

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

Corso di Laurea in
Ingegneria Energetica



DIAGNOSI ENERGETICA DI UNO STABILIMENTO INDUSTRIALE

Relatore: Prof. Livio Mazzarella

Co-relatore: Ing. Roberto Alessio

Tesi di Laurea di:

Giulia Madoglio 783493

Anno Accademico 2012- 2013

Ringraziamenti

I miei ringraziamenti vanno al mio relatore, Prof. Livio Mazzarella per l'aiuto nella stesura di questa tesi.

Vorrei poi ringraziare il mio co-relatore, Ing. Roberto Alessio e il team di Siemens per avermi reso partecipe di questo progetto, che mi ha insegnato molto.

Ringrazio poi i collaboratori al progetto di cui tratta questa tesi, che mi hanno aiutata e consigliata ognuno nella propria area di competenza, Ing. Marco Rottoli e Ing. Fabio Grisoni di Brembana&Rolle e Ing. Marco Pasqualin di Owens Corning.

Un ringraziamento speciale e grandissimo va alla mia famiglia, i miei genitori Milena e Lino e mio fratello Carlo per l'aiuto costante, l'amore e la pazienza con cui mi hanno accompagnata in questo percorso universitario, non ce l'avrei mai fatta senza di loro.

Grazie a Lorenzo, per essere stato il mio supporto costante e importantissimo in questi cinque anni.

Un grande ringraziamento alla mia famiglia allargata, in particolare Laura, Carlo e Mariuccia perché il loro aiuto non è mai mancato quando ne avevo bisogno, neanche una volta.

Ringrazio tutti coloro che hanno permesso e favorito il raggiungimento di questo obiettivo.

Abstract

Questa tesi descrive la produzione di una proposta finale di miglioramento dell'efficienza energetica per lo stabilimento di produzione di fibra di vetro Owens Corning di Besana Brianza.

Per prima cosa si è proceduto all'analisi dei consumi dello stabilimento, in questa fase si sono analizzate le informazioni fornite dai sistemi di controllo dell'azienda, queste informazioni sono poi state razionalizzate per ottenere tutte le misure stabilite nell'M&V (Measure and Verification) plan.

In questa fase di analisi dei consumi durante la campagna misure si è evidenziato una fonte energetica ad alta temperatura che non veniva sfruttata ma dispersa in atmosfera. Questa fonte di energia termica consiste nei gas combusti prodotti nel forno di fusione del vetro, disponibili alla temperatura di 700°C che venivano dispersi in atmosfera.

Si è quindi passati alla stesura di tre possibili interventi tecnici che per sfruttare l'energia termica recuperabile per ottenerne un effetto utile e quindi un risparmio energetico ed economico. Per ogni soluzione si è prodotto un modello per il calcolo dei risparmi energetici ed economici e dei costi di investimento. Si riportano le tecnologie previste dalle varie soluzioni

Soluzione 1: scambiatore di calore per recupero dell'energia termica dai fumi, cogeneratori, Organic Rankine Cycle (ORC) multistadio, refrigeratore ad assorbimento.

Soluzione 2: scambiatore di calore per recupero dell'energia termica dai fumi scambiatori per recupero aggiuntivo anche da camini secondari, ORC multistadio.

Soluzione 3: scambiatore di calore per recupero dell'energia termica dai fumi, ORC multistadio, refrigeratore ad assorbimento.

Tutte le soluzioni proposte sono altamente convenienti dal punto di vista energetico ed economico, con bassi tempi di ritorno dell'investimento, dell'ordine dei tre anni.

Si è poi descritta la formula dell'ESPC (Energy Saving Performance Contracting) descrivendo brevemente le modalità con cui la ESCO (Energy Service Company) interagisce con il cliente per garantire il risparmio.

Abstract

This thesis describes the production of a final proposal for improving energy efficiency in the manufacturing plant of Owens Corning in Besana Brianza, which produces fiberglass .

First, we proceeded to the analysis of the energy consumption of the plant; at this stage we analyzed the information provided by the control systems of the company, this data were then processed to get all the measurements needed for the M & V (Measure and Verification) plan.

In this phase, during the measurements, a high temperature energy source was found that was not exploited but dispersed into the atmosphere. This source consists of thermal energy in the flue gas which is produced by combustion of natural gas in the glass melting furnace, this fumes were available at a temperature of 700 ° C and were dispersed into atmosphere.

The second phase consisted in the drafting of three possible technical solutions to exploit the thermal energy recoverable in order to obtain a useful effect and thus saving energy and money. For each solution a model for the calculation of energy savings, money savings and investment costs was produced. Following are the technologies used in the various solutions:

Solution 1: heat exchanger for heat recovery from the flue gas, CHP(Combined Heat and Power), multi-stage Organic Rankine Cycle (ORC), absorption chiller.

Solution 2: heat exchanger for heat recovery from the flue gas heat exchangers for recovery as well as additional secondary fireplaces, multi stage ORC.

Solution 3: heat exchanger for heat recovery from the flue gas, multi-stage ORC, absorption chiller.

All the proposed solutions are highly cost-effective in terms of energy and cost with low payback period, around three years.

It was then described the model of ESPC (Energy Saving Performance Contracting) briefly describing the way in which the ESCO (Energy Service Company) interacts with the client to ensure the savings.

Indice Generale

Sommario esecutivo	20
1.1 Il sito di Besana in Brianza	24
1.1.1 Storia del sito	24
2.1 Prodotto	27
2.1.1 Roving Assemblato	27
2.2 Attività produttive	31
2.2.1 Miscela	31
2.2.2 Forno	32
2.2.3 Trasporto vetro liquido	32
2.2.4 Filatura	32
2.2.5 Appretti	32
2.2.6 MAT- Unifilo	33
2.2.7 Roving assemblato	33
2.3 Recupero di energia principali attualmente in atto	34
2.3.1 Pre-riscaldamento aria comburente nel forno	34

2.3.2	Scambiatori sui camini del canale di trasporto.....	34
3.1	Consumi totali.....	36
3.2	Consumi di Energia Elettrica.....	40
3.3	Consumi di gas naturale.....	42
3.3.1	Profilo mensile dei consumi di gas naturale.....	42
3.3.2	Destinazione d'uso dei consumi di gas naturale	44
3.4	Conclusioni sull'analisi consumi.....	46
4.3.2	Analisi energetica.....	56
4.3.3	Analisi economica	63
4.3.1	Soluzione tecnica e fattibilità	67
4.3.2	Analisi energetica.....	70
4.3.3	Analisi economica	73
4.4.1	Soluzione tecnica.....	75
4.4.2	Risultati energetici ed economici.....	79
5.1	Schema logico dell'intervento	83
5.2	Elenco delle macchine da installare.....	85
5.3	Scambiatore di calore fumi-olio diatermico.	87
5.3.1	Criticità legate allo scambiatore di calore fumi-olio diatermico.	87

5.3.2	Posizionamento scambiatore	89
5.4	Organic Rankine Cycle	91
5.4.1	ORC 1° Stadio.....	94
5.4.2	ORC 2° Stadio.....	95
5.5	Refrigeratore ad assorbimento	96
5.6	Torri evaporative	97
5.7	Generatore di vapore a calore indiretto	97
5.8	Utilizzo vapore prodotto.....	98
5.9	Analisi energetica.....	106
5.9.1	Diagrammi di flusso	106
5.10	Analisi risparmi CO ₂	117
6.1	Fattibilità tecnica	119
6.2	Analisi economica	120
6.2.1	Risparmio economico dovuto ai saving energetici	121
6.2.2	Risparmio energetico dovuto a certificati bianchi.....	123
6.2.3.	Spese continue aggiuntive di manutenzione, ausiliari e accise	125
6.2.4	Bilancio economico finale.....	127
7.1	Contesto contrattuale: l'ESPC.....	133

7.2 Analisi finanziaria del caso in oggetto.....	135
7.2.1 Modello finanziamento società finanziaria-cliente finale.....	135
7.2.2 Modello finanziamento diretto ESCO	136

Elenco delle figure

Figura 1.1. Collocazione urbanistica.....	25
Figura 2.1. Roving assemblato	27
Figura 2.2. Unifilo.....	28
Figura 2.3. Fili tagliati indiretti	29
Figura 2.4. Schema logico della fusione e filatura del vetro.....	31
Figura 2.6. Schema logico di tutto il processo produttivo, comprende il processo di filatura e trattamento del filato, il laboratorio di formazione miscela e la produzione degli appretti. [1]	35
Figura 3.1. Grafico che rappresenta i consumi totali dello stabilimento negli anni 2007-2012.....	37
Figura 3.2. Figura che rappresenta l'andamento dei consumi riferiti alla tonnellata di prodotto finito e del livello della BAT di settore.	38
Figura 3.3. Grafico a punti che rappresenta l'andamento dei consumi di energia elettrica negli anni 2007-2012.....	39
Figura 3.4. Grafico a linee che rappresenta il consumo di totale di energia elettrica e il consumo di energia elettrica relativo al solo forno 1 in ogni giorno per gli anni 2011-2012.	41
Figura 3.5. Consumi di gas naturale in kWh consumati in 1 giorno (24h) per ogni giorno degli anni 2011 e 2012. In blu sono rappresentati i consumi totali, in rosso quelli relativi solo al forno 1.....	43
Figura 3.6. Consumi di gas naturale della caldaia per la produzione di vapore, in kWh consumati in 1 giorno (24h) per ogni giorno degli anni 2011 e 2012.	44
Figura 3.7. Grafico a torta rappresentante le destinazioni d'uso del consumo di gas naturale dello stabilimento nell'anno 2012.....	45
Figura 4.1. Legenda dei fluidi e dei loro stati.	51
Figura 4.2. Schema logico della soluzione 2.....	52
Figura 4.3. Schema logico della soluzione 2.....	68
Figura 4.4. Schema logico raffigurante una parte della soluzione tre.....	75
Figura 4.5. Utilizzo del vapore prodotto dal primo stadio del ciclo ORC.	77
Figura 5.1. Schema logico dell'intervento di efficientamento energetico scelto.	83

Figura 5.2. Legenda relativa alla figura precedente, rappresentante i fluidi di lavoro.	84
Figura 5.3. Disposizione canali in uscita dal forno 1. La figura non è in scala..	90
Figura 5.4. Rappresentazione dello schema ideale di un ciclo integrato oggetto di deposito di brevetto.	91
Figura 5.5. Schema termodinamico del Ciclo Multistadio.	92
Figura 5.6. Integrazione dei due cicli ORC in cascata con fluido intermedio....	93
Figura 5.7. Ciclo termodinamico del primo stadio a toluene, nel caso in cui si espanda fino a 2 bar.	93
Figura 5.8. Diagramma di flusso rappresentante la logica delle trasformazioni di energia della soluzione.	98
Figura 5.9. Andamento del consumo di energia termica della centrale termica nell'anno 2012.	100
Figura 5.10. Energia richiesta in un mese dal refrigeratore ad assorbimento...	101
Figura 5.11. Utilizzo nei vari mesi dell'anno del vapore prodotto dal 1° ciclo ORC.	105
Figura 5.12. Flowchart relativo all'utilizzo della potenza disponibile dai fumi del forno prima dell'intervento.	107
Figura 5.13. Flowchart relativo all'utilizzo della potenza disponibile dai fumi del forno dopo l'intervento.	107
Figura 5.14. Conversione dell'energia termica in ingresso nel ciclo ORC, per la produzione di energia termica sotto forma di vapore (90%) dell'energia in ingresso, e di energia elettrica (8%).	110
Figura 5.15. Utilizzo dell'energia termica prodotta in un anno dall'ORC 1° Stadio sotto forma di vapore. Questo grafico mostra la quantità di energia termica inviata ai vari usi in un anno.	111
Figura 5.16. Conversione dell'energia termica in ingresso, evidenziando le perdite e l'effetto utile.	112
Figura 5.17. CO ₂ risparmiata grazie all'intervento previsto	118
Figura 6.1. Locale contenimento strutture.	119
Figura 6.2. Posizionamento impianti rispetto al forno 1.	120
Figura 6.3 - Andamento prezzi mercato TEE (fonte: FIRE)[4].....	124
Figura 6.4. Flusso di cassa cumulato attualizzato per gli anni della vita utile dell'impianto.	128
Figura 6.5. Flusso di cassa cumulato attualizzato con anticipo certificati bianchi.	129

Figura 6.6. Prezzo di acquisto del kWh elettrico dell'azienda confrontato con quello di diversi paesi, secondo uno studio de il sole 24 ore.	131
Figura 7.1. Schema finanziario del performance contracting.	132
Figura 7.2. Processo dell'ESPC (Energy Saving Performance Contract).....	133
Figura 7.3. Schema con facilitazione dell'accesso al credito da parte della ESCO.....	135
Figura 7.4. P&L.....	135
Figura 7.5. Schema con finanziamento diretto ESCO.	136
Figura 7.6. P&L.....	136

Elenco delle Tabelle

Tabella 2.1. Vetro fuso prodotto dai forni (t/anno)	30
Tabella 2.2. Prodotto finito (t/anno)	30
Tabella 3.1. Consumi di energia elettrica e metano negli anni	37
Tabella 3.2. Consumi rispetto alla tonnellata di prodotto finito.....	38
Tabella 3.3 Consumi del forno su tonnellata di prodotto finito.....	39
Tabella 3.4. Riassunto consumi di gas naturale per destinazione d'uso.....	44
Tabella 4.1. Potenze in ingresso alla soluzione descritta precedentemente.	56
Tabella 4.2. Produzione cogeneratori.	56
Tabella 4.3. Utilizzo fumi prodotti dal forno di fusione del vetro.....	57
Tabella 4.4. Utilizzo dei fumi prodotti dal cogeneratore.....	57
Tabella 4.5. Utilizzo vapore nella stagione estiva.	57
Tabella 4.6. Utilizzo vapore nella stagione invernale.....	58
Tabella 4.7. Utilizzo acqua a 90°C nella stagione estiva.....	58
Tabella 4.7. Utilizzo acqua a 90°C nella stagione invernale.	58
Tabella 4.8. Utilizzo acqua intercooler.....	59
Tabella 4.9. Riassunto potenze per utilizzo nel caso estivo.	59
Tabella 4.10. Riassunto potenze caso invernale.	60
Tabella 4.11. Energia elettrica risparmiata in un anno.	61
Tabella 4.11. Energia termica risparmiata in un anno.	62
Tabella 4.12. Risparmio economico dovuto al risparmio di energia elettrica in un anno.....	63
Tabella 4.12. Risparmio economico dovuto al risparmio di energia termica in un anno.....	64
Tabella 4.13. Riassunto dei risparmi annuali.....	65
Tabella 4.14. Risparmi annuali dovuti ai certificati bianchi.....	65
Tabella 4.15. Risparmio netto annuo.....	66
Tabella 4.16. Potenze disponibili dal recupero gas combust.....	71
Tabella 4.17. Rendimento elettrico e relativa potenza prodotta.	72
Tabella 4.18. Energia elettrica prodotta in un anno dall'ORC.	72
Tabella 4.19. Risparmi annui relativi alla soluzione 2.	73
Tabella 4.20. Costi da affrontare in un anno per la soluzione 2.	74
Tabella 4.21. Bilancio annuale soluzione 2.	74
Tabella 4.22. Risparmi energetici ed economici in un anno.....	79
Tabella 4.23. Risparmi annui dovuti ai certificati bianchi.....	80

Tabella 4.24. Costi annuali.....	81
Tabella 4.25. Riassunto risparmi e costi dei primi 5 anni di attività.....	82
Tabella 5.1. Consumi di gas naturale della centrale termica nella stagione invernale dell'anno 2012.....	99
Tabella 5.2. Richiesta di potenza frigorifera per ogni mese della stagione invernale anno 2012.	101
Tabella 5.3. Verifica potenza termica in eusbero sotto forma di vapore per ogni mese della stagione invernale.....	102
Tabella 5.4. Quota di energia termica sotto forma di vapore da destinare all'ORC 2° Stadio.....	103
Tabella 5.5. Riassunto richiesta ed effettivo utilizzo del vapore prodotto nei mesi dell'anno.	104
Tabella 5.6. Energia recuperata in ingresso all'impianto.....	106
Tabella 5.7. Produzione di energia elettrica in un anno dell'ORC 1° Stadio...	108
Tabella 5.8. Energia termica prodotta da vapore.	109
Tabella 5.9. Risparmio di gas naturale corrispondente all'energia termica risparmiata sulla centrale termica.....	113
Tabella 5.10. Calcolo del risparmio energetico dovuto al refrigeratore ad assorbimento.....	114
Tabella 5.11. Energia elettrica prodotta in un anno dal secondo stadio del ciclo ORC alimentato a vapore.	115
Tabella 5.12. Riassunto risparmi annuali di energia elettrica e di gas naturale previsti.....	116
Tabella 5.13. Risparmio di energia elettrica dovuto ad altri interventi collaterali a quello di recupero sui fumi.....	116
Tabella 5.14. CO ₂ risparmiata grazie all'intervento previsto.	117
Tabella 6.1. Prezzo di acquisto attuale dello stabilimento dei due principali vettori energetici.....	121
Tabella 6.2. Ritorno economico dovuto a risparmio energetico da recupero fumi prodotti dal forno 1 previsto in un anno.....	122
Tabella 6.2. Ritorno economico dovuto a risparmio energetico da ausiliari previsto in un anno.	123
Tabella 6.3. Incentivi annuali ottenuti grazie a certificati bianchi.	125
Tabella 6.4. Spesa aggiuntiva per manutenzione annua.....	125
Tabella 6.5. Spese aggiuntive annue dovute ad ausiliari.....	126
Tabella 6.6. Spese aggiuntive dovute ad accise sulla produzione di energia elettrica.	126

Tabella 6.7. Riassunto risparmi e costi dei primi 5 anni di attività.	127
Tabella 6.8. Applicazione coefficienti di sicurezza.....	127
Tabella 6.9. Percentuale risparmio annuo rispetto alla spesa annua per l'acquisto di energia elettrica.....	130
Tabella 6.10. Verifica sconto su prezzo di acquisto energia elettrica.	130

Sommario esecutivo

In questo progetto ho avuto l'opportunità di collaborare con gli Ingegneri energetici di Siemens, guidati dal mio co-relatore, Ing. Roberto Alessio nell'acquisire tutti i dati relativi ai consumi energetici della Owens & Corning presso l'insediamento di Besana Brianza. Dopo aver analizzato le bollette energetiche generali degli ultimi tre anni fornite dal loro provider di energia elettrica e gas naturale, è stato elaborato un piano di misure e verifiche per andare ad analizzare i consumi delle singole utenze. La Owens & Corning gestisce e monitora tutti i parametri relativi sia alla produzione sia alla climatizzazione sia ai consumi elettrici globali dell'insediamento produttivo grazie ad un sistema di supervisione WIN CC, realizzato da Siemens. Non si è resa quindi necessaria l'installazione di strumenti di misura in quanto tutte le variabili sono monitorate e controllate. Tali misure non sono correlate alle singole utenze al fine di misurarne i consumi energetici ma svolgono principalmente una funzione di controllo. L'attività da me svolta è stata quella di analizzare questa ingente quantità di informazioni e razionalizzarla per ottenere tutte le misure stabilite nell'M&V plan. Questa razionalizzazione naturalmente ha comportato lo sviluppo di modelli di calcolo per verificare costantemente la coerenza delle misure energetiche relative alle singole utenze rispetto ai consumi generali evinti dalle bollette energetiche. Trattandosi di un insediamento produttivo, abbiamo concentrato i nostri sforzi in prima analisi per distinguere i consumi relativi al processo produttivo rispetto a quelli di infrastrutture. Nel condurre questa attività, abbiamo verificato le temperature e le pressioni dei fumi esausti in uscita dal forno di fusione della miscela vetrificabile, ci siamo quindi resi conto dell'enorme quantità di energia che può essere recuperata da questi gas combusti, da qui la proposta di installare un ciclo Rankine a fluido organico, come descritto di seguito. Anche in questo caso la mia attività si è concentrata sullo studio dei parametri di portata, temperatura e composizione dei fumi esausti. In questo caso abbiamo preferito anche effettuare delle misure on-site sul condotto di trasporto dei fumi in uscita dal forno 1. Un'ulteriore campagna di misure ha riguardato l'analisi dei consumi di gas naturale per individuare l'effettivo consumo di ogni singolo produttore di energia termica, sempre dividendo i consumi relativi al processo produttivo e all'infrastruttura. Lo stesso dicasi per i gruppi pompe dei circuiti di acqua refrigerata che saranno invertite rizzate.

Dopo aver completato il piano di misure e verifiche si è passati alla fase progettuale per definire gli interventi che consentano di ottenere significativi saving energetici. Anche in questo caso ho collaborato a stretto contatto del team di ingegneri energetici di Siemens per lo sviluppo dei modelli di intervento e delle relative calcolazioni necessarie a formulare i costi di investimento, i risparmi ottenibili e i conseguenti tempi di ritorno di ogni singolo intervento. In

questa fase ho avuto la possibilità di utilizzare i tool proprietari di Siemens per l'implementazione dei modelli energetici. Abbiamo formulato diverse ipotesi, descritte nella tesi. Ho quindi partecipato agli incontri con i responsabili di Owens & Corning nei quali venivano illustrate le varie ipotesi progettuali e di conseguenza si decideva quali di queste sviluppare in dettaglio in funzione del rapporto costo/beneficio e dei piani di sviluppo e investimento dell'azienda stessa. Questa parte è stata particolarmente significativa perché mi ha permesso di comprendere la reale dinamica di decisione dello sviluppo del progetto, che è sempre legata sia alle ipotesi ingegneristiche che ai piani di investimento e ai budget finanziari che la società Owens & Corning deve rispettare.

In dettaglio sono state avallate da OCV tre ipotesi di intervento che brevemente descrivo.

Soluzione 1: questa prima soluzione prevede l'installazione di due cogeneratori alimentati a gas naturale, per la produzione di energia elettrica ed energia termica. E' previsto poi un recupero energetico sui gas combusti prodotti dal forno di fusione della miscela vetrificabile, che vengono utilizzati per produrre energia termica. L'energia termica recuperata dai gas combusti alimenta un ciclo Rankine a fluido organico che prevede due cicli Rankine a cascata e produce energia elettrica. Si prevede poi l'installazione di due refrigeratori ad assorbimento per poter produrre acqua refrigerata utilizzando l'energia termica prodotta dai cogeneratori nel periodo estivo. Nel periodo invernale l'energia termica viene utilizzata per riscaldamento e produzione.

Soluzione 2: questa soluzione prevede il recupero energetico sui gas combusti prodotti dal forno di fusione del vetro, così come un recupero termico sui gas combusti prodotti da dei bruciatori che tengono in temperatura i canali di trasporto del vetro fuso. L'energia termica recuperata dal raffreddamento di questi fumi alimenta un ciclo Rankine a fluido organico a doppio stadio come quello descritto nella soluzione precedente per la produzione di energia elettrica.

Soluzione 3: questa soluzione prevede il recupero dell'energia termica disponibile raffreddando i gas combusti in uscita dal forno uno. L'energia termica recuperata viene utilizzata per alimentare due cicli Rankine a fluido organico che produce vapore ed energia elettrica. Il vapore prodotto dal primo ciclo Rankine viene utilizzato per riscaldamento, per produrre acqua refrigerata grazie ad un refrigeratore ad assorbimento e per alimentare un secondo stadio del ciclo Rankine a fluido organico.

Tutte le soluzioni sopra descritte sono state discusse e accettate dai responsabili della produzione e dei servizi di manutenzione dell'insediamento produttivo di Besana Brianza. Sono state quindi sottomesse alla valutazione dei responsabili tecnici della loro casa madre negli Stati Uniti, ottenendo anche la loro approvazione. Sono poi state sottoposte ai responsabili finanziari e al Board di OCV per le considerazioni in merito all'investimento. L'analisi finanziaria

rapportata al piano di investimenti del sito produttivo ha fatto sì che la soluzione 3 sia stata ritenuta la più rispondente alle esigenze di OCV.

1 Presentazione azienda



La Owens Corning è la più grande azienda al mondo produttrice di fibra di vetro e prodotti simili. E' stata fondata nel 1935 dall'unione di Corning Glass Works e Owens-Illinois, a livello mondiale ha circa 18.500 dipendenti ed è presente in 26 paesi; opera in 4 settori principali: sistemi isolanti, soluzioni composite, tetti e coperture con asfalto, altri materiali da costruzione.

La CSB (Composites Solution Business) di Owens Corning si compone di tre business units:

- OCV Reinforcements, che comprende le attività CSB e rinforzi in filato di vetro;
- OCV Technical Fabrics, che comprende le attività CSB riguardo ai tessuti e compositi fatti con filatidi vetro;
- OC tecnologie Non-Woven (non tessuti).

Le attività OCV Reinforcements e Technical Fabrics hanno 36 fabbriche in 16 paesi in Europa, nelle Americhe e in Asia. La Direzione Generale è a Toledo, Ohio, USA.

1.1 Il sito di Besana in Brianza

1.1.1 Storia del sito

La OCV Italia, stabilimento di Besana Brianza (MI) nasce nel 1944 col nome di “Balzaretti e Modigliani”. Le prime produzioni furono dedicate a particolari prodotti chiamati “Vetroflex”.

Negli anni si sono susseguite numerose modifiche e miglioramenti nel ciclo produttivo, a seguito dello sviluppo del mercato e dell’introduzione dei nuovi processi e prodotti.

Le principali tappe di questo sviluppo sono di seguito riassunte:

- 1953-1960: incremento produttività Roving e installazione linea MAT fili tagliati
- 1961: installazione primo forno con tecnologia a fusione diretta
- 1965: installazione Unifilo
- 1981: cambio denominazione in Vetrotex Italia e partecipazione totale di Saint Gobain
- 1992: costruzione forno C
- 1994: ricostruzione forno D
- 1994-1998: aumento dell’automazione e robotizzazione reparto Bobinatura e Roving.
- 2002-2003: costruzione e messa in esercizio linea Unifilo 8
- 2004: il forno D viene sostituito dal forno F, con rifacimento completo
- 2005: il forno C viene sostituito dal forno G, con rifacimento completo
- 2007: dal 1 maggio, conferimento del ramo d’azienda alla società OCV Italia s.r.l.
- 2009: modifica della tipologia di vetro con passaggio da vetro E a vetro ADVANTEX e conseguente modifica assetto produttivo su un unico forno G (denominato ora forno 1), e fermata del forno F.

Nello stabilimento lavorano oggi 255 persone, di cui circa i due terzi operano su tre turni a ciclo continuo per 365 giorni l'anno.

1.1.2 Inquadramento urbanistico amministrativo

La OCV Italia s.r.l., sito di Besana in Brianza (MI) si sviluppa per una superficie complessiva di circa 80.000 m² di cui 35.000 m² coperti e 15.000 m² destinati ad area verde.

Sorge su un'area che, secondo le prescrizioni del Piano Regolatore vigente, ricade nella zona D1 "di completamento produttivo" caratterizzata quindi dalla presenza di piccole realtà produttive locali di carattere artigianale, operanti in diversi settori merceologici quali: tessitura, tintoria filati, stampaggio materie plastiche, minuteria metallica e alimentari. Nell'immediato intorno della OCV Italia s.r.l. sono inoltre presenti più zone residenziali, zone di completamento, zone di espansione e zone caratterizzate da servizi di pubblica utilità quali scuole, ufficio postale, l'ospedale di Besana B.za ed un parco pubblico.

Il sito è facilmente accessibile grazie alla vicinanza con la SS 36 (Valassina) e la strada provinciale per Carate Brianza. E' presente poi la linea ferroviaria Monza – Lecco, che è utilizzabile per l'approvvigionamento di parte delle materie prime vetrificabili.

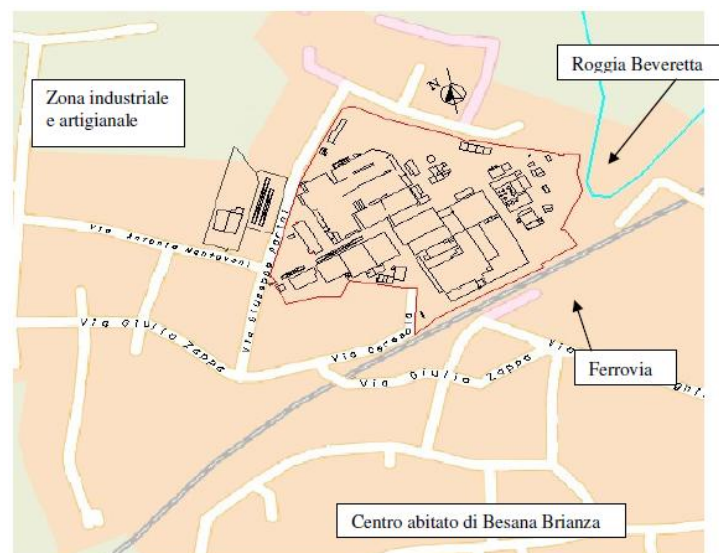


Figura 1.1. Collocazione urbanistica.

1.1.3 Clima

Il Comune di Besana Brianza si estende all'estremità settentrionale della provincia di Milano, ai confini delle province di Lecco e Como ed è situato in territorio collinare ad altezza variabile tra i 244 e 378 m sul livello del mare.

Il territorio del Comune di Besana Brianza gode di un clima mediterraneo con estati secche ed inverni in cui le precipitazioni sono sempre meno frequenti.

1.1.4 Geologia ed idrogeologia

Per ciò che concerne l'assetto idrologico ed idrogeologico, l'area dell'insediamento si trova in prossimità del Roggia Beveretta.

Il sottosuolo sui cui sorge lo stabilimento è prevalentemente costituito da argilla alternata a strati di ghiaia e sabbia; presenta quindi una buona impermeabilità. La prima falda si trova a circa 13,5 m dal piano di campagna.

2.5 Rapporti con il vicinato e la pubblica amministrazione

Il territorio circostante l'insediamento è caratterizzato in parte dalla presenza di centri urbani.

Con il vicinato e con la comunità di Besana Brianza i rapporti si sono consolidati nel tempo e la comunicazione relativa ad aspetti ambientali e di sicurezza è stata gestita sia in modo diretto che attraverso il coinvolgimento della Amministrazione Comunale.

La collettività è stata informata dell'ottenimento della registrazione EMAS attraverso un incontro aperto al pubblico che si è svolto in data 17 ottobre 2005.

La comunicazione con le autorità locali è costante e periodica data l'importanza della azienda per dimensioni e personale occupato.

Tra le attività in corso, si segnala l'iniziativa "porte aperte", ripetuta annualmente. E' una giornata in cui lo stabilimento apre le porte ai dipendenti, ai parenti ed al vicinato per un rituale giro di fabbrica con spiegazione del ciclo produttivo e dei prodotti/applicazioni, premiazione alla carriera dei dipendenti che hanno lavorato per 25 o 30 anni in azienda, rinfresco finale con discorso dell'amministratore delegato o della Direzione OCV.

2 Processo produttivo

Il primo passo per effettuare l'analisi energetica si basa sulla comprensione del layout dello stabilimento e del processo produttivo.

2.1 Prodotto

Lo stabilimento Owens Corning di Besana in Brianza produce fibra di vetro nella forma di filato di vetro. L'applicazione principale di questo prodotto è quella di aumentare le proprietà meccaniche dei materiali plastici, grazie alla elevata resistenza alla trazione.

Dal 2010 lo stabilimento produce tre tipi di fibra di vetro:

- Roving Assemblato
- Unifilo o MAT
- Fili tagliati indiretti.

2.1.1 Roving Assemblato

Questo prodotto viene ottenuto dalla miscela liquida che viene filata attraverso piastre di platino, ogni filamento viene poi rinforzato passando su un appretto.



Figura 2.1. Roving assemblato

I filamenti vengono poi assemblati per formare un unico filo di vetro chiamato Roving Assemblato e si presenta sotto forma di rocche.

Questo prodotto viene utilizzato in campo automobilistico per parti di carrozzeria, per la produzione di tubi per trasporto di liquidi, e per la produzione di piastre traslucide per coperture.

2.1.2 Unifilo

L'unifilo viene prodotto sempre a partire da filamenti di vetro continui disposti in strati multipli e uniti da uno specifico legante fino a creare un feltro. Viene poi confezionato in rotoli di diversa dimensione, grammatura e consistenza. Questo prodotto viene utilizzato così come viene venduto dopo essere stato tagliato o sottoposto ad una sagomatura a caldo. Viene utilizzato ove sia necessaria leggerezza ed elevata resistenza meccanica.



Figura 2.2. Unifilo.

