



**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di laurea magistrale
in Ingegneria Energetica e Nucleare**

Tesi di laurea magistrale

Ciclo di Rankine organico su piccola scala guidato da un concentratore solare (CSP)

Relatore

Dott. Davide Papurello

Candidato

Giuseppe Barone

Anno Accademico 2022-2023

ABSTRACT

Dagli anni 90' la domanda di energia elettrica è in forte aumento in tutto il mondo [1] e le politiche energetiche europee, che promuovono la transizione energetica, hanno generato un ingente aumento degli investimenti nelle fonti rinnovabili [2]. Fra di esse, una delle più abbondanti è l'energia solare, che grazie alla sua adattabilità e basso impatto ambientale ha acquistato sempre più importanza sia nei grandi impianti di potenza che nelle micro produzioni domestiche.

In questo lavoro si sviluppa un modello di Ciclo Rankine Organico (ORC) alimentato da un concentratore solare parabolico situato a Torino sul tetto dell'Energy Center per la produzione di energia elettrica e termica. Il ciclo è stato interamente modellato e regolato tramite i software Aspen Plus e COMSOL Multiphysics, basando le simulazioni sui dati sperimentali ottenuti dal concentratore e dalla stazione meteo presente nella struttura dell'Energy Center.

Per la realizzazione del ciclo Rankine sono stati usati tre fluidi organici di diversa natura chimica: Acetone, MD2M ed n-Butano. Per ciascun fluido considerato sono stati modellati impianti di diverse configurazioni con diversi periodi di utilizzo ricercando, nelle diverse casistiche analizzate, la miglior condizione operativa al fine di aumentare la quota di produzione energetica rinnovabile in edifici energivori.

Nel caso preso in esame è stato dimostrato di poter ridurre notevolmente i consumi dell'Energy Center mediante l'utilizzo di uno o più concentratori solari, la quota energetica risparmiata varia sensibilmente durante l'arco delle stagioni. I modelli hanno mostrato potenzialmente di poter produrre 20 kW_{el} medi durante le ore di funzionamento per il caso dell'impianto con acetone, 14 kW_{el} per il butano e 10 kW_{el} per l'MD2M.

Sommario

1	IL SOLARE TERMICO.....	1
1.1	Generalità	1
1.2	Classificazioni degli impianti CSP	3
1.2.1	Collettori lineari Fresnel (LFC)	3
1.2.2	Collettori parabolici lineari (PTC).....	4
1.2.3	Collettori parabolici a disco (DES).....	5
1.2.4	Impianto a torre di energia solare (CRS)	7
2	CICLO RANKINE.....	8
2.1	Ciclo Rankine Organico (ORC)	10
3	CASO STUDIO	13
3.1	Irradianza.....	13
3.2	Concentratore solare Energy Center	14
4	FLUIDI DI LAVORO	17
4.1	MD2M.....	18
4.2	Acetone	19
4.3	n-Butano	22
5	STRUTTURA IMPIANTO	24
5.1	Turbina	24
5.2	Condensatore.....	28

5.3	Pompa	30
5.4	Recuperatore	31
5.5	Evaporatore	33
5.6	Impianto Completo.....	35
5.6.1	Impianto con Butano.....	35
5.6.2	Impianto con MD2M	38
5.6.3	Impianto con Acetone	41
6	REGOLAZIONE	44
6.1	Regolazione con Acetone	44
6.2	Regolazione impianto con Butano	49
7	FUNZIONAMENTO REALE.....	52
7.1	Funzionamento reale del ciclo con Acetone	57
7.2	Funzionamento reale del ciclo con Butano.....	58
8	USO DELLA CO2	61
9	CONSIDERAZIONI IMPIANTISTICHE FINALI	64
9.1	I limiti del concentratore solare dell'Energy Center	64
9.2	Modello del campo solare.....	65
10	IMPATTO ENERGETICO DEL CSP ALL'ENERGY CENTER.....	73
10.1	Domanda energetica dell'edificio	73
10.1.1	Consumi elettrici marginali.....	74

10.2	Impianto CSP nel tetto.....	75
11	CONCLUSIONI.....	79
12	BIBLIOGRAFIA	80

Indice delle figure

Figura 1:Rappresentazione impianto a specchi lineari Fresnel	4
Figura 2:Rappresentazione impianto a collettori parabolici lineari.....	5
Figura 3:Impianto a riflettore parabolico circolare	6
Figura 4:Rappresentazione impianto a torre di energia solare	7
Figura 5:Diagramma termodinamico ciclo Rankine.....	8
Figura 6:Struttura impianto ciclo Rankine[21].....	9
Figura 7:Mappa impianti ORC	11
Figura 8:mappa irradianza globale	14
Figura 9:Concentratore solare Energy Center	15
Figura 10:Diagramma termodinamico dell'MD2M[15].....	19
Figura 11:Diagramma termodinamico e struttura dell'Acetone [15]	21
Figura 12:Diagramma termodinamico e struttura dell'n-Butano[15].....	23
Figura 13:Confronto ciclo Rankine ideale e reale [20].....	25
Figura 14:Impianto completo alimentato da Butano	35
Figura 15:Diagramma T-s Ciclo Rankine con Butano	36
Figura 16: Impianto completo alimentato da MD2M.....	38
Figura 17:Diagramma T-s ciclo Rankine alimentato con MD2M.....	39
Figura 18:Impianto completo alimentato da Acetone.....	41

Figura 19:Diagramma T-s ciclo Rankine alimentato con Acetone	42
Figura 20:Diagramma di regolazione dell'impianto con acetone nei tre livelli di pressione	45
Figura 21:Diagramma di produzione dell'impianto al variare della temperature	46
Figura 22:Confronto potenze generate al variare di portata e potenza scambiata all'evaporatore a 20 bar.....	48
Figura 23:Confronto potenze generate al variare di portata e potenza scambiata all'evaporatore a 4 bar	48
Figura 24:Diagramma regolazione impianto a butano cogenerativo nei tre livelli di pressione ...	49
Figura 25:Diagramma regolazione impianto a butano non cogenerativo nei tre livelli di pressione	50
Figura 26:Diagramma regolazione portata con cogenerazione nei tre livelli di pressione	51
Figura 27: Diagramma regolazione portata senza cogenerazione nei tre livelli di pressione	51
Figura 28:confronto fra la potenza scambiata in evaporatore e potenza elettrica prodotta nel caso cogenerativo e non cogenerativo	52
Figura 29:Rappresentazione 3D della distribuzione termica del cilindro di concentrazione.....	53
Figura 30: Media temperature orarie raggiunte dal 20/06 al 22/06	55
Figura 31:Media temperature orarie raggiunte dal 10/07 al 14/07	56
Figura 32: Funzionamento giornaliero con regolazione del ciclo ad acetone	57
Figura 33: Confronto produzioni orarie di luglio dei cicli analizzati	59
Figura 34: Confronto produzioni orarie di giugno dei cicli analizzati.....	60

Figura 35:Diagramma termodinamico fluido R744 (CO ₂).....	61
Figura 36: Rappresentazione impianto alimentato a CO ₂	62
Figura 37: Temperatura media giornaliera raggiunta sul fuoco della parabola	64
Figura 38: Andamento orario delle temperature sul fuoco del concentratore e temperature di funzionamento con I vari fluidi	65
Figura 39: Vista satellitare dell'Energy Center	75
Figura 40: Planimetria del tetto dell'Energy Center	76
Figura 41: Immagine satellitare modificata del tetto con 14 concentratori solari	77

Indice delle tabelle

Tabella 1:Proprietà chimiche e fisiche dell'MD2M [15]	18
Table 2:Proprietà chimiche e fisiche dell'Acetone [15]	20
Tabella 3: Proprietà chimiche e fisiche del Butano[15].....	22
Table 4:Confronto Prestazioni turbina con tre diversi fluidi organici	26
Tabella 5:Confronto prestazioni condensatore con tre diversi fluidi organici	29
Table 6:Confronto prestazioni pompa con tre diversi fluidi organici.....	30
Table 7:Confronto prestazioni recuperatore con tre diversi fluidi organici	32
Table 8:Confronto prestazioni evaporatore con tre diversi fluidi organici	33
Tabella 9: Orari stagionali di utilizzo dell'impianto	66
Tabella 10:DNI medio stagionale per i tre cicli considerati.....	67
Tabella 11: Valori DNI medi annuali nei tre cicli considerati	67
Tabella 12:Potenza prodotta da un singolo concentratore per i tre fluidi considerati	68
Tabella 13:Potenza termica richiesta dall'evaporatore per i tre fluidi considerati.....	69
Tabella 14: Parametri di potenza e numero di collettori in diverse condizioni di funzionamento per l'Acetone.....	70
Tabella 15: Parametri di potenza e numero di collettori in diverse condizioni di funzionamento per l'Acetone.....	70
Tabella 16: parametri di potenza e numero di collettori per l'MD2M	71
Tabella 17:Confronto aree del campo solare per i tre fluidi considerati.....	71

1 IL SOLARE TERMICO

1.1 Generalità

Le tecnologie che sfruttano l'energia solare sono principalmente due: il solare Fotovoltaico ed il solare Termico o Termodinamico.

Il solare Fotovoltaico sfrutta l'omonimo effetto fisico per la quale, da pannelli semiconduttori suddivisi in celle, verrà prodotta una differenza di potenziale e quindi corrente elettrica.

Il solare Termico, invece, sfrutta principi geometrici ed ottici per riflettere la radiazione solare in un determinato punto o superficie che, attraversata da un fluido, assorbirà calore. L'energia termica raccolta da tale fluido potrà poi essere usata per il riscaldamento dell'acqua corrente oppure per preriscaldare l'acqua tecnica usata negli impianti termici domestici. Quando il fluido termovettore viene usato per alimentare un ciclo termodinamico volto alla produzione elettrica tramite la coppia turbina-alternatore si parla allora di solare termodinamico.

La tecnologia del solare termico si suddivide secondo il range di temperatura raggiunto:

- **Basse temperature** (fino a 120°C): sono utilizzati per piccoli collettori piani in grado di scaldare acqua o aria. In Nordamerica è molto comune usare la tecnologia del “muro solare” detto anche “muro Trombe-Michel” che sfrutta superfici verticali ad alta inerzia termica dotati di intercapedine in grado di riscaldare l'aria [3].
- **Medie temperature** (circa 500°C): il solare termico a media temperatura è usato soprattutto per i collettori domestici in grado di fornire acqua calda, secondo il dipartimento dell'energia degli Stati Uniti queste installazioni potrebbero coprire circa il 50% della domanda di acqua calda per uso residenziale e commerciale [4]. In ambito

industriale l'uso del solare termico a media temperatura è utilizzato per l'essiccazione termica di materiale legnosi per l'industria edilizia e combustibili legnosi [5].

- **Alte temperature** (circa 1000°C): le temperature più elevate vengono raggiunte con particolari impianti chiamati “Concentrated Solar Power” o semplicemente “CSP”, nei quali le superfici curve concentreranno la radiazione solare per scaldare un fluido in grado di generare potenza alla turbina [6].

Le principali configurazioni impiantistiche ad alta temperatura appartengono a 4 tipologie: impianti con collettori parabolici lineari, collettori lineari con riflettore Fresnel, a torre solare ed infine a riflettore parabolico circolare. La caratteristica principale di questi impianti sta nella vasta area occupata dai pannelli, rendendoli particolarmente adatti a territori desertici come quelli situati negli Stati Uniti, dove vi sono i più grandi impianti di solare termico per la produzione di energia elettrica come la Ivanpah Solar Power Facility da 370 MW e l'impianto SEGS da 354MW [7][8].

L'esperienza maturata negli impianti californiani ha evidenziato come, fra le varie configurazioni di CSP, il riflettore parabolico circolare sia considerato lo stato dell'arte. Attualmente questi modelli di riflettori hanno taglie di circa 50MW, rendendoli vantaggiosi per i costi specifici ed adatti all'ambiente desertico dell'entroterra californiano. L'uso di CSP nelle città è dunque fortemente limitato dalla concorrenza del fotovoltaico, molto più diffuso in ambito domestico per la limitata area occupata ed i prezzi d'investimento vantaggiosi [9].

Recenti studi hanno dimostrato la fattibilità tecnica ed economica dell'uso domestico di sistemi a concentrazione solare, producendo energia elettrica e termica in grado di alimentare comunità energetiche.

Nonostante i costi di investimento, a parità di kWel prodotti, risultano minori nel caso di solare fotovoltaico, il vantaggio del CSP è quello di produrre sia energia elettrica sia acqua calda per usi domestici, rendendo i costi energetici livellati più simili a quelli di un sistema fotovoltaico [10].

1.2 Classificazioni degli impianti CSP

1.2.1 Collettori lineari Fresnel (LFC)

Gli impianti con riflettori Fresnel (in onore del fisico Augustin-Jean Fresnel) sono costituiti da una serie di specchi piani inclinati paralleli fra loro che concentrano la radiazione solare su delle tubazioni rialzate poste al centro della struttura come mostrato in *figura 1*.

All'interno dei tubi vi è un fluido termovettore che riscaldandosi alimenterà un ciclo termodinamico Rankine per produrre energia elettrica e termica. La configurazione degli impianti Fresnell permette una maggior superficie riflettente a parità di area occupata, riducendo però l'efficienza ottica. Durante la crisi petrolifera del 1973, alcune aziende iniziarono ad approfondire questa nuova tecnologia, che rimase inutilizzata fino agli inizi del 1990.

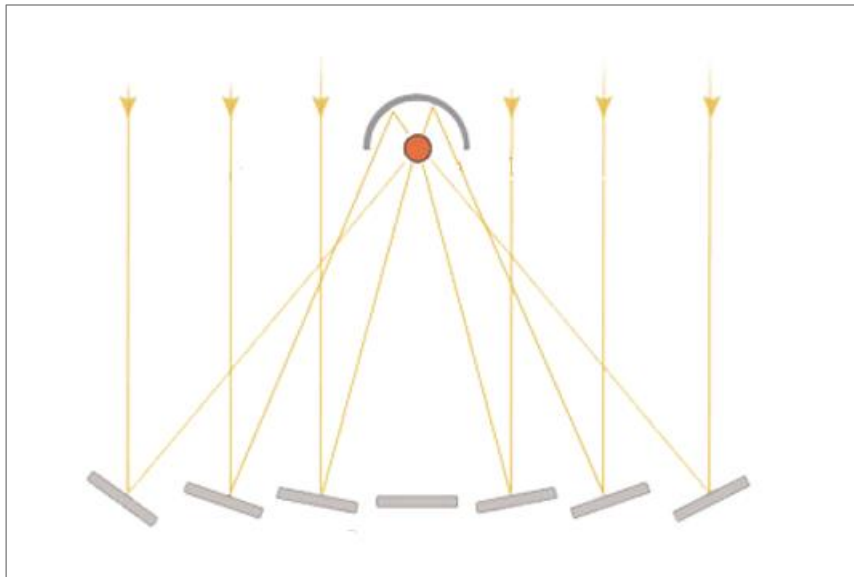


Figura 1: Rappresentazione impianto a specchi lineari Fresnel

1.2.2 Collettori parabolici lineari (PTC)

Questo tipo di impianto è costituito da specchi parabolici rotanti, chiamati riflettori, che concentrano la radiazione solare su di un tubo ricevitore posto nel fuoco del paraboloide. All'interno del tubo scorre un fluido termovettore (generalmente olio diatermico) che viene scaldato e raccolto dalle tubazioni del campo solare che permettono di convogliare tutta la portata agli scambiatori di calore oppure ai serbatoi di accumulo.

Questa tipologia di struttura necessita di grandi superfici per ottenere potenze adeguate, per questo motivo impianti di questo tipo non sono molto efficienti per piccole produzioni ed installazioni domestiche.

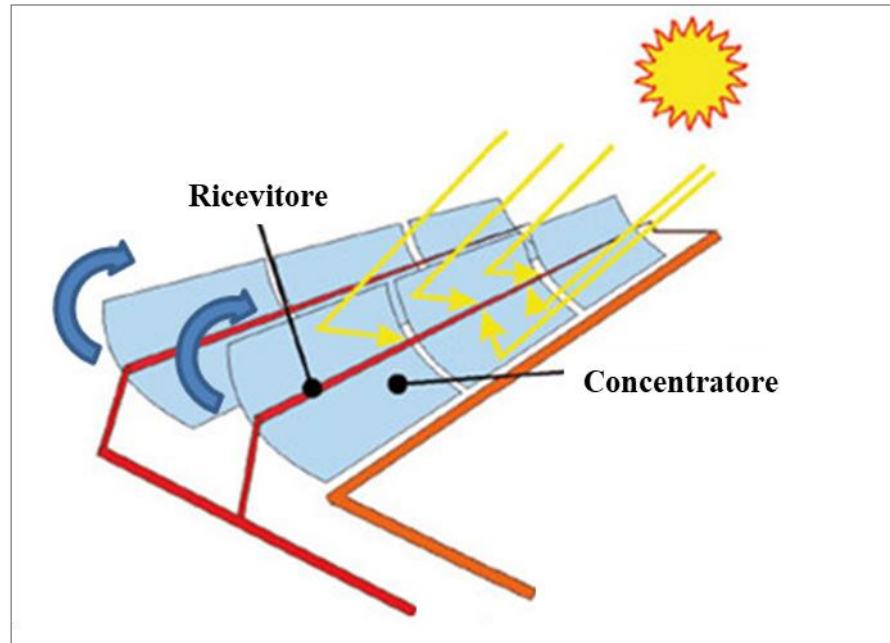


Figura 2: Rappresentazione impianto a collettori parabolici lineari

Nei grandi impianti produttivi i collettori parabolici lineari riescono, con un'efficienza che varia dal 60 all'80%, a riscaldare il fluido fino a 400°C e raggiungere rendimenti complessivi di circa il 20%, simili a quelli dei pannelli fotovoltaici. Dal 2014 i maggiori impianti che utilizzano la tecnologia dei collettori parabolici lineari, per migliorare le prestazioni, utilizzano sistemi di accumulo di calore usando Sali fusi. [11]

1.2.3 Collettori parabolici a disco (DES)

In questo tipo di riflettore la radiazione solare viene riflessa su un fuoco centrale di tipo puntuale. La struttura usa il movimento nei due assi per inseguire il sole. Generalmente nel fuoco troviamo il lato caldo di un motore Stirling, ma sono stati progettati anche alcuni prototipi che utilizzano l'energia solare per dissociare l'ammoniaca per poi ottenere calore in fase di ricombinazione.

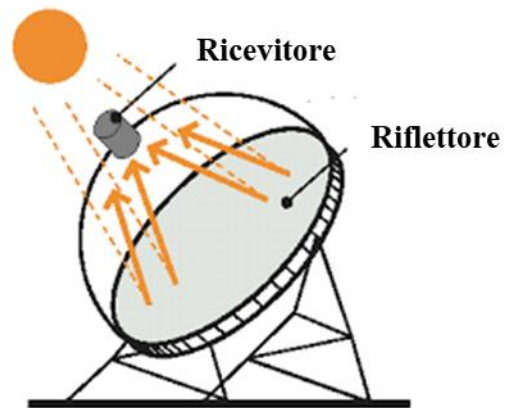


Figura 3: Impianto a riflettore parabolico circolare

Un'altra possibilità è di collegare i concentratori ed usare un fluido termovettore per alimentare un ciclo termodinamico. Il sistema di riflettori parabolici è uno dei più efficienti nel quale vengono raggiunti i massimi fattori di concentrazione, e quindi di temperature usando aree ridotte.

Nel lavoro di tesi è stato usato proprio un riflettore parabolico di questa tipologia, con la differenza che nel fuoco vi si trova un rilevatore di temperature per simulare quanto calore potrà essere assorbito dal fluido termovettore alimentare un ciclo ORC.

1.2.4 Impianto a torre di energia solare (CRS)

Negli impianti a torre solare un sistema di specchi riflettenti indipendenti insegue il sole riflettendo e concentrando la radiazione su un ricevitore fisso posto alla sommità di una struttura a torre posta al centro dell'impianto. In cima alla struttura a torre vi è il ricevitore centrale dove scorre il fluido termovettore che trasferisce la potenza termica ad uno scambiatore di calore che alimenta la coppia turbina-alternatore per la produzione di energia elettrica.

Questo impianto può raggiungere alti fattori di concentrazione e temperature superiori rispetto agli impianti con collettori parabolici lineari, ma l'enorme area di cui necessita non lo rende adatto alle piccole produzioni.

