

POLITECNICO DI TORINO

# Energia e suo impatto ambientale in ambito urbano

---

Metodologie di analisi

**Ing. Novella Talà**

## Indice

1	INTRODUZIONE.....	4
2	CLASSIFICAZIONE DEI MODELLI DI ANALISI ENERGETICO-AMBIENTALI ED EVENTUALI SOFTWARE APPLICATIVI .....	7
	MODELLI DI OTTIMIZZAZIONE.....	11
	MODELLI BOTTOM-UP.....	11
	MODELLI TOP-DOWN.....	12
	SISTEMI DINAMICI .....	12
	MARKAL .....	13
	TIMES.....	14
3	METODI DI ANALISI.....	15
3.1	L'ANALISI ENERGETICA E AMBIENTALE .....	16
3.1.1	CARATTERISTICHE PRINCIPALI .....	16
3.2	L'ANALISI EXERGETICA.....	17
3.2.1	CONCETTI E DEFINIZIONI .....	17
	NOVITÀ SIGNIFICATIVE ALLA METODOLOGIA .....	22
	BREVI NOTE SULLA TEORIA DEL COSTO EXERGETICO .....	22
	APPLICAZIONE DEL METODO IN SISTEMI A PIÙ PRODOTTI.....	23
	NOTE SULL'ANALISI AMBIENTALE: PROPOSTA DI INDICI DI ATTRIBUZIONE DELLA CO <sub>2</sub> IN BASE AD UN FATTORE PESO CHE TIENE CONTO DELL'EXERGIA.....	24
4	CASE-STUDY: SCENARIO BASE .....	26
4.1	OGGETTO DELLO STUDIO: il quartiere Arquata.....	26
4.2	MODELLO DEL SISTEMA QUARTIERE.....	27
4.3	L'ANALISI ENERGETICA E AMBIENTALE .....	31
4.4	L'ANALISI EXERGETICA.....	37
4.4.1	CALCOLO DEI FLUSSI EXERGETICI .....	37

5	CASE-STUDY: SCENARIO ALTERNATIVO.....	50
5.1	L'ANALISI ENERGETICA E AMBIENTALE .....	53
5.2	L'ANALISI EXERGETICA.....	59
6	CONFRONTO SCENARI .....	62
7	RINGRAZIAMENTI .....	65
8	BIBLIOGRAFIA .....	66

## 1 INTRODUZIONE

Le complesse relazioni esistenti tra sistemi naturali e attività antropiche non sono ancora completamente note. Ciò che è certo è che i processi antropici e lo sfruttamento non adeguato delle risorse provocano una progressiva degradazione dell'ambiente. La consapevolezza delle conseguenze nocive dell'inquinamento ambientale ha posto in primo piano questioni quali l'uso sostenibile delle risorse naturali, la salvaguardia della salute umana, dell'ambiente e del patrimonio culturale.

I sistemi energetici rappresentano una delle maggiori sorgenti di emissioni inquinanti in atmosfera e la tutela ambientale richiede una riorganizzazione strutturale riducendo il consumo energetico e l'impatto delle tecnologie di conversione. In tal senso diventa essenziale raccordare in modo sostenibile sviluppo economico, sfruttamento delle risorse (energetiche e materie prime) e salvaguardia ambientale.

Lo sviluppo economico prevede la crescita continua, l'aumento dei consumi, dell'occupazione, del reddito e della ricchezza generale (PIL) tuttavia le crescite esponenziali come quella del sistema economico non sono sostenibili nel lungo periodo. A tal riguardo sono stati proposti diversi modelli di sviluppo uno dei più noti è il cosiddetto "sviluppo sostenibile" che si basa sostanzialmente su due principi:

1. Usare le risorse rinnovabili ma ad una velocità non superiore al loro tempo di rigenerazione.
2. Non immettere nell'ambiente inquinanti e scorie che superino la sua capacità di assorbirli e metabolizzarli.

Un tema predominante delle politiche ambientali è quello dei cambiamenti climatici riconducibili alle emissioni di gas serra specie di anidride carbonica ritenute responsabili del surriscaldamento globale (global warming).

Le influenze principali sul clima sono dovute alle variazioni di assorbimento e di riflessione delle radiazioni da parte di gas atmosferici, nubi e particelle di polvere in sospensione. Tali effetti, collegati tra di loro, si raggruppano in due categorie principali indicate con i nomi di "effetto diffrazione" ed "effetto serra".

Mentre la deforestazione ed alcune attività antropiche contribuiscono a far aumentare la concentrazione di polveri nell'atmosfera, e quindi a ridurre la radiazione solare in arrivo (effetto diffrazione), altre attività industriali rilasciano in atmosfera gas che ostacolano l'emissione delle radiazioni terrestri verso lo spazio. L'"effetto serra" che provoca un aumento della temperatura media terrestre risulta preponderante rispetto a quello della diffrazione.

Nel 1988 la World Meteorological Organization (WMO) in collaborazione con il Programma sull'Ambiente delle Nazioni Unite (UNEP) ha istituito l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) una commissione intergovernativa avente lo scopo di studiare i cambiamenti climatici.

Nel 1990 l'IPCC ha pubblicato il primo rapporto sul clima individuando nel fenomeno dell'effetto serra il principale responsabile dei cambiamenti climatici del pianeta. A questo rapporto ha fatto seguito la

Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici presentata a giugno del 1992 al vertice su ambiente e sviluppo a Rio de Janeiro. La convenzione poneva come obiettivo la stabilizzazione delle concentrazioni dei gas ad effetto serra ad un livello tale da non causare interferenze sui sistemi climatici. La convenzione ha istituito come organo di governo la cosiddetta Conferenza delle Parti per controllare il rispetto degli accordi e stabilire gli strumenti utili alla attuazione degli stessi.

Nel 1997 la conferenza si è riunita a Kyoto per aggiornare la Convenzione di Rio del 1992 attraverso l'adozione di un Protocollo contenente i primi obiettivi di riduzione delle emissioni di gas serra legalmente vincolanti per i paesi sviluppati.

Il Protocollo è diventato operativo il 16 febbraio 2005 dopo essere stato ratificato da 55 paesi rappresentanti il 55% del totale delle emissioni (dati riferiti al 1990). Per i paesi industrializzati il protocollo impone una riduzione media del 5,2% delle emissioni serra entro il 2008-2012 rispetto ai livelli del 1990. In particolare la riduzione dovrà essere dell'8% per la Comunità Europea e del 7% degli Stati Uniti. La Comunità Europea ha ridistribuito i livelli di emissione consentiti tra i suoi stati membri differenziando ulteriormente gli obiettivi: -6,5% per l'Italia, -21% per la Germania e +4% per la Svezia.

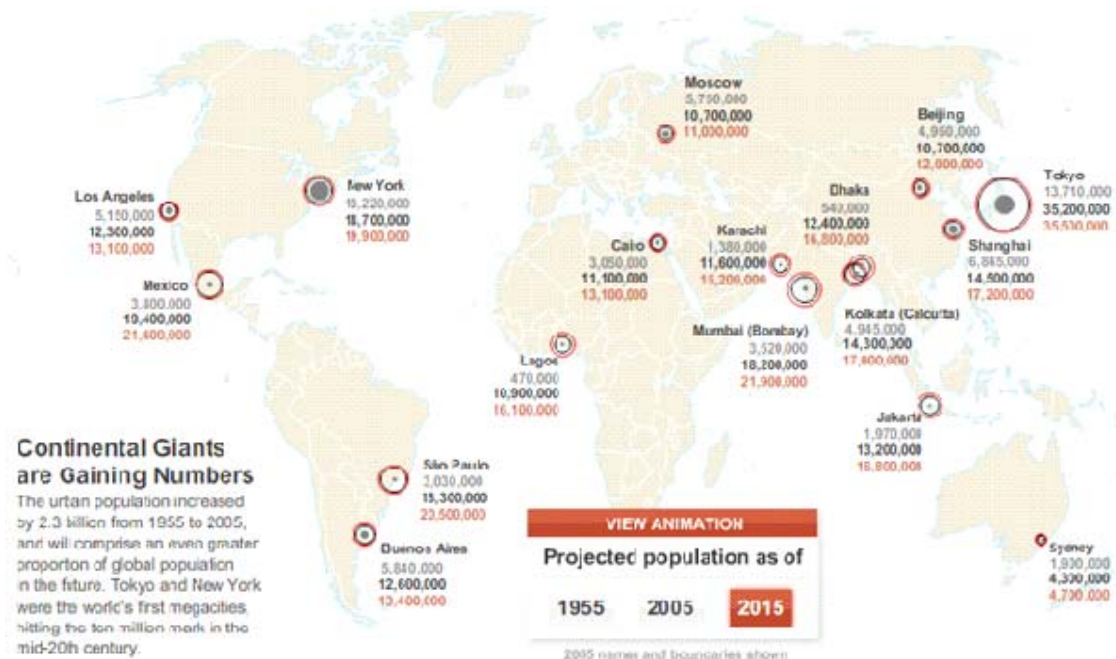
Il Protocollo indica le misure disponibili per attuare le riduzioni attraverso la promozione dell'efficienza energetica, lo sviluppo delle fonti rinnovabili, ecc..Inoltre è possibile adottare tre meccanismi che permettono di raggiungere lo scopo con una certa flessibilità:

- lo "scambio dei diritti di emissione" che consente ai paesi sviluppati di raggiungere gli obiettivi di Kyoto comprando e vendendo crediti sulle emissioni tra di loro;
- la "attuazione congiunta" una modalità per guadagnare crediti investendo in progetti di riduzione delle emissioni nei paesi sviluppati che hanno accettato gli obiettivi di Kyoto;
- il "meccanismo di sviluppo pulito" finalizzato a guadagnare crediti investendo in progetti di riduzione delle emissioni nei paesi in via di sviluppo.

Nell'ambito della Comunità Europea nel marzo 2007 i capi di governo hanno varato un pacchetto clima che prevede che l'Unione tagli le emissioni di gas ad effetto serra del 20% entro il 2020. Prevede anche di portare al 20% il ricorso alle energie rinnovabili nei consumi dell'Unione Europea e di aumentare del 20% l'efficienza energetica. Questa direttiva nota come 20-20-20 è stata approvata dal parlamento Europeo.

Malgrado le problematiche ambientali assumano un carattere nazionale e sovranazionale molti problemi ambientali a scala globale sono originati dalla scala locale. Il 75% del consumo energetico globale e l'80% delle emissioni di gas serra sono concentrati nelle città dove si trovano in prevalenza le attività di produzione e lavoro.

Dal 1955 al 2005, la popolazione urbana è cresciuta di 2,3 miliardi, soprattutto nei paesi più popolosi: Cina, India, Stati Uniti, Indonesia e Brasile. Secondo i demografi nel 2030 circa 1,5 miliardi di individui proverrà dai centri urbani. Il fenomeno dell'urbanizzazione non è un fenomeno nuovo ma il ritmo e la diffusione con cui avviene stanno cambiando. Tra il 2005 e il 2015 nei paesi in via di sviluppo sorgeranno 73 nuove città (37 in Asia, 20 in Africa, e 16 nelle Americhe), e l'Africa, che oggi è il continente meno urbanizzato, nel 2030 avrà una popolazione urbana superiore a quella europea.



**Figura 1: Tokyo e New York sono state le prime megalopoli mondiali, raggiungendo i 10 milioni di abitanti a metà del XX secolo**

*SOURCE: National Geographic - La salute della Terra*

Stime a parte non è dato sapere se le città continueranno a crescere senza controllo oppure vedranno una riduzione della popolazione; quello che è certo è che i centri urbani giocano un ruolo importante per il nostro futuro.