Per le sue proprietà viene utilizzato largamente nei settori:

- Edilizia/Costruzioni
- Eolico
- Navale
- Trasporti pesanti
- Automotive
- Elettrico, elettronico e telecomunicazione

- Infrastruttura e opere pubbliche
- Generi di consumo

2.1.3 Fili Tagliati Indiretti

I fili tagliati indiretti si presentano sotto forma di fili tagliati ad una lunghezza variabile tra i 3 ed i 12 mm. Viene utilizzato per il rinforzo di materiali plastici.



Figura 2.3. Fili tagliati indiretti

2.1.4 Quantità di vetro fuso

Si riporta ora la produzione di vetro annuale riferita al forno F (attivo fino a settembre 2009) e al forno G, attivo da 2005 e completamente ricostruito completamente dal 2009 e rinominato forno 1.

Tabella 2.1. Vetro fuso prodotto dai forni (t/anno)

	2007	2008	2009	2010/06	2011	2012
Forno G	39.369	39.909	12.179	24.391	55.742	54.955
Forno F	37.905	27.718	23.999	-	-	-
Totale	77.274	67.627	36.178	24.391	55.742	54.955

Nota: ai fini del calcolo degli indicatori, non viene considerata la produzione di fili tagliati nel 2010 in quanto eseguita presso terzi.

I valori inferiori nell'anno 2009 sono dovuti al fatto che la produzione è stata fermata per consentire il rifacimento completo del forno G che diventerà successivamente 'forno 1'.

I valori riferiti all'anno 2010 si riferiscono solo ai mesi di gennaio-giugno 2011.

Si riporta ora la quantità di fibre di vetro prodotte annualmente divise per tipo di prodotto negli stessi anni.

Tabella 2.2. Prodotto finito (t/anno)

	2007	2008	2009	2010/06
Roving	31.828	35.043	21.704	15.196
Unifilo	20.346	11.459	6.230	4.415
Fili tagliati	15.861	14.332	1.921	857
Totale	68.035	60.834	29.855	20.468

La produzione di vetro fuso e di prodotti finiti nel 2009 ha subito un deciso calo dovuto in parte alla crisi economica mondiale ancora in corso che ha portato alla sospensione della attività di alcune linee produttive, sia per le attività di modifica impiantistica che hanno richiesto la fermata dei due forni.

2.2 Attività produttive

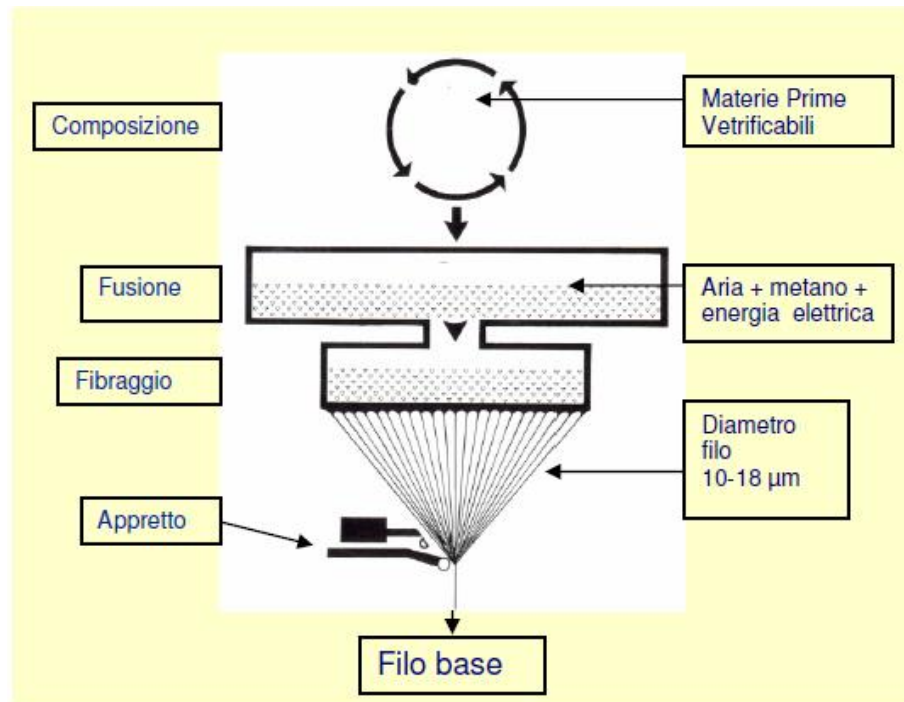


Figura 2.4. Schema logico della fusione e filatura del vetro

2.2.1 Miscela

Il vetro viene prodotto a partire da una miscela vetrificabile. La miscela viene preparata nell'area Composizione ed è composta principalmente dalle seguenti materie prime:

- Farina di quarzo (ossido di silicio)
- Calcite (carbonato di calcio)
- Caolino (ossido di alluminio)
- Dolomite Calcinata (ossido di magnesio)
- Ossido di calcio

La miscela così composta nella sezione composizione viene poi inviata tramite un sistema ad aria compressa alle infornatrici, dei sistemi meccanici a coclea attraverso i quali si regola la portata della miscela da inviare al forno.

2.2.2 Forno

Il forno fusorio è di tipo Unitmelter a produzione in continuo. Il riscaldamento del forno avviene attraverso la combustione di gas naturale e aria e con l'ausilio di elettrodi. La temperatura del vetro viene mantenuta attorno ai 1400-1500 °C. Il forno è poi dotato di un sistema di recupero calore che pre-riscalda l'aria comburente che alimenta i bruciatori.

2.2.3 Trasporto vetro liquido

Il vetro allo stato fuso deve poi essere trasportato attraverso canali riscaldati agli avancorpi dove sono posizionate le filiere per la filatura.

Questi canali vengono riscaldati per mantenere il vetro allo stato fuso attraverso dei bruciatori a gas naturale, che mantengono i canali ad una temperatura attorno ai 1400°C.

2.2.4 Filatura

Una volta che la miscela viene trasportata fino a dove sono posizionate le filiere per la filatura, il vetro fuso viene filato facendolo passare attraverso una piastra di platino con fori della dimensione voluta. Il filo di vetro prodotto dalla filiera ha un diametro variabile tra i 10 e i 18 µm.

Dopo che il vetro allo stato fuso viene trasportato fino alla filiera e vengano creati i filamenti di vetro a partire dal vetro fuso, i filamenti di vetro vengono bagnati dagli appretti.

2.2.5 Appretti

L'appretto è una dispersione acquosa di sostanze organiche ad una concentrazione variabile tra 0,3 e 8% in peso ed assolve tre funzioni fondamentali:

- **PROTEZIONE:** avvolge ogni filo elementare con un film protettivo che dona elasticità e flessibilità al vetro.
- **LUBRIFICAZIONE:** permette ai singoli fili di vetro di scorrere gli uni sugli altri senza creare rotture

- **PONTAGGIO:** permette il legame tra vetro e materiali plastici in fase di utilizzo del prodotto finito.

Per la preparazione degli appretti sono necessarie diverse materie prime organiche (MPO) che sono approvvigionate, secondo il volume utilizzato, attraverso autocarri, oppure in cisterne o fusti. Le Materie Prime Organiche principalmente utilizzate appartengono alle seguenti famiglie:

- acetati di polivinile
- resine poliestere, poliuretatiche, polipropileniche, epossidiche
- silani
- ausiliari (es. lubrificanti, tensioattivi, antistatici e plastificanti)

L'ottenimento del filo apprettato è un processo comune a tutti e tre i prodotti finiti. Dopo questa fase le tre produzioni si dividono.

Gli appretti vengono prodotti nello stabilimento in una sezione dedicata.

2.2.6 MAT- Unifilo

Da ciascuna filiera, i fili apprettati vengono depositati su un tappeto di formazione del materassino. La somma di tutti i fili lanciati da diverse filiere poste in successione forma un materassino di vetro ancora inconsistente ed umido.

Quindi si applica il legante che ha la funzione principale di legare un filo all'altro nei punti in cui si sovrappongono, donando al tappeto di filato consistenza e caratteristiche meccaniche.

Il materassino entra nelle stufe di essiccazione; in uscita viene rifilato sui bordi e avvolto su tubetti in cartone per la formazione di rotoli e imballato automaticamente.

2.2.7 Roving assemblato

Da ciascuna filiera i fili apprettati vengono avvolti su una manichetta in cartone da una bobinatrice, che raccoglie il filato e forma bobine. Le bobine sono quindi trasportate in automatico a stufe di essiccazione in cui il filato avvolto perde l'umidità in eccesso e avviene la polimerizzazione dell'appretto.

Le bobine passano quindi al reparto in cui in base alla specifica di produzione si assemblano un numero di bobine definito formando così la rocca. Le rocche così ottenute passano alla fase di imballaggio e stoccaggio per la spedizione.

2.3 Recuperi di energia principali attualmente in atto

Esistono al momento due principali recuperi di energia già installati e funzionanti all'interno dello stabilimento.

2.3.1 Pre-riscaldamento aria comburente nel forno

Nel forno avviene una combustione di gas naturale con aria comburente che mantiene il forno e il vetro fuso ad una temperatura di circa 1400°C. I gas combustibili prodotti all'interno del forno passano poi in un recuperatore che preriscalda l'aria comburente in ingresso ai bruciatori, recuperando parte dell'energia presente nei gas combustibili. Questo recuperatore raffredda i gas combustibili da una temperatura iniziale di circa 1400°C fino ad una temperatura di circa 700°C. Questi gas vengono poi miscelati con aria fresca ed espulsi in atmosfera.

2.3.2 Scambiatori sui camini del canale di trasporto

Il vetro fuso che viene prodotto all'interno del forno a partire dalla miscela viene poi trasportato in un canale fino ad arrivare alla parte di stabilimento in cui la miscela di vetro viene filata nelle filiere per creare il filato di vetro.

Questi canali devono essere mantenuti ad una temperatura sempre prossima ai 1400°C, in modo da mantenere il vetro che viene trasportato allo stato fuso. Per mantenere i canali in temperatura vengono utilizzati sempre dei bruciatori a gas naturale, che producono dei gas combustibili ad alta temperatura.

Sui camini di espulsione di questi gas combustibili prodotti dai bruciatori del canale esistono degli scambiatori di calore, che preriscaldano aria comburente che viene poi utilizzata dalle stufe di essiccazione per la produzione dell'unifilo.

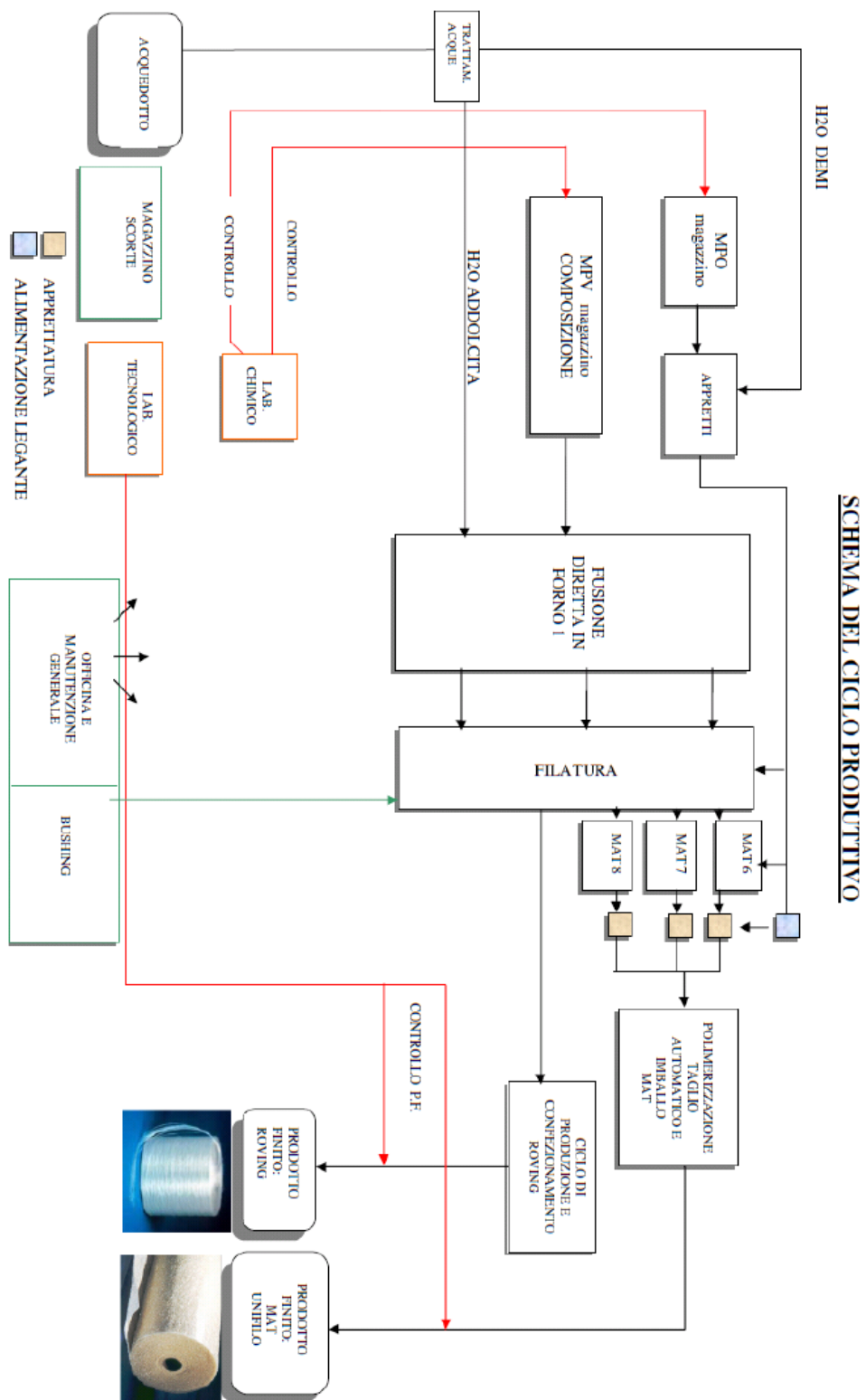


Figura 2.6. Schema logico di tutto il processo produttivo, comprende il processo di filatura e trattamento del filato, il laboratorio di formazione miscela e la produzione degli appretti. [1]

3 Analisi dei consumi

3.1 Consumi totali

Analizzando il processo di produzione dello stabilimento si evidenzia un elevato consumo di energia dovuto alle alte temperature di fusione della miscela del vetro e alle linee di prodotto che richiedono energia per il trasporto del vetro fuso mantenuto in temperatura, il raffreddamento durante la filatura, l'essiccazione dei prodotti attraverso le stufe e il vapore per la produzione degli appretti.

Per fondere la miscela è necessario portare il letto di vetro ad una temperatura di 1400°C. Per problemi di raffreddamento del forno e possibile solidificazione del vetro all'interno del forno stesso, questo è progettato in modo da funzionare in continuo per tutta la sua vita utile.

La produzione è quindi continua sulle 24h e ogni giorno dell'anno, il che significa che il profilo orario dei consumi sia pressoché costante.

Un parametro significativo da analizzare è il consumo totale di energia in MWh rispetto ad una tonnellata di prodotto finito. Questo parametro permette di identificare l'efficienza della produzione del prodotto finito.

Si riporta ora i consumi totali di energia elettrica e gas naturale in diversi anni di produzione.

Tabella 3.1. Consumi di energia elettrica e metano negli anni .

<i>En.Primaria</i>	CONSUMI (MWh)					
	2007	2008	2009	2010/06	2011	2012
En. Elettrica	67'167	57'219	35'008	23'356	60'282	56'227
Gas Naturale	356'779	279'957	172'220	85'802	219'808	208'598
TOT	423'946	337'176	207'228	109'158	280'090	264'824

Consumi totali anni 2007 - 2012

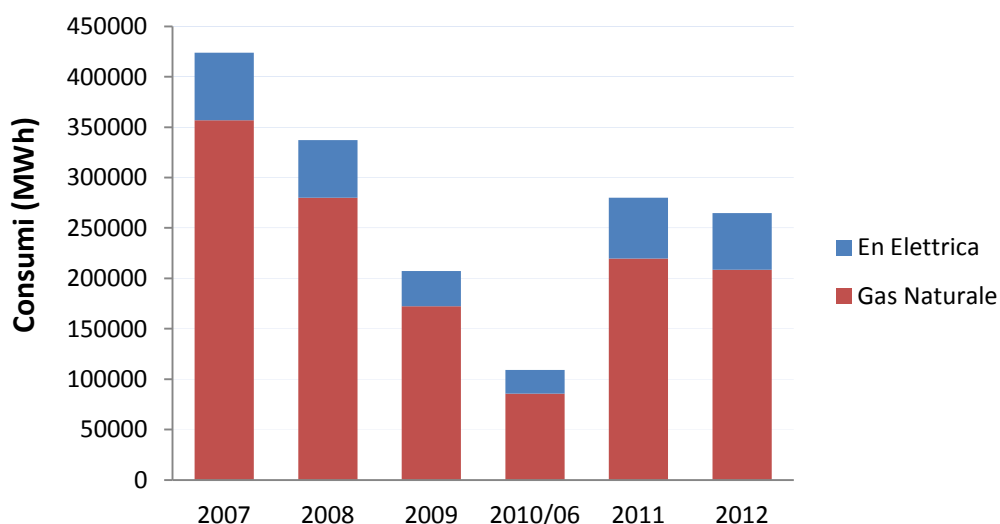


Figura 3.1. Grafico che rappresenta i consumi totali dello stabilimento negli anni 2007-2012.

Da questi dati è possibile notare che il maggiore consumo in termini di MWh e quindi di energia fornita allo stabilimento è quello di gas naturale. Questo era prevedibile dato che il processo chiave è quello della fusione della miscela di vetro e il forno di fusione del vetro è alimentato principalmente da gas naturale. Il dato del 2010 è un dato parziale riferito solo ai mesi di gennaio-giugno 2010, per questo motivo il consumo è nettamente inferiore rispetto agli altri anni, è comunque interessante osservare la proporzione en elettrica – gas naturale e successivamente il consumo per tonnellata di prodotto specifico, che essendo un dato rapportato alla produzione resta allineato agli altri nonostante sia riferito solo ad alcuni mesi.

Si riporta poi i consumi di energia elettrica e metano rispetto alle tonnellate di prodotto finito.

Tabella 3.2. Consumi rispetto alla tonnellata di prodotto finito.

<i>En.Primaria</i>	CONSUMI (MWh/t prodotto finito)					
	2007	2008	2009	2010/06	2011	2012
En. Elettrica	0.99	0.94	1.17	1.19	1.08	1.02
Gas Naturale	5.24	4.6	5.77	4.36	3.94	3.80
TOT	6.23	5.54	6.94	5.55	5.03	4.82

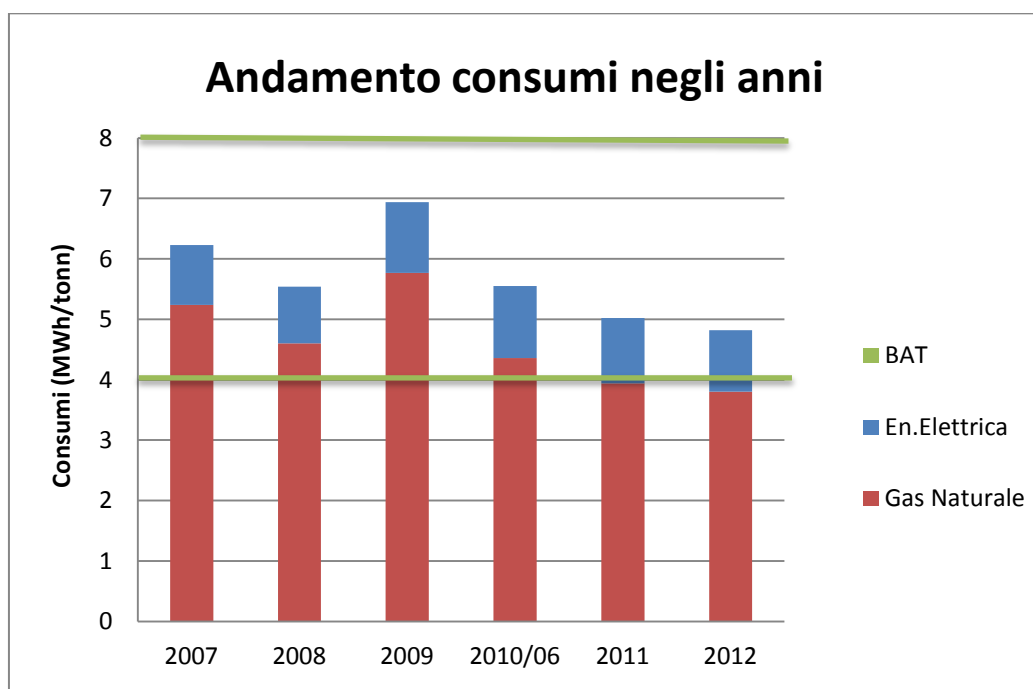


Figura 3.2. Figura che rappresenta l'andamento dei consumi riferiti alla tonnellata di prodotto finito e del livello della BAT di settore.

Questo parametro è di grande interesse in quanto ci fornisce non solo un indicazione sul consumo totale o la destinazione d'uso, ma sull'efficienza dell'utilizzo dell'energia per la produzione del prodotto finito.

Questo parametro dipende da molti fattori, è da tenere conto il fatto che nel passare dalla produzione in due forni alla produzione in un unico forno c'è una significativa diminuzione delle dispersioni termiche e conseguentemente un migliore utilizzo dell'energia termica. Inoltre quando lo stabilimento produce a

pieno carico, i consumi sono inferiori rispetto a quando si è costretti a parzializzare la produzione.

Abbiamo infatti una netta diminuzione dei consumi rispetto alla tonnellata di prodotto finito quando osserviamo il passaggio da 2009 al forno unico, che permette un migliore uso del metano utilizzato nel forno.

Notiamo poi che l'influenza maggiore sul consumo rispetto alla tonnellata di prodotto finito è sul consumo di gas naturale.

Abbiamo un picco in corrispondenza dell'anno 2009, a causa dell'interruzione della produzione dovuta al rifacimento dei forni e al passaggio al forno unico.

Si riporta ora il consumo totale riferito solo al consumo del forno rispetto ad una tonnellata di prodotto finito.

Il documento BAT italiano del 2006 indica valori compresi tra 4.2 e 8.3 MWh/ t vetro fuso come consumo energetico per tonnellata di prodotto finito nel settore della produzione del filato di vetro. Lo stabilimento è largamente all'interno del valore massimo previsto per i consumi.

Tabella 3.3 Consumi del forno su tonnellata di prodotto finito

<i>En.Primaria</i>	CONSUMI FORNO (MWh/t prodotto finito)					
	2007	2008	2009	2010/06	2011	2012
TOT	2.43	2.48	2.49	1.85	1.77	1.72

Consumi forno (MWh/tonn di prodotto finito)

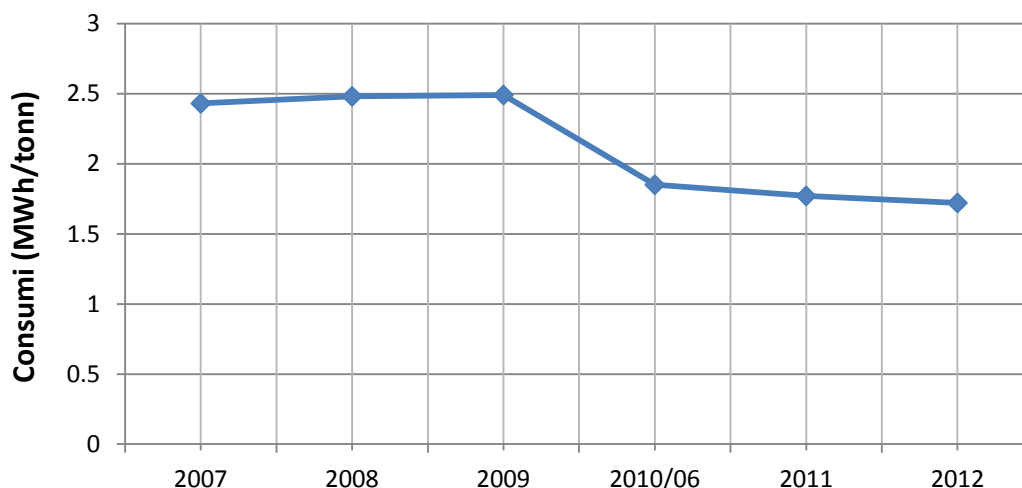


Figura 3.3. Grafico a punti che rappresenta l'andamento dei consumi di energia elettrica negli anni 2007-2012.

Analizzando i consumi totali di energia elettrica e metano relativi solo ai consumi del forno, si nota una netta diminuzione dei consumi dal 2009 al 2010, anno in cui si è passati dalla produzione su due forni alla produzione concentrata in un unico forno.

Si nota che i minori consumi di energia sul forno influenzano significativamente i consumi totali dello stabilimento rispetto alla quantità di prodotto finito, sottolineando il peso di questo componente come principale elemento energivoro del processo di produzione del filato di vetro.

3.2 Consumi di Energia Elettrica

Lo stabilimento è asservito da una linea principale da 132 kVolt trasformata da n° 2 trasformatori elettrici a bagno d'olio a 15.000 Volt e quindi presso le cabine elettriche fino a 400 Volt per l'utilizzo finale. L'Azienda inoltre è dotata di una linea d'emergenza di 15.000 Volt. E' presente un serbatoio di gasolio a servizio del gruppo elettrogeno che interviene in caso di mancanza di energia elettrica.

Per quanto riguarda i consumi di energia elettrica, la principale fonte di consumo è il forno con le relative filiere ed appoint électrique. Altre fonti di importanza non trascurabile sono le linee MAT, Roving, i condizionamenti e gruppi frigo, l'aria compressa. Al fine di un maggior controllo sui consumi interni è stata completata l'installazione di contatori parziali di energia elettrica sulle singole cabine di trasformazione. I dati rilevati sono automaticamente elaborati e inviati giornalmente alle funzioni interessate.

Si riporta un grafico dell'energia elettrica espressa in kWh consumati in ogni giorno dell'anno negli anni 2011 e 2012.

Energia Elettrica anni 2011-2012

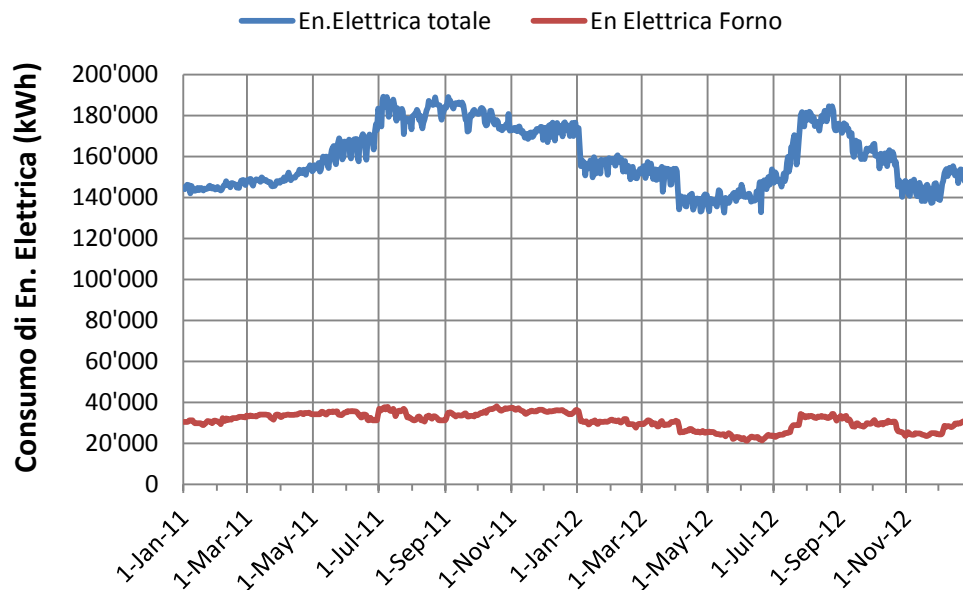


Figura 3.4. Grafico a linee che rappresenta il consumo di totale di energia elettrica e il consumo di energia elettrica relativo al solo forno 1 in ogni giorno per gli anni 2011-2012.

Analizzando i consumi totali di energia elettrica dello stabilimento in kWh per ogni giorno negli anni 2011 e 2012 notiamo un andamento stagionale abbastanza costante con picchi nella stagione estiva, dovuti ai maggiori consumi dei gruppi frigoriferi nei mesi estivi.

Abbiamo poi un conteggio dedicato del consumo di energia elettrica dovuto agli elettrodi presenti nel forno, questo costituisce circa il 20% dei consumi totali di energia elettrica dello stabilimento. Notiamo che il consumo dovuto agli elettrodi presenti nel forno è pressoché costante nell'arco dell'anno, confermando il fatto che l'aumento dei consumi nel periodo annuale è da imputare al consumo delle macchine frigorifere.

3.3 Consumi di gas naturale

Il consumo di gas naturale costituisce il maggior consumo di energia dello stabilimento. La più importante fonte di consumo di metano, come risulta sia dai dati storici che dai dati attuali, sono i forni; altre fonti di importanza significativa sono le tre linee MAT e la linea Roving. Di importanza secondaria sono le stufe del reparto Fili Tagliati e le centrali termiche. Nel corso del triennio 2004-2006 si è provveduto ad installare progressivamente contatori presso le principali utenze di gas metano, al fine di avere la possibilità di monitorare maggiormente i rispettivi consumi.

3.3.1 Profilo mensile dei consumi di gas naturale

Si analizza per prima cosa il profilo mensile dei consumi di gas naturale negli anni 2011 e 2012. Consideriamo che in questo periodo la fusione della miscela vetrificabile avviene in un solo forno completamente rifatto nel 2009 e denominato forno 1.

Osserviamo che il consumo di gas naturale presenta un andamento stagionale, abbiamo come prevedibile un maggior consumo di gas naturale nei mesi invernali rispetto ai mesi estivi.

Se osserviamo però l'andamento dei consumi di gas naturale relativi solo al forno per la fusione della miscela vetrificabile notiamo che questi consumi hanno un andamento piuttosto costante, con un leggero aumento nei mesi invernali.

L'aumento del consumo di gas naturale nei mesi invernali è dato quindi dal maggior consumo sulle utenze adibite al condizionamento dei reparti di filatura dove sono presenti delle UTA per il trattamento dell'aria in ingresso e dalle utenze di riscaldamento.

La leggera stagionalità dei consumi del forno principale può essere imputata sia alle maggiori dispersioni dovute alle temperature esterne più basse sia al fatto che durante la stagione invernale il gas naturale è di qualità inferiore, risultando in un maggior consumo di Nm^3 . Il consumo è segnato dai contatori in volume e viene qui riportato in kWh considerando un pci di 9.59 kW/Nm^3 .

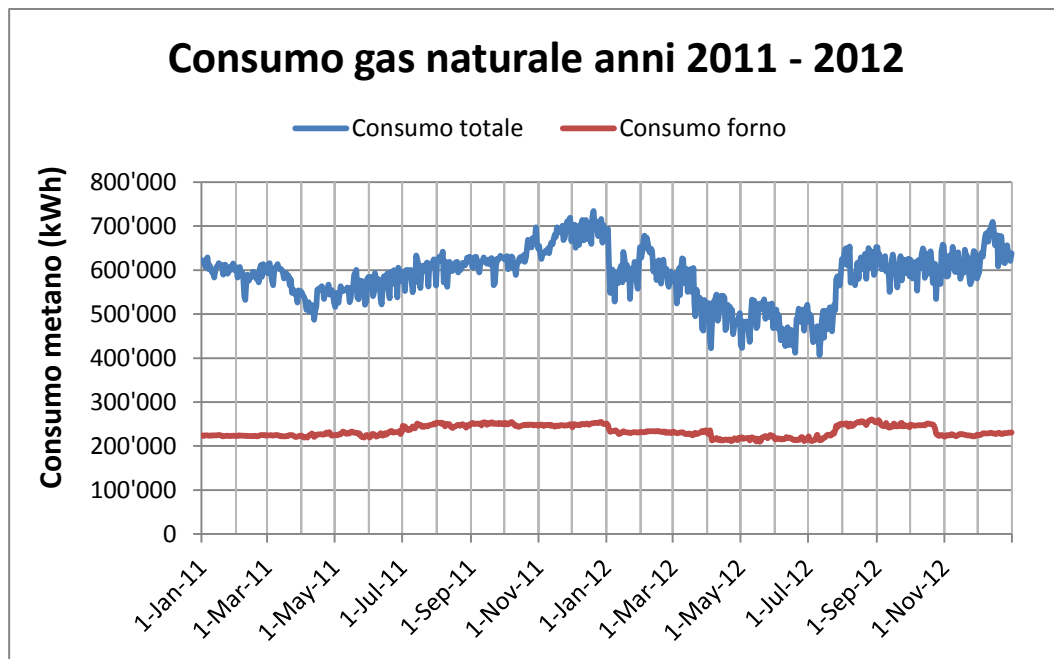


Figura 3.5. Consumi di gas naturale in kWh consumati in 1 giorno (24h) per ogni giorno degli anni 2011 e 2012. In blu sono rappresentati i consumi totali, in rosso quelli relativi solo al forno 1.

