TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Ingegneria energetica e nucleare

Innovazione nella produzione di energia

Politecnico di Torino

Studio di fattibilità di sistemi di dissipazione del calore in un ciclo produttivo

CANDIDATO: SCARAFIA FEDERICO

MATRICOLA: 262936

RELATORE: PROFESSORE MASOERO MARCO

CORRELATORE AZIENDALE: INGEGNERE CAVALERI ANDREA

ANNO ACCADEMICO: 2020-2021

PREFAZIONE

L'obiettivo della seguente Tesi è quello di concludere il Percorso di Studi al Politecnico di Torino, effettuando un tirocinio lavorativo presso un'azienda al fine di acquisire le basilari competenze lavorative necessarie ad essere introdotto nel mondo del lavoro, oltre che applicare sul campo le conoscenze acquisite tramite gli studi compiuti.

La Tesi è stata svolta presso l'azienda Rivolta Energia S.r.l. (da ora definita Riven) la quale propone soluzioni evolute per l'efficienza energetica, la redazione di attestati di prestazione energetica (APE) per edifici e la produzione di energia da fonti rinnovabili.

Lo studio della Tesi, concordato con il Relatore, il professor. Masoero ed il referente lavorativo l'Ing. Cavaleri, riguarda un'analisi energetica ed economica su possibili soluzioni di raffreddamento di liquidi derivanti da processi industriali in base alla richiesta del cliente. Lo studio è stato svolto in maniera teorica, ma con l'utilizzo di dati reali, ottenuti tramite ricerca su Internet e contattando le varie aziende produttrici di gruppi frigoriferi; i dati ottenuti sono poi stati analizzati e confrontati tra di loro, in modo tale da averne una valutazione economica e trovare il miglior modello di gruppo frigorifero proponibile.

Sommario

1. PANORAMICA SUL CONSUMO ENERGETICO: 4
2. INTRODUZIONE E STATO DELL'IMPIANTO: 7
3. DESCRIZIONE DELLE COMPONENTI 13
3.1. REFRIGERATORI 13
3.2. AUSILIARI DI RAFFREDDAMENTO 17
TABELLE SU TORRI EVAPORATIVE 21
4. AZIENDE OGGETTO DELLO STUDIO 25
5. PRESENTAZIONE E STUDIO DEI MODELLI 28
5.1. IPOTESI E DATI PER LO SVILUPPO DELLO STUDIO 31
5.2. STUDIO DEI MODELLI 33
GRUPPO ATR: 34
GRUPPO RHOSS: 36
GRUPPO CLIVET: 38
GRUPPO FRIGEL: 40
6. CONFRONTO ECONOMICO 42
7. CONCLUSIONI 47
8. BIBLIOGRAFIA 48
INDICE DELLE FIGURE: 49
INDICE DELLE TABELLE: 50
SITOGRAFIA: 51

1. PANORAMICA SUL CONSUMO ENERGETICO:

Il consumo energetico a livello mondiale è rapidamente aumentato nel corso degli ultimi anni, con un conseguente aumento delle emissioni di gas inquinanti e climalteranti: risulta dunque fondamentale e necessario intraprendere azioni di riduzione ed efficientamento dell'utilizzo dell'energia a livello mondiale. Secondo l'agenzia IEA (*International Energy Agency*, Agenzia Internazionale dell'Energia), il raggiungere lo scenario *'Sustainable Development'* (Sviluppo Sostenibile) che prevede il limitare l'innalzamento della temperatura globale ben al di sotto dei 2°C e possibilmente entro gli 1,5°C (come definito con gli accordi di Parigi) richiede e richiederà un rapido cambiamento su tutte le componenti del comparto dell'energia, procedendo con tagli netti alle emissioni tramite l'utilizzo combinato di nuove tecnologie e combustibili che siano una soluzione economica ed efficace per tutti, oltre che una revisione dei consumi e dei comportamenti a livello mondiale.

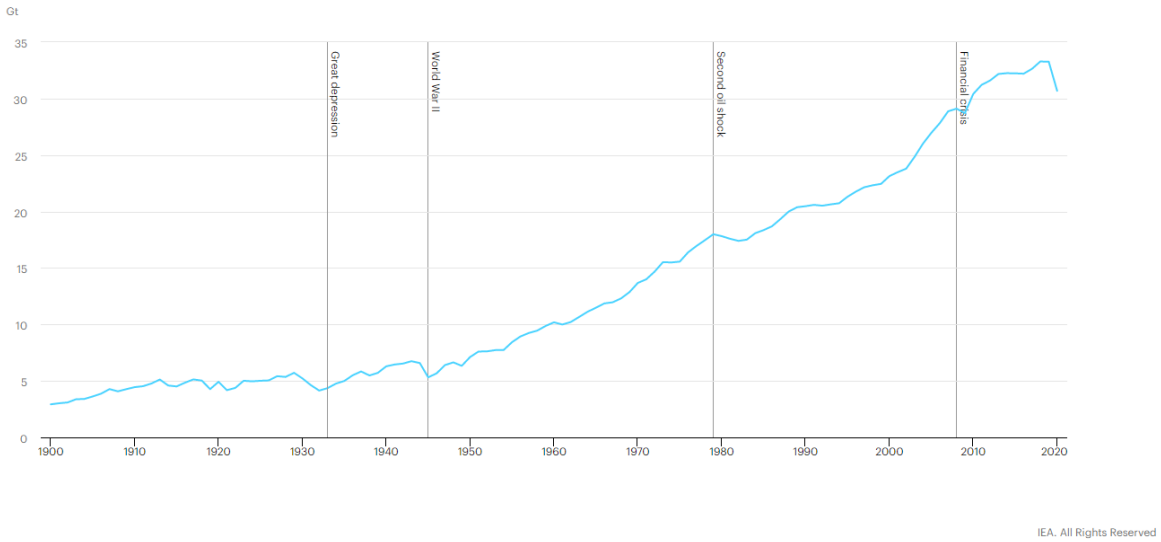

Figura 1 - Evoluzione delle emissioni globali di CO2.

Attualmente si stima che l'energia globalmente prodotta sia di 14034 Mtoe (*Million Tonnes of Oil Equivalent*, milioni di tonnellate di petrolio equivalente), con un prodotto interno lordo mondiale di 80079 miliardi di dollari. Come si può ricavare da tali dati e dalla figura 1 (presa dal sito IEA), l'obiettivo di ridurre le emissioni di CO2 rappresenta un progetto estremamente ambizioso e complesso.

Attualmente, anche a seguito della crescente consapevolezza e necessità di agire, numerosi Paesi hanno cominciato ambiziosi progetti riguardo alla riduzione dei consumi e alla transizione verso fonti energetiche rinnovabili: tra di essi l'Unione Europea ha creato un piano d'azione, il *Green New Deal*.

Esso prevede il raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050, promuovendo l'uso efficiente delle risorse e passando a un'economica pulita e circolare.

Considerando i consumi energetici europei dal 1990 al 2018, essi si caratterizzavano come rappresentato nella figura 2 (presa dal sito IEA, riportante i dati raccolti nel World Energy Balances 2020, un servizio di raccolta dati online dei bilanci energetici di più di 180 Paesi):

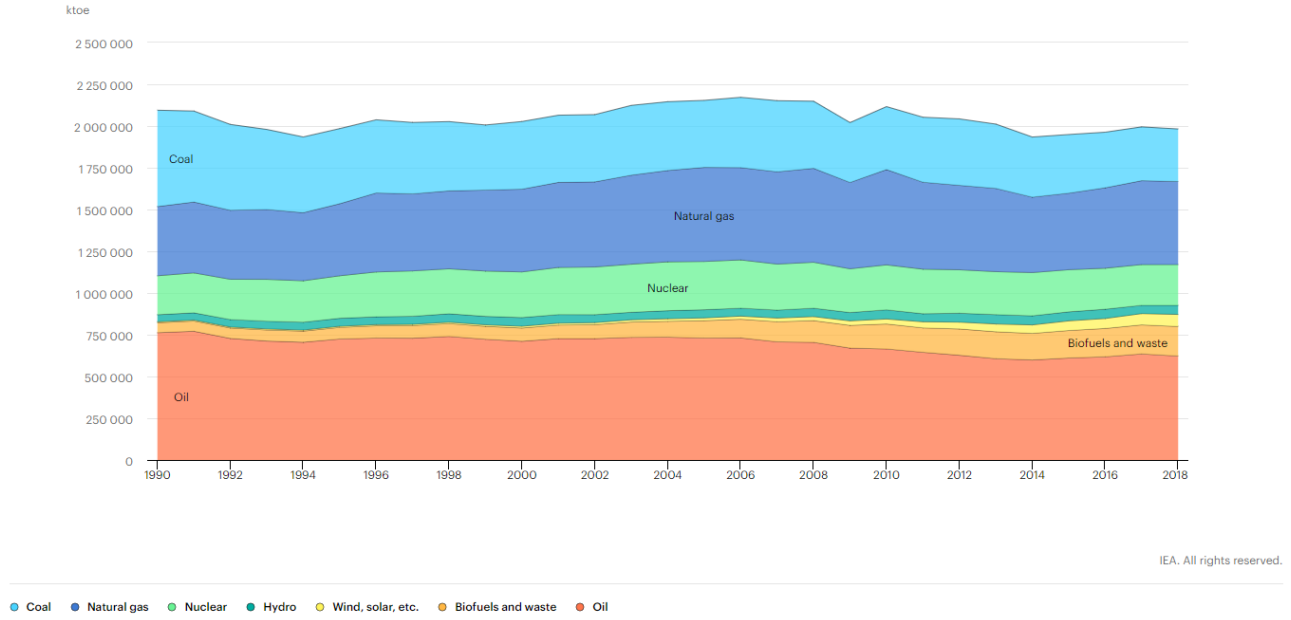

Figura 2 - Consumo totale di energia in Europa, 1990-2018.

Come si può notare, gran parte dei combustibili utilizzati erano fossili, mentre solamente una piccola quota era fornita da fonti rinnovabili. Il Green New Deal rappresenta dunque una grossa sfida per tutti i Paesi Europei; per il raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050 sarà necessaria l'azione di tutti i settori dell'economia e della ricerca:

- Investendo in tecnologie rispettose dell'ambiente;
- Sostenere l'industria dell'innovazione;
- Introdurre forme di trasporto privato e pubblico più pulite, economiche e sane;
- Decarbonizzare il settore energetico;
- Garantire una maggiore efficienza energetica degli edifici;
- Collaborare con i partner internazionali per il miglioramento degli standard ambientali mondiali.

Tra di essi, l'Italia condivide pienamente l'impegno comunitario teso a rafforzare l'impegno per la decarbonizzazione dell'economia e promuovere il Green New Deal, inteso come un patto verde con le imprese e i cittadini, che consideri l'ambiente come motore economico del Paese.

L’esplicazione dei contenuti del Green New Deal verrà manifestato attraverso provvedimenti di recepimento delle Direttive Comunitarie e promuovendo ulteriori iniziative.

Come si può vedere nella figura 3 sottostante, già a partire dagli scorsi anni una fetta sempre più grande dei consumi italiani è stata soddisfatta da fonti rinnovabili, con un calo del consumo di carbone e petrolio. Risulterà tuttavia molto importante una progressiva decarbonizzazione dei settori ed uno spostamento della produzione di energia verso fonti rinnovabili, unita ad una generale riduzione dei consumi totali italiani tramite un efficientamento dei vari settori.

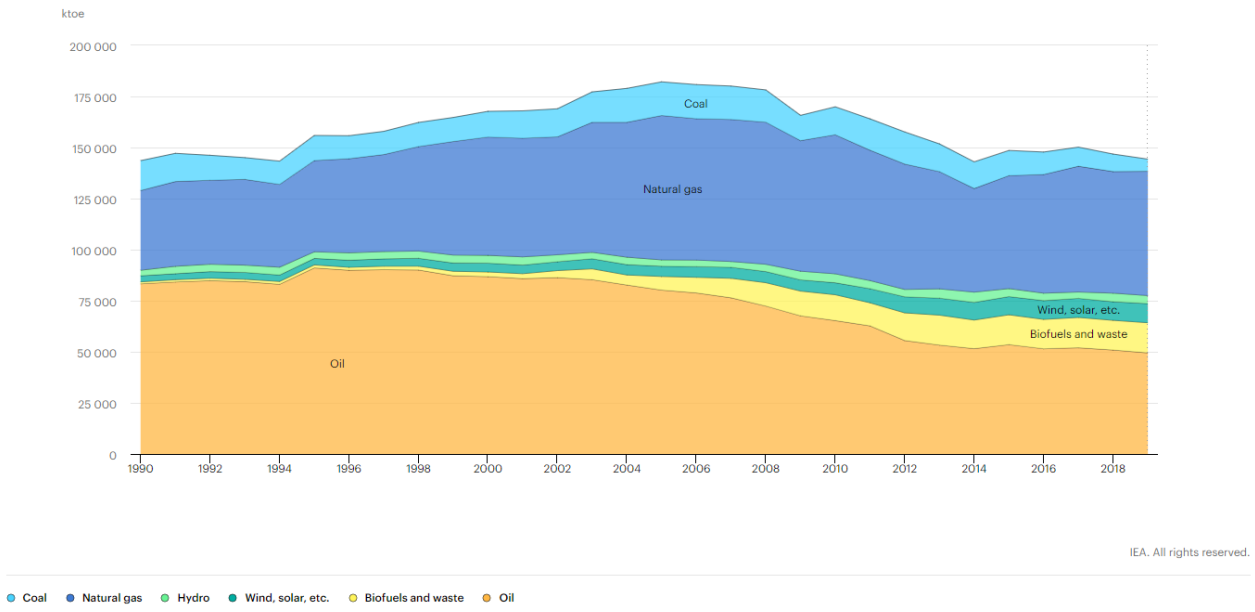

Figura 3 - Consumo energetico italiano per risorsa.