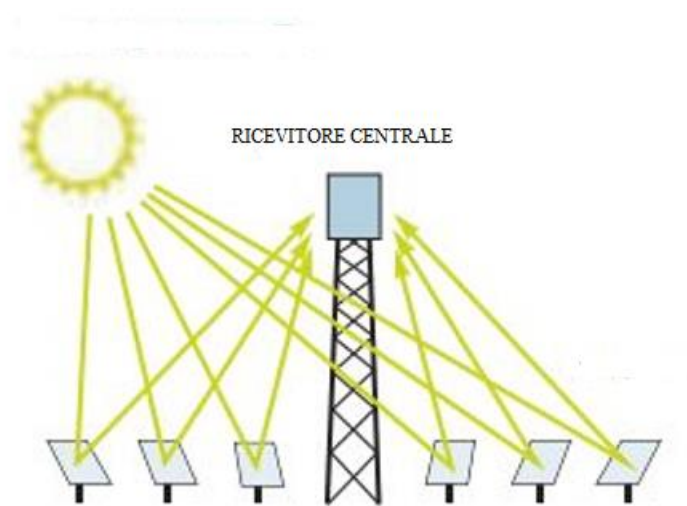


Figura 4: Rappresentazione impianto a torre di energia solare

2 CICLO RANKINE

Uno dei cicli termodinamici più usati è sicuramente quello creato da William Rankine nel 1859, è adottato specialmente nelle centrali termoelettriche con turbine a vapore ed usa generalmente come fluido termovettore l'acqua [21].

Il ciclo termodinamico presenta due curve isoentropiche e due isobare e può avere una configurazione “aperta” o “chiusa”, nel primo caso il ciclo aperto prevede lo scarico in atmosfera, nel secondo si applica la cogenerazione per il recupero del calore. Il ciclo chiuso è quello usato nelle centrali termoelettriche, ma la sua diffusione comprende anche moltissime applicazioni nelle piccole produzioni (5-500kW).

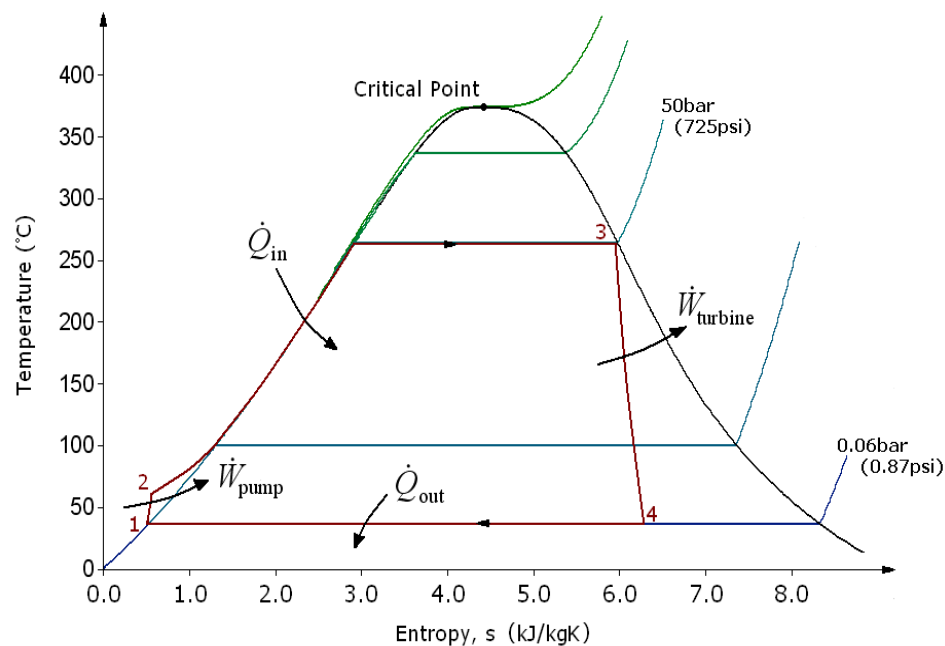


Figura 5: Diagramma termodinamico ciclo Rankine

La configurazione impiantistica del ciclo Rankine chiuso si avvale di 4 fondamentali componenti:

Scambiatore di calore: generalmente una caldaia o un generatore di calore, permette lo scambio termico fra i fumi di combustione ed il liquido saturo che diventerà vapore (spesso da surriscaldare). Questi componenti variano molto nel mercato in base alla struttura stessa, che può essere costituita da fasci tubieri, shall & tube e piastre oppure dal metodo di scambio dei flussi: controcorrente ed equicorrente [22].

Turbina: è il componente che permette l'effettiva produzione del lavoro meccanico utile tramite il movimento delle pale generato dal vapore ad alta temperatura e pressione. Nello stato successivo il fluido avrà perso gran parte del suo potenziale energetico espandendosi e raffreddandosi, la differenza energetica fra i due stadi sarà la potenza effettiva prodotta in turbina.

Condensatore: Scambiatore di calore (di configurazione variabile) volto a condensare il vapore saturo in uscita dalla turbina. Il calore latente sottratto al vapore può essere utilizzato per alimentare altri fluidi termovettori (generalmente acqua) per fare cogenerazione.

Pompa: permette di riportare il ciclo a pressioni superiori.

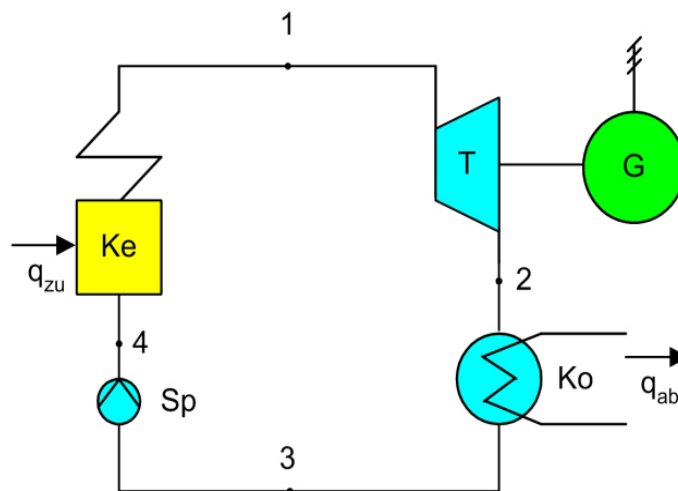


Figura 6: Struttura impianto ciclo Rankine[21]

2.1 Ciclo Rankine Organico (ORC)

Il ciclo Rankine organico (ORC) è un ciclo termodinamico di tipo Rankine che usa come fluido di lavoro delle sostanze di natura organica. La specificità di utilizzare un fluido organico e non la semplice acqua risiede nel poter sfruttare al meglio piccoli salti entalpici, dando la possibilità di sviluppare impianti di taglie inferiori e di conseguenza temperature medio-basse. L'utilizzo di acqua per impianti di piccole taglie sarebbe poco efficiente, sia per questioni relative ad i costi di esercizio, sia per problematiche progettuali della turbina.

In realtà i cicli che usano fluidi organici non si limitano solo ad essi, ma comprendono in generale tutti quelli definiti “bassobollenti”, ovvero tutti i fluidi (anche inorganici) con basse temperature di ebollizione.

L'uso di ORC è iniziato principalmente negli anni 70' e continua tuttora. Nel sito orc-world-map.org è possibile consultare una mappa interattiva con tutti gli impianti ORC attualmente esistenti ed in costruzione con relativi dettagli (dati aggiornati al 2021).

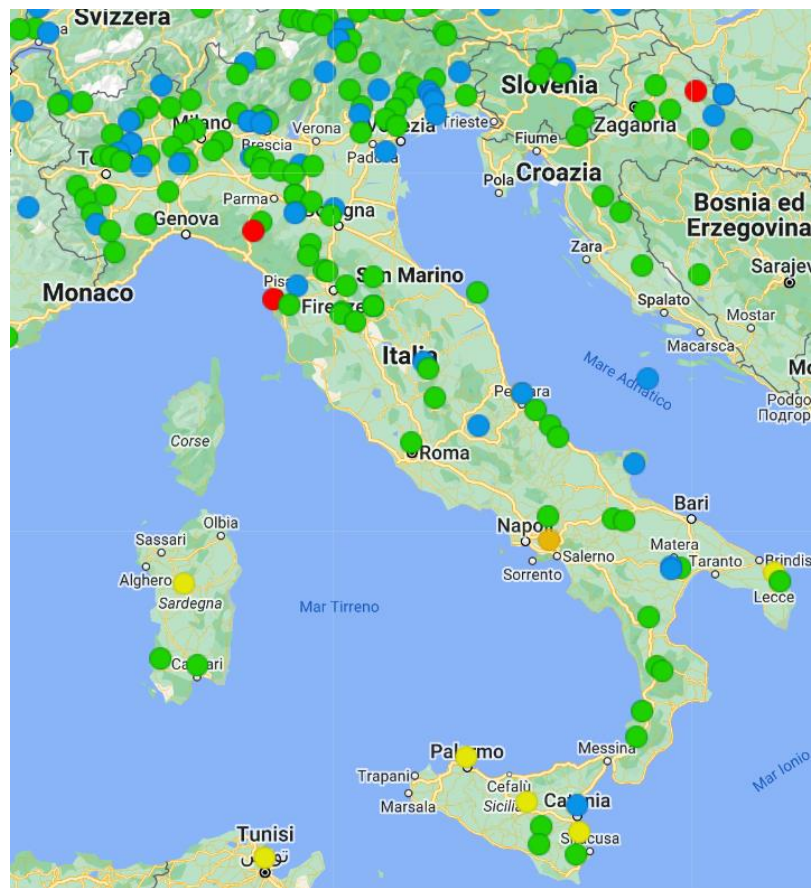


Figura 7: Mappa impianti ORC

La mappa mostra in Italia un grande numero di impianti ORC, divise per risorsa utilizzata:

- Biomasse: Impianti installati generalmente nelle prossimità di zone Agricole, dove scarti di natura organica vengono usati per alimentare dei cicli rankine organici.
- Recupero di calore: sfruttano il calore residuo di impianti industriali che generalmente verrebbe dissipate.

- Solare: Cicli rankine organici alimentati da strutture CSP, particolarmente usati in Europa meridionale e nord Africa, in Sicilia sono presenti tre impianti CSP per la produzione di energia elettrica e termica dotati di tecnologia a collettori lineari parabolici [23].
- Geotermico: come nelle pompe di calore geotermica, il ciclo sfrutta la differenza di temperatura a diverse profondità.
- Rifiuti: in Italia presente soltanto nella regione Campania, questo tipo di impianto è alimentato dalla combustione di rifiuti solidi urbani.

I singoli impianti presenti nel territorio hanno potenze installate basse, nonostante la mappa mostra ORC fino a 150MWel (Impianto geotermico in costruzione in Indonesia), in Italia le potenze risultano mediamente inferiori a 1MWel e la maggior parte degli impianti sono stati costruiti dopo il 2010. [12]

Il primato in Italia va alla centrale Arvedi di Cremona con 7MWel di potenza.

3 CASO STUDIO

Questo lavoro di tesi è incentrato sulla simulazione di un ciclo Rankine organico alimentato da un concentratore solare posto sul tetto dell'Energy Center a Torino.

Le simulazioni del ciclo sono state eseguite sul software AspenPlus ed il ciclo creato non ha effettivi limiti di potenza, ma si approfondisce l'aspetto dell'adattabilità del modello in base ai fluidi usati ed alla disponibilità di irradianza.

3.1 Irradianza

L'irradianza è il flusso della radiazione elettromagnetica, in questo caso radiazione solare, trasmessa per irraggiamento e si misura in W/m^2 (comune anche in MJ/m^2). L'uso del solare termico risulta quindi dipendente dalla posizione geografica, in quanto l'irradianza risulta maggiore in determinate località geografiche come: Australia, Medio-Oriente, Sud Africa, California e Cile.

In Italia l'irradianza non ha livelli elevatissimi, ma la zona del Mediterraneo risulta la più adatta.

Nel caso di questo lavoro di tesi è stata scelta come città Torino, con un'irradianza media annua di 4938 MJ/m^2 [13]. Queste misure non differiscono poi troppo da quelle registrate nelle provincie del sud Italia, ma restano comunque inferiori ai più di 8000 MJ/m^2 del deserto cileno di Atacama, dove si registrano globalmente i valori più alti [14].

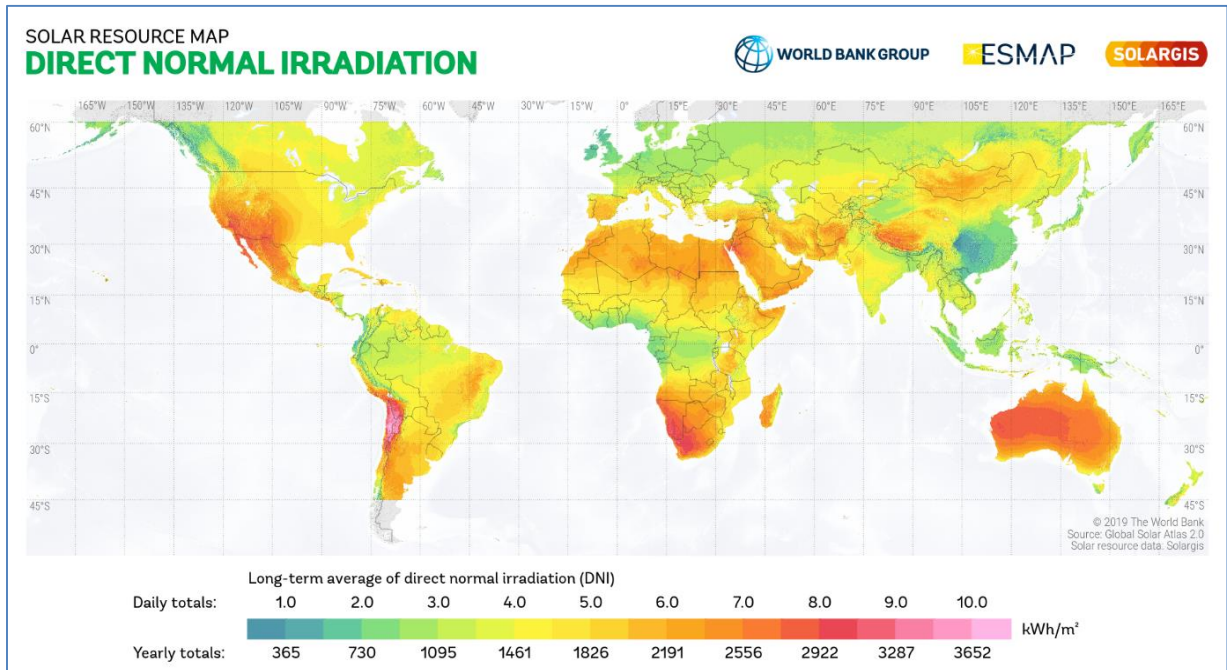


Figura 8: mappa irradianza globale

3.2 Concentratore solare Energy Center

Il concentratore solare considerato in questo lavoro di tesi è quello presente all'Energy Center. La struttura si compone di un paraboloide a disco prodotto da El.Ma. srl Electronic Machining e successivamente rivestito da “petali”, ovvero dei sottili fogli polimerici riflettenti situati nella parte concava della struttura ad alta efficienza ottica stimata a 0.8.



Figura 9: Concentratore solare Energy Center

Il concentratore è in grado di poter ruotare nei due assi (azimut ed elevazione) per poter inseguire il sole automaticamente durante l'intera giornata. Il vertice della parabola è occupato da un braccio di metallo che sorregge la struttura cilindrica dove sarà concentrato il fuoco ad una distanza di circa 76,5 cm.

La struttura del fuoco è composta dalle seguenti parti:

-Cilindro: un tubo di 24 cm di lunghezza con diametro esterno di 18 mm e spessore di 5 mm, questo componente risulta vuoto all'interno, ma è possibile riempirlo tramite un sistema di tubazioni controllate da una pompa. Il materiale del cilindro risulta fondamentale per il rendimento del sistema, le diverse proprietà chimico-fisiche possono provocare la rottura dell'intero cilindro e

deve anche resistere gli altri e repentini cambi di temperatura. Durante le misurazioni sul campo è stato scelto di utilizzare un materiale ceramico, più resistente alle variazioni termiche ma meno conduttore di un acciaio, ovvero il Carburo di Silicio (generalizzato in SiC).

-Termocoppia: All'interno del ciclino è presente una termocoppia che misurerà la temperatura interna, fondamentale per effettuare le misurazioni. La termocoppia utilizzata è di tipo N: Nicrosil (Ni-Cr-Si) (+) / Nisil (Ni-Si) (-), che può effettuare misure precise fino a 1650 °C ed è molto usata per la sua resistenza all'ossidazione.

-Piastra Metallica: durante le operazioni di manutenzione è fondamentale curare il sottile film riflettente sulla parabola, è molto probabile che si formino bolle d'aria che renderanno la superficie scabrosa, influenzando così la posizione del fuoco in determinate ore del giorno. Per proteggere la struttura da questa eventualità è stata posizionata una piastra metallica a sinistra del cilindro per proteggere i componenti esposti, come giunti e soprattutto la parte esterna della termocoppia.

4 FLUIDI DI LAVORO

Nei cicli Rankine chiusi “classici” il fluido termovettore che verrà fatto evaporare e genererà potenze in turbina è l’acqua, tuttavia nei cicli a potenze medio-basse è preferibile usare fluidi differenti a base organica per sfruttare al meglio sia il basso punto di ebollizione sia il minor calore latente.

Non tutti i fluidi organici possono risultare adatti allo scopo, essi devono essere innanzitutto idonei da un punto di vista normativo secondo i valori del GWP(Global Warming Potential) ed ODP (Ozone Depletion Potential).

Il 1° Gennaio 1989, con il protocollo di Montreal, è entrato in vigore il divieto di utilizzare i Clorofluorocarburi (Freon) e successivamente sono stati vietati anche gli alogenuri alchilici ,come il classico R134A, ed infine alcuni idrocarburi ed i fluorocarburi.

4.1 MD2M

Fra i fluidi organici più comuni allo scopo della tesi sono i *silossani*, essi possono essere ciclici come il D3, D4, D5 e D6, oppure lineari. Il fluido adatto al caso è proprio un silossano lineare chiamato decamethyltetrasilossano o più semplicemente MD2M, che fra i fluidi scelti è quello a temperatura critica maggiore.

Tabella 1: Proprietà chimiche e fisiche dell'MD2M [15]

Massa molare[kg/mol]	0.310	Entropia specifica [J/kg K]	-5345.99
Temperatura Punto triplo[°C]	-67.950	Pressione Punto triplo[bar]	3.129
Temperatura Punto critico[°C]	326.250	Pressione Punto critico[bar]	11.440
Densità Punto critico[kg/m³]	268.432	Formula	C ₁₀ H ₃₀ O ₃ Si ₄

Poiché i silossani sono ampiamente utilizzati in ambito biomedico e cosmetico, la loro tossicologia è stata esaminata approfonditamente. Secondo L'Enciclopedia della chimica industriale di Ullmann, queste sostanze sono praticamente non tossiche e quindi adatte come fluido organico per un ciclo Rankine.

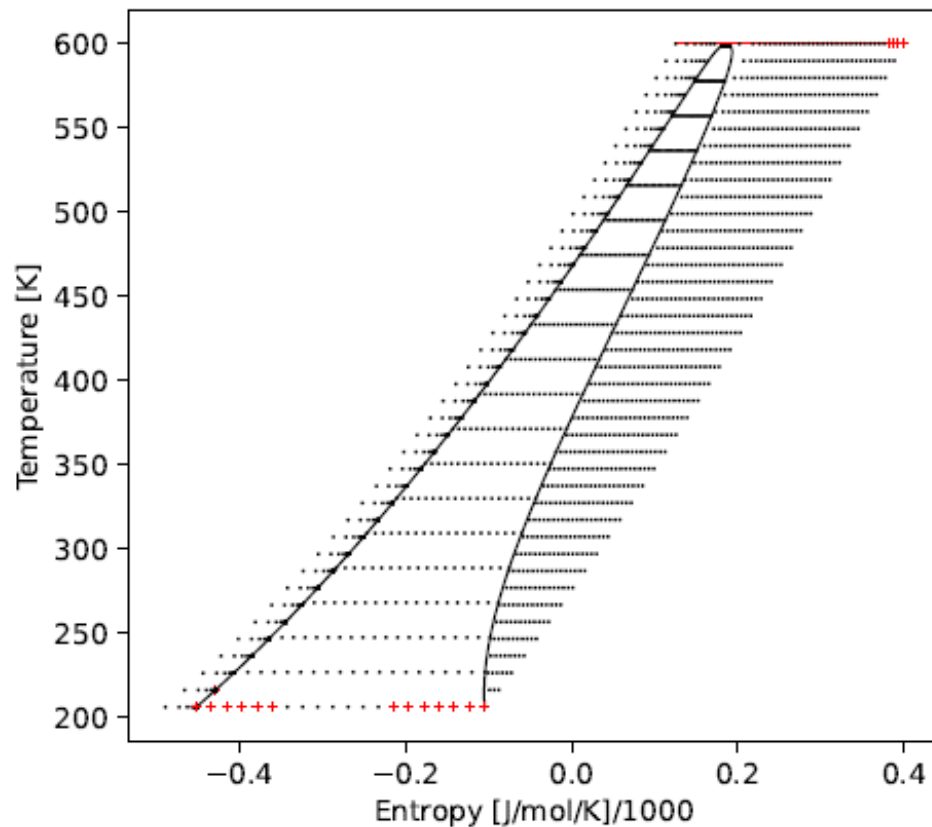


Figura 10: Diagramma termodinamico dell'MD2M[15]

4.2 Acetone

Il secondo fluido testato per un potenziale utilizzo nel campo degli ORC è molto differente rispetto a quello elencato precedentemente, optando per l'analisi di fluidi con caratteristiche differenti fra di loro. La scelta è ricaduta sul dimetilchetone ($\text{CH}_3\text{-CO-CH}_3$) comunemente chiamato acetone, esso risulta adatto allo scopo termodinamico in quanto ha una temperatura di ebollizione di soli 56,2 °C. La principale problematica con l'acetone è la sua temperatura di autoignizione di circa 540 °C, ma in un sistema ORC difficilmente si raggiungono tali valori di temperature.