Si possono poi analizzare i consumi di gas negli anni 2011 e 2012 relativi alla caldaia a vapore. Notiamo in questo caso una forte stagionalità, in quanto la caldaia viene utilizzata principalmente per il riscaldamento invernale. Nei mesi estivi abbiamo comunque un consumo di metano, dovuto al consumo di vapore utilizzato per la produzione degli appetiti.



Figura 3.6. Consumi di gas naturale della caldaia per la produzione di vapore, in kWh consumati in 1 giorno (24h) per ogni giorno degli anni 2011 e 2012.

3.3.2 Destinazione d'uso dei consumi di gas naturale

Si analizza ora le principali destinazioni d'uso del consumo di gas naturale.

Tabella 3.4. Riassunto consumi di gas naturale per destinazione d'uso.

Consumi di gas naturale in Anno 2012	Sm ³	%
Forno 1 per l'ottenimento del vetro liquido	8'801'206	40.6
MAT6 essiccatoi di prima vetrificazione a valle del forno G	3'696'951	17.05
Canali vetro liquido	3'696'951	17.05
Condizionamento e termostattizzazione reparto roving	2'188'178	10.10
Essiccatoi per tappeti, bobine, fili tagliati	1'003'886	4.63
Caldaia a vapore per appretti	562'911	2.60
2 caldaia principale per condizionamento locali sala filatura marca OFFICINE DI SEVESO potenza 5813 kW	473'323	2.18
1 caldaia per riscaldare la mensa marca FERROLI della potenza 131 kW	317'608	1.47
Altro non identificato sottoponibile	313'338	1.45
Essiccatoi carta per roche	297'580	1.37
1 caldaia principale per il riscaldamento opificio marca OFFICINE DI SEVESO potenza 5813 kW	292'608	1.35

Impacchettamento pallet	18'733	0.1
1 caldaia per gli uffici marca BERETTA potenza 27 kW	10'474	0.05
2 robur per riscaldare la portineria della potenza complessiva di 7 kW ca.	5'431	0.03
TOTALE	21'679'178	-

Consumi annui di gas naturale (Sm³)

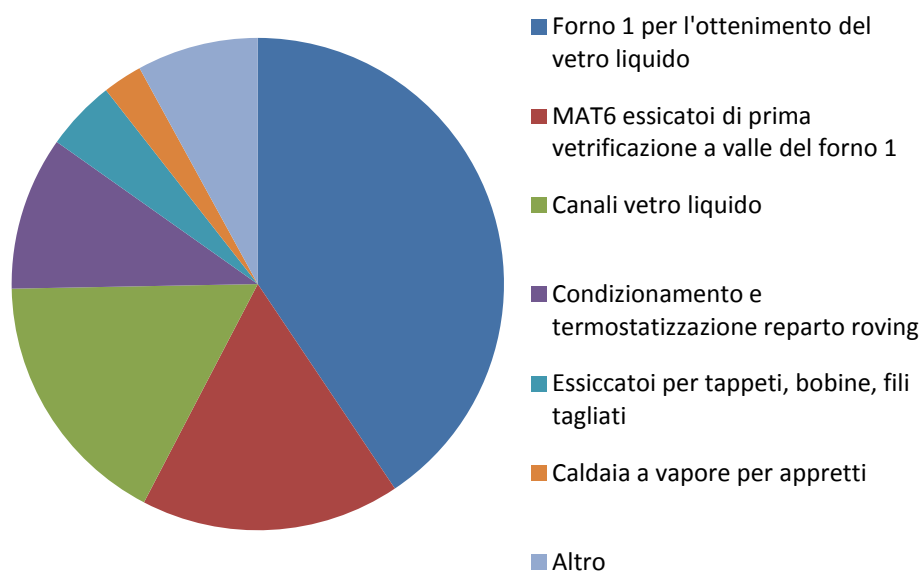


Figura 3.7. Grafico a torta rappresentante le destinazioni d'uso del consumo di gas naturale dello stabilimento nell'anno 2012.

Notiamo che il consumo di gas naturale nel forno è preponderante e consiste nel 40% del consumo totale di gas naturale annuo dello stabilimento. Si osserva che la grande maggioranza dei consumi sono dovuti a processi produttivi come i canali di trasporto del vetro liquido, gli essiccatoi del MAT e la termostattizzazione del reparto Roving.

Uno dei principali recuperi energetici attualmente in atto riguarda appunto i due consumi principali oltre al forno: i bruciatori Selas che mantengono in temperatura il canale di trasporto del vetro liquido e le stufe utilizzate per essiccare l'unifilo. Sono stati infatti installati su ognuno dei 4 bruciatori Selas del canale del vetro degli scambiatori di calore fumi di combustione/aria che

raffreddano i fumi derivati dalla combustione e pre-riscaldano l'aria fresca che verrà poi utilizzata nelle stufe del reparto unifilo.

Abbiamo poi una caldaia a vapore utilizzata sia per la produzione nel reparto appretti sia per il riscaldamento invernale e per la batteria calda delle UTA che mantengono le filiere ad una temperatura di circa 10°C e ad un'umidità fissa.

3.4 Conclusioni sull'analisi consumi

Il principale punto su cui ci si è concentrati è il processo più energivoro sia in termini di consumo di gas naturale che di consumo di energia elettrica, cioè il forno 1 di fusione della miscela vetrificabile, che da solo consuma il 20% dell'energia elettrica prodotta dallo stabilimento e il 40% dell'energia termica sotto forma di gas naturale.

La portata in massa dei fumi del forno è pari a 19'000 kg/h di gas combustibili alla temperatura iniziale di 1400°C. Il primo recupero di calore raffredda i fumi fino alla temperatura di 700°C. Abbiamo quindi a disposizione una portata di 19'000 kg/h di gas combustibili alla temperatura di 700°C. È possibile recuperare calore per il salto termico dalla temperatura di 700°C fino ad una temperatura circa di 210°C per evitare che raffreddando a temperature inferiori si verifichino delle condense acide che corrodano lo scambiatore di calore.

Un ulteriore possibile recupero di calore può essere effettuato a valle dei recuperatori posti sui camini dei bruciatori Selas utilizzati sul canale del vetro, dato che i gas combustibili vengono raffreddati fino ad una temperatura di 500°C, anche in questo caso esiste un possibile recupero termico ottenibile sfruttando il salto termico dai 500°C iniziali fino ad una temperatura sempre di 210°C per le stesse problematiche evidenziate nel primo caso.

Il principale obiettivo dell'audit è quello di recuperare con il miglior rendimento possibile i fumi prodotti dal forno 1, in modo da sottrarre l'energia ottenibile da questi agli altri consumi esistenti nello stabilimento.

Capitolo 4

Individuazione O.R.E (Opportunità di Recupero Energetico)

Analizzando i consumi dello stabilimento si nota che il maggior consumo di energia è dovuto all'uso di gas naturale come fonte di energia primaria. Il largo consumo di questo vettore energetico è dovuto alla natura della produzione, che si basa sulla fusione ad alta temperatura, così come ad altre attività secondarie che richiedono produzione di calore.

Il maggiore consumo di gas naturale è il forno di fusione del vetro, che è adesso un forno unico chiamato "Forno 1". E' nel processo di fusione della miscela vetrificabile che avviene la maggior parte del consumo di gas naturale.

E' quindi su questa fase di produzione che si concentra l'analisi di possibili recuperi energetici.

4.1 Recupero di calore sui gas combusti

Come abbiamo analizzato in precedenza, ci concentriamo sul consumo di gas naturale utilizzato nel forno per mantenerlo ad una temperatura attorno ai 1400°C. Questo avviene per mezzo di elettrodi e per mezzo di bruciatori a gas naturale.

I fumi prodotti dalla combustione del gas naturale nei bruciatori sono quindi all'interno del forno e dove si forma il vetro fuso ad una iniziale temperatura di 1400°C. Questi vengono poi raffreddati in un recuperatore fumi/aria che preriscalda l'aria comburente in ingresso ai bruciatori, e che effettua un primo recupero sui gas combusti portandoli da una temperatura di 1400°C ad una temperatura di 700°C.

Si ha quindi ora una portata di 19'000 kg/h di gas combusti alla temperatura di 700°C che vengono al momento miscelati con aria fresca attraverso dei ventilatori ed espulsi in atmosfera.

Effettuando varie misure di portata e composizione dei gas combusti si è deciso di raffreddare i gas fino ad una temperatura non inferiore ai 210°C per evitare eventuali problemi di condense acide e danneggiamenti allo scambiatore di calore sui fumi.

Abbiamo quindi una potenza sfruttabile di 3'130 kW termici disponibili grazie ad una portata di 19000 kg/h e un salto disponibile di 490°C, considerando un calore specifico di 1.21 kJ/kg K.

4.2 ORC (Organic Rankine Cycle)

Per poter sfruttare la potenza disponibile sui fumi su queste temperature si è pensato di introdurre un ORC, cioè un ciclo Rankine a fluido organico. Tipicamente il ciclo Rankine viene utilizzato con fluido di lavoro acqua e vapore, in questo caso il ciclo funziona con un fluido organico.

Il vantaggio di utilizzare un fluido organico nel ciclo Rankine è la possibilità di lavorare a temperature diverse rispetto ad un ciclo Rankine tradizionale, di modo da adattarlo ad una situazione di recupero di calore anzi che ad una centrale di produzione di energia elettrica.

In un ciclo Rankine a fluido organico esiste anche la possibilità di effettuare due cicli a cascata, scegliendo opportunamente i fluidi di lavoro organici, di modo che le loro proprietà permettano di lavorare sulle temperature disponibili.

In un ciclo Rankine organico a doppio stadio la condensazione del primo fluido organico coincide con l'evaporazione di un secondo fluido organico che espande in una seconda turbina, migliorando l'efficienza di produzione del ciclo.

L'utilizzo di questo ciclo permette di riutilizzare la potenza disponibile sui fumi del forno che viene adesso scartata e immessa in atmosfera per produrre energia elettrica grazie al ciclo termodinamico.

4.3 Soluzione 1: Cogenerazione, ORC, assorbitore

4.3.1 Descrizione tecnica

Questa soluzione prevede l'inserimento di:

- n° 1 Organic Rankine Cycle a doppio stadio
- n° 2 Cogeneratori alimentati a gas naturale
- n° 2 Caldaie a recupero per la produzione di vapore
- n° 1 Refrigeratore ad assorbimento alimentato a vapore
- n° 1 Refrigeratore ad assorbimento alimentato ad acqua calda

La prima soluzione ipotizzata comprende diversi interventi che permettono la produzione di energia elettrica e il recupero di calore, così come un risparmio sul consumo di energia elettrica dovuto ai gruppi frigoriferi.

Un ulteriore vantaggio di questa soluzione è la possibilità di rendere l'azienda più indipendente dal punto di vista energetico, garantendo una produzione di energia elettrica direttamente nello stabilimento.

Per il recupero del calore sui fumi del forno si è pensato di inserire un ciclo Rankine organico a doppio stadio, che produca energia elettrica con un rendimento totale pari a $\eta_{tot} = 22\%$.

Le potenze termiche in ingresso all'ORC sono:

- 3130 kW termici dal raffreddamento dei fumi prodotti dal forno
- 500 kW termici sul recupero dei fumi prodotti dai cogeneratori
- 900 kW termici dall'acqua calda ad alta temperatura anch'essa prodotta dai cogeneratori e utilizzata per il pre-riscaldamento del fluido organico a bassa temperatura.

La produzione di energia elettrica del ciclo sarà quindi di 1012 kW elettrici, secondo la formula:

$$P_{el} = P_{th} \cdot \eta_{tot}$$

Per rendere più indipendente l'azienda dal punto di vista della produzione di energia elettrica e per permettere un risparmio sul consumo di energia elettrica e di calore, si è pensato di inserire due cogeneratori a gas.

I cogeneratori producono sia energia elettrica che calore nelle seguenti forme:

- Produzione di energia elettrica per la potenza di 2000 kW elettrici ognuno.
- Produzione di gas combusti ad alta temperatura (circa 500°C) per una potenza di 978 kW termici ognuno.
- Produzione di acqua calda alla temperatura di 90°C per una potenza di 978 kW termici ognuno.
- Produzione di acqua da intercooler a 45°C per una potenza di 138 kW.

I cogeneratori hanno un rendimento elettrico $\eta_{cog} = 43.7\%$ e producono ognuno 2000 kW elettrici a fronte di un consumo di gas naturale di 478 Nm³/h e quindi una potenza termica in ingresso di 4586 kW. Producono poi ognuno 978 kW termici di acqua, 978 kW termici ad alta temperatura sui fumi e 138 kW di acqua a 40/45 °C dall'intercooler.

Le due caldaie a recupero per la produzione di vapore hanno come ingresso i fumi ad alta temperatura in uscita dai cogeneratori e li raffreddano producendo vapore.

L'assorbitore alimentato a vapore viene alimentato da 906 kW di vapore prodotti dalla caldaia a recupero e permette di risparmiare circa 181 kW elettrici considerando che i refrigeratori esistenti hanno un COP medio pari a 5.

L'assorbitore alimentato ad acqua viene alimentato da 1056 kW di acqua a 90°C prodotti dalla caldaia a recupero e permette di risparmiare circa 211 kW elettrici considerando che i refrigeratori esistenti hanno un COP medio pari a 5.

Si riporta ora lo schema logico dell'intervento, con i vari fluidi rappresentati in diversi colori e i vari componenti dell'impianto con le rispettive interazioni. Si riporta ora la legenda dei colori usati e dei rispettivi fluidi di lavoro utilizzati nello schema logico rappresentante la prima soluzione.

—————	Acqua calda (90°C)
—————	Acqua refrigerata (7°C)
—————	Acqua di torre (29 °C)
—————	Acqua intercooler (45°C)
—————	Vapore
—————	Fumi da Cogeneratore
—————	Fumi da forno vetro
- - - - -	Acqua calda - ritorno (75°C)
- - - - -	Acqua refrigerata - ritorno (12°C)
- - - - -	Acqua di torre - ritorno (35 °C)
- - - - -	Acqua intercooler - ritorno (40°C)

Figura 4.1. Legenda dei fluidi e dei loro stati.

Si riporta ora uno schema logico numerato della soluzione proposta in modo da poter descrivere punto per punto l'intervento da effettuare.

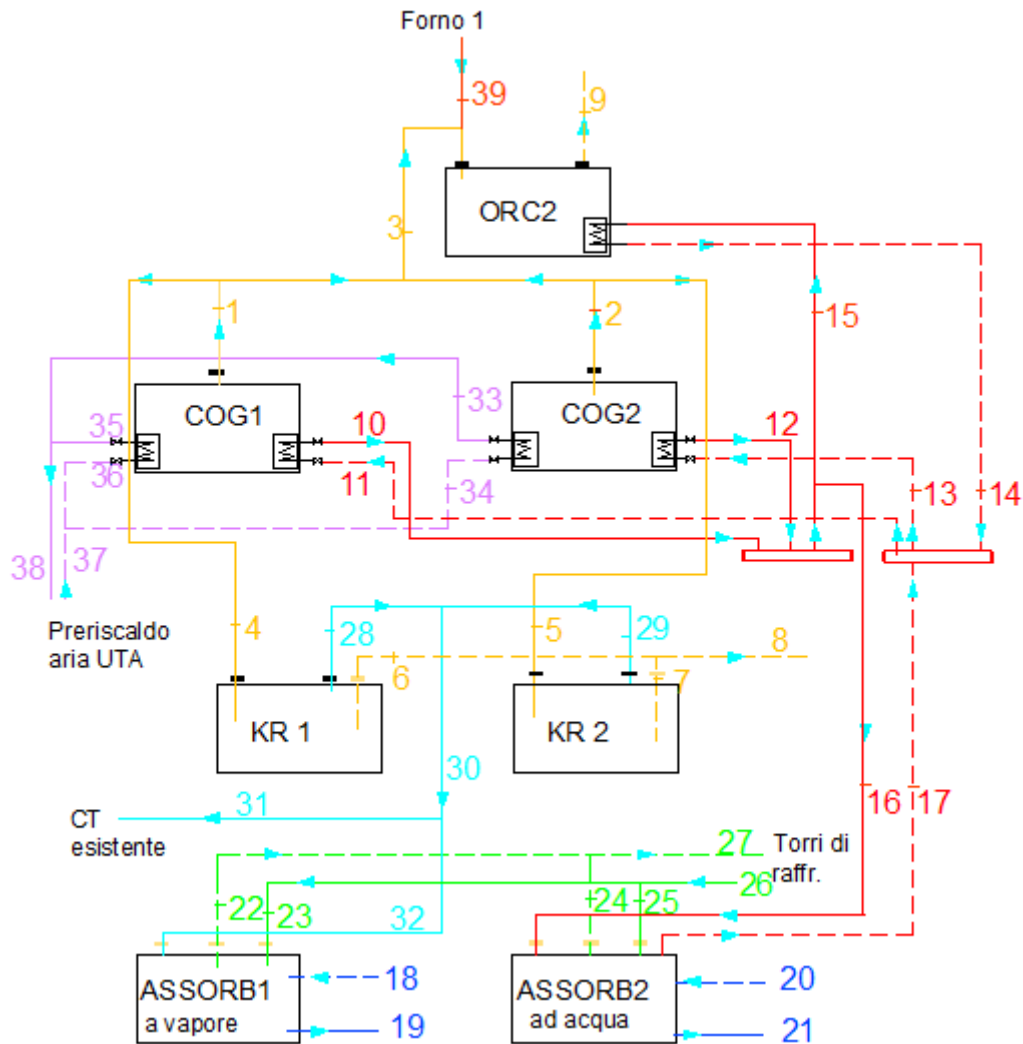


Figura 4.2. Schema logico della soluzione 2.

Descrizione per punti dei vari stadi dei fluidi di lavoro:

1. Gas combusti (fumi) in uscita dal cogeneratore 1 alla temperatura di circa 500°C.
2. Gas combusti (fumi) in uscita dal cogeneratore 2 alla temperatura di circa 500°C.

3. La parte di gas combustibili in uscita dai cogeneratori 1 e 2 che non viene inviata alle caldaie a recupero viene utilizzata come integrazione ai gas combustibili del forno in entrata all'ORC per alimentare il secondo stadio del ciclo multistadio a cascata in totale vengono inviati verso l'ORC 500kW termici.
4. Una parte dei gas combustibili prodotti dal cogeneratore 1 vengono inviati alla caldaia a recupero n°1 (KR1), un generatore di vapore indiretto.
5. Una parte dei gas combustibili prodotti dal cogeneratore 2 vengono inviati alla caldaia a recupero n°2 (KR2), un generatore di vapore indiretto.
6. I fumi raffreddati all'interno del generatore di vapore indiretto vengono convogliati assieme agli altri gas combustibili freddi.
7. I fumi raffreddati all'interno del generatore di vapore indiretto n°1 vengono convogliati assieme agli altri gas combustibili freddi.
8. I fumi raffreddati e convogliati assieme vengono poi espulsi in atmosfera tramite un camino.
9. Allo stesso modo i fumi sia provenienti dal forno che dai cogeneratori vengono espulsi in atmosfera dopo essere stati raffreddati all'interno dell'ORC.
10. Acqua calda alla temperatura di 90°C viene prodotta all'interno del cogeneratore n°1 e inviata al collettore di mandata dell'acqua calda.
11. Acqua alla temperatura di 75°C ritorna nello scambiatore del cogeneratore n°1 dal collettore di ritorno.
12. Acqua calda alla temperatura di 90°C viene prodotta all'interno del cogeneratore n°2 e inviata al collettore di mandata dell'acqua calda.
13. Acqua alla temperatura di 75°C ritorna nello scambiatore del cogeneratore n°2 dal collettore di ritorno.
14. Acqua alla temperatura di 75 °C di ritorno dallo scambiatore dell'ORC in cui pre-riscalda il secondo stadio del ciclo Rankine a due stadi.

15. Acqua calda alla temperatura di 90°C in ingresso all'ORC per il preriscaldamento del fluido organico del secondo stadio.
16. Acqua calda alla temperatura di 90°C in ingresso all'assorbitore alimentato ad acqua calda. Questa cede il calore necessario all'assorbitore per produrre acqua refrigerata.
17. Acqua alla temperatura di 75°C di ritorno verso il collettore di ritorno dell'acqua.
18. Ritorno dell'acqua refrigerata a 12°C verso il refrigeratore ad assorbimento alimentato a vapore.
19. Acqua refrigerata a 7°C prodotta dal refrigeratore ad assorbimento alimentato a vapore e inviata alle utenze.
20. Ritorno dell'acqua refrigerata a 12°C verso il refrigeratore ad assorbimento alimentato ad acqua calda.
21. Acqua refrigerata a 7°C prodotta dal refrigeratore ad assorbimento alimentato ad acqua calda e inviata alle utenze.
22. Ritorno verso le torri evaporative di acqua a 35°C utilizzata per disperdere calore di processo del ciclo ad assorbimento alimentato a vapore.
23. Mandata dell'acqua proveniente dalle torri evaporative verso l'assorbitore alimentato a vapore. Acqua raffreddata dalle torri alla temperatura di 28°C.
24. Ritorno verso le torri evaporative di acqua a 35°C utilizzata per disperdere calore di processo del ciclo ad assorbimento alimentato ad acqua calda.
25. Mandata dell'acqua proveniente dalle torri evaporative verso l'assorbitore alimentato ad acqua calda. Acqua raffreddata dalle torri alla temperatura di 28°C.
26. Mandata delle torri evaporative verso i due assorbitori dell'acqua di raffreddamento.

27. Ritorno dai due assorbitori verso torri evaporative dell'acqua di raffreddamento.
28. Il vapore viene prodotto dalla prima caldaia a recupero raffreddando i fumi prodotti dal primo cogeneratore.
29. Il vapore viene prodotto dalla seconda caldaia a recupero raffreddando i fumi prodotti dal primo cogeneratore.
30. Il vapore prodotto dalle due caldaie a recupero viene convogliato e inviato verso le utenze
31. Parte del vapore viene inviato alla centrale termica esistente ed utilizzato per riscaldamento e per la produzione degli appretti.
32. Parte del vapore viene inviato al frigorifero ad assorbimento alimentato a vapore per la produzione di acqua refrigerata.
33. Acqua a 45°C esce dallo scambiatore dell'intercooler del primo cogeneratore.
34. Acqua a 40°C entra nello scambiatore dell'intercooler del primo cogeneratore.
35. Acqua a 45°C esce dallo scambiatore dell'intercooler del secondo cogeneratore.
36. Acqua a 40°C entra nello scambiatore dell'intercooler del secondo cogeneratore.
37. Acqua a 40°C utilizzata per il pre-riscaldamento dell'aria in ingresso alle UTA ritorna verso il cogeneratore.
38. Acqua scaldata nell'intercooler dei due cogeneratori alla temperatura di 45°C viene inviata alle UTA per il preriscaldamento dell'aria in ingresso.

4.3.2 Analisi energetica

Si analizza ora l'energia in ingresso e in uscita nella nostra soluzione. Consideriamo inizialmente le potenze in gioco nelle due principali stagioni, considerando poi il tempo in un anno in cui queste potenze vengono utilizzate è possibile trarre un bilancio energetico annuale di consumi e di risparmi energetici.

Si analizza per prima cosa le potenze in ingresso alla soluzione scelta, la potenza ricavata dai fumi del forno è gratuita, essendo frutto di un recupero energetico, mentre la potenza in ingresso ai cogeneratori è da considerarsi una spesa aggiuntiva.

Tabella 4.1. Potenze in ingresso alla soluzione descritta precedentemente.

Potenze in ingresso	
Potenza da raffreddamento fumi del forno	3'130 kW termici
Potenza da metano in ingresso ai COG	956 Nm ³ /h = 9'168 kW termici
TOTALE	12'298 kW termici

Consideriamo ora i cogeneratori e la conversione della potenza termica in ingresso in potenza elettrica e termica. I valori riportati si riferiscono alla somma di entrambi i cogeneratori.

Tabella 3.4.2. Produzione cogeneratori.

Potenze prodotte dai cogeneratori	
Produzione di potenza elettrica	4000 kW elettrici
Produzione di fumi ad alta temperatura	1956 kW termici
Produzione di acqua a 90°C	1956 kW termici
Produzione di acqua da intercooler a 45°C	138 kW termici

Si analizza ora nel caso estivo l'uso delle potenze termiche prodotte dal cogeneratore e dai fumi prodotti dal forno 1.

Si analizza per prima cosa l'uso della potenza ottenuta raffreddando i fumi del forno di fusione della miscela vetrificabile.

Tabella 4.3. Utilizzo fumi prodotti dal forno di fusione del vetro.

Fonte	Utilizzo	Quantità
Fumi da forno 1	ORC	3130 kWt

Si analizza poi l'uso dei fumi ad alta temperatura prodotti dai cogeneratori.

Tabella 4.4. Utilizzo dei fumi prodotti dal cogeneratore.

Fonte	Utilizzo	Quantità
Fumi ad alta temperatura da cogeneratori	ORC	500 kWt
Fumi ad alta temperatura da cogeneratori	Caldaie a recupero per la produzione di vapore	1456 kWt
TOTALE		1956 kWt

Si analizza ora l'utilizzo del vapore prodotto nelle caldaie a recupero, inizialmente nel caso ESTIVO.

Tabella 4.5. Utilizzo vapore nella stagione estiva.

Fonte	Utilizzo	Quantità
Vapore da caldaie a recupero	Reparto produzione appretti	550 kWt
Vapore da caldaie a recupero	Refrigeratore ad assorbimento alimentato a vapore	906 kWt
TOTALE		1456 kWt

Si analizza ora l'utilizzo del vapore prodotto nelle caldaie a recupero nel caso INVERNALE.

Tabella 4.6. Utilizzo vapore nella stagione invernale

Fonte	Utilizzo	Quantità
Vapore da caldaie a recupero	Reparto produzione appretti	550 kWt
Vapore da caldaie a recupero	Inviato alla centrale termica esistente per riscaldamento	906 kWt
TOTALE		1456 kWt

Utilizzo dell'acqua a 90°C prodotta dai cogeneratori in fase ESTIVA.

Tabella 4.7. Utilizzo acqua a 90°C nella stagione estiva.

Fonte	Utilizzo	Quantità
Acqua a 90°C prodotta dai cogeneratori	ORC	900 kWt
Acqua a 90°C prodotta dai cogeneratori	Refrigeratore ad assorbimento alimentato ad acqua	1056 kWt
TOTALE		1456 kWt

Utilizzo dell'acqua a 90°C prodotta dai cogeneratori in fase INVERNALE.

Tabella 4.7. Utilizzo acqua a 90°C nella stagione invernale.

Fonte	Utilizzo	Quantità
Acqua a 90°C prodotta dai cogeneratori	ORC	900 kWt
Acqua a 90°C prodotta dai cogeneratori	Inviato alla centrale termica esistente per riscaldamento	1056 kWt
TOTALE		1456 kWt

Utilizzo di acqua a 45°C prodotta dagli intercooler dei cogeneratori (solo in fase invernale).

Tabella 4.8. Utilizzo acqua intercooler

Fonte	Utilizzo	Quantità
Acqua a 45°C da intercooler	Pre-riscaldamento aria in ingresso UTA	138 kWt

Per una maggiore chiarezza, si riporta ora l'elenco delle potenze elettriche prodotte e delle potenze termiche ripartite secondo l'utilizzo che ne viene fatto.

Si riporta per primo le potenze con i vari utilizzi che se ne fanno nella stagione estiva.

Tabella 4.9. Riassunto potenze per utilizzo nel caso estivo.

Utilizzo	Quantità
Elettricità prodotta dai cogeneratori	4000 kW _e
Elettricità prodotta dall'ORC	1012 kW _e – 846 kW _e
Potenza termica sotto forma di vapore utilizzata per la produzione degli apparecchi	550 kWt
Potenza termica sotto forma di vapore inviato al refrigeratore ad assorbimento alimentato a vapore	906 kWt
Potenza termica sotto forma di acqua a 90°C inviato al refrigeratore ad assorbimento alimentato ad acqua calda.	1056 kWt

Potenza termica sotto forma di vapore utilizzata per la produzione degli apparecchi si traduce in un risparmio di gas naturale che veniva utilizzato per la produzione di questo vapore, ora prodotto dalle caldaie a recupero.

La potenza termica inviata al refrigeratore ad assorbimento si traduce in un risparmio di potenza frigorifera e di conseguenza in un risparmio di energia elettrica che sarebbe stata altrimenti utilizzata per produrre potenza frigorifera.

Per quanto riguarda l'ORC, la potenza elettrica prodotta dipende dalla temperatura esterna, dato che il rendimento varia in funzione di questa, avremo quindi diverse potenze a secondo della temperatura esterna media del mese.

Si riporta poi le potenze con i vari utilizzi che se ne fanno nella stagione invernale.

Tabella 4.10. Riassunto potenze caso invernale.

Utilizzo	Quantità
Elettricità prodotta dai cogeneratori	4000 kWe
Elettricità prodotta dall'ORC	1012 kWe – 846 kWe
Potenza termica sotto forma di vapore utilizzata per la produzione degli appretti	550 kWt
Potenza termica sotto forma di vapore e acqua a 90°C inviato alla centrale termica per riscaldamento	1962 kWt
Potenza termica sotto forma di acqua a 45°C inviato per pre-riscaldamento dell'aria in ingresso alle UTA	138 kWt

Potenza termica sotto forma di vapore utilizzata per la produzione degli appretti e per riscaldamento si traduce in un risparmio di gas naturale che veniva utilizzato per la produzione di questo vapore, ora prodotto dalle caldaie a recupero.

Potenza termica sotto forma di acqua a 90°C e acqua a 45°C si traduce allo stesso modo in un risparmio di gas naturale che sarebbe stato utilizzato per produrre questa potenza termica.

Per quanto riguarda l'ORC, la potenza elettrica prodotta dipende dalla temperatura esterna, dato che il rendimento varia in funzione di questa, avremo quindi diverse potenze a secondo della temperatura esterna media del mese.

Si analizza ora l'energia annuale che viene prodotta sotto forma di energia elettrica, energia termica e frigorifera.

Per convertire da energia termica a energia frigorifera nel caso dei frigoriferi ad assorbimento, si può considerare in coefficiente di performance medio tra i due di 1 kWfrigorifero/kWtermico, questo significa che per ogni kW termico inviato ai refrigeratori ad assorbimento ottengo 1 kW di potenza frigorifera.

Per convertire da potenza a energia dobbiamo ovviamente considerare il tempo in cui questa potenza viene prodotta o risparmiata. Esprimendo l'energia in kWh/anno è sufficiente moltiplicare i kW per le ore di funzionamento nell'anno solare.

Si riporta quindi i calcoli dell'energia elettrica risparmiata in un anno con questa soluzione, a partire dai flussi di potenza descritti in precedenza e dalle ore di funzionamento dei macchinari corrispondenti nelle varie stagioni.

Tabella 4.11. Energia elettrica risparmiata in un anno.

Utilizzo	Stagione	Potenza	Ore di funzionamento (in 1 anno)	Energia
Energia elettrica prodotta dai cogeneratori	Estiva	4000 kWe	2475	9'900'000 kWh
Energia elettrica prodotta dai cogeneratori	Invernale	4000 kWe	2475	9'900'000 kWh
Energia elettrica prodotta dai cogeneratori	Intermedia	2000 kWe	2550	5'100'000 kWh
Energia elettrica prodotta dall'ORC	Annuale	1012 kWe – 846 kWe	7500	7'050'325 kWh
Energia elettrica risparmiata sui refrigeratori	Estiva	392 kWe*	2475	970'200 kWh
Energia elettrica risparmiata per spegnimento pompe e ventilatori ausiliari.	Annuale	50 kW + 40 kW+ 91 kW= 181 kW	7500	1'357'500 kWh
TOT En ELETT				34'278'025 kWh

Nel caso dell'ORC è stato un calcolo mese per mese della potenza prodotta in funzione della temperatura esterna media del mese per calcolare l'energia totale prodotta in un anno.

Nel caso dei cogeneratori, abbiamo considerato entrambi i cogeneratori in azione nelle stagioni estiva ed invernale, mentre un solo cogeneratore attivo nella stagione intermedia.

Nel caso dei refrigeratori, dato che inviamo 1962 kW termici ai refrigeratori ad assorbimento e consideriamo un EER medio dei due di 1 kWf/kWt, risparmiamo 1962 kW frigoriferi, considerando poi l'EER medio dei refrigeratori a compressione di vapore esistenti pari a 5, il risparmio di 1962 kW frigoriferi si traduce in 392 kW elettrici.