A tali fini è stato svolto il seguente studio economico-energetico, volto alla ricerca di nuove soluzioni di gruppi frigo per un efficientamento dell’impianto sotto esame e della riduzione dei consumi.

2. INTRODUZIONE E STATO DELL'IMPIANTO:

L'oggetto dello studio è un impianto industriale per produzione di materie plastiche a scopo alimentare, il cui nome è stato omesso per motivi di privacy dalla seguente Tesi. Tale azienda ha necessità di un rinnovamento energetico dello stabilimento, in particolare dell'ammodernamento dei gruppi frigo necessari ad abbattere i carichi termici prodotti dai vari processi industriali di produzione della plastica.

Ai fini dello studio l'impianto è stato considerato in zone separate, con ciascuna il proprio fabbisogno energetico. È stato poi considerato il bilancio energetico dell'impianto considerando il calore fornito dai vari processi e dalle varie zone e la capacità di freddo prodotta dai gruppi frigo preesistenti necessaria a soddisfare i carichi. I dati e le informazioni tecniche riguardo l'impianto sono stati forniti dalla Riven S.r.l. tramite una Diagnosi Energetica da loro effettuata precedentemente, considerando come periodo di riferimento gli anni 2016, 2017 e 2018, mentre uno schema dell'impianto, antecedente lo studio e di successive modifiche, è rappresentato nella figura 4 a pagina 11.

Per l'analisi dello stabilimento sono state considerate varie zone, ciascuna adibita ad uno specifico scopo e con i relativi consumi e carichi termici, dove per consumo ci si riferisce alla quantità di energia [J] richiesta per un dato compito, mentre per carico si intende una data potenza [W] che deve essere fornita o sottratta.

Le varie zone sono:

- Camera grigia: l'ambiente dove sono presenti i macchinari per la produzione della plastica. Il calore derivante dal processo produttivo necessita un abbattimento termico pari a 600 kW.
- Area compressori: locale in cui sono allocati i compressori necessari al fabbisogno di aria compressa della struttura. Il calore derivante dal processo produttivo necessita un abbattimento termico pari a 400 kW.
- Uffici: comprendenti locali amministrativi e mensa.
  Questi ambienti nel periodo estivo richiedono un abbattimento termico pari a 200 kW, mentre nel periodo invernale il riscaldamento è fornito da impianto a gas.

- Stampi: macchinari per la produzione della plastica mediante la pressofusione, comprensivi di 24 macchine con ciascuna un fabbisogno di 25 kW. Il calore derivante dal processo produttivo necessita un abbattimento termico pari a 600 kW.
- Oli delle presse: oli industriali che contribuiscono al raffreddamento degli stampi e che devono essere refrigerati a loro volta. Il calore derivante dal processo produttivo necessita un abbattimento termico o pari a 600 kW.
- Gruppi frigo: vari modelli di differenti taglie e tipologie che raffreddano l'acqua del circuito dissipando i carichi termici.

I vari ambienti sono raffreddati tramite un sistema ad acqua con un compensatore idraulico centrale unito a tutte le componenti dell'impianto necessitanti di controllo della temperatura: la sala compressori, il raffreddamento degli oli industriali e degli stampi per la produzione della plastica, gli uffici e la camera grigia per il condizionamento ed i vari gruppi frigo per la dissipazione del carico di calore prodotto dalle varie zone.
Inoltre, il circuito dell'acqua di raffreddamento degli stampi non usa la stessa acqua del compensatore centrale, ed è dunque collegato a quest'ultimo mediante uno scambiatore di calore: l'acqua utilizzata per gli stampi ha una mandata di 20°C ed un ritorno di 25°C, mentre l'acqua dal compensatore idraulico allo scambiatore di calore ha una mandata di 10°C ed un ritorno di 15°C, secondo il funzionamento ideale.

Il circuito di raffreddamento degli oli delle presse invece presenta una regolazione della temperatura mediante spillamento con una valvola a tre vie: l'acqua di raffreddamento degli oli ha una mandata di 40°C ed un ritorno di 30°C, mentre dal lato del compensatore idraulico la mandata è di 10°C ed il ritorno di 15°C; tramite la valvola avviene un mix delle temperature ed una integrazione dell'acqua nel circuito per compensare le perdite.

L'area compressori presenta l'interessante opportunità di un recupero di calore: i compressori, infatti, sono dotati di un energy recovery, che permette un recupero di 400 kWth prodotti tutto l'anno, tramite un fluido termovettore di 80°C in mandata e di 70°C circa al ritorno. Questo recuperatore di calore presenta poi una unità di condensazione remota, al fine di dissipare il calore inutilizzato.

Risulta quindi molto interessante ai fini dello studio la presa in considerazione di gruppi frigoriferi ad assorbimento, capaci eventualmente di utilizzare il calore recuperato.

Nella fase iniziale dello sviluppo della tesi erano presenti cinque gruppi frigoriferi, di diverse taglie e tipologie, dovuto alla crescita dell'impianto ed a incrementi successivi.
I gruppi frigo erano collegati ad unità remote quali torri evaporative e batterie di ventilatori elicoidali.
Nello specifico i cinque gruppi frigoriferi che si presentavano antecedentemente lo studio avevano le seguenti caratteristiche:

- Gruppo frigo n°1: di 1000 kW condensato ad acqua.
- Gruppo frigo n°2: di 600 kW condensato ad acqua.
- Gruppo frigo n°3: di 100 kW condensato ad aria.
- Gruppo frigo n°4: di 600 kW condensato ad aria.
- Gruppo frigo n°5: di 600 kW condensato ad aria.

Inoltre, alcuni di essi presentavano un funzionamento parziale:

- Il frigo n°1 aveva un funzionamento ridotto per via di uno dei tre compressori bucato, con conseguenti perdite di pressione e fluido. Inoltre, erano presenti anche problematiche relative allo scambiatore di calore, probabilmente dovute all'intasamento delle tubature o al deterioramento delle proprietà del fluido frigorigeno.
- La torre evaporativa del frigo n°2 presentava il compressore bucato e poteva quindi lavorare solamente al 50%.
- Il gruppo frigo n°5 presentava anch'esso un compressore bucato, limitandone il funzionamento al 50%.

Infine, i gruppi frigoriferi 3, 4 e 5 presentano un limitante sistema di innesto al compensatore idraulico, in quanto da un lato gli innesti andrebbero meglio raccordati, mentre dall'altro tali collegamenti convergono tutti e tre su un solo innesto: pertanto le sezioni delle tubature potrebbero non essere correttamente dimensionate o limitanti per il funzionamento dell'impianto.

Dai dati risultanti dallo studio energetico effettuato dalla Riven S.r.l. risultavano inoltre delle discrepanze riguardo alle temperature di targa di funzionamento delle macchine e le temperature registrate. Nello specifico, considerando gli interessi della Tesi:

- L’acqua di raffreddamento degli stampi dal lato del compensatore idraulico, anziché essere di 10°C di mandata e 15°C di ritorno, presenta invece temperature più alte: 14°C in ingresso e circa 20°C al ritorno.
- I gruppi frigo lavorano nel salto termico di 12-7°C, ma emerge che durante la stagione calda le temperature diminuiscano, nell’intervallo di 7°C in mandata e 5°C al ritorno.

Inoltre, la temperatura del compensatore idraulico, considerando non abbia stratificazioni di temperature per via del tipo di struttura, da progetto dovrebbe essere di 5,5°C; tuttavia si registrano temperature più alte, oscillanti tra i 7 e i 10°C.

È ipotizzato che queste discrepanze di temperature siano in parte dovute alla parziale operatività dei gruppi frigo e in parte al sistema di distribuzione ad accumulo centrale: tale soluzione, benché poco efficiente dal punto di vista energetico si è dimostrato molto versatile e affidabile all’azienda, in quanto tutte le produzioni e le utenze versano ed attingono da lì.

Si ritiene dunque che, in base ai dati rilevati dallo studio energetico effettuato durante il funzionamento a regime dell’impianto, ci possa essere un qualche meccanismo di feedback delle temperature, considerando da un lato i gruppi frigo difettosi e dall’altro i carichi termici di condizionamento degli uffici, che hanno una variazione durante l’anno.
Lo studio intende considerare quindi la sostituzione dei gruppi difettosi con altri più efficienti e moderni, in modo tale sia da standardizzare e organizzare efficientemente l’impianto, sia di portare ad una migliore gestione energetica.

Di seguito, nella figura 4, viene riportato schema semplificato dell'impianto allo stato iniziale dello studio della Tesi:

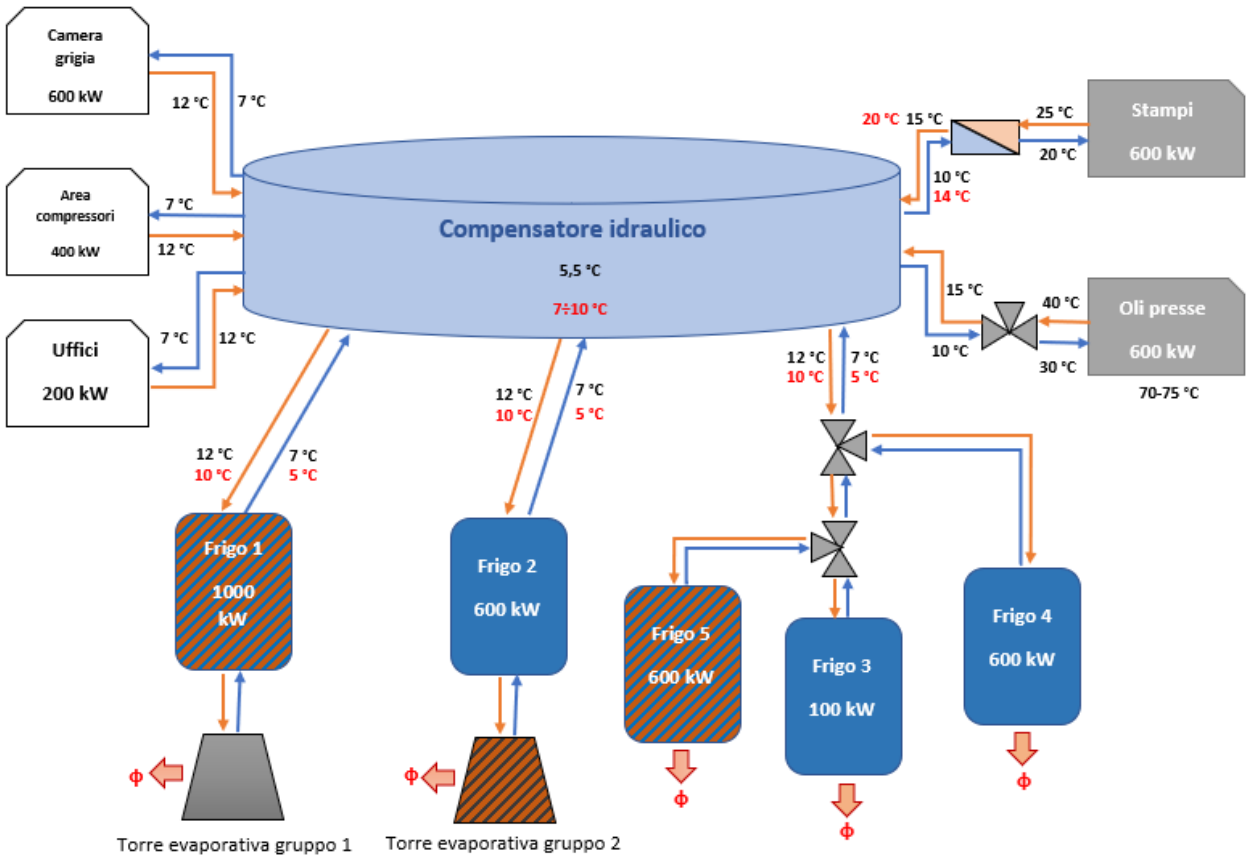

Figura 4 - Schema dell'impianto allo stato dell'arte antecedente lo studio.