La molecola di acetone è molto più piccola e semplice rispetto all'MD2M ed il diagramma T-s risulta più largo, quindi il calore latente durante il passaggio di stato risulterà maggiore e meglio sfruttabile per la cogenerazione, tuttavia richiederà maggior energia termica durante la fase di evaporazione.

Table 2: Proprietà chimiche e fisiche dell'Acetone [15]

Massa molare[kg/mol]	0.058	Entropia specifica [J/kg K]	-5413.15
Temperatura Punto triplo[°C]	-94.65	Pressione Punto triplo[bar]	$2.326 \cdot 10^{-5}$
Temperatura Punto critico[°C]	234.95	Pressione Punto critico[bar]	47
Densità Punto critico[kg/m³]	272.972	Formula	C ₃ H ₆ O

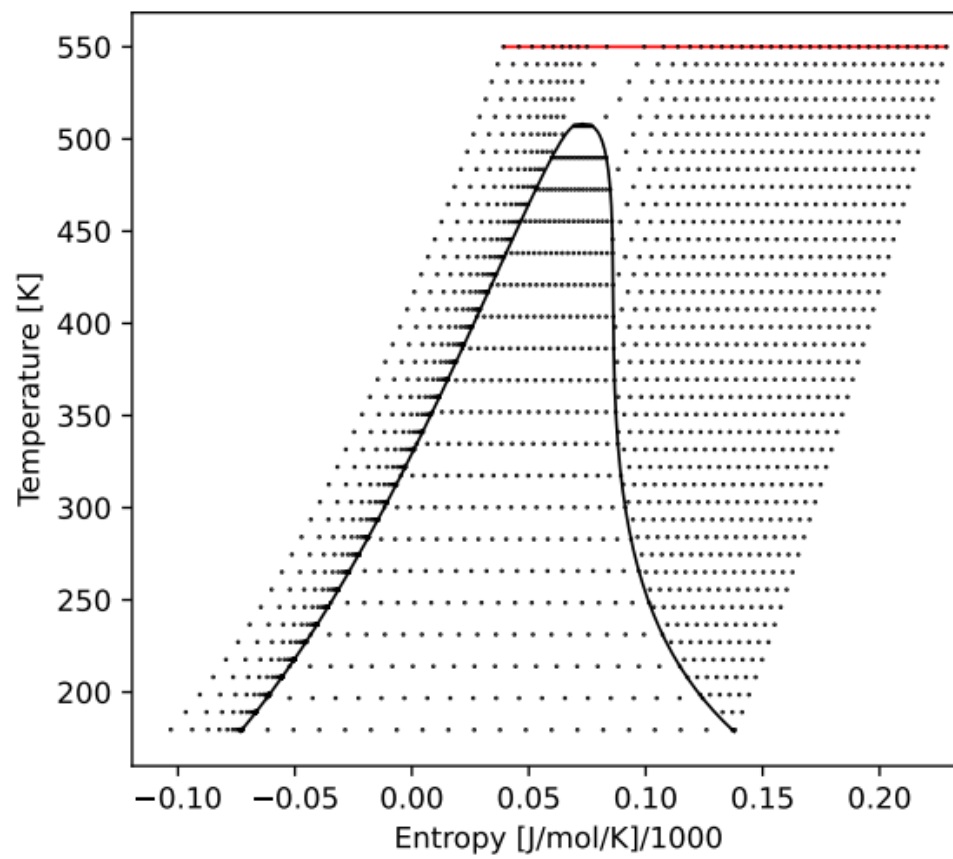


Figura 11: Diagramma termodinamico e struttura dell'Acetone [15]

4.3 n-Butano

Il Butano è un idrocarburo a catena lineare, ha ottime proprietà termodinamiche ma, proprio come l'acetone, è un fluido infiammabile con temperatura di autoignizione di circa 365°C. Le temperature in simulazione non saranno così alte, inoltre il fatto di avere un impianto con due fluidi separati evita che un fluido infiammabile stia a diretto contatto con il concentratore solare. La scelta del butano è da attribuirsi alla diversità dei componenti e delle loro caratteristiche: un silossano, un chetone ed un idrocarburo rispettivamente con temperatura critica alta, media e bassa.

Tabella 3: Proprietà chimiche e fisiche del Butano[15]

Massa molare[kg/mol]	0.058	Entropia specifica [J/kg K]	-6328.67
Temperatura Punto triplo[°C]	-138.255	Pressione Punto triplo[bar]	6.656
Temperatura Punto critico[°C]	151.975	Pressione Punto critico[bar]	37.96
Densità Punto critico[kg/m³]	228.000	Formula	C ₄ H ₁₀

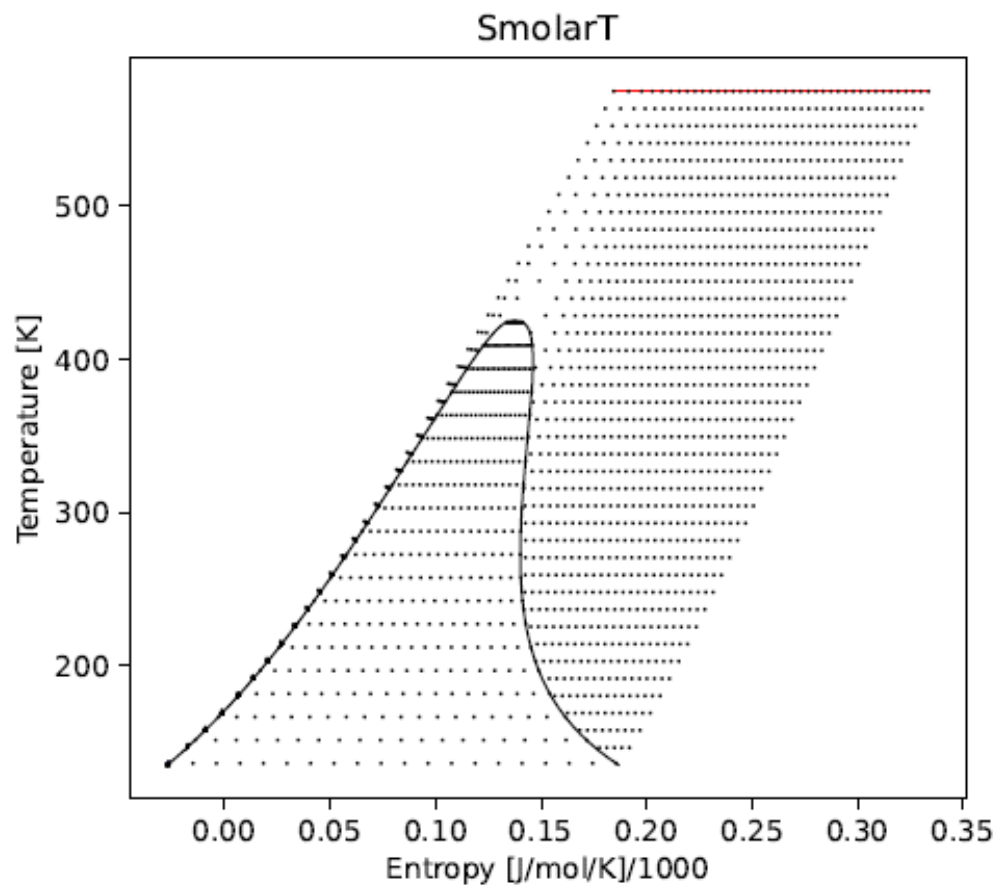


Figura 12: Diagramma termodinamico e struttura dell'n-Butano[15]

5 STRUTTURA IMPIANTO

L'impianto presenta la struttura classica descritta nel paragrafo 3, i componenti e le varie simulazioni sono state eseguite con il software di Aspentech: AspenPlus V11 . La configurazione impiantistica selezionata è quella del doppio fluido, ovvero usare un fluido termovettore che assorbirà il calore dal concentratore e lo trasferirà ai fluidi descritti pocanzi tramite uno scambiatore di tipo “shell and tubes”. La scelta del fluido è ricaduta sul Dowtherm-T, esso risulta molto adatto al nostro scopo in quanto è un fluido termovettore organico sintetico progettato per sistemi in fase liquida non pressurizzati che funzionano in modo ottimale nell'intervallo da $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $288\text{ }^{\circ}\text{C}$, ma può lavorare anche a temperature maggiori di $300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5.1 Turbina

Il primo componente da analizzare è l'espansore, nel nostro caso la turbina, essa accoglierà il fluido sottoforma di vapore surriscaldato e trasmetterà una potenza all'albero che tramite alternatore verrà trasformata in energia elettrica per l'autoconsumo o per la rete.

Nei cicli Rankine questo componente risulta fondamentale non solo perché produce effettivamente un output energetico, ma anche perché è responsabile di una delle differenze fra ciclo Rankine “reale” ed “ideale”. Nella struttura dell'ORC rappresentata nell'immagine sottostante, la turbina si occupa del passaggio **5-6** tramite una curva termodinamica chiamata isoentropica, ovvero una retta verticale che manterrà invariata l'entropia del processo. Per definizione fisica l'entropia solo idealmente potrà restare costante in un processo, nella realtà si verifica un leggero aumento che renderà la curva isoentropica leggermente spostata verso valori maggiori di entropia.

Per calcolare questo spostamento in una turbina è possibile, sul software AspenPlus, settare il valore denominato “rendimento isoentropico” che determinerà la variazione della pendenza della curva, nel nostro caso è stato scelto un rendimento isoentropico di 0.9 ed un rendimento meccanico stimato a 0.9.

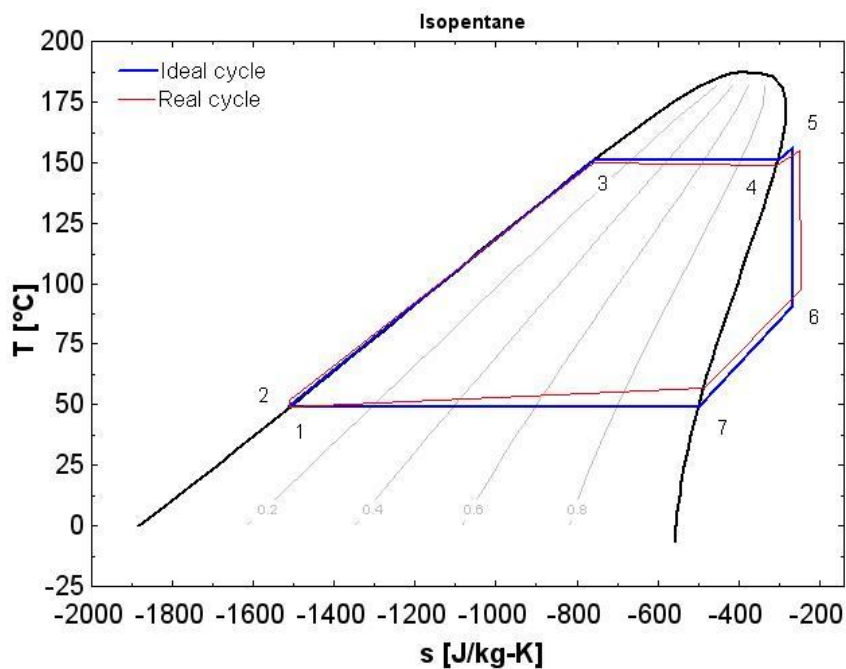


Figura 13: Confronto ciclo Rankine ideale e reale [20]

Il sistema di generazione dell'impianto non ha effettivi limiti, non è stato progettato per produrre una quantità fissa di potenza, al contrario sono stati effettuati calcoli nelle migliori circostanze possibili optando per una massimizzazione della produzione. Non imponendo così un limite superiore a ciò che potrà essere prodotto, è stato deciso di fissare soltanto il valore di portata uguale ad 0.5 kg/s.

A partire dal valore di portata è stato definito il miglior valore possibile della pressione di esercizio, prestando attenzione ai valori critici ed al fatto che impianti micro produzioni non hanno componenti adatti ad alti valori di pressione. In seguito, tramite il software di AspenPlus sono stati calcolati i capisaldi della turbina e degli altri componenti.

Table 4: Confronto Prestazioni turbina con tre diversi fluidi organici

	MD2M	ACETONE	Butano
Portata [kg/s]	0.50	0.50	0.50
Pressione in [bar]	8.00	20.00	20.00
Pressione out [bar]	1.00	3.00	9.50
Potenza [kW]	10.60	38.99	14.58
Temperatura in [°C]	299.79	185.80	150.00
<div> <div>○</div> Temperature (C) </div> <div> <div>⬡</div> Pressure (bar) </div> <div> <div>⬢</div> Mass Flow Rate (kg/sec) </div> <div> <div>□</div> Molar Vapor Fraction </div> <div> <div>Q</div> Duty (kW) </div> <div> <div>W</div> Power(kW) </div>			

Le simulazioni della turbina per i 3 fluidi scelti risultano evidentemente molto diverse, tuttavia il primo parametro da analizzare sicuramente è la pressione. Nel caso del fluido MD2M si può operare con pressioni abbastanza basse, il diagramma T-s del fluido mostra come esso non sia adatto a lavorare a pressioni più alte, avendo la pressione critica ad 11 bar. Per il caso dell'acetone si hanno livelli di pressione decisamente più alti, in una prima analisi si è scelto di procedere senza limiti superiori possibilmente dettati dal tipo di espansore scelto e dalla componentistica. Caso analogo per il butano, esso opera a temperature più basse rispetto all'acetone, ma con la stessa pressione iniziale. Il fatto di espandere fino a 9.5 bar è da attribuirsi al grafico T-s del butano, a pressioni vicine a quella ambiente ha temperature che impediscono di recuperare il calore latente tramite cogenerazione.

La potenza prodotta dalla turbina nel caso dell'acetone risulterebbe quella più conveniente, la temperatura di 185.80 °C non è difficile da ottenere.

Per le alte pressioni sarebbe opportuno valutare il tipo di espansore da utilizzare e calcolarne il numero di giri, ma tramite degli appositi espansori a vite (screw expander) in grado di raggiungere 6000 rpm e 800kW di potenza è possibile soddisfare i carichi dei cicli considerati [9] [24].

5.2 Condensatore

Dopo aver lasciato il fluido espandersi in turbina otterremo lo stato di vapore saturo dove, mantenendo la pressione costante, il titolo varierà gradualmente fino alla completa liquefazione. Questo passaggio risulta fondamentale in quanto eventuali gocce liquide in turbina potrebbero danneggiare i componenti interni e se non opportunamente liquefatto la successiva pompa potrebbe riportare dei danni. Il condensatore dunque ha il compito di modificare il valore “Molar Vapor Fraction” presente su Aspen portandolo da 1 a 0 e per ottenere questo avremo bisogno di uno scambiatore. Nelle librerie del programma, nella sezione “Exchangers” è presente il componente adatto, ovvero uno scambiatore di calore a due flussi in corrente o in controcorrente, la tipologia scelta è quella dello “shell & Tube”, con il fluido organico nei tubi. Il calore viene scambiato con un altro fluido che non è nient'altro che acqua così da poter fare della cogenerazione e sfruttare il calore per scaldare acqua usata nei circuiti idronici che generalmente hanno temperature in uscita dai 50 ai 60 °C in base al tipo di terminale.

Tabella 5: Confronto prestazioni condensatore con tre diversi fluidi organici

	MD2M	Acetone	Butano
Temp. Acqua in [°C]	55.00	55.00	55.00
Temp. Acqua out [°C]	73.39	90.80	83.10
Temp. Fluido in [°C]	260.04	97.26	115.57
Temp. Fluido out [°C]	193.23	92.48	77.08
Calore scambiato [kW]	125.20	244.42	191.57
<div> <div>○</div> Temperature (C) <div>⬡</div> Pressure (bar) <div>⬢</div> Mass Flow Rate (kg/sec) <div>□</div> Molar Vapor Fraction <div>Q</div> Duty (kW) <div>W</div> Power(kW) </div>			

La modalità di scambio termico scelta è stata quella di flussi controcorrente, con l'opzione "Shortcut" ovvero un modello semplificato senza l'utilizzo delle geometrie dello scambiatore. L'acqua utilizzata è quella generalmente usata per i terminali, così da togliere lavoro alla caldaia o alla pompa di calore, in tutti e tre i casi è stata scelta una portata di 1.5 kg/s di acqua, modificabile in base alle esigenze dell'impianto.

5.3 Pompa

La pompa è l'elemento che riporterà il fluido alla pressione di esercizio, nel software AspenPlus è possibile selezionare il rendimento meccanico di tale componente, settato a 0,9.

Table 6: Confronto prestazioni pompa con tre diversi fluidi organici







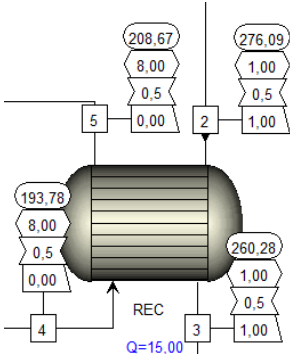
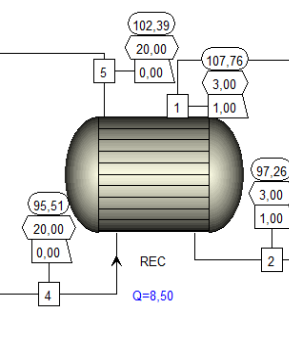
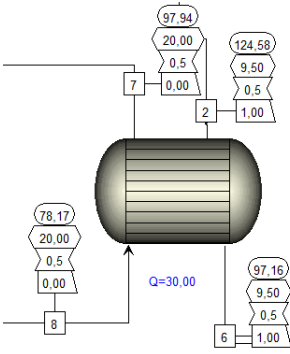
	MD2M	Acetone	Butano
Pressione in [bar]	1.00	3.00	9.50
Pressione out [bar]	8.00	20.00	20.00
Potenza assorbita [kW]	0.58	4.09	1.16
<div> <div>○</div> Temperature (C) <div>⬡</div> Pressure (bar) <div>⬢</div> Mass Flow Rate (kg/sec) <div>▭</div> Molar Vapor Fraction </div> <div> Q Duty (kW) W Power(kW) </div>			

5.4 Recuperatore

Dopo la turbina il fluido non sempre si trova precisamente allo stato di vapore saturo, è possibile dunque inserire uno scambiatore di calore analogo al caso del condensatore, ma che trasferisca calore dal fluido in uscita dalla turbina al fluido in ritorno dalla pompa alla pressione di esercizio. In questo modo l'effetto è duplice: da un lato permette di togliere meno calore al Dowtherm che dovrà riscaldare il fluido fino allo stato iniziale per reimmetterlo in turbina, dall'altro andrebbe a ridurre il calore da smaltire durante la condensazione. L'uso di questo componente è del tutto opzionale, se vi è la necessità di scaldare molta più acqua in cogenerazione allora questo elemento può anche essere bypassato.

La modalità di scambio termico è analoga a quella del caso precedente, con l'unica differenza che per la condensazione è stato imposto il comando di cambiare calore fino a quando il fluido non sia totalmente condensato, mentre nel caso del recupero è stato imposto di scambiare quantità di calore definite. Nel caso dell'acetone non è possibile scambiare di più a causa del "temperature crossover", negli altri casi si cerca di estrarre il più possibile dando la possibilità di fare cogenerazione portando l'acqua ad una temperatura compresa fra 70 °C e 80 °C.

