POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

Indagine su un impianto di trattamento termico per acqua municipale

Relatore
Prof. Eliodoro Chiavazzo

Corelatore
Dr. Matteo Fasano
Dr. Luca Bergamasco

Candidato
Francesca Mollica

Dicembre 2018

Indice

Sommario…….……7
1. Potabilità dell'acqua…….……..9
1.1 Decreto legislativo 31/2001, <acque destinate al consumo umano>…….……10
1.2 Composizione dell'acqua non trattata……14
1.2.1 Particelle solide sospese……..……15
1.2.2 Inquinanti chimici……..…….……15
1.2.3 Agenti patogeni……18
1.2.3.1 Batteri coliformi…….…….20
1.2.3.2 Pseudomonas Aeruginosa…….……..22
1.2.3.3 Enterococchi…….……..23
1.3 Disinfezione dell'acqua…….…….25
1.3.1 Metodi per il trattamento dei corpi idrici……..…….……25
1.4 Pastorizzazione…….……..31
1.4.1 Stato dell'arte di soluzioni simili per il trattamento termico.…….…….32
1.4.2 Modello matematico di inattivazione microbica……..……..…….34
2.1 Descrizione di Impianto……36
2.2 Prove sperimentali in laboratorio……..41
2.2.1 Scelta della combinazione Temperatura - Tempo…….……..41
2.2.2 Attrezzatura utilizzata per il trattamento……44
2.2.3 Protocollo di esecuzione…….45
2.2.4 Risultato prove sperimetali…….49
3.1 Analisi Economica di un impianto solare termico per il trattamento delle acque……..51
3.1.1 Dati geometrici e termici di ogni singolo componente di impianto……..53
3.1.2 Costi dei componenti di impianto …….56
3.1.3 Valutazione dei costi di investimento…….58
3.2 Calcolo del NPV e Payback Period……..……61
3.2.1 Net Present Value ..……..……..61
3.2.2 Payback Period…….……..63
3.2.3 Calcolo del WACC (Weighted Average Cost of Capital) …….…….64
3.2.4 Ritorno dell'investimento rispetto ad un impianto di sola caldaia …….……..66

3.3 Risparmio di emissioni di CO_2 Annue con integrazione del campo solare……73
3.3.1 Importanza delle fonti rinnovabili……73
3.3.2 Quantificazione della CO_2 non emessa in atmosfera dall'impianto……74
4.1 Concetto di Exergia……76
4.1.1 Equazione dell'Energia utilizzabile o Exergia……78
4.1.2 Convenzione dei segni……79
4.1.3 Rendimento di secondo principio o Efficienza Exergetica……79
4.1.4 Ambiente esterno di riferimento o Biosfera……80
4.2 Condizioni di esercizio dell'impianto……80
4.2.1 Valutazione dell'exergia distrutta per componenti d'impianto……84
4.2.2 Risultati Analisi Exergetica……92
5. Conclusioni……94
Appendice A……95
A.1 Material Factor……95
A.2 Pressure Factor……97
Appendice B……99
B.1 Tabelle riassuntive per il calcolo nel NPV……101
Appendice C……102
C.1 Tabelle di saturazione dell'acqua……102
Appendice D……103
D.1 Determinazione dell'equazione dell'Exergia……103
D.2 Ambiente di riferimento……105

Indice delle figure

Fig 1.1 - Inquinamento idrico da Nitrati ……..…16
Fig 1.2 - Inquinamento idrico da Pesticidi ..……16
Fig 1.3 - Escherichia coli al microscopio ottico…..…….….20
Fig 1.4 - Pseudonomas Aeruginosa…….…….22
Fig 1.5 - Enterococcus faecalis..…….…….…….23
Fig 1.6 - Pasteurizer for solar water treatmen……..…….32
Fig 1.7 - Curva di inattivazione dei microorganismi patogeni da pastorizzazione ……..33
Fig 2.1 - Impianto trattamento acqua tramite metodo di pastorizzazione…….36
Fig 2.2 - Collettori solari a configurazione U-pipe con riflettori CPC ..…….…….38
Fig 2.3 - Confronto prestazioni collettori solari tradizionali e sottovuoto..…….….39
Fig 2.4 - Riproduzione curva di inattivazione agenti patogeni ..…….. 42
Fig 2.5 - Prototipo adoperato durante le prove sperimentali…….45
Fig 2.6 - Attrezzatura di laboratorio.…….……46
Fig 2.7 - Sistema di sterilizzazione, laboratorio SMaLL.…….……47
Fig 2.8 - Esecuzione prova di laboratorio a 70°C ..…….…….49
Fig 2.9 - Esecuzione prova di laboratorio a 75°C ..…….…….49
Fig 2.10 - Esecuzione prova di laboratorio a 80°C…….……..49
Fig 2.11 - Esecuzione prova di laboratorio a 85°C ..……49
Fig 3.1 - Ripartizione dei costi di investimento per l'impianto……60
Fig 3.2 - Curva degni NPV con wacc=2,288% ..…….…….70
Fig 3.3 - NPV a 25 anni al variare del tasso di interesse ……..……71
Fig 3.4 - Trend del tempo di ammortamento nei tre casi studio ..……72
Fig 3.4 - Andamento CO_2 non emessa dall'impianto con integrazione campo solare ..……..75
Fig 4.1 - Interazione ambiente/sistema…….……77
Fig 4.2 - Convenzione dei segni in analisi exergetica …….…….……79
Fig 4.3 - Schema impianto trattamento acqua. Software adoperato: AutoCAD…..,…….. 81
Fig 4.4 - Volume di controllo dell'accumulo termico……..……..…88
Fig 4.5 - Schema di funzionamento caldaia integrativa a metano..…….……..…90
Fig 4.6 - Volume di controllo del boiler..…….…..…91

Fig 4.7 - Irreversibilità dei componenti d'impianto, caso A ……..…….92
Fig 4.8 - Irreversibilità dei componenti d'impianto, caso B ……..……93
Fig A.1 - Numero identificativo per fattore di materiale pt.1……..……95
Fig A.2 - Numero identificativo per fattore di materiale pt.2……..……96
Fig A.3 -Fattore del materiale Fm……96
Fig A.4 - Fattore di pressione per apparecchiature di processo pt.1 ……..…..97
Fig A.5 - Fattore di pressione per apparecchiature di processo pt.2……97
Fig A.6 - Fattore di pressione per apparecchiature di processo pt.3. ……..98
Fig B.1 - NPV delle tre configurazioni di impianto con wacc=2,961% ……100
Fig B.2 - NPV delle tre configurazioni di impianto con wacc=2,961% ……100
Fig B.3 - NPV delle tre configurazioni di impianto con wacc=3,6185%……..……..…100

Indice delle tabelle

Tab 1.1 - Parametri microbiologici per acqua potabile…….……11

Tab 1.2 - Parametri microbiologici per acque messe in vendita in bottiglie o in contenitori.. 11

Tab 1.3 - Parametri chimici…..…….12

Tab 1.4 - Parametri indicatori……13

Tab 1.5 - Analisi dei costi delle diverse tecnologie di disinfezione……..30

Tab 2.1- Coppie di Temperatura e Tempo realizzate durante le prove ..……..42

Tab 2.2 - Coppe di Temperatura - Tempo addizionali realizzate in laboratorio..……. 43

Tab 3.1 - Dati Collettori Solari……...…53

Tab 3.2 - Dati delle pompe dei tre diversi circuiti ..……..53

Tab 3.3 - Dati economizzatore lato trattamento acqua.……54

Tab 3.4 - Dati dell'accumulo termico, temperatura della risorsa: 90°C ..……54

Tab 3.5 - Serpentina circuito trattamento acqua……54

Tab 3.6 - Serpentina circuito campo solare..……54

Tab 3.7 - Serpentina circuito caldaia integrativa.……..55

Tab 3.8 - Dati di potenza caldaia di integrazione a metano.……55

Tab 3.9 - Valori costanti riferite alle tipologie di componente scelto e range di validità ..…..58

Tab 3.10 - Valori delle costati per il calcolo del C_{BEC}……..59

Tab 3.11 - Costi dei componenti di impianto per le tre configurazioni……60

Tab 3.12 - Valori del WACC in funzione delle percentuali di debito e equity……..66

Tab 3.13 - Valori energetici ed economici necessari per il calcolo del NPV……69

Tab 4.1 - Condizioni termodinamiche e exergia fisica relativa ……83

Tab 4.2 - Rappresentazione produttiva dei componenti del caso A…..……83

Tab 4.3 - Rappresentazione produttiva dei componenti del caso B…..……84

Sommario

L'acqua è una delle risorse più importanti ed essenziali per la sopravvivenza degli esseri viventi. Il continuo aumento della popolazione ha determinato una maggiore richiesta di acqua potabile e il miglioramento della sua qualità.
Nel lavoro di tesi si illustra l'importanza della potabilizzazione dell'acqua, i principali microrganismi patogeni che popolano le acque non trattate e le ripercussioni sulla salute umana in caso di assunzione di acqua contaminata. Ci sono diversi metodi di trattamento acqua come la clorazione, l'ozonizzazione, la cavitazione di cui è riportato schematicamente il loro funzionamento e le possibili problematiche, soffermandosi più dettagliatamente sul metodo di pastorizzazione su cui è basato il lavoro.
Lo scopo principale è quello di analizzare a livello tecnico la fattibilità dell'impianto di trattamento acqua ideato per SMAT, verificando che le combinazioni di temperatura e tempo di esposizione del trattamento termico, adoperate durante le prove sperimentali, siano sufficienti ad abbattere i microorganismi inquinanti presenti nell'acqua fornita dall'azienda. Si procede successivamente con una analisi economica ed exergetica delle configurazioni di impianto da analizzare, ricercando la soluzione ottimale.

Il lavoro è composto nello specifico da quattro capitoli :

Nel **primo capitolo** si presentano le problematiche relative alla contaminazione dell'acqua, quindi quali sono i principali inquinanti idrici, fornendo una visione sul tipo di sostanze chimiche e microrganismi patogeni presenti e sulle patologie possibili in caso di uso di acqua non trattata. Si elencano inoltre le diverse tecnologie utilizzate più frequentemente dando maggiore importanza al trattamento di pastorizzazione su cui è basato l'intero lavoro.
Per tale trattamento fisico si riportano le soluzioni impiantistiche reperite da analisi di letteratura sullo stato dell'arte.

Nel **secondo capitolo** si presentano le prove sperimentali effettuate presso il laboratorio SMaLL al Politecnico di Torino, dunque il prototipo utilizzato per simulare la parte

d’impianto dedicata al trattamento delle acque, il protocollo utilizzato durante tali prove e i risultati ottenuti.
L’acqua processata è stata poi consegnata al centro ricerche SMAT, presso il quale è stata effettuata un analisi per la rilevazione della carica microbica. L’iter di processo è stato necessario per studiare l'efficacia del trattamento in termini di concentrazione degli agenti patogeni, verificando in tal modo il rispetto dei limiti imposti dal decreto legge 31/2001 (Ref [2], Acque destinate al consumo umano).

Nel **terzo capitolo** ci si concentra sull’aspetto economico della soluzione termica ottimale di impianto, fornendo un quadro generale sui costi di investimento da sostenere. Questa analisi è effettuata su tre possibili soluzioni impiantistiche, differenziazione riguardante la quantità di portata d’acqua da processare e le relative variazioni di taglie dei componenti di impianto, andando ad investigare la configurazione ottimale in termini economici (minimo tempo di ritorno dell’investimento e massimo valore attuale netto a fine esercizio). Si fornisce inoltre un’analisi sul ritorno economico per tali soluzioni valutate rispetto ad un caso base in cui la fonte di energia primaria è esclusivamente il metano. Viene inoltre evidenziata la quantità di emissioni annue di CO_2 non immesse in atmosfera optando per la soluzione con integrazione di solare termico.

Nel **quarto capitolo**, infine, si procede ad un'analisi exergetica, individuando i valori di exergia nei capisaldi dell’impianto e le irreversibilità per ogni singolo componente.

Capitolo 1 - Stato dell'arte

1. Potabilità dell'acqua

A partire dagli anni '70-'80 si è rivolta una maggiore attenzione alla qualità dell'acqua potabile, soffermandosi principalmente sul quantitativo di sostanze chimiche potenzialmente pericolose presenti in essa, qualora fosse destinata al consumo umano.
A tal proposito furono effettuate delle indagini mirate sull'inquinamento idrico da sostanze chimiche andando a sottovalutare la componente microbiologica, altrettanto pericolosa per la salute. Solo dopo un incessante aumento di malattie correlate al consumo di acqua potabile nei paesi industrializzati, si è recepito che tali epidemie potessero avere un'altra origine, e dipendere dagli agenti patogeni nelle risorse idriche, seppure potabilizzate.

Tra il 1999 e 2000 in USA sono state registrate 39 epidemie, attribuite al consumo di acqua potabile, delle quali ne erano affetti 2068 persone e che portarono a due decessi.
Sono stati riportati dati americani in quanto gli USA era l'unico paese che dal 1971 possedeva un sistema di sorveglianza specifica per le patologie idrodiffuse.
Solo di 20 epidemie furono identificate le cause scatenanti, due furono attribuite alla presenza di sostanze chimiche, le restanti 20 ai microorganismi patogenti in acqua.

Tra le patologie causate da microorganismi, il 45% fu attribuito ai batteri (*Escherichia coli* 0157:H7, *Salmonella* spp.), il 35% a parassiti (*Cryptospordium pavius* e *Giardia duodenalis*) e il restante 20% a virus.
Da diversi studi si è notato che la stima su patologie derivanti da agenti patogeni nei paesi industrializzati sono sottostimate. In Europa , ad esempio, dove non è presente un sistema di sorveglianza per le patologie derivanti da uso di acque contaminate, molte gastroenteriti potrebbero essere causate da acque non trattate [1].

L'acqua potabile è una delle più importanti risorse per la sopravvivenza degli esseri viventi e indispensabile per molte attività antropiche.

Per acqua potabile si intende una acqua qualitativamente sicura e idonea, che possa quindi essere consumata dall'uomo in totale sicurezza durante il corso della vita, senza dover incorrere in malattie più o meno gravi.

A tal proposito, vengono stilate delle normative nazionali a tutela della salute umana, che hanno lo scopo di regolamentare la qualità dell'acqua sia per uso domestico che industriale ponendo dei limiti consistenti sulla concentrazione di microorganismi e inquinanti organici ed inorganici presenti nell'acqua[2].

1.1 Decreto legislativo 31/2001, <acque destinate al consumo umano>

Sulla base degli orientamenti dell'Organizzazione Mondiale della Sanità, sono stati identificati i criteri per il monitoraggio e la sicurezza delle acque destinate al consumo umano, indicandone i valori limite dei parametri di qualità.
In Italia, la normativa di riferimento è il "**Decreto legislativo 2 febbraio 2001, n. 31, attuazione alla Direttiva 98/83CE**" [3], che concerne la salvaguardia della salute umana, messa in pericolo in caso di utilizzo e assunzione di acque contaminate.

Con "acque destinate al consumo umano" si fa riferimento ad acque trattate e non trattate per uso domestico, destinate a preparazione di bevande e cibi, di uso potabile, distribuite tramite rete o mediate contenitori o bottiglie. Appartengono alla categoria anche le acque adoperate dalle imprese alimentari per il trattamento e la conservazione di cibi o sostanze destinate al consumo dell'uomo, escludendo acque che non hanno ripercussioni sulla salubrità del alimento finale.
In tal decreto non sono processate le acque minerali naturali poiché regolate da una legislazione differente. Sono inoltre escluse le acque destinate ad usi per cui la sua qualità non ha minime ripercussioni sulla salute dei consumatori.
Nel dettaglio, D.Lgs 31/2001 ('Attuazione della direttiva 98/83/CE relativa alla qualità delle acque destinate al consumo umano'), con le sue successive variazioni ed aggiunte, fornisce restrizioni su 53 parametri, così suddivisi:

- 2 parametri microbiologici (5 per le acque vendute in contenitori o in bottiglia);
- 28 parametri “chimici”, elementi indesiderati e tossici, per i quali sono indicati limiti restrittivi di concentrazione in acqua;
- 21 parametri “indicatori”, per i quali sono menzionati valori consigliabili che non dovrebbero essere superati;
- 2 parametri di radioattività.

A seguire sono illustrati i valori tabellati delle singole voci di inquinanti inorganici e organici o microorganismi con i rispettivi limiti:

Parametri e valori di parametro

PARTE A

- **Parametri microbiologici** :

Parametro	**Valore di parametro (numero/ 100 ml)**
Escherichia coli (E. coli)	0
Enterococchi	0

Tab 1.1 - Parametri microbiologici per acqua potabile [3].

- **Parametri microbiologici per acque messe in vendita in contenitori o bottiglia:**

Parametro	**Valore di parametro**
Escherichia coli (E. coli)	0/ 250 ml
Enterococchi	0/ 250 ml
Pseudonomas aeruginosa	0/ 250 ml
Conteggio delle colonie 22° C	100/ ml
Conteggio delle colonie 37° C	20/ ml

Tab 1.2 - Parametri microbiologici per acque messe in vendita in bottiglie o in contenitori [3].

PARTE B

- **Parametri chimici :**

Parametro	Valore di parametro	Unità di misura
Acrilammide	0,1	µg/l
Antimonio	5,0	µg/l
Arsenico	10	µg/l
Benzene	1,0	µg/l
Benzo(a)pirene	0,01	µg/l
Boro	1,0	µg/l
Bromato	10	µg/l
Cadmio	5,0	µg/l
Cromo	50	µg/l
Rame	10	µg/l
Cianuro	50	µg/l
1.2 dicloroetano	3,0	µg/l
Epicioridrina	0,10	µg/l
Fluoruro	1,50	µg/l
Piombo	10	µg/l
Mercurio	1,0	µg/l
Nichel	20	µg/l
Nitrato (come NO3)	50	µg/l
Nitrato (come NO2)	0,50	µg/l
Antiparassitari	0,10	µg/l
Antiparassitari - Totale	0,50	µg/l
Idrocarburi policiclici aromatici	0,10	µg/l
Selenio	10	µg/l
Tetracloroetilene Tricioroetilene	10	µg/l
Trialometani - Totale	30	µg/l

Tab 1.3 - Parametri chimici [3].

PARTE C

- **Parametri indicatori :**

Parametro	Valore di parametro	Unità di misura
Alluminio	200	µg/ l
Ammonio	0,50	µg/ l
Cloruro	250	µg/ l
Clostridium perfringens spore comprese)	0	Numeri / 100 ml
Colore	Accettabile per i consumatori e senza anomale variazioni	
Conduttività	2500	µScm^{-1} a 20° C
Concentrazione ioni idrogeno	6,5 ≤ [C] ≤ 9,5	Unità pH
Ferro	200	µg/ l
Manganese	50	µg/ l
Odore	Accettabile per i consumatori e senza anomale variazioni	
Ossidabilità	5,0	mg/ l O2
Solfato	250	mg/ l
Sodio	200	mg/ l
Sapore	Accettabile per i consumatori e senza anomale variazioni	
Conteggio delle colonie a 22° C	Senza anomale variazioni	
Batteri coliformi a 37° C	0	
Carbonio organico totale (TOC)	Senza anomale variazioni	
Torbidità	Accettabile per i consumatori e senza variazioni anomale	
Durezza		
Residuo secco a 180° C		
Disinfettante residuo	Il limite inferiore vale per le acque sottoposte a trattamento di addolcimento o di dissalazione	

Tab 1.4 - Parametri indicatori [3].

1.2 Composizione dell'acqua non trattata

Differenti sono i modi in cui i mocroinquinanti possano contaminare i corpi idrici: perdite e sversamento, effluenti di acque di scarico , deposizione atmosferica. Con corpi idrici si fa riferimento a laghi, oceani, fiumi e falde acquifere.

Se vi è un rilascio di acque reflue non trattate in maniera ottimale può portare problematiche all'ecosistema acquatico e alla salute pubblica (es. chi vive a valle), ma spesso la contaminazione è dovuta anche ad attività umane.

L'inquinamento idrico, infatti, costituisce una delle principali cause di morte e malattia a livello mondiale.

Gli inquinanti presenti nei corpi idrici possono essere suddivisi in tre principali categorie:

- Particelle solide sospese
- Inquinanti chimici
- Microorganismi patogeni.

La loro pericolosità per l'uomo dipende da diversi fattori:

- capacità di sopravvivenza degli agenti patogeni all'interno dell'acqua,
- dalla capacità di proliferare nelle condizioni termo-fisiche dell'ambiente ospitante,
- dalla dose infettante.

Inoltre, la moltitudine di inquinanti comporta anche una differenziazione sulle patologie provocate.

A seguire saranno descritti con maggiore dettaglio ogni singola voce sopra citata focalizzando una particolare attenzione sui microorganismi principali che sono riportati nel decreto legge 31/2001, specificando la loro loro natura e le patologie che possono essere loro attribuite se presenti in acque non potabili e utilizzate dall'uomo.

Buona parte di essi, in verità, vengono già debellati nelle prime fasi di depurazione attraverso dei processi biologici, ma è inevitabile un trattamento esterno che porti alla totale eliminazione degli inquinanti.

1.2.1 Particelle solide sospese

Sono delle particelle sospese di materiale solido molto sottili nell'ordine di circa 60 μm di diversa origine. Appartengono a questa categoria materiali insolubili di natura organica o inorganica quali povere, sabbia, decomposizione di materiale animale o di piante acquisito quando l'acqua superficiale circola sul terreno. La presenza di tali sostanze determina quindi la torbidità, la non trasparenza e la non potabilità, seppur in parte, dell'acqua.

1.2.2 Inquinanti chimici

Nell'acqua sono presenti una moltitudine di sostanze chimiche che possono provenire da diverse fonti. La loro diversità è attribuita alla loro composizione (sostanze organiche o inorganiche), solubilità o insolubilità in acqua e la loro tossicità per l'uomo e per l'ambiente stesso.

Da alcune stime si è ricavato che si trovano in acqua più di 700 tipi di sostanze chimiche catalogate in 20 classi differenti, di cui alcune possono recare danni considerevoli e posso essere pericolose per la vita, altre invece meno pericolose per la salute .

Possono inoltre essere di diversa origine, naturale o sintetica, e possono essere presenti in acqua naturalmente o a causa di attività svolte dall'uomo, basti pensare alle sostanze chimiche agricole come pesticidi e nitrati di cui parleremo a breve.

I **nitrati** sono utili in agricoltura e rappresentano una delle fonti principali di inquinamento idrico. Sono sostanze costituite essenzialmente da ossigeno e azoto e sono presenti all'interno di fertilizzanti chimici ed organici sui terreni coltivati. A causa della sua elevata solubilità è facilmente reperibile in acque superficiali e in acque di falda. Se presenti in grosse quantità nei corpi idrici possono portare al fenomeno di eutrofizzazione, ossia una crescita incessante di vegetazione. Il suo accrescimento necessita di grandi quantità di ossigeno che non sono più disponibili per la fauna acquatica.

Ma oltre ad avere un impatto ambientale, i nitrati presentano problematiche anche per la salute umana. Se ingeriti in particolari condizioni, i nitrati vengono convertiti in nitriti e possono portare a patologie quali "Sindrome da sangue blu", che colpisce soprattutto i neonati [4].

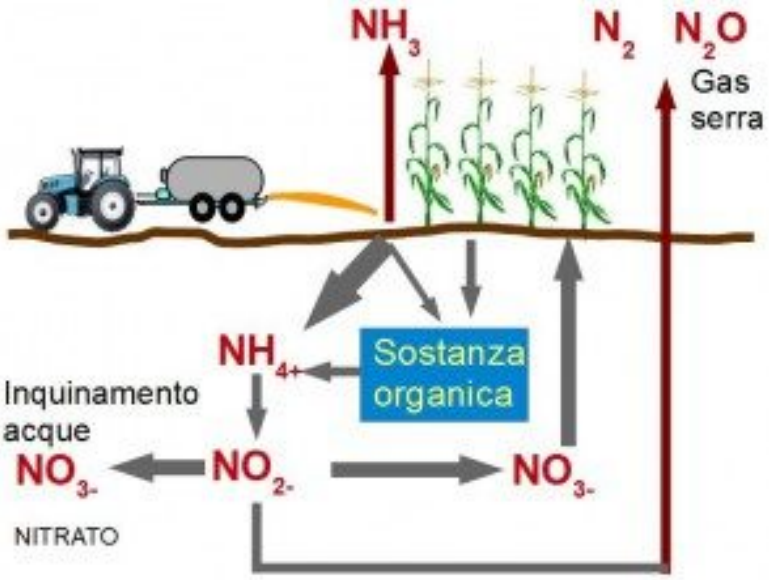

Fig 1.1 Inquinamento idrico da Nitrati [4]

I **pesticidi**, detti anche antiparassitari o fitosanitari, invece, sono utilizzati in agricoltura per salvaguardare le piante da eventuali parassiti (animali e vegetali: come batteri, funghi e insetti) che compromettono la qualità del raccolto e la produttività del suolo. Essi possono essere sintetici o derivanti da elaborazione di sostanze organiche. A causa delle precipitazioni, i pesticidi possono essere assorbiti dal suolo e contaminare le falde acquifere. Attraverso l'acqua o il cibo possono essere assunti dall'uomo con conseguenti danni alla salute. Già a partire dal 1992, in Italia, molti pesticidi erano stati ritenuti dall'Istituto superiore della Sanità dannosi e portatori di gravi malattie come il cancro o alterazioni dell'apparato endocrino.

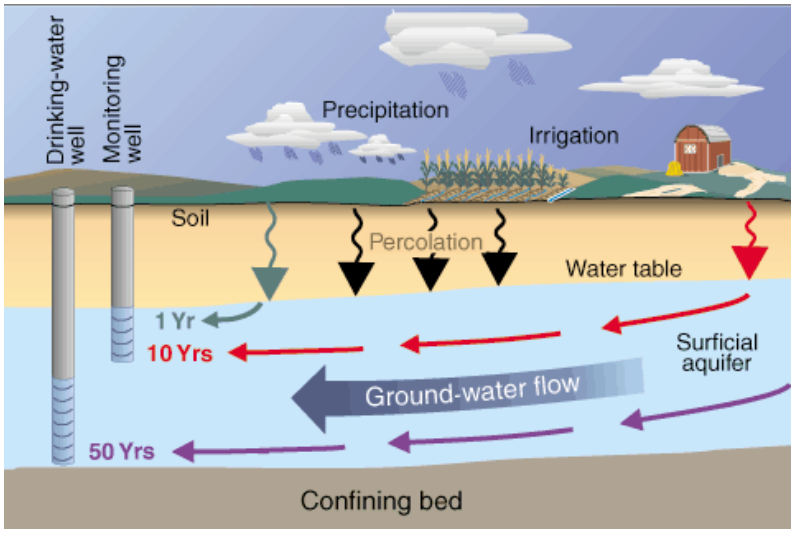

Fig 1.2 - Inquinamento idrico da pesticidi [50].

Tra i vantaggi derivanti dall'utilizzo di pesticidi si ricorda l'eliminazione di particolari malattie come la febbre gialla, la malaria in alcuni territori e la maggiore produzione agricola che andava di pari passo con l'aumento della popolazione mondiale. Ma d'altro canto essi presentano una minaccia per l'uomo.
I pesticidi, come riporta il termine stesso, hanno il compito di uccidere i microrganismi bersaglio. Essi vanno ad intaccare le funzioni vitali degli agenti patogeni o la loro struttura, i quali spesso possono anche essere presenti nel corpo umano. Di conseguenza risultano nocivi e tossici per la salute umana. L'esposizione ad alcuni particolari pesticidi tossici per l'uomo possono recare effetti negativi al sistema nervoso centrale, al fegato e alla fertilità.
L'ideale sarebbe utilizzare i così detti *pesticidi selettivi* e non generici, i quali agiscono esclusivamente su un particolare tipo di bersaglio, persistono in atmosfera per un tempo limitato così da minimizzare la loro presenza in acque, suolo e limitare l'accumularsi in organismi incluso l'uomo.