Fortunatamente i governi locali stanno prendendo coscienza dei problemi legati ai consumi domestici e commerciali dell'energia ed hanno la possibilità di indirizzare la transizione a nuovi modelli energetici più rispondenti agli imperativi climatici.

Le autorità locali possono infatti orientare la produzione e la gestione dell'energia utilizzata localmente, rafforzando lo sviluppo, l'accessibilità e la convenienza economica delle tecnologie energetiche più sostenibili.

Le misure attraverso cui un ente locale orienta le proprie politiche in materia di gestione del territorio, della produzione edilizia, dei rifiuti e della mobilità permette di ridurre enormemente le proprie emissioni locali, e può contribuire a promuovere comportamenti più virtuosi di consumo energetico di migliaia di persone e di operatori economici.

Visto che un ente locale coinvolge gli operatori e l'intera cittadinanza nelle proprie politiche ambientali ed energetiche e può mettere in moto meccanismi diffusi e standardizzati appare naturale studiare gli ambiti urbani per migliorare l'organizzazione delle modalità di vita e lavoro e razionalizzare i consumi energetici.

In definitiva gli insediamenti urbani in quanto principali consumatori di energia responsabili di impatti sulla biosfera si prestano bene ad essere impiegati come possibili laboratori di applicazione dei processi di produzione e gestione sostenibile dell'energia.

## 2 CLASSIFICAZIONE DEI MODELLI DI ANALISI ENERGETICO-AMBIENTALI ED EVENTUALI SOFTWARE APPLICATIVI

Gli ambiti urbani rappresentano dei sistemi energetici "estesi" costituiti da sottosistemi fortemente interconnessi.

Per sistema energetico "esteso" si intende un sistema interconnesso, in cui flussi di materia e di energia (considerabili anche come flussi di beni economici) connettono nodi di produzione, trasformazione e utilizzo dei flussi medesimi. Le tecnologie sono organizzate in reti articolate di componenti ugualmente complesse. Lo scopo di un sistema energetico è quello di soddisfare la domanda di energia di una collettività.

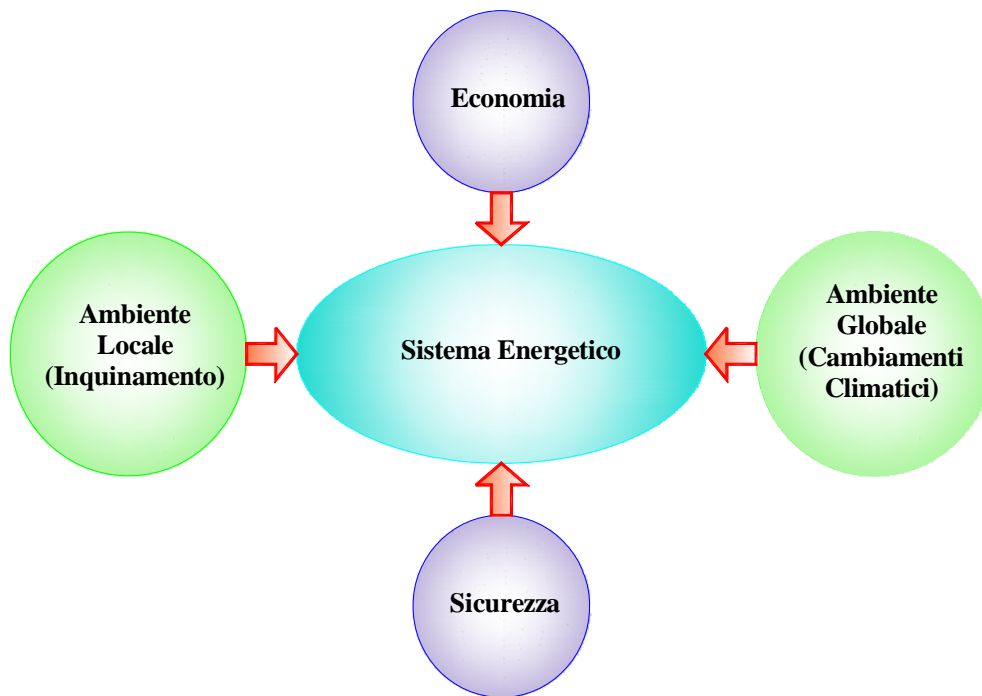


Figura 2: Rappresentazione schematica di un sistema energetico

Una caratteristica peculiare del sistema energetico è quella di evolvere spontaneamente secondo “leggi naturali” di carattere economico, sociale, tecnologico, ambientale; pertanto l’analisi quantitativa si può sviluppare attraverso lo studio di modelli di sottosistemi che descrivono il sistema nel suo complesso.

Al fine di realizzare un processo di pianificazione secondo i principi di sviluppo sostenibile non è possibile prescindere dall’adozione di una analisi di sistema coadiuvata dalla elaborazione del modello di sistema energetico.

L’approccio modellistico appare infatti il più appropriato a trattare realtà siffatte perché il modello, quantificando i flussi energetici ed i costi economici ed ambientali, dà una rappresentazione matematica semplificata del sistema reale.

L’elemento base alla costruzione del modello è l’elaborazione del Sistema Energetico di Riferimento (Reference Energy System-RES), ovvero la rappresentazione del sistema che si intende studiare, descrivendo quantitativamente le tecnologie presenti e previste, con i relativi flussi di energia e materia in uscita ed in ingresso.

Il RES è un reticolo di tecnologie (produzione, conversione, distribuzione e utilizzo dell’energia) e flussi energetici (gas naturale, carbone, elettricità, ...) che soddisfa la domanda di servizi energetici. Mediante il RES è possibile rappresentare ed analizzare i flussi di energia e di materia che attraversano le tecnologie di conversione energetica e di utilizzo.

In altre parole il RES è uno schema che “diagramma” la struttura di un sistema energetico locale tracciando il flusso di energia dalle fonti all’uso finale, ciò che permette di mettere in evidenza l’influenza ed il legame tra flussi energetici e tecnologie. Usando il RES è possibile vedere come i flussi di energia e le tecnologie di conversione energetica influenzano le catene combustibile-tecnologia in un sistema energetico.

In sintesi esprime graficamente le informazioni essenziali sulla disaggregazione della domanda e sui servizi energetici.

La Fig. 3 mostra uno schema aggregato di sistema energetico di riferimento mentre la Fig. 4 mostra nello stesso schema il dettaglio degli elementi che lo compongono.

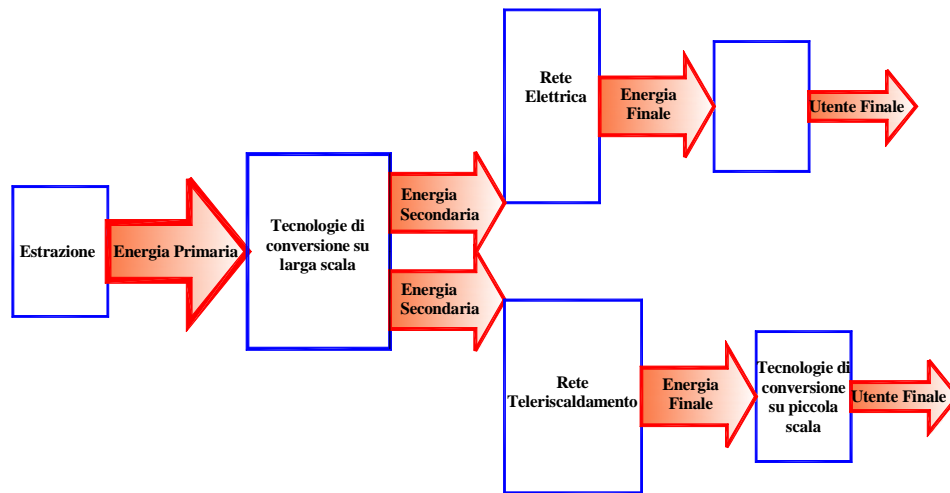


Figura 3: Rappresentazione aggregata di un sistema energetico di riferimento (RES)

Il RES, così come riportato in Fig. 4, è composto dai seguenti elementi:

- **fonti ed offerta di energia primaria**: all'estrema sinistra del diagramma compaiono i flussi energetici in ingresso;
- **processi**: procedendo da sinistra a destra del diagramma è possibile leggere i processi, dove per processo si intende una qualsiasi trasformazione che trasforma la fonte primaria in fonte secondaria successivamente trattabile dalla tecnologia di conversione;
- **tecnologie di conversione-sistemi di distribuzione**: ai processi possono fare seguito le tecnologie di conversione che trasformano una o più fonti (primarie o secondarie) in flussi energetici di più agevole fruizione, quali ad esempio energia elettrica e/o calore;
- **tecnologie di uso finale-domanda di energia utile**: il diagramma termina riportando la domanda di energia dei dispositivi di uso finale per settore di utilizzo.

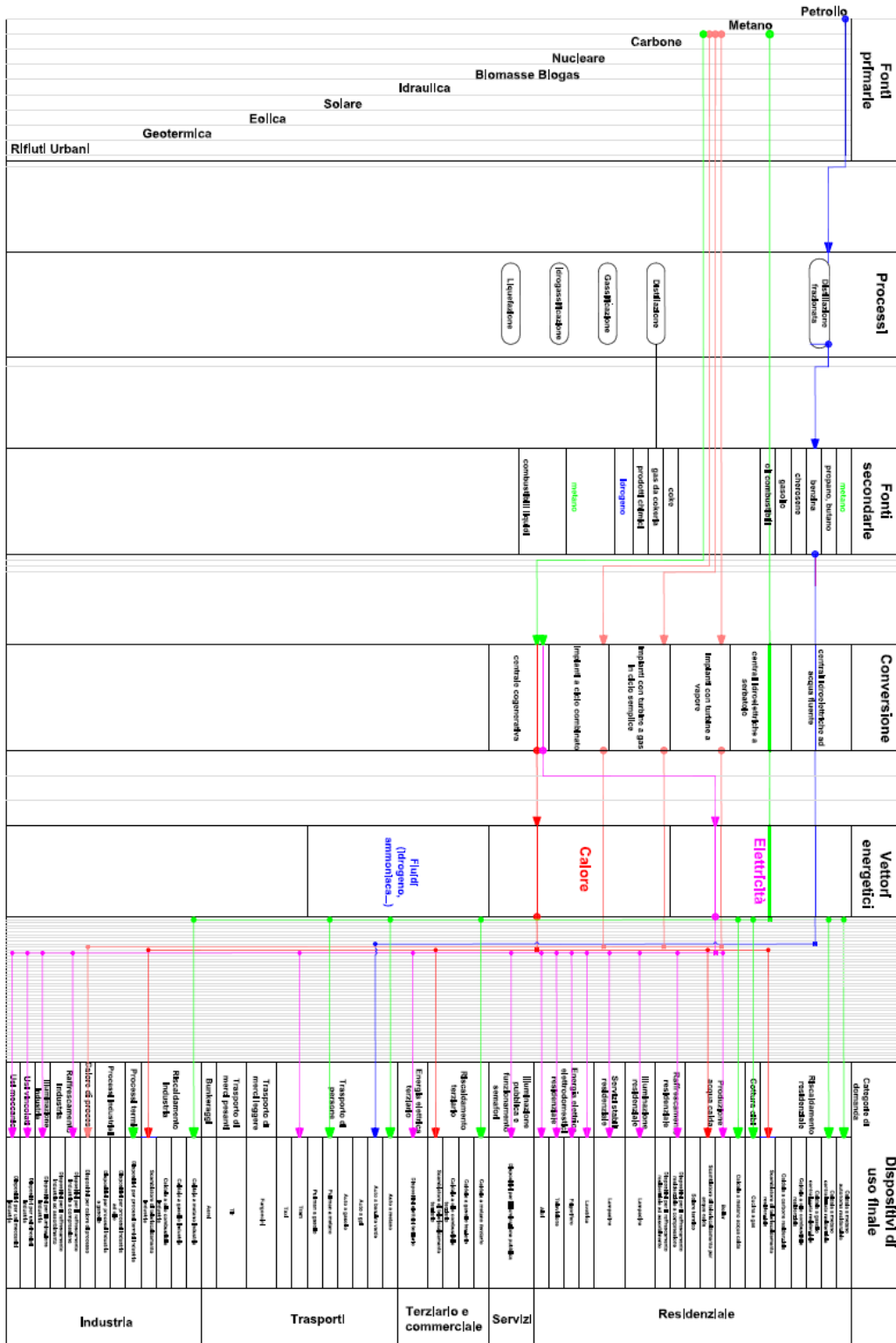


Figura 4: Diagramma energetico

Nella costruzione del RES devono essere effettuate alcune scelte in merito ai confini della rappresentazione, alla disaggregazione della domanda e alla descrizione tecnico-economica delle tecnologie, prendendo in considerazione gli obiettivi a cui si vuole giungere, lo strumento di analisi che si intende utilizzare ed i dati di cui si dispone.