Table 7: Confronto prestazioni recuperatore con tre diversi fluidi organici

	MD2M	Acetone	Butano
Potenza termica scambiata [kW]	15.00	8.50	30.00
Temp Vap in [°C]	276.09	107.76	124.58
Temp Vap out [°C]	260.28	97.26	97.16
Temp liquid in [°C]	193.78	95.51	78.00
Temp liquid out [°C]	208.67	102.39	97.94
<div> <div></div> Temperature (C) <div></div> Pressure (bar) <div></div> Mass Flow Rate (kg/sec) <div></div> Molar Vapor Fraction <div></div> Duty (kW) <div></div> Power(kW) </div>			

5.5 Evaporatore

Questo componente è responsabile del funzionamento dell'intero impianto, esso è uno scambiatore di calore analogo a quelli precedenti, che riceve come fluido “caldo” il Dowtherm riscaldato dal concentratore solare e come fluido “freddo” quello in ritorno dal recuperatore da riportare a temperatura di esercizio.

Table 8: Confronto prestazioni evaporatore con tre diversi fluidi organici

	MD2M	Acetone	Butano
Temp in Dow [°C]	312.00	274.00	230.00
Temp out Dow [°C]	265.32	137.00	149.66
Potenza [kW]	136.39	283.66	186.61
<div> <div>○</div> Temperature (C) <div>⬡</div> Pressure (bar) <div>⬢</div> Mass Flow Rate (kg/sec) <div>⬢</div> Molar Vapor Fraction <div>Q</div> Duty (kW) <div>W</div> Power(kW) </div>			

I risultati ottenuti mostrano come ci siano delle sostanziali differenze nei 3 casi analizzati. L'MD2M è il fluido che necessita maggior sforzo da parte del concentratore che deve portare il dowtherm alla temperatura di 312 °C per poter riscaldare il fluido scelto, nonostante questo va sottolineato che in questo caso la potenza scambiata, e quindi il salto di temperatura della temperatura del dowtherm risulta il più basso dei tre casi.

In termini di potenza termica trasmessa l'acetone è il fluido che ne richiede di più, la cosa non sorprende visto che dal recupero ottiene soltanto 8.5 kW, in ogni caso richiede un salto di temperatura del dowtherm di circa 110 °C

Il caso intermedio è quello del Butano, non richiede al dowtherm di raggiungere temperature elevate, ma con un picco di 230 °C ed un salto termico di circa 80 °C riusciamo a riportare il fluido alla temperatura iniziale.

5.6 Impianto Completo

5.6.1 Impianto con Butano

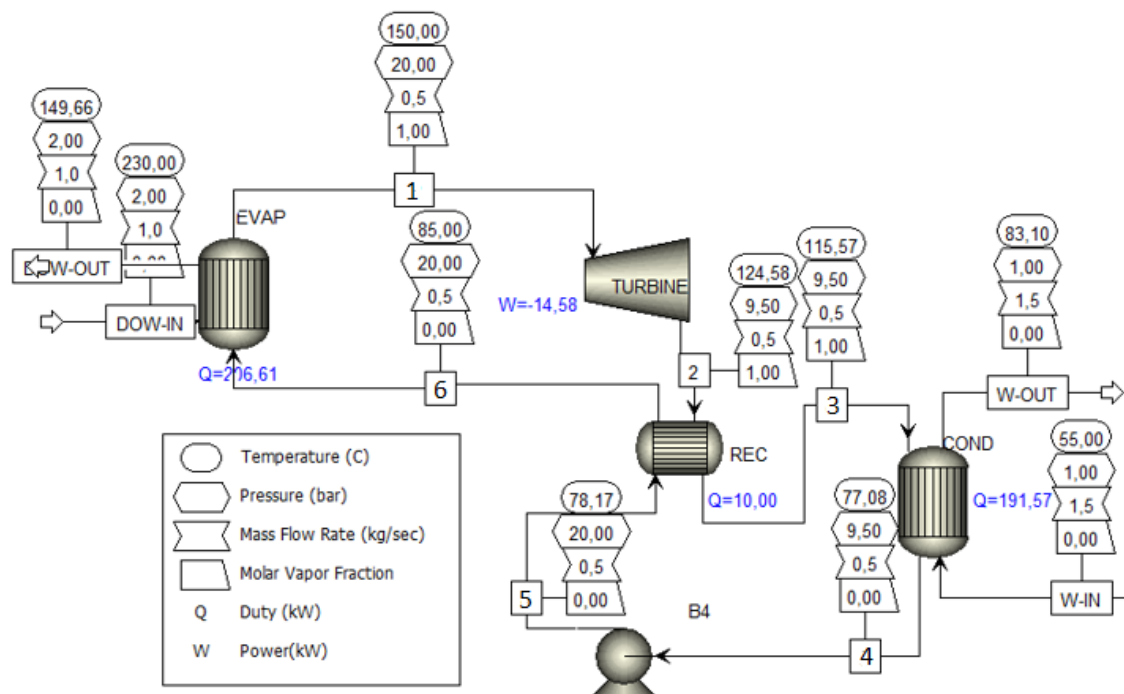


Figura 14: Impianto completo alimentato da Butano

Fra tutte e 3 le configurazioni quella che usa il fluido butano risulta la meno dipendente dalle alte temperature, con un picco di 150 °C è in grado di produrre circa 13 kW di potenza elettrica ipotizzando un rendimento dell'alternatore di 0.9.

Il ciclo, come già specificato, funziona in una condizione di massima produzione, ma in realtà nulla vieta di raggiungere temperature e pressioni più alte.

La temperatura di 150 °C è stata scelta in quanto quella critica del fluido è di 151.9 °C ed a questi valori il software AspenPlus rileverebbe degli errori. La pressione, invece, potrebbe aumentare fino a quella critica di circa 37 bar, ma bisogna considerare una componentistica più resistente e possibilmente più costosa, molto più simile ad impianti industriali che a piccole produzioni come quella del nostro caso.

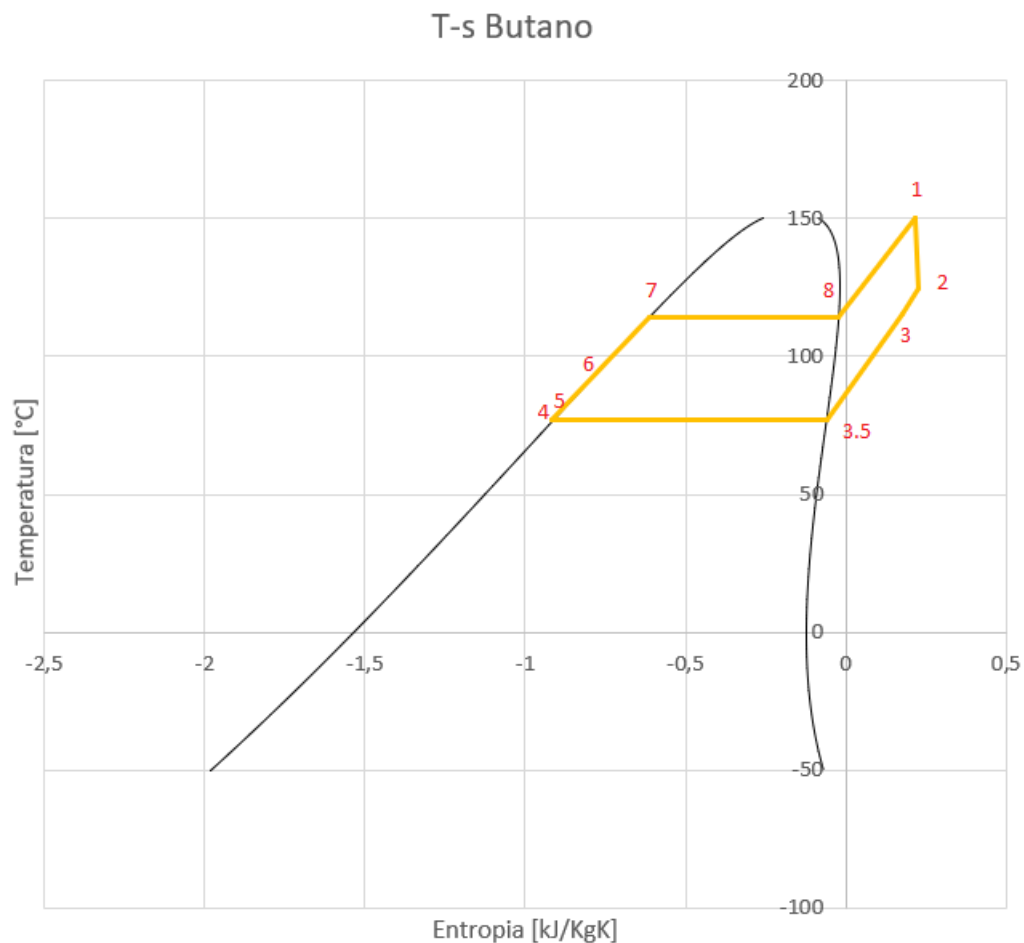


Figura 15: Diagramma T-s Ciclo Rankine con Butano

Come mostra il grafico sovrastante, il ciclo con il butano presenta un notevole surriscaldamento, negli altri cicli questo risulta molto piccolo oppure assente, il motivo sta nel fatto che a 20 bar la temperatura di evaporazione è di circa 114 °C, se fosse mandato in turbina a questa temperatura sarebbe stato impossibile fare cogenerazione e recupero.

Fase 1-2: Espansione in turbina

Fase 2-3: Recupero

Fase 3-4: Condensazione, questa fase contiene il punto 3.5 che non è osservabile dallo schema impiantistico, ma avviene dentro il condensatore, dove l'acqua assorbe sia il calore per abbassare la temperatura dal punto 3 al punto 3.5 e sia il calore latente di condensazione dal punto 3.5 al punto 4.

Fase 4-5: Compressione

Fase 5-6: Recupero

Fase 6-1: Questo passaggio contiene anche i punti 7 ed 8 che avvengono all'interno dell'evaporatore dove prima il fluido viene scaldato fino alla temperatura di evaporazione, poi verrà assorbito il calore latente ed infine il butano verrà riscaldato fino a 150 °C e ricomincerà il ciclo. Tutto questo grazie ad un salto termico di circa 80 °C del Dowtherm.

5.6.2 Impianto con MD2M

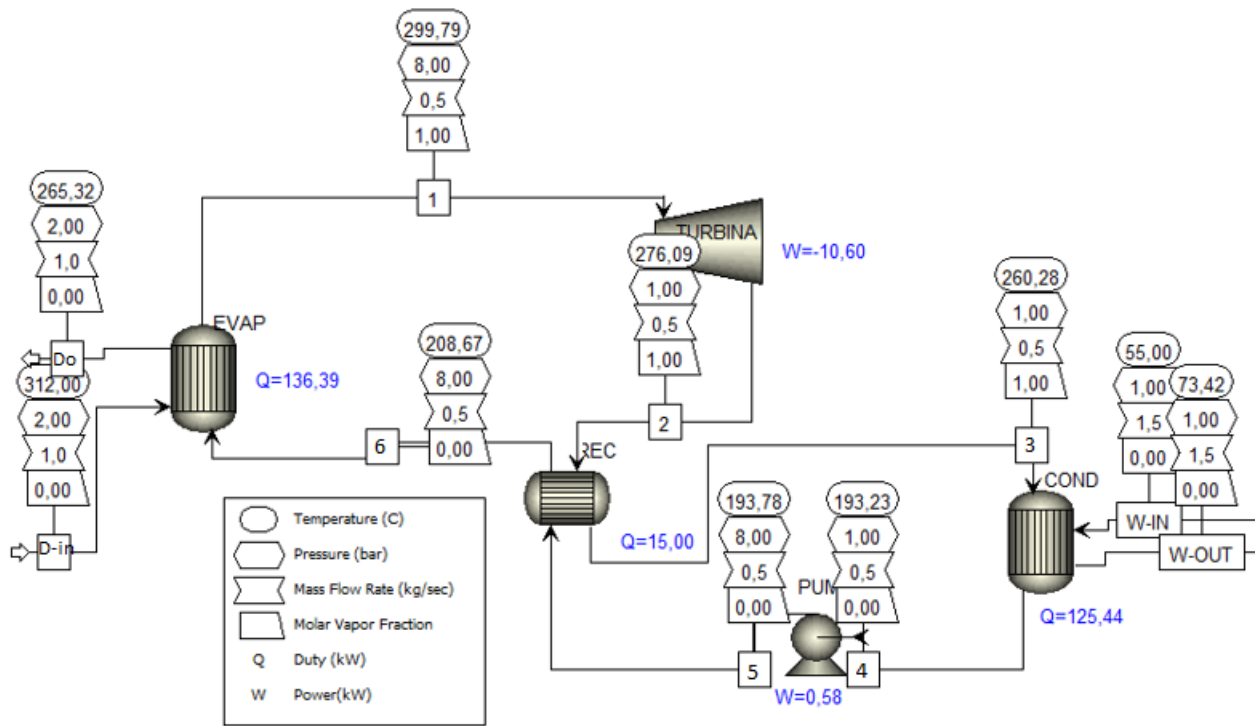


Figura 16: Impianto completo alimentato da MD2M

L'impianto con l'MD2M è quello a temperatura più alta e potenza più bassa, ma con salto termico del Dowtherm minore. In questo caso l'uso di alte temperature è dovuto al particolare diagramma T-s.

Rispetto al caso precedente, qui non vi è alcun surriscaldamento del fluido, appena evaporato verrà mandato direttamente in turbina.

Questa scelta ricade sulle effettive temperature raggiunte dal Dowtherm, se vi è disponibilità di potenza termica allora si potrebbe optare per un surriscaldamento, purtroppo dai dati climatici e sperimentali del concentratore solare non sempre è possibile raggiungere temperature maggiori di 300 °C.

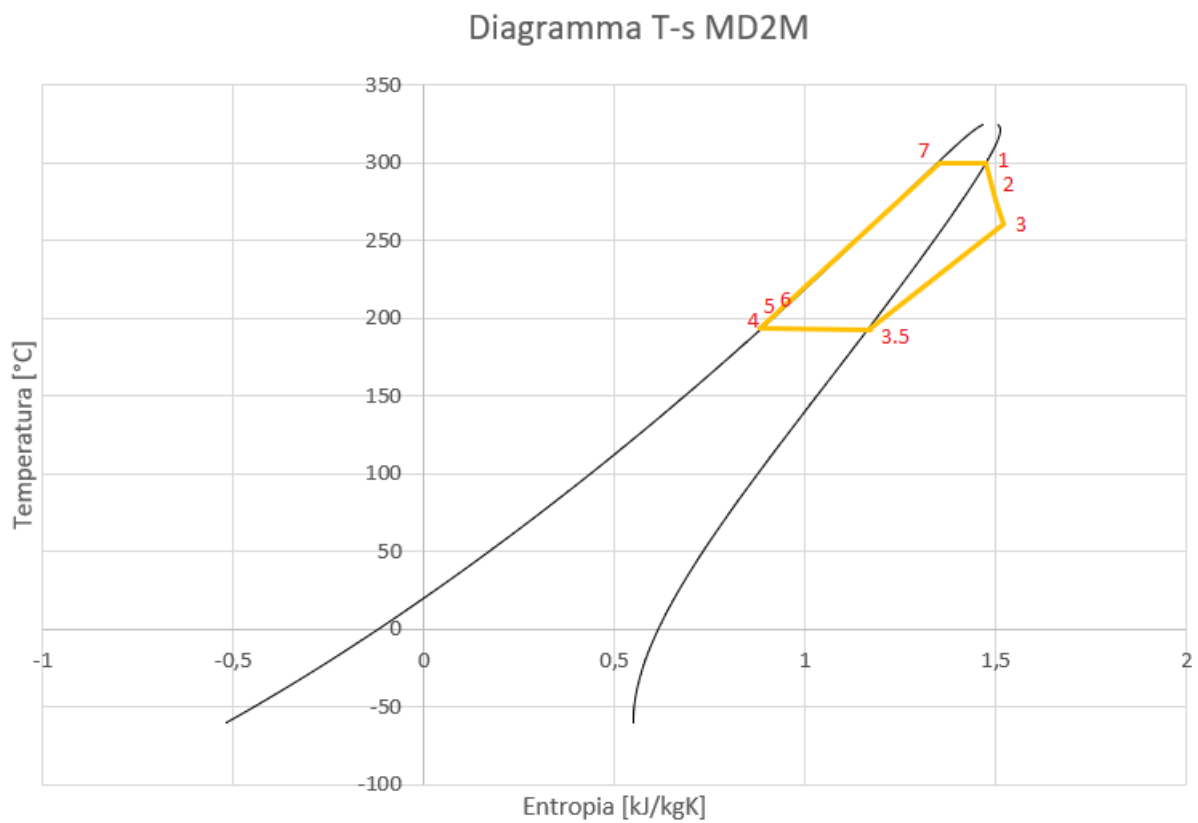


Figura 17: Diagramma T-s ciclo Rankine alimentato con MD2M

Fase 1-2: Espansione in turbina

Fase 2-3: Recupero

Fase 3-4: Condensazione, questa fase contiene il punto 3.5 che non è osservabile dallo schema impiantistico, ma avviene dentro il condensatore, dove l'acqua assorbe sia il calore per abbassare la temperatura dal punto 3 al punto 3.5 e sia il calore latente di condensazione dal punto 3.5 al punto 4.

Fase 4-5-6: le tre fasi di compressione e recupero sono praticamente quasi sovrapposte, gli aumenti di temperatura sono lievi e dunque sono approssimabili da una stessa retta

Fase 6-1: Questo passaggio contiene anche il punto 7 che si trova all'interno dell'evaporatore dove prima il fluido viene scaldato fino alla temperatura di evaporazione, poi verrà assorbito il calore latente ed infine ricomincerà il ciclo. Tutto questo grazie ad un salto termico di circa 45 °C del Dowtherm.

5.6.3 Impianto con Acetone

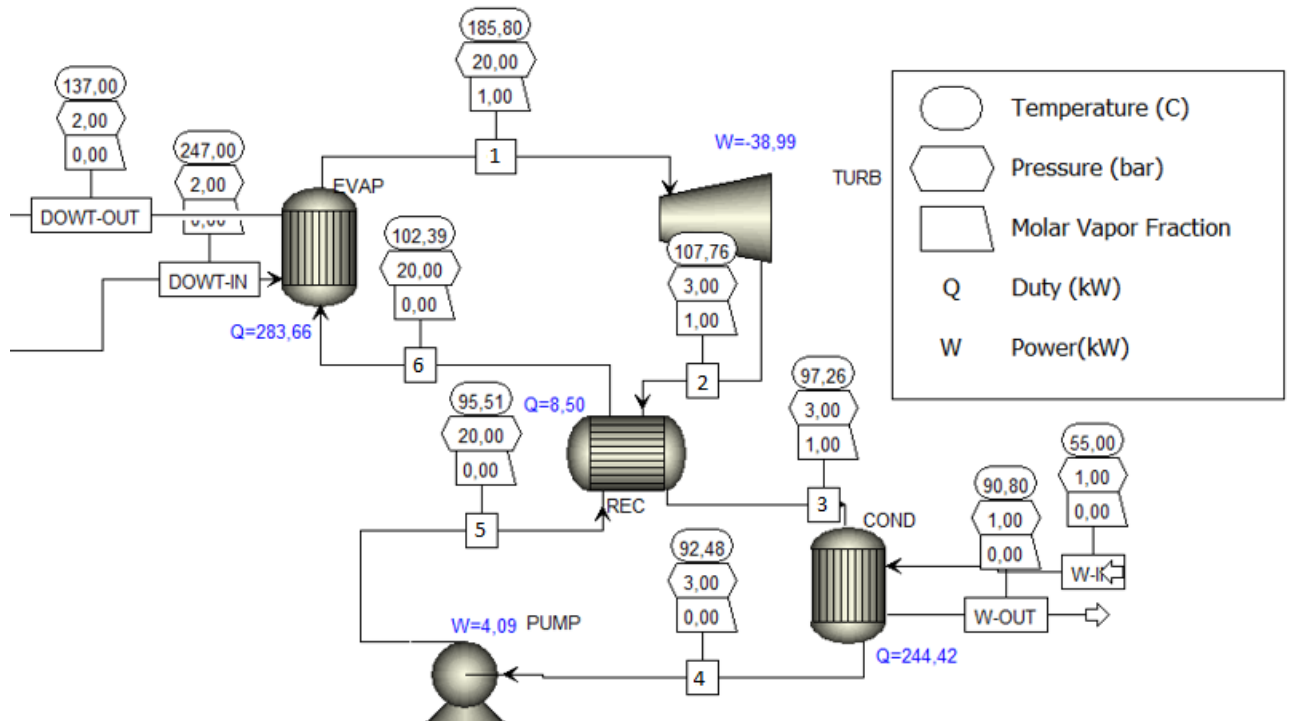


Figura 18: Impianto completo alimentato da Acetone

Chiudiamo infine con il ciclo di maggior potenza, ovvero quello che utilizza come fluido organico l'Acetone. Grazie al grosso salto termico la turbina sarà in grado di produrre circa 35 kW di energia elettrica (rendimento alternatore di 0.9), come negli altri casi anche qui sarà possibile aumentare o diminuire la temperatura di picco, ovvero di ingresso in turbina. Discorso analogo al butano per la pressione, quella critica dell'acetone è di circa 47 bar, ben lontano dal nostro massimo, tuttavia non si è voluto andare oltre i 20 per questioni di componentistica e costi.