Seppur severamente regolamentata nei paesi industrializzati, è stata riscontrata una concentrazione di pesticidi pari al limite massimo consentito (Gli standard EU per acqua potabile riguardo ai pesticidi sono molto restrittivi: **0.1 µg/l**) da sondaggi sulle acque sotterranee [5].

Sono inoltre presenti in acqua alte concentrazioni di fluoro che possono provocare una fluorosi, ai denti o persino alle ossa, alcuni metalli pesanti come il mercurio, il cromo e l'arsenico.

Appartengono alla categoria di inquinanti chimici anche i composti aromatici alogenati come i **bifenili policlorurati (PCB)** e **difenileteri polibromurati (PBDE)**. Sono composti molto simili sia a livello strutturale sia per le loro proprietà chimico-fisiche.
I PBDE sono stati utilizzati in ambito elettronico, i PCB in una vasta gamma di applicazioni industriali, ad esempio come lubrificanti o refrigeranti per i trasformatori e condensatori.
Questi composti chimici sono presenti in atmosfera in quanto facili da trasportare e tendono ad accumularsi nei tessuti grassi. Sono molto dannosi per l'uomo e possono causare problemi di fertilità e effetti neurotossici e cancerogeni [6].

1.2.3 Agenti patogeni

I microorganismi patogeni o agenti patogeni possono essere distinti in tre categorie:

- Batteri
- Virus
- Protozoi parassita.

BATTERI

I batteri sono organismi unicellulari, di forma sferica o bastoncello, con dimensione variabile tra 0.2 e 12 μm in larghezza e 0.4 e 14 μm in lunghezza.
La riproduzione dei batteri avviene per scissione binaria che consiste nello sdoppiamento della cellula madre in due cellule figlie indistinguibili. Non tutti i batteri risultano dannosi per gli esseri viventi e spesso hanno ruoli rilevanti in diversi processi; la principale funzione svolta dai batteri riguarda la fertilità del suolo dal momento che incentivano la sintesi delle proteine da parte delle piante. Vengono anche impiegati per la produzione alimentare in ambito caseario. Ancora più importante è il ruolo che essi rivestono nel controllo dell'equilibrio biologico.
Una classe di batteri, i **batteri parassiti**, si cibano di altre specie e possono indurre malattie nell'organismo ospite producendo sostanze nocive, indebolendo le difese dell'organismo stesso. Infatti la maggior parte delle patologie che investe l'uomo sono dovute alla presenza di tali batteri nelle acque non trattate; basti pensare alle zone in via di sviluppo dove si assiste ad un elevato tasso di mortalità infantile dovuto all'inquinamento delle risorse idriche.

.

L’Influenza Della Temperatura sul Processo di Vita e Morte dei Batteri

La Temperatura ha un ruolo fondamentale nelle funzioni di catabolismo e metabolismo degli organismi unicellulari, un aumento troppo elevato della temperatura potrebbe portarli alla morte. Le cellule dei microorganismi sono costitute prevalentemente da acqua, proteine e sali disciolti, alcuni dei quali sono responsabili della loro sopravvivenza e crescita.

I batteri possono essere distinti in tre classi in base alla temperatura di accrescimento:

- Psychrophiles: con temperatura di accrescimento ta i 10 e 30 °C.
- Mesophiles : tra i 37 e 40°C.
- Thermophiles: oltre i 55°C.

I Psychrophilic bacteria li ritroviamo all’interno dell’acqua a bassa temperatura, i Thermophiles bacteria, invece, caratterizzano le sorgenti d’acqua calda, il suolo e le feci e resistono maggiormente alle alte temperature.

La temperatura alla quale sottoporre gli agenti patogeni per portarli alla morte si aggira tra i 60 e 65°C.

Tuttavia i batteri tendono ad accrescersi e moltiplicarsi se presenti in un ambiente caratterizzato da una temperatura compresa fra i 5 e i 60 °C, ne consegue che per temperature minori di 5 °C si può effettuare un arresto della loro crescita e proliferazione, per temperature superiori ai 60°C possono essere debellati totalmente [7].

1.2.3.1 Batteri Coliformi

I b**atteri coliformi** appartengono al gruppo delle <*Enterobacteriaceae*>: organismi che abitano l'intestino umano e animale. Sono batteri gram-negativi, ovvero tendono ad una colorazione rosacea dopo la colorazione di Gram, a differenza dei gram-positivi che dopo tale prova in laboratorio presentano una colorazione tendente al blu o viola. Tale differenza fa riferimento allo spessore della membrana, detta Peptidoglicano, che nel caso dei gram-negativi è moto sottile, motivo per cui non trattengono la colorazione.

Essi sono responsabili della fermentazione del lattosio con produzione di acidi e grassi a temperatura comprese tra i 35-37°C. Sono inoltre utilizzati come indicatori del livello di inquinamento acquifero.

Uno dei gruppi principali di questa specie è l'E**scherichia.** A questa famiglia appartengono gli Escherichia Coli, i Klebsiella, Citrobacter e Enterobacter i quali costituiscono i **Coliformi Fecali** che risultano i più pericolosi negli ambienti acquosi.

Escherichia Coli

Fig 1.3 - Escherichia Coli al microscopio ottico [46].

Gli **Escherichia coli** appartengono al gruppo dei Coliformi e caratterizzano la flora del tratto gastrointestinale degli animali a sangue caldo e dell'uomo. Furono scoperti per la prima volta dal tedesco - austriaco Dr. Theodor Escherich nel 1885 e da cui presero il nome. Come visibile nella figura, è un microorganismo dalla forma a bastoncello, gram negativo, caratterizzato da una temperatura di accrescimento pari ai 44,5° C.

Esistono diversi sierotipi di Escherichia coli (circa 170), dati dalla combinazione degli antigeni O, H, K, F. Si ricorda il sierotipo **Escherichia coli O157:H7**, un patogeno dannoso per l'uomo che porta a malattie infettive di diversa scala. [8].

L'uomo può essere contagiato principalmente attraverso il cibo o acque contaminate , e il batterio può essere trasmesso anche da persona a persona attraverso il contatto, percepibile a distanza di pochi giorni [9].

Gli Escherichia coli dannosi per l'uomo possono essere suddivisi in 4 categorie in base alla epidemiologia e ai diversi sierogrupi:

- Enteropathogenic E. coli (EPEC)
- Enteroinvasive E. coli (EIEC)
- Enterotoxigenic E. coli (ETEC)
- Enterohemorrhagic E. coli (EHEC).

Il sierotipo E. coli O157:H7 è di tipo entero-emorragico, appartenente al quarto gruppo (EHEC). Può indurre la sindrome emolitica uremica caratterizzata da anemoa emolitica e insufficienza renale.

Questo tipo di batterio viene trasmesso all'uomo attraverso l'introduzione di cibi crudi o poco cotti , quali carni o vegetali, contaminati dal suolo o dalle acque non trattate o latte non pastorizzato.

Fu scoperto in America, nel 1982, a causa di una ingente infezione tossica alimentare su circa 50 individui dovuta all'ingestione di hamburger della Jack in the Box (catena di fast food).

Nel 1989 ci fu la prima epidemica associata a dei microorganismi patogeni presenti in acque non potabilizzate, che coinvolse anche allora un elevato numero di individui, 240 in totale, con 32 ricoveri e 4 casi di morte.

Le principali malattie causate dall' **E.coli O157:H7** sono le seguenti: colite emorragica, sindrome emolitica uremica.

Essi producono la tossina verotossina [VTEC], tossine di Shinga e Shinga-simili.

Sono una delle tossine Shinga più diffuse negli Stati Uniti e Canada e sono causa di diarrea ematica con più frequenza della Shigellosi e Salmonellosi.

Possono essere contratti da persone di tutte le età ma riscontrano maggiore manifestazione in anziani e bambini [10].
Una volta ingeriti, producono delle tossine nell'intestino crasso le quali vanno a danneggiare le cellule endoteliali vascolari e le cellule della mucosa nella zona dell'intestino.

1.2.3.2 Pseudomonas Aeruginosa

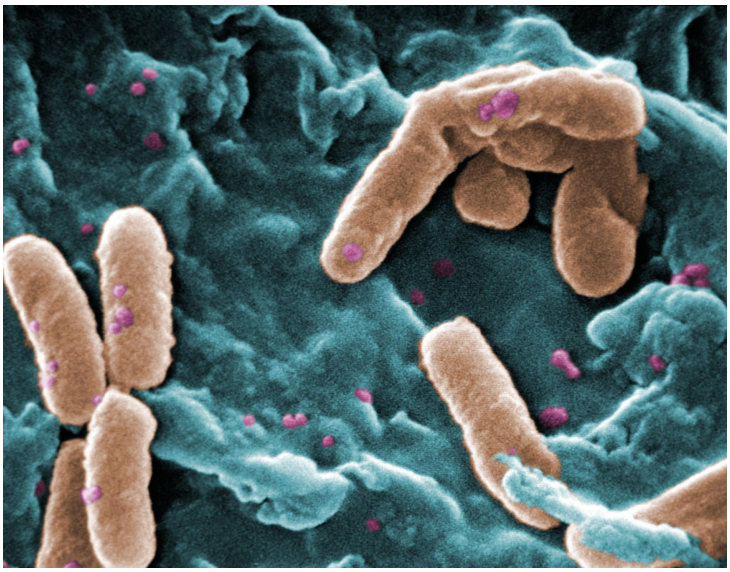

Fig 1.4 - Pseudomonas Aeruginosa [47].

Pseudomonas aeruginosa è un batterio di piccole dimensioni, 0,5 0.5 - 1.0 µm per 1.5 - 5 µm, a forma di bacillo in grado di muoversi grazie alla presenza di flagelli unipolari. E' un batterio gram-negativo, rintracciabile in acqua dolce, acqua salata e nel suolo.
Grazie al suo alto grado di adattabilità alle diverse condizioni, è presente ovunque in ambiente. Presenta un forte impatto nell'ecologia, sono responsabili del degrado di materiali e prodotti petroliferi; inoltre sono anche dannosi nella agricoltura in quanto patogeni vegetali. E' possibile dunque riscontrarlo in acque idromassaggio, piscine e acqua del rubinetto, ambienti domestici e clinici.
Le infezioni causate da Pseudonìmonas Aeruginosa sono varie e possono portare persino alla mortalità. Nelle persone sane possono causare malattie alla pelle o agli occhi, solo invece fatali se vengono contaminate persone immuno-compromesse o pazienti ustionati e chirurgici in ambienti ospedalieri, per tale motivo viene definito 'agente patogeno opportunista'.
Oggigiorno non si è ancora a conoscenza del ruolo ricoperto dall'acqua con la trasmissione di tale batterio nell'uomo [11,12,13].

1.2.3.3 Enterococchi

Fig1.5 - Enterococcus faecalis [48].

L'Eterococco è un batterio Gram - positivo dalla forma sferica. Spesso tendono ad agglomerarsi così da essere difficilmente distinguibili al microscopio. Sono microorganismi anaerobi o aerobi, quindi possono nutrirsi o meno di Ossigeno e si accrescono a 44°C e riescono a sopravvivere se sottoposti per breve tempo a 60°C.

Inizialmente erano classificati come steptococchi di gruppo D, attualmente costituiscono una categoria assestante.

Anche se di norma popolano la flora intestinale senza arrecare alcun disturbo, gli enterococchi, specialmente due specie: Enterococcus faecalis e Enterococcus faecium, provocano una serie di infezioni nell'uomo quali:

- Infezione delle vie urinarie,
- Endocardite,
- infezioni da ferita.

Tali batteri possono accrescersi e sopravvivere a distinte temperature e sembrano essere molto resistenti agli antibiotici [12].

VIRUS

I virus sono organismi patogeni che risultano inattivi se non all'interno dell'organismo ospite. Le loro dimensioni variano tra 0.02 e 0.09 μm e presentano una forma variabile.
Vengono considerati come veri e propri esseri viventi in quanto dotati di un proprio DNA; sono privi di struttura cellulare e di un proprio metabolismo pertanto i virus, a differenza dei batteri, dipendono completamente da un'altra cellula vivente per la loro replicazione: se presenti all'interno del corpo tendono a sostituire il DNA della cellula ospite con il proprio così da generare nuovi virus.
I virus sono spesso portatori di malattie trasmissibili attraverso il contatto reciproco tra due o più persone. Vengono definiti "virus enterici" tutti quei virus che riescono a moltiplicarsi nel tratto gastrointestinale degli esseri umani o animali; contano più di 140 tipologie differenti e sono trasmessi per lo più per via oro-fecale, attraverso l'utilizzo di acque non potabili o attraverso acque trattate ma contaminate da acque reflue. Una volta replicati all'interno dell'intestino, sono espulsi tramite le feci e permangono nell'ambiente.
Risultano essere molto resistenti ai trattamenti sia chimici che fisici per la potabilizzazione delle acque e alle condizioni ambientali sfavorevoli [1].

PROTOZOI PARASSITA

I protozoi parassita sono organismi unicellulari presenti all'interno di organismi viventi esclusi i vegetali. Si nutrono di batteri, alghe e, a differenza dei virus, il loro mantenimento e accrescimento è garantito da una serie di reazioni biochimiche interne (metabolismo).
La stragrande maggioranza di questi organismi sono parassiti che vivono in simbiosi con la cellula ospite vegetale o animale.
Come i batteri, anche questi organismi si moltiplicano a seguito di un processo di scissione cellulare. La loro presenza nelle acque è dovuta a inquinamento da feci e urine.

1.3 Disinfezione dell'acqua

Con il termine **disinfezione** si intende l'eliminazione, inattivazione e abbattimento degli agenti patogeni presenti in acqua, per evitare la loro proliferazione. Se non vengono eliminati possono causare infezioni o epidemie.
A tale proposito vengono adoperate delle tecniche di trattamento chimico o fisico con lo scopo di eliminare del tutto i microrganismi patogeni e le sostanze organiche e inorganiche che caratterizzano i corpi idrici non trattati.

1.3.1 Metodi per il trattamento dei corpi idrici

Come abbiamo visto in precedenza, l'acqua non trattata presenta al suo interno dei contaminanti, agenti patogeni, che sono molto rischiosi per la salute. Ricercando delle efficaci tecnologie di trattamento e/o limitando e controllando l'inquinamento idrico, si può arrivare ad ottenere una qualità maggiore dell'acqua potabile.
A seguire si discute dei principali metodi di trattamento che hanno come scopo quello di inattivare gli agenti patogeni, argomentando più dettagliatamente sul trattamento termico, la pastorizzazione, su cui si basa il lavoro di questa tesi.

Per quanto riguarda i trattamenti di bonifica delle acque, dunque, esistono diversi metodi applicabili per poterla decontaminare e rendere potabile.

Le tecniche di disinfezione nei riguardi dei batteri possono essere classificate in base alle loro proprietà battericida o batteriostatiche.
Con il termine battericida si fa riferimento ad una una sostanza antimicrobica (un antibiotico, un antisettico o un disinfettante) in grado di abbattere la carica batterica nel punto in cui è applicato. Le sostanze battericide si differenziano dalle sostanze batteriostatiche in quanto limitano l'accrescimento e impediscono la riproduzione batterica, avendo un effetto duraturo nel tempo. Le sostanze batteriostatiche invece agiscono localmente nel punto di applicazione e provocano la morte dei batteri.

Tra i metodi più comuni ricordiamo:

- clorazione
- radiazione ultravioletta
- ozonizzazione
- cavitazione
- trattamento termico o pastorizzazione.

La **Clorazione** è uno dei metodi chimici in uso ed è una delle tecniche più economiche e più diffuse per il trattamento dell'acqua. I primi trattamenti chimici furono messi in pratica a partire dagli anni settanta, ancora oggi vengono utilizzati ma vi sono dei limiti sulle quantità di sostanza da disciogliere, in quanto possono recare danni alla salute umana. Sono state inserite queste limitazioni in quanto il cloro tende a reagire con composti inorganici e organici presenti in acqua, i quali poi danno origine a residui di decontaminazione quali trialometano (THM) , sostanza cancerogena generata dalla reazione tra il cloro e una matrice organica, e acidi acetici alogenati [16,17]. La quantità di cloro da introdurre, inoltre, dipende da diversi fattori quali: la temperatura e pH dell'acqua e dalla concentrazione più o meno elevata di matrice organica. Viene definito '*cloro richiesta*' la quantità di sostanza reagente nel processo, '*cloro libero'*, invece, la quota di cloro che non reagisce durante il processo, la quale da luogo all'acido ipocloroso (HOCl) ed è responsabile della disinfezione dell'acqua; viene dunque denominato anche ' cloro attivo'.

Il Cloro intacca i batteri e i virus andando ad agire direttamente sui legami chimici delle molecole da cui son composti. Nel dettaglio, quando il cloro va in contatto con gli enzimi degli agenti patogeni, esso prende il posto di un numero finito di atomi di idrogeni di cui è composta la molecola alterando così la natura dell'enzima stesso. Una volta modificato, l'enzima non è più in grado di svolgere la sua funzione in maniera efficace e porta il microrganismo alla morte o alla sterilizzazione bloccandone la riproduzione.
L'acido ipocloroso riesce a penetrare gli strati protettivi e le pareti cellulari degli agenti patogeni, in quanto sia lo ione ipoclorito che la parete cellulare degli inquinanti batterici hanno carica negativa [17].

Il trattamento per **Radiazione Ultravioletta (UV)** è uno dei metodi fisici per la decontaminazione dell'acqua ed è ritenuto inoltre uno dei più efficaci. L'idea di base è quella di utilizzare gli UV-C, radiazioni con lunghezze d'onda comprese tra 280 - 100 nm, per distruggere i microorganismi presenti nell'acqua andando ad intaccare il DNA o RNA del microrganismo e modificarlo. La radiazione ultravioletta è assorbita dai nucleotidi del nucleo cellulare dei microorganismi, agendo sulla ridisposizione dei legami molecolari del DNA.

L'alterazione della struttura del DNA blocca il processo di riproduzione del microrganismo patogeno, rendendolo innocuo e sterile.

L'efficacia del trattamento dipende dalla quantità di radiazione ultravioletta a cui l'acqua è sottoposta e il tempo di esposizione ai raggi. Anche le particelle sospese e la torbidità influenzano l'efficacia del trattamento in quanto esse assorbono la radiazione o addirittura la riflettono senza inattivare i microorganismi. Per un riferimento numerico, sulla quantità di radiazione ultravioletta necessaria, si riportano i dati citati in referenza [16]: "Per ridurre 3log di Escherichia coli si richiede una fluenza di 2000 kJ/m2 - dose di radiazione integrata nelle lunghezze d'onda degli UVA e UVB".[16,18].

Un ulteriore metodo di trattamento è la **Fotocatalisi.** Si tratta di un processo di tipo catalitico che vede protagonista una serie di reazioni fotochimica attivate da un catalizzatore sensibile alla radiazione luminosa. E' un trattamento adatto alle applicazioni in larga scala dalla depurazione dell'acqua e dell'aria ad applicazioni mediche per debellare le cellule tumorali. Generalmente un foto-catalizzatore è composto da un materiale semiconduttore e tra i più comuni vi sono il biossido di titanio, l'ossido di cadmio, l'ossido di zinco. [19].

- Principio di funzionamento:

La luce solare inattiva e distrugge gran parte dei microorganismi presenti in acqua in quanto il DNA dei microrganismi stessi tende ad assorbire la radiazione UVA.

Tra i microorganismi sensibili alla radiazione solare si hanno:

Escherichia coli, Salmonella, Pseudomonas aeruginosa e Shigella Flexneri [20].

I raggi UVA, inoltre, reagiscono con l'acqua producendo i ROS (reactive oxygen species) , che possono essere:

- radicali liberi, come anione superossido O_2^-
- non radicali, come perossido di idrogeno H_2O_2.

I ROS prodotti, pertanto, intaccano parti fondamentali del microorganismo come il DNA, le proteine, la composizione della membrana e in particolare modo i lipidi della membrana, che sono i maggiori responsabili della uccisione dei patogeni.

Per implementare l'efficacia di trattamento, si discioglie in acqua il biossido di titanio sotto forma di nanoparticelle, TiO_2, che velocizza il processo di decontaminazione.

Le nanoparticelle di biossido di Titanio sospese in acqua , eccitate dai raggi solari, reagiscono con l'ossigeno disciolto in acqua, necessario per il processo, producendo OH-.

$$O_2^- + H_2O \leftrightarrows HO_2 + OH^-$$

In dettaglio, i ROS così formati (OH- e HO2) abbattono la concentrazione di microorganismi presenti, determinando l'efficacia del trattamento [20].

L'**Ozonizzazione** è una delle tecnica chimica che riguarda un processo di ossidazione utilizzato per il trattamento delle acque reflue e per l'acqua potabile. Risulta essere una tecnica molto efficace per la disinfezione di spore , diversi batteri, protozoi e virus, di fatti è una tecnica diffusa in tutto il mondo. [21,22]. Solitamente viene utilizzata una quantità di ozono superiore a quella richiesta, in modo che non solo disinfetti l'acqua dagli agenti patogeni, ma elimini anche gli odori e i micro-inquinati in un unica soluzione [23]. L'ozono, come sostanza alternativa al cloro nel trattamento delle acque, fu scoperto da studiosi statunitensi nel 1997. A differenza del Cloro, agisce efficacemente anche con trattamenti di breve durata (1-5 min) e a basse concentrazioni. In acqua si decompone in ossigeno andando ad ossidare la matrice organica, residui chimici, pesticidi e intaccando le spore batteriche e membrane cellulari dei microbi. Se da una lato offre vantaggi in termini di velocità di trattamento e la mancanza di generazione di trialomenati, prodotti attraverso il metodo di clorazione, l'ozonizzazione potrebbe dar vita a residui chimici come il bromato se vi è un'alta concentrazione di Bromo in acqua [24].

La **Cavitazione** è uno dei trattamenti di disinfezione dell'acqua alternativi ad alcuni metodi sopra elencati, che seppur efficaci presentano diversi svantaggi. La cavitazione è un fenomeno che si verifica in particolari condizioni di pressione (P < P saturazione) e consiste nella creazione , accrescimento e collasso di bolle di vapore molto piccole all'interno del liquido. Quando la pressione raggiunge valori inferiori alla tensione di vapore, all'interno del fluido che si trova in condizioni di cambiamento di fase iniziano a generarsi delle bolle. Le bolle generate non sono stabili, di conseguenza se vengono a trovarsi in zone con pressione differente (Pressione maggiore) implodono istantaneamente. Esistono però due tipologie di cavitazione:

- la cavitazione acustica (Ultrasonication)
- la cavitazione idrodinamica.

Nel primo caso, il fenomeno si genera dal passaggio di onde sonore ad alta frequenza, nel secondo caso invece si verifica a causa della diminuzione improvvisa di pressione (es. cambiamento di geometria) [25].

Purtroppo questa tecnologia attualmente non riscontra una disinfezione batterica al 100%, ma aumenta all' aumentare del tempo di trattamento. Come illustrato nella referenza [24] ("Water disinfection by acustica and hydrodynamic cavitation"), con la tecnica di *Ultrasonication* dopo 5min di trattamento la popolazione batterica diminuisce del 49%, dopo 20 minuti del 85%. Invece per quanto riguarda la *Cavitazione Idrodinamica*, le prove vengono effettuate a diverse pressioni per un tempo ben preciso. Maggiore è la pressione, maggiore è la riduzione dei batteri a tempi ridotti; a 1.72 bar si ha una riduzione del 41% con tempo di trattamento pari a 2h, a 5.17 bar si registra una riduzione del 44% solo dopo 1 ora.

Ad ogni modo con questi tipi di trattamenti non si riescono ad annientare definitivamente i microorganismi presenti in acqua, condizione non accettabile per l'acqua portabile, per cui sono tecniche da eseguire a valle di un ulteriore trattamento (es. pre-trattamento con cavitazione). Risulta essere una tecnica applicabile anche su larga scala, trattando quindi portate di acqua elevate.

Nella referenza [24] viene inoltre effettuata un'analisi dei costi delle differenti tecnologie e la cavitazione riveste un ruolo molto importante nella scelta della tecnologia di disinfezione.

I costi dei vari trattamenti hanno come caso standard di comparazione quello della clorazione e della ozonizzazione. Si riscontra che le tecniche di trattamento fisico hanno dei costi di due

ordini superiore rispetto ai metodi chimici che, d'altra parte, presentano lo svantaggio di creare durante la fase di trattamento dei residui chimici.

Disinfection technique	Energy Efficiency (CFU reduction/J)	Cost of treatment (Rs/l)
Ultrasonication for 15 min	1	0.625
High speed homogenisation for 15 min at 8000 rpm	23	0.034
High pressure homogenisation for 15 min at 345 bar	3	0.275
Hydrodynamic cavitation for 15 min at 5.17 bar	13	0.059
Chlorination	–	0.0003
Ozonation	–	0.001

a Basis: starting value — 1000CFU/ml; acceptable value — 10CFU/ml; reduction required — 990/ml.

Tab 1.5 - Analisi dei costi delle diverse tecnologie di disinfezione [24].

I costi sono riportati in Rupees (Rs) dove 1 US$ = 45 Rs.

La cavitazione non da origine a nessun composto tossico come nel caso del cloro o eventualmente dell'ozono in casi particolari, e risulta apparentemente una tecnica vantaggiosa. Potrebbe essere utilizzata come pre-trattamento , così da diminuire la quantità di sostanze chimiche da disciogliere in caso si scegliesse di adoperare successivamente un trattamento chimico.

1.4 Pastorizzazione

La Pastorizzazione, dal nome del chimico Louis Pasteur, è un processo fisico, basato sul trattamento termico, adoperato per alimenti, con lo scopo di intaccare gli agenti patogeni termosensibili per minimizzare i rischi d'infezione dell'uomo.
Il trattamento termico per pastorizzazione è differente dalla sterilizzazione, in quanto la temperatura dell'acqua non arriva alla temperatura di ebollizione, ma ad un valore tale da rimuovere i microrganismi presenti in acqua; questo aspetto presenta grossi vantaggi in quanto l'energia da fornire risulta essere inferiore. E' considerato uno dei metodi più efficaci nella rimozione dei patogeni.

La pastorizzazione si classifica in:

- Bassa : se effettuata a Temperature comprese tra i 60-65°C per 30 minuti. Questo trattamento viene adoperato per alimenti come birra e vino.
- Alta : con temperature comprese tra i 75 e 85°C per 2-3 minuti.
- Rapida : on temperature comprese tra i 75 e 85°C per 15-20 secondi [26].

Questo processo fisico non viene solo utilizzato in campo alimentare ma ha applicazioni anche nel campo della potabilizzazione delle risorse idriche. Nel trattare l'acqua si va ad agire sulla presenza di microrganismi patogeni sfruttano la loro sensibilità al calore. Questo metodo non muta la concentrazione di particelle sospese, responsabili della torbidità, che dovranno essere rimosse per filtrazione. La torbidità, allo stesso tempo, non influisce sulla efficacia del trattamento termico.

La pastorizzazione termica può essere effettuata attraverso due processi:

- Un **"batch process":** nel caso in cui l'acqua viene processata in maniera discontinua. Questo processo può essere realizzato riscaldando contenitori carichi d'acqua attraverso la combustione di legno o altro tipo di carburante, oppure attraverso dei solar cooking.

- Un “**flow-through process” :** se l’acqua viene processata in maniera continua, ad esempio riscaldata in uno scambiatore di calore (es. pastorizzazione solare in un solare a concentrazione lineare)[27].

