/kg)
<i>A</i>		0,4
<i>B</i>		0,5
<i>C</i>		0,4
<i>D</i>	38,46	
<i>E</i>		0,9
<i>H</i>	32,35	

Capitolo 5.

Conclusioni

L'obiettivo principale del lavoro presentato in questa tesi è stato quello di proporre una metodologia che consentisse alle aziende operanti nel settore della catena del freddo alimentare, di monitorare l'efficienza energetica dei propri impianti attraverso la definizione di un indice di prestazione energetica avendo a disposizione una quantità limitata di dati in input.

Inizialmente è stata condotta un'indagine statistica, che ha coinvolto le aziende italiane operanti nel settore preso in considerazione. L'indagine prevedeva la compilazione di un questionario, somministrato alle aziende, riguardante nello specifico le caratteristiche dell'impianto di refrigerazione, con lo scopo di definire le prestazioni effettive dei sistemi oggi presenti nel panorama dell'industria della refrigerazione, ed identificare le aree con i problemi più comuni e dove è possibile risparmiare gran parte dell'energia elettrica.

Queste azioni avevano lo scopo di incoraggiare i proprietari delle industrie ad intraprendere iniziative di efficienza energetica, come l'installazione di nuove tecnologie e attrezzature.

È stata proposta una metodologia con la quale l'azienda ha la possibilità di modellare e simulare il proprio sistema di refrigerazione avendo a disposizione una limitata quantità di dati ed ottenere un coefficiente di prestazione (COP) che si avvicini al comportamento reale dell'impianto. Definito il modello simulato allo stato attuale è stato possibile, investigare eventuali soluzioni tecnologiche volte al miglioramento dell'efficienza energetica dell'impianto.

La variazione tecnologia apportata nel lavoro è stata quella della sostituzione del ciclo monostadio, oggi comunemente utilizzato nell'industria della refrigerazione alimentare, con un ciclo bistadio, di norma più efficiente.

La metodologia è stata applicata per le 8 aziende italiane che hanno aderito all'indagine statistica.

I dati delle aziende sono stati analizzati e modellati, prima allo stato attuale ed in seguito allo stato migliorato attraverso la variazione della tecnologia al sistema di refrigerazione ed i risultati mostrano un discreto aumento dell'efficienza energetica, nei modelli in simulazione allo stato migliorato.

Per gli otto casi, a seconda della categoria di refrigerazione, è stata effettuata una seconda analisi, riguardante i consumi energetici sia per volume di stoccaggio che per carico di refrigerazione, che consente alle aziende di avere una visione più immediata di quelli che sono i consumi energetici.

I risultati hanno mostrato come questo tipo di variazione tecnologica ha portato ad incidere sul COP del sistema di refrigerazione per un valore di 23,56% nel caso migliore e del 18,53% sul consumo di energia elettrica annuo.

Gli sviluppi futuri potrebbero includere nella metodologia un'analisi costi-benefici derivante da un ipotetico investimento tecnologico. Valutare quindi, in termini di costi, quanto sia conveniente investire su nuove tecnologie attraverso uno scouting tecnologico dettagliato che consenta quindi di valutare in quanto tempo sia possibile un ritorno economico. Nelle valutazioni verranno considerati i costi di investimento oltre che i risparmi energetici derivanti da sistemi più innovativi ed efficienti.

Bibliografia

- Acha, S., Y. Du, and N. Shah. 2016. "Enhancing Energy Efficiency in Supermarket Refrigeration Systems through a Robust Energy Performance Indicator." *International Journal of Refrigeration* 64, pp. 40–50.
- Bansal, P. 2012. "A Review - Status of CO₂ as a Low Temperature Refrigerant: Fundamentals and R&D Opportunities." *Applied Thermal Engineering* 41, pp. 18–29.
- BITZER, 2018. 2018. "BITZER Software."
- Bonacina, F., L. De Propris, A. Marchegiani, and F. Mori. 2015. "Industrial Energy Management Systems in Italy: State of the Art and Perspective." *Energy Procedia* 82, pp. 562–69.
- Cavallini, A. and L. Mattarolo. 1992. *Termodinamica Applicata*. CLEUP.
- Cecchinato, L., M. Corradi, and S. Minetto. 2012. "Energy Performance of Supermarket Refrigeration and Air Conditioning Integrated Systems Working with Natural Refrigerants." *Applied Thermal Engineering* 48, pp. 378–91.
- Chung, W., Y. V. Hui, and Y. M. Lam. 2006. "Benchmarking the Energy Efficiency of Commercial Buildings." *Applied Energy* 83(1) pp. 1–14.
- Clodic D., Pan X., Devin E., Michneau T., Barrault S. 2013. *Alternatives to High GWP HFCs in Refrigeration and Air-Conditioning Applications*.
- DL 102/2014. 2014. D.L n. 102/2014 (Energia).