Nel grafico sottostante si nota un piccolo surriscaldamento prima dell'ingresso in turbina, quindi una via di mezzo fra i due casi rappresentati precedentemente.

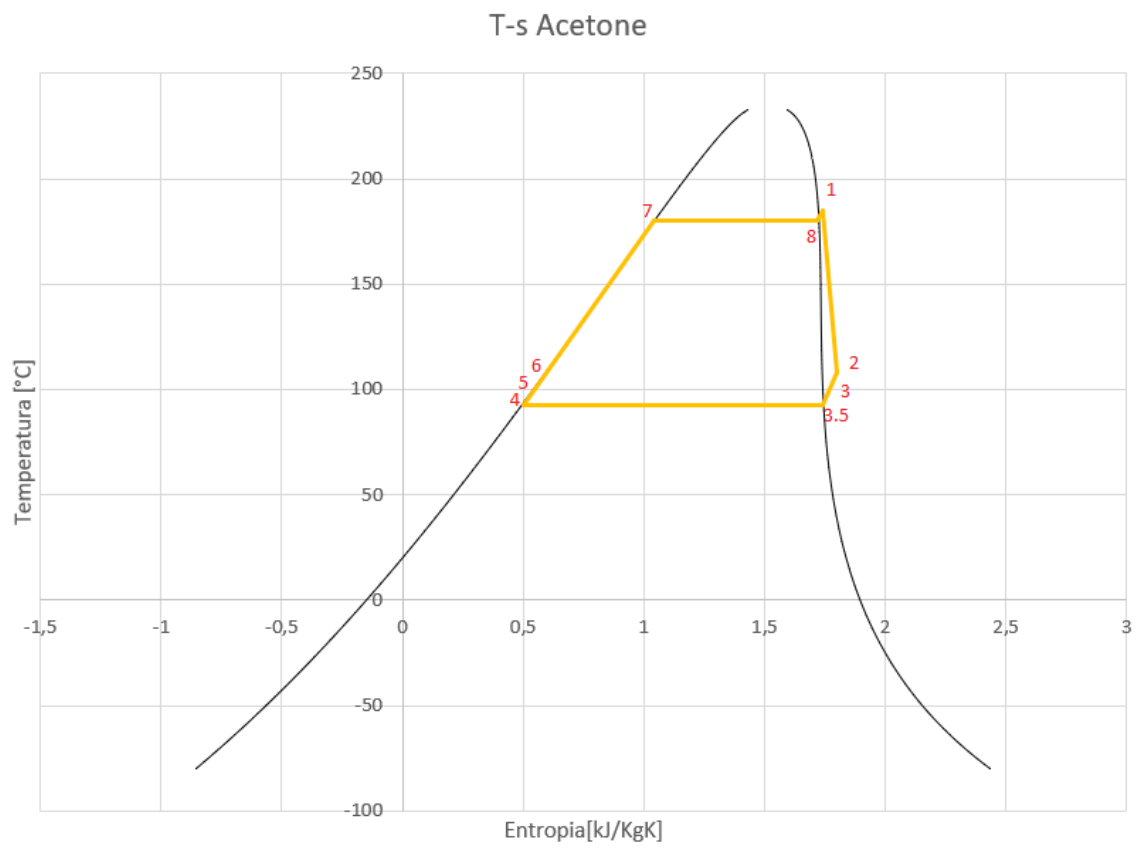


Figura 19: Diagramma T-s ciclo Rankine alimentato con Acetone

Fase 1-2: Espansione in turbina

Fase 2-3: Recupero

Fase 3-4: Condensazione, questa fase contiene il punto 3.5 che non è osservabile dallo schema impiantistico, ma avviene dentro il condensatore, dove l'acqua assorbe sia il calore per abbassare la temperatura dal punto 3 al punto 3.5 e sia il calore latente di condensazione dal punto 3.5 al punto 4.

Fase 4-5-6: Compressione e recupero

Fase 6-1: Questo passaggio contiene anche i punti 7 ed 8 che avvengono all'interno dell'evaporatore dove prima il fluido viene scaldato fino alla temperatura di evaporazione, poi verrà assorbito il calore latente ed infine l'acetone verrà riscaldato fino a 186 °C circa e ricomincerà il ciclo. Tutto questo grazie ad un salto termico di circa 110 °C del Dowtherm.

6 REGOLAZIONE

Dopo aver definito i vari schemi di impianto è opportuno cercare di simulare una condizione più realistica possibile. Fino ad ora abbiamo ipotizzato un impianto con capisaldi costanti, anche perché tutto dipende dalla temperatura raggiunta dal Dowtherm e dunque dalle condizioni climatiche. Per fare regolazione si devono manipolare alcuni dei parametri fondamentali del ciclo: la temperatura del Dowtherm, la portata del fluido organico ed infine la pressione massima di ingresso in turbina.

La prima cosa da fare è stabilire dove questa regolazione è effettivamente fattibile e sensata, nel caso del MD2M non sarebbe molto conveniente, in quanto usare temperature più alte vorrebbe dire avere il Dowtherm a temperature non sempre accessibili, pressioni inferiori genererebbero una potenza in turbina minore di 10kW ed infine aumentare la portata aumenterebbe il salto termico del Dowtherm.

6.1 Regolazione con Acetone

Il miglior fluido che si presta meglio ad un impianto con regolazione è l'acetone, esso presenta un grande salto di pressione in turbina che può variare senza problemi e temperature del dowtherm che possono essere abbassate ed alzate in base alla disponibilità.

La prima cosa da analizzare è come varia e come si comporta l'impianto modellato al variare della temperatura del dowtherm, in quanto è il parametro principale per far funzionare tutto il sistema. Per fare una simulazione completa è stata implementata sul software AspenPlus un'analisi di sensibilità dove in output si sono ottenuti i valori della potenza in turbina.

Nel grafico sottostante è stato mostrato come lavora la turbina al variare della temperatura di ingresso del Dowtherm in tre diversi livelli di pressione, rispettivamente in bassa pressione (4 bar), media pressione (15 bar) ed alta pressione (20 bar).

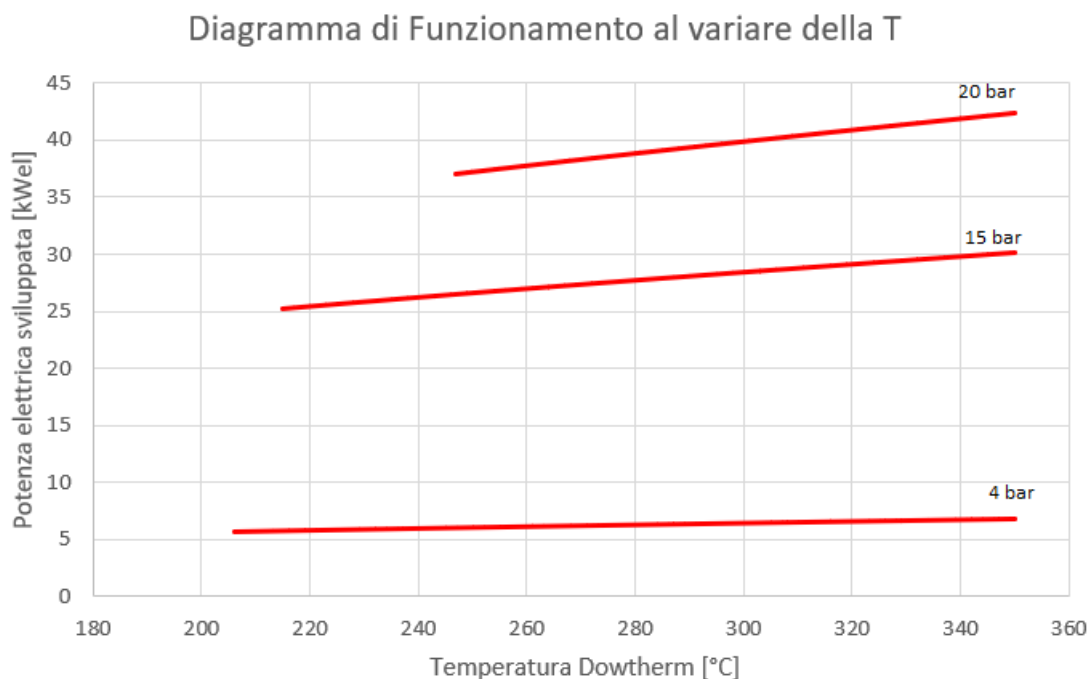


Figura 20: Diagramma di regolazione dell'impianto con acetone nei tre livelli di pressione

Nel primo caso la potenza elettrica generata dalla coppia turbina-alternatore è severamente limitata a pochi kW anche nel caso di alte temperature, con una pressione in ingresso turbina di 15 bar la potenza aumenta sensibilmente, partendo da una generazione minima di 25 kWel fino ad un massimo di 30 kWel aumentando la temperatura fino a 350 °C del Dowtherm.

Il caso più favorevole si otterrebbe a pressione di 20 bar, ma il minimo di temperatura del dowtherm richiesta dall'impianto è di 247 °C. Il livello massimo di produzione si avrebbe a 350 °C con una potenza prodotta di circa 42.5 kWel, raggiungibili soltanto dall'effettiva disponibilità solare che non sempre si otterrà.

Il grafico sottostante (*Figura 21*) mostra anche che l'impianto può lavorare in qualsiasi punto si voglia, purché si trovi nell'area (in blu) sottesa dalle rette.

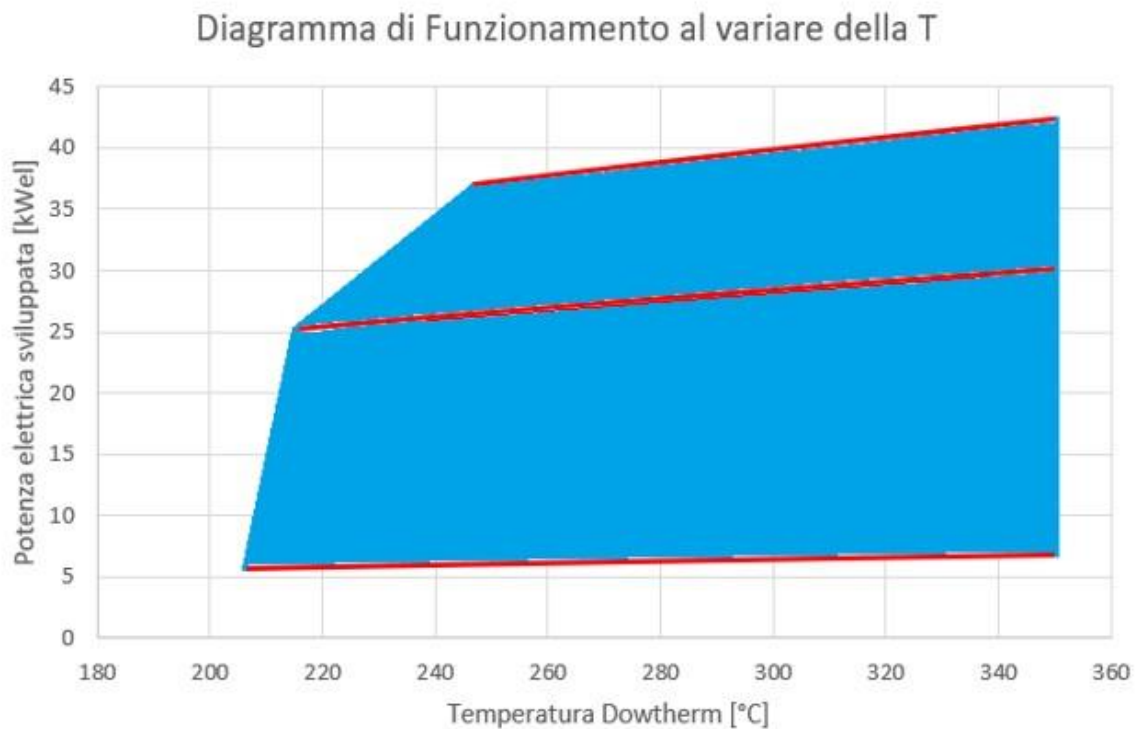


Figura 21: Diagramma di produzione dell'impianto al variare della temperature

Il secondo parametro da considerare per la regolazione è la portata.

All'inizio dello studio è stato imposto un valore identico per tutti e tre i fluidi organici pari a 0.5 kg/s, ma nulla vieta che in fase di regolazione si possa aumentare la portata, in caso di disponibilità termica, ed abbassare la portata in condizioni meteorologiche non ottimali.

Nel software è stata fatta un'altra analisi di sensibilità, dove il parametro manipolato è quello della portata (da 0.2 kg/s a 1 kg/s) ed i parametri da calcolare sono principalmente due: la potenza elettrica generata dalla coppia turbina-alternatore ed il calore scambiato all'interno dell'evaporatore.

Sostanzialmente portata, potenza generata e calore sono dei fattori direttamente proporzionali, dai calcoli si evince facilmente che maggior portata vorrà dire maggior potenza e calore e viceversa.

Il calcolo ha dunque coinvolto i due casi estremi di pressione, ovvero a pressione di 4 bar e di 20 bar. Il primo caso mostra l'andamento della potenza a 20 bar al variare della portata e del calore generato, il secondo caso mostra gli stessi grafici ma ad una pressione di 4 bar.

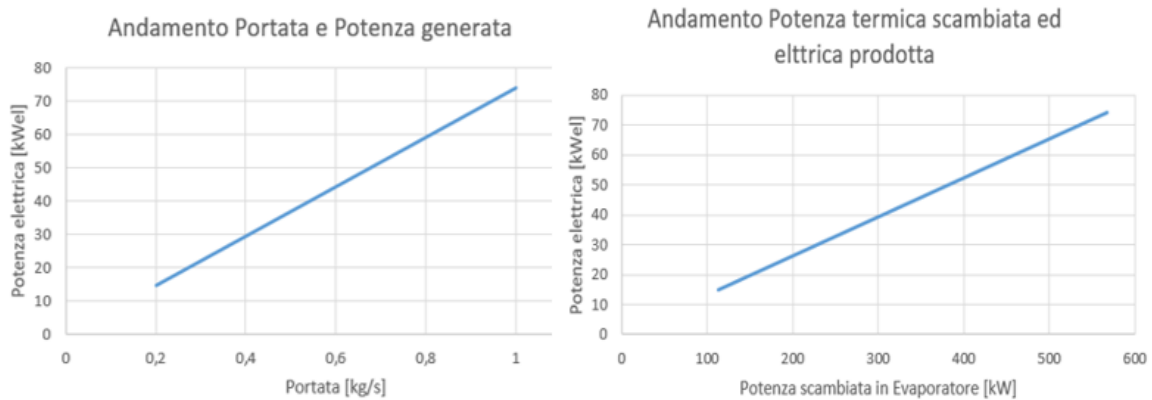


Figura 22: Confronto potenze generate al variare di portata e potenza scambiata all'evaporatore a 20 bar

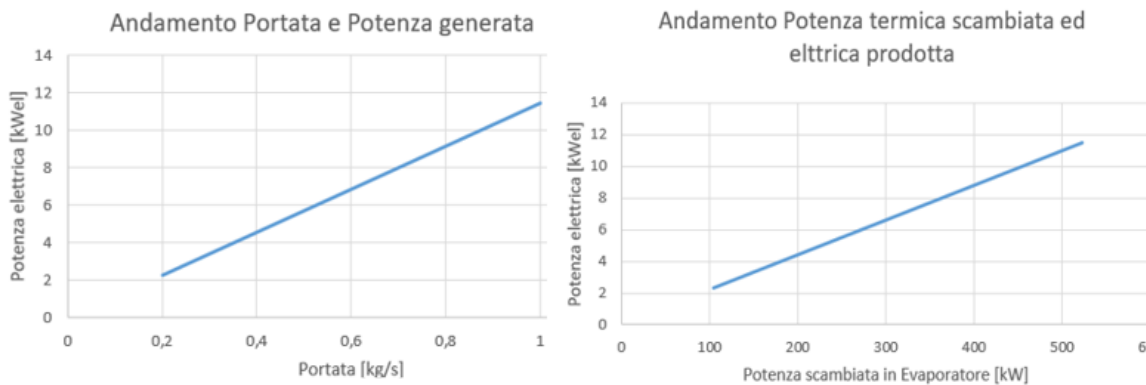


Figura 23: Confronto potenze generate al variare di portata e potenza scambiata all'evaporatore a 4 bar

Nelle migliori condizioni possibili quindi potremmo trovarci ad operare non solo con 20 bar di pressione, ma addirittura potremmo aumentare la portata fino ad ottenere una potenza di quasi 80 kWel. Chiaramente tale condizione è impossibile da ottenere con il concentratore su cui si sono raccolti i dati sperimentali, ma sarebbe possibile nel caso di una località geografica più favorevole e di più concentratori in serie.

6.2 Regolazione impianto con Butano

Utilizzando il butano come fluido organico la situazione si complica, alzando la temperatura del dowtherm non ci sono grossi problemi, tuttavia se volessimo abbassarla risulterebbe problematica la questione cogenerazione. Usando il butano a temperatura e pressione inferiore non avremmo più l'opportunità di riscaldare l'acqua in uscita dai terminali idronici a causa di un "cross-temperature" all'interno del condensatore, quindi si dovrebbe usare acqua in ingresso non più a temperature comprese fra 50 ed i 60 °C, ma si dovrebbe usare acqua a temperatura ambiente di 25 °C circa.

Nella casistica di dover sfruttare la cogenerazione, come nel caso precedente, è stata fatta un'analisi di sensibilità incrementando la temperatura in ingresso del Dowtherm a pressioni differenti: 20 bar (alta), 17 bar (media) e 13 bar (bassa).

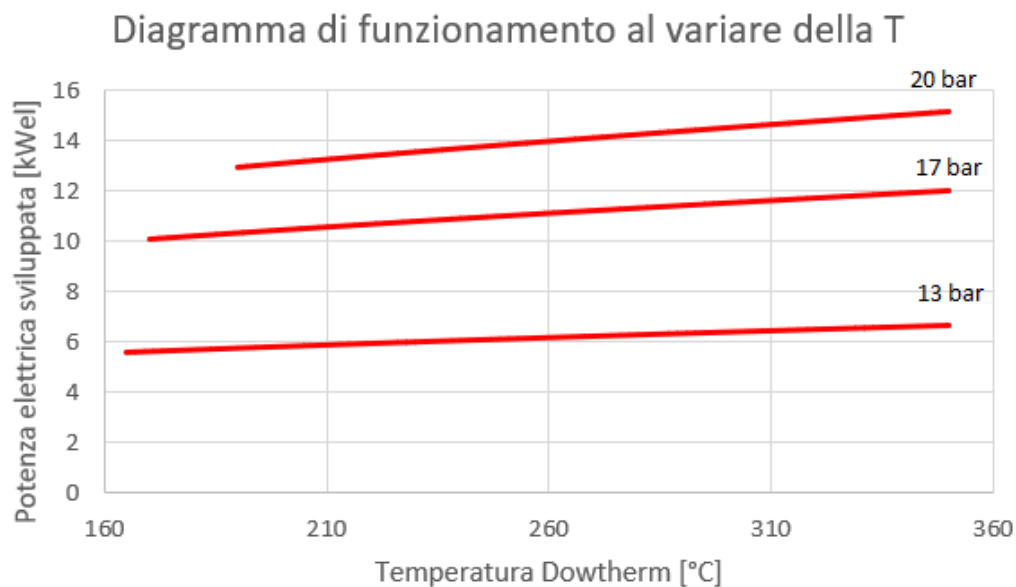


Figura 24: Diagramma regolazione impianto a butano cogenerativo nei tre livelli di pressione

Come si nota dal grafico, rispetto al caso con l'acetone, la potenza elettrica prodotta in turbina è nettamente inferiore, questo perché il salto di pressione è differente, il butano entra in turbina a 20

bar e ne esce a 9.5. Senza contare che il Dowtherm usato in questa casistica ha un ΔT fra ingresso ed uscita di 80 °C, mentre per l'acetone si arrivava a 110 °C.

Se volessimo decidere di realizzare un impianto differente, facendo assorbire il calore latente di condensazione all'acqua a 25 °C, allora le potenze sviluppate sono ovviamente maggiori, poiché si usa un fluido che in turbina si espande da 20 bar fino a 5 bar.