1.4.1 Stato dell’arte di soluzioni simili per il trattamento termico

Una particolare idea di come realizzare a livello impiantistico un trattamento dell’acqua per pastorizzazione è quello di sfruttare il sole come fonte primaria. In molte regione in cui i tradizionali metodi di depurazione, come la clorazione o la filtrazione, non sono del tutto efficaci o realizzabili, es. regioni non sviluppate, si può adoperare un riscaldamento dell’acqua tramite il solare.
Nella referenza [28] (Carielo da Silva, Tiva Calanzas. 2015), si è proposto un sistema in cui la pastorizzazione avvenisse all’interno del collettore solare, identificando una serie di temperature e i relativi tempi di processo ai quali svolgere l’analisi.
Il sistema effettua il trattamento dell’acqua a temperature pre-programmate nei relativi intervalli di tempo (3600s a 55°C, 2700s a 60°C, 1800s a 65°C, 900s a 75°C e 15s a 85°C [28]).
Il trattamento è regolato da sensori di temperatura posti a valle e a monte del collettore, i quali rilevano la temperatura dell’acqua in ingresso e in uscita dal collettore. I sensori inviano le informazioni acquisite al circuito elettronico che attiva o disattiva le valvole anch’esse poste a monte e valle del collettore.

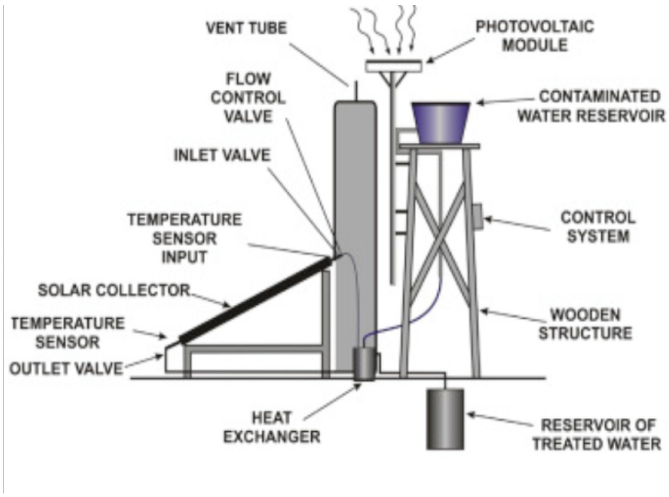

Fig 1.6 - Pasteurizer for solar water treatment [28].

Gli autori del lavoro forniscono inoltre una analisi microbatterica da cui si evince l'efficacia del trattamento.
Traendo ispirazione da tale sistema, in questa tesi abbiamo condotto le prove sperimentali che vengono trattate nel capitolo successivo.

La scelta delle combinazioni dei parametri di temperatura e tempo di trattamento sono state riferite a studi condotti da Feachem nel 1983, il quale ha elaborato un grafico in cui si mostra la zona di letalità e la zona di sicurezza per l'inattivazione dei microorganismi.

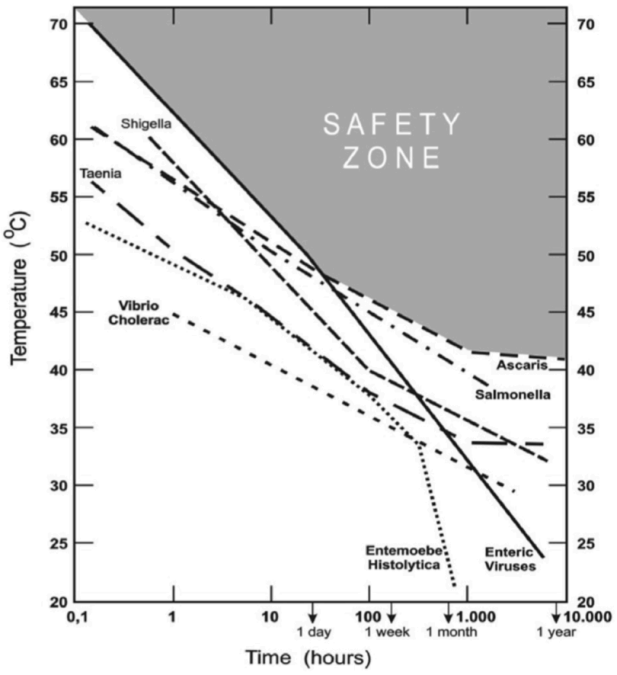

Fig 1.7- Curva di inattivazione dei microorganismi patogeni da pastorizzazione.
Sorgente: Feachem et al. 1983 [28].

1.4.2 Modello matematico di inattivazione microbica

Il modello matematico di inattivaione microbica è un modello empirico basato sull'esperienza e sui test effettuati sull'inattivazione dei batteri tramite trattamenti termici. Tale modello fornisce la combinazione dei parametri temperatura - tempo su cui si basa la pastorizzazione andando a studiare la riduzione batterica logaritmica basata sul concetto di D/z.

Il tempo di riduzione decimale D è la grandezza più importante per la valutazione della termoresistenza di un agente patogeno ed è funzione della temperatura.

Il tempo di riduzione decimale si si ricava dalla prima legge di Bigelow:

$$log\left(\frac{N}{N_0}\right) = \frac{t}{D} \qquad (1.1)$$

Con $N\ e\ N_0$ r la concentrazione di microrganismi patogeni all'istante iniziale e al tempo di trattamento t, rispettivamente.

Il concetto D/z è utile per comprendere quale sia il patogeno meno sensibile al calore per uno specifico processo. La dipendenza del paramento D dalla temperatura è espressa dalla seconda legge di Bigelow così formulata:

$$log(D) = log(D_{ref}) - \left(\frac{T - T_{ref}}{z}\right) \qquad (1.2)$$

Dove:

- D-value è il tempo necessario (detto anche *Tempo di riduzione decimale*) per abbattere la concentrazione dei microrganismi sopravvissuti a un determinato trattamento di un fattore 10 (riduzione del 90% della carica batterica) e non dipende dalla concentrazione iniziale di microrganismi [30]. E' strettamente legato e influenzato dal microrganismo patogeno e dalla sua fase di crescita e dai parametri del sistema (es umidità, pH, composizioe..), e di

conseguenza dalla temperatura di processo. Per un accurato trattamento termico del sistema, si fa sempre riferimento all'agente patogeno più termorestistente in modo da garantire la distruzione dei restanti meno termoresistenti.

- z-value , detto anche ***costante di resistenza termica***, rappresenta il valore (espresso in gradi [°C]) di incremento di temperatura necessario per ridurre di un fattore 10 (diminuzione del 90%) il valore D di un microrganismo patogeno [30]. Anch'esso è influenzato dal tipo di microrganismo analizzato e dai parametri caratteristici di sistema.

- T_{ref} è la temperatura di riferimento (°C) di cui è noto il valore.

- D_{ref} è il valore del tempo alla T_{ref} (min).

Capitolo 2 - Impianto depurazione acqua e prove sperimentali

L'impianto progettato ha lo scopo di trattare termicamente, secondo il metodo di pastorizzazione, l'acqua grezza proveniente dal fiume Po e renderla potabile. Per tal motivo sono state ricercate inizialmente delle soluzioni affini, già esistenti o già testate, che avevano il medesimo scopo.

Una volta individuati i valori di temperatura a cui sottoporre l'acqua, e i relativi tempi di trattamento, sono stati testati campioni di acqua grezza non trattata per le diverse combinazioni di temperatura-tempo presso il laboratorio SMaLL del Politecnico di Torino.

Le prove sperimentali sono state realizzate con un prototipo e con attrezzature di laboratorio che simulassero la parte di impianto destinata al trattamento dell'acqua.

2.1 Descrizione di Impianto

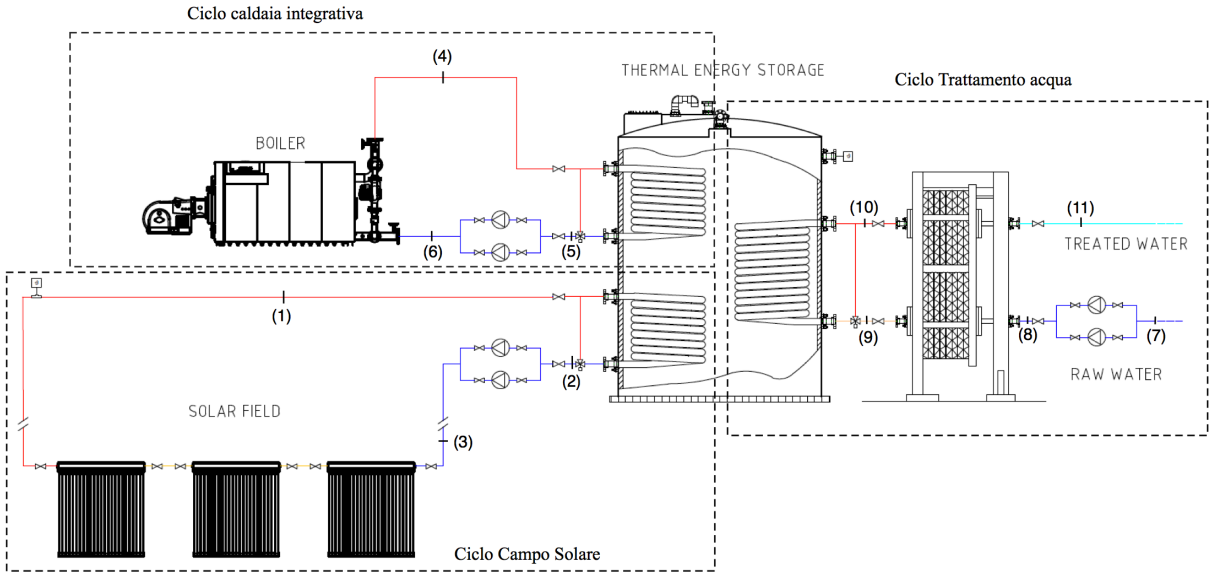

Fig 2.1 - Impianto trattamento acqua tramite metodo di pastorizzazione [31]

La tipologia di processo che viene adoperata nel modello di impianto è il *flow-trough process*.

La figura 2.1 rappresenta l'impianto ideato per SMAT, Società Metropolitana Acque Torino, che sfrutta la potenza da fonte solare per trattare l'acqua.

Vengono riportati nel dettaglio le caratteristiche e le funzioni dei principali componenti di impianto:

1. Campo Solare

Il campo solare è costituito da una serie di collettori solari. Il numero necessario di collettori da installare è proporzionale alla potenza richiesta dell'utenza, ossia dalla potenza da fornire all'accumulo termico per poter mantenere costante la sua temperatura e trattare durante tutta la giornata l'acqua grezza sotto le stesse condizioni di funzionamento.

I collettori solari catturano la radiazione solare e trasmettono il calore assorbito al fluido termovettore, nel nostro caso l'acqua, che passa nei tubi. Un collettore solare piano è generalmente costituito da:

- un vetro trasparente di copertura che fa passare la radiazione solare e blocca quella infrarossa riemessa dall'assorbitore, con lo scopo di minimizzare le perdite di tipo convettivo verso l'esterno.
- l'assorbitore che deve assorbire più del 90% della radiazione solare incidente e riemetterla in minore quantità. Per avere questo effetto solitamente viene ricoperto da una vernice selettiva.
- I tubi e le alette, di materiale metallico per un elevato scambio termico, che hanno lo scopo di trasmettere il calore dalla piastra al fluido termovettore che fluisce nei tubi.

Il collettore solare deve essere ben isolato nella parte inferiore e laterale così da diminuire le perdite di calore verso l'ambiente esterno.
Particolarmente efficienti sono i collettori solari sottovuoti, che presentano alte performance anche in caso di temperature esterne molto basse, inferiori a 0°C, e scarsa insolazione [32].

Il collettore a tubi evacuati è composto da una serie di tubi posti in serie, a loro volta costituiti da due tubi concentrici tra il quali viene creato il vuoto aspirando l'aria. Il tubo esterno è un tubo in vetro trasparente che permette il passaggio della radiazione solare e limita le perdite convettive a causa dell'aria esterna. Il tubo interno è l'assorbitore, generalmente di materiale metallico annerito, e rivestito dal lato rivolto verso il vuoto da una vernice selettiva per massimizzare la cattura della radiazione solare.Il tubo attraversato dall'acqua presenta una forma ad U come mostrato in figura 2.2. Questi tipi di collettori sono provvisti solitamente di riflettori CPC, concentratori parabolici, e consentono di assorbire la radiazione solare che non colpisce direttamente il tubo [33].

Fig 2.2 - Collettori solari a configurazione U-pipe con riflettori CPC [34].

Con questa tecnologia sottovuoto nei mesi invernali, in cui la temperatura è molto bassa, si riesce a non disperdere il calore come nel caso di collettori solari tradizionali.

Si è scelto di adoperare nel progetto i collettori solari sottovuoto della casa costruttrice Kloben, caratterizzati da un'area di apertura pari a 3,43 m^2, con temperatura massima di uscita pari a 130 °C e una portata d'acqua di $0{,}6 - 1.0\ \frac{l}{m_2 \cdot min}$.

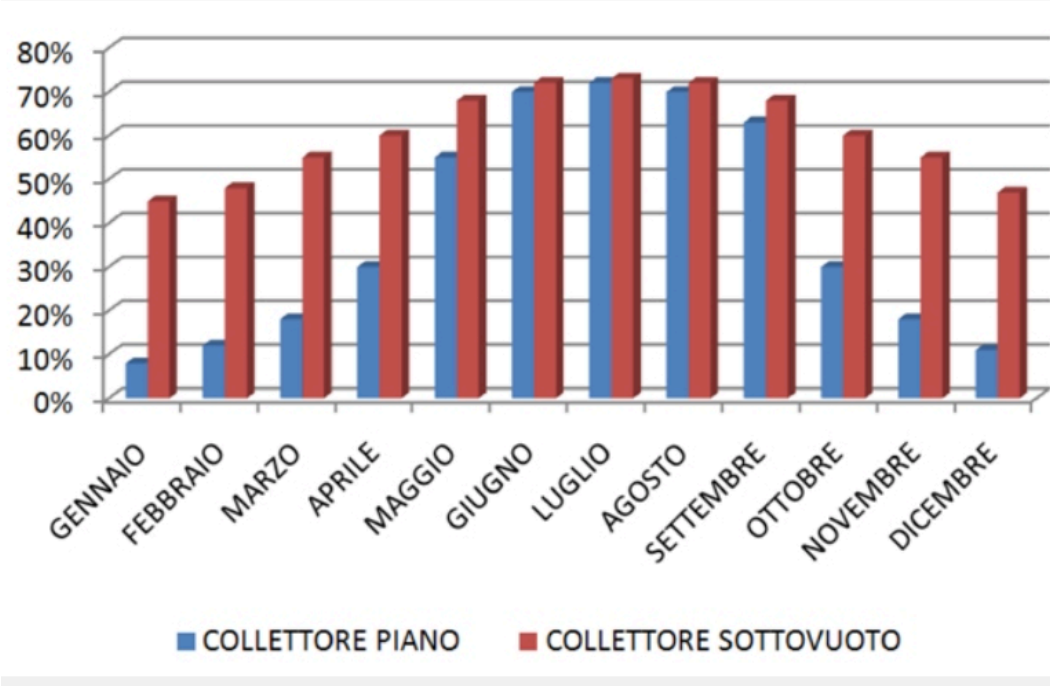

Fig 2.3 - Confronto prestazioni collettori solari tradizionali e sottovuoto [34].

Nella figura 2.3 si riporta una comparazione tra i collettori solari tradizionali e i collettori solari a tubi evacuati realizzata da Kloben. Si nota che i collettori solari presentano migliori prestazioni anche nei periodi più freddi in quanto il vuoto permette una minimizzazione delle dispersioni di calore, a differenza del collettore tradizionale che ottiene la sua massima resa solo nel periodo estivo.

2. Caldaia integrativa

La caldaia integrativa è una caldaia a metano che ha la funzione di backup, ovvero va in funzione quando il campo solare non fornisce un adeguato apporto di calore all'accumulo termico.

I fumi generati dalla combustione del metano scambiano calore con l'acqua che circola nel circuito di Caldaia Integrativa incrementando la sua temperatura. L'acqua che circola nella serpentina, inserita all'interno dell'accumulo termico, cede a sua volta calore al fluido contenuto nello storage.

E' stata adottata la scelta di disporre il circuito di Caldaia integrativa nella parte superiore perchè fornisce calore ad una temperatura più elevata rispetto al campo solare. In questo

modo si va a rispettare la stratificazione dell'accumulo termico; una buona stratificazione porta ad alte performance termiche dell'accumulo termico.
Nel progetto si fa riferimento ad una caldaia integrativa Viessmann con potenza di picco da 0.65 a 8.8 MW.

3. Accumulo Termico

L'accumulo termico è un componente fondamentale nell'impianto di trattamento dell'acqua. Ha il compito di immagazzinare energia da diverse fonti, solare o da combustione di metano, e mantenere la sua temperatura il più costante possibile. La temperatura dell'acqua nello accumulo termico va mantenuta superiore ai 60-65°C in modo da non favorire la proliferazione dei batteri. Solitamente questo aspetto è molto importante se si preleva direttamente l'acqua dall'accumulo, ma nel nostro caso si tratta di un sistema chiuso in cui avvengono solo scambi di energia e non di massa. Ad ogni modo, per una corretta pastorizzazione dell'acqua, la temperatura rispetta questo vincolo.
L'accumulo termico deve presentare buone proprietà isolanti, minimizzando le dispersioni di calore verso l'ambiente esterno. Nelle successive analisi si fa riferimento ad un accumulo termico realizzato in cemento e lana di roccia (materiale isolante di 100mm di spessore), di forma cilindrica (rapporto altezza/diametro pari ad 1) e caratterizzato da una trasmittanza termica di 0,31 W/m^2K.
Il sistema di accumulo termico permette il miglioramento delle prestazioni d'impianto limitando l'intermittenza della fornitura di calore da parte delle fonti rinnovabili per un continuo trattamento dell'acqua e riducendo le emissioni di CO_2 in ambiente.

4. Scambiatore di Calore

Lo scambiatore di calore, o economizzatore, è utilizzato per preriscaldare l'acqua da trattare tramite il recupero termico dell'acqua già pastorizzata e trattata nell'accumulo.
E' stato scelto uno scambiatore di calore a piastre con una area totale massima di scambio pari a 795m^2 ed una massima efficienza raggiungibile del 90%.

Come si evince dalla figura 2.1 sopra riportata, il trattamento dell'acqua avviene nella serpentina del ciclo di trattamento dell'acqua. L'economizzatore è utile a realizzare la rampa termica di trattamento che garantisce la pastorizzazione dell'acqua.. L'acqua entrante nello scambiatore è acqua grezza proveniente dal fiume Po, alle condizioni ambiente. Essa assorbe calore dal fluido in controcorrente (stessa portata d'acqua già pastorizzata) e innalza la sua temperatura fino al raggiungimento della temperatura di trattamento. Successivamente l'acqua fluisce all'interno della serpentina, collocata all'interno dell'accumulo termico, incrementando di pochi gradi la sua temperatura. In questa parte di impianto avviene il trattamento termico di pastorizzazione. La stessa portata d'acqua, già decontaminata, fluisce nuovamente nello scambiatore cedendo calore al fluido da trattare fino al raggiungimento delle condizioni ambiente.

2.2 Prove sperimentali in laboratorio

Il ciclo di interesse per le prove sperimentali è il ciclo di Trattamento dell'acqua evidenziato nella figura 2.1, caratterizzato dall'economizzatore e la serpentina situata all'interno dell'accumulo termico. Nelle prove si va a realizzare questa parte di impianto per verificare l'efficienza del trattamento.

2.2.1 Scelta della combinazione temperatura-tempo

Le prove di laboratorio sull'inattivazione dei batteri sono basate su una scelta accurata della combinazione di valori di temperatura e tempo di trattamento corrispondente.
Come precedentemente discusso, si è fatto riferimento alla curva di inattivazione dei microorganismi riportata da 'Feachem et al. nel 1983' dalla quale si è riprodotta la curva di figura 2.4 nel range di temperatura di interesse. Si è preferito non scendere al di sotto dei 70°C perché i tempi di trattamento sono molto lunghi, così come non superare 85°C perchè si ridurrebbero esponenzialmente i tempi di trattamento. Un trattamento a bassa temperatura è caratterizzato da tempi di esposizione al trattamento molto elevati, si realizza a livello impiantistico tale condizione adoperando una serpentina di lunghezza considerevole incidendo sui costi di investimento. D'altra parte un trattamento ad alta temperatura si realizza

con tempi di trattamento brevi, è necessaria una serpentina di lunghezza inferiore ma con un diametro più elevato.

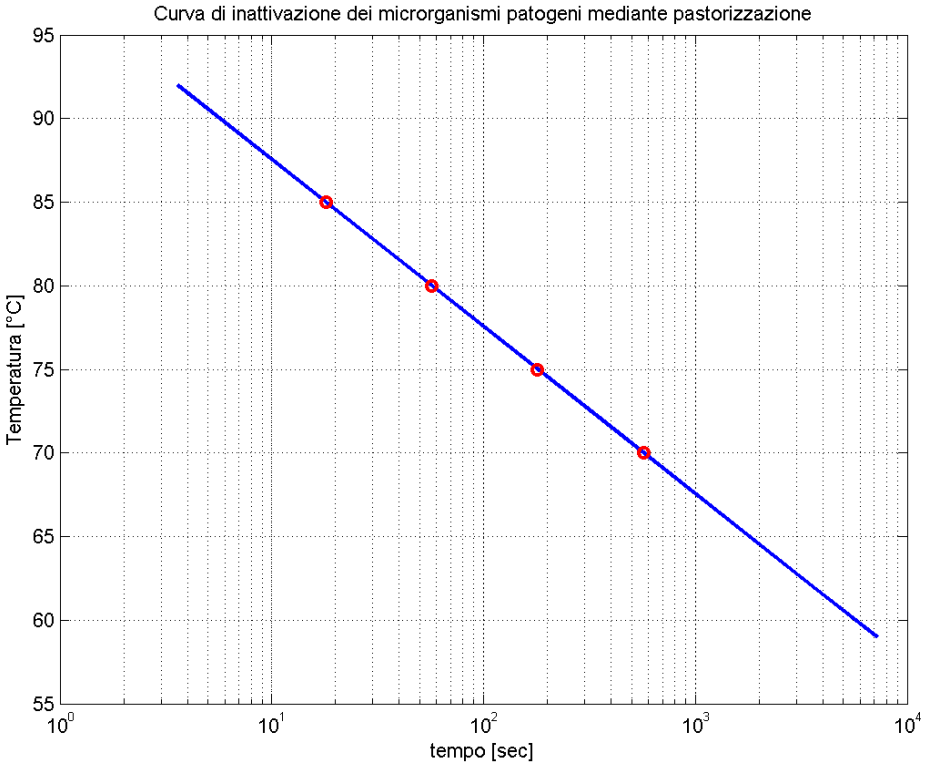

Fig 2.4 - Riproduzione curva di inattivazione dei microorganismi patogeni mediante Pastorizzazione.

I cerchi rossi lungo la linea di inattivazione dei batteri simboleggiano le coppie temperatura - tempo adottate durante le prove sperimentali. Il tempo subisce una diminuzione esponenziale man mano che diminuisce linearmente la Temperatura.

Temperatura [°C]	Tempo [sec]
70	570
75	180
80	57
85	18

Tab 2.1 - Coppie di Temperatura e Tempo realizzate durante le prove.

In tabella vengono riportate le coppie di temperatura e tempo che sono state adoperate e realizzate durante le prove sperimentali, corrispondenti ai puntini rossi evidenziati nel grafico.

Durante le prove sono state sperimentate anche delle combinazioni addizionali con una dilatazione dei tempi di esposizione al trattamento.

Temperatura [°C]	Tempo [sec]
80	67
85	25

Tab 2.2 - Coppie di Temperatura Tempo addizionali realizzate in laboratorio.

2.2.2 Attrezzatura utilizzata per il trattamento

L'esperimento eseguito in laboratorio simula la parte di impianto dedicata al trattamento dell'acqua grezza del fiume PO.

Il trattamento è costituito da tre fasi:

- nella prima fase l'acqua grezza che circola nell'economizzatore è sottoposta ad un innalzamento repentino della temperatura poco inferiore alla temperatura di trattamento,
- una seconda fase caratterizzata dall'effettivo trattamento dell'acqua che si realizza nella serpentina del circuito di trattamento posta all'interno del tank. L'acqua presente all'interno dell'accumulo è mantenuta ad una temperatura costante che supera di qualche grado la temperatura di trattamento, in modo da garantire la cessione di calore.
- una terza fase in cui l'acqua trattata e calda cede calore nell'economizzatore all'acqua grezza, raggiungendo circa la temperatura ambiente.

Durante le prove di laboratorio sono state riprodotte queste tre differenti fasi adoperando differenti apparecchiature che simulassero la rampa di temperatura di trattamento.

Le prove di laboratorio hanno lo scopo di simulare il circuito di trattamento dell'acqua tratteggiata nell'immagine 2.1. I componenti di impianto di interesse sono l'economizzatore, utilizzato per recuperare calore dall'acqua trattata e preriscaldare l'acqua grezza, e la serpertina di trattamento nell'accumulo termino in cui avviene il vero e proprio trattamento di pastorizzazione dell'acqua.

Gli esperimenti sono stati effettuati presso il laboratorio SMaLL del Dipartimento di Energia del Politecnico di Torino.

Le attrezzature utilizzate durante le prove devono simulare l'andamento di temperatura che si avrebbe nel funzionamento reale dell'impianto.

Il prototipo adoperato per il trattamento è costituito da 4 provette in alluminio, ognuna delle quali presenta un tappo di chiusura in materiale gomma siliconica con foro centrale. In ogni foro vi è una termocoppia inserita all'interno del suo supporto. Il supporto ha il compito di mantenere in posizione la termocoppia per acquisire correttamente i dati di temperatura

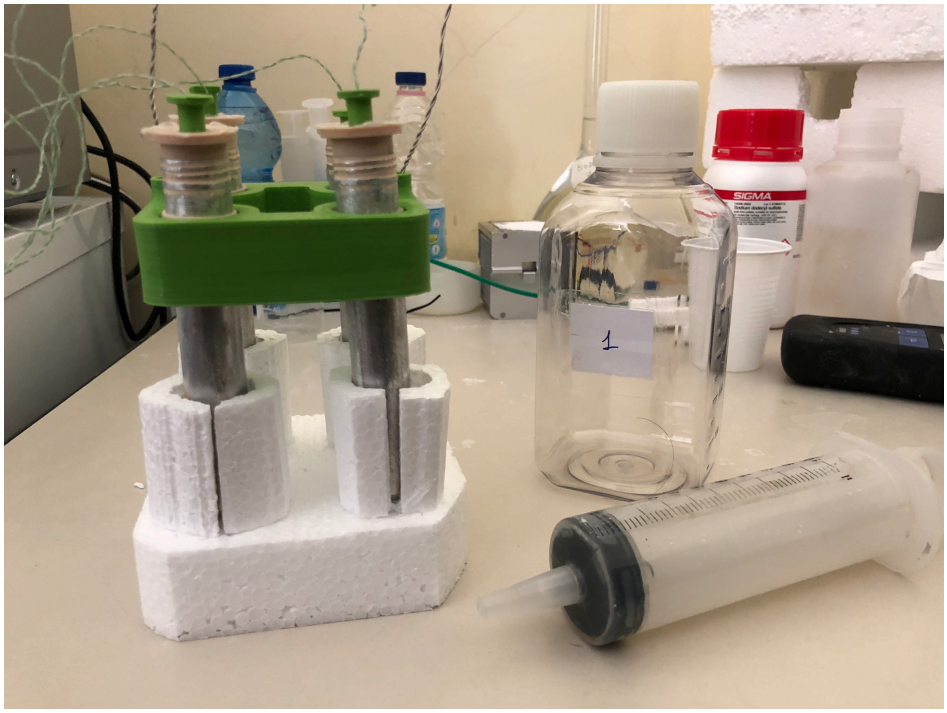

Fig. 2.5 - Prototipo adoperato durante le prove sperimentali.

dell'acqua, così da evitare il contatto con la provetta di alluminio che ovviamente avrà una temperatura nettamente maggiore.