L'elaborazione del RES è il punto di partenza per lo sviluppo e l'analisi del modello del sistema energetico-tecnologico reale, il modello infatti traduce in termini matematici i flussi energetici ed i costi economici e ambientali del sistema e permette l'individuazione dei componenti deboli sui quali è opportuno intervenire.

A seconda dello scopo che ci si prefigge e del metodo che si intende adottare i modelli possono essere classificati in:

- **modelli di ottimizzazione**, seguono l'evoluzione temporale di un sistema energetico a partire dalla sua configurazione iniziale e ricercano la configurazione di ottimo fissando vincoli specifici (minimizzazione dei costi, dei consumi, delle emissioni, ecc.);
- **modelli di simulazione**, effettuano l'analisi del sistema energetico utilizzando dei valori che vengono variati per eseguire una analisi parametrica;
- **modelli dinamici**, dinamici consentono di rappresentare i fenomeni che considerano la variabile temporale.

Segue una breve descrizione dei modelli elencati.

### MODELLI DI OTTIMIZZAZIONE

Esistono vari modelli di ottimizzazione di sistema quasi tutti basati su tecniche di ottimizzazione matematica che si distinguono per:

- l'estensione geografica del sistema descritto (regionale/nazionale o continentale);
- il tipo di approccio (bottom-up, top-down, equilibrio parziale, equilibrio generale);
- il grado di caratterizzazione economica (modelli tecnico-economici, modelli macroeconomici).

La distinzione più importante riguarda il tipo di approccio seguito in base al quale si dividono i modelli in due grandi categorie: modelli macroeconomici "top-down" (dall'alto verso il basso) e modelli ingegneristici "bottom-up" (dal basso verso l'alto) o tecnico-economici. Entrambi considerano contemporaneamente aspetti tecnico ingegneristici ed economici attribuendo però pesi diversi agli uni ed agli altri.

### MODELLI BOTTOM-UP

Nei modelli bottom-up le condizioni al contorno macroeconomico sono mantenute esogene, perciò non permettono di conoscere gli effetti retroattivi delle scelte tecnologiche sul quadro economico.

I modelli "bottom-up" scompongono il sistema energetico nelle tecnologie di produzione e in quelle di domanda, considerano i costi delle varie tecnologie e consentono di scegliere tra più tecnologie. Questi modelli usano dati quantitativi per descrivere le tecnologie utilizzate per rendere disponibili le risorse e

convertirle nei servizi desiderati e prevedono tecnologie alternative che possono provvedere ai medesimi servizi consumando, però, più o meno energia.

Il contorno socio-economico dei modelli "bottom-up" è fisso, cioè la variazione della popolazione e delle variabili economiche sono inserite dall'analista e sono perciò variabili indipendenti dell'analisi: tali variabili, però, influenzano la domanda di energia del sistema.

### MODELLI TOP-DOWN

I modelli top-down sono modelli di tipo econometrico. Hanno lo scopo di catturare l'impatto macroeconomico di grandi componenti economiche quali gli investimenti, distribuzione dei redditi e dei consumi ecc. Questi modelli tendono ad evitare i dettagli tecnologici descrivendo un mondo con comportamenti, istituzioni e tecnologie fisse. Usando informazioni storiche sulle interrelazioni tra sistema energetico e sistema economico cercano di prevedere l'evoluzione del mercato.

Possiamo riconoscere in questa famiglia i modelli di tipo:

- **modelli input-output** che forniscono una descrizione dettagliata dal lato della produzione ma trascurano i processi di sostituzione, di innovazione tecnologica e il carattere internazionale dei problemi;
- **modelli macroeconomici** per analisi puramente economiche. Scarsamente adatti ad analisi di lungo periodo tuttavia sono stati modificati per includere problematiche ambientali aggiungendo la variabile energia nel costo delle imprese;
- **modelli di equilibrio generale** particolarmente adatti a simulazioni di lungo periodo. Nei modelli di equilibrio generale applicato o computabile (AGE o CGE) si ipotizzano ottimizzazioni vincolate da parte degli agenti;
- **modelli di equilibrio parziale** caratterizzati da un'accurata rappresentazione del settore energetico e dal mantenere esogeno il quadro macroeconomico.

### SISTEMI DINAMICI

I sistemi dinamici per la modellizzazione energetica, si basano sull'approccio system dynamics, sviluppato negli anni '60 presso il MIT (Massachusetts Institute of Technology) ed avente come ideatore Jay Forrester.

Questa metodologia si basa su equazioni differenziali e consente di modellare i fenomeni che considerano la variabile temporale. Suddividendo un generico sistema energetico in un certo numero di settori, individuati dall'analista tramite il RES (Sistema Energetico di Riferimento), il modello consente di ricavare i consumi energetici per settore e per fonte, nonché le emissioni di CO<sub>2</sub> al variare del livello di attività e dell'intensità energetica di settore.

In base alla teoria su cui si fonda la dinamica dei sistemi, per esprimere qualsiasi relazione in un sistema occorrono solo due tipi di variabili: *livelli* e *indici di variazione* (o velocità di scambio).

I *livelli* sono le variabili costituenti le quantità delle grandezze considerate che caratterizzano il sistema in ogni istante (es: popolazione, inquinamento, risorse naturali, capitale industriale e terra coltivabile). Il comportamento del modello dipende dalle variazioni nel tempo delle quantità presenti in ciascun livello.

Gli *indici di variazione* sono le variabili che dipendono da interventi esterni o dal funzionamento del sistema, che controllano i flussi entranti o uscenti dai livelli e in tal modo ne modificano l'ammontare (es: indice di natalità e di mortalità, tasso di generazione di inquinamento, tasso di investimento di capitale industriale). Gli indici che agiscono su un livello hanno in genere espressione complessa perché sintetizzano tutti i fattori (biologici, politici, sociali, economici, od altro genere) che intervengono a modificare quel certo livello. Le componenti di un indice, dette *variabili secondarie* sono descritte separatamente. Un esempio sono i coefficienti d'influenza sulla durata presunta della vita; tali legami stanno solo a indicare che esiste una relazione di tipo casuale tra due elementi, senza precisarne l'esatta dimensione quantitativa.

Quando una sequenza di influenza viene riportata al punto di partenza a formare un circuito chiuso si genera un anello di retroazione. La modificazione in un elemento di un anello di retroazione negativo produce degli eventi, lungo l'anello, che esercitano sull'elemento di partenza una azione antagonista rispetto alla modificazione che l'ha originata. All'interno degli anelli di retroazione positivi una modificazione di un elemento ripercuotendosi attraverso i vari elementi dell'anello esercita sull'elemento di partenza una azione concorde con la modificazione originaria, che ne risulta così rafforzata. Normalmente, ogni elemento di un sistema sarà influenzato simultaneamente da più anelli, positivi e negativi. Gli anelli di retroazione differiscono non solo per il segno, ma anche per i ritardi con i quali le risposte si propagano lungo di essi.

### MARKAL

MARKAL (MARKet ALlocation) è un generatore di modelli che, con i dati forniti dall'analista, consente di seguire l'evoluzione di un sistema energetico nazionale, regionale o locale.

MARKAL è stato creato da un gruppo internazionale e sviluppato nel corso di vent'anni all'interno del Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP) dell'International Energy Agency (IEA).

Il modello è composto dalle tecnologie che trasformano e consumano energia e quelle che controllano le emissioni; ognuna è descritta quantitativamente attraverso le sue caratteristiche fisiche ed economiche presenti e previste. MARKAL sceglie le tecnologie e indica l'energia necessaria per il soddisfacimento delle esigenze di ciascun settore di domanda, (la cui evoluzione nel periodo considerato costituisce la principale variabile esogena) in modo che sia minimizzato il costo totale del sistema e siano rispettati gli standard ambientali richiesti e stabiliti dall'operatore.

Si impone che la domanda finale di energia raggiunga l'equilibrio con l'offerta su base annua. Tuttavia la richiesta per ogni tipo di servizio energetico considera le fluttuazioni dei diagrammi di carico, i relativi fattori di picco e la disponibilità degli impianti. Nelle valutazioni economiche si tiene conto di: tasso di sconto rispetto ad un anno di riferimento che permette di considerare il diverso valore di costi ed investimenti avvenuti in tempi diversi nelle valutazioni a moneta costante; i costi di investimento ed i costi di esercizio; tutti i costi vengono annualizzati e contabilizzati all'inizio di ogni anno e non vengono considerati i costi di capitale di impianti esistenti all'inizio del periodo in esame.

Dal punto di vista matematico il modello utilizza la programmazione lineare: considerando la domanda di uso finale, le tecnologie di conversione e quelle di processo ed i dispositivi di uso finale ed i flussi energetici e materiali disponibili nel sistema segnala l'insieme delle tecnologie e delle fonti che soddisfano le domande di uso finale che minimizza la funzione obiettivo scelta. La funzione obiettivo può essere il costo scontato del sistema, l'entità delle emissioni di CO<sub>2</sub> o il consumo di combustibili fossili, etc. La programmazione lineare consente di porre una serie di limitazioni al sistema attraverso variabili e coefficienti definiti come input.

La rappresentazione matematica di un problema di programmazione lineare è la seguente:

$$Z = \sum_i c_i x_i$$

$$\sum_j a_{ij} x_j \leq b_j$$

$$x_j \geq 0$$

dove

Z rappresenta la funzione obiettivo

$x_j$  rappresenta la variabile  $i$ -esima del modello (variabile di decisione)

$\sum_j a_{ij} x_j \leq b_j$  rappresenta una disequazione di vincolo di tipo lineare.

### TIMES

Il TIMES è l'evoluzione del MARKAL, si tratta quindi di un generatore di modelli "bottom-up" di equilibrio economico parziale che descrive un sistema energetico e ne analizza l'evoluzione nel tempo ricercando l'allocatione ottimale delle risorse in base alla domanda e ad altre variabili esogene.

TIMES, rispetto a MARKAL, consente una più dettagliata descrizione temporale dei flussi di energia e di materia (prima limitata da un numero fisso di periodi temporali) e permette quindi una rappresentazione dell'andamento della domanda più rispondente alla realtà.

TIMES consente una maggiore flessibilità nella definizione degli intervalli temporali, una migliorata rappresentazione delle tecnologie e delle infrastrutture; una migliore descrizione dei flussi in termini temporali (da annuale ad oraria); la trattazione di problemi multi regionali e delle interrelazioni tra sistema energetico e macroeconomico.

### 3 METODI DI ANALISI

Il modello utilizzato in questo studio ricade nella categoria dei modelli tecnologici del tipo bottom-up.