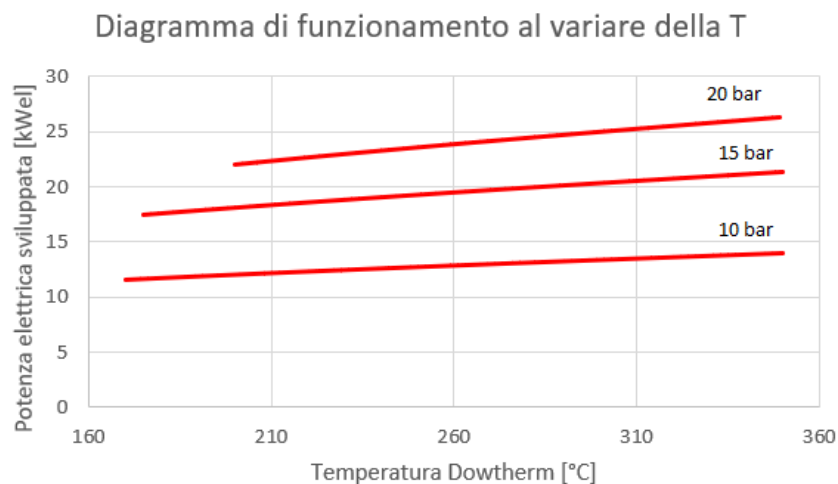


Figura 25: Diagramma regolazione impianto a butano non cogenerativo nei tre livelli di pressione

Proprio come per il caso dell'acetone, facciamo un'altra analisi di sensibilità facendo variare la portata da 0.2 kg/s fino ad 1 kg/s.

I risultati ottenuti sono chiaramente simili ai precedenti, separando il caso in cui si voglia fare cogenerazione da quello in cui si usa acqua a temperatura ambiente.

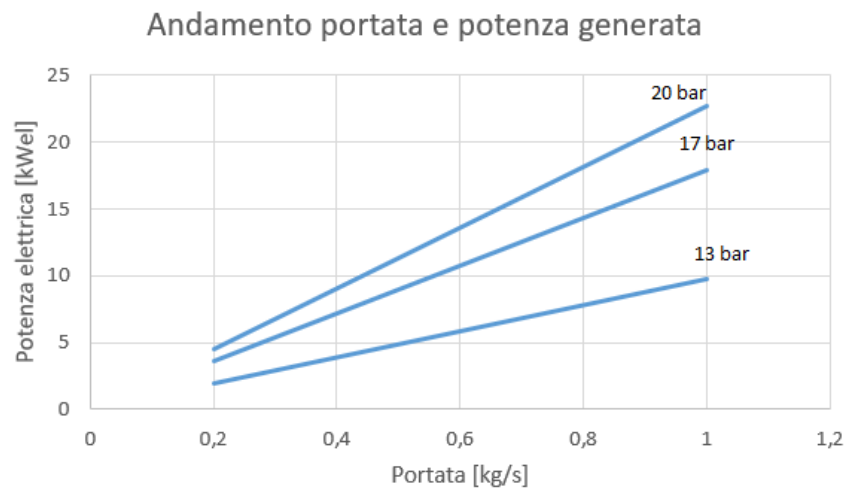


Figura 26: Diagramma regolazione portata con cogenerazione nei tre livelli di pressione

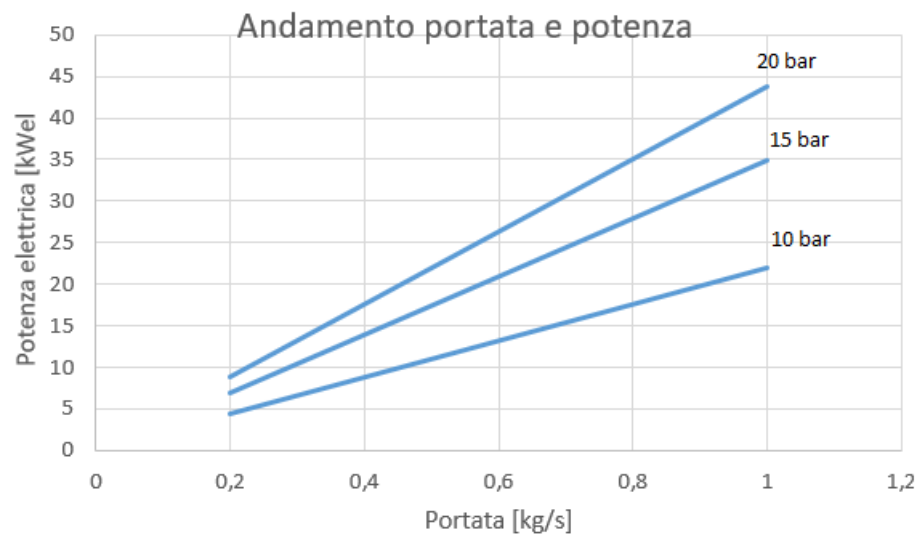


Figura 27: Diagramma regolazione portata senza cogenerazione nei tre livelli di pressione

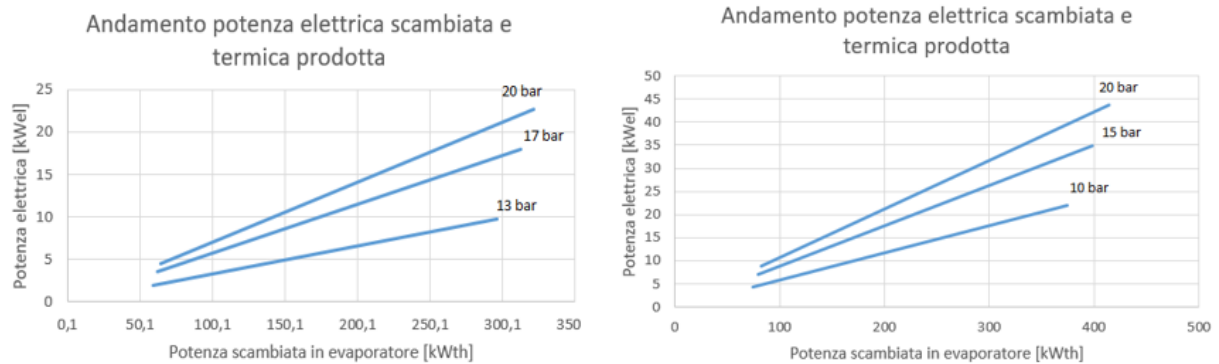


Figura 28: confronto fra la potenza scambiata in evaporatore e potenza elettrica prodotta nel caso cogenerativo e non cogenerativo

7 FUNZIONAMENTO REALE

Dopo i calcoli relativi all'impianto ed alla regolazione si procede all'effettivo funzionamento del ciclo alimentato dal concentratore solare. Il luogo di riferimento è l'Energy Center della città di Torino, tuttavia non è stato possibile ottenere il fluido termovettore Dowtherm, la validità dell'impianto e l'effettivo raggiungimento delle temperature di funzionamento sono da calcolare.

La struttura del concentratore presenta soltanto la parte del cilindro e su questa si sono ottenuti tutti i dati sperimentali, ma non avendo fluidi particolari i risultati sono stati ottenuti semplicemente con il cilindro pieno d'aria. Conoscendo la temperatura in superficie e quella interna grazie alle termocoppie è stato calcolato quanto il fluido all'interno si fosse scaldato se al posto dell'aria ci fosse stato il Dowtherm.

Il calcolo è stato eseguito mediante calcoli di termodinamica con le equazioni di conduzione del calore ed il modello del cilindro è stato creato tramite il software COMSOL Multiphysics usando come fisica del sistema quella del trasferimento di calore in solidi e fluidi in un modello di studio di tipo stazionario.

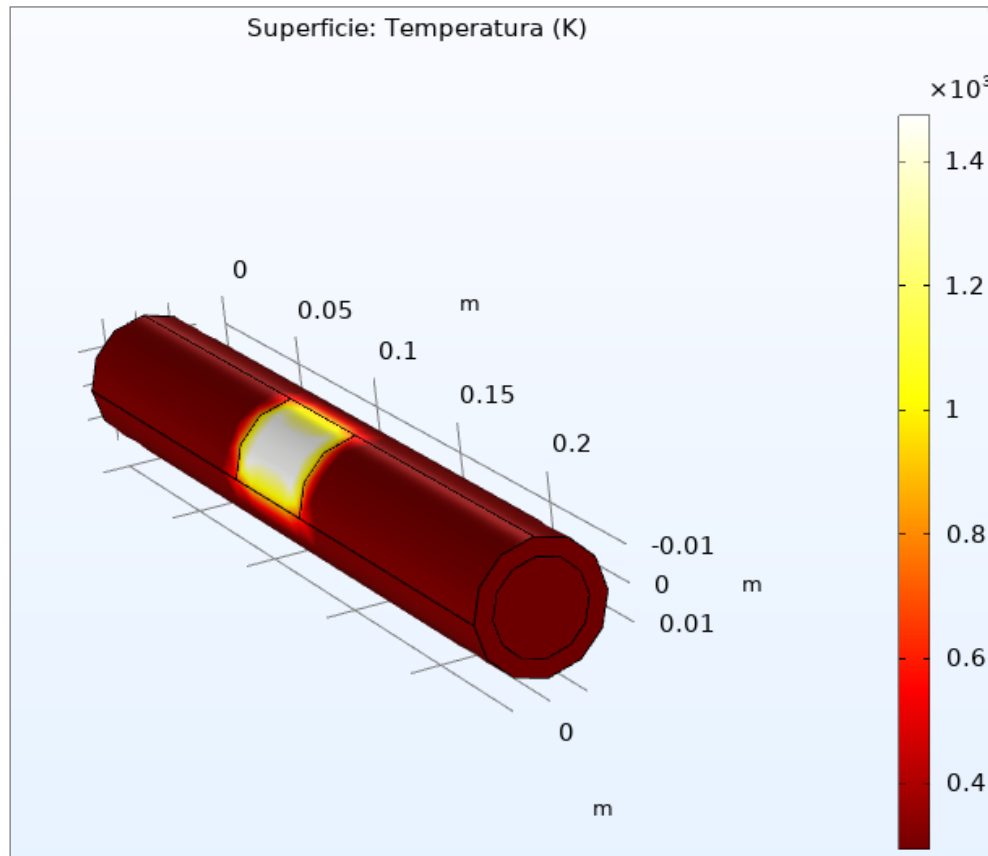


Figura 29: Rappresentazione 3D della distribuzione termica del cilindro di concentrazione

Il modello soffre di alcune lacune per quanto riguarda il fluido Dowtherm, che non risulta presente nel software, dunque solo poche proprietà del fluido sono state inserite nella simulazione. Tuttavia, avendo a disposizione le misure di temperatura superficiale interna ed esterna, possiamo confrontare i coefficienti di trasmissione termica nel caso del cilindro con aria e con Dowtherm e constatare, in via approssimativa, che il fluido Dowtherm conduce circa 2.3 volte di più rispetto

all'aria. Oltretutto non siamo in grado di stimare esattamente quanto gli eventi esterni possano influire sul rendimento effettivo, il calcolo è stato eseguito utilizzando uno studio di tipo stazionario, ed altri contributi come il vento non possono essere facilmente quantificati.

Dunque procedendo in maniera più conservativa è stato eseguito un calcolo stimato in cui le temperature del Dowtherm saranno 2 volte più alte di quelle raggiunte sperimentalmente dall'aria.

Grazie al PLC presente a bordo del concentratore la raccolta dati è stata fatta automaticamente tramite misurazioni ad ogni minuto, sapendo dunque quanto l'aria si riscaldi durante svariati giorni possiamo conoscere quando il Dowtherm raggiungerà le temperature adatte ai cicli termodinamici.

A seguire due grafici relativi alla temperatura media del Dowtherm ottenuta in due differenti periodi: dal 20 al 22 giugno e dal 10 al 14 luglio. Le linee orizzontali sono le temperature per il funzionamento dei cicli considerati: 230 °C per il Butano, 247 °C per l'Acetone e 310 °C per l'MD2M.

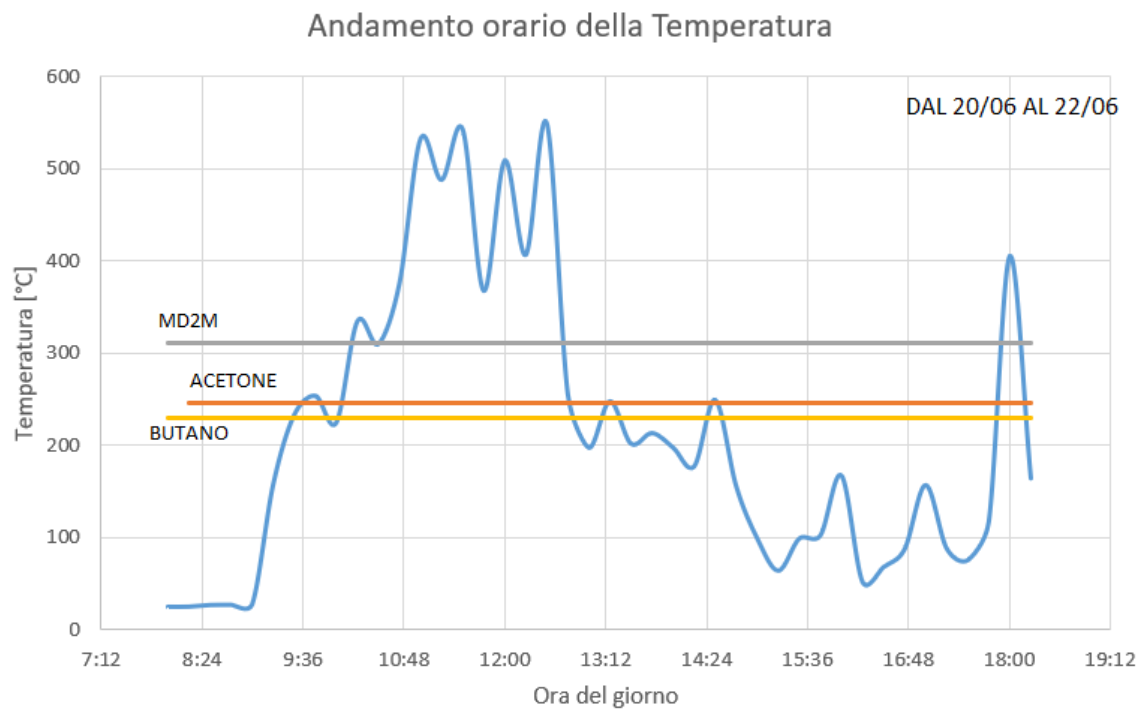


Figura 30: Media temperature orarie raggiunte dal 20/06 al 22/06

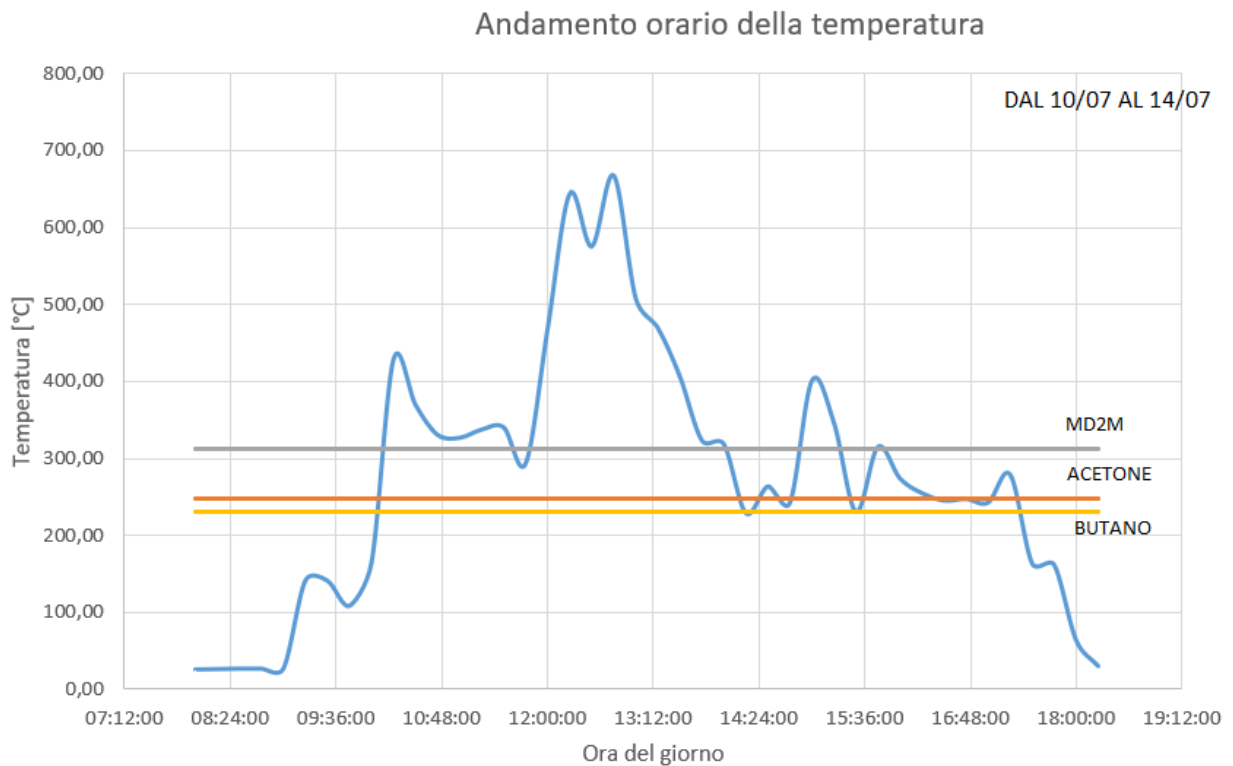


Figura 31: Media temperature orarie raggiunte dal 10/07 al 14/07

I risultati evidenziano come le ore con temperature adatte al funzionamento dei tre cicli siano essenzialmente poche e comprese per la maggior parte dalle ore 10 alle ore 13 per giugno ed alle 14 per luglio. Effettivamente l'impianto descritto tratta di un ciclo Rankine di piccola scala, ed ottenere le potenze descritte (36kW nel caso dell'Acetone) solo per poche ore al giorno è già soddisfacente.

Per rendere il grafico dell'utilizzabilità più efficiente è opportuno applicare la regolazione, così da modificare le rette del butano e dell'acetone per renderle più adattabili ai cambi repentini di temperatura potendo produrre maggior potenza.

7.1 Funzionamento reale del ciclo con Acetone

Nel caso si volesse usare il ciclo Rankine alimentato dall'acetone, le potenze sarebbero di sicuro maggiori, con lo svantaggio che si avrebbe un maggior salto di temperatura del Dowtherm e quindi maggior tempo prima che tutto il fluido arrivi a temperatura di inizio ciclo.

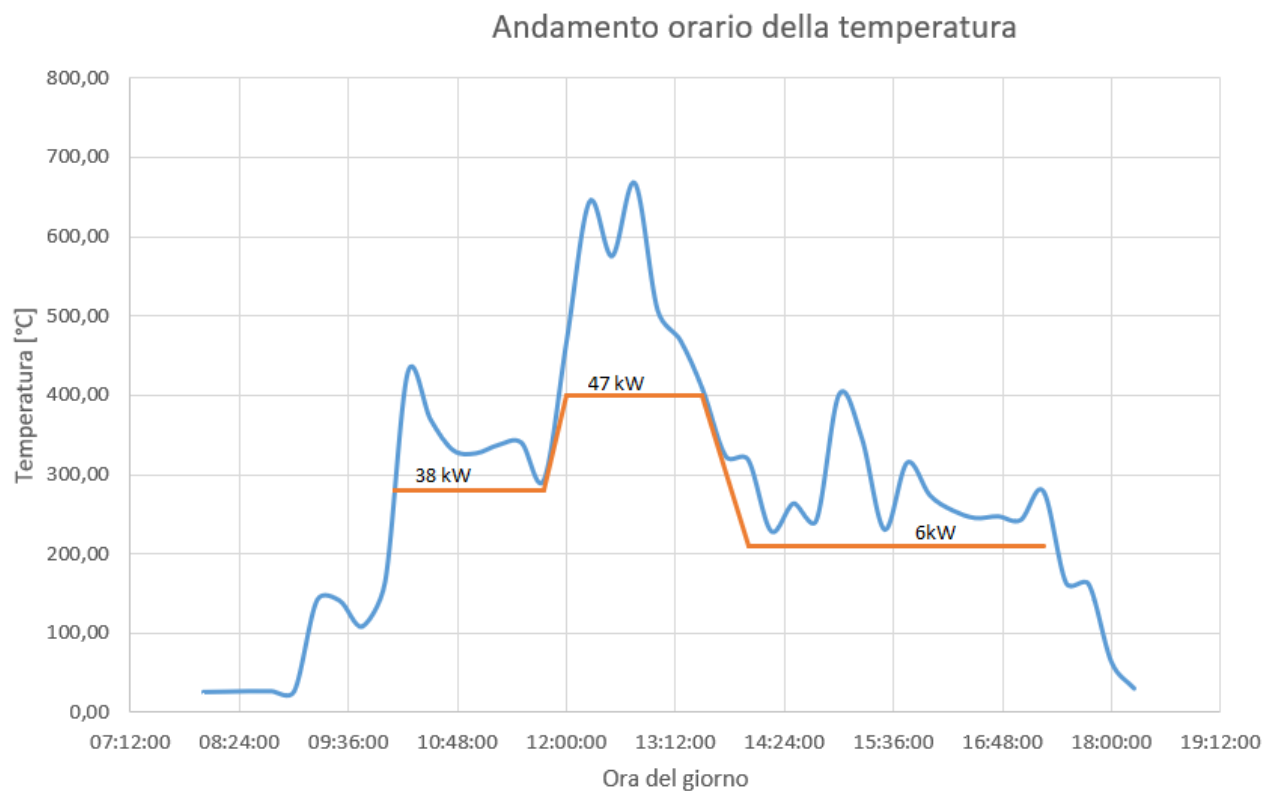


Figura 32: Funzionamento giornaliero con regolazione del ciclo ad acetone

L'uso medio dell'impianto nelle giornate estive, nel nostro caso luglio, sarebbe diviso in tre blocchi, senza regolazione la potenza era un'unica retta con la produzione di 36kW costante, variando la pressione in base all'esigenza il ciclo potrà produrre per maggior tempo.