Sono state adoperate provette in alluminio di piccolo spessore per favorire lo scambio termico, quattro per aumentare la superficie di scambio termico.

Il tutto è sostenuto da un supporto con maniglia per agevolare lo spostamento delle provette nelle varie strumentazioni.

Il supporto è stato realizzato con una stampante 3D in materiale ABS (acrilonitrile-butadiene-stirene) avendo come input un modello 3D realizzato su Solidworks.

L'ABS è un materiale plastico particolarmente robusto e leggero, termo-resistente, comunemente utilizzato per la stampa 3D. Presenta delle buone proprietà meccaniche e temperature di rammollimento intorno ai 97-98°C.

Sono state utilizzate delle provette in alluminio di piccolo spessore per poter avere un migliore scambio termico e quattro in numero un modo da incrementare l'area di scambio termico.

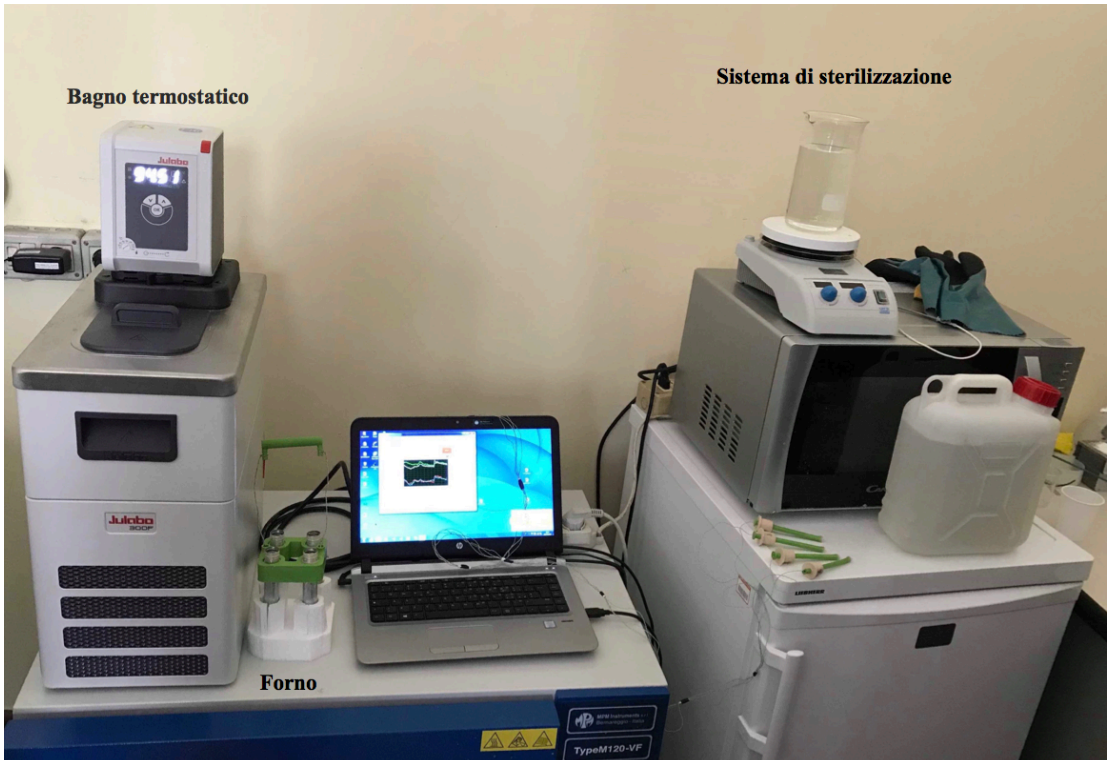

Fig 2.6 - Attrezzature di Laboratorio.

Il bagno termo-statico , tenuto ad una temperatura fissa di 95°C, simula l'economizzatore nella fase di acquisizione di calore dal fluido trattato. In questa fase si genera una rampa termica crescente, fino al raggiungimento della temperatura di trattamento.

Una volta raggiunta la temperatura desiderata, il prototipo viene posto all'interno del forno, dove é stata imposta una temperatura di 10°C superiore alla temperatura di trattamento, in cui l'acqua resta in equilibrio termico per la durata del trattamento. Il forno simula la serpentina del lato trattamento d'acqua all'interno dell'accumulo termico, il quale presenta per l'appunto una temperatura costante e poco superiore alla temperatura di trattamento.

Successivamente il prototipo viene posto all'interno di un recipiente contenente ghiaccio, così da raffreddare il provino fino a temperature prossime all'ambiente. In questa fase si va a simulare la cessione di calore all'economizzatore da parte del fluido trattato all'acqua grezza.

2.2.3 Protocollo di esecuzione

L'acqua grezza è stata prelevata al centro di ricerca SMAT, proveniente dal fiume Po, e trasportata in una tanica di materiale plastico fino al laboratorio SMaLL.
Per evitare alterazioni sulla composizione batterica dovuta al trasporto e variazione di condizioni climatiche, ed ottenere una analisi batteriologica più precisa e accurata, parte dell'acqua prelevata non è stata trattata ma utilizzata come campione prova di confronto.

Il campione prova di confronto presenta la seguente composizione microbica:
Batteri coliformi totali : 2419.6 MPN/100 ml
E. coli : 143.9 MPN/100 ml.

In ogni singola prova vengono processati circa 45 ml di acqua e suddivisi nelle 4 provette in acciaio in modo che l'area di scambio risulti più elevata e l'innalzamento della temperatura più repentino possibile.
Per tale motivo viene ripetuta la prove alla stessa condizione di trattamento (temperatura - tempo) per 4 volte. Questo perché ogni bottiglia sterile dovrà contenere al suo interno almeno 100 ml di acqua trattata, il minimo valore di capacità per poter poi eseguire una analisi di carica batterica presso il laboratorio del centro ricerca SMAT.
Per evitare di contaminare la serie di prove in successione si è pensato di sterilizzare l'attrezzatura, le termocoppie con supporti e le provette in acciaio, nel sistema di sterilizzazione per 2 minuti ad ogni ciclo.

Fig. 2.7 - Sistema di sterilizzazione, laboratorio SMALL.

Il sistema di sterilizzazione è stato mantenuto alla temperatura compresa tra gli 85 - 90 ° C (visibile in figura 2.7) così da poter riutilizzare di volta in volta strumentazioni sterili ed evitare di contaminare le prove successive.

Le prove sono state condotte alle stesse condizioni ambiente.

2.2.4 Risultato prove sperimentali

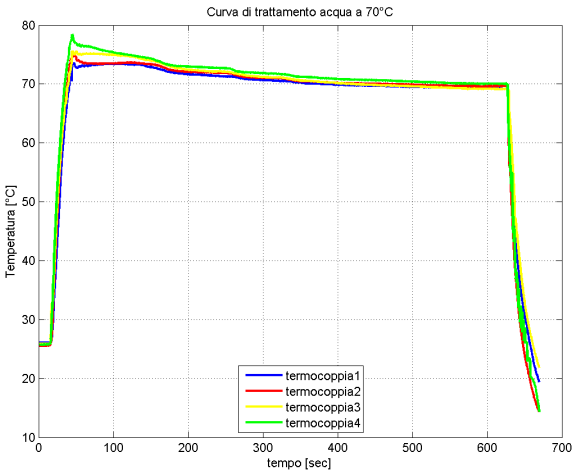

Fig 2.8 - Esecuzione prova di laboratorio a 70°C.

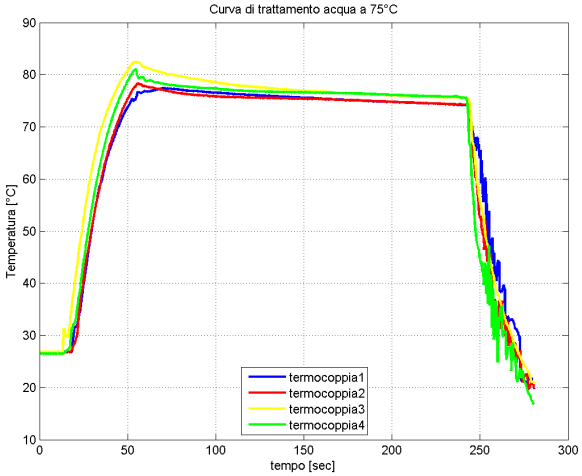

Fig 2.9 - Esecuzione prova di laboratorio a 75°C.

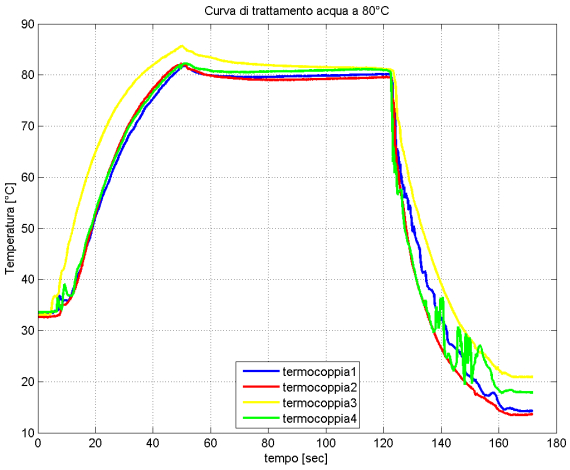

Fig 2.10 - Esecuzione prova di laboratorio a 80°C.

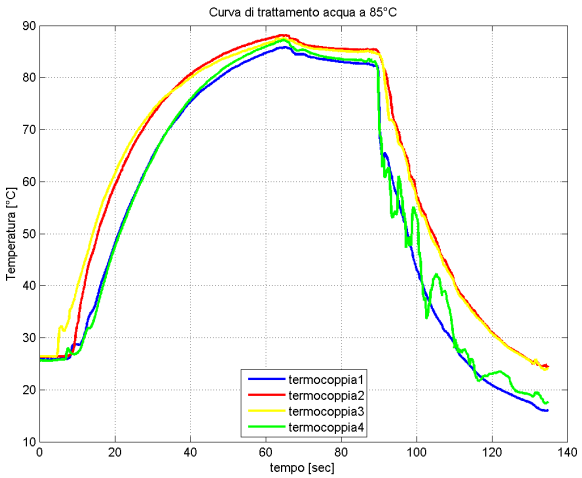

Fig 2.11 - Esecuzione prova di laboratorio a 85°C.

Risultati ottenuti dal centro ricerca SMAT dei campioni analizzati:

Batteri coliformi totali : 0 MPN/100 ml

E. coli : 0 MPN/100 ml.

Tutte le prove effettuate sono state condotte con successo in quanto i microorganismi presenti all'interno dell'acqua grezza sono stati totalmente inattivati. E'possibile realizzare il trattamento servendosi di qualunque combinazione di temperatura - tempo simulata durante la prova sperimentale. La scelta ottimale si basa principalmente sul costo di trattamento e sulla possibilità di realizzazione a livello di impianto.

Il costo del trattamento incrementa all'aumentare della temperatura a cui sottoporre l'acqua per pastorizzarla. D'altra parte, più è bassa la temperatura, più si dilatano i tempi di trattamento per i quali l'acqua deve essere mantenuta ad una temperatura costante. Poiché il tempo di trattamento coincide con il tempo per cui l'acqua deve acquisire calore attraversando la serpentina posta nell'accumulo, si è pensato di adottare come punto ottimale il trattamento a 75°C , essendo stato ritenuto un buon compromesso tra le due possibili problematiche.

3. Capitolo 3 - Analisi Economica

3.1 Analisi Economica di un impianto solare termico per trattamento delle acque

In questa sezione, si effettua una analisi economica dell'impianto preso in esame per verificare la fattibilità di realizzazione.
Si ricavano, tramite un modello di calcolo, i costi di ogni singolo componente d'impianto per i tre diversi casi studio da analizzare. Solo per lo scambiatore di calore a piastre e il collettore solare a tubi evacuati si hanno informazioni accurate sul prezzo.
In prima analisi si era ricavato anche il costo dello scambiatore di calore a piastre e il prezzo stimato risulta superiore al prezzo effettivo di acquisto. Avere un costo maggiorato dei componenti è un vantaggio per il calcolo del ritorno dell'investimento, nel caso reale si avrebbe un tempo di ritorno inferiore.

La distinzione dei tre casi studio fa riferimento alla portata d'acqua da depurate nel circuito di trattamento.

- Caso 1 : 50 l/s
- Caso 2 : 100 l/s
- Caso 3 : 250 l/s

Aumentando la portata d'acqua da trattare, varia ed incrementa anche la potenza che l'accumulo termico deve fornire alla serpentina di trattamento acqua per rispettare i limiti di temperatura imposti per la pastorizzazione. L'accumulo termico, d'altra parte, deve essere mantenuto ad una temperatura costante e superiore alla temperatura di trattamento dell'acqua. Ciò comporta una maggiore richiesta di potenza dal campo solare, ottenuta con l'aggiunta di ulteriori collettori solari, e dalla caldaia integrativa.

Il costo di depurazione dell'acqua aumenta all'aumentare della temperatura di pastorizzazione per il trattamento. Da questo punto di vista, la scelta ottimale ricadrebbe sul trattamento con la

più bassa temperatura, ma realizzabile con tempi di esposizione molto lungi. Per ovviare a problematiche riguardati il lungo tempo di permanenza dell'acqua all'interno della serpentina del circuito di trattamento, si è scelto come *punto ottimale* la p*astorizzazione a 75°C (riferimento Tab 2.1, pag 42).* Per poter trattare l'acqua a 75°C è necessario avere una temperatura stabile nel sistema di accumulo poco superiore e pari a 90°C.

Il sistema in esame è un sistema dinamico e variabile nel tempo in quanto il calore proveniente dal sistema solare dipende dalle condizioni atmosferiche e dall'irradianza solare. In caso di mancata copertura totale in termini di potenza da parte del campo solare al sistema di accumulo interviene la Caldaia Integrativa.

Tramite il Software Simulink, software per la simulazione, modellazione e analisi di sistemi dinamici, implementato da Alberto Bologna [31] si sono ricavate le grandezze termodinamiche e geometriche d'impianto per le tre differenti configurazioni da analizzare.

Per un corretto dimensionamento del campo solare è necessario introdurre un parametro che descrive più accuratamente la configurazione dei Collettori Solari a tubi sottovuoto con riflettori CPC, il ***solar multiple.***

Il solar multiple è definito come rapporto tra la potenza prodotta dal campo solare e la potenza richiesta dal blocco di potenza, in questo caso dal sistema di accumulo. Per la simulazione si è utilizzato un SM pari a 1.25.

3.1.1 Dati geometrici e termici di ogni singolo componente di impianto

A seguire sono riportate in tabella i parametri con i le relative grandezze per le tre proposte di studio. I dati di taglia di ogni componente sono indispensabili per la stima del proprio costo di investimento per il calcolo del C_{BEC} e per ricavare il costo totale di investimento dell'impianto.

- ***CAMPO SOLARE***

Parametro	**Caso 1**	**Caso 2**	**Caso 3**
Costo Pannello [€/m2]	355	355	355
Numero Collettori [-]	861	1784	4472
Area tot Collettori [m2]	2953	5948	15339

Tab 3.1 - Dati Collettori Solari

- **POMPE**

Parametro	**Caso 1**	**Caso 2**	**Caso 3**
Potenza Pompa Caldaia [kW]	1,76	1,47	11,4
Ore di funzionamento Pompa Caldaia [h/y]	5961	6466	6050
Potenza Pompa campo solare [kW]	0,914	1,39	3,26
Ore di funzionamento Pompa campo solare [h/y]	4306	4306	4306
Potenza Pompa Trattamento Acque [kW]	8,0	21,9	49,7
Ore di funzionamento Pompa Trattamento Acque [h/y]	8760	8760	8760

Tab 3.2 - Dati delle Pompe dei tre diversi circuiti.

- ***ECONOMIZZATORE***

Materiale: Acciaio inossidabile

Parametro	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Area di scambio [m2]	280,2	557,3	695,6
Costo Economizzatore	162.448	246.300	320.190

Tab 3.3 - Dati Economizzatore lato trattamento acqua.

- **ACCUMULO TERMICO**

Parametro	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Ore di funzionamento giornaliere [h]	12	12	12
Volume occupato dall'acqua [m3]	47	96,7	244,2
Volume totale Accumulo Termico [m3]	57	120	303

Tab 3.4 - Dati dell'accumulo termico, Temperatura della risorsa: 90° C.

- ***SERPENTINE***

Materiale: Rame

Parametro	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Lunghezza tubazione [m]	288	368	411
Diametro tubazione [m]	219,1	273	406,4
Area di scambio [m2]	198,24	315,62	524,74

Tab 3.5- Serpentina circuito Trattamento acqua.

Parametro	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Lunghezza tubazione [m]	150	220	300
Diametro tubazione [m]	168,3	219,1	323,9
Area di scambio [m2]	79,31	151,43	305,27

Tab 3.6 - Serpentina circuito Campo Solare.

Parametro	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Lunghezza tubazione [m]	120	180	220
Diametro tubazione [m]	88,9	139,7	168,3
Area di scambio [m2]	33,51	79	116,32

Tab 3.7 - Serpentina circuito Caldaia Integrativa.

- ***CALDAIA A METANO***

Parametro	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Potenza [kW]	1600	3030	7810

Tab 3.8 - Dati di Potenza Caldaia di integrazione a metano.

Il prezzo dei Collettori Solari comprende il costo effettivo del collettore e il costo dell'istallazione, direttamente reperiti dal fornitore Kloben.

Anche per lo scambiatore di calore si fa riferimento a prezzi reali e non stimati dall'analisi.

Nella prima configurazione la taglia di riferimento dello scambiatore è inferiore a quella ricevuta dal fornitore, il prezzo è stato modificato tramite la formula 3.4 riportata nel paragrafo successivo. Nella terza configurazione la taglia necessaria è superiore, per cui si fa uso di due scambiatori. Con l'acquisto di due scambiatori vi è una percentuale di sconto pari al 35% del prezzo totale d'acquisto.

3.1.2 Costi dei Componenti di impianto

Per i componenti per cui non si hanno informazioni dei fornitori sui costi, si è adoperato il "**Module costing technique"** [37]**.**

Questa tecnica stima il prezzo del componente per una specifica condizione di base (Pressione pari alla pressione ambiente e materiale base di riferimento).
Per discostarsi dalla condizione di base, quindi, si utilizzano dei fattori moltiplicativi che dipendo da:

- tipo di apparecchiatura in esame
- pressione specifica del sistema (Fp)
- materiale specifico di costruzione dell'apparecchio (Fm).

La formula generica per il costo del componente viene calcolata come segue:

$$C_{BEC} = C_p^0 \ (B_1 + B_2 \cdot F_M \cdot F_P) \quad (3.1)$$

Dove :

- B_1 e B_2 sono dei valori tabellati riferiti alla tipologia del componente [35].

- F_M e F_p sono i fattori moltiplicativi per il materiale e la pressione, rispettivamente. Hanno un valore superiore ad 1 se discostano dal caso base.

F_M è un valore tabellato e dipende dal tipo di materiale di cui è costituito l'aparecchio.
F_P invece si ricava utilizzando una formula che dipende dalle costanti C_1 , C_2 , C_3 anch'esse tabellate e P il valore della pressione in [bar]; La formula (3.2) viene utilizzata qualora la pressione di esercizio non rientri nel range di validità.

$$F_P = 10^{(C_1 + C_2 \cdot log_{10}P + C_3 \cdot (log_{10}P)^2)} \quad (3.2)$$

- C_p^0 è il costo del componente riferito al caso base.

Per la determinazione del C_p^0 si utilizza l'equazione seguente:

$$C_p^0 = 10^{(K_1 + K_2 \cdot log_{10}A + K_3 \cdot (log_{10}A)^2)} \quad (3.3)$$

Con K_1 , K_2 , K_3 costanti tabellate e A il parametro caratteristico che identifica il componente (es. Potenza [kW] per una Pompa, Area di scambio [m^2] per uno scambiatore di calore, ecc..).

I valori di C_p^0 sono espressi in dollari e riferiti all'anno 2001. Per attualizzare il costo ed esprimerlo in € si utilizza un fattore moltiplicativo.
Considerando che 1 € corrisponde a 0,86 $ e che per attualizzare il costo viene utilizzato un indice CEPCI ($CEPCI_{2001}$= 394 , $CEPCI_{2018}$ = 567,5), il fattore moltiplicativo vale **1,24**.

Nel caso in cui la taglia della grandezza caratteristica del componente non rientra all'interno del range di validità, è possibile riportare il costo del componente alla taglia effettiva utilizzando la seguente formula:

$$\frac{C_1}{C_0} = \left(\frac{S_1}{S_0}\right)^n \quad (3.4)$$

C_1 è il costo del componente riferito alla taglia effettiva,
C_0 è il costo del componente alla taglia base,
S_1 è la taglia effettiva del componente,
S_0 è la taglia base del componente,
n è l'esponente del costo e vale 0,6.

Nel caso in cui non sono disponibili in tabella i valori delle costanti B1 e B2 si fa riferimento alla formula semplificata:

$$C_{BEC} = C_p^0 \cdot F_{BM} \quad (3.5)$$

Il C_{BEC} ricavato è un *overnight cost* ed è espresso in moneta corrente. Tale costo comprende il costo delle apparecchiature di processo, delle strutture di supporto, dei costi diretti e indiretti di lavoro.

3.1.3 Valutazione dei costi di investimento

Si evidenziano i dati sui costi, ricavati step by step, tramite le formule sopra citate.
Il costo dei collettori solari e dell'economizzatore sono stati reperiti dai fornitori, dunque per tali componenti non vengono presi in considerazione nel calcolo dei costi tramite la "M*odule Costing Technique"***.***

- Il costo del singolo **collettore sottovuoto CPC Kloben** è pari a 335€/m2 (il prezzo di listino del collettore è di 1919€, e se acquistati in gran numero, come nel nostro caso, viene applicato uno sconto pari al 40%).

- Il costo di un singolo **scambiatore** è pari a 246 300€, se acquistati in coppia viene applicato una detrazione del 35%. Nel caso con portata di acqua da trattare pari a 50l/s, si utilizza la formula 3.4 per riportare il prezzo alla grandezza di riferimento. Nel caso dei 250 l/s si utilizzano due scambiatori ed è quindi possibile applicate lo sconto.

Le tabelle riportate in seguito evidenziano le costanti utilizzate per la stima del C_{BEC} dei componenti di cui non si è riusciti a reperire informazioni dettagliate dai fornitori.

COMPONENTE	Tipologia	k1	k2	k3	Range	Parametro
Serpentina	U tube Heat Exchanger	4,1884	-0,2503	0,1974	10 - 1000	Area [m2]
Tank	Fixed roof	4,8509	-0,3973	0,1445	90 - 30000	Volume [m3]
Caldaia	Hot water heater	2,0829	0,9074	-0,0234	650 - 10750	Potenza [kW]
Pompa	Centrifugal	3,3892	0,0536	0,1538	1 - 300	Potenza [kW]

Tab 3.9 - Valori costanti riferite alle tipologie di componente scelto e range di validità [35].

COMPONENTE	Tipologia	F_P	F_M	B_1	B_2	F_{BM}
Serpentina	U tube Heat Exchanger	1	1,8	1,63	1,66	-
Tank	Fixed roof	1	1	-	-	1,1
Caldaia	Hot water heater	1	1	-	-	2,19
Pompa	Centrifugal	1	1	1,89	1,35	-

Tab 3.10 - Valori delle costati per il calcolo del C_{BEC} [35].

Nelle Tabelle 3.9 e 3.10 vengono specificate le tipologie attribuite ad ogni apparecchiatura mettendo in evidenza qual è il range di validità del proprio parametro caratteristico e le costanti di pressione e materiale di costruzione. Tutti i componenti appartenenti alla stessa categoria (es Pompa lato trattamento acqua, Pompa campo solare e Pompa lato Caldaia) sono stati considerati della stessa tipologia e costituiti dallo stesso materiale; ciò che varia è unicamente il parametro caratteristico.

In **Appendice A** vengono riportati i grafici su cui si sono estrapolati i valori delle costanti correttive di pressione e del materiale.

Componenti	C_{BEC} [€] - Caso 50 l/s	C_{BEC} [€] - Caso 100 l/s	C_{BEC} [€] - Caso 250 l/s
Campo Solare	989.255	1.992.580	5.487.371
Accumulo termico	152.580	246.465	494.231
Caldaia	560.106	788.161	1.137.289
Gruppo di pompaggio	34.821	42.144	61.732
Economizzatore	162.448	246.300	320.190
Totale investimento	1.899.209	3.315.649	7.500.812

Tab 3.11 - Costi dei componenti di impianto per le tre configurazioni.

Dalla tabella 3.11 si deduce che il campo solare ricopre un ruolo fondamentale nel costo d'investimento totale dell'impianto. A scopo illustrativo viene riportato il diagramma della ripartizione dell'investimento nel caso dei 250 l/s.

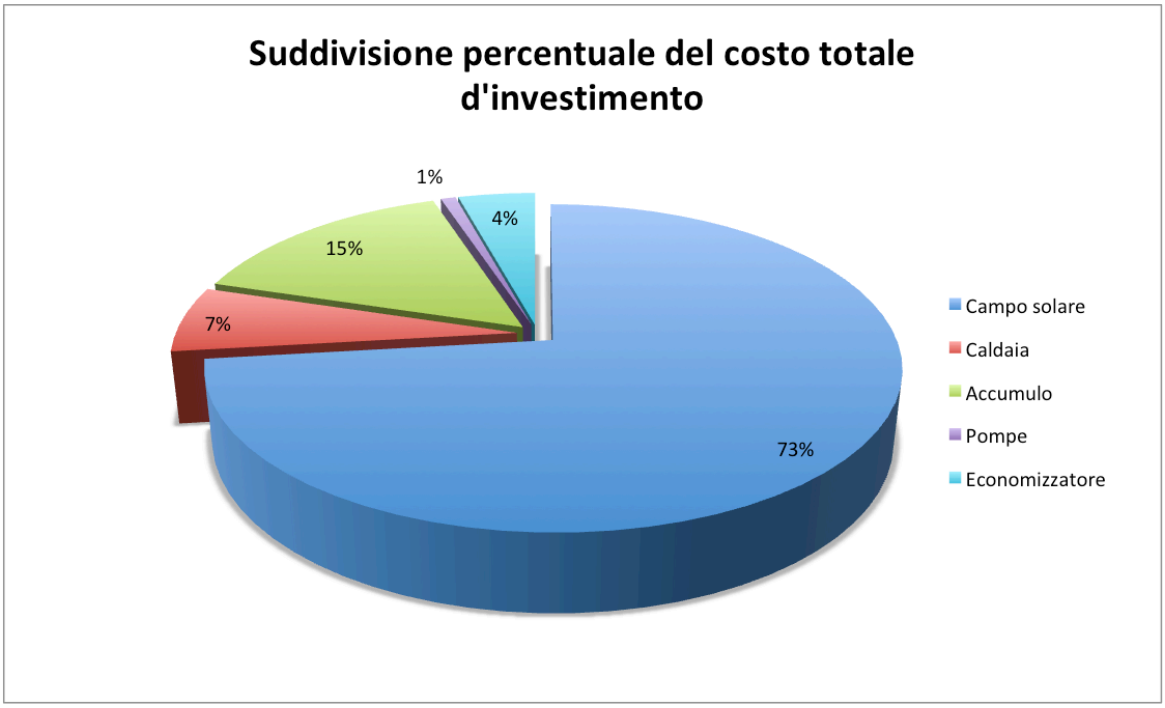

Fig 3.1 - Ripartizione dei costi di investimento per impianto.