Si riporta poi l'energia termica risparmiata in un anno con questa soluzione, a partire dai flussi di potenza descritti in precedenza e dalle ore di funzionamento dei macchinari corrispondenti nelle varie stagioni.

Tabella 4.11. Energia termica risparmiata in un anno.

Utilizzo	Stagione	Potenza	Ore di funzionamento (in 1 anno)	Energia
Energia termica risparmiata su produzione appretti	Annuale	550 kW	7500	4'125'000 kWh
Energia termica risparmiata su riscaldamento	Invernale	1962 kW	2475	4'855'950 kWh
Energia termica risparmiata da intercooler	Invernale	138 kW	990	136'620 kWh
TOT En TERMICA				9'117'570 kWh

Le ore di funzionamento del recupero sull'intercooler sono state ridotte al 40% delle ore totali, non essendo possibile recuperare sempre il calore sulle UTA. Riassumendo avremo quindi un risparmio annuale di energia elettrica di 34'278'025 kWh e un risparmio annuale di energia termica di 9'117'570 kWh, questo a fronte di un consumo di 978 Nm³/h di gas naturale.

4.3.3 Analisi economica

Per effettuare l'analisi economica dobbiamo considerare i costi e i risparmi annui. Come costi consideriamo l'investimento iniziale come costo fisso iniziale, i consumi di gas naturale, le accise sulla produzione di energia elettrica e i costi di manutenzione. Come risparmi consideriamo i risparmi di energia elettrica, metano e i ricavi dai certificati bianchi.

Si analizza per prima cosa i risparmi di energia per quantificarli in effettivi risparmi economici. Per quantificare il risparmio economico corrispondente ad un risparmio di energia elettrica, abbiamo bisogno di quantificare il prezzo dell'energia elettrica che deve affrontare l'azienda secondo il proprio contratto. Il prezzo di acquisto dell'energia elettrica dell'azienda è di 0.1417 €/kWh, mentre quello di acquisto del gas naturale è di 0.35 €/Nm³.

Si riporta quindi i risparmi annuali dovuti al risparmio di energia elettrica. La produzione di energia elettrica dell'ORC e dei cogeneratori si trasforma in un risparmio di energia elettrica dato che non devo acquistare l'energia che produco e quindi in un risparmio economico così come il risparmio di energia elettrica spesa sui refrigeratori e sulle pompe si trasforma in un risparmio economico dato che non devo acquistare dalla rete l'energia che spenderò in meno.

Tabella 4.12. Risparmio economico dovuto al risparmio di energia elettrica in un anno.

Utilizzo	Energia	Costo specifico	Risparmio
Energia elettrica prodotta dai cogeneratori	9'900'000 kWh	0.1417 €/kWh	1'402'830 €
Energia elettrica prodotta dai cogeneratori	9'900'000 kWh	0.1417 €/kWh	1'402'830 €
Energia elettrica prodotta dai cogeneratori	5'100'000 kWh	0.1417 €/kWh	722'670 €
Energia elettrica prodotta dall'ORC	7'050'325 kWh	0.1417 €/kWh	999'031 €
Energia elettrica risparmiata sui refrigeratori	970'200 kWh	0.1417 €/kWh	137'477 €

Energia elettrica risparmiata per spegnimento pompe e ventilatori ausiliari.	1'357'500 kWh	0.1417 €/kWh	192'358 €
--	---------------	--------------	-----------

TOT En ELETT	34'278'025 kWh	0.1417 €/kWh	4'857'196 €
---------------------	-----------------------	---------------------	--------------------

Si riporta quindi i risparmi annuali dovuti al risparmio di energia termica. La produzione di energia termica dell'ORC e dei cogeneratori si trasforma in un risparmio economico dato che non devo acquistare il gas naturale corrispondente a quell'energia termica. In questo caso la conversione da effettuare deve tenere in considerazione la spesa di gas naturale che avremmo con una caldaia per produrre la stessa energia termica. Dobbiamo quindi considerare il potere calorifico inferiore medio del gas naturale, fissato a 9.59 kWh/Nm³ e il rendimento medio della centrale termica fissato a 0.9. A partire dai kWh termici dobbiamo quindi considerare i kWh che dovrebbero essere stati prodotti in una centrale termica con rendimento del 90%, dividiamo quindi per prima cosa i kWh risparmiati per 0.9. A questo punto consideriamo il risparmio di Nm³ corrispondenti ai kWh così trovati. Una volta che conosciamo i Nm³ corrispondenti a quel risparmio di energia si può calcolare il risparmio economico considerando che all'azienda un Nm³ di metano costa 0.35 €. Si riporta quindi la tabella con i calcoli descritti prima.

Tabella 4.12. Risparmio economico dovuto al risparmio di energia termica in un anno.

Utilizzo	Energia	Costo specifico	Risparmio
Energia termica risparmiata su produzione appretti	4'125'000 kWh	0.35 €/Nm ³	167'275 €
Energia termica risparmiata su riscaldamento	4'855'950 kWh	0.35 €/Nm ³	196'916 €
Energia termica risparmiata da intercooler	136'620 kWh	0.35 €/Nm ³	5'540 €
TOT En TERMICA	9'117'570 kWh	0.35 €/Nm³	369'731 €

Si riporta quindi la tabella riassuntiva dei risparmi di energia elettrica e gas naturale

Tabella 4.13. Riassunto dei risparmi annuali.

Utilizzo	Energia	Costo specifico	Risparmio
TOT En ELETT	34'278'025 kWh	0.1417 €/kWh	4'857'196 €
TOT En TERMICA	9'117'570 kWh	0.35 €/Nm ³	369'731 €
TOT Annuale			5'226'927 €

Si riporta poi i risparmi dovuti a certificati bianchi per i cogeneratori e i due stadi del ciclo ORC. Questi verranno garantiti in alcuni casi per 5 anni e in altri per 10.

Tabella 4.14. Risparmi annuali dovuti ai certificati bianchi.

Utilizzo	Anni	Risparmi
Cogeneratori	10	186'911 €
ORC	5	284'978 €
ORC 2	5	812'608 €
TOT Annuale		1'284'496 €

Dobbiamo poi considerare come spese annuali quelle dovute all'acquisto di gas naturale per il funzionamento dei cogeneratori, che consumano 956 Nm³/h di gas naturale per circa 7500 ore annue, se consideriamo sempre 0.35 €/Nm³, abbiamo un costo annuo di 2'509'500 €.

Dobbiamo poi aggiungere un costo annuo per accise sulla produzione di energia, manutenzione e consumo di urea per un totale di 406'140 € annui.

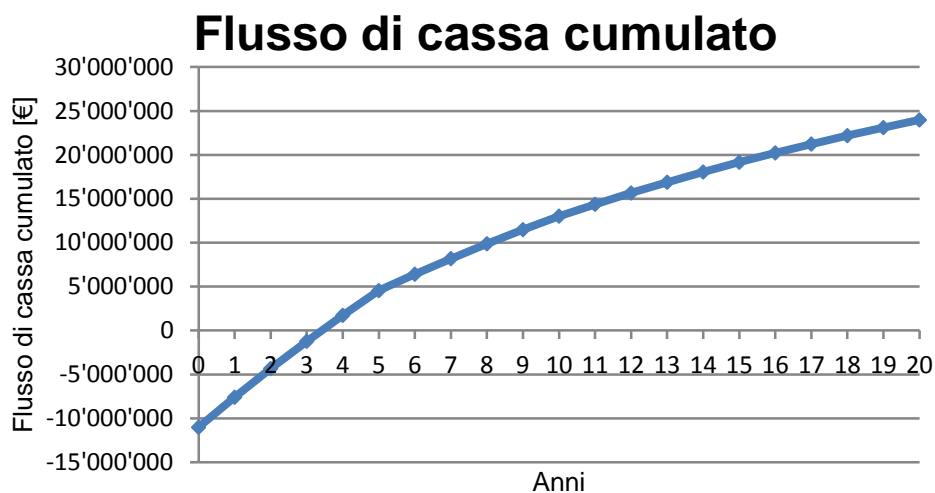
Il costo di investimento totale ammonta a circa 11'030'000 €.

Visualizziamo quindi la tabella riassuntiva di costi e risparmi annuali per poi verificare il tempo di ritorno dell'investimento.

Tabella 4.15. Risparmio netto annuo.

Risparmi/Costi	Ammontare in euro
Risparmi annui di energia	5'226'927 €
Ricavi annui da certificati bianchi	1'284'496 €
Costi annui per consumo di gas naturale	- 2'509'500 €
Costi annui per accise, urea, manutenzione	- 406'140 €
TOTALE RISPARMIO NETTO	3'595'783 €

L'investimento iniziale comporta un costo di 11'030'000 €, il ritorno è quindi stimato in 3.07 anni.



Il tempo di ritorno dell'investimento è basso, il che indica che la soluzione identificata è fattibile economicamente, il costo iniziale di investimento è però molto ingente a causa delle diverse tecnologie impiegate e le varie modifiche che devono essere apportate agli impianti esistenti.

4.3 Soluzione 2: ORC con recupero su forno e canali del vetro.

La prima soluzione analizzata come opportunità di recupero energetico prevedeva l'installazione di due cogeneratori, un ciclo ORC a doppio stadio, due refrigeratori ad assorbimento e due caldaie a recupero.

La complessità di questa soluzione comporta un investimento iniziale molto ingente, è stata quindi esplorata una seconda soluzione che prevedeva il solo recupero termico ove possibile, evitando l'inserimento di cogeneratori che richiedevano un ingresso e quindi un costo aggiuntivo costante di gas naturale per poter funzionare.

A questo punto la fonte principale di energia sono i gas combusti alla temperatura di 700 °C che vengono prodotti dal forno di fusione della miscela vetrificabile. Questa portata di fumi a 700°C può essere raffreddata creando una fonte di calore gratuita.

Si è quindi pensato di evitare l'installazione dei cogeneratori e di alimentare il ciclo Rankine a fluido organico (ORC) solamente con la potenza termica ricavata dai fumi in uscita dal forno 1.

Nel primo caso però l'ORC aveva una maggiore potenza disponibile in ingresso, che dava la possibilità di effettuare due stadi di espansione con due diversi fluidi organici. In questo caso la potenza disponibile in ingresso all'ORC non è sufficiente per alimentare il doppio stadio del ciclo, è necessario pensare ad un ulteriore ingresso possibile di potenza termica.

A questo punto si è analizzata la possibilità di effettuare un secondo recupero termico su un'altra delle principali destinazioni d'uso del consumo di gas naturale, i bruciatori posti sul canale di trasporto del vetro liquido alle filiere.

L'obiettivo di questa soluzione è quindi di recuperare tutta l'energia spesa per la combustione del gas naturale sia nel forno che sui canali di trasporto.

4.3.1 Soluzione tecnica e fattibilità

Si riporta ora uno schema logico della soluzione per come è stata pensata, quello che rappresentato è solo uno schema logico di come i fluidi interagiscono tra di loro e non un disegno tecnico. Non sono infatti riportati gli scambiatori di calore con la loro effettiva forma e non sono riportate valvole, controlli o dispositivi di misura.

Lo schema è numerato per poter descrivere con chiarezza punto per punto la soluzione tecnica.

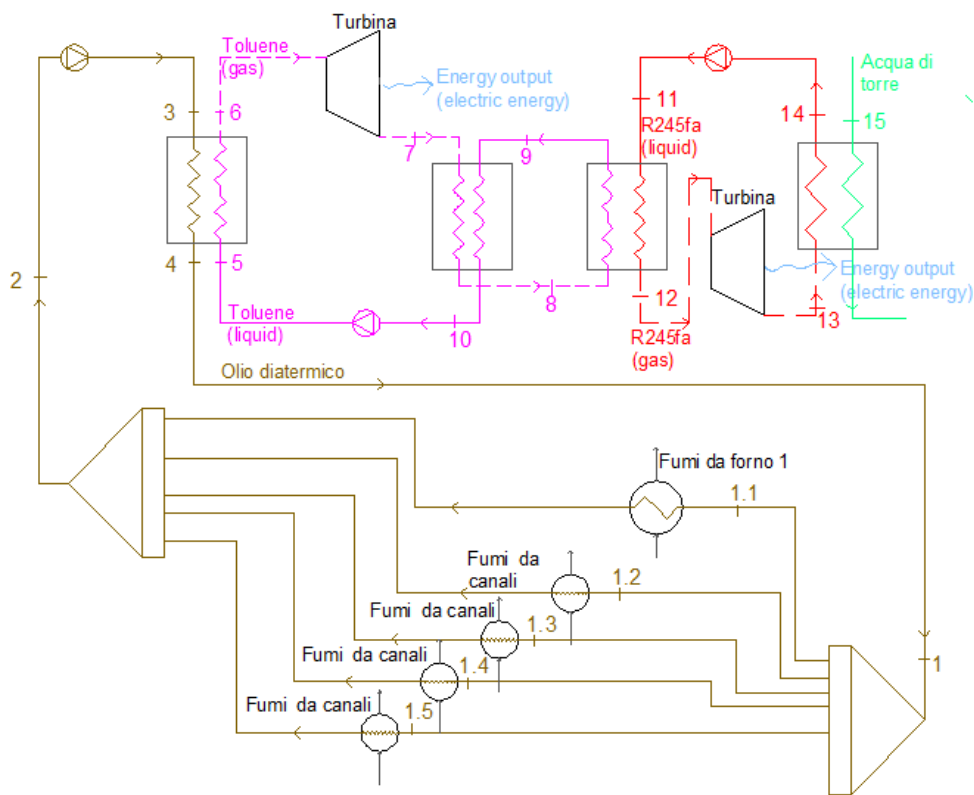


Figura 4.3. Schema logico della soluzione 2.

1 - L'olio diatermico raffreddato fino alla temperatura di circa 197°C nello scambiatore di calore olio diatermico/toluene e viene poi diviso in 5 parti.

1.1 – Una parte dell'olio diatermico viene inviata ad uno scambiatore di calore posizionato sull'uscita dei gas combusti dal forno 1 e scaldato dai gas combusti alla temperatura di circa 700°C.

1.2 / 1.3 / 1.4 / 1.5 – Una parte dell'olio diatermico viene inviata ad uno scambiatore di calore posizionato sul camino che espelle i gas combusti prodotti dai bruciatori posti sul canale di trasporto del vetro fuso, il nostro scambiatore di calore viene posizionato a valle di scambiatori di calore esistenti e i fumi entrano nello scambiatore ad una temperatura di circa 500°C.

2 – L'olio diatermico scaldato alla temperatura di circa 328 °C viene poi trasportato fino ad uno scambiatore di calore olio diatermico/toluene.

- 3 – L'olio diatermico scambia calore con il toluene, questo scambiatore funge da caldaia a calore indiretto che alimenta entrambi i cicli Rankine a fluido organico.
- 4 – L'olio diatermico è alla temperatura di circa 198°C all'uscita dello scambiatore di calore tra olio diatermico e toluene.
- 5 – Il toluene liquido ad una temperatura di circa 170°C viene inviato allo scambiatore di calore olio diatermico/toluene.
- 6 – Il toluene evapora all'interno dello scambiatore di calore olio diatermico/toluene e all'uscita ho quindi toluene sotto forma di gas alla temperatura di 253°C. Viene poi inviato ad una turbina per la produzione di energia elettrica.
- 7 – Il toluene espande in turbina producendo energia elettrica.
- 8 – Il toluene ancora sotto forma di gas pre-riscalda il toluene liquido e entra nello scambiatore toluene/R245fa alla temperatura di 137°C.
- 9 – Il toluene condensa nello scambiatore toluene/R245fa e viene inviato nello scambiatore intermedio toluene/toluene per essere pre-riscaldato.
- 10 – Il toluene pre-riscaldato nello scambiatore intermedio ritorna verso lo scambiatore olio diatermico/toluene.
- 11 – Il fluido refrigerante R245fa allo stato liquido entra nello scambiatore di calore toluene/R245fa che funge da caldaia a calore indiretto che alimenta il secondo stadio del ciclo ORC.
- 12 – L'R245fa esce dallo scambiatore di calore toluene/R245fa sotto forma di gas e alla temperatura di circa 130°C e viene inviato alla seconda turbina per la produzione di energia elettrica.
- 13 – L'R245fa espande in turbina producendo energia elettrica e viene poi inviato ad un condensatore ad acqua.
- 14 – L'R245fa viene condensato e ritorna allo scambiatore toluene/R245fa.
- 15 – L'R245fa viene condensato ad acqua grazie all'acqua proveniente dalle torri evaporative.

Essendo il ciclo attivo tutto l'anno sarà possibile avere acqua di raffreddamento proveniente dalle torri evaporative tanto più fredda quanto minore sarà la temperatura esterna. L'espansione del fluido in turbina sarà tanto maggiore quanto posso condensare a temperatura bassa, avremo quindi un rendimento variabile con la temperatura esterna in maniera inversamente proporzionale.

La soluzione appena descritta comporta una serie di problemi logistici per quanto riguarda gli scambiatori da installare sui camini dei bruciatori del canale di trasporto della miscela vetrificabile. Il primo problema riguarda il posizionamento degli scambiatori di calore. I camini sono posti sul tetto di un capannone, a valle degli scambiatori di calore esistenti all'interno del capannone. Per posizionare i nostri scambiatori a valle degli scambiatori di calore esistenti sarebbe necessario appoggiarli sul tetto del capannone, questo è rischioso dal punto di vista strutturale dato che non si conosce il carico accidentale del tetto. Si rende necessario quindi ampliare la struttura esistente in ferro presente all'interno del capannone prolungandola fino oltre il tetto. Questa operazione è fattibile ma comporta costi e precauzioni aggiuntive.

Esiste poi un problema maggiore per quanto riguarda il trasporto dei tubi contenenti l'olio diatermico che devono viaggiare a partire dai quattro scambiatori posti sui quattro camini fino all'ORC. L'olio scelto in questo caso è Therminol 72, che resiste fino a 350 °C senza evaporare. Il problema riguardante il trasporto dell'olio diatermico deriva dall'approvazione di questo intervento da parte dei vigili del fuoco. L'olio diatermico viene considerato materiale pericoloso e il suo stoccaggio o trasporto sopra ad una certa quantità rende l'attività soggetta a controllo da parte dei vigili del fuoco. Il trasporto delle quantità necessarie di olio per un percorso all'interno del capannone fino agli scambiatori sui camini e ritorno verso l'ORC è stato giudicato troppo pericoloso e quindi non approvato da parte dei vigili del fuoco.

Per questo motivo questa soluzione è stata scartata a causa della mancanza di fattibilità tecnica dell'intervento.

4.3.2 Analisi energetica

Si analizza ora l'energia in ingresso e in uscita nella nostra soluzione. A differenza della prima soluzione, in questo caso non si hanno consumi di combustibili per alimentare il ciclo ma utilizzo esclusivamente calore di recupero che viene prodotto indipendentemente dal ciclo. Inoltre in questo caso ho solamente una produzione di energia elettrica e nessun risparmio in termini di gas naturale per riscaldamento o produzione di vapore.

Come già sottolineato nella descrizione tecnica dell'intervento, la potenza in ingresso al ciclo è pressoché costante, cambia però il rendimento del ciclo ORC. Il rendimento del ciclo Rankine dipende infatti dalla temperatura a cui è possibile condensare utilizzando l'acqua proveniente dalle torri evaporative.

Questa temperatura, se si utilizzano appunto delle torri evaporative, scende al diminuire della temperatura esterna. Si avrà quindi un miglior rendimento del ciclo quando la temperatura esterna è inferiore e quindi nelle stagioni invernali. Si analizzino gli ingressi di energia termica provenienti dal canale sui fumi sia dai fumi provenienti dal forno che dai camini sul canale di trasporto del vetro fuso. Si riporta la tabella con i vari salti termici disponibili per il recupero energetico dei gas combusti.

Tabella 4.16. Potenze disponibili dal recupero gas combusti.

Fonte	T ingresso fumi	T uscita fumi	Portata	Potenza disponibile
Forno 1	700 °C	210°C	19000 kg/h	3130 kW
Camino 1	620 °C	210°C	1787.76 kg/h	246 kW
Camino 2	420 °C	210°C	1578.40 kg/h	111 kW
Camino 3	420 °C	210°C	1294.80 kg/h	91 kW
Camino 4	430 °C	210°C	1000.80 kg/h	74 kW
TOTALE				3652 kW

Si ottiene quindi una potenza totale in ingresso di 3652 kW termici, da questi è possibile ricavare la produzione di energia elettrica conoscendo il rendimento totale dell'ORC. Il rendimento totale dell'ORC, compreso il rendimento elettromeccanico della turbina e gli ausiliari, è compreso tra il 20.8% quando la temperatura dell'acqua proveniente dalle torri è minima e 20% quando la temperatura dell'acqua proveniente è massima.

Si riporta quindi la tabella con i rendimenti e la potenza elettrica massima e minima prodotta dall'ORC.

Tabella 4.17. Rendimento elettrico e relativa potenza prodotta.

Temperatura torri	Rendimento totale ORC	Potenza termica in ingresso	Potenza elettrica in uscita
12 °C	20.81 %	3652 kW	760 kW
30 °C	20%	3652 kW	730 kW

Si riportano ora i calcoli dell'energia prodotta per i vari mesi dell'anno.

Tabella 4.18. Energia elettrica prodotta in un anno dall'ORC.

	gg mese	Test media	T torri	Pot. ORC	ore di lavoro	Energia
gennaio	31	2.2 °C	12 °C	760 kW	696.4	529'425.5 kWh
febbraio	28	5.3 °C	14 °C	757 kW	629.0	476'080.7 kWh
marzo	31	9.6 °C	16 °C	753 kW	696.4	524'753.1 kWh
aprile	30	15 °C	20 °C	747 kW	674.0	503'304.0 kWh
maggio	31	20.3 °C	22 °C	743 kW	696.4	517'744.7 kWh
giugno	30	21.7 °C	25 °C	738 kW	674.0	497'652.0 kWh
luglio	31	23.2 °C	27 °C	735 kW	696.4	511'904.2 kWh
agosto	31	25.6 °C	27 °C	735 kW	696.4	511'904.2 kWh
settembre	30	21.2 °C	22 °C	743 kW	674.0	501'043.2 kWh
ottobre	31	14.1 °C	20 °C	747 kW	696.4	520'080.8 kWh
novembre	30	7.5 °C	16 °C	753 kW	674.0	507'825.6 kWh
dicembre	31	4.1 °C	15 °C	755 kW	696.4	525'921.2 kWh
TOTALE						6'127'639 kWh

Si avrà quindi una produzione di 6'127'639 kWh elettrici ogni anno che si traducono in un risparmio in euro sull'acquisto di energia elettrica.

Non si hanno ulteriori consumi di energia elettrica dato che il consumo degli ausiliari è già stato incluso. Esiste poi un ulteriore risparmio dovuto allo spegnimento dei ventilatori sul condotto dei fumi del forno pari a 606'390 kWh elettrici ogni anno.

4.3.3 Analisi economica

E' necessario analizzare ora i risparmi annui che otteniamo con la seconda soluzione esaminata, come descritto in precedenza il costo che affronta l'azienda per l'acquisto dell'energia elettrica è di 0.1413 €/kWh, l'energia elettrica prodotta in un anno si traduce in un risparmio sull'acquisto di energia elettrica. Esiste poi un risparmio di energia elettrica dovuto allo spegnimento dei ventilatori per l'espulsione dei fumi del forno 1.

Si aggiunge poi una quota di risparmi per i primi 5 anni dovuta all'emissione di certificati bianchi, valutati a circa 70 €/MWh elettrico prodotto. Il 100% dell'energia elettrica prodotta dall'ORC è riconoscibile per i certificati bianchi. Si riporta quindi la tabella dei risparmi prodotti in un anno con questa soluzione.

Tabella 4.19. Risparmi annui relativi alla soluzione 2.

Utilizzo	Energia	Costo specifico	Risparmio
Energia elettrica prodotta dall'ORC	6'127'639 kWh	0.1417 €/kWh	868'287 €
Energia elettrica risparmiata sui ventilatori	606'390 kWh	0.1417 €/kWh	85'925.5 €
Risparmio dovuto ai certificati bianchi	6'127'639 kWh	0.07 €/kWh	428'934.8 €
TOTALE			1'383'147 €

Si riportano poi i costi annuali dovuti a manutenzione e accise sulla produzione di energia elettrica.

Per la manutenzione il costo è stato stimato attorno agli 0.01 €/kWh elettrico prodotto dall'ORC

Tabella 4.20. Costi da affrontare in un anno per la soluzione 2.

Utilizzo	Energia	Costo specifico	Costo
Costi annuali dovuti alla manutenzione	6'127'639 kWh	0.01 €/kWh	- 61'276 €
Costi annuali dovuti alle accise per produzione <200.000 kWe al mese	2'400'000 kWh	0.0125 €/kWh	- 30'000 €
Costi annuali dovuti alle accise per produzione >200.000 kWe al mese	3'727'639 kWh	0.0075 €/kWh	- 27'957 €
TOTALE COSTI			-119'234 €

Facendo un bilancio annuale si avrà quindi:

Tabella 4.21. Bilancio annuale soluzione 2.

Utilizzo	Risparmio
Risparmi annui	1'383'147 €
Costi annui	-119'234 €
TOTALE	1'263'913.0 €

L'investimento in questo caso risulta molto inferiore rispetto a quello precedente, ed è di 4'308'000 €. Avremo quindi un pay back time di 3.41 anni.

4.4 Soluzione 2: ORC a doppio stadio con produzione di vapore.

La soluzione 2 precedentemente descritta comportava un problema di fattibilità tecnica, si è deciso quindi di modificare la soluzione utilizzando il più efficientemente possibile il calore disponibile dal forno 1, producendo sia energia elettrica sia vapore da utilizzare per produzione e riscaldamento che acqua refrigerata grazie ad un frigorifero ad assorbimento.

Questa soluzione è stata poi scelta e portata avanti come effettivo intervento finale. Sarà quindi qui descritta brevemente e l'effettiva soluzione sarà poi esplicitata in un capitolo dedicato alla descrizione dei componenti, all'analisi energetica ed economica della soluzione finale integrata con l'analisi dei consumi condotta precedentemente.

4.4.1 Soluzione tecnica

Si riporta uno schema logico della soluzione per come è stata pensata. Si è deciso di effettuare un recupero termico sul condensatore del toluene e utilizzare la condensazione del toluene per produrre vapore che può poi essere utilizzato nello stabilimento produttivo. In questo caso il rendimento elettrico di questo stadio del ciclo ORC diminuisce in quanto condensa a temperatura superiore, mentre il rendimento totale del ciclo si alza dato che sfruttiamo quasi tutta la potenza che ci viene fornita dai gas combusti.

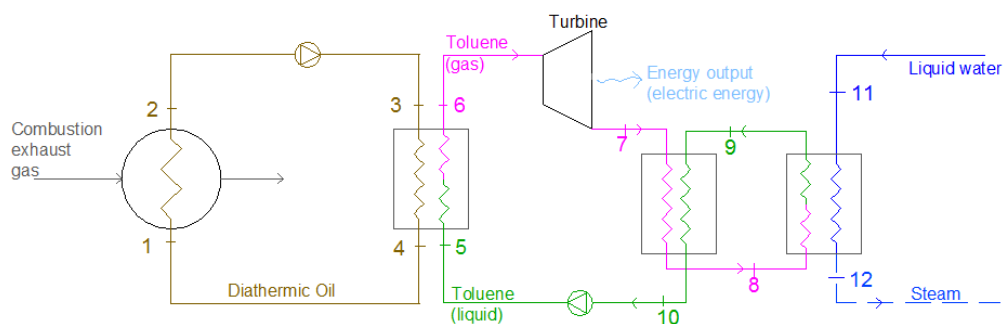


Figura 4.4. Schema logico raffigurante una parte della soluzione tre.

1 – L'olio diatermico raffreddato fino alla temperatura di circa 197°C nello scambiatore di calore olio diatermico/toluene.

2 – L'olio diatermico viene inviato ad uno scambiatore di calore posizionato sull'uscita dei gas combusti dal forno 1 e scaldato dai gas combusti alla

temperatura di circa 700°C. L'olio diatermico scaldato alla temperatura di circa 328 °C viene poi trasportato fino ad uno scambiatore di calore olio diatermico/toluene.

3 – L'olio diatermico scambia calore con il toluene, questo scambiatore funge da caldaia a calore indiretto che alimenta entrambi i cicli Rankine a fluido organico.

4 – L'olio diatermico è alla temperatura di circa 198°C all'uscita dello scambiatore di calore tra olio diatermico e toluene e ritorna verso lo scambiatore posto sul forno per lo scambio termico tra gas combusti e olio diatermico.

5 – Il toluene liquido ad una temperatura di circa 180°C viene inviato allo scambiatore di calore olio diatermico/toluene.

6 – Il toluene evapora all'interno dello scambiatore di calore olio diatermico/toluene e all'uscita ho quindi toluene sotto forma di gas alla temperatura di 256°C. Viene poi inviato ad una turbina per la produzione di energia elettrica.

7 – Il toluene espande in turbina producendo energia elettrica.

8 – Il toluene ancora sotto forma di gas pre-riscalda il toluene liquido e entra nello scambiatore toluene/acqua alla temperatura di 187°C.

9 – Il toluene condensa nello scambiatore toluene/acqua e viene inviato nello scambiatore intermedio toluene/toluene per essere pre-riscaldato.

10 – Il toluene pre-riscaldato nello scambiatore intermedio ritorna verso lo scambiatore olio diatermico/toluene.

11 – Acqua alla temperatura di 148°C entra nello scambiatore toluene/acqua ed evapora.

12 – Nello scambiatore di calore il toluene condensa e l'acqua evapora formando vapore alla pressione di 3,5 bar.

A questo punto è possibile raffigurare sempre con uno schema logico la distribuzione del vapore a 3,5 che viene prodotto dal ciclo.

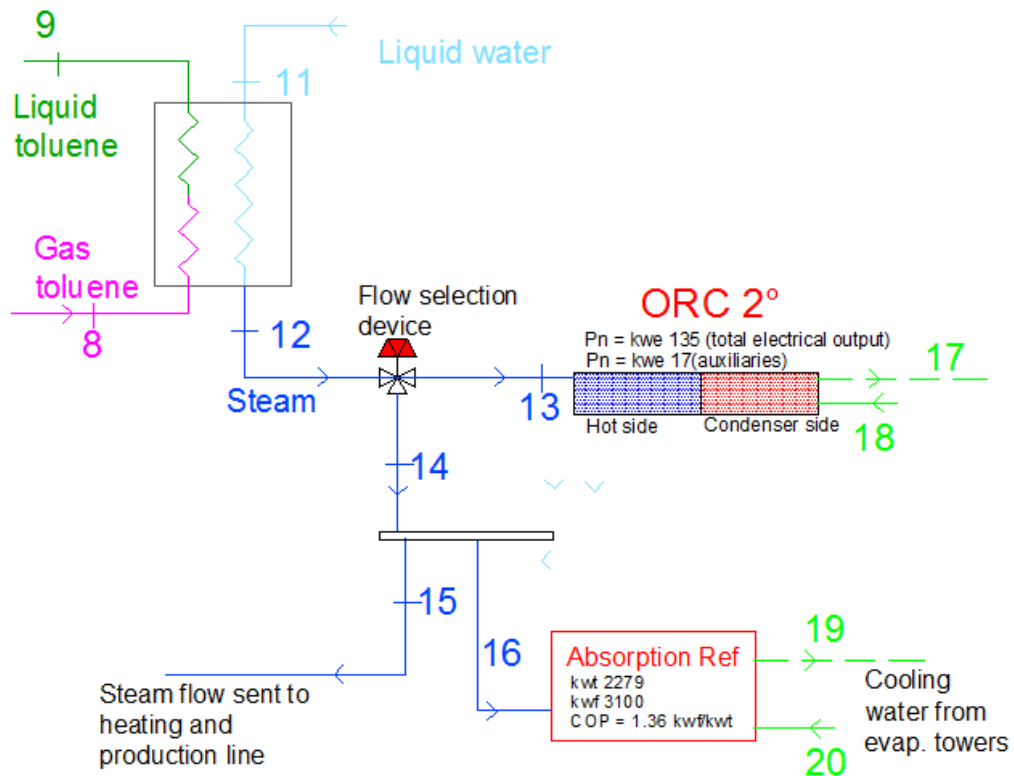


Figura 4.5. Utilizzo del vapore prodotto dal primo stadio del ciclo ORC.

11 – Acqua alla temperatura di 148°C entra nello scambiatore toluene/acqua ed evapora.

12 – Nello scambiatore di calore il toluene condensa e l'acqua evapora formando vapore alla pressione di 3,5 bar.