La spinta allo studio di metodologie atte a spiegare le trasformazioni dei flussi energetici viene dalla necessità di razionalizzare lo sfruttamento delle risorse energetiche mondiali.

Il lavoro svolto ha consentito di indagare i seguenti metodi di analisi:

- Analisi ENergetica ( $WTW_{EN}$ )
- Analisi Ambientale ( $WTW_{AMB}$ )
- Analisi EXergetica

A prescindere dal metodo che si intende applicare l'analisi di un sistema territoriale include una serie di fasi correlate tra di loro.

Il diagramma a blocchi riportato di seguito rende conto visivamente della sequenza delle fasi.



**Figura 5: Fasi principali di una analisi di sistema territoriale**

Il primo passo consiste nell'individuare i confini dell'area geografica da analizzare, quindi devono essere raccolte tutte le informazioni sul territorio che permettono di elaborare un diagramma energetico (RES, vedi sopra) in cui sono identificati tutti gli elementi che costituiscono il sistema, flussi di materia ed energia coinvolti.

La fase successiva di analisi richiede di quantificare i flussi di energia e materia (costruzione del modello del sistema energetico reale) che elaborati restituiscono i parametri di valutazione necessari all'individuazione dei componenti critici del sistema.

## **3.1 L'ANALISI ENERGETICA E AMBIENTALE**

### **3.1.1 CARATTERISTICHE PRINCIPALI**

L'analisi WTW rappresenta una metodologia di valutazione energetico che si è sviluppata principalmente per analisi nel settore dei trasporti per uso privato e costituisce un caso particolare della metodologia Life Cycle Assessment (LCA) che analizza l'utilizzo di materiali ed energia per quantificare le emissioni e l'impatto ambientale secondo una procedura cradle-to-grave per qualsiasi aspetto del ciclo di un prodotto, una procedura o un servizio.

Tale analisi energetica è stata in alcuni casi estesa a considerazioni di carattere ambientale.

L'analisi WTW energetica-ambientale permette di assegnare un "valore" energetico ed ambientale ad ogni percorso di trasformazione di una fonte energetica primaria in un combustibile finito, reso disponibile alla tecnologia, ed alla sua trasformazione in un servizio finale reso all'utente.

Un percorso completo è una combinazione e una successione di processi. Ai processi individuali costituenti i passaggi di un percorso totale utile alla produzione di un combustibile si attribuisce un fattore quantitativo atto a valutare i flussi di energia e l'impatto ambientale richiesti alla realizzazione del processo stesso.

In questo modo se da un lato è possibile risalire all'energia primaria necessaria al sostentamento del sistema energetico e che alimenta i processi che si verificano al suo interno, dall'altro è possibile calcolare le emissioni prodotte a causa del funzionamento del sistema.

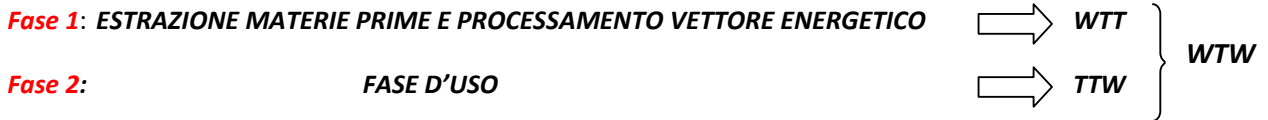
Allo scopo di sviluppare l'analisi energetica ed ambientale si è ritenuto conveniente prendere in considerazione alcuni indicatori specifici. Un indicatore permette di esprimere sinteticamente un insieme di informazioni.

L'indice *WTT* (Well-to-Tank) tiene conto dell'energia utilizzata per estrarre, lavorare e trasportare il combustibile sino al parco combustibili a disposizione diretta della tecnologia atta a produrre il servizio utile finale richiesto.

Un altro indicatore utile è il cosiddetto *TTW* (Tank-to-Wheel) che caratterizza le modalità con cui il combustibile è impiegato in una specifica tecnologia per fornire un servizio utile.

Mettendo insieme i due diversi contributi si ottiene un indicatore composto, indicato nella letteratura come "Well-to-Wheel" (*WTW*) che permette di paragonare le diverse modalità di fornire fonti primarie di energia e le tecnologie per utilizzarle.

Schematicamente le fasi della sequenza *WTW* sono:



Nel presente documento, i parametri  $WTT_{EN}$  adottati fanno riferimento al lavoro di EUCAR/JRC/CONCAWE (European Council for Automotive R&D/ Joint Research Center-European Commission/ Conservation of Clean Air and Water in Europe). Mentre quelli  $TTW_{EN}$  sono stati calcolati attraverso una procedura basata sulla Teoria del Costo EXergetico della quale parleremo più avanti.

I parametri  $WTT_{AMB}$  assunti nei calcoli si riferiscono al lavoro di EUCAR/JRC/CONCAWE, per i parametri  $TTW_{AMB}$  sono stati considerati i fattori di emissione caratteristici degli impianti

Gli indicatori principali considerati in questo lavoro sono:

- Energia primaria totale spesa ( $MJ_{xt}$ ) per contenuto energetico unitario dell'output del particolare processo ( $MJ_f$ ):  $WTT_{EN}$  ( $MJ_{xt}/MJ_f$ )
- Energia totale spesa (MJ) per prodotto energetico unitario (MJ):  $TTW_{EN}$  (MJ/MJ)
- $CO_2$  emessa (g) nel processo di produzione di una unità di combustibile finito ( $MJ_f$ ):  $WTT_{AMB}$  ( $g_{CO_2}/MJ_f$ )
- $CO_2$  emessa (g) nella fase di utilizzo di una unità di combustibile (MJ):  $TTW_{AMB}$  ( $g_{CO_2}/MJ$ )

Nel suo complesso l'indicatore  $WTW$  valuta i costi di un servizio energetico:

- $WTT_{EN}$  (MJ/MJ)
- $WTT_{AMB}$  ( $g_{CO_2}/MJ$ )

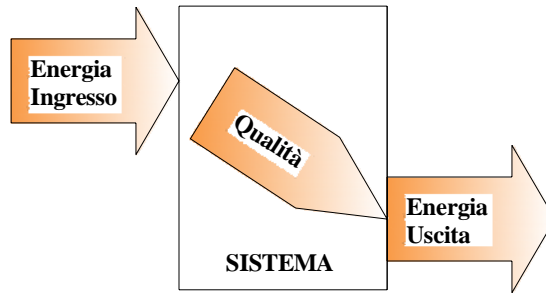
## 3.2 L'ANALISI EXERGETICA

### 3.2.1 CONCETTI E DEFINIZIONI

Durante i processi che trasformano un flusso di risorsa primaria (materia o energia) in un flusso di energia (elettrica, termica o associata ad un flusso di materia) utilizzabile dall'utente finale, la materia subisce molteplici trasformazioni, ciascuna delle quali comporta un inevitabile deterioramento qualitativo del contenuto energetico che la risorsa originariamente possiede

Il Primo Principio della Termodinamica afferma che *in ogni processo l'energia si conserva*, fornisce dunque informazioni di carattere quantitativo ma nulla dice circa le qualità intrinseche di una forma di energia rispetto un'altra.

Il Secondo Principio della termodinamica aggiunge un vincolo, cioè limita la convertibilità di una forma di energia in un'altra, e quindi consente di attribuire una qualità alle diverse forme di energia



**Figura 6: Deterioramento qualitativo del contenuto energetico**

Proprio in riferimento al concetto di qualità dell'energia si introduce il concetto di exergia [2].

L'exergia di un flusso energetico (termico, elettrico, associato a un flusso di massa) è la massima quantità di lavoro ottenibile da una trasformazione reversibile del flusso energetico fino a portarlo in equilibrio con l'ambiente.

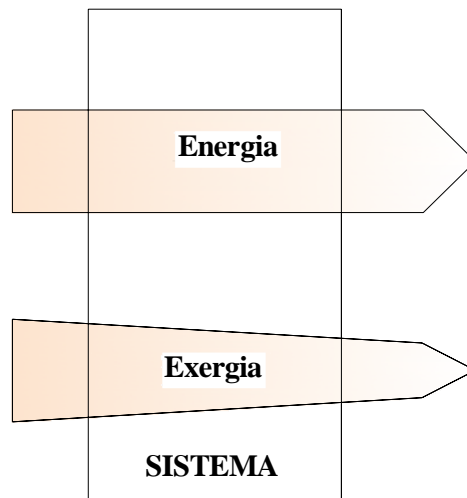
Solo una parte di energia di un flusso energetico può essere spesa per produrre lavoro utile, l'exergia rende conto di quella quota di energia convertibile in lavoro utile.

Ad un flusso di massa è associata una certa quantità di energia: quanto questa quantità di energia sia utile a fornire lavoro dipende dallo stato termodinamico della massa in questione.

Un flusso di energia termica, a seconda della temperatura alla quale il flusso è disponibile, può essere più o meno utile a fornire lavoro

L'exergia posseduta da un certo sistema è definita come il "massimo lavoro estraibile dai flussi di energia che il sistema scambia con l'ambiente circostante sino a portarsi in equilibrio con esso".

Mentre l'energia si conserva sempre, non si può né distruggere, né creare, l'exergia si conserva solamente in un processo reversibile; tutti i processi reali però sono di tipo irreversibile, per cui alla fine di ogni processo l'energia è destinata a degradarsi in termini qualitativi (capacità di produrre lavoro). In un sistema antropico in condizioni stazionarie l'energia in ingresso fluisce ed esce quantitativamente invariata, mentre l'exergia si consuma all'interno del sistema arrivando, in alcuni sistemi, anche ad annullarsi. Tale diminuzione di exergia quantifica la degradazione qualitativa dell'energia a cui è associata.



**Figura 7: Exergia consumata all'interno del sistema**

Il compito di un sistema energetico è quello di trasformare le risorse energetiche entranti in prodotti energetici utilizzabili. L'obiettivo di una analisi di un sistema energetico è quello di verificare in che modo il sistema energetico in esame svolge questo compito. Il fine dell'analisi è verificare l'efficienza del processo di trasformazione energetica. L'analisi exergetica si serve della grandezza 'exergia' al posto della grandezza 'energia' per stabilire l'efficienza di una operazione di trasformazione energetica che avviene nei componenti tecnologici di un sistema energetico.

L'analisi exergetica permette di analizzare le prestazioni di un sistema dal punto di vista di un utilizzo razionale delle risorse consumate e viene utilizzata per identificare i componenti tecnologici in cui si sprecano le risorse energetiche del sistema, il tipo e l'entità di questo spreco, ed è quindi utile per sviluppare strategie per un miglior utilizzo delle risorse. La distruzione di exergia è legata all'efficienza di funzionamento del sistema.

In sintesi serve a:

- quantificare come l'energia si degrada attraverso la evoluzione della distruzione della grandezza exergia;
- confrontare diversi processi attraverso un ulteriore indice chiamato efficienza exergetica.

Questa analisi è applicabile sia per i singoli componenti che per il sistema globale.

Come già detto, gli elementi fondamentali che occorre identificare per sviluppare l'analisi di un sistema energetico sono la delimitazione dei confini del sistema stesso, l'identificazione dei componenti tecnologici e delle correlazioni che intercorrono tra di loro, espresse come flussi di energia.

Al fine di svolgere l'analisi exergetica è stato costruito un modello topologico, del tipo cosiddetto *a rete*, dove i componenti tecnologici sono rappresentati dai nodi di un grafo ed i flussi dai rami.

Il diagramma di flusso dell'exergia per un generico processo viene identificato come "black-box" nel quale confluiscono e si diramano i vari flussi exergetici.