Nella figura 4 sono presenti le varie utenze con riportato il loro fabbisogno energetico e il serbatoio centrale a cui sono tutte connesse. Sono stati rappresentati inoltre lo scambiatore di calore degli stampi e le valvole a tre vie utilizzate sia per gli oli di raffreddamento che per l'unione dei gruppi frigo 3, 4 e 5.

Sono anche state inserite le temperature delle varie utenze e delle portate in mandata e ritorno, di due colori: i valori in nero rappresentano le temperature di progetto, mentre le temperature in rosso rappresentano le temperature realmente registrate.

Recentemente l'azienda ha apportato alcune modifiche, mettendo a riposo il gruppo frigo n°5 e riparando e tenendo di backup il gruppo frigo n°1; inoltre è stata rimossa la torre evaporativa del frigo n°2 mentre quest'ultimo è stato collegato alla torre evaporativa del frigo n°1. È stato deciso inoltre di acquistare un nuovo gruppo frigo, al fine di ammodernare l'impianto e sostituire i due gruppi rimossi, della potenza frigorifera di 1200 o 1400 kW.

Infine, si considera il recupero di calore dall'area compressori prodotto tutto l'anno e utilizzabile per ridurre la richiesta di energia di altre componenti, eventualmente da integrare in un gruppo ad assorbimento.

La figura 5 invece rappresenta l'impianto a seguito delle modifiche effettuate:

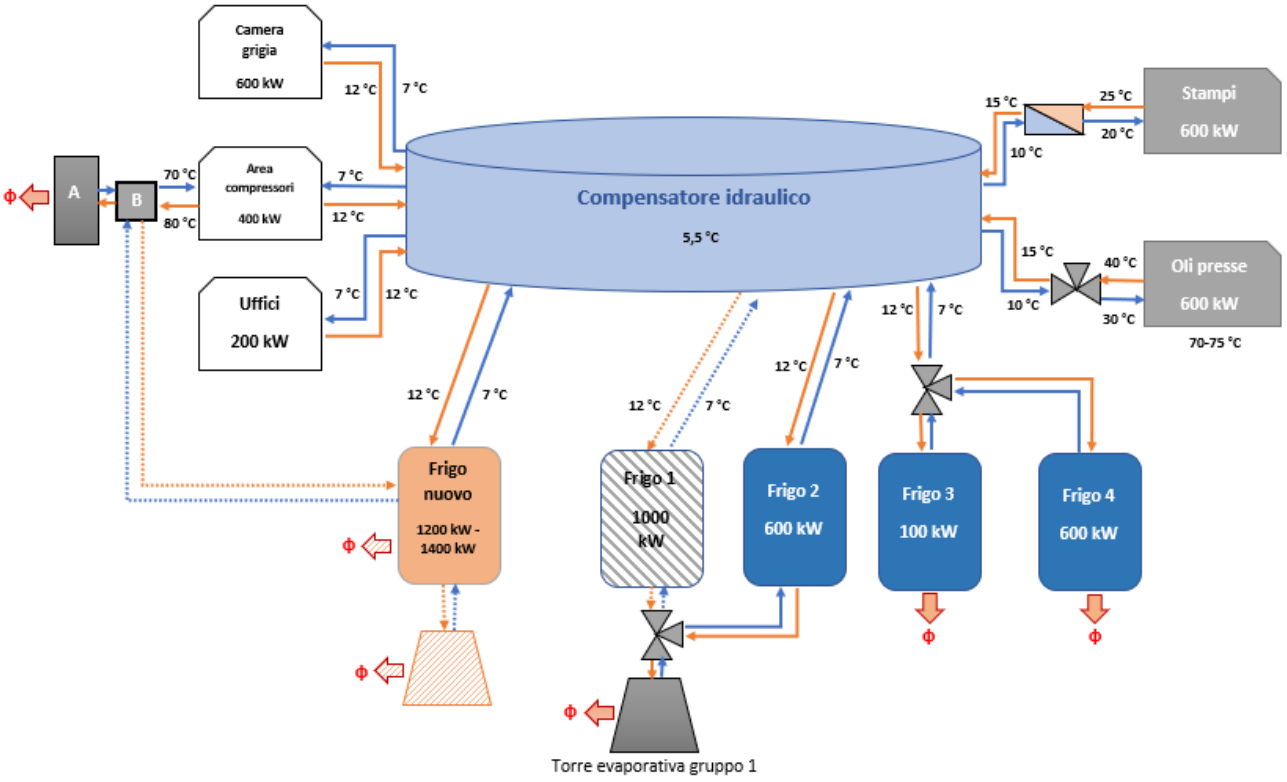

Figura 5 - Schema dell'impianto successivo alle recenti modifiche apportate, considerando l'ipotesi di progetto.

Come rappresentato il gruppo frigo 5 e la torre evaporativa 2 sono stati rimossi, il gruppo frigo 1 è stato messo in backup e il gruppo frigo 2 è stato collegato alla torre evaporativa 1. È stato inoltre aggiunto il gruppo frigo nuovo, con annessa una eventuale propria torre evaporativa. Nell'area compressori è stato inserito un recupero di calore, rappresentato dalla figura B, che va successivamente a collegarsi al gruppo frigorifero nuovo, per un eventuale utilizzo; il gruppo A alla sinistra dell'area compressori rappresenta invece l'unità di condensazione remota associata al recupero termico, la quale dissipa il calore nell'atmosfera.

3. DESCRIZIONE DELLE COMPONENTI

L'obiettivo dello studio è dunque la ricerca di alternative per l'acquisto di un nuovo gruppo frigo capace di soddisfare le richieste dell'impianto e sostituire i vecchi modelli frigo n°5 e n°1 con un altro più efficiente ed economicamente sostenibile. Partendo da ciò nel seguente capitolo sono descritte le due componenti principali e necessarie per un gruppo frigorifero. Tale gruppo, a seconda della tecnologia di funzionamento può essere rappresentato da una macchina frigorifera singola (chiamata anche refrigeratore) in grado di produrre freddo e smaltire il calore prodotto, o in alternativa di una macchina frigorifera abbinata ad un ausiliario di raffreddamento, la cui funzione è quella di smaltire il calore prodotto dal refrigeratore che altrimenti, per motivi impiantistici, non sarebbe in grado di dissipare nell'atmosfera. Tali tipologie presentano ognuna i propri vantaggi, da considerare in funzione del fabbisogno e delle richieste dell'impianto.

3.1. REFRIGERATORI

Le macchine frigorifere sono sistemi artificiali che appartengono alla categoria delle macchine operatrici, la cui funzione è indirizzata al trasferimento di calore da un livello termico inferiore ad uno superiore, producendo un effetto frigorifero. Per il loro funzionamento è necessaria un'azione dall'esterno, che può essere energia meccanica nel caso delle macchine frigorifere a compressione di gas o vapore, oppure sottoforma di calore ad un adeguato livello termico nel caso delle macchine frigorifere ad assorbimento. I refrigeratori, chiamati anche *chiller*, sono dunque macchine frigorifere preposte al raffreddamento delle utenze.

Le macchine frigorifere operano in modo ciclico, ovvero secondo trasformazioni termodinamiche, per cui si può avere come effetto il trasferimento di calore da un fluido ad un altro, che eseguite in un certo ordine e rappresentante in un opportuno grafico individuano una linea chiusa.

Le macchine frigorifere necessitano per il compimento del ciclo di un fluido frigorigeno che, subendo varie trasformazioni termodinamiche, permetta lo scambio termico con un fluido termovettore; tali fluidi frigorigeni necessitano di particolari caratteristiche quali la pressione di condensazione e di evaporazione, adeguati calore di evaporazione e volume specifico, nonché un impatto ambientale possibilmente basso: tipicamente questi refrigeranti sono gas ed i più utilizzati sono il R410a, il R407c e il R134a, ma quando possibile vengono anche utilizzati fluidi quali l'acqua e l'aria.

Inoltre, come prodotto del ciclo viene generato del calore di scarto, che deve essere dissipato nell'ambiente esterno tramite ausiliari di raffreddamento.

I principali cicli termodinamici su cui si basano le tecnologie delle macchine frigorifere sono i seguenti:

- Cicli a compressione di vapore: la tipologia più utilizzata consiste in fasi di compressione ed espansione del fluido refrigerante con conseguente passaggio di stato da fluido ad aeriforme e viceversa. Il fluido refrigerante, nello stato di vapore surriscaldato, viene inizialmente compresso sino al raggiungimento delle condizioni di interesse; dopodiché posto a contatto con un condensatore cede il proprio calore all'ambiente esterno o ad un altro fluido fino allo stato di liquido sottoraffreddato; successivamente tramite una valvola di laminazione il liquido viene espanso e, posto a contatto con un evaporatore preleva il calore dal fluido termovettore fino a ritornare nuovamente in una condizione di vapore surriscaldato. L'efficienza di tale processo dipende dunque dalla capacità di compressione ed espansione del fluido frigorigeno.

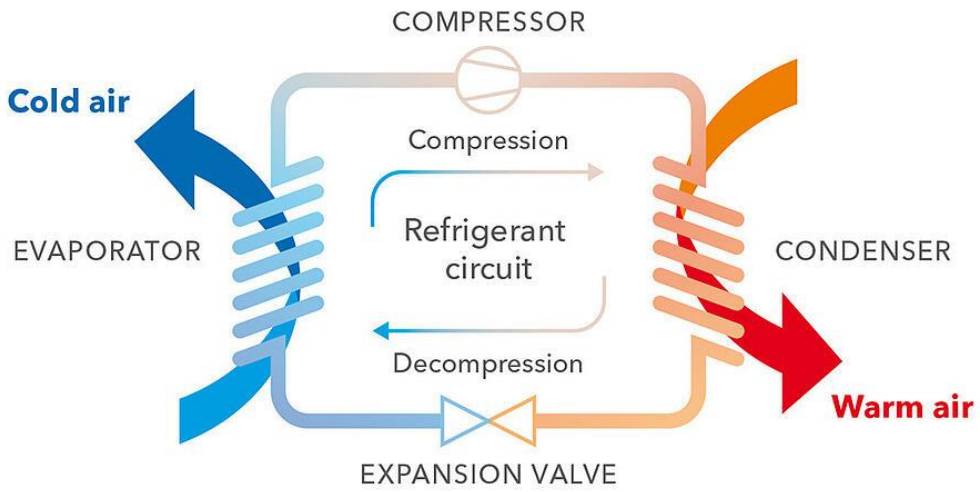

Figura 6 - Schema di un ciclo a compressione.

- Cicli ad assorbimento: tali soluzioni utilizzano calore ad un basso livello termico (solitamente 90-120°C) per scaldare e separare da una miscela a due componenti quella a tensione di vapore più elevata, e che successivamente con un processo simile a quello dei frigoriferi a compressione (condensazione, laminazione ed evaporazione) è in grado di produrre l'effetto frigorifero richiesto; tipicamente una delle miscele più utilizzate è il bromuro di litio (*LiBr*).

Il processo tramite absorbimento (gas-liquido, il più comune) sfrutta il calore di dissoluzione applicato ad un soluto in un solvente, che ciclicamente viene concentrato e diluito; il secondo sistema invece è quello tramite adsorbimento (gas-solido), usato più di rado. Tali cicli sono caratterizzati da una efficienza solitamente minore rispetto a quelli a compressone e di una maggiore complessità tecnica e di realizzazione, tuttavia la possibilità di utilizzare del calore di scarto unito ad un conseguentemente basso consumo elettrico possono risultare in una soluzione interessante.

Nei cicli ad assorbimento si sfrutta il calore di dissoluzione di un soluto in un solvente, che viene ciclicamente concentrato e diluito. Essi non presentano una particolare efficienza, ma permettono il raggiungimento di basse temperature (anche -60°C utilizzando ammoniaca come soluto e acqua come solvente), oltre a poter utilizzare scarti termici prodotti da altri processi o da cogenerazione per il proprio funzionamento, con un conseguente risparmio di energia utilizzata. Tipicamente si utilizzano come solvente l'acqua e soluto l'ammoniaca, che è il gas frigorigeno, oppure come soluto l'acqua e come solvente il bromuro di litio, ed in tal caso il fluido frigorigeno è il vapore acqueo. Questa tipologia di chiller richiede infatti calore per il proprio funzionamento per l'evaporazione del soluto, che può essere fornito sia tramite fiamma diretta che tramite vari recuperi di calore, per esempio vari tipi di fluidi di recupero o gas di scarico.