Come può notare dalla figura 3.1, la quota più elevata dell'investimento è ricoperta dal costo dei collettori solari a causa dell'elevato numero per ricoprire la potenza necessaria all'accumulo termico. La percentuale del costo dei collettori solari varia proporzionalmente alla richiesta di potenza dall'accumulo termico dal 60 % al 73 % del costo totale di investimento nelle tre diverse configurazioni analizzate.

3.2 Calcolo del NPV e Payback Period

In questa sezione si studia la redditività di investimento dell'impianto da un punto di vista economico. I due parametri che permettono una valutazione economica sul beneficio ricavato dall'impianto studiato sono il Net Present Value e il Payback Time.

3.2.1 Net Present Value

Il **Net Present Value** (NPV), unità di misura [€], è a somma aritmetica dei flussi di cassa generati da un progetto, i quali sono attualizzati attraverso il tasso di sconto o tasso di interesse (wacc) che tiene conto della variazione del costo della moneta in un lasso di tempo prestabilito. Consente di valutare il valore del beneficio netto dall'investimento ad un tempo pari alla vita media dell'impianto nel momento in cui la decisione vene presa.

Viene calcolato come segue:

$$NPV = -I + \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \cdot R \qquad (3.6)$$

Dove:

- I : costo dell'investimento [€],
- i: tasso di interesse al quale viene effettuata l'operazione (in ambito industriale è solitamente utilizzato il tasso che rappresenta il costo medio ponderato del capitale o *Weighted Average Cost of Capital* - WACC) [-],
- R : Risparmio annuale [€/y],
- n: il tempo o anno di riferimento, n ≤ vita dell'impianto [y].

Affinché un investimento possa essere convenevole e accettabile devono essere verificate due condizioni:

- Al tempo n prestabilito il valore dell'NPV deve risultare positivo, nel caso contrario non vi sarà mai un ritorno di investimento.
- l'NPV calcolato deve risultare uguale o superiore agli NPV di altri progetti accettabili che hanno il medesimo scopo.

Considerazioni sul NPV:

- I flussi di cassa sono pesati diversamente a diversi periodi temporali,
- il suo valore è strettamente collegato al valore dell'investimento iniziale,
- a parità di condizioni, aumenta all'aumentare delle dimensioni del progetto,
- Valuta il rendimento monetario effettivo senza fornire ulteriori chiarimenti sul tasso di rendimento dell'investimento,
- non è in grado di differenziare progetti caratterizzati da un basso costo di investimento e un rapido tempo di ammortamento e con progetti con elevati costi di investimento e tempi di ammortamento lenti nel caso in cui si ha lo stesso valore di NPV [37].

E' possibile ritrovarsi in tre differenti situazioni:

- Se l' NPV >0 ci si trova in una situazione favorevole in cui dopo un certo periodo prefissato n si ha un guadagno effettivo e il rientro dell'investimento. Si ha quindi una utilità economica.

- Se l'NPV=0 ci si trova in una situazione di parità , dunque non si ha nè guadagno nè perdita, e l'operazione avrà come scopo quello di far rientrare dopo n anni il capitale investito con un certo tasso di rendimento (wacc).

- Se l'NPV<0 l'operazione non presenta minimi guadagni, anzi l'investimento è in perdita.

3.2.2 Payback Period

Il **Payback period,** o **periodo di ammortamento,** con unità di misura [anno], determina in quanto tempo si ha il ritorno d'investimento di un progetto , in altre parole è il tempo per il quale i flussi di cassa positivi (o flussi di cassa in ingresso) eguagliano il valore dell'investimento iniziale.
Per determinarlo si pone l'NPV pari a zero e si esplicita il tempo n dalla formula 3.6.

$$-I + \frac{(1+wacc)^n - 1}{wacc \cdot (1+wacc)^n} \cdot R = 0 \quad (3.7)$$

Di conseguenza, il fondo investito per un determinato progetto è tanto più conveniente quanto più è basso il valore del tempo di ammortamento corrispondente.

Data la complessità nel ricavare il tempo n dalla formula 3.7, si è soliti utilizzare una formulazione più semplificata che coinvolge solo l'investimento e il risparmio annuale.

$$PBP = \frac{I}{R} \quad (3.8)$$

Questo metodo, però, presenta dei limiti in quanto non tiene conto dell'andamento variabile dei flussi di cassa dopo l'investimento iniziale ad anno zero, ossia non tiene conto del valore temporale del denaro, a differenza di altri metodi tra cui il metodo del valore attuale netto (NPV) riportato nel paragrafo precedente.
Come si può dedurre dalla 3.8, il periodo di ammortamento è valutando semplicemente contando il numero di anni necessari per recuperare l'investimento iniziale.
Alcuni analisti preferiscono questo metodo puramente per la sua semplicità, altri ne fanno uso per ottenere un ulteriore punto di riferimento per questioni decisionali su diversi progetti in aggiunta ad ulteriori analisi [37].

3.2.3 Calcolo del WACC (Weighted Average Cost of Capital)

Il C**osto medio ponderato del Capitale**, in inglese **WACC - Weighted Average Cost of Capital**, è il tasso di rendimento minimo che una azienda deve cercare di ottenere dai fornitori o creditori, per far fronte alle spese totali di investimento da sostenere per la realizzazione del progetto.

Il Costo medio ponderato del capitale viene calcolato come segue:

$$WACC = Ke \cdot \frac{E}{D+E} + Kd \cdot \frac{D}{D+E} \quad (3.9)$$

Dove:

- K_e : costo dell'equity, che al suo interno prende in considerazione due aspetti: il *rischio specifico* di un certo fondo investito e del *rischio sistematico*, che invece dipende dall'evoluzione temporale dell'economia. Il valore di K_e deve essere al massimo uguale se non superiore al rischio sistematico.

$$K_e = R_f + premium \quad (3.10)$$

di cui:

- R_f è il *rischio sistematico* e può assumere il valore del rendimento dei titolo di stato emessi dai governi dei paesi economicamente stabili. In Italia si utilizza un indice detto indice benchmark che quantifica il rendimento lordo di titoli di stato a dieci anni. Si adopera un Rf pari a 2,3% (BTP a 10 anni) [39] ,

$$premium = R_s + \beta \cdot (R_m - R_f) \quad (3.11)$$

con:

- Rs è il *market return* ed è diverso da zero solo in caso di piccoli investitori.
- $R_m - R_f$ è l'*equity market risk premium*, o EMRP, pari a 6,1% [40].

- β è "il coefficiente che quantifica il rischio della singola impresa rispetto a quello medio del mercato. Nella tecnica finanziaria è definito anche come coefficiente di rischio sistematico e indica come varia il rendimento di un titolo al variare del rendimento di tutto il mercato" [41] pari a 0,77 , così determinato:

$$\beta = \beta_U = \beta_L \cdot \left[1 + (1 - t) \cdot \frac{D}{E}\right] \quad (3.12)$$

- β_U è detto *Beta Unlevered*,
- β_L *Beta Levered* : è il valore del beta modificato e tiene conto della struttura finanziaria dell'anzienda.
- t : tassazione su reddito d'impresa

- K_d : costo dell'indebitamento, ed è valutato come segue:

$$K_d = (IRS + spread) \quad (3.13)$$

- IRS (Interest Rate Swap) : pari a -0,27% Euribes medio a 6 mesi [41].
- $spread$: è una percentuale aggiuntiva da applicare al tasso di interesse base, il quale dipende dal rischio che l'istituto di credito si assume erogando un finanziamento, ossia dipende dalla capacità dell'investitore di restituire il capitale richiesto. Si adopera un valore pari a 0,54% [42].

- **E e D** : sono rispettivamente le percentuali del capitale azionario e del debito di impresa.

Come si può osservare dalla formula 3.9, il *WACC* è composto da due componenti: il capitale di indebitamento e il capitale di equity. Il costo di equity è sicurmente quello più complesso da ricavare in quanto non si hanno dati certi ma solo previsionali, a differenza del costo di indebitamento[37,38].

Sono state prese in esame tre diverse combinazioni ipotetiche riguardante le percentuali di debito ed equity che deve assumersi l'azienda e il creditore per la realizzazione dell'impianto di trattamento termico delle acque, da cui sono stati ricavati tre differenti valori di *WACC*, o tasso di interesse, tramite le formule riportate nel paragrafo, da utilizzare successivamente per calcolare l'andamento del NPV nel periodo della durata media dell'impianto.

Parametri	Variante 1	Variante 2	Variante 3
E	30%	40%	50%
D	70%	60%	50%
WACC	2,288%	2,961%	3,6185%

Tab 3.12 - Valori del WACC in funzione delle percentuali di debito ed equity.

Dal calcolo si può evincere che maggiore è la percentuale di debito richiesta dall'azienda, minore è il *WACC* corrispondente.

3.2.4 Ritorno dell'investimento rispetto ad un impianto a sola caldaia senza integrazione solare

In questa sezione si va a calcolare il valore attuale netto e il periodo di ammortamento dell'impianto di trattamento termico dell'acqua ideato per SMAT che sfrutta l'energia solare derivante dal sole per riscaldare l'acqua nel serbatoio di accumulo e integrato con una caldaia a metano che terra la temperatura di set point azionandosi nel momento in cui la fonte solare non riesce a soddisfare i requisiti di potenza attesa. A tal proposito, L'NPV e il payback time sono riferiti ad un caso base, ovvero lo stesso impianto di trattamento acqua alimentato solo tramite la caldaia a metano, per poi valutare la quantità di emissioni di CO2 annue evitate.

Per il calcolo del Valore attuale netto vengono di seguito riportate le voci necessarie per il calcolo e a cosa corrispondono .

$$NPV = -I + \frac{(1+wacc)^n - 1}{wacc \cdot (1+wacc)^n} \cdot R$$

- Con la voce investimento (I) si prende in considerazione una differenza del costo dei componenti d'impianto rispetto al caso base. Per caso base si intende un impianto di trattamento delle acque del tutto analogo a quello studiato con alimentazione esclusivamente a metano. Si adopera questa definizione di investimento essendo una situazione di confronto rispetto ad un impianto non rinnovabile. Il delta costo, o differenza di costo, si riferisce alla quota di spesa che deve essere integrata con l'aggiunta del solare, vale a dire il costo dei pannelli, il costo della serpentina solare nel serbatoio di accumulo termico e il costo della pompa del campo solare. I restanti costi dei componenti non vengono inseriti nella voce investimento in quanto sono presenti anche nell'impianto base di riferimento.

- R è il risparmio annuo in termini di costo, in questa situazione di confronto si fa riferimento al costo del metano risparmiato annualmente con l'integrazione del solare a cui viene sottratto il costo adibito alla manutenzione del'impianto. I costi di manutenzione sono stati calcolati come l'1% del costo totale di impianto.

- n sono gli anni per cui si fa l'analisi ed è preso pari alla vita media dell'impianto solare termico, circa 25 anni.

Vengono riportati gli step necessari per la determinazione del risparmio annuale R:

1. In prima battuta, tramite il software Simulink [31], si sono ottenuti per i tre casi studio i valori di energia annua [kWh/y] del campo solare (Q_{Sol}) e della caldaia di integrazione a metano (Q_{aux}) tenendo conto della variazione dell'irradianza solare [W/m2] per Torino, considerata costante per ipotesi durante la vita dell'impianto per procedere con l'analisi.

2. Da questi dati di input, si calcola il "solar field", ovvero la percentuale di energia fornita dal sole durante tutto l'anno rispetto all'energia totale, calcolata come segue

$$SF = \frac{Q_{Sol}}{Q_{sol} + Q_{aux}} \quad (3.14)$$

3. Si ipotizza che tutta l'energia necessaria all'accumulo termico sia generata esclusivamente dalla caldaia di integrazione a metano ($Q_{Aux,0}$) senza il contributo del solare (Hp. $A_c = 0$) e ricavata dalla relazione:

$$Q_{aux,0} = \frac{Q_{aux}}{1 - SF} \quad (3.15)$$

4. La quantità di energia primaria annuale risparmiata con il contributo del solare è ricavata come segue:

$$\Delta Q_{aux} = SF \cdot Q_{aux,0} \quad (3.16)$$

5. Considerando il prezzo del metano pari a 0,276 €/Nm3 per le utenze industriali, ossia 0,03 €/kWh (PCI CH_4 pari a 35.874.020 J/Nm3), si può valutare il costo annuo risparmiato, strettamente legata alla quantità di metano non utilizzata, decurtato dei costi di manutenzione annui dell'impianto. I costi di manutenzione sono stati stimati pari al 1% del costo del capitale totale da investire per la realizzazione dell'impianto. Purtroppo per grandi taglie di impianti non sono concessi degli incentivi statali, che invece vengono riservati esclusivamente per la realizzazione di impianti solari termici residenziali (circa pari al 65% del costo di investimento) [44].

$$R = c_{metano} \cdot \Delta Q_{aux} - c_{OeM} \quad (3.17)$$

Per maggiore chiarezza vengono riportati in tabella tutte le voci sopra elencate per tutti e tre le configurazioni di interesse.

Parametro	Portata acqua : 50 l/s	100l/s	250 l/s
Q_{Sol} $[kWh/y]$	4.128.400	7.890.200	18.810.450
Q_{aux} $[kWh/y]$	8.786.000	17.693.600	45.516.500
SF $[-]$	31,97%	30,84%	29,24%
$Q_{aux,0}$ $[kWh/y]$	12.914.400	25.583.800	64.326.950
ΔQ_{aux} $[kWh/y]$	4.128.400	7.890.200	18.810.450
c_{OeM} $[euro/y]$	36.276	59.609	104.135
R $[euro/y]$	**79.319**	**161.316**	**422.558**

Tab 3.13 - Valore dei parametri energetici ed economici necessari per il calcolo del NPV.

Il solar field ricavato diminuisce all'aumentare della portata trattata e all'aumentare dei m^2 necessari di campo solare.

Per condurre una analisi più dettagliata sul confronto dell'impianto ideato per SMAT con uno del tutto simile ma alimentato esclusivamente con caldaia integrativa a metano , si riportano i grafici degli andamenti degli NPV dei casi studio ottenuti al variare del tasso di interesse come illustrato nel paragrafo 3.2.1.

Sono stati realizzati i grafici che mostrano l'andamento del NPV in funzione del tempo (da 0 a 25 anni). Ogni curva è rappresentativa di un determinato caso specifico valutati per un fissato valore di tasso di interesse. L'andamento dei grafici per i tre tassi di interesse sono molto simili. Risultano traslati verso desta, seppur di poco, i punti in cui la curva del flusso di cassa attualizzato intercettano l'asse x (NPV = 0 , ossia il valore del payback time), ciò vuol dire che, a parità di condizioni dei costi, più è alto il valore del tasso di interesse più si dilata il tempo per cui si ha il ritorno dell'investimento.

Vista la netta somiglianza dei grafici, si riporta un solo andamento rappresentativo per mostrare come si comporti l'NPV all'aumentare degli anni dalla realizzazione del progetto.
Il valore dell'NPV per l'anno n generico non corrisponde all'effettivo guadagno in quel dato instante di tempo, ma alla cumulata dei flussi di cassa dall'anno dell'investimento fino all'anno n di riferimento.

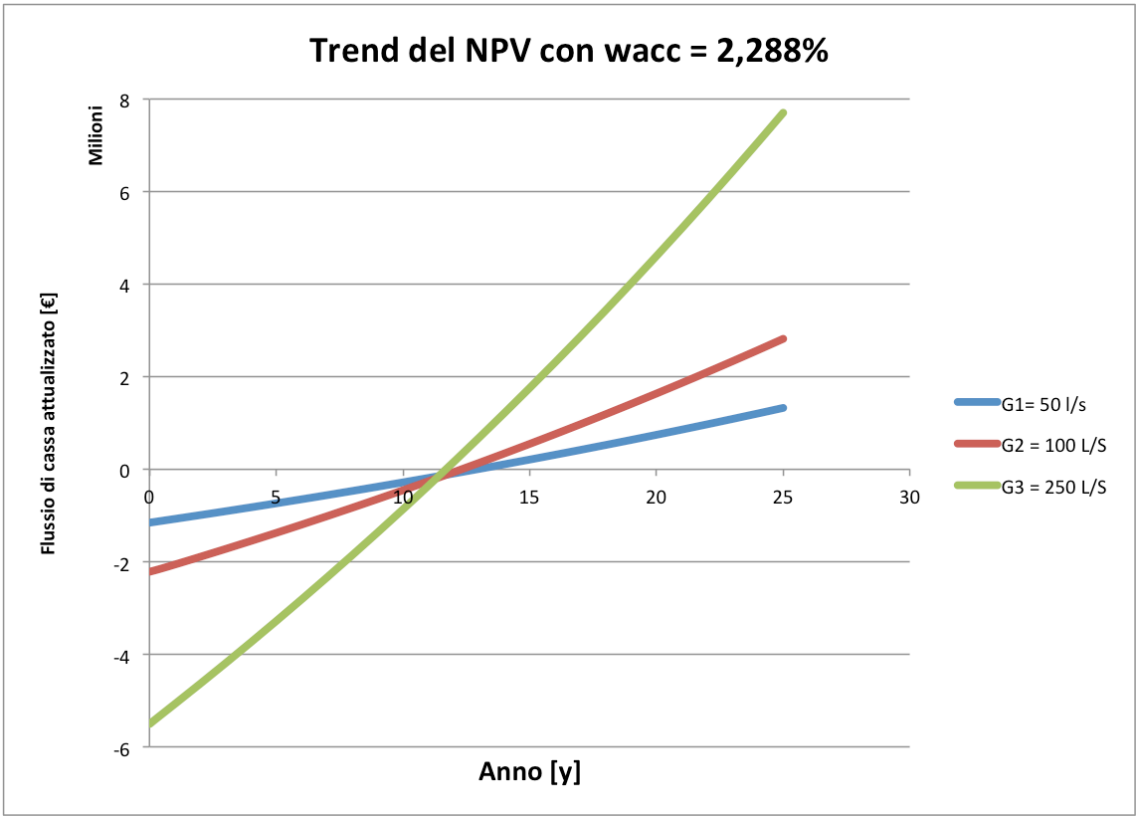

Fig 3.2 - Curva degli NPV con wacc= 2,288% .

In Appendice B sono riportati per maggiore completezza i grafici dell'andamento del NPV per i tre differenti valori di tasso di interesse dove si può notare un andamento del tutto analogo.

Per fornire ulteriori informazioni dettagliate è utile graficare il valore del NPV dei tre casi in esame dopo 25 anni, variando il valore del Wacc ($i_1 = 2{,}288\%$, $i_2 = 2{,}961\%$ e $i_3 = 3{,}625$ %). Questo perchè è fondamentale anche capire quale soluzione fornisce un guadagno cumulativo più elevato a fine analisi.

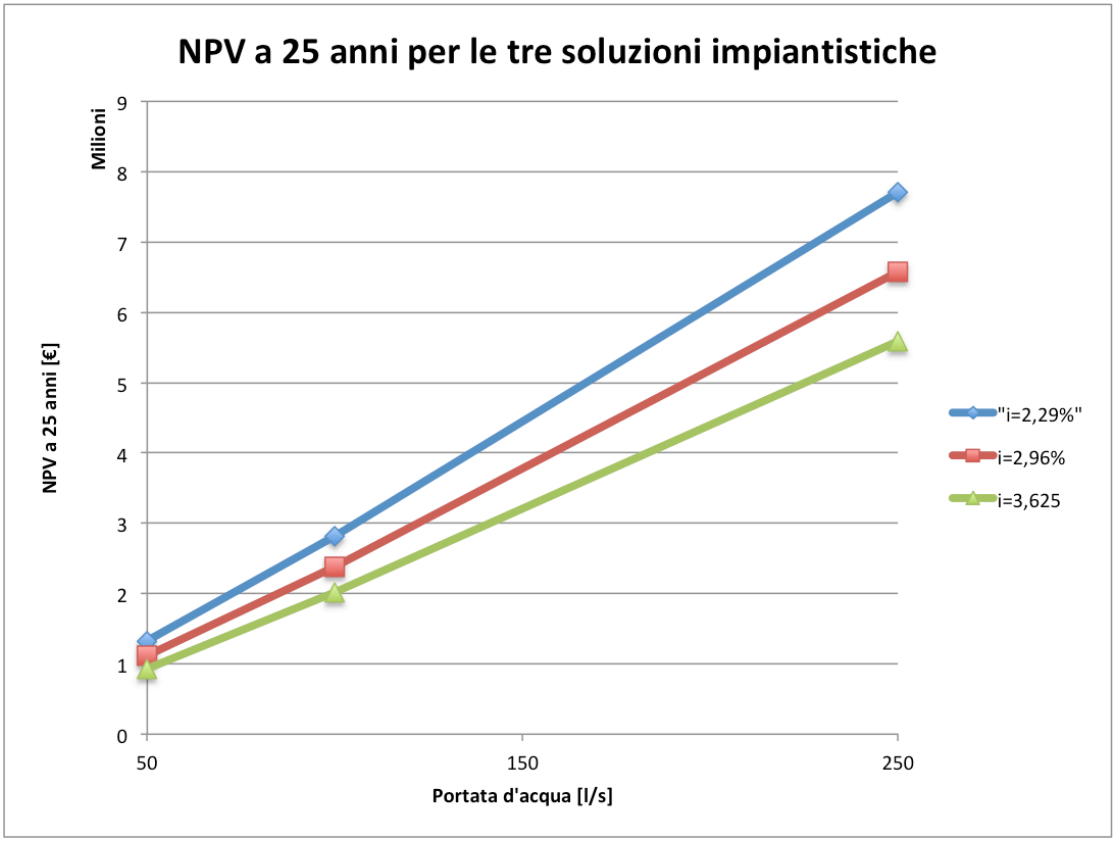

Fig 3.3 - Variazione degli NPV a 25 anni al variare del tasso di interesse.

Tutte le soluzioni riportate presentano un NPV positivo all'anno di fine analisi, di conseguenza tutte le soluzioni sono valide e possono essere prese in considerazione. Nel caso in cui una o più di una avesse avuto un NPV negativo sarebbe stato da escludere a priori.

Tra le soluzioni d'impianto, il caso 3 (G3= 250 l/s di acqua da trattare) è quello che presenta un NPV dopo 25 anni più elevato, soluzione migliore con un tasso di interesse pari a 2,288%.

La scelta ottimale ricade sulla configurazione di impianto che presenta all'anno di fine analisi. Allo stesso tempo è favorevole avere un payback time più basso possibile, ossia una soluzione impiantistica che minimizza il tempo di rientro dell'investimento.

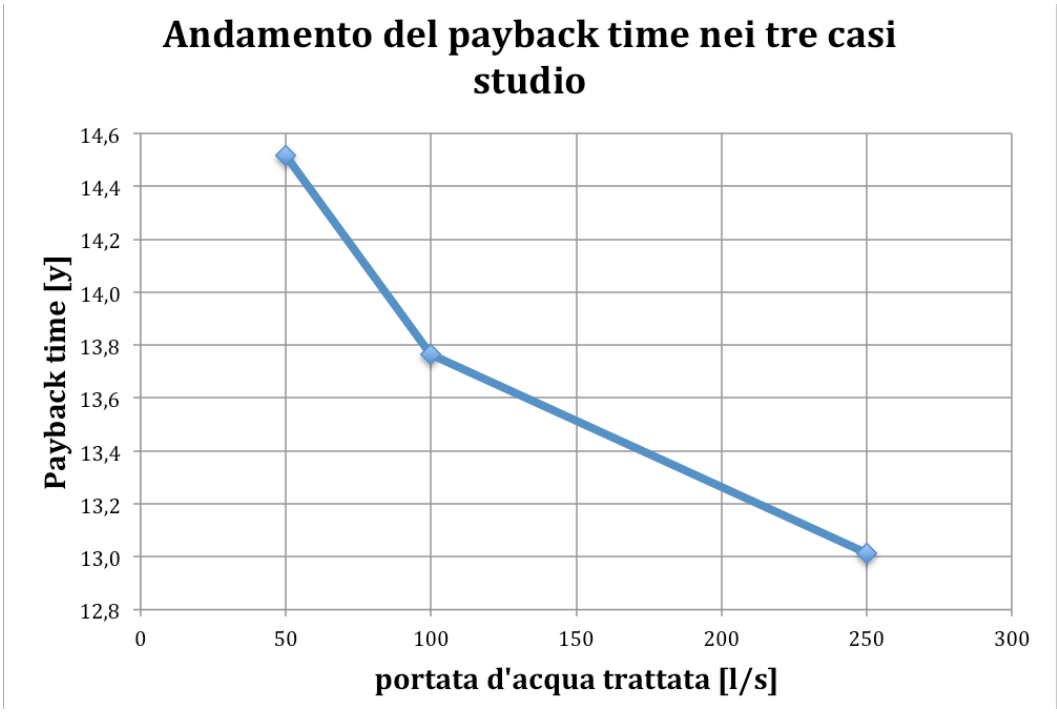

Fig 3.4 - Trend del tempo di ammortamento nei tre casi studio.

Il grafico di Fig 3.4 riporta l'andamento del tempo di ammortamento ricavato per i tre casi studio. Generalmente in una analisi supplementare si tende a scegliere come configurazione ottimale quella che presenta un tempo di ritorno dell'investimento minore.

A quanto detto, la scelta ottimale ricade sulla configurazione di impianto con portata di acqua da processare pari a 250 l/s con un costo capitale medio ponderato pari a 2,288% (Equity: 30% - Debito: 70%).

3.3 Risparmio di emissioni di CO_2 Annue con integrazione del campo solare

3.3.1 Importanza delle fonti rinnovabili

I gas serra presenti in atmosfera hanno un forte impatto sull'equilibrio del sistema climatico.
Si registra che sin dal periodo pre-industriale, dal 1970 al 2010, i livelli globali di emissione sono andati continuamente crescendo fino ad aumentare dell'80%. Il principale gas serra prodotto dall'uomo è la CO_2, emesso per la maggior parte dall'uso di fonti fossili come fonti di energia, nel 2010 costituisce circa il 60% delle emissioni.
I gas serra, che trattengono in atmosfera la radiazione infrarossa emessa dal sole, hanno determinato un innalzamento della temperatura terrestre. L'Agenzia Internazionale per l'Energia (IEA) ha fornito delle limitazioni a 450 parti per milione di CO_2 per evitare che l'innalzamento della temperatura terrestre oltrepassi i 2°C.

Come riportato da ENEA "Secondo le misurazioni del centro meteo del Noaa alle Hawaii, la CO_2 in atmosfera ha superato la soglia di 400 ppm di concentrazione nel maggio del 2013, un valore che non era stato mai raggiunto negli ultimi tre milioni di anni." [45].

Aggiunto a questa problematica, vi è anche la diminuzione delle fonti fossili che sono limitate nel tempo e la sicurezza degli approvvigionamenti energetici, per cui l'attenzione si è spostata su questioni come l'attuale assetto del sistema energetico globale.

Una riduzione delle emissioni nel settore energetico è uno degli argomenti attualmente più discussi, tale riduzione può avvenire utilizzando soluzioni impiantistiche con fonti rinnovabili a basse emissioni di CO_2, utilizzando dei metodi per la carbon capture, sfruttando meno energia e quindi una sensibilizzazione dello spreco di energie [45]

3.3.2 Quantificazione della CO_2 non emessa in atmosfera dall' impianto di trattamento dell'acqua

Vista l'importanza del diminuire drasticamente le emissioni di CO2 in atmosfera, ci si chiede a quanto ammonta il quantitativo di anidride carbonica non emessa in ambiente con l'integrazione del campo solare nel nostro impianto di riferimento, ovviamente valutato per tutte le soluzioni impiantistiche prese in esame.

Reazione chimica del metano:

$$CH_4 + 2\left(O_2 + \frac{79}{21}N_2\right) -> CO_2 + \ 2H_2O \ + 2 \cdot \frac{79}{21}N_2 \quad (3.18)$$

1 mole di CH_4 produce 1 mole di CO_2, e dalla legge di Avogadro 1Nm^3 di CH_4 produce 1 Nm^3di CO_2.