In ingresso abbiamo i flussi *risorsa* ( $F$ ) mentre in uscita: *prodotto utile* ( $P$ ); *flusso exergetico non utilizzato* ( $L$ ), si tratta di exergia persa sottoforma di exergia residua; *flusso exergetico distrutto* ( $D$ ) cioè exergia distrutta all'interno del sistema. La somma delle irreversibilità esterne e di quelle interne definisce la grandezza ( $I$ ) come irreversibilità totale del sistema.

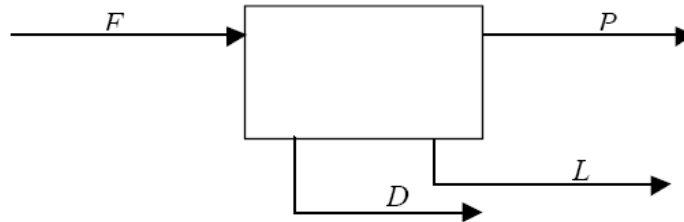


Figura 8: Diagramma di flusso dell'exergia

In condizioni di regime stazionario il bilancio di una qualsiasi grandezza estensiva associata ai flussi si scrive:

$$F = P + D + L = P + I \quad (1)$$

Una volta che sia stata stabilita questa definizione per ogni componente l'efficienza è univocamente stabilita dalla relazione:

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{P}{F} = 1 - \frac{I}{F} \quad (2)$$

La classificazione convenzionale di cui si è detto si traduce nel definire come prodotti, combustibili e perdite opportune aggregazioni dei flussi entranti o uscenti dal sistema considerato, alle quali si associa la somma algebrica dei valori dei flussi delle grandezze estensive corrispondenti.

Questa definizione convenzionale può essere riprodotta ed estesa al livello dei singoli componenti o sottosistemi.

L'equazione di bilancio del flusso exergetico applicata ad un sistema con  $m$  componenti tecnologici collegati tra di loro e con l'ambiente esterno da  $n$  flussi si scrive con notazione matriciale nella forma:

$$[\mathbf{A}] \cdot \{\Psi\} = \{\Psi_I\} \quad (3)$$

Dove  $\mathbf{A}$  è la matrice di incidenza,  $\{\Psi\}$  è il vettore dei flussi di exergia di ogni collegamento tra i componenti e  $\{\Psi_I\}$  è il vettore dei flussi di exergia dissipati in ogni componente per effetto delle irreversibilità; in pratica  $\{\Psi_I\}$  rappresenta il vettore che indica tutta l'exergia persa.

Qui di seguito si riportano alcuni principali esempi di flussi di exergia.

Exergia di un flusso di calore:

$$\psi_q = \Phi \left( 1 - \frac{T_0}{T_q} \right) \quad (4)$$

dove  $T_q$  è la temperatura della sorgente e  $T_0$  la temperatura dell'ambiente di riferimento.

Exergia di un flusso di lavoro meccanico:

Nel caso di un asse che ruota con un momento torcente  $\tau$  e con una velocità angolare  $\omega$ , il flusso di lavoro corrispondente sarà  $\dot{W} = \omega \tau$ . Il flusso di exergia corrispondente è dato da:

$$\Psi_w = \omega \tau \quad (5)$$

ed è identico al flusso di lavoro.

Exergia di un flusso di materia:

$$\Psi_i = G_{m,i} b_i = G_{m,i} \cdot (h_i - T_0 s_i) \quad (6)$$

L'exergia di un flusso prodotto da una macchina funzionante secondo un ciclo inverso che ha come obiettivo la produzione di freddo si può calcolare utilizzando l'equazione

$$L + T_0 \cdot \Delta s_{irr} = \sum_{i=1}^N G_{m,i} \cdot [(h_{ie} - h_{iu}) - T_0 \cdot (s_{ie} - s_{iu})] + \Phi_1 \cdot \left( 1 - \frac{T_0}{T_1} \right) + \dots + \Phi_k \cdot \left( 1 - \frac{T_0}{T_k} \right) \quad (7)$$

Ottenuta sottraendo all'equazione del Primo Principio dell'energia per i sistemi aperti

$$\sum_{i=1}^N G_{m,i} \cdot (h_{iu} - h_{ie}) = \Phi_0 + \Phi_1 + \dots + \Phi_k - L \quad (8)$$

l'equazione di bilancio dei flussi di entropia moltiplicata per  $T_0$

$$\sum_{i=1}^N G_{m,i} \cdot T_0 \cdot (s_{iu} - s_{ie}) = \Phi_0 + \Phi_1 \cdot \frac{T_0}{T_1} + \dots + \Phi_k \cdot \frac{T_0}{T_k} + T_0 \cdot \Delta s_{irr} \quad (9)$$

Dopo aver calcolato il vettore dei flussi di exergia attraverso l'equazione matriciale è possibile calcolare, per ogni componente del sistema energetico, la distruzione di exergia per irreversibilità. Per cui l'analisi exergetica viene eseguita per tutti i componenti e per il sistema nel suo complesso.

L'Analisi Exergetica ha permesso di calcolare i seguenti indicatori: l'efficienza exergetica totale del sistema ( $\eta_{ex,tot}$ ), l'efficienza exergetica ( $\eta_{ex,i}$ ) e l'exergia distrutta in ogni componente tecnologico ( $\Psi_{I,i}$ ) ed il difetto di efficienza ( $\delta_i$ ) che indica la perdita relativa di exergia nei diversi componenti del sistema.

$$\eta_{ex,tot} = 1 - \frac{\Psi_{I,tot}}{\Psi_{F,tot}} \quad (10)$$

$$\eta_{ex,i} = \frac{\Psi_{L,i}}{\Psi_{F,i}} \quad (11)$$

$$\delta_i = \frac{\Psi_{L,i}}{\Psi_{F,tot}} \quad (12)$$

L'Analisi Exergetica è stata utilizzata per identificare i componenti in cui si sprecono le risorse energetiche del sistema, il tipo e l'entità di tale spreco ed è quindi utile per sviluppare strategie per un miglior utilizzo delle risorse [3].

### NOVITÀ SIGNIFICATIVE ALLA METODOLOGIA

Le analisi WTW ed EXergetica si intersecano nel punto in cui per assegnare il parametro  $TTW_{EN}$  ai flussi in uscita di un componente multi-prodotto si applica con le opportune modifiche *La Teoria del Costo Exergetico*. Questo ha permesso di formalizzare una procedura rigorosa per il calcolo dell'indicatore  $TTW_{EN}$ .

### BREVI NOTE SULLA TEORIA DEL COSTO EXERGETICO

La Teoria del costo exergetico rappresenta una procedura di assegnazione dei costi dei flussi energetici del sistema nell'ambito dell'Analisi Termoeconomica. L'Analisi Termoeconomica è una disciplina che ha l'obiettivo di attribuire un costo ad ogni flusso di sistema per valutare le prestazioni del sistema stesso. Lo scopo dell'Analisi Termoeconomica è studiare il funzionamento di sistemi energetici al fine di individuare e correggere eventuali difetti sia in termini termodinamici che economici.

La Teoria del Costo Exergetico è uno dei più importanti metodi di costing della Analisi Termoeconomica ed ha come obiettivo l'assegnazione dei costi a tutti i flussi energetici del sistema e non solo ai prodotti finali.

L'Analisi Termoeconomica segue il processo di formazione del costo attraverso la catena di trasformazioni energetiche che collega le risorse esterne del sistema ai prodotti del sistema individuando i punti critici sui quali è possibile intervenire conoscendo il costo dell'intervento e l'ammontare del costo sul prodotto finale.

Il concetto di costo è inteso in senso lato come il consumo di risorse di tipo energetico o monetario, effettuato per ottenere un certo prodotto. Per effettuare un'allocazione di costo che tenga conto della quantità e anche della qualità delle risorse energetiche utilizzate viene utilizzata la grandezza exergia.

La Teoria del Costo Exergetico sviluppa il concetto di *costo exergetico* di un flusso di exergia; esso è inteso come:

la quantità di exergia che deve essere spesa nel sistema, in termini di contenuto energetico delle risorse primarie, per ottenere il determinato flusso di exergia considerato.

Il concetto di costo exergetico consente di conoscere la quantità di risorse consumate per la produzione di un flusso ma per confrontare diversi processi di produzione è più utile utilizzare il concetto di costo exergetico unitario del flusso considerato, che rappresenta il costo exergetico del flusso per unità di exergia del flusso stesso.

Il calcolo del costo exergetico in sistemi a più componenti prevede di utilizzare le equazioni di bilancio di costo in ogni componente ed un certo numero di equazioni ausiliarie definite secondo particolari regole imposte generalmente da considerazioni di tipo economico.

L'equazione di bilancio del costo exergetico per il sistema assume la forma:

$$[A] \cdot \{\Psi^*\} = 0 \quad (13)$$

Dove  $[A]$  è la matrice di incidenza che rappresenta la struttura fisica del sistema al livello di aggregazione considerato,  $\{\Psi^*\}$  il vettore del costo exergetico dei flussi.

Essendo il numero dei flussi maggiore dei componenti del sistema è necessario utilizzare oltre alle equazioni di bilancio di costo in ogni componente anche una serie di equazioni ausiliarie derivanti da una serie di proposizioni.

Le equazioni ausiliarie sono di tipo lineare e sono scritte nella forma matriciale:

$$[\alpha] \cdot \{\Psi^*\} = \{\omega\} \quad (14)$$

dove  $\{\omega\}$  è il vettore delle valutazioni esterne (termini noti).

L'insieme delle equazioni fondamentali e di quelle ausiliarie porta ad un sistema che ha struttura:

$$\begin{bmatrix} A \\ \alpha \end{bmatrix} \cdot \{\Psi^*\} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \end{bmatrix} \quad (15)$$

e che può essere risolto nelle incognite costi exergetici di tutti i flussi [3].

### APPLICAZIONE DEL METODO IN SISTEMI A PIÙ PRODOTTI

Ragionando in termini di costo energetico la procedura appena descritta verrà applicata sostituendo al concetto di costo exergetico il concetto di costo energetico per passare al costo energetico unitario che interpreteremo come il parametro  $TTW_{EN}$  che stiamo cercando.

Le equazioni in forma matriciale assumono la forma:

$$\begin{bmatrix} A \\ \alpha \end{bmatrix} \cdot \{\phi^*\} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \end{bmatrix} \quad (16)$$

Che risolta nelle incognite costi energetici dei flussi permette di calcolare il costo energetico unitario espresso come:

$$\phi_u^* = \frac{\phi^*}{\phi} \quad (17)$$

e assunto uguale a  $TTW_{EN}$ :

$$\phi_u^* = TTW_{EN} \quad (18)$$

### NOTE SULL'ANALISI AMBIENTALE: PROPOSTA DI INDICI DI ATTRIBUZIONE DELLA CO<sub>2</sub> IN BASE AD UN FATTORE PESO CHE TIENE CONTO DELL'EXERGIA

Per i componenti che riversano verso l'esterno due o più prodotti energetici come per esempio il caso di un sistema di cogenerazione, lo studio ha proposto il calcolo del costo ambientale dei prodotti energetici attraverso degli indici di attribuzione della CO<sub>2</sub> in base ad un fattore peso che tiene conto dell'exergia.