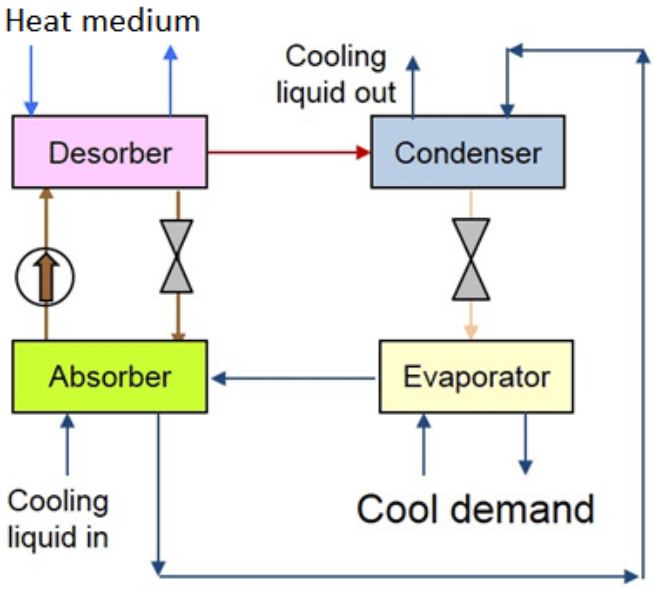

Figura 7 - Schema di un refrigeratore ad assorbimento.

Nella figura 7 è rappresentato un generico gruppo ad assorbimento in condizioni operative di raffreddamento del fluido di lavoro di processo (*Cool demand*). La fonte di calore apportata al processo (*Heat medium*) può genericamente essere del calore di recupero o in alternativa calore prodotto da un bruciatore, mentre l'acqua di raffreddamento (*Cooling liquid*), utilizzata per la condensazione della soluzione preleva il calore dal processo e viene successivamente smaltito tramite ausiliari di raffreddamento.

- Cicli inversi a gas: aventi come riferimento tecnico il ciclo Brayton-Joule, sono caratterizzati da un'alternanza ciclica di fasi di espansione e compressione del fluido frigorifero, che deve essere un gas (tipicamente l'aria), e che non implica il cambiamento di stato del fluido. Il ciclo è caratterizzato da un compressore (a cui è necessario fornire energia) che comprime il gas, che successivamente cede il proprio calore ad uno scambiatore; dopodiché il gas viene inviato in una turbina (la cui energia prodotta va a fornire una parte dell'energia richiesta dal compressore) in cui la sua temperatura viene abbassata: infine, passando nuovamente in uno scambiatore di calore assorbe il calore dal fluido termovettore, aumentando la sua temperatura e tornando nel compressore. Le sue prestazioni sono modeste, ma al contempo presenta i vantaggi di compattezza e leggerezza dell'impianto.

Considerando i refrigeratori esistono due metodologie principali attraverso cui il fluido frigorigeno del processo frigorifero viene raffreddato dopo che esso ha compiuto il ciclo prelevando il calore dal fluido termovettore:

- Raffreddamento a liquido;
- Raffreddamento ad aria.

Il raffreddamento a liquido utilizza un fluido refrigerante tramite cui viene scambiato calore con il fluido frigorigeno proveniente dal processo; la tipologia di scambio di calore può essere per convezione (e dunque tramite il calore sensibile) per sistemi che non prevedono il cambio di fase del fluido refrigerante, o in alternativa per scambio di calore latente dovuto all'evaporazione del fluido. Solitamente come fluido viene usata l'acqua, per via dei bassissimi costi e delle buone proprietà, tipicamente utilizzata per medie e grandi installazioni che ne abbiano una sufficiente quantità disponibile all'uso.

In tal caso la condensazione del fluido frigorigeno avviene mediante uno scambiatore di calore ad acqua, la quale a sua volta viene raffreddata tramite ausiliari di raffreddamento che possono essere la torre evaporativa (la quale utilizza lo scambio a calore latente), il d*ry cooler* (tramite scambio a calore sensibile) o un condensatore adiabatico (utilizzante un'unione dei due tipi di scambi). I chiller raffreddati ad acqua consentono performance più costanti rispetto a quelli raffreddati ad aria grazie alla relativa indipendenza dalle fluttuazioni di temperatura esterna; tipicamente sono posizionati all'interno e dunque presentano un tempo di vita più lungo.

Nel raffreddamento ad aria invece l'abbassamento della temperatura del fluido frigorigeno è ottenuto tramite la circolazione dell'aria esterna, con l'eventuale ausilio di ventilatori o cicli meccanici refrigeranti che facilitano lo scambio termico; in tal caso il processo si definisce ad aria forzata, mentre si parla di raffreddamento libero (*free cooling*) nel caso venga sfruttata la sola differenza di temperatura con l'ambiente esterno, senza l'ausilio della ventilazione. Il raffreddamento dei refrigeratori avviene dunque tramite una serie di batterie di ventilatori di tipo radiale o assiale. Tipicamente tale metodo trova applicazione in piccole e medie installazioni, dove sono presenti problemi di spazi o l'acqua utilizzabile è scarsa. Offrono bassi costi di installazione, oltre ad essere più compatti e ad avere una manutenzione più semplice rispetto a chiller refrigerati ad acqua; tuttavia, il fatto di risiedere quasi sempre all'esterno li espone agli elementi, compromettendone la durata della vita operativa.

3.2. AUSILIARI DI RAFFREDDAMENTO

Scopo degli ausiliari di raffreddamento è quello di disperdere i carichi termici nell'atmosfera; il fluido termovettore è l'acqua, e questi impianti possono essere usati per disperdere i carichi termici generati da processi industriali o da impianti HVAC.

Esistono differenti tipologie di ausiliari, in base alla tipologia di funzionamento e alle differenti componenti; la letteratura standard utilizza i seguenti criteri:

- Ausiliari *dry air-cooled* ed *evaporative wet cooled*; a seconda del tipo di scambio termico dominante, totalmente sensibile per il *dry cooling* e prevalentemente latente per *l'evaporative cooling*.

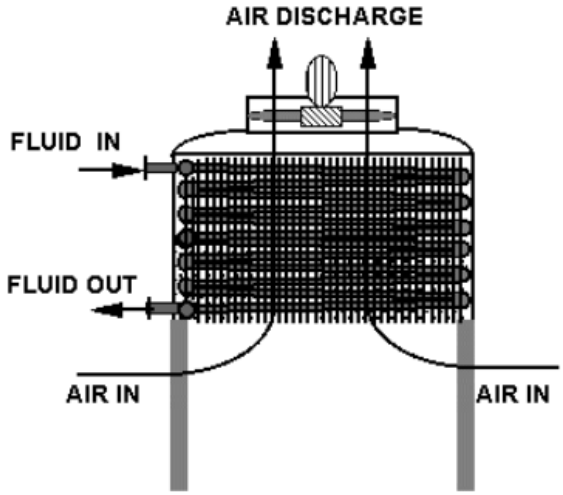

Figura 8 - Schema di una torre dry cooling.

Nella figura 8 sopra riportata è rappresentato il principio del *dry cooling*, nel quale una serpentina contenente l'acqua di processo viene raffreddata in maniera sensibile tramite il passaggio dell'aria; se il passaggio dell'aria è effettuata tramite l'uso di ventilatori si parla di ventilazione forzata, mentre nel caso in cui non siano presenti o non vengano utilizzati tali ventilatori si intende una ventilazione in *free cooling*.

Nella figura 9 invece è rappresentata una torre *dry cooling*, nella quale l'acqua di processo viene raffreddata tramite uno scambio termico latente dovuto all'evaporazione di acqua che viene spruzzata tramite ugelli sullo scambiatore; nel caso riportato in figura è presente un ricircolo dell'acqua della torre.

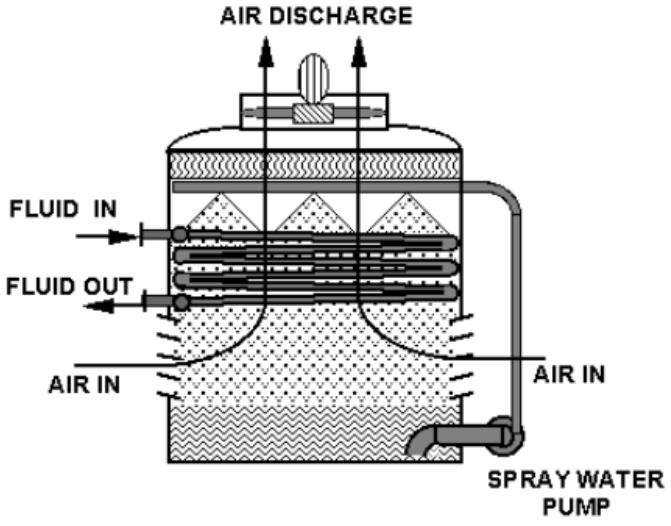

Figura 9 – Schema di una torre wet cooling.

- Circuito aperto o chiuso; in un circuito aperto (*open circuit*) il fluido di processo o refrigerante è a diretto contatto con l'ambiente, mentre in un circuito chiuso (*closed circuit*) il fluido non è in contatto con l'esterno (passante, dunque, dentro scambiatori di calore).
- Sistemi diretti o indiretti; nei sistemi diretti (*direct systems*) è presente un solo scambiatore di calore dove fluido refrigerante e fluido di processo scambiano calore, nei sistemi indiretti (*indirect systems*) invece sono presenti almeno due scambiatori di calore e un circuito chiuso secondario, nel quale il fluido refrigerante cede il calore precedentemente assorbito dal fluido di processo. I sistemi diretto e indiretto sono anche conosciuti come *primary* e *secondary systems*.

Inoltre, sono utilizzate anche le tecnologie *recirculation* e *once-through* per il fluido refrigerante. Nel primo caso il fluido refrigerante (che in certi casi può anche essere il fluido di processo) viene ricircolato e, salvo qualche integrazione dovuta a perdite e leakage è sempre lo stesso; nel *once-through* invece tipicamente l'acqua refrigerante è pompata da una sorgente direttamente nel processo, e dopo lo scambio termico l'acqua riscaldata è scaricata direttamente nella sorgente. Tipicamente i sistemi *once-through* sono utilizzati in grossi impianti che producono un notevole carico termico; si possono dunque presentare problemi di inquinamento termico e chimico delle acque.

Sono presenti anche tecnologie intermedie, come ad esempio i raffreddatori adiabatici (*adiabatic cooler*), nei quali l'acqua di processo non è a contatto diretto con l'ambiente (circolante, dunque, in un circuito chiuso) ma viene raffreddata oltre che dall'aria esterna anche da acqua nebulizzata in un processo di preraffreddamento.

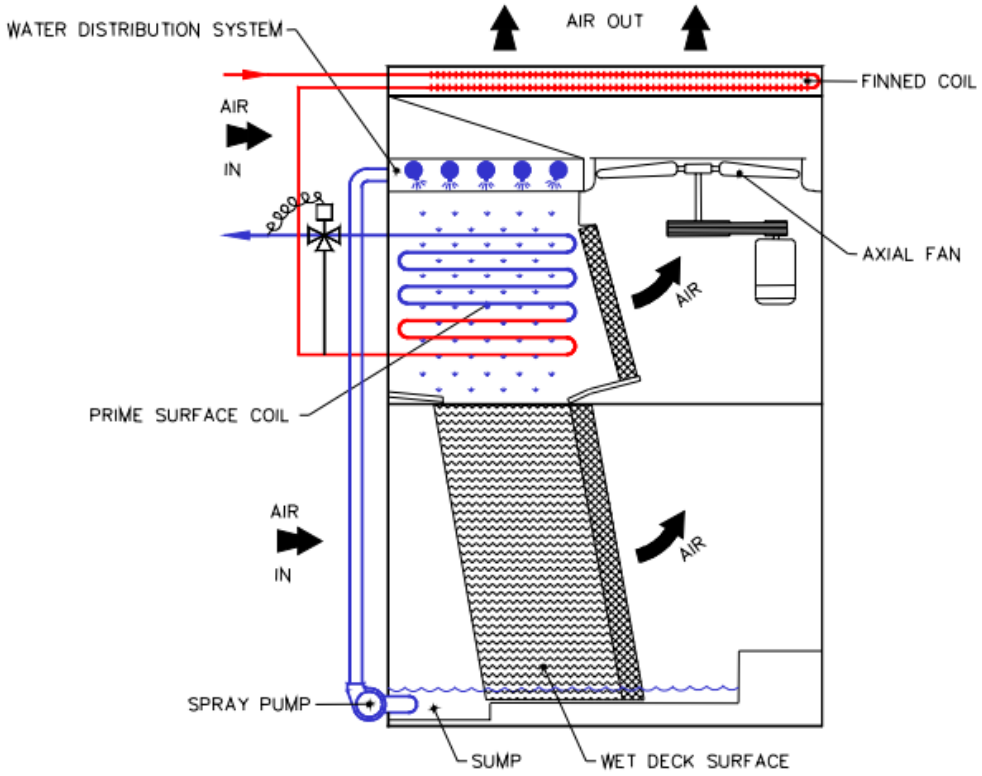

Figura 10 - Schema di una torre di raffreddamento ibrida.