13 – Parte del vapore che non viene utilizzato sul refrigeratore ad assorbimento e per produzione e riscaldamento e che quindi eccede la capacità dello stabilimento di smaltire calore viene inviato ad un secondo ciclo ORC che utilizza come fluido organico R245fa e produce energia elettrica.

14 – Parte del vapore che viene richiesta dal refrigeratore ad assorbimento e dalla centrale termica viene inviata ad un collettore di mandata.

15 – Una parte del vapore viene inviato alla centrale termica in cui esiste una caldaia per la produzione di vapore. Una parte del vapore prodotto viene utilizzato durante tutto l'arco dell'anno nel reparto produzione appretti che richiede vapore per la produzione. Durante la stagione invernale parte di questo vapore viene utilizzato per riscaldamento di edifici e per riscaldamento dell'aria nelle UTA che fungono da condizionamento per i reparti di filatura.

16 – Una parte del vapore viene inviata ad un refrigeratore ad assorbimento alimentato a vapore per la produzione di acqua refrigerata. Questo permette di risparmiare energia elettrica dato permette un minore utilizzo di energia elettrica da parte dei chiller esistenti. La richiesta di acqua refrigerata è maggiore durante i mesi estivi, anche se esiste una richiesta di acqua refrigerata per la produzione anche nei mesi invernali.

17 / 18 – Acqua dalle torri evaporative viene utilizzata per raffreddare il condensatore del ciclo ORC a bassa temperatura che utilizza come fluido organico R245fa. Dalla temperatura a cui arriva l'acqua dalle torri dipende il rendimento del ciclo Rankine.

19 / 20 – Acqua dalle torri evaporative viene utilizzata per il raffreddamento del condensatore e dell'assorbitore del ciclo ad assorbimento alimentato a vapore.

4.4.2 Risultati energetici ed economici

Si riporta ora la sintesi dei risultati in termini energetici ed economici che analizzeremo poi approfonditamente nella parte relativa alla descrizione dell'intervento.

E' necessario analizzare per prima cosa i risparmi di energia con il corrispondente risparmio economico sui vettori di energia primaria.

Tabella 4.22. Risparmi energetici ed economici in un anno.

Utilizzo	Energia	Costo specifico	Risparmio
Energia elettrica prodotta dall'ORC 1	2'190'000 kWh	0.1417 €/kWh	310'323 €
Energia elettrica prodotta dall'ORC 2	658'092 kWh	0.1417 €/kWh	93'252 €
Energia elettrica risparmiata sui Chiller	3'307'260 kWh	0.1417 €/kWh	468'639 €
Energia elettrica risparmiata su installazione inverter su pompe e spegnimento ausiliari	3'402'197 kWh	0.1417 €/kWh	482'091 €
Energia termica risparmiata alla centrale termica per produzione di vapore	7'002'786 kWh	0.35 €/Nm ³	319'470 €
TOTALE			1'607'804 €

Si calcolano poi i risparmi dovuti ai certificati bianchi, convertendo i MWh in certificati bianchi reali, questa conversione è diversa nel caso in cui si stia trattando con un risparmio effettivo di energia elettrica oppure di energia termica, ovviamente il risparmio di energia elettrica a parità di MWh è più retribuito, considerando che l'energia elettrica è energia prodotta solitamente a

partire da energia termica con un rendimento medio del 46%. Non sarebbe quindi corretto valutare un risparmio della stessa quantità di energia elettrica come un risparmio di energia termica. I certificati bianchi sono emessi in funzione dell'energia risparmiata in un anno, per i primi 5 anni in cui sarà in funzione l'impianto di risparmio energetico istallato.

Tabella 4.23. Risparmi annui dovuti ai certificati bianchi.

Utilizzo	Energia	Certificati Bianchi reali	€/ C.B.	Risparmio
Energia elettrica prodotta dall'ORC 1 e 2	2'848 MWh	1'789 C.B.	80 €/C.B.	143'161 €
Energia elettrica risparmiata sui Chiller	3'362 MWh	2'112 C.B.	80 €/C.B.	168'980 €
Energia elettrica risparmiata su modifiche circuiti refrigerati	1'695 MWh	840 C.B.	80 €/C.B.	67'182 €
Energia termica risparmiata alla centrale termica per produzione di vapore	7'003 MWh	2'024 C.B.	80 €/C.B.	161'882 €
TOTALE				541'205 €

Si riportano poi i calcoli relativi ai costi annuali aggiuntivi da sostenere per ausiliari, fiscalità sulla produzione dell'energia elettrica e manutenzione sull'impianto.

Tabella 4.24. Costi annuali.

Utilizzo	Costo
Costi annuali dovuti alla manutenzione	-39'577 €
Costi annuali dovuti alle accise per produzione	- 36'735 €
Costi annuali dovuti ad ausiliari elettrici	-58'587 €
TOTALE COSTI	-134'899 €

A questo punto è possibile trarre un bilancio dei risparmi totali che si avrebbero per i primi 5 anni successivi all'intervento di riqualificazione energetica, considerando sia i risparmi di energia, gli incentivi dovuti ai certificati bianchi e i costi aggiuntivi relativi alla produzione di energia elettrica.

Si riporta quindi una tabella riassuntiva di costi totali e risparmi.

Tabella 4.25. Riassunto risparmi e costi dei primi 5 anni di attività.

Utilizzo	Risparmi/Costi
Risparmi totali di energia	1'607'804 €
Risparmi dovuti a certificati bianchi	541'205 €
Costi annuali	-134'899 €
TOTALE RISPARMIO NETTO ANNUO	2'014'110 €

L'investimento totale è di 5'509'082 €, avremo quindi in prima approssimazione un pay back time di circa 2.74 anni.

5 Descrizione dell'intervento

In questo capitolo sarà descritto nel dettaglio l'intervento scelto, le apparecchiature che verranno utilizzate e l'analisi energetica annuale partendo dai dati relativi ai consumi per calcolare il risparmio ottenuto grazie all'intervento proposto.

5.1 Schema logico dell'intervento

Si riporta uno schema logico di tutta la soluzione finale, per avere un quadro generale delle interazioni tra i diversi macchinari e fluidi di lavoro che vengono trasportati.

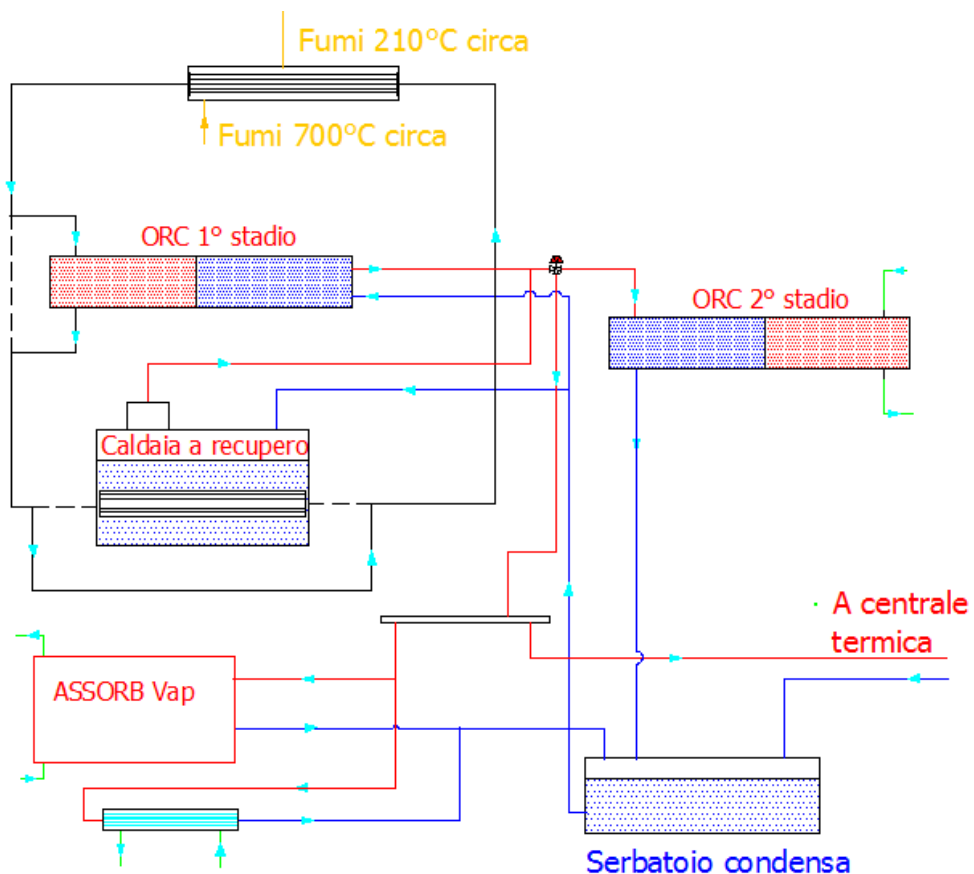


Figura 5.1. Schema logico dell'intervento di efficientamento energetico scelto.

Inseriamo poi la legenda, per interpretare i flussi.

- Fumi forno
- Olio diatermico - percorso normale
- - - Olio diatermico - percorso deviato
- Vapore
- Condensa
- Acqua di torre

Figura 5.2. Legenda relativa alla figura precedente, rappresentante i fluidi di lavoro.

Si può analizzare quindi lo schema logico che evidenzia i percorsi dei vari fluidi. A partire dalla fonte di energia, cioè i fumi del forno che vengono raffreddati da una temperatura iniziale di 700°C fino ad una temperatura di 210°C. Questi riscaldano l'olio diatermico che normalmente entra nell'ORC 1° Stadio e poi ritorna verso lo scambiatore con i fumi del forno.

Esiste una possibilità alternativa di percorso dell'olio diatermico, rappresentato con la linea tratteggiata, che si verifica nel caso in cui l'ORC 1° stadio sia in manutenzione oppure in riparazione. L'olio diatermico in questo particolare caso bypassa l'ORC 1° Stadio per entrare in un generatore di vapore a calore indiretto, che produce vapore raffreddando l'olio diatermico.

Solitamente quindi il vapore viene prodotto dall'ORC 1° Stadio lato condensatore, e poi inviato ad un partitore di flusso che indirizza al collettore il vapore richiesto dallo stabilimento e indirizza il vapore in eccesso verso l'ORC 2° stadio, un ciclo Rankine per la produzione di energia elettrica.

Il vapore che non viene indirizzato verso l'ORC 2° Stadio entra in un collettore, e viene poi inviato in parte alla Centrale Termica dove verrà utilizzato per la produzione degli appretti e per il riscaldamento e in parte al refrigeratore ad assorbimento che utilizza il calore in ingresso per la produzione di acqua refrigerata.

Nel caso in cui ci fosse una parte del vapore che non utilizzato, questo viene condensato in uno scambiatore che utilizza acqua proveniente dalle torri evaporative per raffreddare lo scambiatore e condensare il vapore in eccesso in modo che l'acqua possa essere nuovamente inviata all'ORC 1° Stadio (o eventualmente al generatore di vapore a calore indiretto) per essere evaporato e produrre vapore.

C'è la necessità di rimuovere calore di processo sia per l'ORC 2° stadio, in cui il fluido di lavoro deve essere condensato per chiudere il ciclo Rankine, sia nel

refrigeratore ad assorbimento dove abbiamo necessità di raffreddare con acqua sia il condensatore che l'assorbitore, sia abbiamo la necessità di poter condensare il vapore in eccesso.

Per questi motivi abbiamo una grande richiesta di acqua per raffreddamento, che verrà ottenuta installando tre torri evaporative.

Come si può notare dallo schema, questa soluzione non prevede nessun utilizzo di ulteriori combustibili fossili, l'unico ingresso di energia termica è dato dal recupero termico dei fumi prodotti dal forno di fusione della miscela vetrificabile.

5.2 Elenco delle macchine da installare

Si riporta ora l'elenco delle macchine che dovranno essere installate, per avere un quadro dell'intervento.

Si riportano anche alcune caratteristiche tecniche di base, che verranno poi utilizzate per il calcolo energetico. Inseriamo poi anche una sezione sulle pompe aggiuntive che verranno installate per l'intervento. Queste infatti compariranno nel calcolo finale del risparmio energetico come voci negative in quanto sono consumi aggiuntivi che non erano presenti precedentemente. E' necessario in ogni caso tenere in conto che anche alcuni ausiliari verranno spenti a seguito del nostro intervento e quindi quelli dovranno comparire come voci positive nel bilancio energetico finale dopo l'intervento.

Scambiatore di calore posto all'uscita del forno 1.	Potenza nominale: 3130 kWt
ORC 1° Stadio	Organic fluid: Toluene Nominal power: 327 kW _e
ORC 2° Stadio	Organic fluid: R245fa Nominal power: 135 kW _e
Refrigeratore ad assorbimento	Acqua refrigerate temperature in-out: 12°C- 7°C Potenza frigorifera: 3100 kW _f COP 1.496 (Text=2°C) ,1.36 (Text=26 °C) kW _f /kW _t

Torri evaporative	Temperatura di set: 29 °C/35°C with TBU= 24 (°C) - Potenza ventilatore assiale 18.5 kW
Generatore di vapore a calore indiretto	Potenza nominale : 3130 kWt (4 bar)
Pompe	Olio diatermico a/b (1 attiva e 1 backup) Portata: 31 m ³ /h Prevalenza : 20 mca Potenza nominale 3 kW
	Acqua di torre a/b/c (1 backup) : Portata: 400 m ³ /h Prevalenza : 18 mca Potenza nominale: 37 kW
	Acqua refrigerata 1/2/3 (2 attive e 1 backup): Portata: 280 m ³ /h Prevalenza: 18 mca Potenza nominale: 18.5 kW
	Condensa 1/2 (1 attiva e 1 backup) : Portata:7500 lt/h Prevalenza : 80 mca Potenza nominale: 4 kW

5.3 Scambiatore di calore fumi-olio diatermico.

Questo scambiatore scalda dell'olio diatermico grazie ai fumi ad alta temperatura che escono dal forno in cui avviene la fusione della miscela vetrificabile. E' importante analizzare il percorso di questi gas combusti per considerare le possibili criticità.

La combustione del gas naturale avviene direttamente all'interno del forno 1. Abbiamo una reazione di combustione tra il combustibile (gas naturale) ed il comburente, aria esterna. L'aria comburente è ad una temperatura di circa 200°C dato che viene pre-riscaldata da un recuperatore posto all'interno del forno 1. Il gas naturale e l'aria reagiscono quindi bruciando all'interno del forno che deve essere mantenuto alla temperatura di 1400°C. All'interno del forno c'è la miscela vetrificabile che fonde formando vetro fuso. All'interno dei gas combusti avremo quindi sia prodotti della combustione del gas naturale, sia componenti della miscela vetrificabile che evaporano unendosi ai gas combusti.

I gas combusti alla temperatura di 1400°C vengono quindi fatti passare all'interno di un recuperatore in cui pre-riscaldano l'aria comburente e si raffreddano fino alla temperatura di circa 700°C.

I fumi che arrivano nel nostro scambiatore sono quindi frutto della combustione avvenuta all'interno del forno e fatti passare nel primo recuperatore e arrivano nel canale di uscita alla temperatura di 700°C.

A questo punto l'obiettivo è quello di recuperare la potenza termica disponibile raffreddando questi fumi fino ad una certa temperatura.

5.3.1 Criticità legate allo scambiatore di calore fumi-olio diatermico.

Questa operazione comporta una serie di criticità che devono essere attentamente valutate per poi trovare la soluzione più efficiente dal punto di vista energetico ma anche tecnicamente fattibile e sicura nel corso del funzionamento del recupero termico.

Una prima criticità deriva dal posizionamento dello scambiatore.

Il forno di fusione della miscela vetrificabile è alto circa 40 metri. Attualmente i fumi escono dalla parte più alta del forno dopo essere passati nel recuperatore e hanno un tratto orizzontale bypassabile per poi scendere nuovamente verso il terreno per essere miscelati con aria fresca grazie a dei ventilatori posti nel sotterraneo ed essere inviati ad un camino alla temperatura di 200°C. Per una disposizione ambientale i fumi non possono essere espulsi in atmosfera ad una temperatura di 700°C, vengono quindi prima miscelati con aria fresca fino a raggiungere la temperatura di 200°C e successivamente immessi in atmosfera attraverso una ciminiera. Il nostro obiettivo è di raffreddarli con uno scambiatore

che scaldi nel contempo dell'olio diatermico. Un punto in cui può essere possibile posizionare lo scambiatore è il tratto orizzontale, raggiungibile attraverso un'impalcatura metallica, posto a 40 m di altezza. Esistono quindi dei forti vincoli geometrici di spazio, a causa dell'impalcatura che circonda la struttura e dei vincoli strutturali per essere certi che la struttura sia in grado di sostenere il peso dello scambiatore di calore.

Un'ulteriore criticità è dovuta alla possibile corrosione dello scambiatore di calore. In alcuni stabilimenti di produzione di fibra di vetro in altre parti del mondo gli interventi di recupero termico che raffreddavano i gas combusti per recuperarne il calore attraverso scambiatori sono falliti a causa della corrosione subita dallo scambiatore di calore, che ha reso inutilizzabile lo scambiatore. Questo aspetto era ovviamente prioritario e una preoccupazione sia per l'azienda che aveva già avuto esperienze negative sia per la progettazione dello scambiatore, che deve essere ovviamente 'custom made' data la particolarità dell'applicazione e del posizionamento. Il canale di uscita dei fumi è stato quindi oggetto di una campagna misure dedicata da parte dei costruttori dello scambiatore per misurare tutti i componenti dei gas combusti, sia i prodotti della combustione sia per verificare la presenza di altri elementi trasportati dalla miscela vetrificabile. Attraverso queste misurazioni si è poi anche verificata l'effettiva temperatura dei fumi e la portata disponibile. A valle di queste misure si è verificato che con l'attuale miscela utilizzata per la produzione del vetro fuso, non ci sono particolari problemi di sporcamento o intaccamento dello scambiatore di calore dovuti a possibili agenti chimici trasportati dalla miscela che possano essere corrosivi. E' però importante però considerare la possibilità di formazione di condense acide, questo può avvenire nel caso in cui i fumi vengano raffreddati eccessivamente. Si è quindi deciso di raffreddare i gas combusti dalla temperatura iniziale di 700°C fino al massimo ad una temperatura finale di 210°C, pari a quella a cui vengono raffreddati ora con l'uso dei ventilatori, per essere certi che non ci siano condense che potrebbero corrodere lo scambiatore gas combusti-olio diatermico.

5.3.2 Posizionamento scambiatore

Il punto in cui si è deciso di installare lo scambiatore è appunto il tratto orizzontale che percorre il canale di trasporto dei gas combusti dopo essere uscito dal forno. L'olio diatermico passerà in dei tubi posti orizzontalmente, mentre i gas combusti entreranno nello scambiatore dall'alto, perpendicolari ai tubi in cui passa l'olio diatermico, per poi uscire dal basso dello scambiatore. Il posizionamento ideale dello scambiatore sarebbe stato quello verticale, con i gas combusti entranti lateralmente e uscenti lateralmente, ma sarebbe mancato lo spazio geometrico. Il vantaggio della posizione verticale dei tubi di trasporto dell'olio diatermico è quello di evitare che le polveri si depositino sui tubi, peggiorando l'efficienza dello scambiatore. Per questioni di spazio lo scambiatore sarà però posizionato con i tubi orizzontali e verrà quindi previsto un sistema che sfrutta il circuito ad aria compressa dello stabilimento per la pulizia dei tubi dello scambiatore di calore.

Lo scambiatore verrà quindi posizionato nel tratto orizzontale dei tubi in uscita dal forno. Questo punto è particolarmente adatto al posizionamento dello scambiatore anche per l'esistenza di un secondo canale di by-pass di fianco al canale di trasporto effettivo dei fumi dello scambiatore di calore. Questo ci permette di avere una maggiore libertà di azione nell'installare lo scambiatore mentre il forno è in funzione e nel deviare eventualmente il flusso di calore sull'altro canale parallelo nel caso in cui si renda necessaria una riparazione o delle operazioni di manutenzione sullo scambiatore di calore.

Per una maggiore chiarezza si riporta un'immagine tridimensionale che mostra il forno e il percorso dei canali di trasporto dei gas combusti.

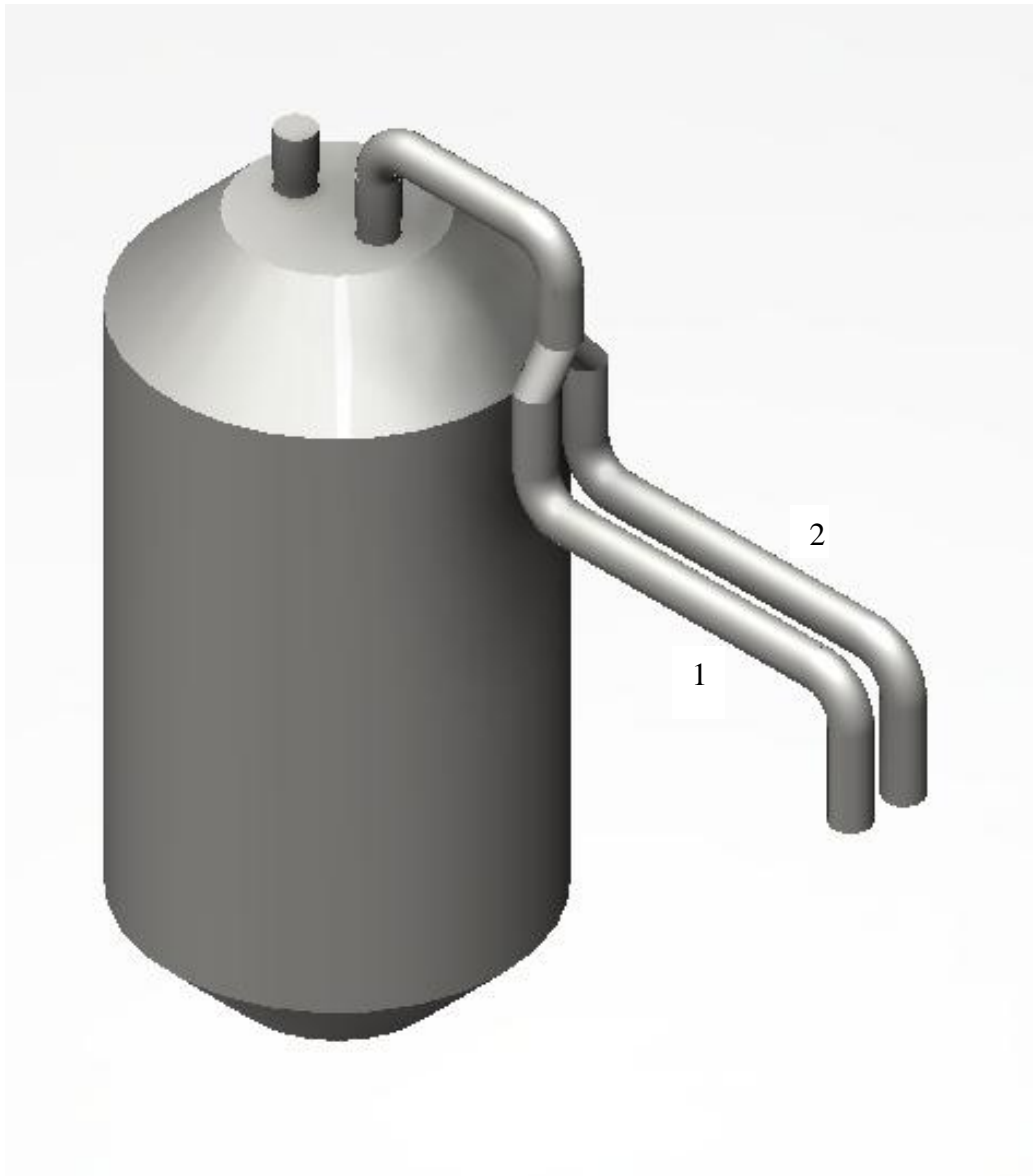


Figura 5.3. Disposizione canali in uscita dal forno 1. La figura non è in scala.

Attualmente il canale 1 è chiuso e i fumi passano nel canale 2. Lo scambiatore di calore verrà installato sul canale 1 mentre i gas combusti passano come loro solito nel canale 2. Quando l'installazione sarà completata i gas combusti verranno deviati sul canale 1 e il canale 2 rimarrà come possibile bypass in situazioni di emergenza.

5.4 Organic Rankine Cycle

Un componente fondamentale dell'intervento è il ciclo Rankine a fluido organico, che permette la produzione di energia elettrica a partire da una fonte di calore a bassa temperatura. Il ciclo Rankine viene largamente utilizzato per la produzione di energia elettrica in centrali termoelettriche a vapore utilizzando H₂O come fluido di lavoro.

Così come un ciclo Rankine tradizionale, ORC è composto da un generatore di vapore, una turbina, un condensatore ed una pompa. Lavora su due livelli di pressione. Il vantaggio dell'utilizzo di un fluido organico sta nella possibilità di scegliere il fluido che si adatti al range di temperatura che abbiamo a disposizione. Un ulteriore vantaggio di utilizzare fluidi organici è che con questa flessibilità sulla temperatura della sorgente calda, è possibile lavorare con cicli a cascata, cioè il calore di condensazione del ciclo ad alta temperatura può diventare fonte per un ciclo a temperatura inferiore, sfruttando con un rendimento maggiore il calore in ingresso.

Il brevetto di questo particolare ciclo sfrutta le diverse caratteristiche dei fluidi per poter creare dei cicli a cascata, aumentando così in rendimento.

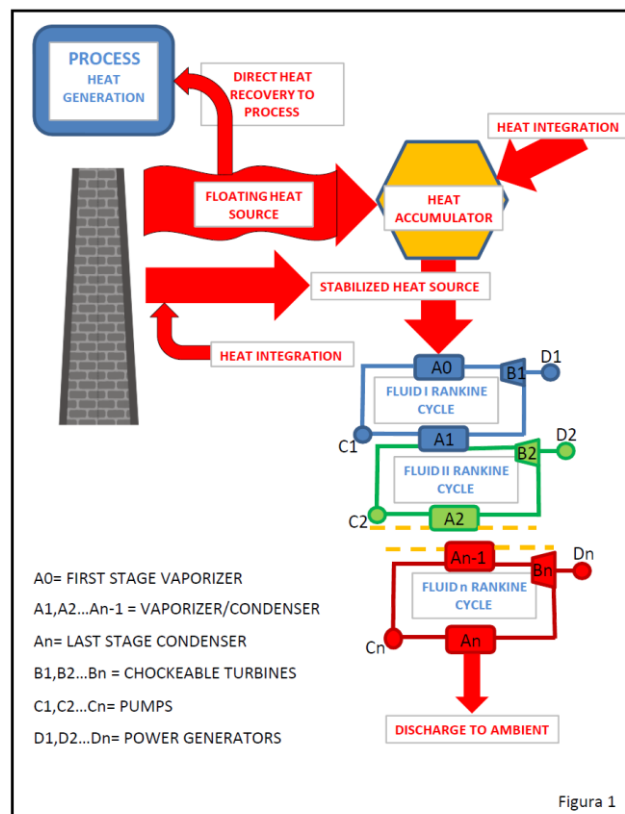


Figura 5.4. Rappresentazione dello schema ideale di un ciclo integrato oggetto di deposito di brevetto.

I cicli a cascata, come mostrato nello schema possono essere idealmente n cicli in cui le proprietà di ogni fluido organico permettono di condensare il fluido n alla stessa temperatura a cui evapora il fluido n-1.

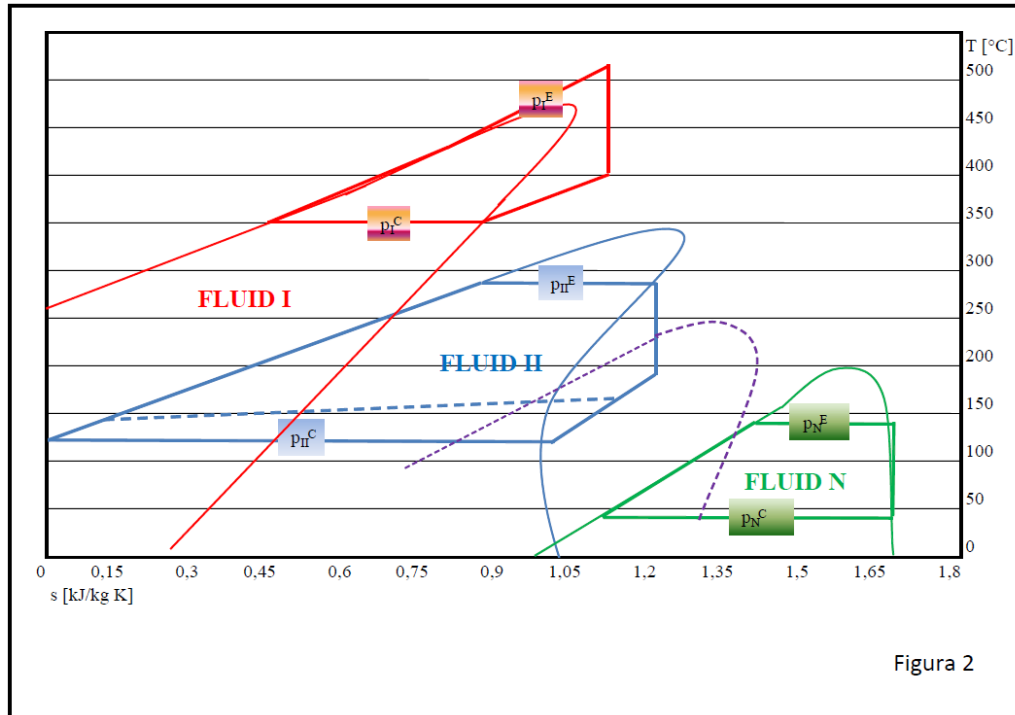


Figura 5.5. Schema termodinamico del Ciclo Multistadio.

E' però difficile avere le condizioni necessarie per arrivare ad un numero elevato di stadi, è invece possibile sfruttare energia recuperata a temperature relativamente basse sfruttando due stadi, con toluene come fluido ad alta temperatura e R235fa come fluido del secondo stadio a più bassa temperatura. Nella soluzione particolare pensata per questo caso, esiste un ulteriore fluido da tramite tra i due stadi, cioè il vapore prodotto dal primo stadio che alimenta il secondo.

Questa soluzione si adatta al range di temperature disponibile e permette un recupero ad alta efficienza del calore che al momento viene considerato calore di scarto e disperso in atmosfera.

Si riporta ora lo schema logico dell'integrazione dei due cicli ORC con i due fluidi di lavoro organici, vediamo come l'energia termica in ingresso viene sfruttata in vari step.

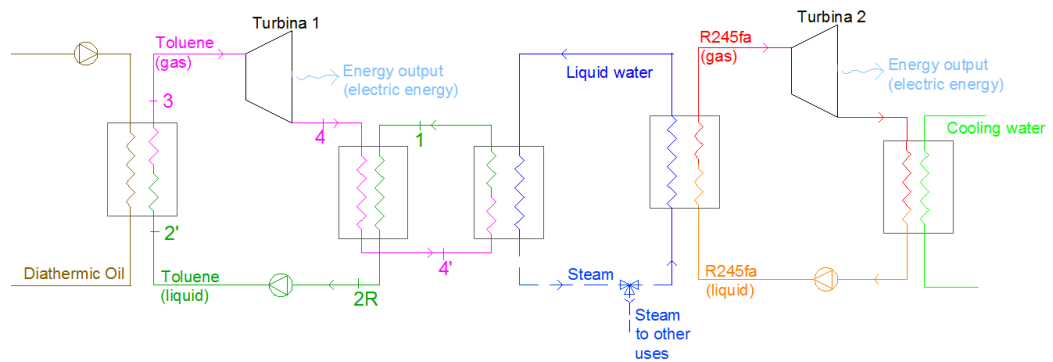


Figura 5.6. Integrazione dei due cicli ORC in cascata con fluido intermedio.