Facendo riferimento al sistema seguente:

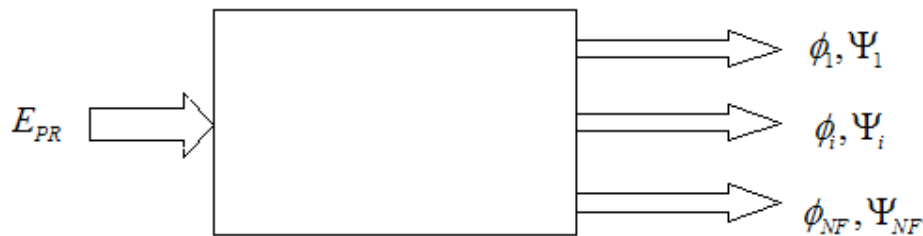


Figura 9: Sistema di riferimento

Per il flusso i-esimo è stato definito:

$\phi_i$  flusso di energia

$\Psi_i$  flusso di exergia

$$\eta_{EN_i} = \frac{\phi_i}{\phi_{TOTin}} = \frac{\phi_i}{E_{PR}} \text{ rendimento energetico} \quad (19)$$

$$\eta_{EX_i} = \frac{\Psi_i}{\Psi_{TOTin}} = \frac{\Psi_i}{E_{PR}} \text{ rendimento exergetico} \quad (20)$$

$$\eta_i^* = \frac{\Psi_i}{\phi_i} \text{ rendimento} \quad (21)$$

Si introduce un fattore peso che tiene conto sia del flusso utilizzato che della degradazione del flusso

$$Z_i = \frac{\phi_i F_{Qi}}{\sum_{j=1}^{NF} \phi_j F_{Qj}} \quad (22)$$

essendo

$$\sum_{i=1}^{NF} Z_i = 1 \quad (23)$$

Si definisce un coefficiente di degradazione del prodotto in uscita:

$$F_{Qi} = 1 - \frac{\eta_i^*}{\eta_{TOT}^*} = 1 - \frac{\eta_i^*}{\sum_{j=1}^{NF} \eta_j^*} \quad (24)$$

Ciascun prodotto del sistema avrà un costo ambientale, in termini di CO<sub>2</sub> emessa, pari al prodotto della CO<sub>2</sub> totale emessa dal componente per il fattore peso sopra definito:

$$m_{CO_2,i} = m_{CO_2,TOT} Z_i \quad (25)$$

## 4 CASE-STUDY: SCENARIO BASE

### 4.1 OGGETTO DELLO STUDIO: il quartiere Arquata

Un sistema territoriale può essere rappresentato attraverso un sistema “termodinamicamente aperto”, ossia in grado di scambiare con l’esterno materia ed energia.

Il sistema analizzato in questo lavoro è un quartiere del Comune di Torino (quartiere Arquata). Un sistema territoriale quindi, che scambia flussi di materia ed energia provenienti dall’ambiente esterno al quartiere.

Il Quartiere in esame è gestito dall’ATC (Agenzia Territoriale per la Casa) di Torino ed è sito in via Arquata di circa 87.000 mq, 650 unità abitative, e circa 2.500 tra abitanti e impiegati di ATC.

Già nel maggio 1998 il quartiere Arquata era stato indicato come area sulla quale sperimentare un intervento di riqualificazione secondo un piano nazionale chiamato “Contratti di quartiere”.

Il piano prevedeva:

- Interventi di riqualificazione delle abitazioni;
- Interventi di riqualificazione degli spazi pubblici.

Recentemente il quartiere Arquata è stato coinvolto in *Polycity*, un progetto promosso e finanziato dalla UE nell’ambito del programma Concerto, per la riqualificazione energetica e ambientale che vede partecipare tre grandi città europee: Torino, Barcellona e Stoccarda.

L’obiettivo principale di *Polycity* era stato il miglioramento delle prestazioni energetiche di grossi insediamenti urbani grazie all’uso ottimale dell’energia e delle fonti rinnovabili, a beneficio della qualità della vita degli abitanti.

Per rispondere alla domanda di energia elettrica e di energia termica del quartiere Arquata il progetto *Polycity* ha previsto la realizzazione di un sistema costituito da:

- Sistema di teleriscaldamento composto da una caldaia a condensazione e due caldaie a gas, il gruppo di tre caldaie è trattato come un’unica caldaia alimentata a gas e generante calore per il quartiere ad esclusione della palazzina uffici ATC servita direttamente dal co-generatore;
- Chiller a compressione alimentato elettricamente che produce energia termica – freddo per ATC;
- Impianto di co-generazione composto da un motore a combustione interna alimentato a gas naturale installato nei locali della palazzina uffici di ATC che produce energia elettrica e termica per l’edificio stesso;

- Chiller ad assorbimento accoppiato termicamente all'impianto di co-generazione, anch'esso posto nei locali della palazzina uffici. Il chiller eroga il freddo necessario alla climatizzazione degli uffici;
- Moduli fotovoltaici sulla facciata della palazzina uffici e sui tetti delle unità abitative per la produzione di energia elettrica. L'energia elettrica prodotta dai pannelli posti sugli edifici si somma a quella importata dalla rete al fine di soddisfare la domanda elettrica del quartiere mentre quella prodotta dai pannelli posti sulla palazzina ATC contribuisce ad aumentare l'energia elettrica esportata dal quartiere.

## 4.2 MODELLO DEL SISTEMA QUARTIERE

Il sistema quartiere è stato modellato suddividendolo in componenti tecnologiche. Queste componenti rappresentano le tecnologie che scambiano tra di loro flussi di energia e ricevono energia dall'ambiente esterno dove, successivamente, rivolgono i prodotti della propria elaborazione. Il modello descrive il comportamento in condizioni stazionarie.

L'analisi del sistema attraverso le diverse metodologie illustrate nella sezione precedente ha consentito di quantificare gli impatti energetici ed ambientali non solo del sistema nel suo complesso ma anche dei suoi componenti, così da poter valutare su quali può essere più opportuno intervenire per migliorare le prestazioni complessive.

Nell'ambito di questo studio il primo passo affrontato per attuare le analisi è stato quello di modellare il sistema Quartiere.

Il sistema è stato rappresentato nel modello attraverso i seguenti componenti:

**Componente 1, BOILER**, composto da una caldaia a condensazione di 978 kW<sub>th</sub> e due caldaie a gas di 2600 kW<sub>th</sub> ciascuno, visto come un'unica caldaia alimentata a gas naturale;

**Componente 2, CHILLER A COMPRESSIONE**, composto da chiller a compressione alimentato elettricamente;

**Componente 3, CHP+ABS CHILLER**, è composto dall'insieme impianto di cogenerazione accoppiato ad un chiller ad assorbimento alimentato a gas naturale;

**Componente 4, SISTEMA FOTOVOLTAICO**, è composto da tutti i moduli fotovoltaici.

Il secondo passaggio fondamentale nella costruzione del modello è la definizione dei flussi. In termini di flussi entranti si prendono in considerazione: il **gas naturale** che alimenta il gruppo di tre caldaie e il cogeneratore e l'**energia elettrica**, distinguendo tra quella importata e quella autoprodotta. In termini di flussi uscenti l'attenzione è stata posta ai **fabbisogni termici (calore e refrigerazione) ed elettrici**. E' importante sottolineare che l'edificio ATC viene direttamente servito dal cogeneratore sia da un punto di vista elettrico che da un punto di vista termico (caldo, freddo). Mentre gli edifici del quartiere, indicati nella Tabella 1 col termine "District", fanno fronte al proprio fabbisogno termico (caldo) attraverso la rete di

teleriscaldamento e soddisfano il proprio fabbisogno elettrico importando l'energia elettrica necessaria dalla rete.

La Tab.1 riporta i fabbisogni elettrici e termici e l'energia elettrica esportata, riferiti ad un anno, del quartiere e dell'edificio ATC, sintetizza quindi il sistema dal punto di vista della domanda.

	<b>Fabbisogni elettrici</b>	<b>Fabbisogni termici</b>
	MWh <sub>el</sub> /anno	MWh <sub>th</sub> /anno
<i>District</i>	1051+104=1155	2147+4100=6247
<i>ATC</i>	901	856
<i>Tot</i>	2056	7103
<i>Energia elettrica esportata</i>	3222+54=3276	

**Tabella 1: Fabbisogni elettrici e termici del quartiere ed energia elettrica esportata**

Sul lato dell'offerta, si distingue tra energia termica prodotta dalla caldaia e dal cogeneratore, energia elettrica autoprodotta dal cogeneratore e dai pannelli fotovoltaici ed energia elettrica importata:

<b>NATURAL GAS</b>			<b>ENERGIA ELETTRICA</b>		
<i>Energia elettrica autoprodotta (CHP)</i>	<i>Energia termica prodotta (boiler)</i>	<i>Energia termica prodotta (CHP)</i>	<i>Energia elettrica importata</i>	<i>Energia elettrica autoprodotta (ATC PV Systems)</i>	<i>Energia elettrica autoprodotta (District PV Systems)</i>
MWh <sub>el</sub> /anno	MWh <sub>th</sub> /anno	MWh <sub>th</sub> /anno	MWh <sub>el</sub> /anno	MWh <sub>el</sub> /anno	MWh <sub>el</sub> /anno
3222+901=4123	2147	4100+856=4956	1051	54	104

**Tabella 2: Energia elettrica e termica circolante nel quartiere**

Nelle Tab.1,2 sono stati evidenziati i percorsi dell'energia prodotta dai componenti tecnologici costituenti il sistema in esame, ad esempio il fabbisogno termico del quartiere è soddisfatto in parte dall'energia termica prodotta dal boiler (2147 MWh) ed in parte da quella eccedente i consumi della palazzina ATC e prodotta dal cogeneratore (4100 MWh).

I flussi energetici (potenze) espressi in kW e relativi al modello vengono riportati nella tabella 3.

Al flusso di tipo solare è assegnato un valore energetico pari al prodotto dell'irraggiamento solare per unità di superficie del sito in esame in un istante dell'anno per la superficie dei pannelli. L'analisi puntuale è giustificata dal comportamento del campo fotovoltaico che dipende dall'irraggiamento e quindi dal momento dell'anno in cui l'analisi viene eseguita.

La modellizzazione ha dato origine al diagramma di Fig.10 che descrive la configurazione impiantistica attuale del quartiere; questa rappresentazione permette di leggere le componenti tecnologiche ed i flussi risorsa e prodotto entranti ed uscenti da ognuna di esse.

<b>Componente</b>	<b>Fuel (kW)</b>	<b>Product (Kw)</b>
<b>1.(Boiler)</b>	$\phi_{1,NG} = 7722$	$\phi_{3,T\_C} = 6178$
<b>2.(Compressor chiller)</b>	$\phi_{2,ELE} = 100$	$\phi_{6,T\_F} = 476$
<b>3.(CHP+ABS chiller)</b>	$\phi_{3,NG} = 2513$	$\phi_{7,ELE} = 970$ $\phi_{8,T\_C} = 1166$ $\phi_{9,T\_F} = 234$
<b>4.(PV System)</b>	$\phi_{4,SOL} = 376$	$\phi_{10,ELE} = 60$