La Figura 10 riporta il funzionamento di una torre ibrida, nella quale è possibile ottenere una combinazione degli effetti di scambio termico sensibile e latente, fornendo una buona flessibilità operativa ed efficienza a seconda dei carichi termici e delle condizioni esterne.

Di seguito sono riportate tabelle comparative n°1, n°2, n°3, n°4 e n°5, riguardo varie tecnologie per il raffreddamento di sistemi industriali, tratte dalla documentazione *BREF Industrial Cooling Systems, ICS, BREF (12.2001)*. I BREF, acronimo di *Best Available Techniques Reference Documents*, sono una serie di documenti europei di riferimento per quanto riguarda le migliori tecniche e tecnologie industriali, al fine di avere uno scambio di informazioni tra gli enti e il settore industriale. Inoltre, le immagini sopra riportate (figure 8, 9 e 10) sono anch'esse state prese dai BREF.

TABELLE SU TORRI EVAPORATIVE

Tabella 1 - Range di temperature e applicazioni per diverse tipologie di torri evaporative.

Temperature range	Suitable Cooling System	Typical Applications
Low temperature (10 – 25 °C)	• once-through systems (direct/indirect) • wet cooling towers (mechanical/natural draught) • hybrid cooling towers • combined cooling systems	• power generation • (petro-) chemical processes
Medium temperature (25 – 60 °C)	• once-through systems (direct/indirect) • wet cooling towers (mechanical/natural draught) • closed circuit cooling towers • evaporative condensers • air-cooled fluid coolers • air-cooled condensers • hybrid cooling towers/ condensers • hybrid closed circuit cooling tower	• refrigeration cycles • compressor • cooling of machines • autoclave cooling • cooling of rotary kilns • steel plants • cement plants • power generation in warmer regions (Mediterranean)
High Temperature (above 60 °C)	• once-through systems (direct/indirect) in special cases • wet cooling towers (mechanical/natural draught) • air-cooled fluid cooler/ condensers	• waste incineration plants • engine cooling • cooling of exhaust fumes • chemical processes

Tabella 2 - Richiesta di acqua per differenti tipologie di torri evaporative.

Cooling system	Average water use [$m^3/h/MW_{th}$]	Relative water use [%][1]
Once-through system –direct	86	100
Once-through system –indirect	86	100
Open wet cooling tower –direct	2	2.3
Open wet cooling tower –indirect	2	2.3
Open wet/dry (hybrid) cooling tower	0.5	0.6
Closed circuit wet cooling tower	variable	Variable
Closed circuit dry air cooling tower	0	0
Closed circuit wet/dry cooling tower	1.5	1.7

[1] assumption: cooling capacity ΔT 10 K
open wet cooling tower: cycles of concentration between 2 and 4
open wet/dry cooling: 75% dry operation
closed circuit wet/dry tower dry operation ranging from 0 to 25 %

Tabella 3 - Impatto ambientale qualitativo per differenti tipologie di torri evaporative.

	Energy Consumption (direct)	Water requirement	Fish[2] entrainment	Emissions to surface water		Air emissions (direct)	Plume formation	Noise	Risk		Residues
Cooling system	(§ 3.2)	(§ 3.3)[1]	(§ 3.3)	Heat (§ 3.3)	Additives (§ 3.4)	(§ 3.5)	(§ 3.5)	(§ 3.6)	Leakage (§ 3.7)	Micro biol. risk (health) (§ 3.7)	(§ 3.8)
Once-through cooling (direct circuit)	Low	++	+	++	+ (biocides)	--	--	--	++	--/low	+[6]
Once-through cooling (indirect circuit)	Low	++	+	++	+ (biocides)	--	--	--	Low	--/low	+[6]
Open wet cooling tower (direct circuit)	+	+	--	Low	+[3]	Low (in plume)	+	+	+	+	--/low
Open wet cooling tower (indirect circuit)	+	+	--	Low	+[3]	Low (in plume)	+	+	Low	+	+
Open wet/dry cooling tower	+	Low	--	Low	Low[3]	--	--[5]	+	Low	?	+
Closed circuit wet cooling tower	+	+	--	--	Low	Low[4] (in plume)	--	+	Low	Low	--/low
Closed circuit dry cooling	++	--	--	--	--	--/Low	--	++	Low	--	--
Closed circuit wet/ dry cooling	+	Low	--	--	Low[3]	Low	--	Low	Low	Low	--/low

Notes:

-- none/not relevant
Low relevance below average
\+ relevant
++ highly relevant

1: paragraph in text
2: other species can also be entrained
3: biocides, antiscaling, anticorrosion
4: potentially in case of leakage
5: if properly operated no issue
6: waste refers to sludge from water intake and from decarbonization

Tabella 4 - Esempio di comparazione di richiesta di energia annuale diretta e indiretta ed emissioni di CO2 per differenti torri evaporative.

Cooling system	Specific direct energy consumption (kW_e/MW_{th})			Increased T pump (°C)	Specific indirect energy consumption (kW_e/MW_{th})	Total energy consumption (kW_e/MW_{th})	E_{input} per $E_{discharged}$ (in ‰)	CO_2 (tonnes/yr/MW_{th})
	Pumps	**Fans**	**Total**		**Applied corr. factor[1)] = 1.4 kW_e/MW_{th}°C**	**Total direct+indirect**		
Once-through -direct	10 (9-12)	-	**10**	0	0	**10**	25	**50**
-indirect	15 (12-18)	-	**15**	5	7	**22**	55	**110**
Open wet cooling tower	15 (13-17)	5	**20**	5	7	**27**	68	**136**
Hybrid cooling	15 (13-17)	8	**23**	5	7	**30**	75	**150**
Closed circuit cooling tower	>15 (13-17)	8	**>23**	8	11	**>34**	>85	**>170**
Dry air cooling	-	20	**20**	20	28	**48**	120	**240**
[1)] for calculation of correction factor see Annex II								

Un possibile problema legato alle torri evaporative è il rischio microbiologico, ovvero lo sviluppo di alghe, batteri e differenti specie di patogeni capaci di causare problemi sia sanitari che strutturali. Tipicamente si sviluppano a contatto con l'acqua di raffreddamento, perciò non vi sono rischi nelle torri evaporative condensate ad aria (*dry cooler*). I principali patogeni termofili che si possono trovare sono il batterio *Legionella pneumophila (Lp)* e l'ameba *Naegleria fowleri (Nf)*, capaci di provocare malattie estremamente gravi; le temperature ottimali per questi organismi sono tra i 25°C e i 42°C. Possibili soluzioni sono l'uso di prodotti chimici o un aumento di temperatura capace di uccidere i patogeni, oltre a un regolare controllo e manutenzione dell'impianto.

Tabella 5 - BAT per la riduzione del rischio di crescita biologica nelle torri evaporative.

Cooling system	Criterion	Primary BAT approach	Remarks	Reference
All wet recirculating cooling systems	Reduce algae formation	Reduce light energy reaching the cooling water		Section 3.7.3
	Reduce biological growth	Avoid stagnant zones (design) and apply optimized chemical treatment		
	Cleaning after outbreak	A combination of mechanical and chemical cleaning		Section 3.7.3
	Control of pathogens	Periodic monitoring of pathogens in the cooling systems		Section 3.7.3
Open wet cooling towers	Reduce risk of infection	Operators should wear nose and mouth protection (P3-mask) when entering a wet cooling tower	If spraying equipment is on or when high-pressure cleaning	Section 3.7.3

4. AZIENDE OGGETTO DELLO STUDIO

Al fine di trovare i migliori modelli offerti e poter effettuare uno studio a riguardo è stato necessario visitare diversi siti dei produttori di tali componenti. I parametri della ricerca sono stati quelli di trovare dei gruppi frigoriferi che fossero nel range 1200-1400 kW e che operassero tramite raffreddamento dell'acqua nell'intervallo 12/7 °C; è stata inoltre presa in considerazione anche la possibilità di un gruppo frigo costituito da due refrigeratori dello stesso modello lavoranti in parallelo. Infine, è stata posta una particolare attenzione nella ricerca di gruppi ad assorbimento.
La ricerca ha inizialmente compreso un certo numero di aziende, di cui sono stati considerati i prodotti: l'elenco di tali aziende è sotto riportato.

- Yazaki;
- ATR;
- Frigel;
- Rhoss;
- Clivet;
- Carrier;
- Systema;
- Robur;
- Daikin;
- Climaveneta;
- Aermec;
- AKM-Industreanlagen.

Di tali produttori visitati e contattati però ne sono stati considerati solamente quattro per lo studio, in quanto le soluzioni degli altri produttori, per quanto ottime, non si sono rivelate adeguate alle condizioni cercate.
Di seguito sono riportate le generalità delle quattro aziende di cui sono stati scelti i gruppi frigoriferi per lo studio.

Gruppo ATR: una delle più importanti compagnie nel mercato della climatizzazione, specializzata inoltre nel settore dell'energia per la co e trigenerazione.
(*In possesso delle seguenti certificazioni: ISO 9001; ISO 14001; certificazione CE per single effect double lift hot water driven absorption chiller e double effect direct fire absorption chiller; Green Certificate e Designation of Excellent Product*).
Link del sito: *http://gruppoatr.com/*

Gruppo Rhoss: membro del gruppo internazionale NIBE Industrier AB, è l'azienda specializzata nella progettazione e produzione di prodotti a sistemi per la climatizzazione e il trattamento dell'aria.
(*In possesso delle seguenti certificazioni: ISO 9001; ISO 14001; certificazione EUROVENT per refrigeratori, pompe di calore e ventilconvettori; certificazioni EUROVENT per centrali di trattamento aria; certificazione LEED*).
Link del sito: *https://www.rhoss.com/it/*

Gruppo Clivet: inizialmente produttrice di chiller e pompe di calore, tramite l'alleanza industriale al gruppo MIDEA integra la sua offerta con sistemi packaged, VRF e mono e multisplit.
(*In possesso delle seguenti certificazioni: certificazioni EUROVENT gruppi refrigeratori d'acqua, rooftop, centrali di trattamento dell'aria e VRF; ISO 9001; ISO 14001; ISO 45001; direttive europee ErP-Energy related Products, ed Energy labeling-etichettatura energetica*).
Link del sito: *https://www.clivet.com/*

Gruppo Frigel: ditta internazionale produttrice di sistemi per il raffreddamento e il controllo della temperatura nei processi industriali.
(*In possesso delle seguenti certificazioni: ISO 9001; ISO 14001; BS OHAS 18001*).
Link del sito: *https://www.frigel.com/it*

L’installazione di gruppi ad assorbimento, per quanto tecnologicamente interessante, risulta difficilmente applicabile sul mercato Europeo, in quanto le scelte commerciali delle aziende produttrici hanno puntato il mercato verso il continente asiatico. Infatti, tali gruppi frigoriferi, benché permettano un recupero di calore che altrimenti andrebbe eliminato, presentano basse efficienze ed elevati costi, dovuti alla particolare complicazione tecnica e manutentiva.
Durante le ricerche sono stati trovati diversi modelli, i quali però presentavano un limite tecnico, ovvero le temperature richieste dal calore recuperato e utilizzato nel gruppo erano più alte rispetto a quelle disponibili, attorno ai 90-100 °C a fronte degli 80 °C disponibili dal recupero della sala compressori.

Considerando il modello dell’azienda ATR, il quale è l’unico gruppo ad assorbimento tra i quattro considerati, inizialmente esso prevedeva l’utilizzo combinato del calore recuperato dai compressori e di gas naturale per riscaldare la soluzione; tuttavia, dopo aver contattato il referente ed aver richiesto un dimensionamento su misura di tale gruppo rispetto alle condizioni disponibili, la risposta è stata che purtroppo a causa della bassa temperatura del calore recuperato, dei costi di gestione e dei sovraccosti di costruzione e manutenzione continuativa della macchina i tempi di rientro dell’investimento si allungavano troppo, e dunque è stato consigliato un nuovo gruppo ad assorbimento alimentato solamente a gas naturale.

5. PRESENTAZIONE E STUDIO DEI MODELLI

Si procede ora allo studio dei vari modelli proposti. Al fine di avere una base energetica su cui strutturare l'analisi, si effettua una analisi dei carichi termici prodotti e dissipati, in modo tale da valutare la migliore alternativa tra i 1200 o 1400 kW del gruppo frigorifero richiesti dall'azienda cliente.

CARICHI TERMICI:

Q_{st}= Carico termico degli stampi= 600 kW

Q_{ol}= Carico termico degli oli delle presse= 600 kW

Q_{cg}= Carico termico della camera grigia= 600 kW

Q_{cm}= Carico termico dei compressori= 400 kW

Entrambi necessitanti di un costante raffreddamento, indipendentemente dalla stagione. Inoltre, il carico termico dei compressori, non potendo essere recuperato ed utilizzato per altri processi, necessita dunque di essere raffreddato dai gruppi frigo.