Diagramma T-s TOLUENE

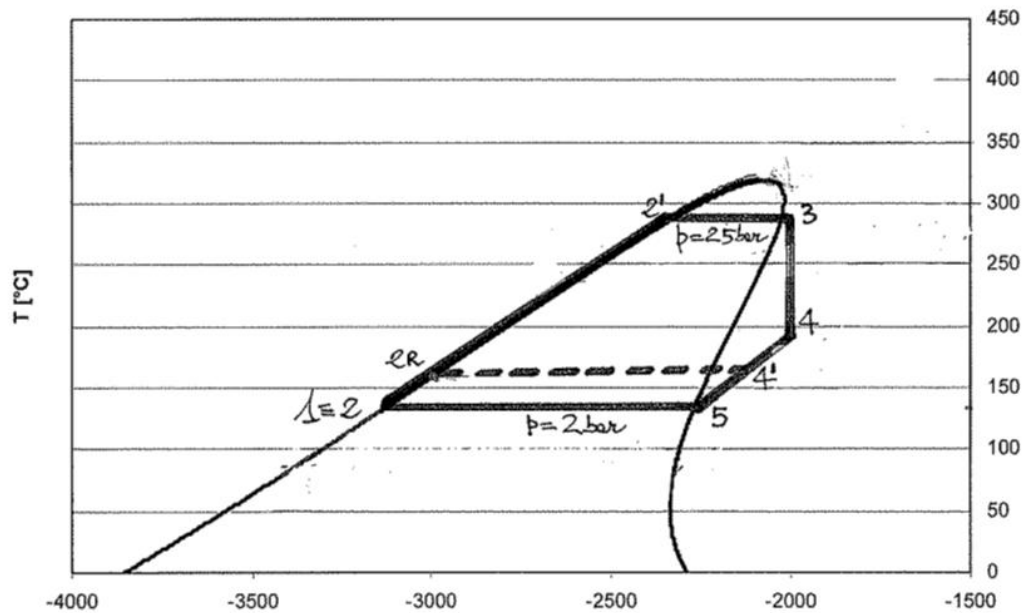


Figura 5.7. Ciclo termodinamico del primo stadio a toluene, nel caso in cui si espanda fino a 2 bar.

Mostriamo poi il ciclo termodinamico del primo stadio dell'ORC in un diagramma T – s che mostra le varie fasi del ciclo del toluene.

5.4.1 ORC 1° Stadio

In questo caso il primo stadio dell'ORC ha come fluido di lavoro Toluene. Il generatore di vapore indiretto consiste nello scambiatore di calore olio diatermico/toluene che evapora il toluene, abbiamo quindi la fase del ciclo in cui c'è un passaggio di stato a pressione costante, grazie ad una fonte esterna di calore che in questo caso è l'olio diatermico. A questo punto il toluene espande in turbina mettendo in moto la girante e producendo energia elettrica grazie ad un alternatore. A questo punto è necessario condensare il toluene alla pressione inferiore. Nel nostro caso condensiamo il toluene con acqua alla pressione di 3.5 bar, in modo da produrre vapore alla pressione di 3.5 bar che verrà poi utilizzato.

Solitamente in un ciclo Rankine per la sola produzione di energia elettrica l'obiettivo è di massimizzare il rendimento elettrico del ciclo, cioè la quantità di energia elettrica viene prodotta a con un unità di energia termica in ingresso. Questo rendimento è maggiore tanto è inferiore la temperatura di condensazione del fluido di lavoro. Infatti più è bassa la temperatura della sorgente fredda, minore sarà la pressione di condensazione e quindi avremo un'espansione maggiore in turbina e conseguentemente una maggiore produzione di energia elettrica a parità di energia termica in ingresso.

Nel nostro caso però l'effetto utile del ciclo non è solamente la produzione di energia elettrica, ma anche la produzione di vapore che verrà poi utilizzato in varie modalità. Dobbiamo quindi considerare che il rendimento totale nel nostro caso è costituito sia dall'energia elettrica prodotta che dall'energia termica prodotta sotto forma di vapore, a parità di energia termica in ingresso al ciclo ORC. In questo caso il rendimento totale verrà dato dall'effetto utile totale rispetto all'ingresso totale nel ciclo.

Questa soluzione avrà quindi un rendimento elettrico inferiore alle soluzioni precedenti che ipotizzavano la sola produzione di energia elettrica e una condensazione a bassa temperatura grazie all'acqua di torre che mi permetteva di condensare a temperature molto basse. In questo caso però il rendimento totale dell'ORC 1° Stadio è in totale maggiore rispetto a quello precedente, dato che ho la possibilità di sfruttare il calore ceduto dal toluene durante la condensazione, questa calore sarebbe stato calore di processo da smaltire, e non un effetto utile come nel caso di questa soluzione.

5.4.2 ORC 2° Stadio

L'idea di inserire il secondo stadio del ciclo ORC in questa soluzione è frutto dell'analisi dei consumi dello stabilimento, in particolare dei consumi della caldaia a vapore presente nello stabilimento che viene alimentata a gas naturale. Si riportano i valori dei consumi di gas di questa caldaia per ogni giorno dell'anno per gli ultimi due anni. Questa caldaia produce vapore che viene utilizzato per la produzione degli appretti, per le batterie calde delle UTA e per il riscaldamento di alcuni edifici all'interno dello stabilimento. Conosciamo poi la richiesta dello stabilimento di energia frigorifera nella forma di acqua refrigerata.

Il vapore che produciamo sfruttando la condensazione del toluene viene utilizzato sia per sostituire la produzione di vapore da parte della caldaia a vapore alimentata a gas naturale, sia per la produzione di acqua refrigerata.

Ci siamo però resi conto che nel periodo invernale la richiesta da parte dello stabilimento di vapore era inferiore alla produzione di vapore che avevamo grazie all'ORC 1° Stadio.

A questo punto abbiamo analizzato quale potesse essere un modo per utilizzare il vapore in eccesso per produrre un effetto utile. Per questo motivo si è pensato di inserire un secondo stadio dell'ORC, che sfrutti nei mesi invernali una quota del vapore totale per produrre dell'energia elettrica.

Questo secondo stadio del ciclo Rankine a fluido organico utilizza R245fa come fluido di lavoro. L'R245fa evapora in un generatore di vapore a calore indiretto in cui il vapore in ingresso condensa facendo evaporare l'R245fa che espande in un'altra turbina, producendo energia elettrica. In questo caso l'R245fa viene condensato con acqua proveniente dalle torri evaporative, questo ciclo infatti produce solo energia elettrica. In questo ciclo a bassa temperatura non avremo recuperatore intermedio, ma semplicemente un ciclo Rankine composto da generatore di vapore, turbina, condensatore, pompa.

Dato che abbiamo del vapore in eccesso nei mesi invernali, questo secondo stadio di ORC sarà attivo appunto nei mesi freddi in cui anche l'acqua utilizzata nel condensatore sarà a temperatura inferiore, e quindi potremo avere un più alto rendimento elettrico del ciclo.

5.5 Refrigeratore ad assorbimento

Per la produzione di acqua refrigerata è previsto nella soluzione finale un refrigeratore ad assorbimento alimentato a vapore. Questo refrigeratore ha come ingresso del calore ad alta temperatura sotto forma di vapore, che utilizza grazie ad un ciclo ad assorbimento per la produzione di acqua refrigerata utilizzata sia per alcuni aspetti della produzione sia per la climatizzazione ambientale.

Il ciclo ad assorbimento permette di produrre acqua refrigerata senza avere il consumo elettrico di un compressore, come accade con un refrigeratore a compressione di vapore. Avendo a disposizione del vapore posso quindi alimentare un refrigeratore ad assorbimento e produrre acqua refrigerata risparmiando energia elettrica che avrei altrimenti speso per alimentare un ciclo a compressione di vapore.

Grazie al fatto che il ciclo ad assorbimento viene alimentato a vapore anzi che ad acqua calda, abbiamo un alto rendimento del ciclo ad assorbimento, che dipende in ogni caso dalla temperatura dell'acqua di raffreddamento proveniente dalle torri evaporative. Infatti minore è la temperatura dell'acqua, è possibile condensare a temperatura inferiore, migliorando il rendimento del ciclo. Il rendimento del refrigeratore ad assorbimento scelto oscilla tra un massimo di 1.496 kWf/kWt quando abbiamo una temperatura esterna di 2.2°C ed un minimo di 1.36 kWf/kWt quando la temperatura esterna si assesta attorno ai 26°C. Ovviamente questo rendimento non è paragonabile a quello di un refrigeratore a compressione di vapore, dato che in quel caso confrontiamo la potenza frigorifera prodotta con la potenza elettrica consumata, mentre in questo caso confrontiamo la potenza frigorifera prodotta rispetto alla potenza termica in ingresso. In questo caso l'energia termica in ingresso è derivata da un recupero termico, ed è quindi gratuita.

Il refrigeratore ad assorbimento produce acqua refrigerata alla temperatura di 7°C e riceve in ingresso acqua alla temperatura di 12°C, fornendo quindi acqua refrigerata alla temperatura con cui veniva fornita precedentemente per essere utilizzata per condizionamento e processo produttivo.

La richiesta di acqua refrigerata da parte dello stabilimento è massima nei mesi in cui la temperatura esterna è massima, ma abbiamo in ogni caso una richiesta minima di acqua refrigerata anche nei mesi invernali.

5.6 Torri evaporative

Tra i macchinari da installare previsti nella soluzione scelta sono presenti tre torri evaporative. Queste torri vengono utilizzate per raffreddare l'acqua che viene utilizzata per rimuovere calore di processo prodotto dai cicli termodinamici presenti. Ci sono diversi macchinari che richiedono un raffreddamento ad acqua: il secondo stadio dell'ORC e il refrigeratore ad assorbimento. Esiste poi la necessità di condensare direttamente il vapore prodotto nel caso in cui questo non possa essere utilizzato per produrre un effetto utile, questo avviene all'interno di uno scambiatore di calore in cui il vapore condensa riscaldando l'acqua di torre.

Nel caso del refrigeratore ad assorbimento l'acqua di torre raffredda il condensatore del ciclo ma anche l'assorbitore.

Nel ORC 2° Stadio l'acqua si scalda raffreddando il condensatore del ciclo Rankine e facendo condensare il fluido organico, per poi essere raffreddata nuovamente all'interno della torre evaporativa.

Come già detto, per smaltire tutta la potenza termica saranno necessarie tre torri evaporative.

Ognuna con una resa di 1800 kWt. Le temperature di funzionamento tipiche delle torri sono 29°C in uscita e 35°C in ingresso e con ventilatori assiali della potenza di 18.5 kWe.

5.7 Generatore di vapore a calore indiretto

Questo componente dell'impianto è aggiuntivo e non è normalmente funzionante. Infatti nel normale funzionamento della soluzione l'olio diatermico entra nell'ORC 1° Stadio e by-passa il generatore di vapore a calore indiretto.

Nel caso in cui si renda necessario by-passare il ciclo Rankine a fluido organico 1° stadio, avremo quindi dell'olio diatermico caldo che entra nel generatore di vapore e che scalda dell'acqua formando vapore che può successivamente essere utilizzato all'interno dello stabilimento.

Questo generatore di calore non è altro che uno scambiatore di calore direttamente tra olio diatermico e acqua, che permette di raffreddare l'olio diatermico che ritornerà poi allo scambiatore di calore con i fumi del forno. L'olio diatermico passa attraverso dei tubi nel bagno d'acqua producendo vapore che potrà poi essere utilizzato.

Questo scambiatore è quindi un backup che è pensato per essere utilizzato in caso l'ORC 1° Stadio stia subendo operazioni di manutenzione o riparazione.

5.8 Utilizzo vapore prodotto

Si analizza ora dopo aver descritto i vari componenti dell'impianto, il funzionamento e le potenze in gioco. Si riporta per maggior chiarezza un diagramma di flusso che mostra l'energia termica in ingresso e i successivi utilizzi di questa e le varie trasformazioni in energia elettrica, termica e frigorifera. Abbiamo infatti un'energia in ingresso data dalla potenza di 3130 kW disponibile dal recupero termico sui fumi del forno che è disponibile in continuo 24h/24 per ogni giorno dell'anno. Questo ci permette di conoscere l'energia disponibile in ingresso per qualsiasi periodo di tempo. A seconda delle richieste mensili di energia dello stabilimento avremo poi una diversa conversione di questa energia in ingresso. L'energia frigorifera è rappresentata entrante, dato che sottraggo energia all'acqua per raffreddarla, questa si traduce poi in un risparmio di energia elettrica dai chiller.

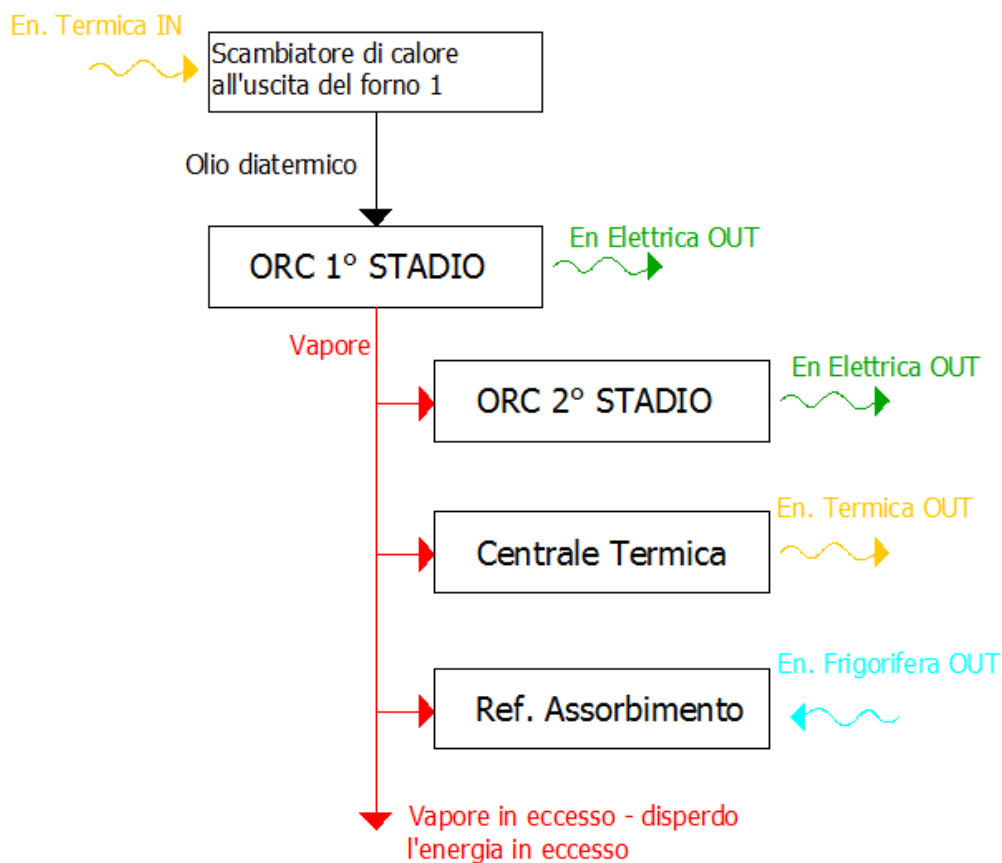


Figura 5.8. Diagramma di flusso rappresentante la logica delle trasformazioni di energia della soluzione.

Sia nella stagione invernale che estiva ho richiesta di vapore sia dalla centrale termica che dall'assorbitore, dato che questa richiesta non esaurisce il vapore a disposizione, una quota del vapore a disposizione viene inviato all'ORC 2° Stadio. Il ciclo ORC non può però essere sottoposto a variazioni istantanee di potenza termica in ingresso, dobbiamo quindi analizzare per ogni mese i consumi e scegliere la distribuzione mensile del vapore da inviare all'ORC 2° Stadio.

Per valutare la quantità di energia sotto forma di vapore inviata ad ogni componente dobbiamo inizialmente valutare la richiesta di energia termica sotto forma di vapore da parte della caldaia della centrale termica e da parte dell'assorbitore.

A partire dalla richiesta di vapore da parte della centrale termica, partiamo dai dati di consumo mensile di gas naturale per risalire attraverso il rendimento della centrale termica esistente e del potere calorifico del gas naturale al consumo mensile di energia termica che si traduce in consumo di vapore.

Si analizza ora i consumi di gas naturale ed energia termica della centrale termica nei mesi invernali. Considerando che l'impianto lavora in continuo su ogni ora del giorno e ogni giorno dell'anno, può essere comodo nel nostro caso considerare per ogni mese una potenza ricavata dal consumo di energia mensile divisa per le ore del mese che stiamo considerando. Questo ci permette di ragionare a partire dalla potenza termica in ingresso suddividendo nei vari mesi la potenza termica prodotta nella modalità che permette di avere il maggior rendimento possibile.

Tabella 5.1. Consumi di gas naturale della centrale termica nella stagione invernale dell'anno 2012.

anno 2012	Tmedia	gg mese	Nmc/mese su caldaie C1+C2	kWt richiesti utili
gennaio	2.2	31	110'389	1'138
febbraio	5.3	29	113'967	1'256
marzo	9.6	31	131'236	1'353
aprile	15.0	30	50'859	542
maggio	20.3	31	54'307	560
giugno	21.7	30	50'859	542
luglio	23.2	31	54'307	560
agosto	25.6	31	54'307	560
settembre	21.2	30	50'859	542
ottobre	14.1	31	64'105	661
novembre	7.5	30	66'445	708
dicembre	4.1	31	111'132	1'146

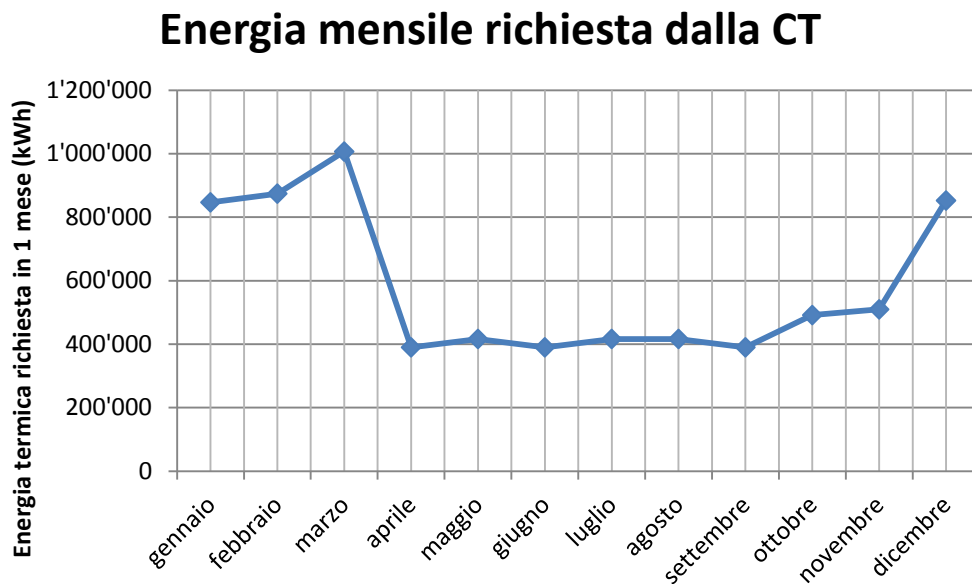


Figura 5.9. Andamento del consumo di energia termica della centrale termica nell'anno 2012.

Osservando il consumo di energia mensile, essendo il consumo costante nel corso della giornata è possibile avere un'indicazione relativa alla potenza istantanea richiesta dalla centrale termica in forma di vapore. Dato che l'energia totale in ingresso è di 3130 kW termici, e l'espansione in turbina del primo stadio dell'ORC consuma 320 kW considerando anche le perdite, abbiamo una potenza termica disponibile sotto forma di vapore di 2'810 kW termici. Si analizza poi la richiesta di potenza media dei vari mesi da parte della centrale termica notiamo che la richiesta di potenza termica anche nei mesi di maggior richiesta è sempre nettamente inferiore a quella disponibile prodotta dall'ORC.

Si analizza ora la richiesta di energia frigorifera, che si traduce in una richiesta di energia termica, a seconda del rendimento del refrigeratore ad assorbimento. Si riportano quindi i valori della richiesta di acqua refrigerata, i valori di rendimento medi valutati per quel mese e quindi per le condizioni esterne, e a partire da questi due valori calcoliamo la richiesta di energia termica da parte dell'assorbitore per poter produrre l'acqua refrigerata. Come nel caso precedente, ragioniamo per ogni mese con valori di potenza, da cui è possibile ottenere facilmente il valore dell'energia richiesta moltiplicando la potenza istantanea per le ore mensili, dato che l'impianto è progettato per funzionare in continuo.

Tabella 5.2. Richiesta di potenza frigorifera per ogni mese della stagione invernale anno 2012.

MESE	Tmedia	gg mese	kWf richiesti dallo stabilimento	EER f(T torri e Tmandata) kWf/kWt	kWt corrispondenti richiesti da Ref. ad Assorb.
gennaio	2.2	31	612	1.496	409
febbraio	5.3	29	612	1.478	414
marzo	9.6	31	947	1.454	651
aprile	15.0	30	1'807	1.423	1'270
maggio	20.3	31	2'651	1.393	1'904
giugno	21.7	30	2'874	1.385	2'076
luglio	23.2	31	3'113	1.376	2'262
agosto	25.6	31	3'495	1.362	2'566
settembre	21.2	30	2'794	1.387	2'014
ottobre	14.1	31	1'663	1.428	1'165
novembre	7.5	30	612	1.466	418
dicembre	4.1	31	612	1.485	412

Energia mensile richiesta dalla CT

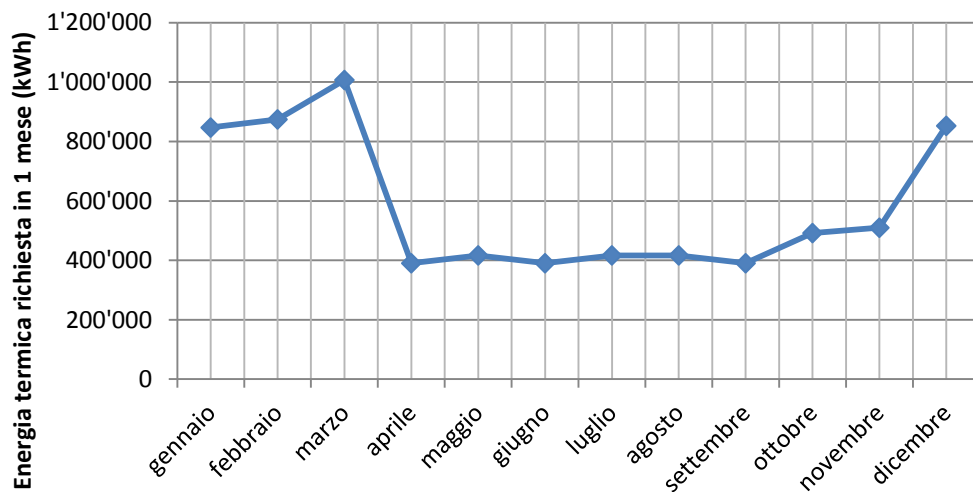


Figura 5.10. Energia richiesta in un mese dal refrigeratore ad assorbimento.

Ora che abbiamo visualizzato la richiesta nella stagione invernale di acqua refrigerata notiamo che, come prevedibile, la richiesta di acqua refrigerata è in controtendenza rispetto alla richiesta da parte della centrale termica. Valutiamo ora la somma delle richieste da parte dell'assorbitore e della centrale termica confrontando la somma di queste due richieste con la potenza termica totale disponibile all'uscita dell'ORC 1° Stadio, per poter poi valutare la quota in eccesso di vapore da indirizzare all'ORC 2° Stadio.

Tabella 5.3. Verifica potenza termica in eusbero sotto forma di vapore per ogni mese della stagione invernale.

MESE	kWt richiesti utili	kWt corrispondenti richiesti da Ref. ad Assorbimento	kWt richiesti da CT e Assorbitore	kWt disponibili in uscita da ORC 2° Stadio	kWt in esubero
gennaio	1'138	409	1'548	2'810	1'262
febbraio	1'256	414	1'670	2'810	1'140
marzo	1'353	651	2'004	2'810	806
aprile	542	1'270	1'812	2'810	998
maggio	560	1'904	2'464	2'810	346
giugno	542	2'076	2'618	2'810	192
luglio	560	2'262	2'822	2'810	-
agosto	560	2'566	3'126	2'810	-
settembre	542	2'014	2'556	2'810	254
ottobre	661	1'165	1'826	2'810	984
novembre	708	418	1'126	2'810	1'684
dicembre	1'146	412	1'558	2'810	1'252

A questo punto è possibile indicare la quota di vapore da inviare all'ORC 2° Stadio a seconda dell'esubero di vapore che abbiamo verificato.

Tabella 5.4. Quota di energia termica sotto forma di vapore da destinare all'ORC 2° Stadio.

MESE	Tmedia	gg mese	Rendimento ORC 2° Stadio	kWt in esubero	kWt destinati a ORC 2° Stadio
gennaio	2	31	11.25%	1'262	1'200
febbraio	5	29	11.25%	1'140	1'200
marzo	10	31	11.25%	806	1'000
aprile	15	30	10.83%	998	1'000
maggio	20	31	10.39%	346	300
giugno	22	30	10.28%	192	-
luglio	23	31	10.15%	-	-
agosto	26	31	9.95%	-	-
settembre	21	30	10.32%	254	-
ottobre	14	31	10.91%	984	1'000
novembre	8	30	11.25%	1'684	1'200
dicembre	4	31	11.25%	1'252	1'200

Si può quindi riassumere la ripartizione di energia termica prodotta dall'ORC 1° Stadio per ogni mese e valutare eventuali ulteriori esuberi di energia termica sotto forma di vapore che saranno condensati attraverso lo scambiatore con acqua di torre. Dato che la quantità di vapore inviato all'ORC 2° stadio non può variare in ogni istante, abbiamo fissato secondo l'analisi precedente una portata di vapore che corrisponde ad una potenza fissa da inviare al secondo stadio dell'ORC. A questo punto della potenza rimanente diamo la precedenza all'invio di vapore verso la centrale termica, il vapore rimanente sarà utilizzato dall'assorbitore.

Si riporta quindi le richieste e l'effettiva ripartizione della potenza termica sotto forma di vapore per ogni mese della stagione invernale.

Tabella 5.5. Riassunto richiesta ed effettivo utilizzo del vapore prodotto nei mesi dell'anno.

	kWt richiesti da CT	kWt richiesti da Ref. ad Ass.	kWt ORC 2°	kWt inviati a CT	kWt inviati ad assorbire	kWt richiesti totali	kWt disponi bili sui fumi	kWt in esube ro
GEN	1'138	409	1'200	1'138	409	2'748	2'810	62
FEB	1'256	414	1'200	1'256	354	2'870	2'810	-
MAR	1'353	651	1'000	1'353	457	3'004	2'810	-
APR	542	1'270	1'000	542	1'268	2'812	2'810	-
MAG	560	1'904	300	560	1'904	2'764	2'810	46
GIU	542	2'076	-	542	2'076	2'618	2'810	192
LUG	560	2'262	-	560	2'250	2'822	2'810	-
AGO	560	2'566	-	560	2'250	3'126	2'810	-
SET	542	2'014	-	542	2'014	2'556	2'810	254
OTT	661	1'165	1'000	661	1'149	2'826	2'810	-
NOV	708	418	1'200	708	418	2'326	2'810	484
DIC	1'146	412	1'200	1'146	412	2'758	2'810	52

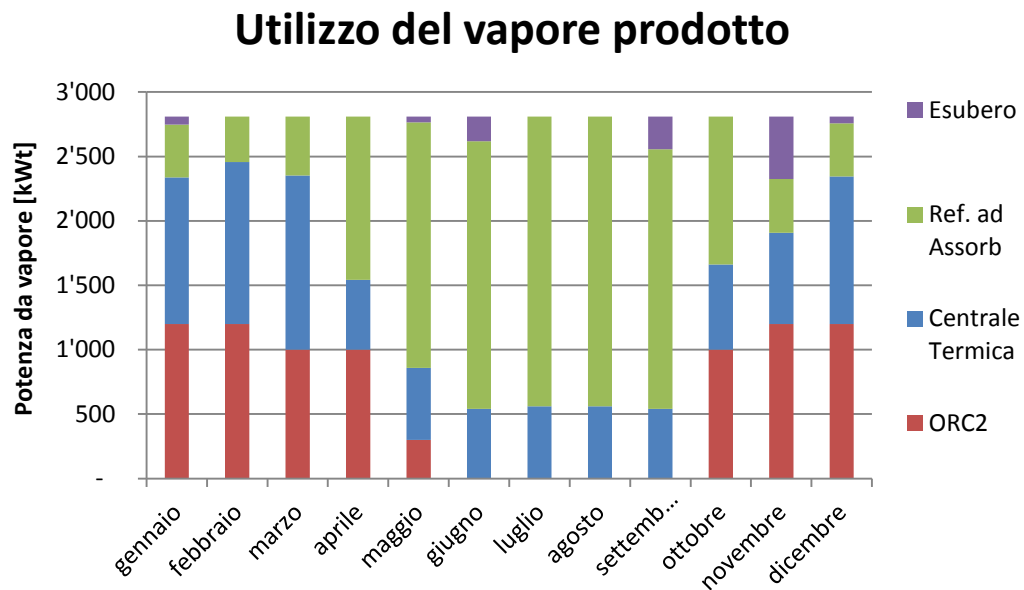


Figura 5.11. Utilizzo nei vari mesi dell'anno del vapore prodotto dal 1° ciclo ORC.

Da questo grafico è possibile visualizzare più chiaramente l'utilizzo che viene fatto del vapore prodotto dal condensatore del ciclo ORC 1° Stadio. Si osserva con maggiore chiarezza il fatto che nei mesi estivi la richiesta di vapore da parte del refrigeratore ad assorbimento e della centrale termica è tale da utilizzare quasi tutto il vapore prodotto, mentre nei mesi invernali il consumo di vapore è inferiore e abbiamo dunque una quota destinata all'ORC. Notiamo poi come la richiesta di vapore della centrale termica sia maggiore nei mesi con temperatura inferiore, mentre al contrario la richiesta di potenza frigorifera è massima nei mesi estivi. Ovviamente l'altezza totale è sempre costante e pari a 2810 kW, cioè la produzione di potenza termica del ciclo Rankine organico al primo stadio. Cambia però la composizione dell'utilizzo di vapore, studiata per avere un alto rendimento e per sfruttare al massimo la potenza termica recuperata dai gas combusti provenienti dal forno 1.

5.9 Analisi energetica

Una volta analizzata la distribuzione del vapore ai vari componenti per le varie stagioni è possibile passare al calcolo dell'energia risparmiata, in termini di energia elettrica ed energia termica, il che permette di analizzare successivamente i risparmi di energia primaria ed i risparmi economici. Una volta analizzati i flussi di energia sarà poi possibile analizzare il rendimento dell'intervento di recupero termico, cioè la percentuale dell'energia recuperata che viene effettivamente convertita in effetto utile per l'azienda.

Si riportano quindi i risultati di energia termica in ingresso alla nostra soluzione, cioè l'energia termica recuperata dei gas combusti in uscita dal forno, l'energia elettrica prodotta dal ORC 1° Stadio, l'energia termica risparmiata sulla centrale termica e l'energia frigorifera risparmiata grazie al refrigeratore ad assorbimento. L'energia è relativa ad un anno di funzionamento dell'impianto di recupero energetico.

E' necessario analizzare inizialmente l'energia totale in ingresso al ciclo.

Tabella 5.6. Energia recuperata in ingresso all'impianto.

Potenza termica istantanea in ingresso	Ore di funzionamento annue	Energia termica in ingresso in un anno
3'130 kW	8760	27'418'800 kWh

Questa è l'energia in ingresso al ciclo, ottenuta dal raffreddamento dei gas combusti da una temperatura di 700°C fino ad una temperatura di 210 °C.

5.9.1 Diagrammi di flusso

L'energia recuperata grazie allo scambiatore posto sul canale dei gas combusti, viene in questo momento dispersa in atmosfera, dopo l'intervento l'obiettivo è quello di utilizzare questa energia per avere un effetto utile.

Può essere interessante visualizzare le situazioni prima e dopo l'intervento tramite dei diagrammi di flusso.

Si riporta quindi il diagramma di flusso relativo a prima dell'intervento.

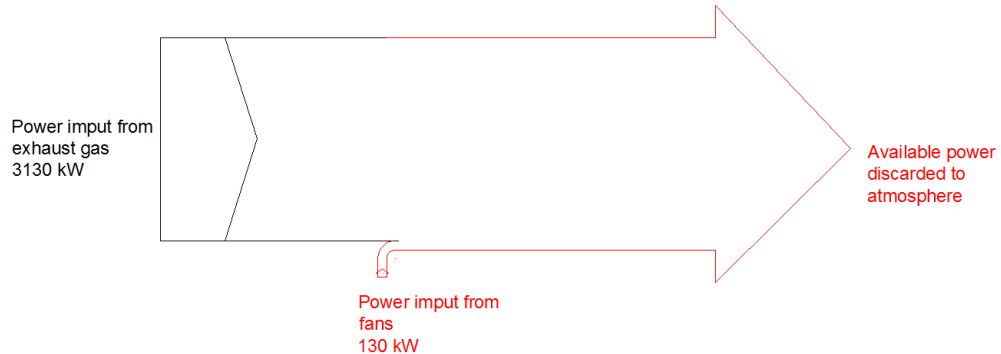


Figura 5.12. Flowchart relativo all'utilizzo della potenza disponibile dai fumi del forno prima dell'intervento.