Tabella 3: Flussi energetici entranti ed uscenti per componente

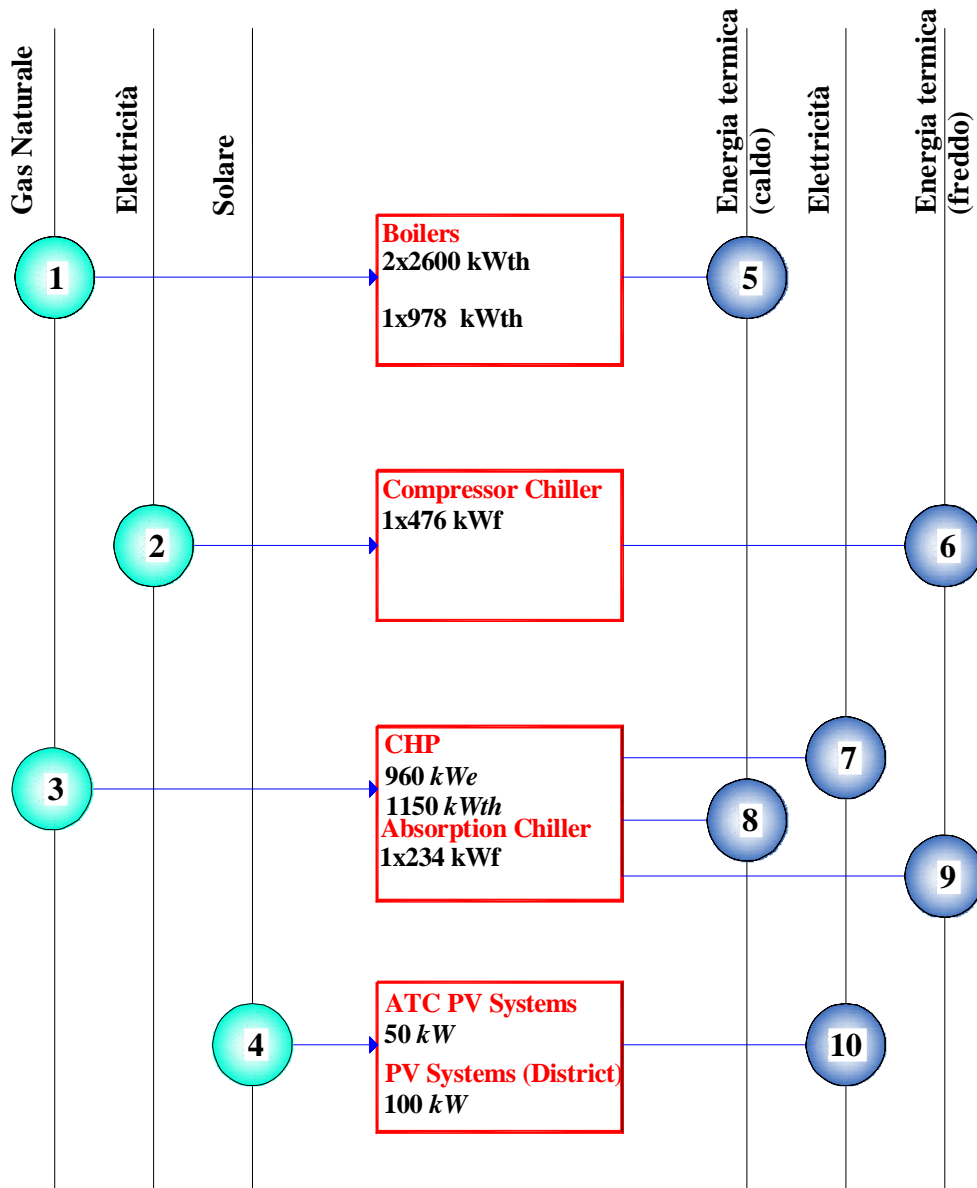


Figura 10: Modello scenario base

### 4.3 L'ANALISI ENERGETICA E AMBIENTALE

Come già detto, attraverso il metodo  $WTT_{EN}$  è possibile eseguire l'analisi dell'intero percorso produttivo di un combustibile partendo dall'estrazione delle materie prime e comprendendo le fasi di lavorazione ed utilizzo. Questo metodo permette un confronto omogeneo tra diversi combustibili perché attribuisce un valore in termini di risorse primarie tramite una procedura che ingloba via via in un combustibile tutti i costi energetici che concorrono alla sua formazione.

Nel caso dell'analisi  $WTT_{AMB}$  la grandezza utilizzata in questo CASE STUDY come indicatore ambientale è la  $CO_2$  emessa in ciascun processo formante il percorso.

La fonte utilizzata per il calcolo dei parametri  $WTT_{EN}$  e  $WTT_{AMB}$  è lo studio EUCAR/JRC/CONCAWE (European Council for Automotive R&D/ Joint Research Center-European Commission/ Conservation of Clean Air and Water in Europe) Il percorso assunto per il Gas Naturale (NG – Natural Gas) si compone dei processi riportati nella Tabella sotto:

	<b><math>WTT_{EN,NG}</math></b> ( $MWh_{xt}/MWh_f$ )	<b><math>WTT_{AMB,NG}</math></b> ( $t_{CO_2}/MWh_f$ )
<i>NG estrazione e processamento</i>	0.0242	0.0060
<i>NG long-distance pipeline: EU-mix quality, 1000 km</i>	0.0225	0.0041
<i>NG trunk distribution</i>	0.0100	0.000
<i>NG local distribution</i>	0.0000	0.000
<b>Totale</b>	<b>0.0567</b>	<b>0.010</b>

Tabella 4: Percorso WTT per la fornitura di Gas Naturale

Mentre quello assunto per l'Elettricità risulta dalla combinazione dei processi riportati in Tab.5:

	<b><math>WTT_{EN,ELE}</math></b> ( $MWh_{xt}/MWh_f$ )	<b><math>WTT_{AMB,ELE}</math></b> ( $t_{CO_2}/MWh_f$ )
<i>EU-mix power generation</i>	1.8400	0.435
<i>Electricity distribution (LV)</i>	0.0300	0.000
<b>Totale</b>	<b>1.8700</b>	<b>0.435</b>

Tabella 5: Percorso WTT per la produzione di Energia Elettrica

Il  $WTT_{EN,NG}$  totale è pari a  $0.0567 MWh_{xt}/MWh_f$ , ciò significa che per estrarre, lavorare e trasportare  $1 MWh_f$  di gas naturale finito in ingresso al sistema è stato necessario spendere  $0.0567 MWh_{xt}$  mentre, nelle stesse fasi di produzione, venivano emessi  $0.010 t$  di  $CO_2$  ogni  $MWh_f$ , espressi dal parametro  $WTT_{AMB,NG}$

Allo stesso modo la generazione e la distribuzione di  $1 MWh_f$  di energia elettrica richiede la spesa di  $1.87 MWh_{xt}$  e la liberazione di  $0.435 t$  di  $CO_2$  espressi rispettivamente da  $WTT_{EN,ELE}$  e  $WTT_{AMB,ELE}$ .

Per calcolare il parametro  $TTW_{EN}$  ai flussi in uscita dei componenti multi-prodotto è stata applicata con le opportune modifiche *La Teoria del Costo Exergetico*. Questo ha permesso di formalizzare una procedura rigorosa per il calcolo dell'indicatore  $TTW_{EN}$ .

La procedura proposta pone il parametro  $TTW_{EN}$  pari al costo energetico unitario, intendendo per costo energetico unitario il costo energetico del flusso per unità energetica di prodotto:

$$TTW_{EN} = \phi_u^* = \frac{\phi^*}{\phi_p} \quad (26)$$

I costi energetici dei flussi vengono calcolati risolvendo le equazioni:

$$\left[ \frac{A}{\alpha} \right] \{ \phi^* \} = \left[ \frac{0}{\omega} \right]$$

dove  $\phi^{*(10,1)}$  è il vettore incognito del costo energetico dei flussi,  $A^{(4,10)}$  è la seguente matrice di incidenza che rappresenta la struttura fisica del sistema (vedi fig. 10)

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

mentre  $\alpha^{(6,10)}$  è la matrice che definisce le 6 (10-4) equazioni ausiliarie necessarie perché il numero dei flussi (10) è maggiore dei componenti del sistema (4), in accordo con le seguenti proposizioni:

*Proposizione P1:* il costo energetico è una proprietà conservativa. Dalla proposizione 1 scaturiscono le equazioni di bilancio.

*Proposizione P2:* se un flusso entra in un componente provenendo dall'esterno del sistema e non da un altro componente, il suo costo energetico è posto uguale alla sua energia. La proposizione 2 serve a scrivere 4 delle 6 equazioni ausiliarie necessarie alla risoluzione del problema:

$$\begin{aligned} \phi_1^* &= \phi_1 \\ \phi_2^* &= \phi_2 \\ \phi_3^* &= \phi_3 \\ \phi_4^* &= \phi_4 \end{aligned} \quad (27)$$

Proposizione P3: se un sottosistema o componente ha un prodotto totale composto da diversi flussi-prodotto, tutti loro avranno lo stesso costo energetico unitario. Che tradotto significa:

$$\phi_{u7}^* = \phi_{u8}^* = \phi_{u9}^* \tag{28}$$

In definitiva avremo:

$$\alpha = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \phi_8 & -\phi_7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \phi_9 & -\phi_8 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$\omega^{(1,10)}$  rappresenta il vettore dei termini noti:

$$\omega = \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Risolviendo le equazioni si calcolano i costi energetici ed i costi energetici unitari dei flussi:

<b>Componente</b>	<b>Fuel (kW)</b>	$\phi_i^*$	$\phi_{u,i}^*$	<b>Product (kW)</b>	$\phi_i^*$	$\phi_{u,i}^*$
<b>1.(Boiler)</b>	$\phi_{1,NG} = 7722$	7722	1	$\phi_{5,T-C} = 6178$	7722	1.25
<b>2.(Compressor chiller)</b>	$\phi_{2,ELE} = 100$	100	1	$\phi_{6,T-F} = 476$	100	0.21
<b>3.(CHP+ABS chiller)</b>	$\phi_{3,NG} = 2513$	2513	1	$\phi_{7,ELE} = 970$ $\phi_{8,T-C} = 1166$ $\phi_{9,T-F} = 234$	1029 1239 248	1.06 1.06 1.06
<b>4.(PV System)</b>	$\phi_{4,SOL} = 376$	376	1	$\phi_{10,ELE} = 60$	376	6.3

Tabella 6: Costi energetici e costi energetici unitari dei flussi

Ciò ha consentito di ricavare i seguenti indicatori:

$$TTW_{EN,BOILER} = 1.2500$$

$$TTW_{EN,CHP} = 1.0612$$

$$TTW_{EN,PV} = 6.3000$$

Si suppone che l'energia elettrica utilizzata all'interno del sistema non subisca alcuna trasformazione ma sia direttamente utilizzata dagli utenti. Ciò equivale a porre:

$$TTW_{EN,ELE} = 1$$

L'analisi  $WTW_{EN}$  condotta per l'intero sistema esprime l'energia necessaria al sostentamento del sistema stesso in termini di risorse primarie. Di seguito si riporta la tabella che riassume i valori di  $WTT_{EN}$ ,  $TTW_{EN}$  e  $WTW_{EN}$  per ogni componente. Ciò che emerge dall'analisi è che per il proprio funzionamento il sistema quartiere deve prelevare dall'ambiente esterno 7627 MWh di energia primaria.

BILANCIO ENERGETICO								
Componenti		MWh	TTW		TTW	WTT	WTT	WTW
					MWh <sub>r</sub>	MWh <sub>e</sub> /MWh <sub>r</sub>	MWh <sub>e</sub>	MWh <sub>PR</sub>
Energia elettrica importata	Energia elettrica importata	1051.00	1.00	Energia elettrica importata	1051	1.87	1965	3016
Boiler	Energia termica prodotta (boiler)	2147.00	1.25	Natural Gas importato (boiler)	2684	0.0567	152	2836
Cogeneratore	Energia elettrica autoprodotta (CHP)	4122.50	1.0612	Natural Gas importato (CHP)	4375	0.0567	248	4623
	Energia termica prodotta (CHP)	4955.50	1.0612	Natural Gas importato (CHP)	5259	0.0567	298	5557
Energia elettrica esportata	Energia elettrica esportata	-3275.50	1.00	Energia elettrica esportata	-3276	1.87	-6125	-9401
PV Systems	Energia elettrica autoprodotta (ATC PV Systems)	54.00	6.30	Energia solare	340	0.00	0	340
	Energia elettrica autoprodotta (District PV Systems)	104.00	6.30	Energia solare	655	0.00	0	655
								7627
								Fabbisogno finale energia primaria

Tabella 7: Bilancio energetico  $WTW_{EN}$

L'istogramma che segue rende conto visivamente in maniera immediata di quanto sopra detto. Ad esempio se analizziamo il gas naturale includendo i consumi sia del CHP che del boiler si osserva che per rendere

disponibili 12318 MWh al sistema quartiere è necessario un incremento del fabbisogno energetico di 698 MWh.