Sapendo che il potere calorifico inferiore del metano è pari a 35874020 J/$Nm^3_{CH_4}$, ossia 9,96 kWh/$Nm^3_{CH_4}$ si ricavano le emissioni di CO_2 evitate in base al risparmio di metano con l'integrazione del solare come segue:

$$CO_{2_{non\ emesse}} = \frac{moli\ CO_2 \cdot PM_{CO_2} \cdot V_{molare} \cdot \Delta Q_{aux}}{PCI_{CH_4} \cdot \eta_{caldaia}} \quad (3.19)$$

PM_{CO_2} : peso molare dell'anidride carbonica (44 g/mol),

V_{molare} : volume molare pari a 22,4 litri/mole,

ΔQ_{aux} : quantità di metano annuo risparmiato (riferimento eq 3.16) [kWh/y].

$\eta_{caldaia}$: rendimento della caldaia di integrazione a metano (94% da catalogo).

Il fattore di conversione è pari a 0,21 kg CO_2 emesse per ogni kWh prodotto da combustione del metano. questo fattore non varia nelle tre configurazioni d'impianto in quanto si considera costante il rendimento di caldaia.

Moltiplicando il fattore di conversione per la quantità di energia risparmiata con l'aggiunta dei collettori solari sottovuoto, si stima il valore di emissioni annue di anidride carbonica NON emesse in atmosfera. Aumentando la portata da trattare nelle tre configurazioni, si necessita di maggiore potenza da fornire all'acqua per poter effettuare il trattamento alle stesse condizioni di temperatura e pressione. Di conseguenza vi è un proporzionale aumento dell'area totale dei collettori per poter coprire la richiesta di energia. Questo comporta ad un incremento dell'energia risparmiata fornita dalla caldaia integrativa.

Viene quindi riportato l'andamento della CO_2 non emessa in relazione alla portata d'acqua processata. Il suo trend dipende esclusivamente dalla quantità di energia annua risparmiata.

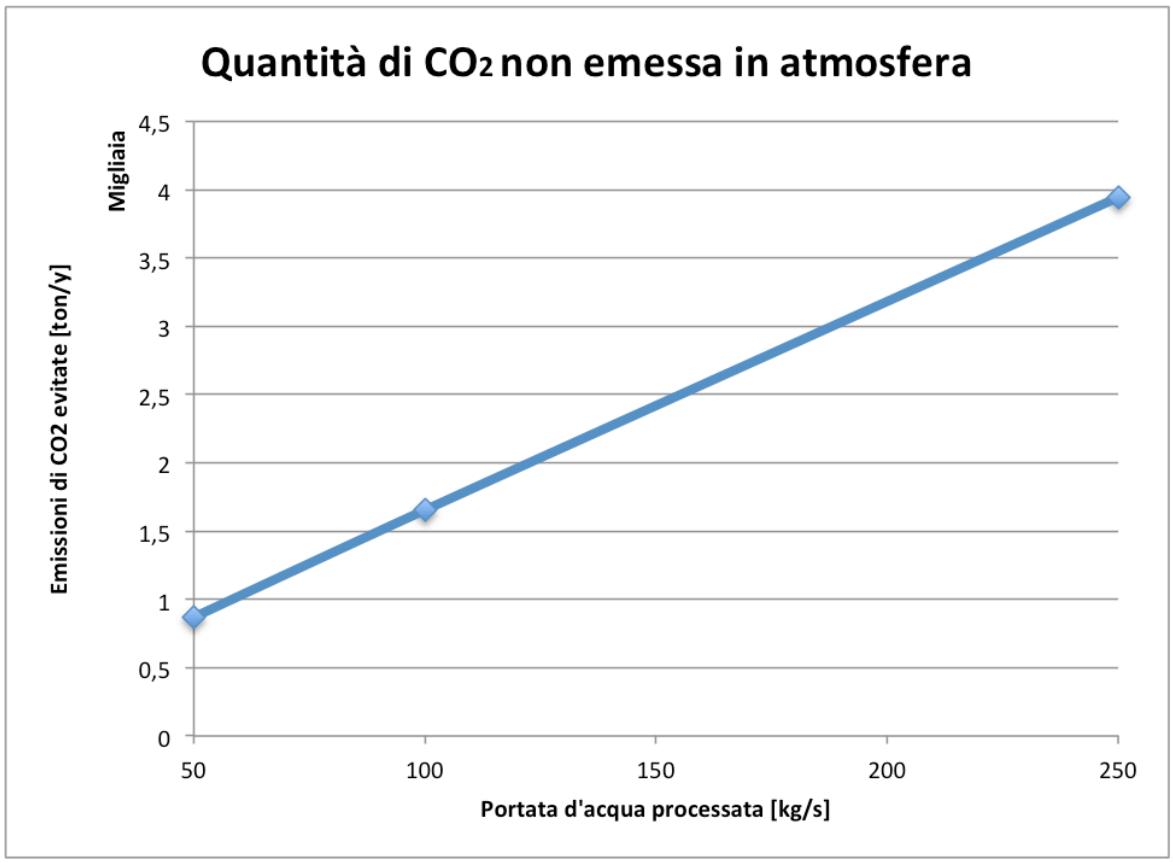

Fig 3.5 - Andamento CO_2 non emessa dall'impianto con integrazione campo solare.

4. Capitolo 4 - Analisi Exergetica d'impianto

4.1 Concetto di Exergia

L'idea di valutare l'exergia di un sistema è nato dalla possibilità di fornire da un punto di vista oggettivo informazioni sulla qualità delle diverse forme di energia (termica, meccanica..), e sottolineare il ruolo dell'ambiente nelle trasformazioni termodinamiche.

A partire dal XIX secolo si iniziò a discutere del concetto di f*razione di energia utilizzabile*, ossia l'energia direttamente convertibile in lavoro, attribuendogli il nome di exergia. I primi a identificare una grandezza che ne riportasse tali caratteristiche o definizioni furono G. Gouy e A. Stodola.

Il concetto prese piede in tutto il mondo e gli furono attribuiti diversi nomi:

- In Francia e nei paesi anglosassoni fu chiamata 'energia utilizzabile',
- In Europa centrale, invece, il primo ad utilizzare e coniare il termine EXERGIA fu Zoran Rant (1953) [51].

Il Primo Principio della termodinamica, o legge di conservazione dell'energia, dice che *"l'energia non si crea, né si distrugge ma si modifica nelle sue diverse forme con l'ausilio di calore o lavoro".*

Di conseguenza, all'aumentare di una forma di energia, vi è la diminuzione delle altre forme di energia. Il primo principio, però, non fornisce alcuna distinzione sulle differenti forme di energia ponendole tutte sullo stesso piano.

Il Secondo Principio della termodinamica pone dei vincoli sulle trasformazioni termodinamiche, determina un limite su quali trasformazioni possono o non possono avvenire spontaneamente in natura, o più specificatamente, su quali trasformazioni termodinamiche sono realmente realizzabili.

L'exergia è una combinazione lineare tra il primo e secondo principio, e da una valutazione sulle diverse forme di energia che permettono la realizzazione di processi termodinamici. Ma

tali processi termodinamici generano delle trasformazioni con l'ambiente esterno, o biosfera, che costituisce quindi un vincolo di funzionamento.

Definizione di exergia (Ref [2], Verda V., Guelpa E.,2015):

" L'exergia associata ad una quantità di energia è il lavoro massimo ottenibile attraverso un dispositivo che, interagendo esclusivamente con la biosfera, utilizzi in modo completo la quantità di energia, realizzando una o più trasformazioni che portino lo stato del dispositivo fino all'equilibrio termodinamico con la biosfera".

Il dispositivo preso in esame è ideale, ovvero è soggetto esclusivamente a interazioni o trasformazioni reversibili con l'ambiente esterno. Nel caso ci trovassimo in una situazione in cui le trasformazioni non fossero reversibili, il lavoro ottenuto sarebbe inferiore a quello massimo [52].

Il modello sul quale si basa l'analisi exergetica è costituito semplicemente da un generico sistema S che interagisce, attraverso scambi energetici, con l'ambiente esterno. Tali scambi vanno ad alterare solo le condizioni fisico-chimiche del sistema, mantenendo in alterate quelle dell'ambiente. Di conseguenza l'ambiente presenta pressione e temperatura, P_0 e T_0, costanti e indipendenti dal tempo[51,52].

Nella figura 4.1, successivamente riportata, si riporta il modello di sistema base utilizzato per l'analisi exergetica.

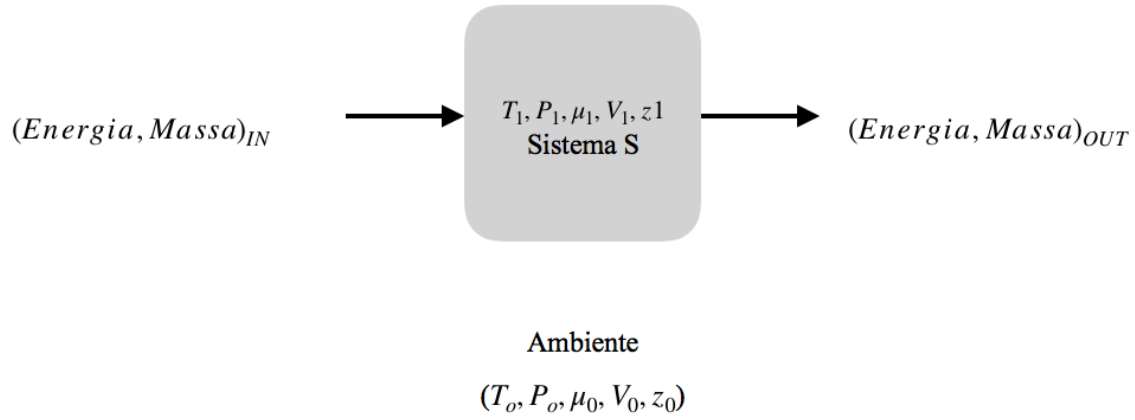

Fig. 4.1 - Interazione ambiente/sistema.

4.1.1 Equazione dell'energia utilizzabile o Exergia

Come detto in precedenza, l'exergia è data dalla combinazione del Primo e del Secondo principio della termodinamica.

Viene riportata a seguire ***l'Equazione generale dell'Exergia o dell'energia utilizzabile***:

$$\Sigma\Phi_i\left(1-\frac{T_0}{T_i}\right)-W_t=\left(\frac{dA^t}{dt}\right)_{VC}+\Sigma G_i(b_i)+\Sigma G_i(\xi_0)+T_0\Sigma_{irr} \qquad (4.10)$$

con:

- Φ_i la potenza termica scambiata con la i-esima sorgente o posso alla temperatura T_i.
- W_t è la potenza tecnica prodotta o assorbita. Può essere una potenza meccanica, elettrica.
- A^t è exergia interna totale.
- b_i è l'exergia fisica di un punti i-esimo. L'exergia fisica rappresenta il massimo lavoro ricavabile quando un flusso di massa è portato dallo stato i-esimo allo stato in equilibrio con la biosfera attraverso dei processi fisici, i quali determinano scambi termici e meccanici con l'ambiente esterno.
- ξ_i è la differenza di exergia chimica tra lo stato i-esimo lo stato morto. In assenza di reazioni chimiche questo termine si annulla. Viene calcolata come la sommatoria delle differenze dei potenziali chimici di Gibbs di tutti i componenti del sistema, se formato da più composti o molecole, valutati allo stato i-esimo e allo stato della biosfera, pesati per la corrispettiva frazione molare.
- $T_0\Sigma_{irr}$ è l'irreversibilità.

Per sistemi in assenza di reazioni chimiche e in condizioni stazionare la formula diventa la seguente:

$$\Sigma\Phi_i\left(1-\frac{T_0}{T_i}\right)-W_t=\Sigma G_i(b_i)\ +\ T_0\Sigma_{irr} \ (4.11)$$

4.1.2 Convenzione dei segni

Nella figura 4.2 viene riportato un sistema non isolato che può scambiare con l'ambiente esterno calore e lavoro.

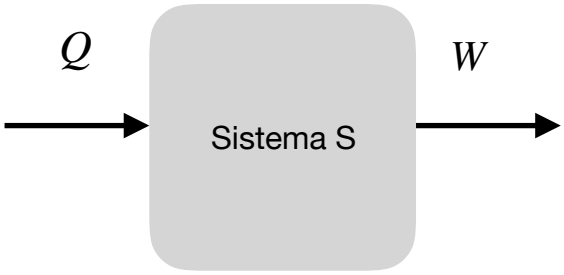

Fig. 4.2 - Convenzione dei segni analisi exergetica.

Nell'analisi exergetica effettuata nel prossimo paragrafo sull'impianto di trattamento acque per SMAT, verrà considerato positivo

- il calore o potenza termica entrante nel sistema,
- il lavoro o potenza meccanica uscente dal sistema.

4.1.3 Rendimento di secondo principio o Efficienza Exergetica

L'efficienta exergetica di un dato sistema è definita come il rapporto tra il prodotto utile e la risorsa utilizzata, sempre in termini exergetici.

$$\eta_{II} = \frac{\Psi_{P,i}}{\Psi_{R,i}} \quad (4.12)$$

L'efficienza exergetica ha un valore compreso tra 0 e 1, e fornisce una informazione oggettiva da un punto di vista termodinamico sulle prestazioni del sistema analizzato. E' utile calcolarlo quando si deve effettuare una scelta su diverse soluzioni alternative.

Esso può essere valutato sull'intero impianto o per ogni singolo componente. Quando si effettua una analisi componente per componente è necessario individuare per ognuno la

risorsa e il prodotto. Nel caso di componenti dissipativi, non è del tutto facile individuare il prodotto.

NB. Qualora un componente avesse come risorsa il delta exergia fisica, a differenza dei prodotti in cui si adopera la dicitura $G_i(b_{out} - b_{in})$, per la risorva la convezione risulta: $G_i(b_{in} - b_{out})$; perchè il rendimento deve essere un valore sempre positivo e inferiore a 1.

4.1.4 Ambiente esterno di riferimento o Biosfera

La scelta principale per una buona analisi exergetica di un sistema è quella riguardante l'ambiente esterno di riferimento, quindi la definizione delle condizioni fisico-chimiche e la composizione chimica in cui il sistema da analizzare è immerso.
Si è soliti considerare come ambiente esterno di riferimento l'aria atmosferica in quanto la sua pressione e temperatura restano pressoché costanti anche in caso di significativi apporti di calore o lavoro.

Condizioni termodinamiche dell'ambiente esterno:
P_o = 1 bar
T_0 = 15 °C = 288 K

4.2 Condizioni di esercizio dell'impianto

Lo schema sotto riportato raffigura l'impianto sul quale effettuare l'analisi exergetica. Per maggiore chiarezza sono stati inseriti i valori numerici, nell'immagine 4.3, per indicare i capisaldi presi in esame, dei quali sono state successivamente riportate le grandezze caratteristiche (pressione, temperatura, entalpia e entropia) che li caratterizzano, necessari per il calcolo.
Tra le tre soluzioni propose, nel caso dell'analisi exergetica, si prende il considerazione la terza, ossia la soluzione che va a trattare una portata d'acqua pari a 250 kg/s, e con

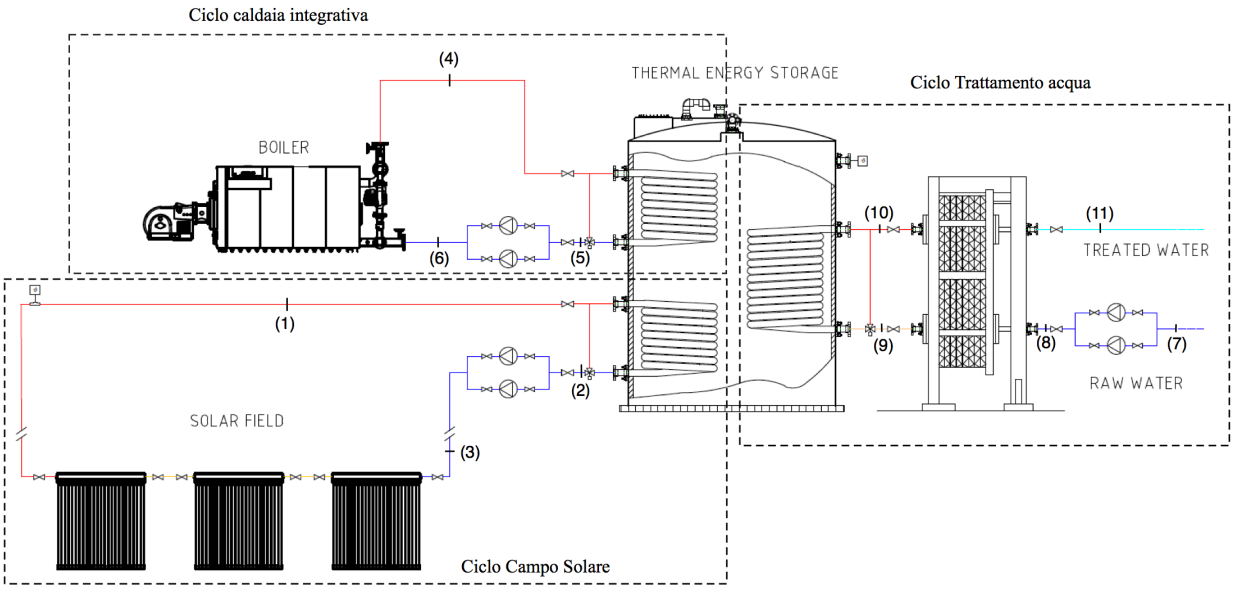

Fig 4.3 - Schema Impianto trattamento acqua. Software adoperato: AutoCAD [31].

temperatura di pastorizzazione di 75°C. L'accumulo termico è tenuto ad una temperatura superiore, a 90°C, così da permettere il raggiungimento della temperatura desiderata per il trattamento.

NB. La rappresentazione in Fig 4.3 è del tutto qualitativa, vi sono 3 collettori in serie per una ipotetica idea di disposizione. Nel calcolo si fa riferimento a collettori tutti in parallelo, in modo da evitare variazioni di temperature tra ingresso e uscita del collettore e conseguente variazione di rendimento degli stessi.

Dati di input utili per l'analisi:

Potenza Caldaia ceduta all'acqua nel circuito integrativo Φ_{CI} : 7810 kW

Potenza pompa circuito campo solare $W_{t,CS}$: 3,26 kW

Potenza pompa circuito caldaia $W_{t,CI}$: 11,4 kW

Potenza pompa circuito acqua trattata $W_{t,w}$: 49,7 kW

Portata totale fluido circuito campo solare G_{CS}: 153 kg/s (0,1 kg/s per singolo collettore)

Portata fluido circuito caldaia G_{CI}: 48 kg/s

Portata fluido circuito acqua trattata G_w: 250 kg/s

Temperatura sorgente solare T_{sol}: 5780 K

Irradianza solare media I: 850 W/m2

Temperatura dell'accumulo termico T_{acc}: 90°C.

Le pressioni in ogni singolo circuito sono per semplicità lasciate costanti in quanto le pompe di circolazione incidono irrisoriamente sia sulla pressione che sulla temperatura, trattandosi di un fluido in fase liquida. Pur variando di poco la pressione a causa di cadute di pressione o pompaggio, nel liquido sottoraffreddato l'entapia e l'entropia non presentano variazioni considerevoli. Dalle tabelle dell'acqua in appendice C, sono stati calcolati i valori di entropia ed entalpia corrispondenti alle condizioni termodinamiche del fluido.
Se ad una data pressione, la Temperatura di interesse non è presente ma compresa fra due valori, l'entropia e l'entalpia sono stati ricavati con interpolazioni lineari.

Pressioni di riferimento:

- Circuito Caldaia di integrazione : 3 bar,
- Circuito Campo Solare : 4 bar,
- Circuito Trattamento acqua: 2 bar.

Punto	Temperatura [°C]	Entalpia [kJ/kg]	Entropia [kJ/kgK]	Exergia fisica [kJ/kg]
1	123	516,672	1,560	68,826
2	107,8	452,248	1,394	52,210
3	107,805	452,269	1,394	52,231
4	130	546,408	1,635	76,962
5	91,07	381,568	1,205	35,962
6	91,13	381,898	1,206	26,004

Punto	Temperatura [°C]	Entalpia [kJ/kg]	Entropia [kJ/kgK]	Exergia fisica [kJ/kg]
7	15	63,078	0,224	0,000
8	15,05	63,383	0,225	0,017
9	73	305,722	0,991	21,748
10	80	335,070	1,075	26,904
11	24	100,839	0,353	0,609
stato morto	15	63,078	0,224	-

Tab 4.1 - Condizioni termodinamiche e exergia fisica relativa.

Per il calcolo dell'efficienza di secondo principio è necessario definire, componente per componente, qual è la risorsa e quale il prodotto.
A tal proposito, vengono di sotto riportate le tabelle riassuntive per i due casi in esame in cui si illustrano come sono state identificate le risorse e i prodotti di ogni componente.

Componente	Risorsa	Prodotto
Collettore solare	$\Phi_{sol}\left(1-\frac{To}{T_{sol}}\right)$	$G_{CS}\cdot(b_1-b_3)$
Pompa Campo Solare	$W_{t,CS}$	$G_{CS}\cdot(b_3-b_2)$
Accumulo Termico	$G_{CS}\cdot(b_1-b_2)$	$G_w\cdot(b_{10}-b_9)$
Scambiatore di Calore	$G_w\cdot(b_{10}-b_{11})$	$G_w\cdot(b_9-b_8)$
Pompa Trattamento Acqua	$W_{t,w}$	$G_w(b_8-b_7)$

Tab 4.2 - Rappresentazione produttiva dei componenti del caso A.

Componente	Risorsa	Prodotto
Boiler	$\Phi_{CH4}\left(1-\frac{To}{T_{fumi}}\right)$	$G_{CI}\cdot(b_4-b_5)$
Pompa Caldaia Integrativa	$W_{t,CI}$	$G_{CI}\cdot(b_6-b_5)$
Accumulo Termico	$G_{CI}\cdot(b_4-b_5)$	$G_w\cdot(b_{10}-b_9)$
Scambiatore di Calore	$G_w\cdot(b_{10}-b_{11})$	$G_w\cdot(b_9-b_8)$
Pompa Trattamento Acqua	$W_{t,w}$	$G_w(b_8-b_7)$

Tab 4.3 - Rappresentazione produttiva dei componenti del caso B.

4.2.1 Valutazione dell'exergia distrutta per componenti d'impianto

Per l'analisi exergetica si fa riferimento alla configurazione di impianto che ha una portata l'acqua di 250 l/s a 75°C.

L'equazione utilizzata per il calcolo dell'exergia distrutta, $T_0\Sigma_{irr}$, è la 4.11 in quanto si adottano come ipotesi la stazionarietà del sistema e l'assenza di reazioni chimiche che comporta l'annullamento del termine di exergia chimica.
Vengono di seguito riportate le assunzioni fatte per ogni singolo componente e la formula utilizzata per il calcolo, andando ad evidenziare i termini che si annullano nell'equazione generale e il valore della corrispondente exergia distrutta ricavata.

Il sistema è un sistema dinamico, il calore fornito al sistema di accumulo dal campo solare dipende dalla irradianza solare. Essa dipende sia dalle condizioni climatiche del luogo in cui si vuole installare l'impianto (in questo caso Torino) che dal periodo dell'anno.

Quando la potenza fornita dal campo solare non è sufficiente a mantenere la temperatura nell'accumulo termico pressocchè costante a 90°C, il boiler andrà in funzione e integrerà il deficit di potenza richiesta. Da questo si evince che il sistema non ha delle temperature operative fisse ma variano nel tempo.

A tal proposito si è pensato di valutare due casi distinti di sistema, uno nel periodo estivo in cui il calore necessario al sistema d'accumulo è totalmente ceduto da fonte solare, e uno invernale in cui opera esclusivamente la caldaia a metano.

L'analisi exergetica è possibile valutarla solo in un istante temporale preciso, a tal proposito si è considerata la di massima potenza dal campo solare e dalla caldaia integrativa a metano

Caso A : Calore fornito all'accumulo esclusivamente da Campo Solare

Il calore necessario all'accumulo termico per mantenere la sua temperatura circa costante a 90°C ed essere in grado di trattare l'acqua a 75°C è fornita esclusivamente dalla serpentina del circuito di Campo Solare. In tal caso la caldaia integrativa non è in funzione, per cui non vengono calcolati i valori di exergia distrutta per il circuito Caldaia Integrativa.

- **Exergia distrutta per ogni componente:**

1. Collettore

La portata totale del campo solare è pari a 153 kg/s.
Considerando una configurazione in cui ogni collettore è inserito in parallelo, evitando distinzioni di temperature e rendimenti corrispondenti, il valore della portata del singolo collettore è ricavata come la portata totale diviso il numero totale di collettori adoperati nella soluzione studiata (4473 collettori).

Il flusso termico che viene assorbito dal fluido termovettore, passante nei tubi del collettore, è così calcolato:

$\Phi_{sol} = A_{coll} \cdot \eta \cdot I = G_{CS} \cdot (h_1 - h_3)$ = 153 (516,672 - 452,269) = 9,853 MW.

$$T_0 \Sigma_{irr,coll} = \Phi_{sol} \left(1 - \frac{T_0}{T_{sol}} \right) - G_{coll}(b_1 - b_3) \quad (4.3)$$

Si consideri la sorgente solare ad una temperatura T_{sol} di 5780 K.
Il calcolo dell'exergia distrutta nel caso del campo solare è pari a **6,823MW.**

2. Pompa campo solare

La quantità d'acqua che attraversa il circuito del campo solare è anch'essa pari alla portata totale dei collettori, 153 kg/s.

I termini non nulli nell'equazione dell'exergia in questo caso sono:

- la potenza entrante (<0 per la convenzione riportata nel paragrafo 4.1.2)
- l'exergia fisica dovuta al passaggio di massa in ingresso e uscita della pompa.

L'exergia distrutta è quindi calcolata come:

$T_0\Sigma_{irr,P_{CS}} = -Wt - G_{CS} \cdot (b_3 - b_2)$ = 3,26 - 153 (52,231 - 52,210) = **0,047 kW**

3. Accumulo termico

L'accumulo è considerato a temperatura costante e uguale a 90° C; nel caso reale la temperatura del sistema di accumulo ha una variazione di pochi gradi durante l'intera giornata.

Gli unici termini non nulli nell'equazione 4.11 sono le quote di exergia fisica dei flussi di massa provenienti dal circuito solare e dal circuito del trattamento dell'acqua e il calore disperso in ambiente.
La temperatura di sorgente da inserire nel fattore di Carnot, che moltiplica la quota di flusso disperso in ambiente, corrispinde alla temperatura dell'accumulo termico.

Il flusso disperso viene calcolato come:

$\Phi_{disp} = A_{tank} \cdot U \cdot \Delta T$ (4.4)

con:

A_{tank} : l'area di scambio dello Storage (si considera il tank di forma cilindrica con Volume totale di 303 m^3 e con rapporto H/D uguale ad 1) di **208** $m2$**.**

U : trasmittanza termica di **0,31** $\frac{W}{m^2\ K}$

$\Delta T = T_{tank} - T_{amb}$: differenza di temperatura [K].