- Duiven J. E. and Binard P. n.d. “Refrigerated Storage: New Developments.” in Bulletin of the IIR, Vol. 2002-2.
- EES. 2019. “EES: Engineering Equation Solver | F-Chart Software: Engineering Software.”
- EnergyStar. 2008. “Facility Type: Supermarkets and Grocery Stores.” Epa (January) pp. 1–19.
- Evans, J. A., A. M. Foster, J. M. Huet, L. Reinholdt, K. Fikiin, C. Zilio, M. Houska, A. Landfeld, C. Bond, M. Scheurs, and T. Van Sambeek, 2015. “Specific Energy Consumption Values for Various Refrigerated Food Cold Stores.” Refrigeration Science and Technology 74(2014) pp. 2815–22.
- Evans, J. A. and A. Gigiel., 2010. “Reducing Energy Consumption in Cold Storage Rooms.” 1st IIR International Cold Chain Conference, Cambridge UK, 2010.
- Evans, J. A., A. Gigiel, F. Refrigeration, C. Building, and N. Somerset. 2007. “Reducing the Energy Consumption in Cold Stores.”
- Evans, J. A., E. C. Hammond, A. Gigiel, L. Reinholdt, K. Fikiin, and C. Zilio. 2014. “Assessment of Methods to Reduce the Energy Consumption of Food Cold Stores.” Applied Thermal Engineering 62(2) pp. 697–705.
- FAO, (Food and Agriculture Organisation). 2013. Statistical Yearbook 2013. Vol. Part 3.
- FAO, (Food and Agriculture Organisation). 2015. Global Food Losses and Food Waste, 2011.
- Foster, A. M., T. Brown, J. A. Evans, and G. Maidment. 2019. “Relationship between

- Specific Energy Consumption and Size of Supermarket Stores.” in 25th IIR International Congress of Refrigeration, Montreal, Canada, 2019, pp. 4973–80.
- Foster, A. M., J. A. Evans, and G. Maidment. 2018. “Benchmarking of Supermarket Energy Consumption.” *Refrigeration Science and Technology* 2018-April (117) pp. 62–68.
- Foster, A. M., L. O. Reinholdt, T. Brown, E. C. Hammond, and J. A. Evans. 2016. “Reducing Energy Consumption in Cold Stores Using a Freely Available Mathematical Model.” *Sustainable Cities and Society* 21 pp. 26–34.
- Frigo Tecnica Internazionale SpA. n.d. “Frigo Tecnica Internazionale SpA –.” URL (<https://www.frigotecnica.com/>).
- IEA, International Institute of Refrigeration. 2015. “IEA, Electricity/Heat in World in 2009.” URL (<https://www.iea.org/statistics/electricity/>).
- IIR, International Institute of Refrigeration. 2007. “Refrigeration Drives Sustainable Development.” URL (http://www.iifir.org/medias/medias.aspx?INSTANCE=exploitation&PORTAL_ID=portal_model_instance__News_dossiers_thematiques_en.xml&SYNCMENU=DOSSIER_THEMATIQUE&SETLANGUAGE=EN).
- IIR, International Institute of Refrigeration. 2009. “5th Informatory Note on Refrigeration and Food.” pp. 9–11.
- IIR, International Institute of Refrigeration. 2015. “The Role of Refrigeration in the Economy.” 29th Informatory Note on Refrigeration Technologies 13(5) p. 210.
- JRC. 2015. *Energy Use in the EU Food Sector: State of Play and Opportunities for*

- Improvement. Luxembourg: Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Kolokotroni, M., Z. Mylona, J. A. Evans, A. M. Foster, and R. Liddiard. 2019. "Supermarket Energy Use in the UK." *Energy Procedia* 161(2018) pp. 325–32.
- Ministero Sviluppo Economico. 2016. "Chiarimenti in Materia Di Diagnosi Energetica Nelle Imprese Ai Sensi Dell'articolo 8 Del Decreto Legislativo N°102 Del 2014." (1) pp. 1–11.
- Mossad, R. 2011. "Energy Usage Reduction in Supermarket Refrigerated Food Cabinets."
- Mudgal, S., Tinetti, B., Bain, J., Cervantes R. and de Prado Trigo A. 2011. "Preparatory Study for Eco-Design Requirements for EuPs, Lot 1. Task 2: Economic and Market Analysis." 33(August) pp. 1–82.
- Sawalha, S. 2008. "Theoretical Evaluation of Trans-Critical CO₂ Systems in Supermarket Refrigeration. Part II: System Modifications and Comparisons of Different Solutions." *International Journal of Refrigeration* 31(3) pp. 525–34.
- Schönenberger, J., A. Hafner, K. Banasiak, and S. Girotto. 2014. "Experience with Ejectors Implemented in a R744 Booster System Operating in a Supermarket." in 11th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants: Natural Refrigerants and Environmental Protection, GL 2014 pp. 755–65.
- Spyrou, M. S., K. Shanks, M. J. Cook, J. Pitcher, and R. Lee. 2014. "An Empirical Study of Electricity and Gas Demand Drivers in Large Food Retail Buildings of a National Organisation." *Energy and Buildings* 68 pp. 172–82.

- Suamir, I. N. 2012. Integration of Trigeneration and Co 2 Based Refrigeration Systems for Energy Conservation.
- Tallini, A. and L. Cedola. 2016. "Evaluation Methodology for Energy Efficiency Measures in Industry and Service Sector." *Energy Procedia* 101(September) pp. 542–49.
- Tassou, S. A., Y. Ge, A. Hadawey, and D. Marriott. 2011. "Energy Consumption and Conservation in Food Retailing." *Applied Thermal Engineering* 31(2–3) pp. 147–56.
- UE, 2012/27. 2012. "DIRETTIVA 2012/27/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO." 27. (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX:32012L0027>).
- UNEP. 2010. Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee.