Dalle 10 circa alle 11:45 con la temperatura di 280°C ed una pressione di 20 bar si può produrre

una potenza di circa 38kW, durante il picco si può passare ad una potenza prodotta di 47 kW per poi scendere dopo le 13:30 a 6 kW fino al resto della giornata con pressioni basse di circa 4 bar.

Considerando una disponibilità di circa 7 ore (dalle 10 alle 17) nel caso senza regolazione produrremmo mediamente circa 20.57 kWh, con la regolazione nelle stesse ore produrremmo 23.5 kWh.

La casistica migliore ottenuta è rappresentata nell'immagine sovrastante, tuttavia negli altri mesi, con maggiori fluttuazioni delle condizioni climatiche, l'operatività dell'impianto si ridurrebbe di molto. Questo è possibile notarlo già nei 3 giorni di riferimento nel mese di giugno, in quel caso anche con un eventuale regolazione le ore di operatività sarebbero comunque non più di 3, discorso analogo per gli utilizzi dell'impianto nei mesi invernali o autunnali, con minore disponibilità di irradianza la produzione dovrà fermarsi o essere molto limitata.

7.2 Funzionamento reale del ciclo con Butano

Il ciclo del butano fornisce sicuramente meno potenza in turbina, ma come mostrano i grafici della regolazione, il vantaggio di usare il butano sta nel fatto che non richiede temperature elevate come nel caso dell'acetone ed inoltre la differenza di temperatura del Dowtherm fra ingresso ed uscita è minore, ovvero circa 80°C rispetto ai 110°C dell'acetone.

Quindi se ragionassimo solo in termini di prestazioni massime è palese che l'impianto più adatto sarebbe quello alimentato ad acetone, nel grafico sottostante si mostra l'andamento orario della potenza di 3 cicli: Acetone, Butano con Cogenerazione e Butano senza Cogenerazione nelle giornate che vanno dal 10 al 14 luglio.

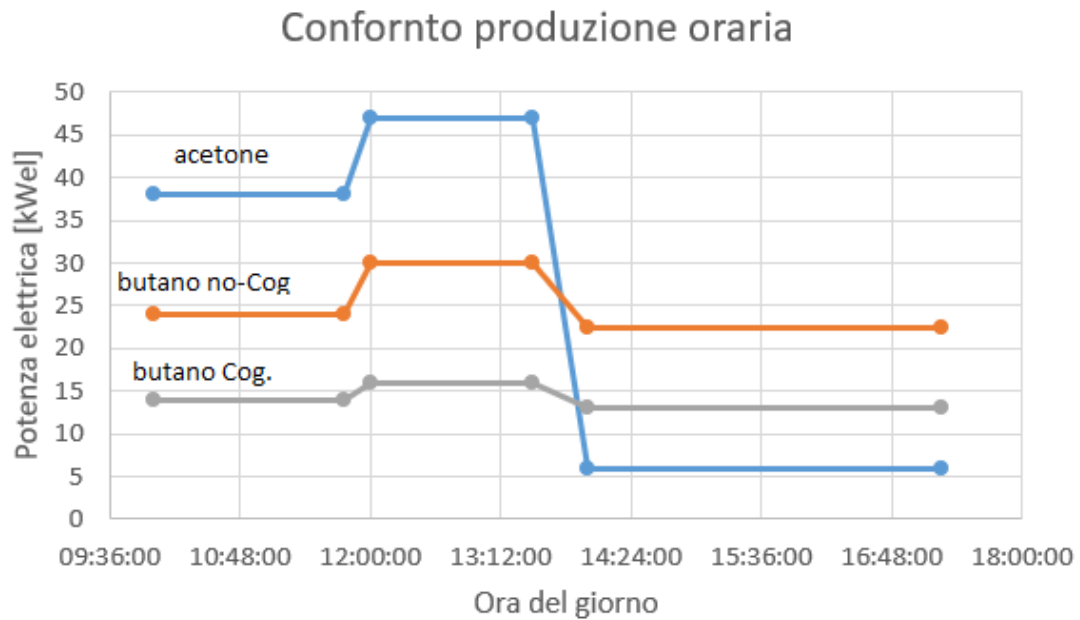


Figura 33: Confronto produzioni orarie di luglio dei cicli analizzati

Se volessimo un ciclo che si adatta in maniera migliore ai cambi di temperatura ed ai cambi stagionali allora sicuramente quello alimentato a butano sarebbe il migliore, nel grafico sottostante viene mostrato l'andamento orario della potenza prodotta nel periodo che va dal 20 al 22 giugno, in cui le condizioni meteorologiche poco stabili hanno ridotto l'uso del ciclo con acetone a poche ore.

Al contrario usando il ciclo con butano si otterrebbe una produzione per più ore, infine saranno le esigenze cogenerative a stabilire se riscaldare acqua a 55 °C o a 25 °C e quindi se dare la precedenza alla produzione elettrica o termica.

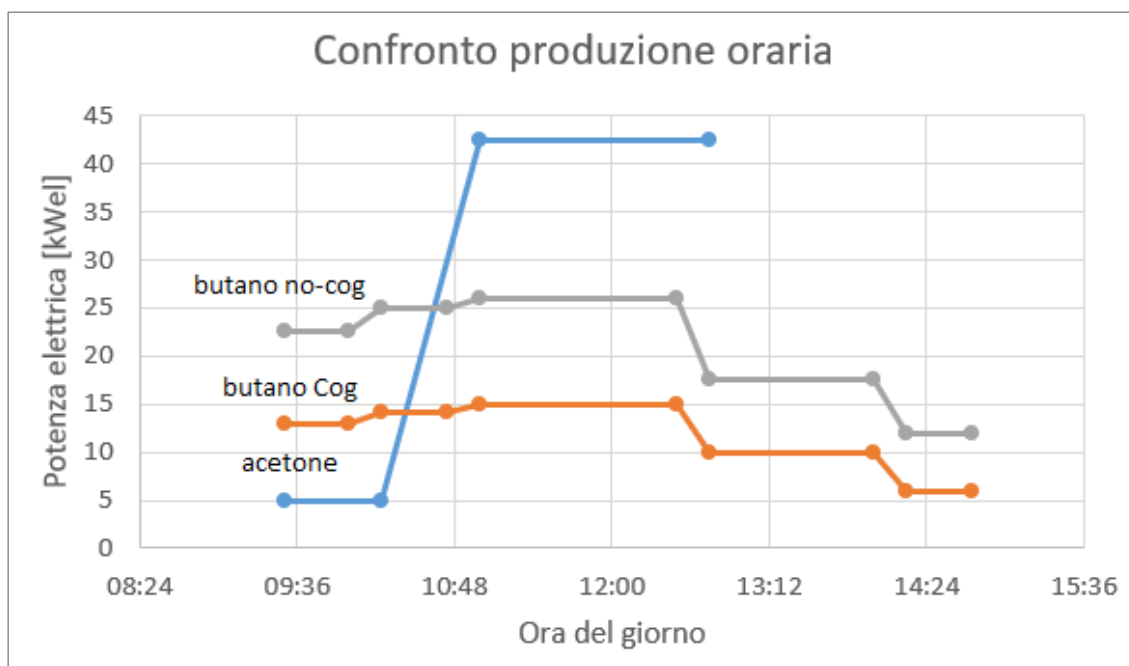


Figura 34: Confronto produzioni orarie di giugno dei cicli analizzati

8 USO DELLA CO2

Nelle simulazioni sono stati usati soltanto fluidi organici, tuttavia ne esistono anche altri, con proprietà termodinamiche simili, che potrebbero essere utilizzate per alimentare un ciclo Rankine.

Durante la fase sperimentale è stato deciso di provare la CO₂, un fluido non organico con temperatura di ebollizione di circa 31°C. La particolarità del Diossido di carbonio è l'anormale diagramma termodinamico, troppo differente rispetto a quello dei fluidi organici, con livelli di pressione troppo elevati per la costruzione di impianti di piccola taglia.

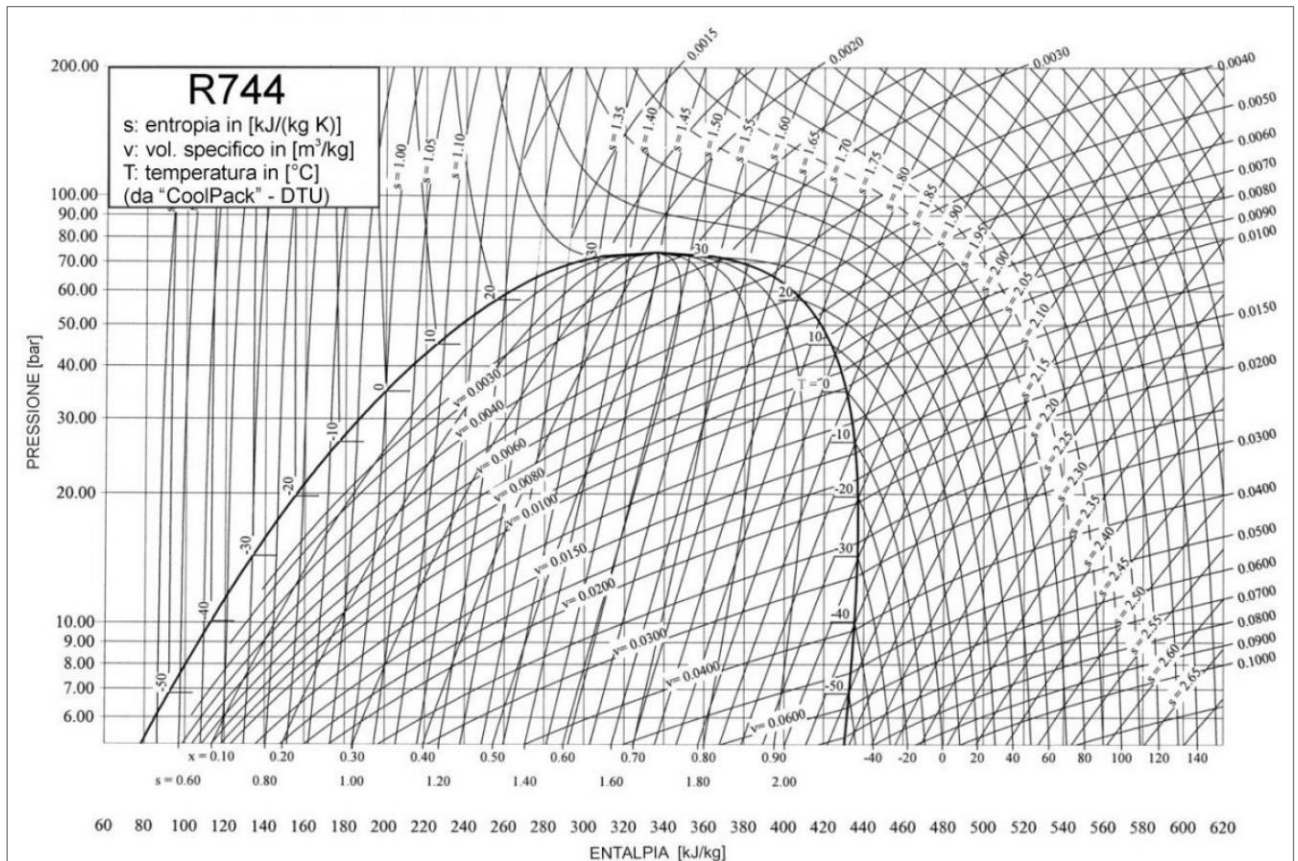


Figura 35: Diagramma termodinamico fluido R744 (CO₂)

La *figura 35* mostra l'estremo livello di pressione richiesto per permettere ad un ciclo di funzionare, questo aumenterebbe enormemente i costi dei componenti e delle tubazioni.

Se per ipotesi costruissimo un ciclo Rankine, senza badare troppo alla pressione, si presenterebbero grandi problemi relativi alla condensazione.

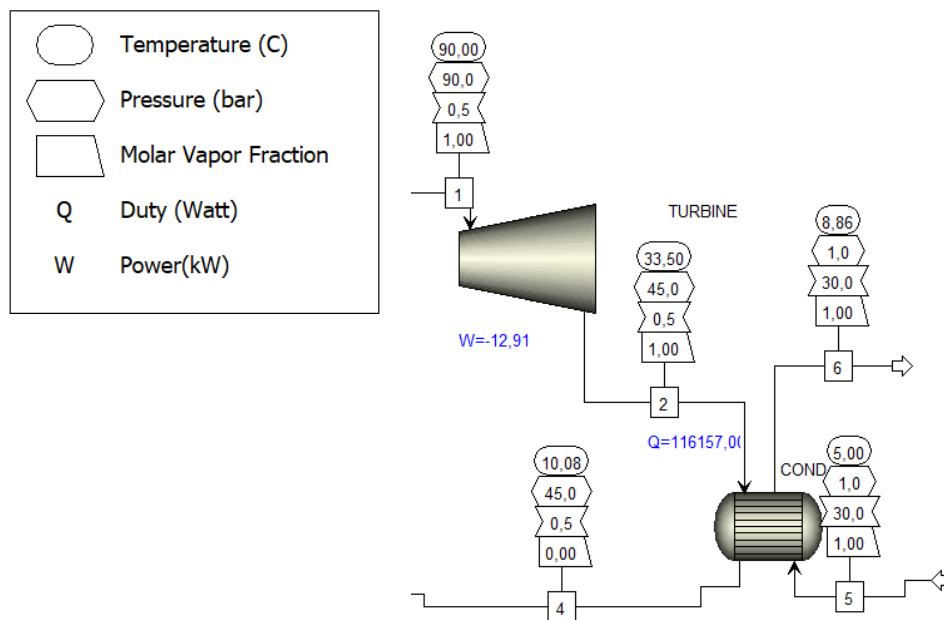


Figura 36: Rappresentazione impianto alimentato a CO₂

Il ciclo dovrebbe partire da una condizione di 90 bar all'ingresso della turbina, la produzione meccanica sarebbe di 12.91 kW alla quale togliere la potenza necessaria a ricomprimere il fluido, ottenendo così un utile di circa 5 kWel. Tralasciando il fatto che produrre potenze simili con tali livelli di pressione sarebbe poco efficiente, dopo la turbina si otterrebbe una CO₂ a 45 bar e poco più di 33°C da far condensare.

L'unico modo per far cedere calore al Diossido di Carbonio è quello di inserire nello scambiatore un fluido più freddo e la miglior soluzione sarebbe quella di usare acqua refrigerata oppure dei modelli di air-cooling.

In ogni caso la portata di aria sarebbe di circa 30 kg/s, possibile in teoria solo nei mesi invernali, ma comunque impossibile da ottenere realmente in quanto tali condizioni non sarebbero economicamente e tecnicamente convenienti.

9 CONSIDERAZIONI IMPIANTISTICHE FINALI

9.1 I limiti del concentratore solare dell'Energy Center

I precedenti risultati sono stati ottenuti sulla base di misure eseguite solo in determinati periodi dell'anno, per una visione completa è necessario riferirsi ai dati dell'intero anno. Non avendo sufficienti misurazioni è stato deciso di utilizzare i dati relativi all'anno 2020.

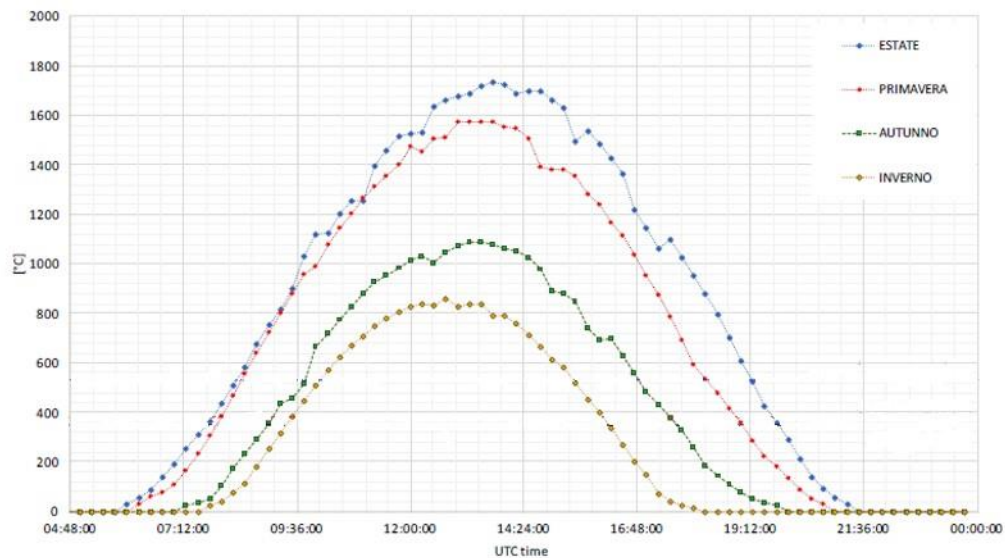


Figura 37: Temperatura media giornaliera raggiunta sul fuoco della parabola

La *figura 37* mostra un andamento più uniforme rispetto a quello mostrato in *figura 30* e *figura 31*, senza le zone di bassa irradianza nel pomeriggio è possibile stimare in media quanto produrrebbe il ciclo per tutta la stagione considerata. Considerando il concentratore presente all'Energy Center abbiamo costruito dei modelli che, in estate, possono produrre mediamente 20 kW giornalieri durante le ore di funzionamento.

La situazione reale è ben diversa, il concentratore è troppo piccolo per mantenere tale potenza, il tempo impiegato per riscaldare nuovamente il fluido Dowtherm rallenterebbe la produzione, rendendo necessario l'uso di più concentratori in serie.

Inoltre il materiale utilizzato per assorbire la radiazione è ceramico, quindi resistente alle alte temperature, ma suscettibile alle repentine oscillazioni termiche. Con un acciaio più resistente sarebbe possibile sfruttare al meglio la temperatura ottenuta sul fuoco migliorando lo scambio termico e permettendoci di sfruttare più ore di utilizzo.

9.2 Modello del campo solare

Adattando la *figura 37* alla minima temperatura richiesta per il funzionamento si ottiene un grafico che estende notevolmente il periodo di utilizzo dell'impianto.

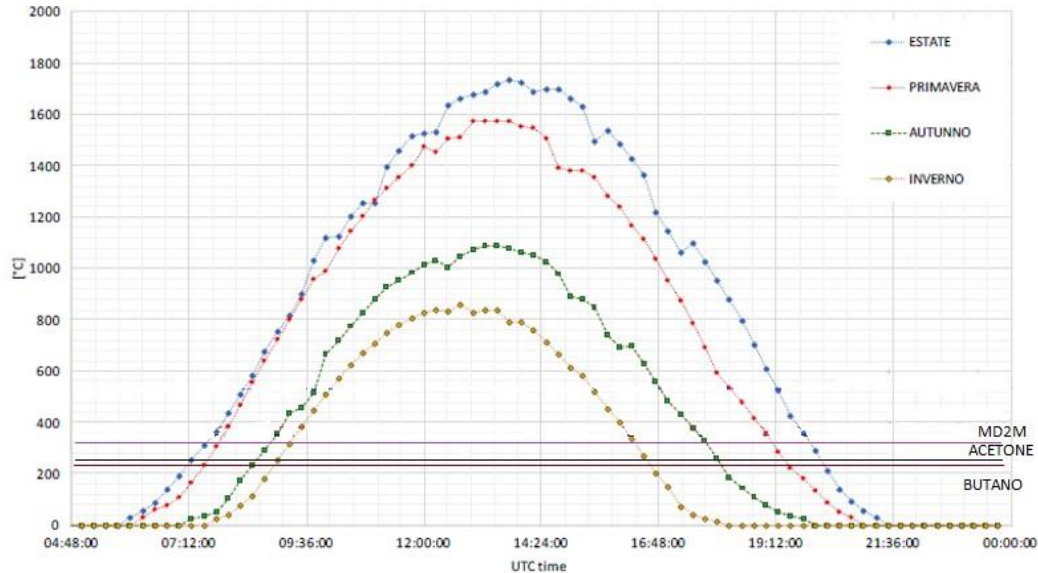


Figura 38: Andamento orario delle temperature sul fuoco del concentratore e temperature di funzionamento con i vari fluidi

Nel grafico in *figura 38* sono riportate le curve stagionali della temperatura sul fuoco del

paraboloide in relazione alle temperature di funzionamento del ciclo per i vari fluidi organici.