Q_{uf}= Carico termico degli uffici= 200 kW

Tale carico è variabile nel tempo: durante il periodo estivo esso è un carico di calore da raffreddare, mentre durante il periodo invernale il carico termico è circa nullo, poiché il riscaldamento viene effettuato tramite un impianto a gas. Ai fini del dimensionamento, dunque, considero questo carico presente, in quanto il massimo possibile richiesto dagli uffici, anche se nella realtà dei fatti esso oscilli tra questo valore e zero.

CAPACITA' DI FREDDO:

Considerando i gruppi frigoriferi attualmente presenti.

Q_{f1}= Capacità del frigo n°1, attualmente mantenuto in backup= 1000 kW

Q_{f2}= Capacità del frigo n°2= 600 kW

Q_{f3}= Capacità del frigo n°3= 100 kW

Q_{f4}= Capacità del frigo n°4= 600 kW

Considerando la somma dei carichi e delle capacità frigorifere:

$Q_{ct}=Q_{st}+Q_{ol}+Q_{cg}+Q_{cm}+Q_{uf}=600+600+600+400+200=2400$ kW

Carico termico totale delle utenze.

$Q_f=Q_{f2}+Q_{f3}+Q_{f4}=$ 1300 kW

Capacità di freddo disponibile, senza considerare il frigo 1.

Risulta dunque che per arrivare a soddisfare la richiesta di freddo sia necessario un gruppo frigorifero di 1100 kW; tuttavia, considerando le richieste del cliente si può ipotizzare che sia preferibile avere un gruppo sovradimensionato, in modo tale da poter eventualmente avere una maggiore flessibilità di operazione nonché utilizzabile sia in caso di imprevisti o guasti agli altri gruppi frigo sia per un futuro ampliamento dello stabilimento, con un aumento della produzione e dunque della richiesta di freddo.

Per quanto riguarda l'iniziale considerazione sulla possibilità di un gruppo frigo costituito da due refrigeratori lavoranti in parallelo, sebbene la possibilità di avere due chiller possa rappresentare una elevata flessibilità di gestione dei carichi termici, considerando il fabbisogno continuo dello stabilimento, il costo di due modelli invece di uno unico e le complicazioni impiantistiche dovute al collegamento dei refrigeratori e alla loro gestione, è stata in seguito scartata.

Inoltre, considerando che l'idea dell'azienda sarebbe una modernizzazione dei vari gruppi, in un piano a medio lungo termine, avere un gruppo frigo sovradimensionato e l'eventuale backup del vecchio frigo n°1 può permettere uno spostamento dei carichi su questi ultimi per una eventuale rimozione e sostituzione dei restanti gruppi frigo. Pertanto, la potenza del gruppo frigorifero considerata per lo studio è di 1400 kW; questo sovradimensionamento rispetto all'alternativa di 1200 kW è dato dal fatto che da un lato quest'ultima capacità frigorifera è troppo vicina alla minima richiesta di freddo dell'impianto (1100 kW) e che pertanto si potrebbero generare problemi di smaltimento del calore nel caso di variazione dei carichi termici, imprevisti o a seguito di eventi programmati; dall'altro, sebbene l'azienda abbia deciso di rimuovere i gruppi frigoriferi n°1 e n°5, di potenza complessiva 1600 kW, indicando una possibile riduzione dei consumi, un nuovo gruppo frigo da 1400 kW potrebbe garantire la flessibilità accennata sopra. Infine, sebbene un gruppo da 1200 kW sia meno costoso rispetto ad uno di 1400 kW, lo studio economico sotto riportato ne dimostra la convenienza in termini di tempi di rientro dell'investimento.

5.1. IPOTESI E DATI PER LO SVILUPPO DELLO STUDIO

Vengono di seguito presentate alcune ipotesi effettuate al fine di strutturare lo studio e di permettere il confronto tra i vari modelli.

Come comparazione tecnico/economica per il frigo proposto viene scelto il gruppo frigo n°1, attualmente disabilitato e mantenuto in backup, per le seguenti motivazioni:

- Si posseggono sufficienti dati riguardanti il frigo n°1 per una efficace comparazione numerica con i modelli proposti;
- Considerando l'acquisto di un nuovo gruppo frigo, il criterio minimo di scelta è che esso sia in ogni caso più conveniente dell'attuale frigo che deve essere sostituito.

Di seguito sono riportati i dati principali del frigo 1, considerando sia la potenza ed i costi del suo attuale parziale utilizzo (circa 300 kW) sia dell'utilizzo a potenza massima di progetto (1000 kW).

Tabella 6 - Dati del frigo n°1.

Vecchio gruppo frigo n°1, condensato ad acqua		
Potenza frigorifera	1.000,00	kW
Potenza elettrica installata	441,00	kW
% utilizzo su potenza installata	0,31	[-]
Potenza elettrica attualmente in uso	136,58	kW
Consumo elettrico annuale	1.188.184,32	kWh
COP	2,27	[-]

Come indicato nella tabella, la potenza elettrica installata necessaria a produrre 1000 kW è di 441 kW elettrici, tuttavia attualmente se ne utilizza solamente una porzione, ovvero 136,58 kW elettrici, i quali producono circa 300 kW di freddo. Ciò può essere dovuto ad un sovradimensionamento del vecchio gruppo frigo, oltre a variazioni dei carichi termici richiesti nel tempo e al fatto che il gruppo frigo presenti un problema ad uno dei compressori.

Per quanto riguarda le ore di funzionamento dei gruppi frigoriferi, il funzionamento dell'impianto è continuato per quasi tutto l'anno, con solamente pochi giorni di ferma per le necessarie manutenzioni. Non avendo tuttavia un numero preciso, si ipotizzano 8400 ore di lavoro l'anno, corrispondenti a 350 giorni; tale valore è anche supportato dalla Diagnosi Energetica effettuata dalla Riven S.r.l.

Di seguito viene riportata la tabella 7 con le informazioni generali riguardo ai costi della corrente elettrica e del gas considerati, oltre al recupero di calore e alle ore di lavoro all'anno ipotizzate.

Tabella 7 - Dati generali sullo studio.

DATI		
Prezzo energia elettrica	0,14	€/kWh ivato
Prezzo gas naturale	0,54	€/Sm3 netto
1 kcal/h	0,001163	kW
1 Sm3	10,69	kWh th
Costo gas €/kWh	0,05	€/kWh ivato
Recupero calore da compressore	400,00	kWth
Fabbisogno frigorifero dell'impianto	2.694.295,51	kWh
Numero di ore ipotizzate di funzionamento del frigo n° 1		
	8400,00	h

I costi del gas e della corrente sono stati ricavati dalla Diagnosi Energetica precedentemente effettuata. Inoltre, per via della posizione dei gruppi frigo, non sono necessari particolari accorgimenti riguardo la riduzione del rumore.

5.2. STUDIO DEI MODELLI

Si procede ora alla descrizione e allo studio dei modelli scelti, con particolare interesse dal punto di vista economico e del risparmio.

Per ogni gruppo frigo sono presentate le caratteristiche quali la potenza generata, i consumi e i costi del modello. Viene poi effettuato lo studio in una tabella per ogni gruppo frigo: considerando il fabbisogno dell'impianto allo stato attuale, calcolato valutando i consumi attuali del vecchio frigo n°1, si quantificano i consumi annuali e orari del nuovo gruppo frigo proposto e del vecchio frigo. Si valutano infine i costi dei consumi di elettricità e combustibile (nel caso del gruppo ad assorbimento ATR) per il funzionamento, e si effettua la differenza tra i costi del nuovo gruppo e quello vecchio: il risparmio, calcolato in base annuale e indipendente dalle ore ma solo dal fabbisogno di freddo, rappresenta il guadagno dovuto alle mancate spese dei consumi rispetto a quello che sarebbe stato speso per il funzionamento del frigo n°1 per soddisfare lo stesso fabbisogno annuale.

Nelle righe riguardanti il consumo orario viene considerato come tempo di riferimento le 8400 ore di lavoro l'anno: tali valori rappresentano i consumi medi orari necessari per il fabbisogno.

Inoltre, è stato fatto uno studio ulteriore considerando l'ipotesi che il fabbisogno di freddo cresca per differenti percentuali, rispettivamente il 10, 20, 30, 40 e 50%, al fine di valutare l'eventuale convenienza anche nel caso dell'aumento dei consumi, in possibile previsione dell'ampliamento dello stabilimento o del riarrangiamento dei carichi termici da un frigo ad un altro.

GRUPPO ATR:

Il gruppo frigorifero scelto si tratta del modello WDAH040, un gruppo ad assorbimento a fiamma diretta, a doppio effetto (ovvero possibilità di riscaldamento e raffreddamento). Per il proprio funzionamento tale modello necessita di gas naturale e potenza elettrica, oltre ad una torre evaporativa per raffreddare l'acqua necessaria al funzionamento del ciclo ad assorbimento; il modello della torre è l'EWK 1800/09, fabbricato in accordo alla direttiva 2006/42/CE. Come riportato sopra, purtroppo confrontandomi con un referente dell'azienda risulta impossibile l'integrazione del calore recuperato dai compressori all'interno del processo, e dunque la soluzione deve essere scaldata tramite un bruciatore a gas naturale.

Tabella 8 - Dati gruppo frigo ATR.

Gruppo frigo WDAH040 ad assorbimento a fiamma diretta; ATR		
Cooling capacity	1.400,00	kW
COP	1,50	[-]
LHV (LNG)	8.800,00	kcal/Nm3
Fuel flow rate (LNG)	90,60	Nm3/h
Potenza elettrica assorbita	5,90	kW
Potenza consumata gruppo frigo	933,14	kW
Potenza termica dissipata torre frigorifera	2.314,00	kW
Consumo elettrico torre frigorifera	22,00	kW
Potenza totale consumata	955,14	kW
Costo gruppo ad assorbimento	210.000,00	€
Costo torre di raffreddamento	68.845,65	€

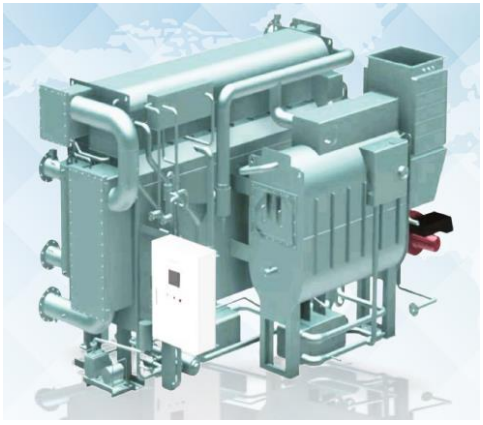

Figura 11 - Gruppo frigo ATR, serie WDA/WDA-H.

Tabella 9 - Analisi gruppo frigo ATR.

% di carico aggiunto	0%	10%	20%	30%	40%	50%	
Fabbisogno frigorifero annuo	2.694.295,51	2.963.725,06	3.233.154,61	3.502.584,16	3.772.013,71	4.041.443,27	**kWh**
Consumo elettrico annuale frigo 1	1.188.184,32	1.307.002,75	1.425.821,18	1.544.639,62	1.663.458,05	1.782.276,48	**kWh**
Consumo annuale frigo nuovo	1.838.157,40	2.021.973,14	2.205.788,88	2.389.604,62	2.573.420,36	2.757.236,10	**kWh**
Consumo elettrico orario frigo 1	141,45	155,60	169,74	183,89	198,03	212,18	**kWh**
Consumo orario frigo nuovo	218,83	240,71	262,59	284,48	306,36	328,24	**kWh**
Consumo orario energia termica frigo nuovo	19,87	21,86	23,85	25,83	27,82	29,81	**Sm3**
Consumo elettrico orario frigo nuovo	1,35	1,49	1,62	1,76	1,89	2,03	**kWh**
Costo annuale frigo 1	167.534 €	184.287 €	201.041 €	217.794 €	234.548 €	251.301 €	**€**
Costo annuale frigo nuovo e ausiliario	97.378 €	106.519 €	115.660 €	124.801 €	133.942 €	143.082 €	**€**
Risparmio economico annuale	70.156 €	77.768 €	85.381 €	92.993 €	100.606 €	108.219 €	**€**

Nella tabella 9 sopra riportata è stata inoltre effettuata l'ipotesi per cui l'energia consumata dalla torre evaporativa sia proporzionale alla potenza da dissipare generata dal gruppo frigo; pertanto, il suo consumo elettrico non sarà 22 kW, necessari a raffreddare 2314kW, ma un valore inferiore proporzionale al fabbisogno.

GRUPPO RHOSS:

Il gruppo frigorifero scelto si tratta del modello TCHITL 21360 della serie FullFlow VDF(1+i), un gruppo condensato ad acqua. Tale modello funziona tramite potenza elettrica, necessaria per la gestione delle pompe idrauliche, e richiede una torre evaporativa, per dissipare il calore dell'acqua refrigerante prelevato a sua volta dall'acqua refrigerata.