Si nota come tutta la potenza disponibile venga dispersa, con anche un dispendio di potenza dato dall'utilizzo di ventilatori per il raffreddamento dei fumi. Si riporta poi il diagramma di flusso relativo a dopo l'intervento.

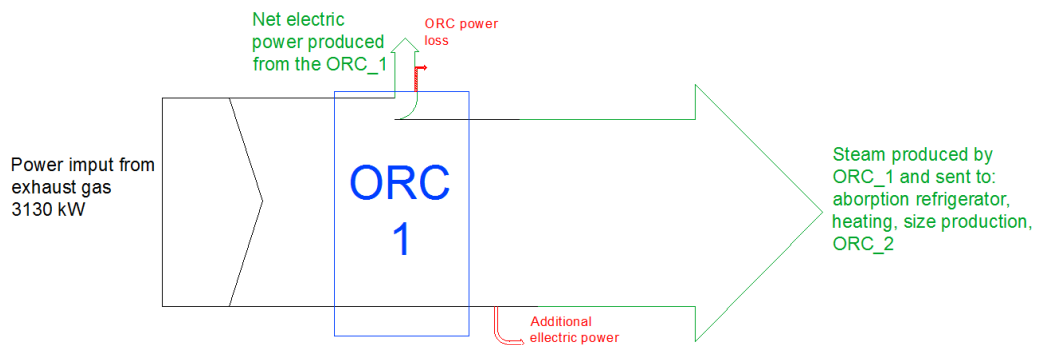


Figura 5.13. Flowchart relativo all'utilizzo della potenza disponibile dai fumi del forno dopo l'intervento.

Si evidenzia come la potenza in ingresso venga trasformata in effetto utile sotto forma di energia elettrica e vapore. L'utilizzo della potenza termica disponibile sotto forma di vapore è stata descritta nei capitoli precedenti in dettaglio dato che la sua destinazione d'uso varia di mese in mese.

Si riporta poi l'energia elettrica prodotta in un anno dall'ORC 1° Stadio, non essendo presente in questo caso un raffreddamento del condensatore da parte delle torri evaporative ma essendo il condensatore del ciclo un generatore di vapore a scambio indiretto, il rendimento elettrico del ciclo Rankine è costante e non dipende dalla temperatura esterna.

Tabella 5.7. Produzione di energia elettrica in un anno dell'ORC 1° Stadio.

Potenza termica istantanea in ingresso	3130 kW
Rendimento ORC 1° Stadio	9.27%
kW meccanici alla turbina	320 kW
Produzione Elettrica ORC lorda	290 kW
Perdite su ORC per ausiliari	40 kW
produzione netta di energia elettrica	250 kW
Ore di funzionamento annue	8760
Energia elettrica prodotta utile netta	2'190'000 kWh

Una parte dell'energia in ingresso viene trasformata dall'ORC 1° Stadio in energia elettrica, mentre una parte viene trasformata in energia termica sotto forma di vapore a 3,5 bar.

L'utilizzo del vapore prodotto varia nei vari mesi come descritto nella sezione precedente. Si riporta quindi una tabella riportante l'energia termica e frigorifera risparmiata in un anno grazie al vapore prodotto.

Tabella 5.8. Energia termica prodotta da vapore.

	kWh inviati alla CT	kWh termici inviati al Ref. ad Assorb.	kWh frigoriferi prodotti da Ref. ad Assorb	kWh in esubero non usati
Gennaio	846'902	304'455	455'465	46'483
Febbraio	874'356	246'204	363'960	0
Marzo	1'006'842	339'798	493'969	0
Aprile	390'194	913'006	1'299'078	0
Maggio	416'640	1'416'302	1'972'302	34'498
Giugno	390'194	1'494'492	2'069'231	138'514
Luglio	416'640	1'674'000	2'303'424	0
Agosto	416'640	1'674'000	2'280'466	0
Settembre	390'194	1'450'086	2'011'891	182'920
Ottobre	491'816	854'824	1'220'689	0
Novembre	509'765	300'722	440'772	348'713
Dicembre	852'603	306'681	455'465	38'556
TOT	7'002'786 kWh	10'974'570 kWh	15'366'711 kWh	789'684 kWh

Graficamente è possibile visualizzare i vari stadi di conversione dell'energia, a partire dall'energia termica in ingresso.

L'energia termica in ingresso è di 27'418'800 kWh, di cui una parte vengono convertiti in energia elettrica utile, una parte vengono dispersi dall'ORC 1 e una parte vengono convertiti in energia termica sotto forma di vapore.

Si riporta il grafico rappresentante questa conversione.

Conversione dell'energia termica in ingresso

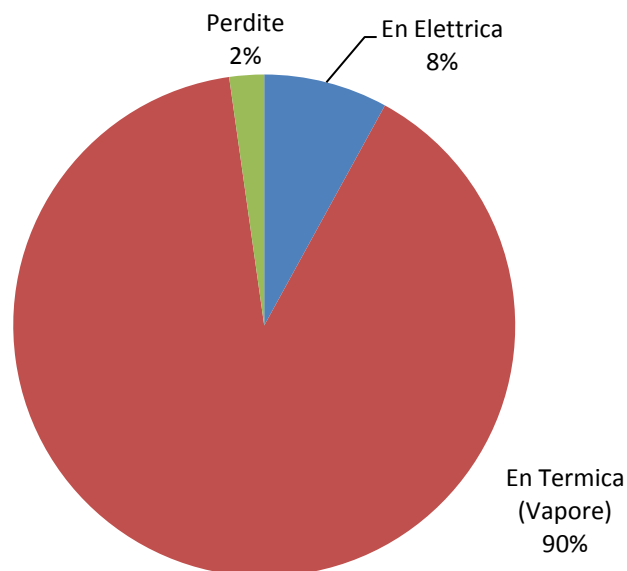


Figura 5.14. Conversione dell'energia termica in ingresso nel ciclo ORC, per la produzione di energia termica sotto forma di vapore (90%) dell'energia in ingresso, e di energia elettrica (8%).

Si nota che esistono delle perdite nel ciclo, dovute ad ausiliari e perdite meccaniche sulla turbina. Il rendimento di questa prima conversione è del 98%.

Il rendimento elettrico del ciclo è molto basso a causa del fatto che la condensazione del toluene avviene ad alta temperatura per permettere di formare vapore a 3.5 bar. Come si evince dal grafico però, il rendimento totale del ciclo è molto alto, se si considera come effetto utile anche la produzione di vapore.

Si può ora analizzare la suddivisione dell'energia termica prodotta sotto forma di vapore, considerando l'energia totale di un anno. Di questo 90% di energia termica una parte sarà destinata al refrigeratore ad assorbimento, una parte alla centrale termica e una parte all'ORC 2° Stadio. Ognuno di questi avrà poi la propria conversione interna.

Si può quindi analizzare successivamente la ripartizione del 90% in ulteriori parti.

Si riporta il grafico che rappresenta i risultati.

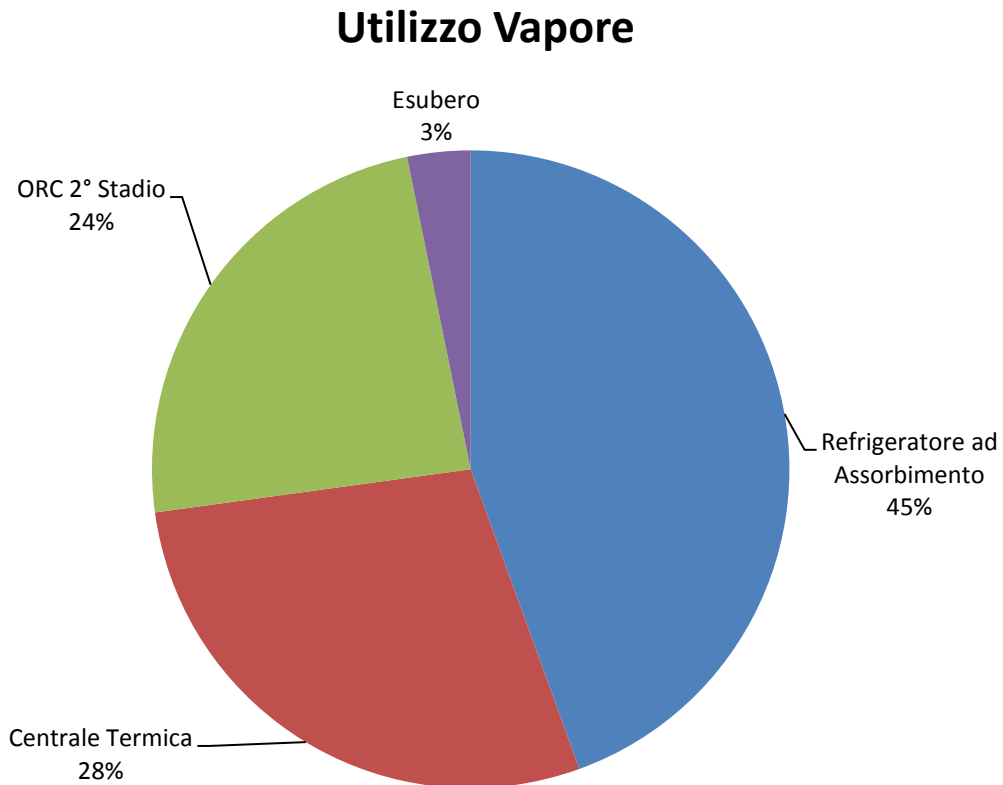


Figura 5.15. Utilizzo dell'energia termica prodotta in un anno dall'ORC 1° Stadio sotto forma di vapore. Questo grafico mostra la quantità di energia termica inviata ai vari usi in un anno.

Si nota che nell'arco dell'anno la maggior quantità di vapore viene inviata ai refrigeratori ad assorbimento, il 45% dell'energia termica viene infatti utilizzata per la produzione di acqua refrigerata. Il 28% del vapore viene utilizzato direttamente senza ulteriori conversioni e inviato alla centrale termica. Il 24% verrà inviato al secondo stadio dell'ORC per essere convertito in energia elettrica. Il 3% di tutto il vapore prodotto nel corso dell'anno non viene utilizzato.

Ognuno degli utilizzi del vapore avrà poi un rendimento interno di conversione, ad esempio solo una parte dell'energia inviata all'ORC verrà effettivamente utilizzata per la produzione di energia elettrica.

Può essere interessante unire i due grafici per suddividere il 90% del vapore prodotto nei suoi usi successivi.

Utilizzo Energia termica in ingresso

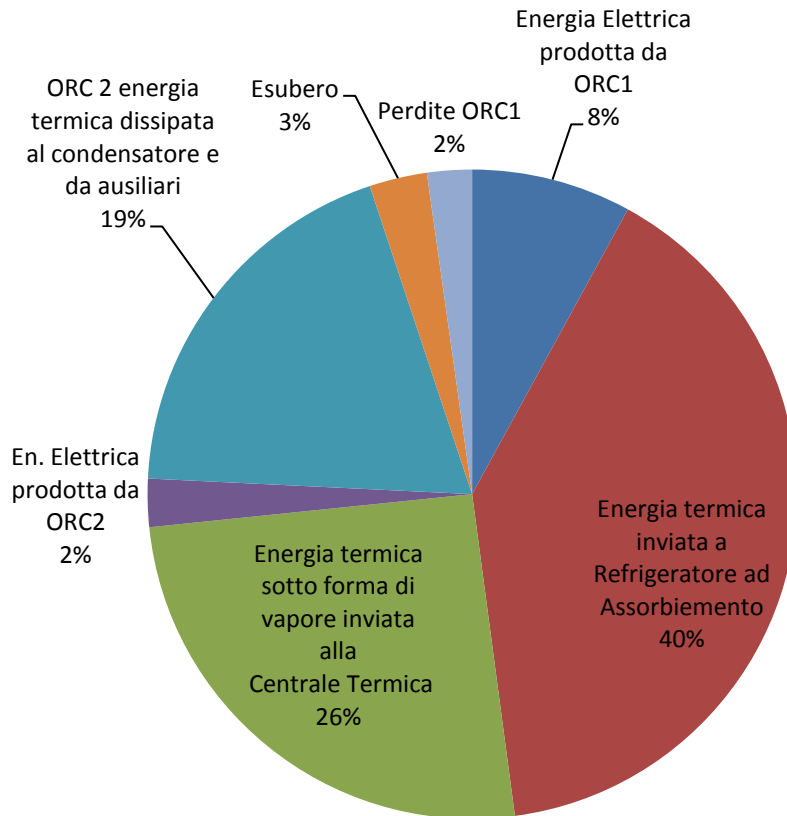


Figura 5.16. Conversione dell'energia termica in ingresso, evidenziando le perdite e l'effetto utile.

Analizzando il grafico a torta si evidenzia quale parte dell'energia termica in ingresso viene sfruttata come effetto utile e quale viene dispersa. Notiamo che dell'energia termica in ingresso all'ORC 2° Stadio, solo circa il 10% di tutta l'energia termica inviata viene trasformata in energia elettrica, mentre il resto viene dissipato al condensatore. È possibile grazie a questo grafico capire il rendimento totale con cui sfruttò l'energia termica recuperata dal forno. Per calcolare il rendimento totale è necessario sottrarre all'energia in ingresso (100%) le quote di energia dispersa, (19% su ORC2, 2% su ORC1 e 3% di esubero di vapore che non viene utilizzato).

Avremo quindi un rendimento del 76%, cioè il 76% dell'energia termica in ingresso in un anno grazie al recupero sui fumi del forno 1 viene trasformata in

effetto utile e quindi in effettivo risparmio di energia elettrica e gas naturale come vettori energetici.

Ovviamente questo grafico a torta pone sullo stesso piano l'energia termica e l'energia elettrica, anche se in realtà queste non sono equiparabili da un punto di vista energetico né economico. Il kWh di energia elettrica è più costoso del kWh di energia termica da un punto di vista economico, ma anche da un punto di vista energetico il kWh di energia elettrica viene in media prodotto utilizzando 2.18 kWh di energia termica.

A questo punto è necessario analizzare l'utilizzo di energia termica sotto forma di vapore da parte dei vari componenti dell'impianto, considerando la conversione dell'energia e il relativo risparmio di energia primaria, che sia nella forma di energia elettrica o di gas naturale.

Il più semplice consiste nella quantità di vapore inviato alla centrale termica, in questo caso l'energia termica si traduce direttamente in risparmio di gas naturale. La quantità di gas naturale risparmiata è facilmente calcolabile considerando il potere calorifico medio del gas naturale e il rendimento della caldaia a vapore presente nell'impianto. L'energia termica che fornisce il vapore sarebbe infatti stata prodotta altrimenti attraverso la combustione di gas naturale con un certo rendimento.

Si riportano quindi i risultati ottenuti.

Tabella 5.9. Risparmio di gas naturale corrispondente all'energia termica risparmiata sulla centrale termica.

Risparmio energia termica	7'002'786 kWh
Rendimento CT esistente	80%
PCI gas naturale	9.59 Nm³/kWh
Risparmio di gas naturale corrispondente	912'772 Nm³

Nel caso del refrigeratore ad assorbimento il risparmio di energia termica si traduce nel ciclo termodinamico in risparmio di energia frigorifera a seconda dell'EER, che varia al variare dei mesi. Il risparmio di energia frigorifera si traduce in termini pratici ed economici in un risparmio di energia elettrica, dato che l'energia frigorifera sarebbe stata altrimenti prodotta da dei chiller a compressione di vapore che consumano energia elettrica per produrre acqua refrigerata. Si deve quindi valutare, a partire dall'energia termica inviata al refrigeratore ad assorbimento, l'energia frigorifera prodotta in un anno e

successivamente l'energia elettrica che sarebbe stata spesa dai chiller presenti nello stabilimento per produrre questa quantità di energia frigorifera.

Per calcolare il risparmio di energia elettrica, parto dal risparmio di energia frigorifera e dall'EER dei chiller esistenti. Dividendo il risparmio di energia frigo per l'EER medio dei refrigeratori a compressione di vapore presenti nello stabilimento, posso calcolare il risparmio di energia elettrica corrispondente.

Si riportano i calcoli relativi al refrigeratore ad assorbimento.

Tabella 5.10. Calcolo del risparmio energetico dovuto al refrigeratore ad assorbimento.

Energia termica inviata al refrigeratore ad assorbimento	10'974'570 kWh
Corrispondente energia frigorifera risparmiata	15'366'711 kWh
EER medio refrigeratori esistenti	4.52
Corrispondente risparmio di energia elettrica	3'402'197 kWh

Un'ulteriore conversione di energia avviene dal secondo stadio dell'ORC, che converte l'energia termica in ingresso come vapore in energia termica. In questo caso il rendimento varia al variare della temperatura esterna, dato che questa come già evidenziato influisce sulla temperatura dell'acqua di torre e quindi sulla temperatura di condensazione. Si analizza quindi la produzione di energia elettrica del secondo stadio dell'ORC.

Tabella 5.11. Energia elettrica prodotta in un anno dal secondo stadio del ciclo ORC alimentato a vapore.

	Potenza termica inviata a ORC 2	Tmedia (°C)	Rendimento ORC 2	Potenza elettrica da ORC (kW)	Energia elettrica prodotta da ORC 2 (kWh)
Gennaio	1'200	2.2	11.25%	135	100'440
Febbraio	1'200	5.3	11.25%	135	93'960
Marzo	1'000	9.6	11.25%	113	83'700
Aprile	1'000	15.0	10.83%	108	78'000
Maggio	300	20.3	10.39%	31	23'194
Giugno	0	21.7	10.28%	0	0
Luglio	0	23.2	10.15%	0	0
Agosto	0	25.6	9.95%	0	0
Settembre	0	21.2	10.32%	0	0
Ottobre	1'000	14.1	10.91%	109	81'158
Novembre	1'200	7.5	11.25%	135	97'200
Dicembre	1'200	4.1	11.25%	135	100'440
TOT					658'092 kWh

L'ORC 2° Stadio viene utilizzato principalmente nei mesi invernali, dato che in questi mesi abbiamo un eccesso di vapore da smaltire. Questo significa che nei mesi di utilizzo abbiamo un rendimento più alto, dato che grazie alla temperatura media esterna inferiore potremmo condensare a temperatura inferiore e il rendimento elettrico del ciclo sarà maggiore.

Una volta analizzata la conversione dell'energia in ingresso nei vari componenti dell'impianto, è possibile riassumere i risparmi effettivi di energia elettrica e di gas naturale previsti in un anno di funzionamento dell'impianto di recupero energetico.

Si riportano quindi i risultati ottenuti.

Tabella 5.12. Riassunto risparmi annuali di energia elettrica e di gas naturale previsti.

Energia elettrica prodotta da ORC 1° Stadio	2'190'000 kWh elettrici		
Energia elettrica prodotta da ORC 2° Stadio	658'092 kWh elettrici		
Energia elettrica risparmiata grazie a refrigeratore ad assorbimento	3'402'197 kWh elettrici		
Energia termica risparmiata alla centrale termica	7'002'786 kWh termici	Risparmio di gas naturale corrispondente	912'772 Nm ³

Si riporta poi il risparmio dovuto ad accorgimenti supplementari e interventi aggiuntivi a quello di recupero sui fumi del forno

Tabella 5.13. Risparmio di energia elettrica dovuto ad altri interventi collaterali a quello di recupero sui fumi.

	Energia risparmiata
Risparmio su ventilatori di raffreddamento fumi	1'147'061 kWh elettrici
Risparmio su circuito di distribuzione acqua refrigerata	1'694'631 kWh elettrici
TOTALE	2'841'692 kWh elettrici

5.10 Analisi risparmi CO₂

Può essere utile valutare il risparmio di CO₂ ottenuto grazie all'intervento proposto, valutando i kg di CO₂ risparmiati grazie al risparmio di energia elettrica e metano. Consideriamo come dato 0.527 kgCO₂/kWh elettrico^[2] e un valore di 0.185 kgCO₂/kWh termico^[3]. Possiamo quindi rappresentare il risparmio in termini di emissioni di CO₂.

Tabella 5.14. CO₂ risparmiata grazie all'intervento previsto.

	Risparmio energia	Conversione	kg CO₂
Energia elettrica prodotta da ORC 1° Stadio	2'190'000 kWh elettrici	0.527 kgCO ₂ /kWh	1'154'130
Energia elettrica prodotta da ORC 2° Stadio	658'092 kWh elettrici	0.527 kgCO ₂ /kWh	346'814
Energia elettrica risparmiata grazie a refrigeratore ad assorbimento	3'402'197 kWh elettrici	0.527 kgCO ₂ /kWh	1'792'958
Energia termica risparmiata alla centrale termica	7'002'786 kWh termici	0.185 kgCO ₂ /kWh	129'645
Risparmio su ventilatori di raffreddamento fumi	1'147'061 kWh elettrici	0.527 kgCO ₂ /kWh	604'501
Risparmio su circuito di distribuzione acqua refrigerata	1'694'631 kWh elettrici	0.527 kgCO ₂ /kWh	893'071
TOTALE			4'902'934

Si riporta quindi un grafico riportante i risparmi di anidride carbonica corrispondenti ai risparmi di energia.

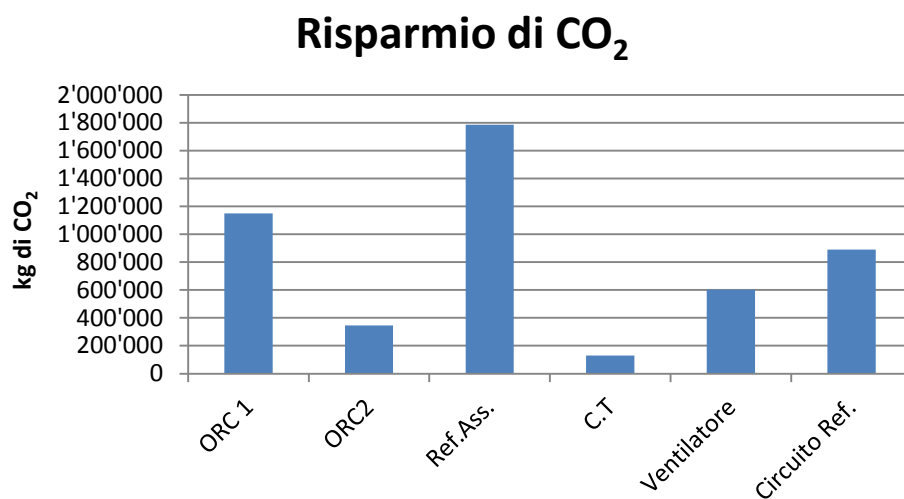


Figura 5.17. CO₂ risparmiata grazie all'intervento previsto

6 Verifica fattibilità e convenienza

6.1 Fattibilità tecnica

Una volta analizzato le opportunità di recupero energetico e scelta una soluzione di recupero energetico con i vari macchinari flussi e previsioni di risparmio energetico, è necessario verificare la fattibilità tecnica dell'intervento e la convenienza dal punto di vista energetico ed economico della soluzione scelta.

E' infatti fondamentale analizzare i vincoli di sicurezza, i vincoli strutturali e lo spazio per l'effettivo posizionamento degli impianti previsti.

Per l'effettivo layout in sicurezza dell'impianto si è pensato di costruire una struttura dedicata in un punto dello stabilimento in prossimità del forno 1 che risponda ai requisiti dei vigili del fuoco per il posizionamento specialmente dell'ORC. A tale scopo è stata destinata una zona all'aperto precedentemente dedicata allo stoccaggio di bombole dove verrà costruita la struttura che contenga il nostro impianto. Si riporta un particolare della pianta dello stabilimento in cui si evidenzia la posizione della struttura.

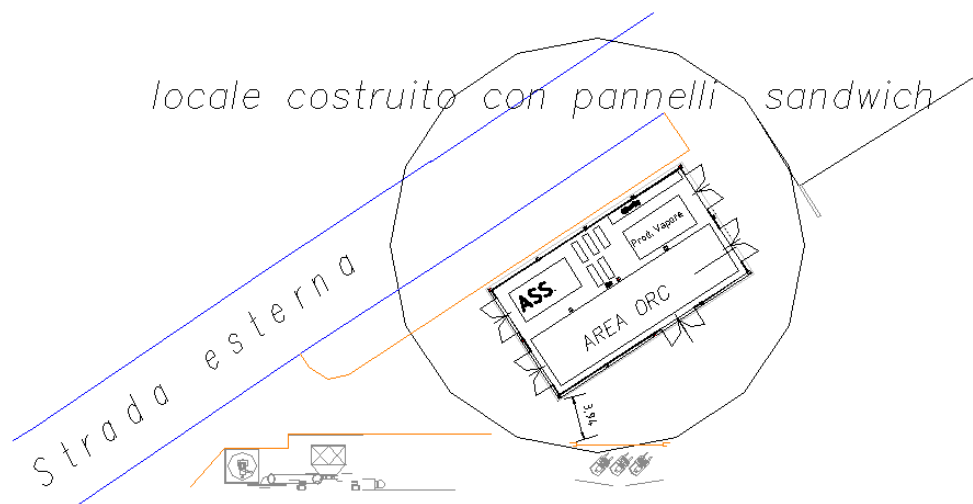


Figura 6.1. Locale contenimento strutture.

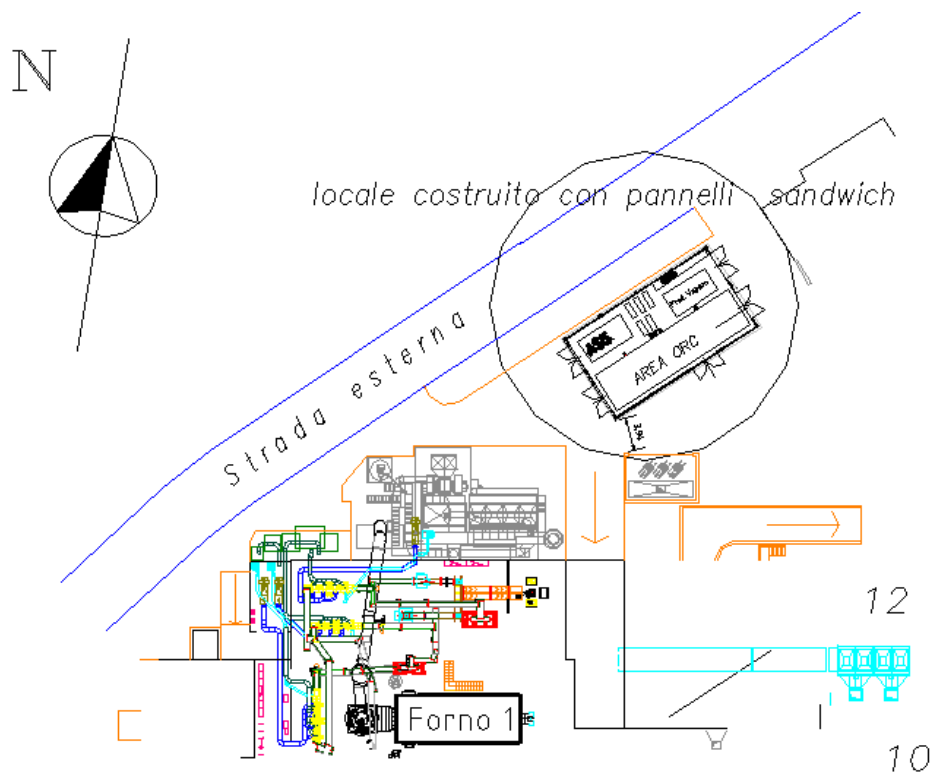


Figura 6.2. Posizionamento impianti rispetto al forno 1.

6.2 Analisi economica

Per l'analisi economica si terrà conto in maniera esclusiva dei ritorni economici dovuti a risparmi energetici e a incentivi su interventi di efficientamento energetico.

E' da considerare inoltre che l'azienda può avere, a fronte di un intervento di recupero energetico e di efficientamento, anche un ritorno in termini di immagine, dato che l'intervento porta ad un risparmio di emissioni di anidride carbonica e ad un risparmio di combustibili fossili, rendendo lo stabilimento più "green" e all'avanguardia nel campo del risparmio energetico.

Si deve poi considerare che un intervento di questo tipo ha una doppia valenza per uno stabilimento con queste caratteristiche specialmente in Italia. Un processo produttivo come quella della fusione della miscela vetrificabile per la produzione di filato energetico è un processo produttivo che, per sua natura, è altamente energivoro. L'influenza del costo dell'energia e di combustibili

fossili sul prodotto finito è molto influente, se poi si considera che in Italia il costo dell'energia è molto maggiore rispetto a quello negli altri paesi europei. La possibilità di recuperare parte dell'energia spesa riducendo le spese che l'azienda deve affrontare in termini di energia permette all'azienda di essere più competitiva rispetto agli stabilimenti di altri paesi.

6.2.1 Risparmio economico dovuto ai saving energetici

Il “core” del risparmio annuale dovuto all'intervento di risparmio energetico è ovviamente costituito dai risparmi di energia elettrica e gas naturale, dovuto al fatto che l'azienda dovrà acquistare meno energia elettrica e meno gas naturale dalla rete dopo che l'intervento sarà completato. Questo ovviamente si traduce in un risparmio economico corrispondente alla quantità di energia elettrica e gas naturale che non dovrà più essere affrontato.

Per valutare il valore economico dei risparmi di energia è fondamentale conoscere il valore di acquisto attuale dell'azienda del kWh di energia elettrica e del Nm³ di gas naturale. Si riportano quindi il valore di acquisto di energia elettrica e gas naturale. Per poter confrontare più facilmente il costo dell'energia elettrica e dell'energia termica sotto forma di gas naturale è necessario convertire il prezzo di acquisto del Nm³ di gas considerando l'energia termica ottenuta con un Nm³ di gas naturale. Dato che 1 Nm³ di gas naturale produce 9.59 kWh termici, e che si possono produrre con un rendimento dell'80%, è possibile valutare il prezzo di acquisto del kWh di energia termica.

Tabella 6.1. Prezzo di acquisto attuale dello stabilimento dei due principali vettori energetici.

Prezzo di acquisto dell'energia elettrica	0.1417 € / kWh elettrico
Prezzo di acquisto del gas naturale	0.35 €/Nm ³
Prezzo di acquisto dell'energia termica (da prezzo gas naturale)	0.04562 €/kWh termico

Come già evidenziato in precedenza, il risparmio del kWh elettrico non corrisponde come ritorno economico ad un risparmio di un kWh di energia termica. Il prezzo di acquisto del kWh elettrico è infatti può di 3 volte il prezzo che deve affrontare lo stabilimento per la produzione di un kWh termico.

Una volta noti i prezzi di acquisto dell'energia primaria, si può valutare il ritorno economico annuo dovuto al risparmio energetico di energia elettrica ed energia termica. Il risparmio di energia elettrica è dovuto sia all'energia elettrica prodotta dall'ORC, dato che l'energia prodotta può essere utilizzata gratuitamente dallo stabilimento e quindi si acquisterà meno energia dall'esterno, sia dal risparmio sull'uso dei chiller a compressione di vapore, dato che si acquisterà meno energia elettrica per la produzione di acqua refrigerata. Si riportano quindi i valori riassuntivi di risparmio energetico evidenziati nel capitolo precedente e i corrispondenti ritorni economici.

Tabella 6.2. Ritorno economico dovuto a risparmio energetico da recupero fumi prodotti dal forno 1 previsto in un anno.

	Energia risparmiata	Costo specifico	Risparmio economico
Energia elettrica prodotta da ORC 1° Stadio	2'190'000 kWh elettrici	0.1417 €/kWh	310'323 €
Energia elettrica prodotta da ORC 2° Stadio	658'092 kWh elettrici	0.1417 €/kWh	93'252 €
Energia elettrica risparmiata grazie a refrigeratore ad assorbimento	3'402'197 kWh elettrici	0.1417 €/kWh	482'091 €
Risparmio di gas naturale	912'772 Nm ³	035 €/Nm ³	319'470 €
TOTALE			1'205'136 €

Il risparmio economico dovuto al recupero energetico sui fumi uscenti dal forno di fusione del vetro è quindi di 1'205'136 € ogni anno, per gli anni di funzionamento dell'impianto.

Esistono poi degli ulteriori ritorni economici dovuti allo spegnimento di ausiliari come i ventilatori utilizzati per il raffreddamento dei fumi in uscita dal forno che non vengono più utilizzati, e dei ritorni economici dovuti all'installazione di inverter sulle pompe di distribuzione dell'acqua refrigerata.

Si riportano quindi i risparmi dovuti a questi altri interventi a lato dell'intervento di recupero principale.

Tabella 6.2. Ritorno economico dovuto a risparmio energetico da ausiliari previsto in un anno.