La *Tabella 9* mostra come le alte temperature nel fuoco e le basse temperature richieste dai fluidi permettano un utilizzo di circa 12 ore per le stagioni di primavera ed estate, mentre si riducono a meno di 10 durante l'autunno e l'inverno.

Tabella 9: Orari stagionali di utilizzo dell'impianto

	Acetone	MD2M	n-Butano
Primavera	7:35-19:20	7:50-19:10	7:30-19:30
Estate	7:15-20:10	7:30-19:55	7:10-20:15
Autunno	8:00-17:55	9:05-17:45	7:55-18:00
Inverno	9:00-16:35	9:10-16:15	9:00-16:40

Dopo aver calcolato le ore di funzionamento è necessario avere a disposizione i dati del DNI, ovvero la radiazione normale diretta, necessaria per il calcolo della potenza di un concentratore solare tramite la formula sottostante.

$$P_{CSP} = DNI_{annua} * 0,8 * Area_{disco} \quad (1)$$

Nella formula è presente un fattore di 0,8 dovuto all'efficienza ottica del concentratore come descritto nel paragrafo 4.2, l'area del disco riflettente di circa 4.5 m² ed infine la radiazione normale diretta annua stimata.

I dati relativi ai valori del DNI sono stati forniti dalla piccola stazione meteorologica presente all'Energy Center, misurando i valori di radiazione solare ogni 15 minuti per tutto l'arco della giornata. Tramite i dati forniti siamo stati in grado di calcolare, per ogni fluido considerato, il DNI relativo al proprio periodo di funzionamento in maniera stagionale come mostrato in *tabella 10*.

Tabella 10: DNI medio stagionale per i tre cicli considerati

	DNI [W/m ²]		
	Acetone	MD2M	n-Butano
Primavera	852.47	861.05	849.78
Estate	788.10	771.43	792.39
Autunno	621.27	601.08	653.81
Inverno	702.08	699.34	687.52

Tabella 11: Valori DNI medi annuali nei tre cicli considerati

	Acetone	MD2M	n-Butano
DNI annua [W/m²]	740.98	733.23	745.88

Tramite la formula (1) possiamo calcolare quanto produce ogni singolo collettore per ciascun fluido considerato.

Tabella 12: Potenza prodotta da un singolo concentratore per i tre fluidi considerati

	Acetone	MD2M	n-Butano
Potenza prodotta da un collettore a disco P_{CSP} [kW]	2.67	2.64	2.60

Per calcolare di quanti paraboloidei abbiamo bisogno è necessario sapere quanta energia termica occorre all'evaporatore per scaldare il fluido organico. Avendo fatto varie analisi di sensibilità per adattare al meglio l'impianto si cambi di carico non ci sarà un valore unico per la potenza all'evaporatore, ma considereremo tre valori:

- Potenza minima: quantità di energia termica richiesta dall'evaporatore per generare almeno 10 kW di potenza elettrica in turbina.
▪
- Potenza massima: quantità di energia termica richiesta dall'evaporatore per generare da 20 a 50 kW di potenza elettrica in turbina variando i parametri di portata o pressione.
- Potenza nominale: quantità di energia termica richiesta dall'evaporatore come descritto negli impianti completi in *figura 14, 16 e 18*.

Tabella 13: Potenza termica richiesta dall'evaporatore per i tre fluidi considerati

	Acetone	MD2M	n-Butano
Potenza termica minima P_{eva_min} [kW]	207,55	/	154,04
Potenza termica massima P_{eva_max} [kW]	317.27	/	223.03
Potenza termica nominale P_{eva_nom} [kW]	283.66	136.39	186.61

Nel caso dell'Acetone si ottengono migliori prestazioni, con uno scambio minimo di 207.55 kW si ottiene una potenza di circa 10 kWel considerando una regolazione che mantenga la pressione sempre a 20 bar, nel caso si disponga di una temperatura del Dowtherm molto alta il ciclo potrebbe produrre ben 50 kWel scambiando nell'evaporatore circa 317.27 kW.

La differenza fra la potenza termica nelle condizioni di massimo e minimo è solo di circa 110kW, questo perché maggiore è la disponibilità termica all'uscita della turbina, maggiore sarà il contributo del recuperatore.

Calcolando il numero di collettori dividendo la potenza dell'evaporatore per la potenza di un singolo collettore ci rendiamo conto del grande numero di parabole che occorrono per le potenze ottenute dal ciclo.

Tabella 14: Parametri di potenza e numero di collettori in diverse condizioni di funzionamento per l'Acetone

Acetone	P_{Turb} [kW]	P_{rec} [kW]	P_{eva}	Numero collettori
Condizioni massime	50	60	317.27	119
Condizioni minime	10	4.5	207.55	78
Condizioni nominali	39	8.5	283.66	106

Per quanto riguarda il Butano si ottengono risultati migliori per quanto riguarda in numero dei collettori, essi diminuiscono sensibilmente rispetto al caso dell'acetone sacrificando la potenza ottenuta in turbina.

Tabella 15: Parametri di potenza e numero di collettori in diverse condizioni di funzionamento per l'Acetone

n-Butano	P_{Turb} [kW]	P_{rec} [kW]	P_{eva}	Numero collettori
Condizioni massime	20	52	223,03	83
Condizioni minime	10	47	154,04	57
Condizioni nominali	14	30	186,61	70

Il fluido organico MD2M non è stato soggetto a regolazione, dunque viene considerata solo la potenza nominale d'impianto in *figura 16*.

Tabella 16: parametri di potenza e numero di collettori per l'MD2M

MD2M	P_{Turb} [kW]	P_{rec} [kW]	P_{eva}	Numero collettori
Condizioni nominali	10	15	136.39	51

Infine viene calcolata l'area del campo solare, necessaria per stimare la grandezza occupata dai collettori, che può sia essere usata nel caso di concentratori solari di tipo parabolico sia per qualsiasi altra tipologia di impianto.

$$Area\ campo\ solare = \frac{Q_{eva}}{DNI_{annua} * 0,8}$$

(2)

Nel calcolo considereremo soltanto il numero di collettori nelle condizioni nominali poiché le condizioni minime o massime si otterrebbero nelle eventualità ci sia bassa o alta disponibilità di irradianza durante la giornata, mentre i calcoli sono stati fatti con il DNI medio.

Tabella 17: Confronto aree del campo solare per i tre fluidi considerati

	Acetone	MD2M	n-Butano
Area campo solare [m²]	478.52	232.51	312.73

I risultati mostrano l'utilizzo di un'ampia area occupata dai concentratori solari, maggiore per il caso di un ORC alimentato ad acetone che fornisce una potenza maggiore e minore nel caso dell'MD2M che produrrà soltanto 10 kW. Il modello del campo solare si basa su paraboloidi simili a quello sperimentale presente all'Energy Center, se si volessero migliorare le prestazioni e ridurre l'area occupata si potrebbe aumentare l'area riflettente.

Se il concentratore fosse grande il doppio si otterrebbe un dimezzamento del numero dei collettori da installare e di conseguenza l'area verrebbe ridotta sensibilmente.

10 IMPATTO ENERGETICO DEL CSP ALL'ENERGY CENTER

L'Energy Center è sede di svariate strutture ed impianti energetici a scopo sperimentale, nel tetto sono situati sia svariati metri quadri di pannelli fotovoltaici, una micro turbina eolica ed infine il concentratore solare parabolico circolare su cui è stato svolto questo lavoro di tesi.

Nel panorama urbano di questo edificio tramite l'uso di modelli di concentratori solari è possibile riuscire ad ottenere un notevole impatto sui consumi dell'intera struttura.

Domanda energetica dell'edificio

10.1 Domanda energetica dell'edificio

La raccolta delle informazioni energetiche dell'edificio è frutto del monitoraggio di studenti e ricercatori per volgere elaborati e tesi, tuttavia è anche presente il personale del Politecnico di Torino che monitora i dati forniti dai datalogger installati.

Grazie a questi dati siamo in grado di affermare che la struttura consuma circa 405.3 MWh all'anno di energia elettrica per soddisfare le esigenze dell'edificio. Di tale quantità soltanto il 9% è autoconsumata dai sistemi fotovoltaici installati.

La richiesta energetica dell'edificio è soddisfatta in gran parte dal sistema centrale di produzione situato nei sotterraeni della struttura e costituito da un Gruppo Polivalente Geotermico che lavora in commutazione stagionale producendo una capacità termica di 473.7 kW in modalità riscaldamento e 442.7 kW in raffrescamento appositamente distribuiti dal sistema HVAC [25].

Chiaramente l'uso di tecnologie green in ambito urbano non riusciranno a sostituire interamente il carico di lavoro di impianti con taglie simili, ma ritagliano consumi secondari che, sommati insieme, costituiscono una parte importante del consumo energetico. Per tale ragione la potenza fornita dai concentratori solari nel tetto dell'Energy Center sarà sicuramente confrontata con quella dei consumi marginali come ad esempio quelli di apparecchiature elettroniche.

10.1.1 Consumi elettrici marginali

- **Ascensori:** uno centrale di tipo panoramico e due di servizio che rappresentano una quota di 74 potenza installata di 20 kW.
- **Plug-in:** sono rappresentati dai carichi elettrici richiesti da apparecchiature elettroniche come PC, stampanti ecc... Hanno un carico stimato di circa 10 kW
- **Servizi e sicurezza:** includono carichi di diversa natura che risultano fondamentali per le attività della struttura, essi hanno un carico complessivo di 16 kW e sono rappresentati da: Wi-fi, Sistema di sorveglianza e antincendio ecc...

Il carico totale stimato è di 46 kWel.

10.2 Impianto CSP nel tetto

La struttura del tetto dell'Energy Center potrebbe essere a forma di "L" rovesciata, con un'area di circa 1420 metri quadrati, ma di questi bisogna togliere le zone occupate dagli impianti fotovoltaici e dai tavoli.



Figura 39: Vista satellitare dell'Energy Center

L'area utilizzabile, mostrata in verde in *figura 40* si restringe dunque a circa 580 metri quadri, senza contare gli impedimenti presenti dovuti al passaggio di condotte e tubi.

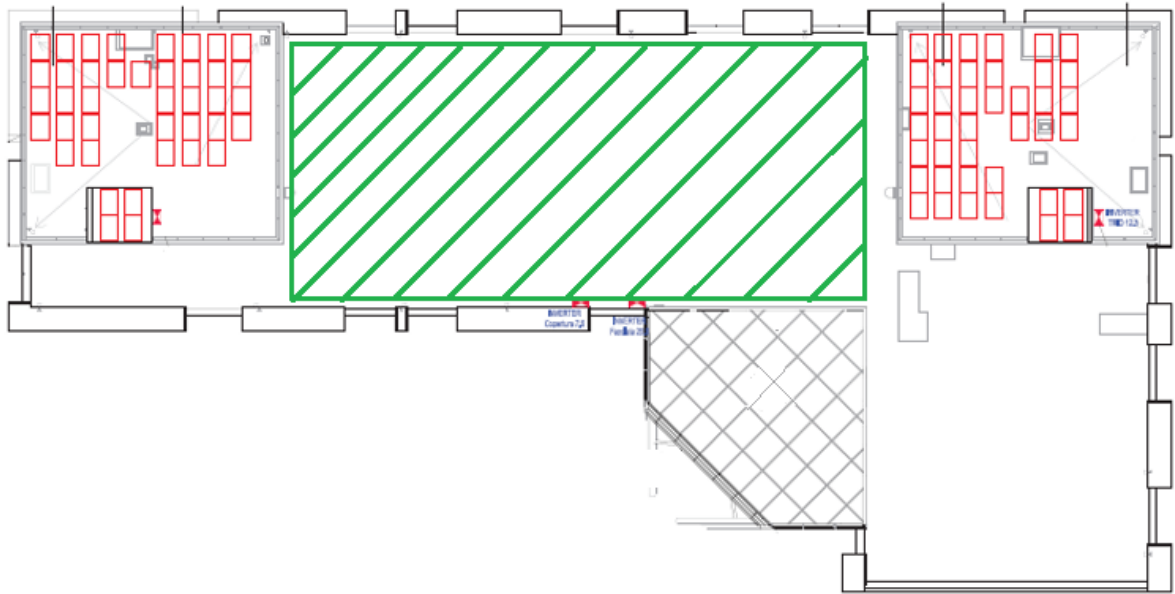


Figura 40: Planimetria del tetto dell'Energy Center

Considerando per difetto un'area di 500 m^2 possiamo benissimo adattare l'impianto CSP alimentato ad acetone che, come calcolato in *tabella 17* occuperebbe un campo solare 478.52 m^2 adatti a qualsiasi tipologia di impianto solare termodinamico.

Se volessimo usare dei concentratori simili a quello già presente all'Energy Center dobbiamo tener conto che ciascun paraboloide poggia su un rialzo di area 9 m^2 e che bisogna mantenere una determinata distanza nel caso volessimo installarne diversi.

Per capire quanti concentratori si potrebbero installare nell'area designata è opportuno modificare l'immagine satellitare per avere idea di come apparirebbe il tetto dell'edificio.



Figura 41: Immagine satellitare modificata del tetto con 14 concentratori solari

Organizzando al meglio gli spazi è stato possibile inserire nell'area considerata ben 14 concentratori solari esattamente uguali a quello già presente.

In *tabella 12* è stata calcolata la potenza di ciascuno dei concentratori per i tre cicli considerati e con una Potenza media di 2.63 kW ciascuno, con un impianto dotato di 14 collettori si otterrebbe una potenza di circa 36 kW, pari al 78.2% dei consumi marginali.

Nei calcoli non è stata considerata la produzione termica da parte dell'impianto, essa risulterà ancora più marginale poiché sarà maggiormente prodotta durante il periodo estivo, nella quale la

domanda di riscaldamento, resta soltanto la quota da destinare all'acqua calda sanitaria, ma non avendo dati sufficienti sul consumo non è stato possibile fare un'analisi più completa.

In ogni caso nel piano interrato della struttura sono presenti grandi cisterne di accumulo di acqua, fra le quali uno storage di acqua calda di 4000 litri.

11 CONCLUSIONI

In questo lavoro di tesi è stato modellato e dimensionato un ciclo Rankine organico per la produzione di energia elettrica e termica alimentato da un campo di concentratori solari circolari parabolici. Il ciclo è in grado di produrre un minimo di 10 kW_{el} e grazie alla regolazione raggiunge picchi di 40 kW_{el}, il calore dissipato durante la fase di condensazione del fluido organico viene usato per riscaldare acqua fino a temperature comprese fra 80 e 90 °C utili per la rete di riscaldamento. L'impianto è stato modellato grazie al software AspenPlus utilizzando tre diversi fluidi organici: MD2M, Acetone e Butano. I diversi risultati hanno evidenziato come il ciclo alimentato ad acetone sia quello a produrre maggior potenza in turbina, ma il costo energetico di evaporazione e condensazione ne potrebbe limitare l'utilizzo. Per versatilità il ciclo migliore risulta quello alimentato a Butano, maggior tempo di operatività e basse temperature richieste dal Dowtherm lo rendono adatto per tutte le prestazioni richieste dall'impianto e disponibili dal meteo. Nei capitoli successivi è stato analizzato un ipotetico uso del concentratore solare sperimentale su buona parte dell'area del tetto dell'Energy Center, coprendo circa il 78% dei consumi marginali dovuti ad apparecchiature elettroniche, safety e servizi.

12 BIBLIOGRAFIA

- [1] International Energy Agency [Online]. url: <https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview/electricity-consumption>.
- [2] International Energy Agency [Online]. url: <https://www.iea.org/data-and-statistics>.
- [3] U.S Energy Information Administration [Online]. url: <https://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/showtext.php?t=ptb1007>.
- [4] P. Denholm, «The Technical Potential of Solar Water Heating to Reduce Fossil Fuel Use and Greenhouse Gas Emissions in the United States» National Renewable Energy Laboratory. url: <https://www.nrel.gov/docs/fy07osti/41157.pdf>
- [5] Belhamri Azeddine, Bennamoun Lyes «Studio dell'energia solare termica nella regione settentrionale dell'Algeria con simulazione e modellazione di un sistema di essiccazione solare convettivo indiretto,» Liège Université [Online]. url: <https://orbi.uliege.be/handle/2268/105237>.
- [6] Charles W. Forsberg, Per F. Peterson, Haihua Zhao, «High-Temperature LiquidFluoride-Salt Closed-BraytonCycle Solar Power Towers,» url: https://web.archive.org/web/20070816191924/http://www.ornl.gov/sci/scale/pubs/SOL-05-1048_1.pdf.
- [7] Ivanpah solar electric generating system [Online]. url: <https://web.archive.org/web/20130111010740/http://ivanpahsolar.com/>.
- [8] California Energy Commission [Online]. url: <https://web.archive.org/web/20160714141020/http://www.energy.ca.gov/sitingcases/solar/>.
- [9] F. Ferrara, A. Gimelli, A. Luongo, «Small-scale concentrated solar power (CSP) plant: ORCs comparison for different organic fluids,» Energy Procedia 45 (2014) 217 – 226.

- [10] Alba Ramosa, Maria Anna Chatzopouloua, James Freemana, Christos N. Markidesa, «Optimisation of a high-efficiency solar-driven organic Rankine cycle for applications in the built environment,» *Applied Energy* 228 (2018) 755–765.
- [11] NREL, concentrating solar power project [Online]. url: https://solarpaces.nrel.gov/?utm_medium=domain-switch&utm_source=csp&utm_campaign=solarpaces
- [12] Orc world map, [Online]. url: <https://orc-world-map.org/>.
- [13] MRWATT, [Online]. url: <https://www.mrwatt.eu/it/content/radiazione-solare-in-italia>
- [14] Osservatorio Caldera, articles-64683 [Online]. Url: http://www.plataformacaldera.cl/biblioteca/589/articles-64683_documento.pdf
- [15] coolprop [Online]. Url: <http://www.coolprop.org/index.html>
- [16] Davide Betto, «Solare a concentrazione,» *educazionetecnicaonline.com* 8 Feb 2012 [Online]. Url: <https://www.educazionetecnicaonline.com/2012/02/08/centrali-solari-a-concentrazione/>.
- [17] concentrating-solar-power-2009 [Online]. Url: <https://www.greenpeace.org/raw/content/international/press/reports/concentrating-solar-power-2009.pdf>.
- [18] Wikipedia [Online]. Url: [w:en:File:Rankine cycle Ts.png](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Rankine_cycle_Ts.png) on English WP online:(https://en.wikipedia.org/wiki/File:Rankine_cycle_Ts.png)
- [19] Volker Sperlich, «Übungsaufgaben zur Thermodynamik mit Mathcad,» *Fachbuchverlag Leipzig* 2002.
- [20] Wikipedia, Ideal and real organic rankine cycle [Online]. Url: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ideal_and_real_organic_rankine_cycle.jpg
- [21] Gianni Truini «Energia con il ciclo Rankine,» [Online]. Url: Tag24:Energia con il ciclo Rankine di Gianni Truini.
- [22] Ramesh K. Shah, Dusan P. Sekulic «Fundamentals of Heat Exchanger Design,» John Wiley

& Sons, 11 ago 2003

- [23] enea «Energia: ENEA presenta nuova infrastruttura sperimentale per produrre calore per l'industria dalla fonte solare» [Online]. Url: <https://www.enea.it/it/Stampa/news/energia-enea-presenta-nuova-infrastruttura-sperimentale-per-produrre-calore-per-lindustria-dalla-fonte-solare>.
- [24] rinnovabili.it, «Produzione energetica, i sistemi micro ORC», [Online]. Url: [rinnovabili.it: Produzione energetica, i sistemi micro ORC](http://rinnovabili.it/Produzione-energetica-i-sistemi-micro-ORC)
- [25] Vitangelo Vitulli, « A preliminary study of Demand-side Management techniques in an office building,» Master of Science course in Energy and Nuclear Engineering, Advisor: Andrea Lanzini, Politecnico di Torino a.a 2018/2019