Per quanto riguarda il condensatore remoto del gruppo frigo, sono stati cercati modelli dello stesso produttore, in modo tale da avere un'affinità tra le varie componenti. Tuttavia, purtroppo non sono stati trovati prodotti dalle capacità richieste, dunque è stata necessaria la ricerca da altri produttori: tra questi è stato scelto il modello Ecodry 3DK della Frigel, un tipo di raffreddatore adiabatico. Tale modello è stato dimensionato per dissipare 1700 kW dal lato della condensazione, dunque leggermente sovradimensionato rispetto ai 1596,4 kW dei dati di progetto, tramite un sistema dry cooler che all'occorrenza può essere integrato con una camera adiabatica che, tramite un sistema di umidificazione preraffredda la portata.

Tabella 10 - Dati gruppo frigo Rhoss.

Gruppo frigo TCHITL condensato ad acqua; Rhoss		
Cooling capacity	1.362,00	kW
EER	5,64	[-]
Potenza elettrica assorbita	241,60	kW
Potenza termica da smaltire	1.596,40	kW
Costo totale gruppo	149.834,22	€
Potenza termica torre evaporativa	1.700,00	kW
Ipotesi potenza elettrica torre evaporativa	32,20	kW
Costo torre evaporativa	249.550	€

Figura 12 - Gruppo frigo Rhoss, serie TCHITL.

Tabella 11 - Analisi gruppo frigo Rhoss.

% di carico aggiunto	0%	10%	20%	30%	40%	50%	
Fabbisogno frigorifero annuo	2.694.295,51	2.963.725,06	3.233.154,61	3.502.584,16	3.772.013,71	4.041.443,27	**kWh**
Consumo elettrico annuale frigo 1	1.188.184,32	1.307.002,75	1.425.821,18	1.544.639,62	1.663.458,05	1.782.276,48	**kWh**
Consumo elettrico annuale frigo nuovo	477.711,97	525.483,17	573.254,36	621.025,56	668.796,76	716.567,95	**kWh**
Consumo elettrico orario frigo 1	141,45	155,60	169,74	183,89	198,03	212,18	**kWh**
Consumo elettrico orario frigo nuovo	56,87	62,56	68,24	73,93	79,62	85,31	**kWh**
Costo annuale frigo 1	167.534 €	184.287 €	201.041 €	217.794 €	234.548 €	251.301 €	**€**
Costo annuale frigo nuovo e ausiliario	76.339 €	83.973 €	91.607 €	99.240 €	106.874 €	114.508 €	**€**
Risparmio economico annuale	91.195 €	100.315 €	109.434 €	118.554 €	127.673 €	136.793 €	**€**

Non avendo i consumi relativi alla soluzione adiabatica EcoDry, essi sono stati ipotizzati considerando la tabella n°4, in cui sono riportate le potenze medie necessarie in base a differenti tipologie di torri frigorifere. Nel caso del modello EcoDry è stata considerata la categoria closed circuit cooling tower, con un consumo di 23 kWel/MWth; da tale valore è stato ricavato un consumo di 32,2 kWel per la soluzione EcoDry, di 1700 kWth.

Inoltre, anche nel seguente caso è stata considerata l'ipotesi di un consumo della torre proporzionale al fabbisogno.

GRUPPO CLIVET:

Il modello dell'azienda Clivet scelto è il gruppo frigo WDAT-iK4 580.2, di tipologia condensato ad aria. Pertanto, non è necessario un condensatore remoto, in quanto la portata è raffreddata da ventilatori elicoidali; la serie iK4 consiste di un compressore a vite azionato da inverter e refrigerante 513A. La configurazione è del tipo acustica standard (ST), con livello di prestazioni *Excellence*. I dati presenti sono riferiti alla temperatura dell'aria esterna di 35°C; inoltre è presente la possibilità di un recupero di calore tramite uno scambiatore: le temperature dell'acqua sono nell'intervallo 40°C/15°C.

Tabella 12 - Dati gruppo frigo Clivet.

Gruppo frigo WDAT-iK4 580.2 condensato ad aria; Clivet		
Cooling capacity	1.423,00	kW
COP	2,95	[-]
Potenza elettrica assorbita compressori	459,00	kW
Potenza elettrica totale assorbita	482,00	kW
Potenza termica recupero parziale	188,00	kW
Costo fornitura in opera	180.000,00	€

Figura 13 - Gruppo frigo Clivet, serie WDAT-iK4.

Tabella 13 - Analisi gruppo frigo Clivet.

% di carico aggiunto	0%	10%	20%	30%	40%	50%	
Fabbisogno frigorifero annuo	2.694.295,51	2.963.725,06	3.233.154,61	3.502.584,16	3.772.013,71	4.041.443,27	**kWh**
Consumo elettrico annuale frigo 1	1.188.184,32	1.307.002,75	1.425.821,18	1.544.639,62	1.663.458,05	1.782.276,48	**kWh**
Consumo elettrico annuale frigo nuovo	913.320,51	1.004.652,56	1.095.984,61	1.187.316,67	1.278.648,72	1.369.980,77	**kWh**
Consumo elettrico orario frigo 1	141,45	155,60	169,74	183,89	198,03	212,18	**kWh**
Consumo elettrico orario frigo nuovo	108,73	119,60	130,47	141,35	152,22	163,09	**kWh**
Costo annuale frigo 1	167.534 €	184.287 €	201.041 €	217.794 €	234.548 €	251.301 €	**€**
Costo annuale frigo nuovo	128.778 €	141.656 €	154.534 €	167.412 €	180.289 €	193.167 €	**€**
Risparmio economico annuale	38.756 €	42.631 €	46.507 €	50.383 €	54.258 €	58.134 €	**€**

GRUPPO FRIGEL:

Il gruppo frigo dell'azienda Frigel scelto è il modello IndustrialChiller-3HL, della tipologia condensato ad aria utilizzante il refrigerante l'R134a. La configurazione scelta è la standard (ST), con possibilità di operare con temperature esterne da -25°C a 45°C; inoltre i dati riportati sono rispetto alle condizioni di progetto, ipotizzando una temperatura esterna di 35°C. Il prodotto utilizza compressori a vite e ventilatori assiali. Inoltre, nell'acquisto è presente un pannello di controllo, per la gestione del gruppo frigo.

Tabella 14 - Dati gruppo frigo Frigel.

Gruppo frigo IndustrialChiller 3HL condensato ad aria; Frigel		
Cooling capacity	1.450,00	kW
COP	4,06	[-]
Potenza elettrica assorbita compressori	322,90	kW
Potenza elettrica ventilatori	34,20	kW
Potenza elettrica totale assorbita	357,10	kW
Costo totale impianto	288.720,00	€

Figura 14 - Gruppo frigo Frigel, serie IndustrialChiller 3HL.

Tabella 15 - Analisi gruppo frigo Frigel.

% di carico aggiunto	0%	10%	20%	30%	40%	50%	
Fabbisogno frigorifero annuo	2.694.295,51	2.963.725,06	3.233.154,61	3.502.584,16	3.772.013,71	4.041.443,27	**kWh**
Consumo elettrico annuale frigo 1	1.188.184,32	1.307.002,75	1.425.821,18	1.544.639,62	1.663.458,05	1.782.276,48	**kWh**
Consumo elettrico annuale frigo nuovo	663.539,95	729.893,94	796.247,94	862.601,93	928.955,93	995.309,92	**kWh**
Consumo elettrico orario frigo 1	141,45	155,60	169,74	183,89	198,03	212,18	**kWh**
Consumo elettrico orario frigo nuovo	78,99	86,89	94,79	102,69	110,59	118,49	**kWh**
Costo annuale frigo 1	167.534 €	184.287 €	201.041 €	217.794 €	234.548 €	251.301 €	**€**
Costo annuale frigo nuovo	93.559 €	102.915 €	112.271 €	121.627 €	130.983 €	140.339 €	**€**
Risparmio economico annuale	73.975 €	81.372 €	88.770 €	96.167 €	103.565 €	110.962 €	**€**

6. CONFRONTO ECONOMICO

Si procede infine alla comparazione economica dei quattro modelli scelti, valutando inizialmente i tempi di rientro dell'investimento per ciascuno di essi ed infine il confronto dei NPV (*Net Present Value*) dei vari gruppi frigo.

Il NPV, o valore attuale netto, è una metodologia per attualizzare una somma di flussi di cassa avvenuti in un certo lasso di tempo. Esso è dato dalla somma algebrica del costo di investimento I, con i flussi di cassa netti B_t avvenuti in un certo periodo di tempo (solitamente tutto il periodo di vita dell'oggetto studiato), attualizzati in base al tasso di rendimento i.

$$NPV = -I + \sum_{t=1}^{n} \frac{B_t}{(1+i)^t}$$

Un progetto è accettato se ha un NPV≥0, ovvero se entro il limite di tempo considerato si è rientrati dell'investimento, e dunque tra più possibili NPV solitamente viene scelto quello con il NPV maggiore.

Ai fini dello studio vengono fatte le seguenti ipotesi di calcolo:

- Come valore per il tasso di rendimento è stato considerato il HICP: *Harmonized Index of Consumer Prices*, un indicatore dell'inflazione e della stabilità dei prezzi utilizzato dalla Banca Centrale Europea. Esso è calcolato tramite definizioni armonizzate tra i vari paesi e viene utilizzato per comparazioni statistiche riguardo ai prezzi del consumatore. La Banca Centrale Europea definisce la "stabilità dei prezzi" l'incremento anno per anno dell'HICP dell'euro ad un valore vicino al 2%, nel medio periodo. Dunque, come valore per i è stato considerato il 2%, considerato il più indicato a disposizione per lo studio.
- Non avendo a disposizione costi di manutenzione, si ipotizza un valore del 5% del costo totale del gruppo frigo, considerando (in maniera cautelativa) che tale manutenzione venga svolta ogni anno. Tale valore è stato ricavato dall'art.102 comma 6 del Tuir (Testo Unico delle Imposte sui Redditi): l'articolo stabilisce una deducibilità delle spese di manutenzione o ammodernamento nel limite del 5% del costo complessivo dei beni; dunque, in base alla scelta del Tuir è ipotizzabile che tipicamente le spese di manutenzione si aggirino attorno al 5% del costo del bene.

- Si considera che, per via del funzionamento continuo dello stabilimento, il nuovo gruppo frigorifero viene installato durante una pausa programmata dello stabilimento, pertanto non vengono considerati mancati guadagni a causa della mancata produzione.

In conclusione, a fronte sia dei rapidi tempi di rientro dell'investimento sia dell'aleatorietà e incertezza su alcuni parametri e ipotesi considerate, lo studio del NPV è stato fatto in un limite di tempo di dieci anni, a fronte di un periodo di vita degli impianti di una ventina d'anni. Va inoltre sottolineato che i guadagni ottenuti nel tempo vadano intesi non come entrate ma come risparmio dato dai costi di funzionamento e dalla maggiore efficienza dei gruppi frigoriferi, molto meno costosi nel lungo periodo rispetto al vecchio gruppo frigo n°1.

Tabella 16 - Studio dei NPV per i differenti gruppi frigo.

Gruppo ATR

Costo manutenzione	13942	**€/y**									
Net cash flow	70156	**€/y**									
Anni [y]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NPV [€]	- 278.846	- 223.734	- 169.704	- 116.733	- 64.800	- 13.886	36.030	84.968	132.945	179.982	226.097

Gruppo Clivet

Costo manutenzione	9000	**€/y**									
Net cash flow	38756	**€/y**									
Anni [y]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NPV[€]	- 180.000	- 150.828	- 122.227	- 94.188	- 66.698	- 39.747	- 13.325	12.579	37.976	62.874	87.284

Gruppo Rhoss

Costo manutenzione	19969	**€/y**									
Net cash flow	91195	**€/y**									
Anni [y]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NPV[€]	- 399.384	- 329.555	- 261.095	- 193.977	- 128.175	- 63.663	- 417	61.590	122.381	181.979	240.409

Gruppo Frigel

Costo manutenzione	14436	**€/y**									
Net cash flow	73975	**€/y**									
Anni [y]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NPV[€]	- 288.720	- 230.349	- 173.122	- 117.017	- 62.012	- 8.086	44.783	96.615	147.431	197.250	246.093