$\Phi_{disp} = 208 \cdot 0{,}31 \cdot (90 - 15) =$ **4838 W.**

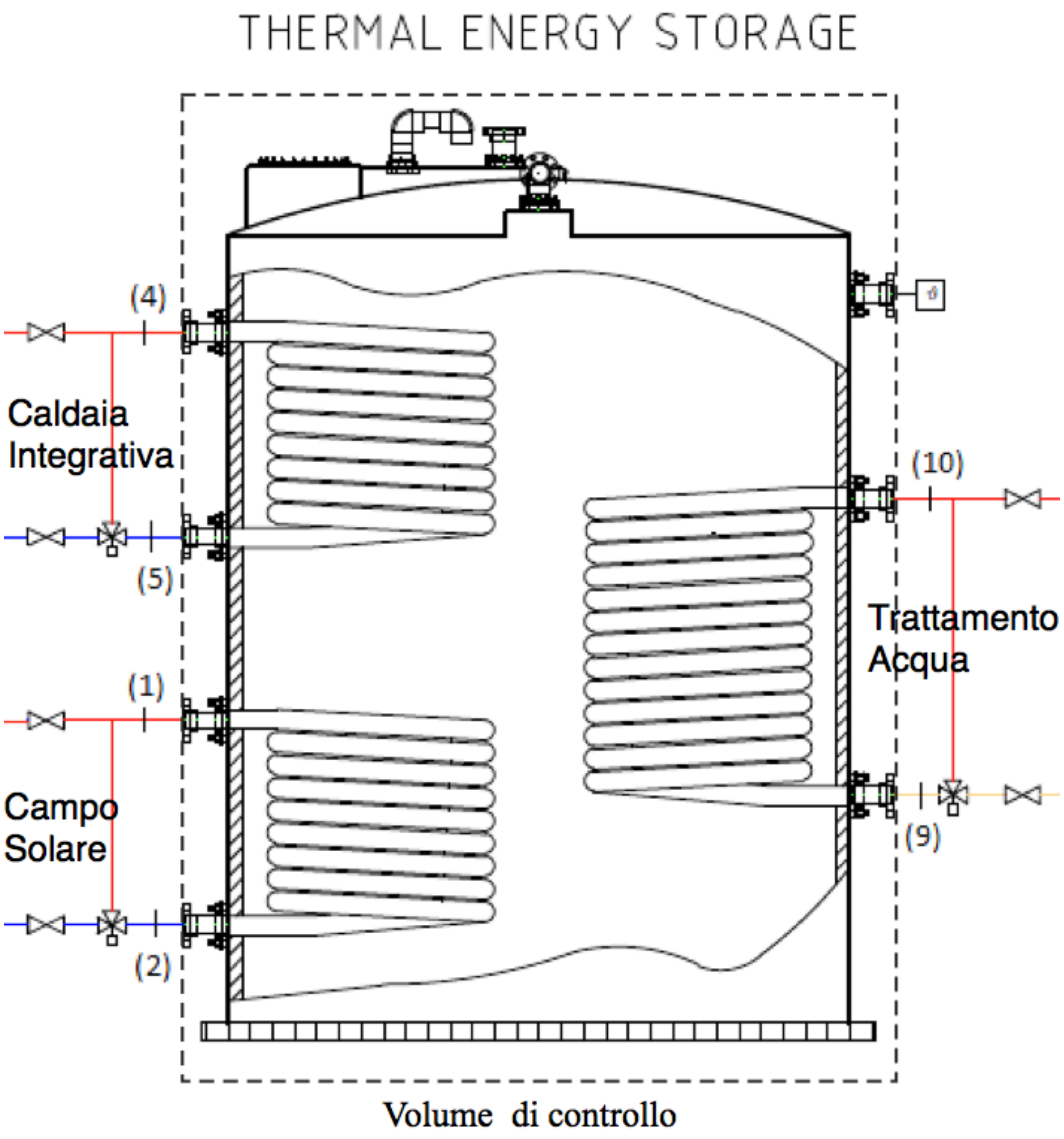

Fig 4.4 - Individuazione volume di controllo dell'accumulo termico.

L'exergia distrutta è valutata quanto segue:

$$T_0\Sigma_{irr,Acc} = \Phi_{disp}\left(1 - \frac{To}{T_{tank}}\right) - G_{CS}(b_2 - b_1) - G_w(b_{10} - b_9) =$$

$$= 4{,}83\ (1- 288/363)\ - [153\ (43{,}68 - 53{,}2) + 250\ (19{,}047 - 14{,}469)\ ] = \mathbf{1{,}254\ MW}$$

4. Scambiatore di calore (trattamento acqua)

Lo scambiatore di calore tratta la stessa portata, una di mandata grezza e una di ritorno trattata termicamente nell'accumulo. Viene utilizzato per recuperare calore dall'acqua trattata e non disperderlo in ambiente, e di conseguenza per pre-riscaldare l'acqua grezza prima del trattamento.

Nel calcolo denn'exergia distrutta le quote non nulle corrispondono esclusivamente alle exergie fisiche legate al flusso di massa, in questo caso dell'acqua.

$$T_0\Sigma_{irr,Scambiatore} = -G_w(b_9 - b_8) - G_w(b_{11} - b_{10}) =$$

$$= \text{-}250\ (\ 14{,}469 - 1{,}608) - 250\ (0{,}179 - 19{,}047)\ = \mathbf{1{,}502\ MW}$$

5. Pompa circuito trattamento acqua

La pompa del circuito trattamento acqua permette il ricircolo di una portata d'acqua pari a 250 kg/s. Come nel caso della pompa del campo solare, i valori non nulli che determinano l'irreversibilità sono la potenza da fornire alla pompa e l'exergia fisica del flusso di massa.

$$T_0\Sigma_{irr,P_w} = -Wt, w\ -\ G_w \cdot (b_8 - b_7) = 49{,}7 - 250\ (0{,}017\text{-}0{,}000) = \mathbf{45{,}45\ kW.}$$

Caso B : Calore fornito all'accumulo esclusivamente da Caldaia Integrativa

Nel secondo caso il calore necessario all'accumulo termico per trattare l'acqua viene totalmente ceduto dal circuito della caldaia integrativa. Nel calcolo exergetico, il componente che presenta una variazione di calcolo è l'accumulo termico di cui si ricalcolerà l'exergia distrutta. Lo scambiatore di calore e la pompa di trattamento acqua non subiscono variazioni di temperatura, pressione e portata d'acqua per cui l'exergia distrutta è esattamente la stessa del caso A.

6. Boiler

I fumi prodotti dalla combustione del metano ad alta temperatura scambiano calore con il fascio di tubi in cui fluisce l'acqua con portata pari a 48 l/s (Fig 4.5). L'acqua riceve il calore dai fumi ad una temperatura di 400°C [54].

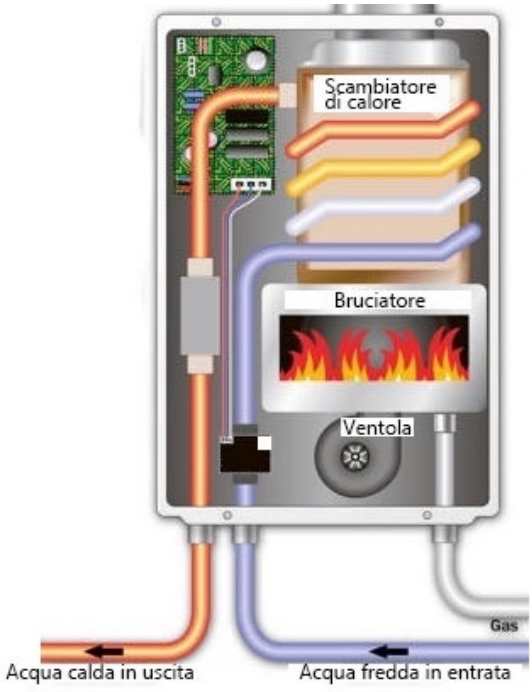

Fig 4.5 - Schema di funzionamento caldaia integrativa a metano [55]

Si considera come volume di controllo la parte di caldaia in cui si ha la tubazione in cui passa l'acqua del circuito.

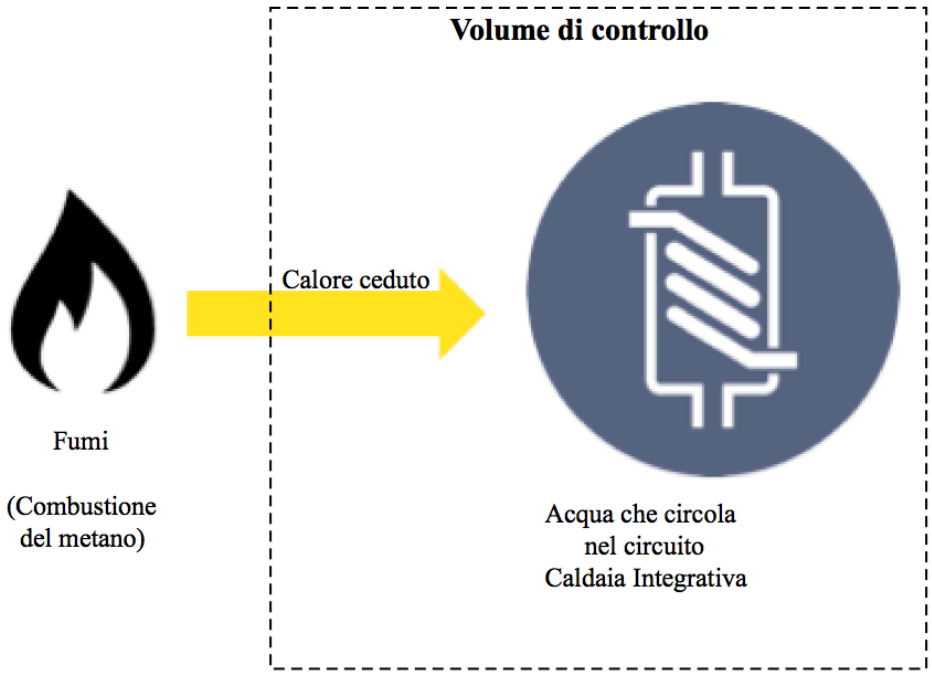

Fig 4.6 - Volume di controllo boiler per analisi exergetica.

Sono note le temperature all'ingresso e all'uscita della caldaia pari a 116 e 130°C.
L'incremento della temperatura è dovuto al recupero di calore dai fumi di combustione.
Il calore ceduto dai fumi all'acqua è calcolato come:

$$\Phi_{CH_4} = G_{CI} \cdot c \cdot \Delta T = G_{CI} \cdot c \cdot (T_4 - T_6) = 48 \bullet 4{,}186\ (\ 130 - 91{,}13) = 7810\ \text{kW}$$

Le grandezze in gioco per il calcolo dell'exergia distrutta, nel caso del boiler, sono il flusso ceduto dai fumi di combustione (>0 per la convenzione dei segni) e dall'exergia fisica.

L'exergia distrutta vale:

$$T_0 \Sigma_{irr,boiler} = Q_{CH_4} \left(1 - \frac{T_0}{T_{fumi}} \right) - G_{H_20}(b_4 - b_6) \ =$$

$= 7810 \left(1 - \frac{298}{673}\right)$ - 48 (76,962 - 36,004) = **6,441 MW**

7. Pompa circuito trattamento acqua

La pompa del circuito di caldaia integrativa permette il ricircolo di una portata d'acqua pari a 48 kg/s.
Come nel caso della Pompa del circuito del Campo Solare, gli unici addendi dell'equazione che non son nulli sono la quota dell'exergia fisica e la potenza da fornire nella pompa.

Pertanto l'exergia distrutta è così calcolata:

$T_0 \Sigma_{irr,P_{CI}} = - W_{t,CI} - G_{CI}(b_6 - b_5)$ = 11,4 - 48 (36,004 - 35,962) = **9,384 kW.**

4.2.3 Risultati Analisi Exergetica

Sono riportate a seguire i grafici a barre per entrambi i casi analizzati per poter evidenziare con maggiore chiarezza la quantità di exergia distrutta componente per componente.

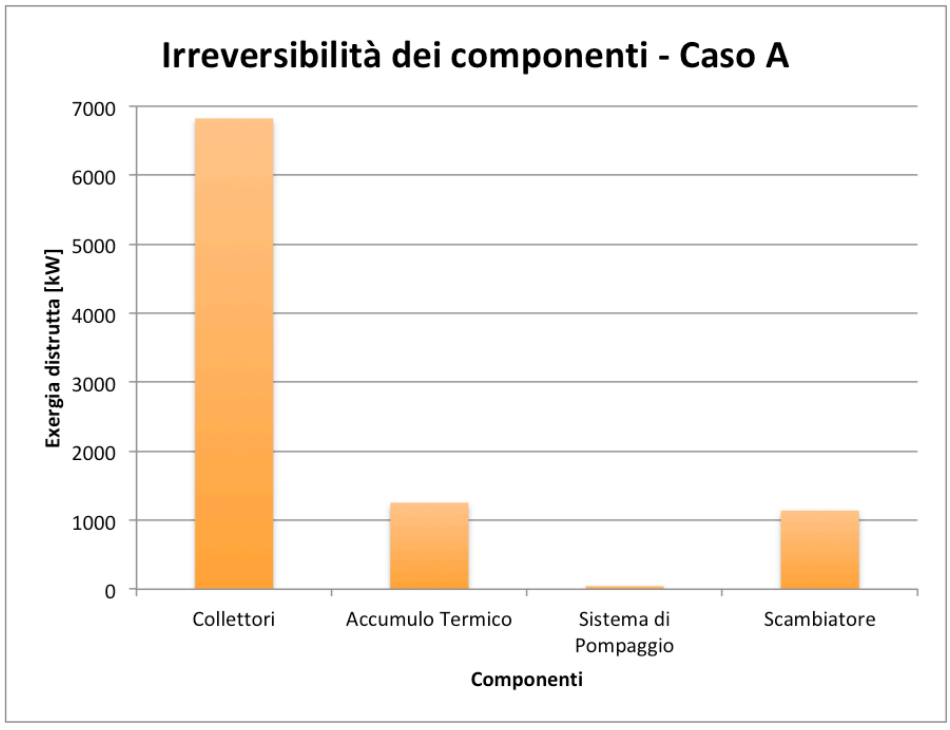

Fig 4.7 - Irreversibilità dei componenti d'impianto, caso A.

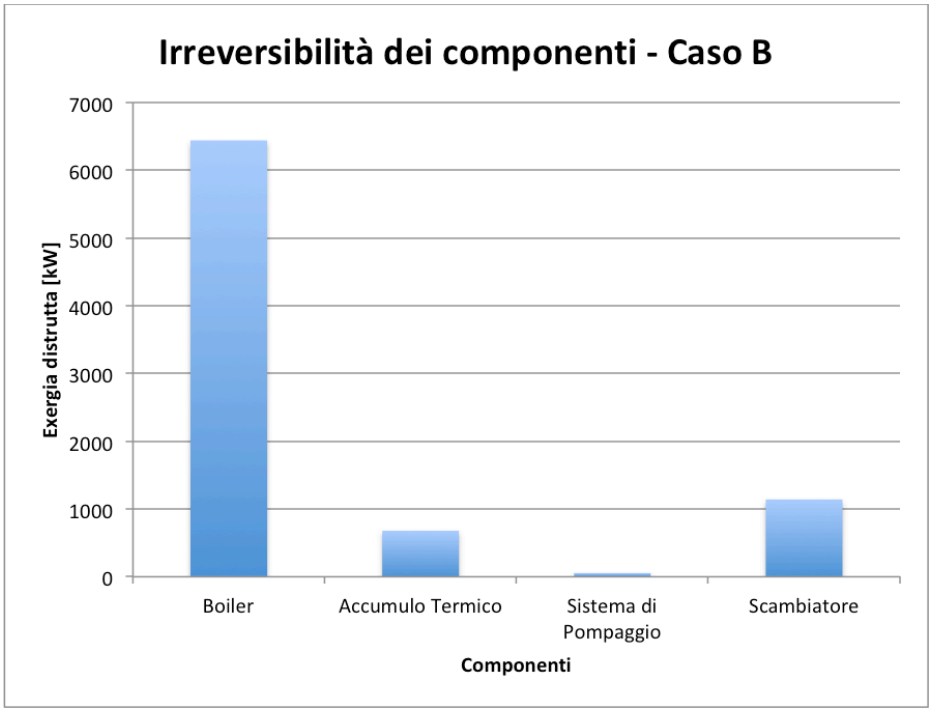

Fig 4.8 - Irreversibilità dei componenti d'impianto, caso B.

In entrambi le situazioni studiate il sistema di pompaggio ha una irreversibilità del tutto trascurabile rispetto agli altri componenti che compongono il sistema, avendo un valore di tre ordini di grandezza inferiore rispetto alle restanti apparecchiature. In entrambe le soluzioni le irreversibilità maggiori sono ottenute dal campo solare e dalla caldaia integrativa. La distruzione di exergia nei due componenti citati é una conseguenza del fatto che si ha un forte degrado della temperatura.

5. Conclusioni

In questo lavoro di tesi si è analizzata l'efficacia del trattamento termico di pastorizzazione per produzione di acqua potabile in un impianto solare termico.

Il più diffuso metodo di trattamento dell'acqua attualmente è la clorazione, che come visto precedentemente, presenta degli svantaggi sulla formazione di residui chimici in condizioni particolari. Ha come vantaggio l'eliminazione totale degli inquinanti, un basso costo di trattamento.

Le prove eseguite in laboratorio hanno rilevato un feedback positivo sull'utilizzo del trattamento termico, come metodo alternativo ai trattamenti chimici comunemente in uso, adoperando diverse combinazioni di temperatura e tempo di trattamento.

Tra i vantaggi riscontrati del trattamento si rammenta:

- un'abbattimento pari al 100% degli agenti patogeni presenti nell'acqua non trattata,
- possibilità di adoperare il metodo per processare grandi portate di acqua,
- una forte diminuzione di emissioni in atmosfera di CO_2 con l'utilizzo del campo salare termico.

D'altro canto l'impianto di trattamento presenta un elevato costo di investimento, per la maggior parte dovuto all'installazione di numerosi collettori solari per coprire la domanda di energia richiesta dal sistema di accumulo.

E' infine stata condotta una analisi exergetica d'impianto per identificare i componenti che sfruttavano in modo efficace o meno la risorsa exergetica disponibile.

Il trattamento di pastorizzazione risulta una valida alternativa agli attuali trattamenti in uso. In un futuro si potrebbe analizzare un impianto simile andando a sostituire i collettori solari con dei concentratori solari e poter confrontare, a parità di portata d'acqua da trattare, i costi di investimenti, il ritorno del costo d'investimento e le emissioni annue di CO_2 risparmiate in atmosfera. Per poi confrontare oggettivamente, con una analisi exergetica la soluzione impiantistica ottimale.

Appendice A

Valutazione dei costi dei componenti - Grafici di riferimento

A.1 Material Factor

Il Fattore di correzione del Materiale viene identificato attraverso un grafico a griglia. Per l'individuazione del valore di Fm si fa ricorso ad un numero identificativo che dipende dal tipo di componente, configurazione e materiale di costruzione.

Table A.3 Identification Numbers for Material Factors for Heat Exchangers, Process Vessels, and Pumps to Be Used with Figure A.18 (*Continued*)

Identification Number	Equipment Type	Equipment Description	Material of Construction
1	Heat exchanger	Double pipe, multiple pipe,	CS-shell/CS-tube
2		fixed tube sheet, floating head,	CS-shell/Cu-tube
3		U-tube, bayonet, kettle reboiler, scraped	Cu-shell/Cu-tube
4		wall, and spiral tube	CS-shell/SS-tube
5			SS-shell/SS-tube
6			CS-shell/Ni alloy tube
7			Ni alloy, shell/Ni alloy-tube
8			CS-shell/Ti-tube
9			Ti-shell/Ti-tube
10		Air cooler	CS tube
11		Air cooler	Al tube
12		Air cooler	SS tube
13		Flat plate and spiral plate	CS (in contact with fluid)
14		Flat plate and spiral plate	Cu (in contact with fluid)
15		Flat plate and spiral plate	SS (in contact with fluid)
16		Flat plate and spiral plate	Ni alloy (in contact with fluid)
17		Flat plate and spiral plate	Ti (in contact with fluid)
18	Process vessels	Horizontal, vertical (including towers)	CS
19		Horizontal, vertical (including towers)	SS clad
20		Horizontal, vertical (including towers)	SS
21		Horizontal, vertical (including towers)	Ni alloy clad
22		Horizontal, vertical (including towers)	Ni alloy
23		Horizontal, vertical (including towers)	Ti clad
24		Horizontal, vertical (including towers)	Ti

(*continued*)

Fig A.1 - Numero identificativo per Fattore di Materiale pt.1 [35].

Table A.3 Identification Numbers for Material Factors for Heat Exchangers, Process Vessels, and Pumps to Be Used with Figure A.18 (*Continued*)

Identification Number	Equipment Type	Equipment Description	Material of Construction
25	Pumps	Reciprocating	Cast iron
26		Reciprocating	Carbon steel
27		Reciprocating	Cu alloy
28		Reciprocating	SS
29		Reciprocating	Ni alloy
30		Reciprocating	Ti
31		Positive displacement	Cast iron
32		Positive displacement	Carbon steel
33		Positive displacement	Cu alloy
34		Positive displacement	SS
35		Positive displacement	Ni alloy
36		Positive displacement	Ti
37		Centrifugal	Cast iron
38		Centrifugal	Carbon steel
39		Centrifugal	SS
40		Centrifugal	Ni alloy

Fig A.2 - Numero identificativo per Fattore di Materiale pt.2 [35].

Una volta individuato il numero identificativo del componente si può ricavare dal grafico successivo l'Fm.

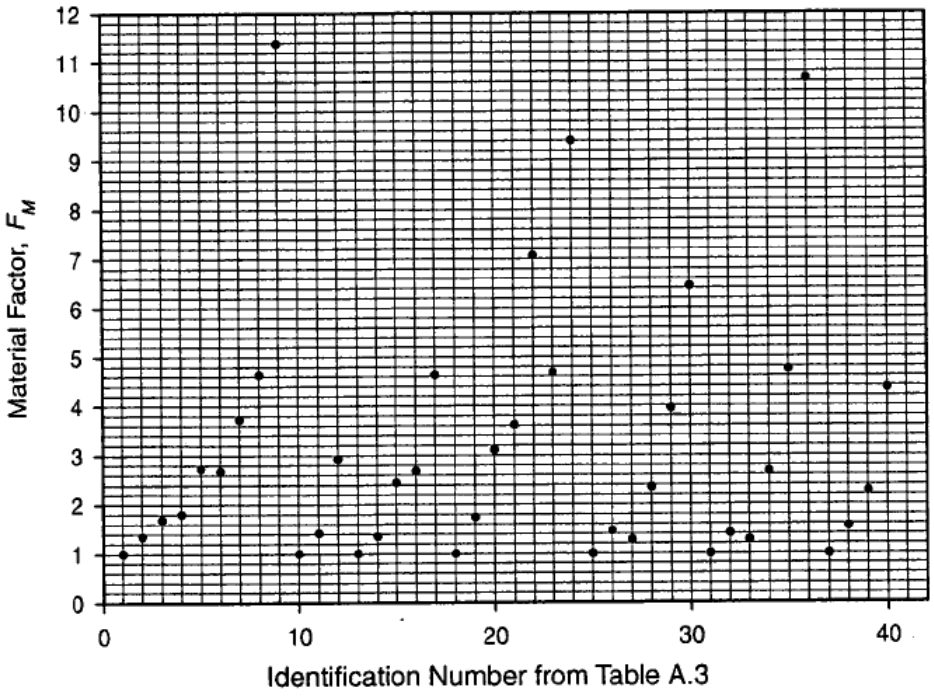

Fig A.3 - Fattore del materiale Fm [35].

A.2 Pressure Factor

Anche per il pressure factor bisogna identificare la tipologia del componente che bisogna analizzare e ricavare i valori delle costanti C_1, C_2 *e* C_3 da inserire nell'equazione

Table A.2 Pressure Factors for Process Equipment (Correlated from Data in Guthrie [1, 2], and Ulrich [3])

Equipment Type	Equipment Description	C_1	C_2	C_3	Pressure Range (barg)
Compressors	Centrifugal, axial, rotary, and reciprocating	0	0	0	–
Drives	Gas turbine	0	0	0	–
	Intern. comb. engine	0	0	0	–
	Steam turbine	0	0	0	–
	Electric—explosion-proof	0	0	0	–
	Electric—totally enclosed	0	0	0	–
	Electric—open/drip-proof	0	0	0	–
Evaporators	Forced circulation (pumped), falling film, agitated film (scraped wall), short tube, and long tube	0 0.1578	0 −0.2992	0 0.1413	P<10 10<P<150
Fans*	Centrifugal radial, and centrifugal backward curve	0 0	0 0.20899	0 −0.0328	ΔP<1kPa 1<ΔP<16kPa
	Axial vane and axial tube	0 0	0 0.20899	0 −0.0328	ΔP<1kPa 1<ΔP<4kPa
Furnaces	Reformer furnace	0 0.1405	0 −0.2698	0 0.1293	P<10 10<P<200
	Pyrolysis furnace	0 0.1017	0 −0.1957	0 0.09403	P<10 10<P<200
	Nonreactive fired heater	0 0.1347	0 −0.2368	0 0.1021	P<10 10<P<200
Heat exchangers	Scraped wall	0 0.6072 13.1467	0 −0.9120 −12.6574	0 0.3327 3.0705	P<40 40<P<100 100<P<300
	Teflon tube	0	0	0	P<15

(continued)

Fig A.4 - Fattore di pressione per apparecchiature di processo pt.1 [35].

Table A.2 Pressure Factors for Process Equipment (Correlated from Data in Guthrie [1, 2], and Ulrich [3]) *(Continued)*

Equipment Type	Equipment Description	C_1	C_2	C_3	Pressure Range (barg)
	Bayonet, fixed tube sheet, floating head, kettle reboiler, and U-tube (both shell and tube)	0 0.03881	0 −0.11272	0 0.08183	P<5 5<P<140
	Bayonet, fixed tube sheet, floating head, kettle reboiler, and U-tube (tube only)	0 −0.00164	0 −0.00627	0 0.0123	P<5 5<P<140
	Double pipe and multiple pipe	0 0.6072 13.1467	0 −0.9120 −12.6574	0 0.3327 3.0705	P<40 40<P<100 100<P<300
	Flat plate and spiral plate	0	0	0	P<19
	Air cooler	0 −0.1250	0 0.15361	0 −0.02861	P<10 10<P<100
	Spiral tube (both shell and tube)	0 −0.4045	0 0.1859	0 0	P<150 150<P<400
	Spiral tube (tube only)	0 −0.2115	0 0.09717	0 0	P<150 150<P<400
Heaters	Diphenyl heater, molten salt heater, and hot water heater	0 −0.01633	0 0.056875	0 −0.00876	P<2 2<P<200
	Steam boiler	0 2.594072	0 −4.23476	0 1.722404	P<20 20<P<40
Packing	Loose (for towers)	0	0	0	–
Process vessels	Horizontal and vertical			†	
Pumps	Reciprocating	0 -0.245382	0 0.259016	0 −0.01363	P<10 10<P<100
	Positive displacement	0 −0.245382	0 0.259016	0 −0.01363	P<10 10<P<100
	Centrifugal	0 −0.3935	0 0.3957	0 −0.00226	P<10 10<P<100

(continued)

Fig A.5 - Fattore di pressione per apparecchiature di processo pt.2 [35].

Table A.2 Pressure Factors for Process Equipment (Correlated from Data in Guthrie [1, 2], and Ulrich [3]) *(Continued)*

Equipment Type	Equipment Description	C_1	C_2	C_3	Pressure Range (barg)
Towers	Tray and packed			†	
Tanks	API—fixed roof	0	0	0	P<0.07
	API—floating roof	0	0	0	P<0.07
Trays	Sieve	0	0	0	–
	Valve	0	0	0	–
	Demisters	0	0	0	–
Turbines	Axial gas turbines	0	0	0	–
	Radial gas/liquid expanders	0	0	0	–
Vaporizers	Internal coils / jackets and jacket vessels	0	0	0	P<5
		−0.16742	0.13428	0.15058	5<P<320

*Pressure factors for fans are written in terms of the pressure rise across the fan, ΔP, where ΔP is measured in kPa.
†See Equation (A.2).