	Energia risparmiata	Costo specifico	Risparmio economico
Risparmio su ventilatori di raffreddamento fumi	1'147'061 kWh elettrici	0.1417 €/kWh	162'539 €
Risparmio su circuito di distribuzione acqua refrigerata	1'694'631 kWh elettrici	0.1417 €/kWh	240'129 €
TOTALE			402'668 €

6.2.2 Risparmio energetico dovuto a certificati bianchi

Il meccanismo dei Titoli di Efficienza Energetica (TEE) o Certificati Bianchi (CB) ha lo scopo di promuovere una sensibile riduzione del consumo di fonti primarie di energia mediante l'incremento dell'efficienza dei dispositivi di conversione energetica presso gli utenti finali.

L'incentivo è emesso sotto forma di certificati bianchi, calcolati secondo una formula che tiene conto dell'energia elettrica e termica utile, dei rendimenti medi del parco elettrico e termico, dell'energia del combustibile.

L'incentivo quindi viene erogato in funzione dell'energia primaria effettivamente risparmiata nell'anno. Per fare ciò è necessaria l'installazione di strumenti di misura per la contabilizzazione e la fatturazione periodica.

Il contratto di performance dunque tutela ulteriormente il cliente finale, grazie alle garanzie sull'energia prodotta e sull'ottimizzazione del funzionamento dell'impianto. I costi degli strumenti di misura sono inoltre già inclusi nel progetto di performance, dato che devono essere utilizzati per la contabilizzazione dei risparmi garantiti a consuntivo.

Il meccanismo dei TEE è strutturato in maniera tale che i risparmi energetici divengano “monetizzabili”, e dunque contrattabili, su un mercato ad essi dedicato.

La valorizzazione economica del TEE dunque non è fissata a priori, bensì dipende dall’andamento del mercato (rif. Figura 6.3), dove si “incontrano” la domanda dei soggetti obbligati e l’offerta dei soggetti volontari.

Nella analisi contenuta nella sezione successiva si è ipotizzato un prezzo medio in base all’andamento di mercato degli ultimi 2 anni.

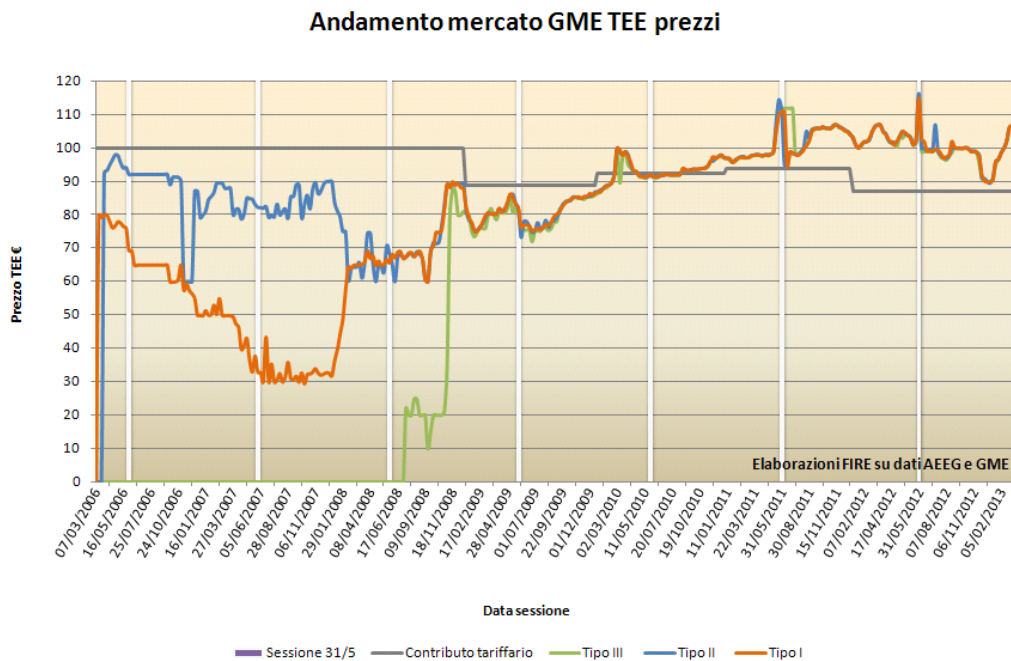


Figura 6.3 - Andamento prezzi mercato TEE (fonte: FIRE)[4]

Per calcolare gli incentivi ricevuti da certificati bianchi è necessario partire dai kWh risparmiati grazie all’intervento di efficientamento energetico. E’ poi necessario calcolare i TEP corrispondenti ai kWh prodotti. Il calcolo dei TEP è diverso nel caso in cui si tratti di energia elettrica o di energia termica, e anche a seconda dell’intervento di recupero. Per l’energia elettrica la conversione da MWh a TEP è di 0.187 TEP/MWh elettrico. Nel caso di energia termica risparmiata, la conversione tra MWh e TEP è pari a 0.086 TEP/MWh. E’ poi necessario moltiplicare i TEP per un coefficiente Tau che varia per le varie soluzioni per calcolare il Certificati Bianchi reali, che corrispondono ad un incentivo economico di 80 €/C.B. che verranno assicurati per una durata di 5 anni.

Si riportano quindi i calcoli degli incentivi annui ottenuti grazie ai certificati bianchi.

Tabella 6.3. Incentivi annuali ottenuti grazie a certificati bianchi.

	Energia	TEP	Tau	C.B. reali	€/CB	Incentivo annuo
En.El. ORC 1° e 2° Stadio	2'848 MWh	532.6	3.36	1'789.51	80	143'161 €
En.El. Assorb.	3'362 MWh	628.6	3.36	2'112.25	80	168'980 €
En.El. modifica circuiti	1'695 MWh	316.9	2.65	839.77	80	67'182 €
Risparmio di gas naturale	7'003 MWh	602.2	3.36	2'023.53	80	161'882 €
TOTALE						541'205 €

6.2.3. Spese continue aggiuntive di manutenzione, ausiliari e accise.

Oltre ai risparmi, con l'intervento sono presenti anche dei costi annuali dovuti ad operazioni di manutenzione, a nuovi ausiliari installati e alle accise dovute alla produzione di energia elettrica.

Si riporta il costo per la manutenzione dell'ORC previsto per ogni anno, partendo da un costo specifico riguardante il kWh totale prodotto (anche con ausiliari).

Tabella 6.4. Spesa aggiuntiva per manutenzione annua.

	Energia	Costo specifico	Spesa
Produzione di energia da ORC 1° e 2° Stadio	3'298'044 kWh elettrici	-0.012 €/kWh	-39'577 €

Si riportano le spese aggiuntive previste per ausiliari presenti sui nuovi circuiti previsti dall'impianto.

Tabella 6.5. Spese aggiuntive annue dovute ad ausiliari.

	Energia	Costo specifico	Spesa
Energia consumata da ausiliari	- 413'459 kWh elettrici	0.1417 €/kWh	- 58'587 €

Si riportano infine le accise previste per la produzione di energia elettrica. Le accise hanno un certo costo al kWh fino a 2'400'000 kWh prodotti, considerando anche le perdite per ausiliari dell'ORC e un costo inferiore per i kWh che eccedono questo valore.

Tabella 6.6. Spese aggiuntive dovute ad accise sulla produzione di energia elettrica.

	Energia	Costo specifico	Spesa
Energia prodotta fino a 2'400'000 kWh	2'400'000 kWh elettrici	-0.0125 €/kWh	- 30'000 €
Energia prodotta oltre 2'400'000 kWh	898'044 kWh elettrici	-0.0075 €/kWh	- 6'735 €
TOTALE			- 36'735 €

6.2.4 Bilancio economico finale

A questo punto è possibile riassumere i risparmi e le spese per ottenere un bilancio annuale dei ricavi economici ottenuti grazie all'intervento di recupero energetico.

Tabella 6.7. Riassunto risparmi e costi dei primi 5 anni di attività.

	Risparmi/Costi
Risparmi totali di energia	1'607'804 €
Risparmi dovuti a certificati bianchi	541'205 €
Costi annuali	-134'899 €
TOTALE RISPARMIO NETTO ANNUO	2'014'110 €

A questo risparmio netto annuo si applica un coefficiente di sicurezza del 4% e un'ulteriore riduzione dei risparmi dovuta alle ore in cui l'impianto non è funzionante a causa della manutenzione obbligatoria. Questo riguarda principalmente il ciclo ORC primo stadio e l'assorbitore, dato che funzionano in continuo su tutto l'arco dell'anno, mentre l'ORC secondo stadio e il generatore di vapore indiretto non sono sempre in funzione ed è quindi possibile prevedere un'ulteriore coefficiente di riduzione del risparmio netto. Il risparmio netto annuo deve essere quindi ricalcolato applicando i coefficienti correttivi di sicurezza ai risparmi e ai certificati bianchi, che vengono uniti in un coefficiente totale del 4.93%.

Tabella 6.8. Applicazione coefficienti di sicurezza

Risparmi calcolati	Coeff.	Risparmio con margine correttivo
2'014'110 €	4.93%	1'914'732 €

Avendo calcolato il risparmio annuale al netto di accise, costi di manutenzione e spese per ausiliari è possibile calcolare il pay back time dell'investimento e i flussi di cassa annuali.

L'investimento totale che comporta questa soluzione è di 5'509'082 € totale che deve affrontare l'azienda. L'investimento è nettamente inferiore rispetto a quello previsto nella prima soluzione che comprendeva l'acquisto dei cogeneratori. Per il calcolo degli anni di ritorno dell'investimento, è possibile utilizzare il metodo del flusso di cassa attualizzato.

Si riporta quindi il grafico relativo ai flussi di cassa cumulati di ogni anno per la vita utile dell'impianto di recupero, garantita per 20 anni dall'installazione.

Si applica un tasso di attualizzazione del capitale del 2%. Non è stato considerato nessun tasso di aumento dell'energia elettrica o del gas naturale, per mantenere l'analisi economica più conservativa possibile.

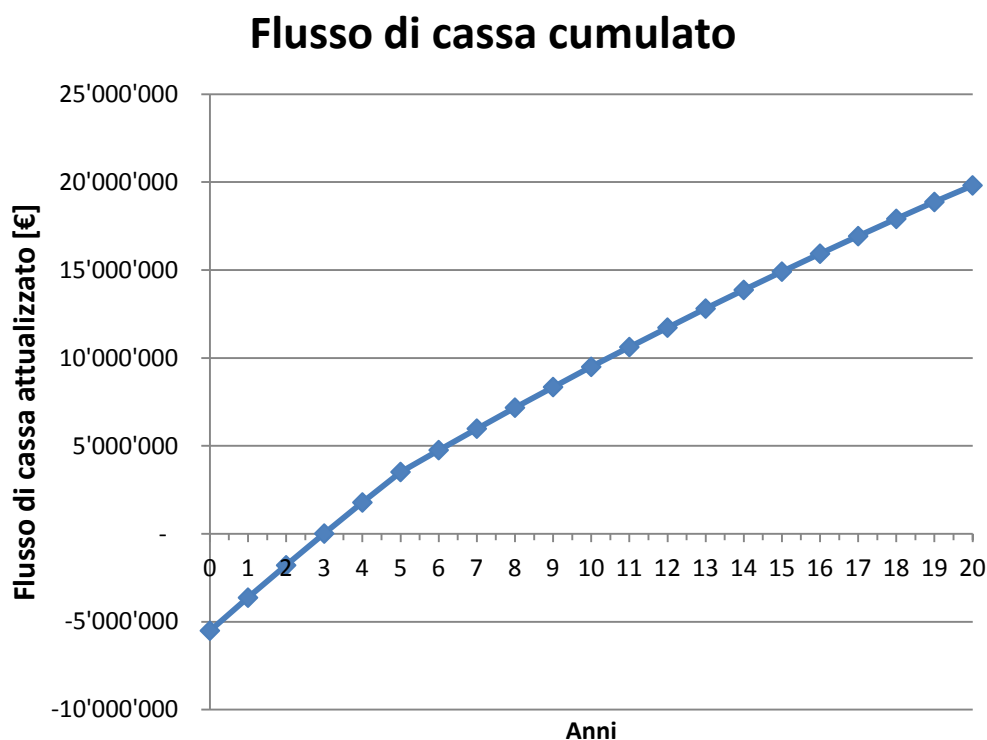


Figura 6.4. Flusso di cassa cumulato attualizzato per gli anni della vita utile dell'impianto.

Analizzando il grafico si evidenzia che il tempo di ritorno dell'investimento, considerando i coefficienti di sicurezza e l'attualizzazione, è di circa 3 anni, per la precisione 2.99 anni. L'investimento ha quindi un pay back time molto ridotto. Si nota una variazione della pendenza della curva dopo i 5 anni, dovuto al fatto che gli incentivi per i certificati bianchi vengono emessi per i primi 5 anni e quindi fino a quel momento il flusso di cassa cumulato cresce più velocemente.

Esiste poi la possibilità che vengano anticipati all'anno zero i primi tre anni di incentivi relativi ai certificati bianchi, riducendo di fatto in questo modo il costo dell'investimento iniziale.

Si riporta la curva del flusso di cassa cumulato secondo queste premesse.

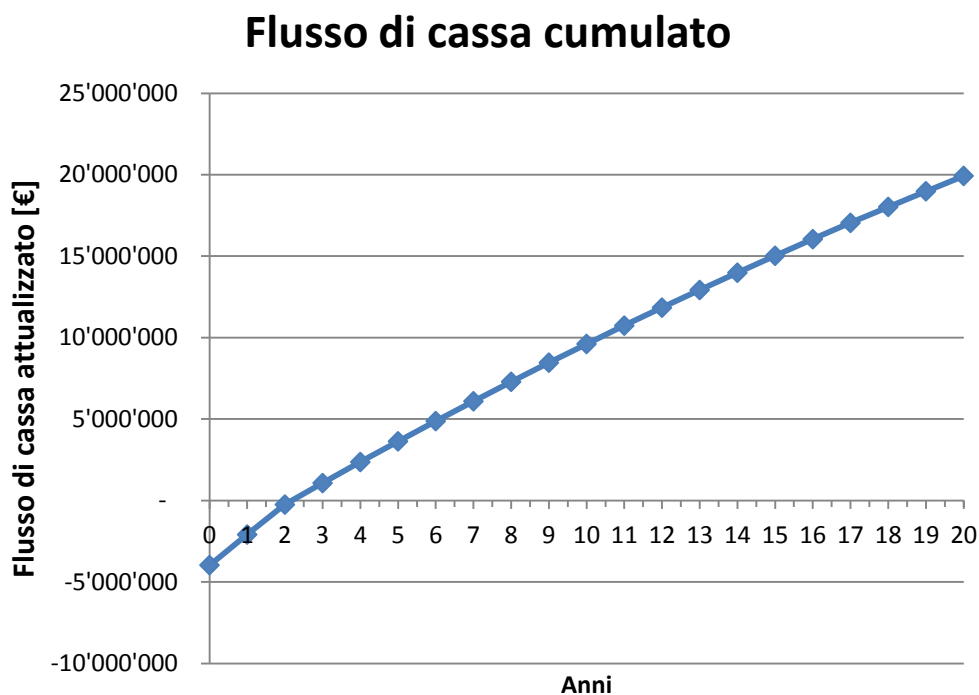


Figura 6.5. Flusso di cassa cumulato attualizzato con anticipo certificati bianchi.

Grazie all'anticipo degli incentivi relativi ai certificati bianchi, il pay back time si abbassa ulteriormente attorno ai 2.18 anni.

Questo intervento ha quindi un tempo di ritorno dell'investimento molto basso, mentre i macchinari installati hanno una vita utile di un ordine di grandezza maggiore. Nonostante l'investimento e la complessità dell'impianto non siano trascurabili, esiste un buon margine di risparmio energetico ed economico.

Per quantificare il risparmio economico ottenuto grazie all'intervento, è possibile calcolare quanto dovrebbe scendere il prezzo di acquisto dell'energia elettrica per risparmiare quanto risparmia lo stabilimento grazie all'intervento proposto.

Lo stabilimento consuma ogni anno 56'227'000 kWh di energia elettrica, che con un prezzo del kWh pari a 0.1417 €/kWh equivalgono a 7'967'366 €/anno di spesa per l'acquisto dell'energia elettrica. Il risparmio netto annuo dovuto all'intervento è pari a 1'914'732 €, cioè il 25% del costo totale di energia elettrica. E' quindi possibile considerare il risparmio economico ottenuto grazie all'intervento come una riduzione del 25% sul prezzo dell'energia elettrica. Si riportano i calcoli:

Tabella 6.9. Percentuale risparmio annuo rispetto alla spesa annua per l'acquisto di energia elettrica.

Consumo di energia elettrica in un anno	56'227'000 kWh
Prezzo di acquisto dell'energia elettrica	0.1417 €/kWh
Spesa dovuta all'acquisto di energia elettrica in un anno	7'967'366 €
Risparmio annuale grazie all'intervento	1'914'732 €
Percentuale risparmiata	24 %
Spesa sottraendo il risparmio annuale	6'052'634 kWh
Prezzo di acquisto dell'energia elettrica equivalente grazie all'intervento	0.106 € / kWh

E' possibile considerare l'intervento come uno 'sconto' sul prezzo di acquisto di energia elettrica, è infatti come se allo stabilimento fosse stata applicata una tariffa vantaggiosa sull'acquisto dell'energia elettrica pari al 24%. E quindi come se lo stabilimento acquistasse energia elettrica al prezzo di 0.1077 €/kWh. Si riporta la verifica dei calcoli.

Tabella 6.10. Verifica sconto su prezzo di acquisto energia elettrica.

Consumo di energia elettrica in un anno	56'227'000 kWh
Prezzo di acquisto dell'energia elettrica	0.10765 €/kWh
Spesa	6'052'634 €

Si è scelto di riportare questa equivalenza a causa dell'alto costo dell'energia elettrica in Italia, per poter poi confrontare la maggior competitività dell'azienda rispetto alle altre aziende europee che devono affrontare costi inferiori per l'acquisto dell'energia elettrica.

Il prezzo equivalente del kWh elettrico dopo la soluzione riporta lo stabilimento a livelli di prezzo più in linea con quelli da affrontare in altri paesi, permettendo all'azienda di aumentare la propria capacità di competere sul mercato.

Può essere interessante inserire questo dato in un contesto confrontandolo con il prezzo del kWh elettrico di altri paesi, per avere un'idea della posizione dell'azienda nel contesto internazionale, essendo Owens Corning una multinazionale con stabilimenti produttivi in diverse parti del mondo. I dati derivano da uno studio de Il Sole 24 ore^[4].

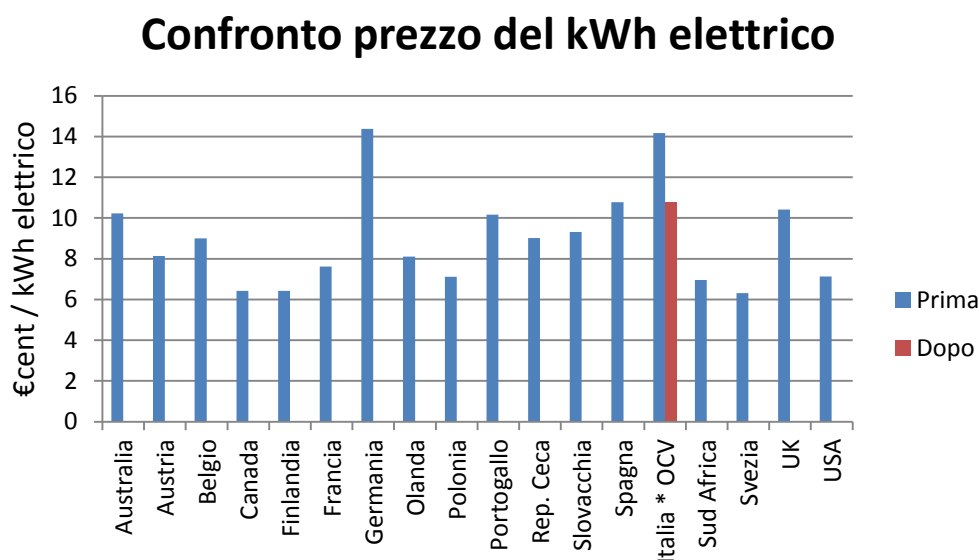


Figura 6.6. Prezzo di acquisto del kWh elettrico dell'azienda confrontato con quello di diversi paesi, secondo uno studio de il sole 24 ore.

Si nota agli stabilimenti produttivi di altri paesi, interventi di efficientamento energetico come quello proposto sono fondamentali per l'azienda per rimanere competitiva sul mercato senza che i costi dell'energia influiscano eccessivamente sul costo di produzione.

7 Garanzia dei risultati

Le società che propongono nel mercato queste soluzioni per il risparmio energetico sono denominate ESCO (Energy Service Company), come definito dal D.Lgs. 115/2008, ossia una società che offre servizi energetici integrati, propone contratti a prestazioni garantite il cui canone è collegato ai risparmi energetici conseguiti (energy performance contracting – EPC) e opera con il finanziamento tramite terzi (FTT), sia provvedendo in proprio al finanziamento dell'intervento, sia facilitando l'accesso al credito al cliente attraverso appositi contratti con le banche.^[6]

L'Energy Performance Contracting è un contratto a prestazioni energetiche garantite: la ESCO programma, finanzia (direttamente o tramite terzi, salvo disponibilità immediata del cliente) e realizza un progetto di efficientamento energetico e, per ripagare nel tempo i costi del progetto e dell'investimento, impiega il flusso di cassa dei risparmi ottenuti rispetto ad una baseline concordata con il cliente.

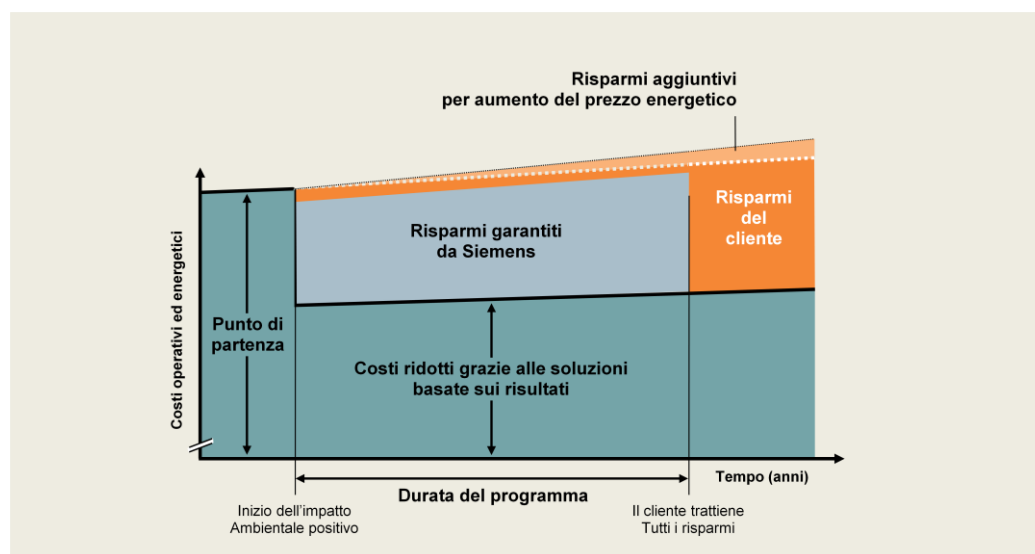


Figura 7.1. Schema finanziario del performance contracting.

Si descrive successivamente la forma contrattuale dell'energy saving performance contract (ESPC).

7.1 Contesto contrattuale: l'ESPC

Il seguente schema riassume il processo tipico di formazione di un contratto di ESPC; a seguire, una breve descrizione delle singole fasi, con relativi ruoli e responsabilità.

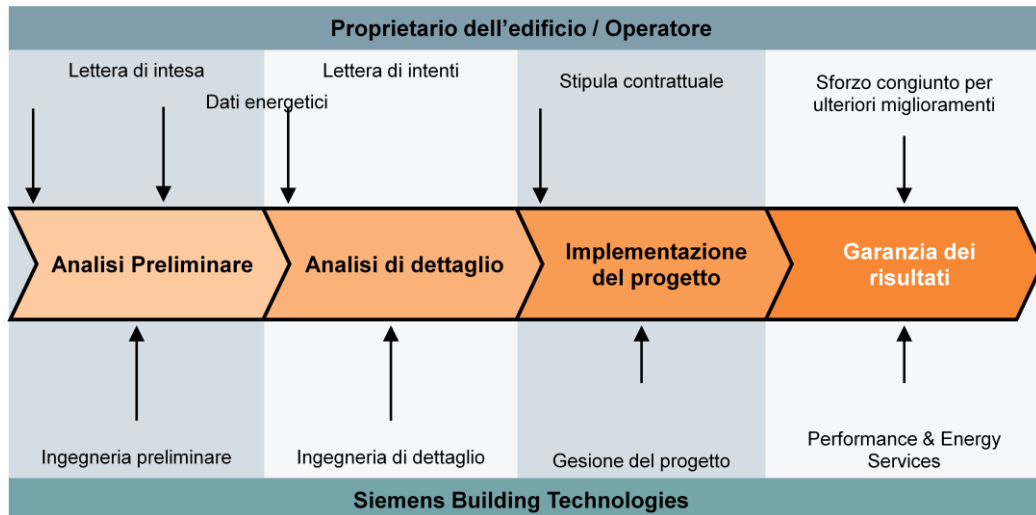


Figura 7.2. Processo dell'ESPC (Energy Saving Performance Contract)

Fase 1 – Analisi preliminare: è la fase del processo che verifica le potenzialità di risparmio energetico e si conclude con la consegna di un documento di analisi energetica, con i parametri economici in grado di fornire una prima indicazione dei risparmi e dei relativi investimenti necessari a conseguirli.

Sulla base dell'analisi preliminare, se vi sono risparmi energetici allineati alle aspettative dichiarate, viene proposto lo sviluppo della analisi di dettaglio tramite una lettera di intenti.

Fase 2 - Analisi di dettaglio: in questa fase l'attenzione si concentra sull'analisi di tutte le fonti e dei relativi percorsi energetici sino alle singole utenze. Tale analisi punta ad individuare aspetti che rivelino ulteriori opportunità di risparmio, consentendo di ottenere il risparmio previsto.

Se l'analisi di dettaglio conferma, o migliora, i dati dell'analisi preliminare, e cioè i risparmi e gli investimenti necessari a conseguirli, si procede alla stipula del Contratto di Performance (ESPC).

Fase 3 - Implementazione (contratto di risparmio energetico): questa fase consiste nella vera e propria realizzazione del progetto; ruolo chiave è svolto dal Project Manager, che ha come obiettivo la gestione di tutta la fase di implementazione della soluzione energetica nel rispetto dei tempi, costi e target qualitativi, fondamentali per poter adempiere alle garanzie di risparmio volti alla sostenibilità nel tempo dell'intervento.

Fase 4 - Performance Assurance: in questa fase vengono forniti i servizi di assicurazione dei risultati, che sono parte integrante del Contratto di Performance; il responsabile del performance assurance svolge i servizi di monitoraggio e verifica dei risparmi raccogliendo i dati energetici, verificando il corretto funzionamento dell'impianto e predisponendo al termine di ciascun periodo (concordato contrattualmente, normalmente quadrimestrale) del Periodo Annuale di Risparmio un resoconto nel quale verranno evidenziati i risparmi conseguiti in relazione alle previsioni contenute nel contratto di Performance. Detto resoconto avrà la funzione di monitorare il trend di consumi/risparmi durante il periodo di garanzia e servirà come base per la predisposizione del Rapporto Annuale, che viene trasmesso al Cliente.

Al termine del periodo annuale di risparmio, viene predisposto un preciso calcolo della quantità di energia consumata/risparmiata basata sui dati acquisiti.

La base utilizzata per il calcolo sono i dati di consumo contabilizzati prima della implementazione degli impianti (baseline) ed i consumi energetici registrati attraverso i contatori di energia, ad intervalli regolari, ed opportunamente corretti (criteri di "adjustment" per fattori quali occupazione, condizioni climatiche, etc).

7.2 Analisi finanziaria del caso in oggetto

I due schemi di FTT proposti dalla ESCO verso Owens & Corning, nel caso la società necessiti di tale forma di finanziamento, sono sotto riportati.

7.2.1 Modello finanziamento società finanziaria-cliente finale

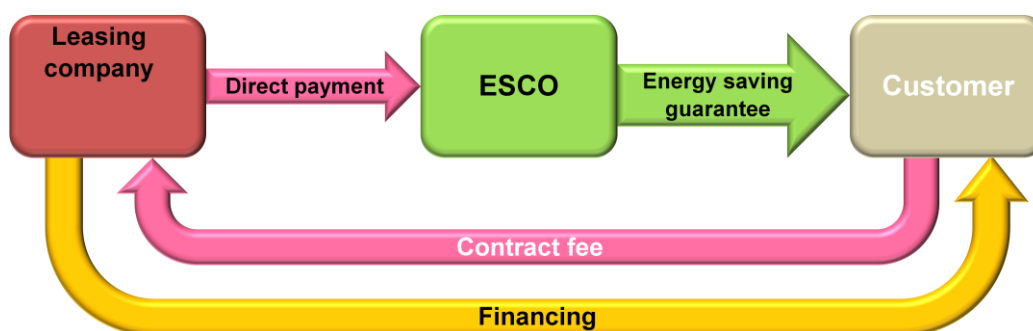


Figura 7.3. Schema con facilitazione dell'accesso al credito da parte della ESCO.

Questo è la conseguente profit and loss line.

Modello senza finanziamento diretto ESCO											
P&L (M€)	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	
energy saving termici	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	
energy saving elettrici	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	
energy saving ORC	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	
white certificate termici	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
white Certificate elettrici	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
white certificate ORC	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
total savings	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	
leasing	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	
maintenance costs	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	
UTIF	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	
total	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	
Operating Margin	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	Total 8.0825

Figura 7.4. P&L.

7.2.2 Modello finanziamento diretto ESCO

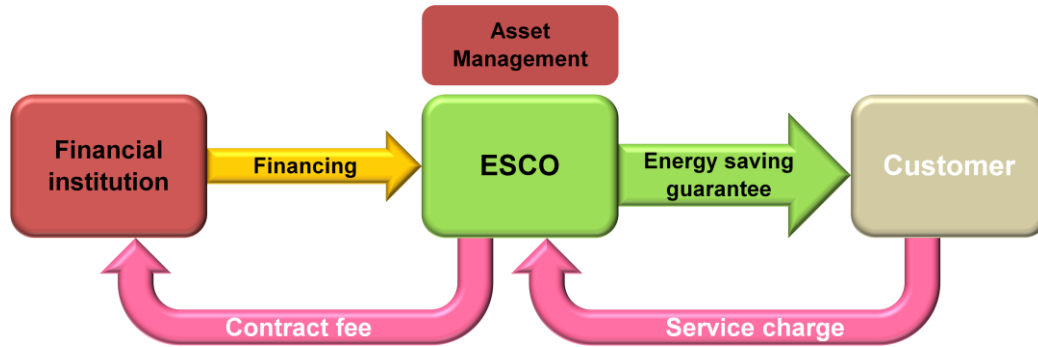


Figura 7.5. Schema con finanziamento diretto ESCO.

Questo è la conseguente profit and loss line.

Modello finanziamento diretto ESCO											
P&L (M€)	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	
energy saving termici	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	
energy saving elettrici	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	
energy saving ORC	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	
white certificate termici	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
white Certificate elettrici	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
white certificate ORC	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
total savings	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15	1.61	1.61	1.61	1.61	1.61	
revenue	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	
revenue O&M	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	
UTIF	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	
total	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	
Operating Margin	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	
Total											6.0894

Figura 7.6. P&L.

Bibliografia

- [1] Schemi di processo produttivo, Owens Corning
- [2] DEFRA (June 2007) *Act on CO2 Calculator: Public Trial Version Data, Methodology and Assumptions Paper*
www.defra.gov.uk/environment/climatechange/uk/individual/pdf/actonco2-calc-methodology.pdf
- [3] DEFRA (June 2007) *Guidelines to Defra's GHG conversion factors for company reporting*
www.defra.gov.uk/environment/business/envrp/pdf/conversion-factors.pdf
- [4] FIRE (2013) *Elaborazione dati FIRE su dati AEEG e GME Andamento mercato GME TEE prezzi* **www.fire-italia.it**
- [5] Il Sole 24 ore (2013) *Indagine internazionale sui costi di energia elettrica*
www.ilsole24ore.com/pdf2010/SoleOnline5/_Oggetti_Correlati/Documenti/Impresa%20e%20Territori/2013/07/costi-energia-elettrica-gas-naturale.pdf
- [6] FIRE (2012) *Un'analisi del mercato delle ESCO e dei servizi energetici*