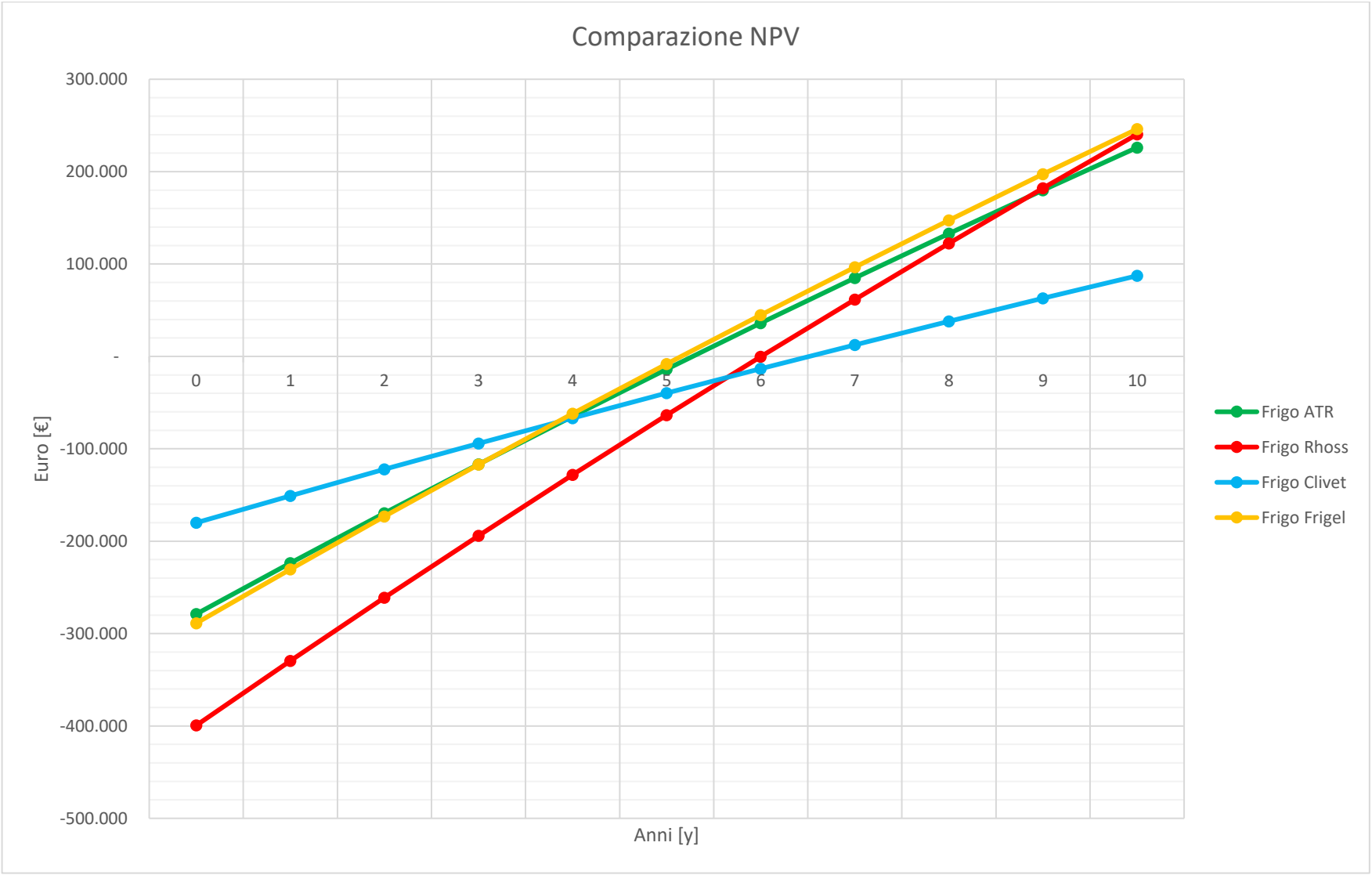

Figura 15 – Grafico comparativo dei NPV.

Le due immagini sopra riportate mostrano lo studio dei NPV dei vari gruppi frigo: nella tabella 16 essi sono riportati singolarmente, considerando nel NPV il net cash flow diminuito dei costi di manutenzione, e l'anno zero come l'anno di investimento; a partire dall'anno uno cominciano i ricavi dovuti alle mancate spese. La figura 15 mostra invece in un grafico i vari NPV confrontati tra loro, considerando un periodo di dieci anni.

Inoltre, va considerato che, per quanto riguarda il gruppo ad assorbimento della ATR, per via della maggiore complicazione impiantistica di tale tipologia di gruppi frigo è ipotizzabile che i costi di manutenzione siano superiori rispetto agli altri gruppi; tuttavia, non essendo riuscito a trovare possibili valori da utilizzare, i costi sono stati mantenuti come il 5% del costo del gruppo frigo, valore in ogni caso presumibilmente mediato tra varie applicazioni differenti.

7. CONCLUSIONI

Nello studio sopra riportato sono stati considerati i quattro gruppi frigoriferi e ho analizzato la loro convenienza, relativamente alle richieste dell'azienda, in base al rientro dei costi dovuti alle mancate spese.

Come si può notare nel grafico del NPV, sul lungo periodo il gruppo frigo Frigel rappresenta la migliore scelta, anche a fronte di un alto investimento iniziale. A seguire sono presenti i gruppi della Rhoss, della ATR e della Clivet. Ciascuno di essi rappresenta una buona alternativa, e tutti i modelli mostrano in ogni caso un buon livello di rientro rispetto all'attuale gruppo frigo n°1. Va inoltre considerata anche la complicazione impiantistica per quanto riguarda le manutenzioni, ipotizzate con una percentuale costante per tutti i modelli. Per quanto riguarda il gruppo ATR va inoltre sottolineato il fatto che esso rappresenta una buona scelta in quanto il costo del gas naturale è molto inferiore riguardo al costo dell'energia elettrica, mentre per il gruppo della Rhoss l'alto investimento iniziale è parzialmente dovuto ai costi della torre adiabatica Ecodry, soluzione interessante ma possibilmente soggetta a cambiamenti con altre torri evaporative, a discrezione dell'azienda cliente; in tal caso, la retta del NPV mostrerebbe una traslazione verticale, verso l'alto o verso il basso, in base ai nuovi costi di investimento, e dunque modificando anche i previsti ritorni economici.

Tutti i prodotti analizzati in questo studio sono potenzialmente ottime soluzioni. La scelta dei prodotti più adatti è stata basata sui dati a disposizione; in una situazione reale fattori quali la vicinanza geografica, accordi commerciali pregressi, la filosofia aziendale e quant'altro possa emergere potrebbero modificare i tempi di ritorno delle soluzioni.

8. BIBLIOGRAFIA

- Valter Giaretto; Lezioni di Termodinamica applicata e trasmissione del calore; C.U.L.T. Editrice; 2014.
- PDF: IEA; Global Energy Review 2021. Assessing the effects of economic recoveries on global energy demand and CO2 emissions in 2021.
  Scaricabile dal link:
  https://iea.blob.core.windows.net/assets/d0031107-401d-4a2f-a48b-9eed19457335/GlobalEnergyReview2021.pdf
- PDF: Ministero dello Sviluppo Economico, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti; Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima; Dicembre 2019.
  Scaricabile dal link:
  https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/documents/it_final_necp_main_it.pdf
- PDF: Ministero dello Sviluppo Economico, Direzione Generale per le Infrastrutture e la Sicurezza dei Sistemi Energetici e Geominerari; La Situazione Energetica Nazionale nel 2019, allegato Giugno 2020.
  Scaricabile dal link:
  https://dgsaie.mise.gov.it/pub/sen/relazioni/relazione_annuale_situazione_energetica_nazionale_dati_2019.pdf
- PDF: European Commission; Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Reference Document on the application of Best Available Techniques to Industrial Cooling Systems; December 2001.
  Scaricabile dal link: https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/industrial-cooling-systems
- PDF: Regione Piemonte; Prezzario per Opere e Lavori Pubblici della regione Piemonte, 2020. Scaricabile dal link:
  http://www.sistemapiemonte.it/cms/privati/territorio/servizi/929-consultazione-prezzario-regionale-opere-pubbliche/3554-prezzario-2020

INDICE DELLE FIGURE:

Figura 1 - Evoluzione delle emissioni globali di CO2. 4
Figura 2 - Consumo totale di energia in Europa, 1990-2018. 5
Figura 3 - Consumo energetico italiano per risorsa. 6
Figura 4 - Schema dell'impianto allo stato dell'arte antecedente lo studio. 11
Figura 5 - Schema dell'impianto successivo alle recenti modifiche apportate, considerando l'ipotesi di progetto. 12
Figura 6 - Schema di un ciclo a compressione. 14
Figura 7 - Schema di un refrigeratore ad assorbimento 15
Figura 8 - Schema di una torre dry cooling. 18
Figura 9 – Schema di una torre wet cooling. 18
Figura 10 - Schema di una torre di raffreddamento ibrida. 20
Figura 11 - Gruppo frigo ATR, serie WDA/WDA-H. 34
Figura 12 - Gruppo frigo Rhoss, serie TCHITL. 36
Figura 13 - Gruppo frigo Clivet, serie WDAT-iK4. 38
Figura 14 - Gruppo frigo Frigel, serie IndustrialChiller 3HL. 40
Figura 15 – Grafico comparativo dei NPV 45

Si desidera ringraziare il sito della IEA - International Energy Agency, da cui sono state prese le figure n°1, n°2 e n°3. Link del sito: https://www.iea.org/

Si desidera ringraziare il sito della Europea Commission – Commissione Europea, nella sezione European IPPC Bureau, da cui sono state prese le figure n°8, n°9 e n°10. Link del sito: https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference

Si desidera ringraziare il Gruppo ATR per la gentile concessione del trattamento delle immagini dei propri prodotti. L'immagine utilizzata è la figura n°11. Link del sito: http://gruppoatr.com/

Si desidera ringraziare il Gruppo Rhoss per la gentile concessione del trattamento delle immagini dei propri prodotti. L'immagine utilizzata è la figura n°12. Link del sito: https://www.rhoss.com/it/

Si desidera ringraziare il Gruppo Clivet per la gentile concessione del trattamento delle immagini dei propri prodotti. L'immagine utilizzata è la figura n°13. Link del sito: https://www.clivet.com/

Si desidera ringraziare il Gruppo Frigel per la gentile concessione del trattamento delle immagini dei propri prodotti. L'immagine utilizzata è la figura n°14. Link del sito: https://www.frigel.com/it

INDICE DELLE TABELLE:

Tabella 1 - Range di temperature e applicazioni per diverse tipologie di torri evaporative. 21
Tabella 2 - Richiesta di acqua per differenti tipologie di torri evaporative. 21
Tabella 3 - Impatto ambientale qualitativo per differenti tipologie di torri evaporative. 22
Tabella 4 - Esempio di comparazione di richiesta di energia annuale diretta e indiretta ed emissioni di CO2 per differenti torri evaporative. 23
Tabella 5 - BAT per la riduzione del rischio di crescita biologica nelle torri evaporative. 24
Tabella 6 - Dati del frigo n°1. 31
Tabella 7 - Dati generali sullo studio. 32
Tabella 8 - Dati gruppo frigo ATR. 34
Tabella 9 - Analisi gruppo frigo ATR. 35
Tabella 10 - Dati gruppo frigo Rhoss. 36
Tabella 11 - Analisi gruppo frigo Rhoss. 37
Tabella 12 - Dati gruppo frigo Clivet. 38
Tabella 13 - Analisi gruppo frigo Clivet. 39
Tabella 14 - Dati gruppo frigo Frigel. 40
Tabella 15 - Analisi gruppo frigo Frigel. 41
Tabella 16 - Studio dei NPV per i differenti gruppi frigo. 44

Si desidera ringraziare il sito della Europea Commission – Commissione Europea, nella sezione European IPPC Bureau, da cui sono state prese le tabelle n°1, n°2, n°3, n°4 e n°5. Link del sito: https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference

SITOGRAFIA:

Di seguito sono riportati i vari indirizzi internet dei vari siti visitati e utilizzati per la seguente Tesi.

IEA: https://www.eia.gov/

Ministero della Transizione Ecologica: https://dgsaie.mise.gov.it/

ENEA: https://www.enea.it/it

Commissione Europea: https://ec.europa.eu/info/index_it

United States government: https://www.usa.gov/

Wikipedia: https://www.wikipedia.org/

Oxycom, natural air conditioning: https://www.oxy-com.com/it/

Yazaki: https://www.yazakienergy.com/

ATR group: http://gruppoatr.com/

Frigel: https://www.frigel.com/it

Rhoss: https://www.rhoss.com/it/

Clivet: https://www.clivet.com/

Atlas Copco: https://www.atlascopco.com/it-it

Carrier: https://www.carrier.it/

Systema: https://www.systema.it/

Robur: https://www.robur.it/

Climaveneta e RC (facenti parte del gruppo Mitsubishi Electric Hydronics & IT Cooling Systems S.p.A): https://www.melcohit.com/it

Aermec: https://global.aermec.com/it/

AKM-Industreanlagen GmbH: https://akm-industrieanlagen.de/index.php/de/

Eurostat: https://ec.europa.eu/eurostat

RINGRAZIAMENTI:

Desidero ringraziare il Professor Masoero Marco e l'Ingegnere Cavaleri Andrea per l'opportunità e l'aiuto datomi nel concludere il mio percorso di studi presso il Politecnico di Torino.

Inoltre, desidero ringraziare le aziende ATR group, Rhoss, Clivet, Frigel e Yazaki, le quali hanno gentilmente dato la loro disponibilità e fornitomi l'aiuto per lo svolgimento della Tesi.