Fig A.6 - Fattore di pressione per apparecchiature di processo pt.3 [35].

Appendice B

B1. Tabelle riassuntive per il calcolo del NPV

Per il calcolo dell'evoluzione del NPV delle varie soluzioni impiantistiche, si è fatto riferimento a tre valori differenti del costo capitale medio ponderato (wacc) o tasso di interesse (i) , che vengono riportati successivamente.
Nella formula del NPV si va ad utilizzare un tasso di interesse modificato tenendo conto dell'aumento dell'energia nel tempo.

Di conseguenza il tasso percentuale utilizzato è così calcolato:

$$i' = \frac{i - e}{1 + e} \qquad \text{(B.1)}$$

- i: tasso di interesse che in questo caso coincide con il costo capitale medio ponderato,
- e: incremento percentuale atteso del costo dell'energia.

Dunque l'NPV viene calcolato anno dopo anno come segue:

$$NPV = -I + \frac{(1+i')^n - 1}{i' \cdot (1+i')^n} \cdot R \qquad \text{(B.2)}$$

Considerando **e = 4%** i valori del tasso di interesse modificato sono i seguenti:

Parametri	E = 30% - D = 70%	E = 40% - D = 60%	E = 50% - D = 50 %
i	2,29%	2,96%	3,62%
i'	-1,646%	-0,999%	-0,367%

Tab B.1 - Valori dei tassi di interesse.

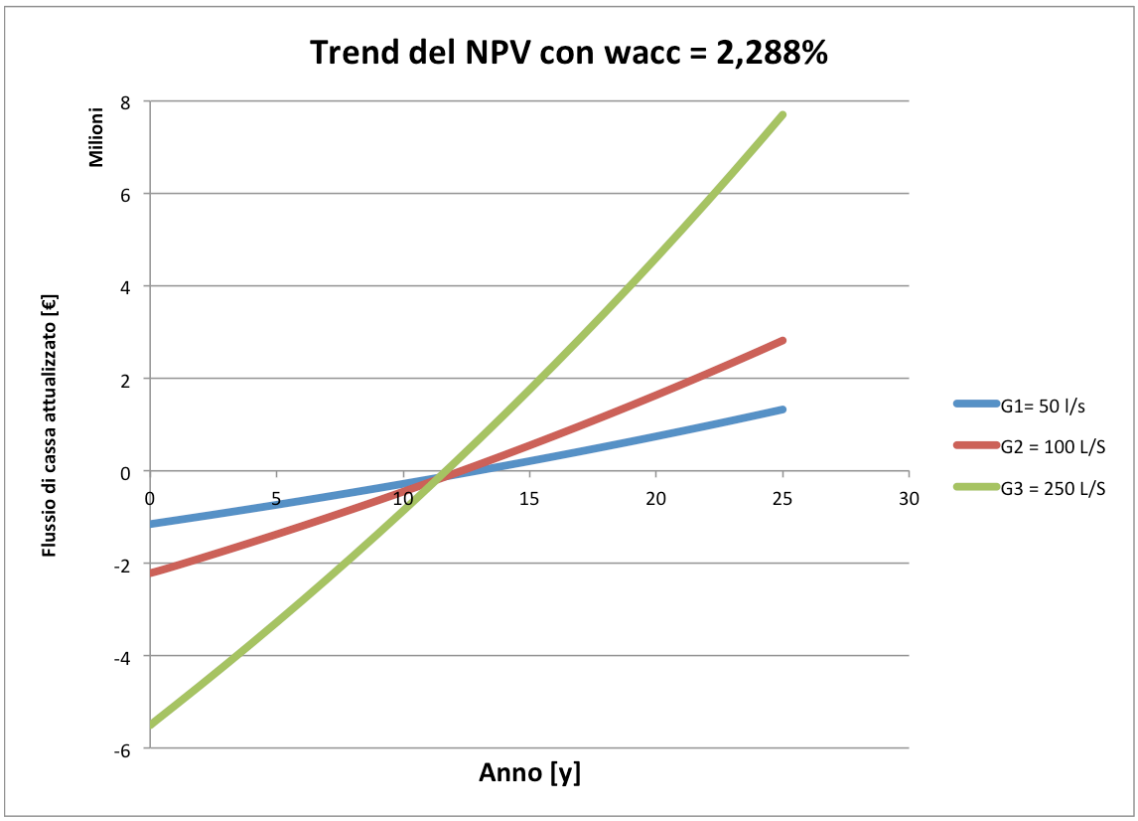

Fig B.1 - NPV delle tre configurazioni di impianto con wacc = 2,288%.

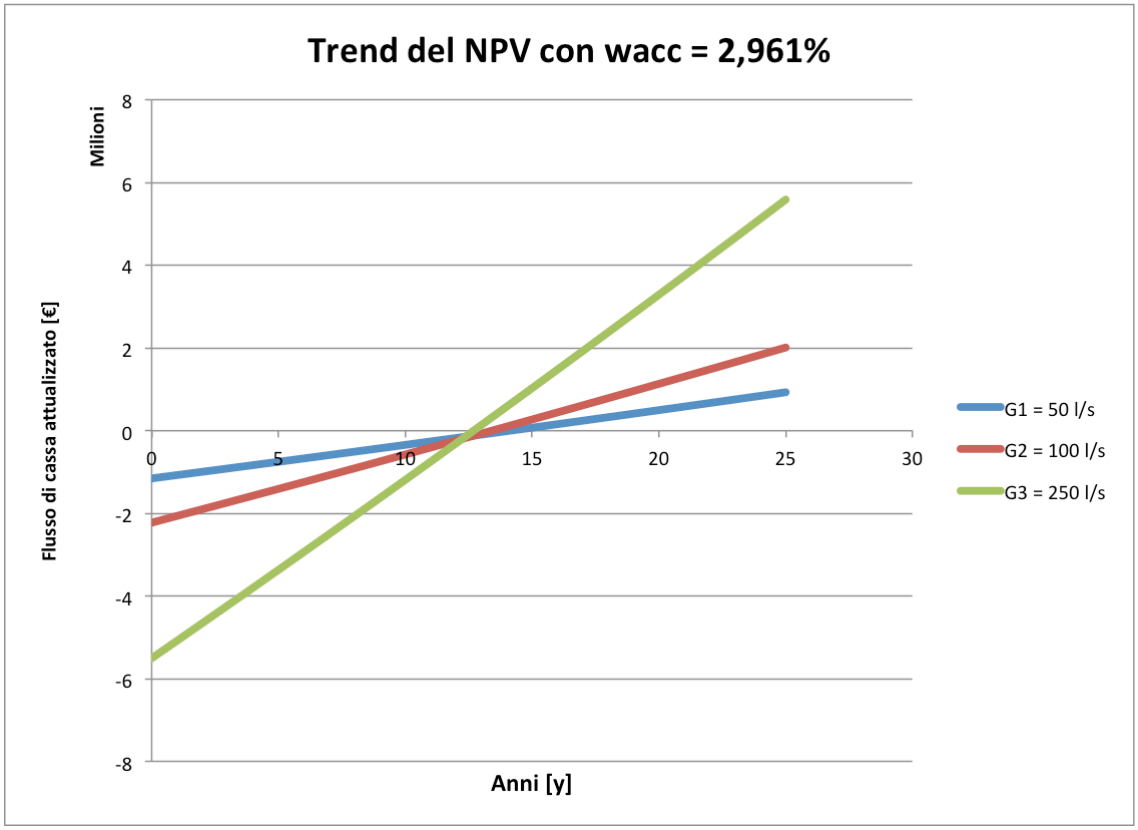

Fig B.2 - NPV delle tre configurazioni di impianto con wacc = 2,961%.

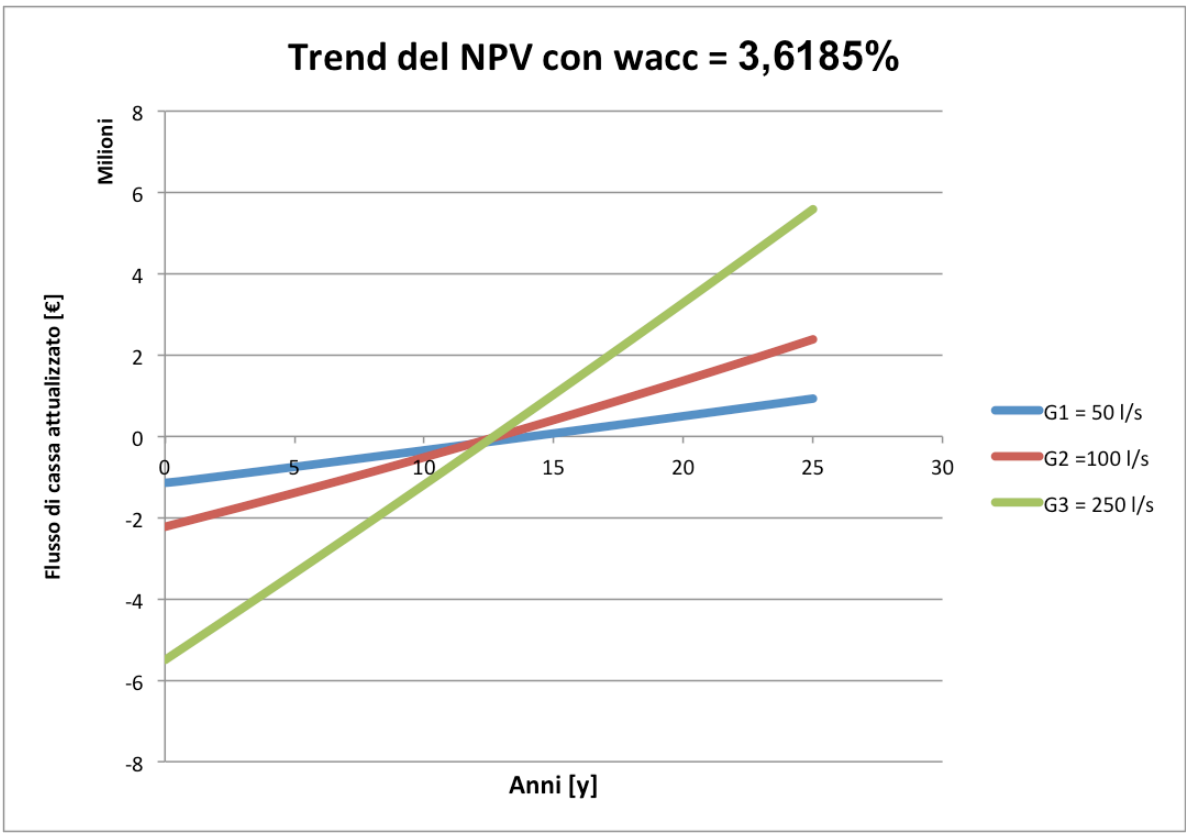

Fig B.3 - NPV delle tre configurazioni di impianto con wacc = 3,6185 %.

Appendice C

C.1 Tabelle di saturazione dell'acqua

Le temperature di esercizio nei tre differenti circuiti di riferimento dell'impianto sono inferiori alle Temperature di saturazione alla pressione di riferimento. Siamo nel caso di liquido sottoraffreddato per cui su un diagramma T-s i punti sono tutti esterni alla campana di saturazione.

I valori di *Entalpia* ed *Entropia* alla data Temperatura e Pressione sono presenti direttamente dalle tabelle sotto riportate. Qualora per una data pressione, il valore di Temperatura non è esplicitamente segnato in tabella ma compreso tra due valori di temperatura limite (T_{min} *e* T_{max}), i valori di Entropia ed Entalpia ricercati vengono calcolati tramite una interpolazione.

Indicando con e_i la generica grandezza estensiva da calcolare(entropia o entalpia) alla temperatura $T_i$ad una pressione fissata, essa viene calcolata quanto segue:

$$\frac{e_i - e_{min}}{e_{max} - e_{min}} = \frac{T_i - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \qquad \text{(C.1)}$$

di conseguenza:

$$e_i = e_{min} + (e_{max} - e_{min}) \cdot \frac{T_i - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \qquad \text{(C.2)}$$

Pressioni di riferimento:

- Circuito Caldaia di integrazione : 3 bar,
- Circuito Campo Solare : 4 bar,
- Circuito Trattamento acqua: 2 bar.

Appendice D

D.1 Determinazione dell'equazione dell'Exergia

Nel seguito sarà mostrato come ricavare l'espressione generale dell'energia utilizzabile partendo dalla formulazione di questi due principi.

- Espressione primo principio della termodinamica:

$$\Sigma\Phi_i - W_t = \left(\frac{d(U + E_c + Ep)}{dt}\right)_{VC} + \Sigma G_k\ (h + e_c + e_p)_k \qquad (4.1)$$

La potenza tecnica è data dalla somma di due contributi, una potenza utile (W_u) e una potenza scambiata con l'ambiente esterno (W_s):

$$W_t = W_u + W_s \quad (4.2)$$

Di conseguenza:

$$W_u = \Sigma\Phi_i - W_s - \left(\frac{d(U + E_c + Ep)}{dt}\right)_{VC} - \Sigma G_k\ (h + e_c + e_p)_k \quad (4.3)$$

- Espressione secondo principio termodinamica:

$$\Sigma\frac{\Phi_i}{T_i} + \Sigma_{irr} = \left(\frac{dS}{dt}\right)_{VC} + \Sigma G_k s_k \quad (4.4)$$

Dal teorema di Gouy-Stodola, la potenza persa è ricavata quanto segue:

$$W_{perso} = T_0\Sigma_i = -\Sigma\frac{\Phi_i}{T_i}T_0 + T_0\left(\frac{dS}{dt}\right)_{VC} + T_0\Sigma G_k s_k \qquad (4.5)$$

In condizioni ideali l'exergia è definita come il lavoro massimo ottenibile. Il lavoro massimo è dato dalla somma del lavoro ottenuto in condizioni reali più il lavoro perso. In termine di potenze diventa:

$$W_{max} = W_u + W_{perso} \quad (4.6)$$

Inserendo l'espressione 4.3 e 4.5 nella 4.6 e mettendo in evidenza i termini simili si ottiene:

$$W_{max} = \Sigma\Phi_i - W_s - \left(\frac{d(U + E_c + Ep)}{dt}\right)_{VC} - \Sigma G_k\ (h + e_c + e_p)_k - \Sigma\frac{\Phi_i}{T_i}T_0 + T_0\left(\frac{dS}{dt}\right)_{VC} + T_0\Sigma G_k s_k$$

(4.7)

Il bilancio exergetico può essere calcolato utilizzando la stessa combinazione lineare tra l'equazioni di primo e secondo principio della termodinamica per sistemi aperti.

$$\Sigma\Phi_i\left(1 - \frac{T_O}{T_i}\right) - W_t = \left(\frac{d(U + E_c + Ep + p_0V - T_0s)}{dt}\right)_{VC} - \Sigma G_k\ (h + e_c + e_p - T_0s)_k + T_0\Sigma_{irr}$$

(4.8)

Ponendo:

- $U^t = U + E_c + E_p$ (energia interna + energia cinetica + energia potenziale), l'energia interna totale;
- $A^t = U^t + p_0V - T_0s$, l'exerga interna totale;
- $h^t = h + e_c + e_p$, l'entalpia specifica totale.

Si ottiene:

$$\Sigma\Phi_i\left(1 - \frac{T_O}{T_i}\right) - W_t = \left(\frac{dA^t}{dt}\right)_{VC} + \Sigma G_k\ (h^t - h_0 - T_0(s - s_0))_k + \Sigma G_k\ (h_0 - T_0s)_k + T_0\Sigma_{irr}$$

(4.9)

Essendo:

$\xi_i = h_i - T_0s_i$ (4.8) l'exergia chimica per unità di massa alla condizione i-esima.

$\xi_0 = h_0 - T_0s_0$ (4.9) l'exergia chimica per unità di massa alla condizione della biosfera.

$b_i = \xi_i - \xi_0 = h_i - h_0 - T_0(s_i - s_0)$ l'exergia fisica per unità di massa alla condizione i-esima.

Si determina ***l'Equazione generale dell'Exergia o dell'energia utilizzabile***:

$$\Sigma\Phi_i\left(1-\frac{T_0}{T_i}\right)-W_t=\left(\frac{dA^t}{dt}\right)_{VC}+\Sigma G_i(b_i)+\Sigma G_i(\xi_0)+T_0\Sigma_{irr} \qquad (4.10)$$

con:

- Φ_i la potenza termica scambiata con la i-esima sorgente o posso alla temperatura T_i.
- W_t è la potenza tecnica prodotta o assorbita. Può essere una potenza meccanica, elettrica.
- A^t è exergia interna totale.
- b_i è l'exergia fisica di un punti i-esimo. L'exergia fisica rappresenta il massimo lavoro ricavabile quando un flusso di massa è portato dallo stato i-esimo allo stato in equilibrio con la biosfera attraverso dei processi fisici, i quali determinano scambi termici e meccanici con l'ambiente esterno.
- ξ_i è la differenza di exergia chimica tra lo stato i-esimo lo stato morto. In assenza di reazioni chimiche questo termine si annulla. Viene calcolata come la sommatoria delle differenze dei potenziali chimici di Gibbs di tutti i componenti del sistema, se formato da più composti o molecole, valutati allo stato i-esimo e allo stato della biosfera, pesati per la corrispettiva frazione molare.
- $T_0\Sigma_{irr}$ è l'irreversibilità.

D.2 Ambiente di riferimento

La scelta principale per una buona analisi exergetica di un sistema è quella riguardante l'ambiente esterno di riferimento, quindi la definizione delle condizioni fisico-chimiche e la composizione chimica in cui il sistema da analizzare è immerso.

L'ambiente esterno ha la caratteristica di mantenere immutate le proprie caratteristiche nonostante avvengano delle interazioni con il sistema sia da un punto di vista dell'energia che della massa, in altre parole non modifica il suo stato di equilibrio termodinamico.

Si è soliti considerare come ambiente esterno di riferimento l'aria atmosferica in quanto la sua pressione e temperatura restano pressoché costanti anche in caso di significativi apporti di calore o lavoro.

In definitiva, l'ambiente esterno di riferimento presenta tali caratteristiche:

1. è omogeneo e di grandi dimensioni,
2. non possono variare le proprie grandezze intensive (p_0, T_0)
3. scambia il calore sempre a temperatura T0
4. non si possono verificare modifiche di composizione chimica
5. può subire interazioni esclusivamente reversibili
6. il suo livello exergetico è nullo.

Quando il sistema di riferimento da analizzare non presenta le stesse condizioni di pressione e temperatura dell'ambiente esterno, esso scambia calore e/o lavoro con esso; se il sistema raggiunge l'equilibrio termodinamico con l'ambiente esterno, non si hanno più interazioni, ci si trova in una condizione di stato morto, e l'exergia del sistema analizzato si annulla.

I. **Referenze Bibliografiche**

[1] Carraro E., Bonetta S., Palumbo F., Gilli G., (2004). Rischio microbiologico associato al consumo di acqua potabile nei paesi industrializzati. 40(1) , 117-140

[2] Acque destinate al consumo umano - http://www.salute.gov.it/portale/temi/p2_6.jsp?lingua=italiano&id=4416&area=acque_potabili&menu=norme (19 agosto 2016)

[3] Decreto Legislativo 2 Febbraio 2001, n. 31 "Attuazione della direttiva 98/83/CE relativa alla qualità delle acque destinate al consumo umano". Gazzetta Ufficiale n. 52 del 3 Marzo 2001 – Supplemento Ordinario n. 41.

[4] Contaminazione acqua da Nitrati - http://www.almabamboo.com/2017/05/05/inquinamento-da-nitrati/

[5] I pesticidi (28 febbraio 2018) - https://www.issalute.it/index.php/la-salute-dalla-a-alla-z-menu/p/pesticidi#effetti-sulla-salute

[6] Lavandier, R., Quinete, N., Hauser-Davis, R. A., Dias, P. S., Taniguchi, S., Montone, R., & Moreira, I. (2013). Polychlorinated biphenyls (PCBs) and Polybrominated Diphenyl ethers (PBDEs) in three fish species from an estuary in the southeastern coast of Brazil. Chemosphere, 90(9), 2435–2443.

[7] Bettylee Hampil The Quarterly Review of Biology Vol. 7, No. 2 (Jun., 1932). The Influence of Temperature on the Life Processes and Death of Bacteria, pp. 172-196.

[8] Escherichia coli - https://it.wikipedia.org/wiki/Escherichia_coli

[9] PADHYE, N. V., & DOYLE, M. P. (1992). Escherichia coli O157:H7: Epidemiology, Pathogenesis, and Methods for Detection in Food. Journal of Food Protection, 55(7), 555–565.

[10] Escherichia coli O157:H7. https://www.msdmanuals.com/it-it/professionale/malattie-infettive/bacilli-gram-negativi/infezione-da-escherichia-coli-o157-h7-e-altri-e-coli-enteroemorragici-ehec

[11] Shrivastava, R., Upreti, R. K., Jain, S. R., Prasad, K. N., Seth, P. K., & Chaturvedi, U. C. (2004). Suboptimal chlorine treatment of drinking water leads to selection of multidrug-resistant Pseudomonas aeruginosa. Ecotoxicology and Environmental Safety, 58(2), 277–283.

[12] Lefebvre, A., Bertrand, X., Quantin, C., Vanhems, P., Lucet, J.-C., Nuemi, G., … Aho-Glélé, L. S. (2017). Association between Pseudomonas aeruginosa positive water samples and healthcare-associated cases: nine-year study at one university hospital. Journal of Hospital Infection, 96(3), 238–243.

[13] K.D. Mena, C.P. Gerba **.**Risk assessment of Pseudomonas aeruginosa in water .
Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, vol. 201, Springer (2009), pp. 71-115.

[14] Infezioni da Enterococco (2018). https://www.msdmanuals.com/it-it/professionale/malattie-infettive/cocchi-gram-positivi/infezioni-da-enterococchi

[15] Disinfezione dell'acqua(2018). https://www.lenntech.it/disinfezione-acqua/cos-e-disinfezione-acqua.htm#ixzz5VN0YA5Uy

[16] Carielo da Silva, G., Tiba, C., & Calazans, G. M. T. (2016). Solar pasteurizer for the microbiological decontamination of water. Renewable Energy, 87, 711–719.

[17] Clorazione per decontaminare l'acqua. http://www.acquadiqualita.it/

[18] Li, H. Y., Osman, H., Kang, C. W., & Ba, T. (2017). Numerical and experimental investigation of UV disinfection for water treatment. Applied Thermal Engineering, 111, 280–291.

[19] Trattamento per fotocatalisi - https://www.ingegneri.cc/fotocatalisi-per-il-trattamento-acque-reflue-la-ricerca-si-rivolge-alle-cozze.html

[20] Afsharnia, M., Kianmehr, M., Biglari, H., Dargahi, A., & Karimi, A. (2018). Disinfection of dairy wastewater effluent through solar photocatalysis processes. Water Science and Engineering.

[21] Applicazione dell'ozono in acqua potabile - https://www.lenntech.it/biblioteca/ozono/potabile/ozono-applicazione-acqua-potabile.htm#ixzz5Tc7c099X

[22] Xi, J., Zhang, F., Lu, Y., & Hu, H.-Y. (2017). A novel model simulating reclaimed water disinfection by ozonation. Separation and Purification Technology, 179, 45–52.

[23] Brunner, A. M., Vughs, D., Siegers, W., Bertelkamp, C., Hofman-Caris, R., Kolkman, A., & ter Laak, T. (2018). Monitoring transformation product formation in the drinking water treatments rapid sand filtration and ozonation. Chemosphere.

[24] J. Rosenblum, C. Ge, Z. Bohrerova, A. Yousef, J. Lee**.** (2012). Ozonation as a clean technology for fresh produce industry and environment: sanitizer efficiency and wastewater quality
J. Appl. Microbiol., pp. 837-845

[25] Jyoti, K., & Pandit, A. . (2001). Water disinfection by acoustic and hydrodynamic cavitation. Biochemical Engineering Journal, 7(3), 201–212.

[26] Pastorizzazione - https://it.wikipedia.org/wiki/Pastorizzazione.

[27] Abraham, J. P., Plourde, B. D., & Minkowycz, W. J. (2015). Continuous flow solar thermal pasteurization of drinking water: Methods, devices, microbiology, and analysis. Renewable Energy, 81, 795–803.

[28] Carielo da Silva, G., Tiba, C., & Calazans, G. M. T. (2016). Solar pasteurizer for the microbiological decontamination of water. Renewable Energy, 87, 711–719.

[29] VANASSELT, E., & ZWIETERING, M. (2006). A systematic approach to determine global thermal inactivation parameters for various food pathogens. International Journal of Food Microbiology, 107(1), 73–82.

[30] Inattivazione microbica. - https://it.wikipedia.org/wiki/Inattivazione_microbica

[31] Bologna A, (2018). Optimization of a thermal solar plant for water purification. Politecnico di Torino.

[32] Fracastoro G.V, Lorusso S., Zanino R. (2016). Technology for renewable Energy Souces. Politecnico di Torino.

[33] I.George, R.Kalaivanan, (2017).Experimental Study on U- pipe Evacuated Tube Solar Collector with Reflected Shield.

[34] Tecnologia Sottovuoto KLOBEN - http://www.kloben.it/contents/view/22

[35] Turton (2009) , Analysys, Synthesisn and Design of Chemical Processes, Third Edition.

[36] Valore attuale netto (2010) - http://www.bankpedia.org/index.php/it/133-italian/v/22954-valore-attuale-netto-van

[37] Leone P. (2010) -Thermal design and optimization, Politecnico di Torino.

[38] Il costo medio ponderato del capitale (15 Aprile 2011) - https://www.borsaitaliana.it/notizie/sotto-la-lente/costo-medio-ponderato139.htm

[39] Rischio sistematico (Settembre 2018) - https://it.tradingeconomics.com/italy/government-bond-yield.

[40] Market Risk Premium (2018) - https://www.statista.com/statistics/664854/average-market-risk-premium-italy-europe/

[41] Interest Rate Swap (Novembre 2018) - https://www.global-rates.com/interest-rates/euribor/euribor-interest-6-months.aspx

[42] Spread (2018) - Current, http://pages.stern.nyu.edu.

[43] Il costo del capitale proprio (26 febbraio 2018) - https://www.cloudfinance.it/il-calcolo-del-wacc.html

[44] Fracastoro G.V. Lorusso S., Zanino R (2010) - Technology for Renewable Energy Sources, Politecnico di Torino.

[45] Importanza delle fonti rinnovabili - http://www.enea.it/it/seguici/le-parole-dellenergia/fonti-rinnovabili-scenari-e-politiche/perche-le-fonti-rinnovabili

[46] Escherichia coli - https://www.bancodasaude.com/noticias/escherichia-coli-pode-ser-utilizada-na-nova-geracao-de-vacinas/

[47] Pseudomonas Aeruginosa - https://it.wikipedia.org/wiki/Pseudomonas_aeruginosa

[48] Enterococcus faecalis - https://it.wikipedia.org/wiki/Enterococcus_faecalis

[49] D.Lgs 31/2001 - http://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/01031dl.htm

[50] Pesticides in groundwater - https://water.usgs.gov/edu/pesticidesgw.html

[51] Exergia, definizione. Giorgio Galli - Enciclopedia Italiana - V Appendice (1992). http://www.treccani.it/enciclopedia/exergia_%28Enciclopedia-Italiana%29/

[52] Verda V., Guelpa E., (2015). Metodi Termodinamici per l'uso efficiente delle Risorse Energeriche.

[53] Ambiente di riferimento. http://www.ditec.unige.it/users/administrator/documents/FT2_DITEC_GG_PARTE1.pdf

[54] Caldaia a metano - https://www.informazioneambiente.it/caldaia-a-gas/

[55] Funzionamento caldaie. - http://www.caldaiaacondensazione.it/articoli/tecnica/funzionamento-delle-caldaie-e-rendimento-energetico