Allo stesso modo 1051 MWh di energia elettrica “costano” 3016 MWh di energia primaria.

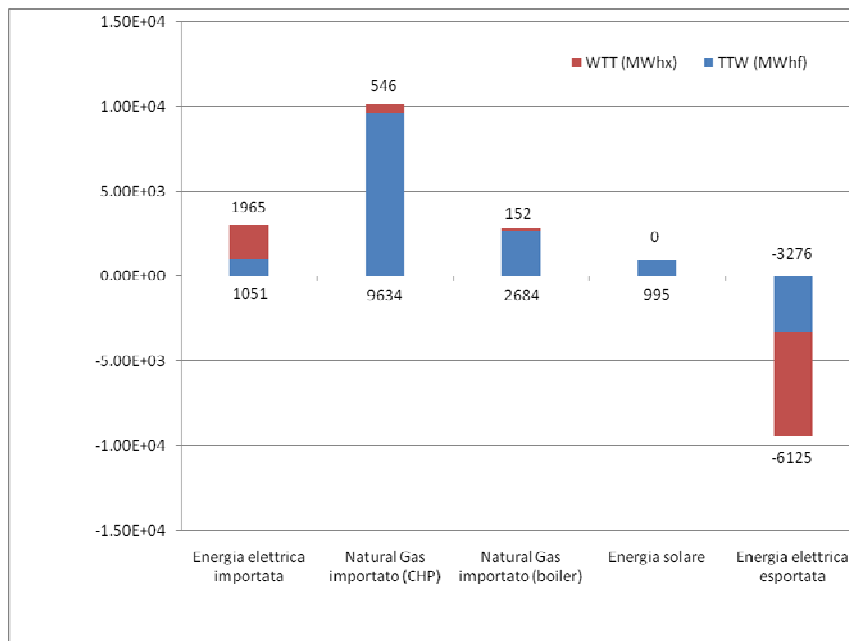


Figura 11: Istogramma relativo ai parametri  $WTT_{EN}$  e  $TTW_{EN}$

L’energia primaria equivalente all’energia elettrica esportata è stata considerata alla stregua di una energia in uscita dal sistema non prodotta dalla rete elettrica.

Per questa ragione nel bilancio di energia primaria l’energia elettrica esportata compare col segno meno.

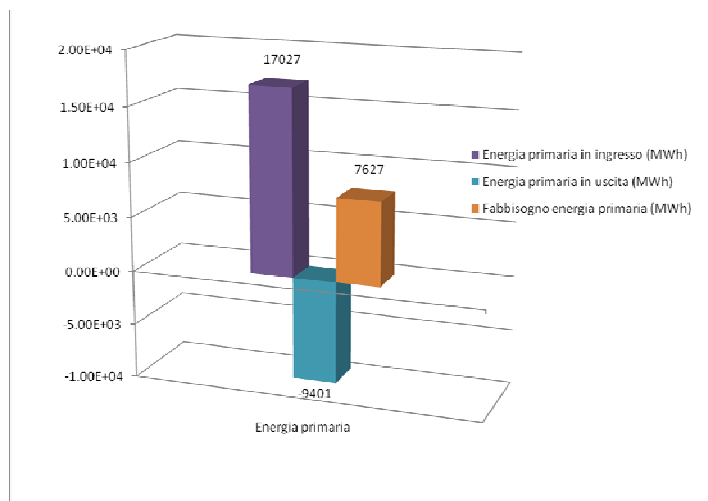


Figura 12: Bilancio di energia primaria.

L'indicatore che sarà utilizzato per confrontare il funzionamento di diverse configurazioni impiantistiche è il fabbisogno di energia primaria che scaturisce dall'analisi  $WTW_{EN}$ . Come indicato in Tab.7 lo scenario attuale necessita di 7627 MWh per il soddisfacimento dei propri fabbisogni.

L'analisi  $WTW_{AMB}$  condotta per l'intero sistema ha consentito di calcolare la CO<sub>2</sub> emessa per anno dal quartiere.

I parametri  $TTW_{AMB}$  si riferiscono ai fattori di emissione caratteristici degli impianti:

$$TTW_{AMB,NG} = 0.202 \text{ t}_{CO_2} / MWh$$

Il  $TTW_{AMB,ELE}$  è posto uguale a 0 perché si suppone che i dispositivi di uso finale alimentati elettricamente non comportino emissione di CO<sub>2</sub>.

La Tab.8 riassume i passaggi dell'analisi e riporta i valori di CO<sub>2</sub> emessa per componente:

BILANCIO AMBIENTALE							
Componenti		WTT	WTT	TTW	TTW	WTW	
	MWh <sub>f</sub>	t <sub>CO2</sub> /MWh <sub>f</sub>	t <sub>CO2</sub>	t <sub>CO2</sub> /MWh	t <sub>CO2</sub>	t <sub>CO2</sub>	
Energia elettrica importata	1051.00	0.435	457	0.00	0	457	Energia elettrica importata
Boiler	2683.75	0.010	27	0.202	542	569	Natural Gas (boiler)
Cogeneratore	4374.80	0.010	45	0.202	884	928	Natural Gas (CHP,ELE)
	5258.78	0.010	54	0.202	1062	1116	Natural Gas (CHP,TH)
Energia elettrica esportata	-3275.50	0.435	-1424	0.00	0	-1424	Energia elettrica esportata
PV Systems							
			-842		2488	1646	Totale CO <sub>2</sub> emessa

Tabella 8: Bilancio ambientale  $WTW_{AMB}$

L'istogramma dell'analisi ambientale evidenzia come la quantità maggiore di CO<sub>2</sub> emessa sia da attribuirsi al cogeneratore, ciò che è ovvio dati gli elevati consumi di gas naturale del componente.

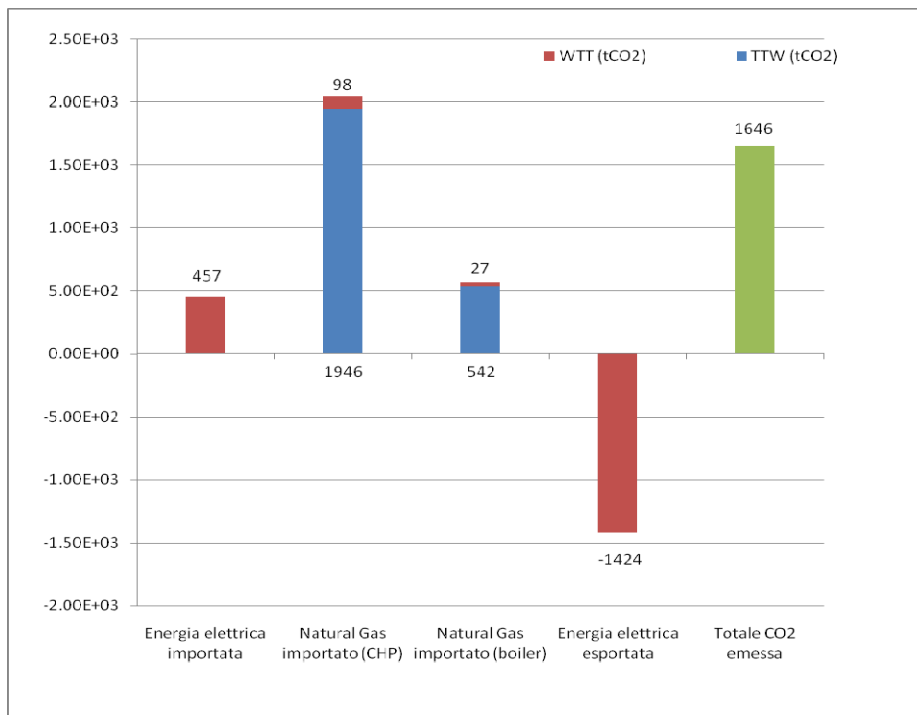


Figura 13: Istogramma relativo ai parametri  $WTT_{AMB}$  e  $TTW_{AMB}$

Il parametro di valutazione utilizzato dall'analisi  $WTT_{AMB}$  è la CO<sub>2</sub> totale emessa l'anno dal sistema che per la configurazione esaminata risulta pari 1646 tCO<sub>2</sub>.

Gli indicatori ottenuti attraverso le analisi  $WTT_{EN}$  e  $WTT_{AMB}$  per la configurazione impiantistica attuale verranno confrontati con quelli calcolati per uno scenario alternativo proposto, dal confronto scaturiscono considerazioni su entrambi gli scenari in merito all'efficienza di funzionamento dei sistemi esaminati.

## 4.4 L'ANALISI EXERGETICA

### 4.4.1 CALCOLO DEI FLUSSI EXERGETICI

Per effettuare l'analisi exergetica è stato necessario calcolare i flussi di exergia.

Di seguito si esaminano tutti i componenti.

**Componente 1, BOILER**, composto da una caldaia a condensazione di 978 kW<sub>th</sub> e due caldaie a gas di 2600 kW<sub>th</sub> ciascuno. Il gruppo di tre caldaie è visto come una singola caldaia alimentata a gas naturale che genera calore con una efficienza di circa l'80%.

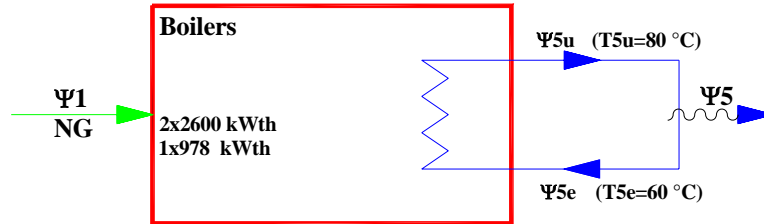


Figura 14: Schema Componente Caldaia

Il flusso risorsa del componente BOILER è il metano perciò il corrispondente flusso exergetico può essere calcolato utilizzando il suo potere calorifico inferiore:

$$\Psi_c = m_c \cdot H_{i,c} \quad (29)$$

Nello specifico per il componente 1 il flusso exergetico vale:

$$\Psi_1 = m_{c1} \cdot H_{i,c}$$

La potenza termica complessiva è stata calcolata sommando le potenze termiche delle singole caldaie:

$$\Phi_{th1} = 2 \cdot 2600 + 978 = 6178 \text{ kWth}$$

Il combustibile consumato, in termini di portata in massa vale:

$$m_c = (\Phi / \eta) / H_{i,c} \quad (30)$$

Applicando la (30) si ha

$$m_{c1} = (\Phi_{th1} / \eta) / H_{i,c} = 0,1545 \text{ kg/s dove:}$$

$\eta = 0.80$  rappresenta l'efficienza complessiva del gruppo composto dalle tre caldaie;

$H_{i,c} = 5 \cdot 10^4 \text{ kJ/kg}$  è il potere calorifico inferiore del metano.

Pertanto

$$\Psi_1 = m_{c1} \cdot H_{i,c} = 7722 \text{ kW}$$

$\Psi_1 = 7722 \text{ kW}$  flusso exergetico della risorsa del componente caldaia.

Il prodotto della Caldaia è un flusso di calore che viene ceduto all'acqua, pertanto il corrispondente flusso exergetico viene calcolato come differenza del flusso exergetico della massa di acqua uscente e di quella

entrante (il prodotto del componente può essere definito come l'aumento di exergia specifica associato al flusso d'acqua riscaldato nella caldaia).

La variazione di exergia tra il flusso di massa uscente e quello entrante ha la seguente espressione:

$$\Delta b = h_u - h_e - T_0(s_u - s_e) \quad (31)$$

Dalla (31) segue

$$\Delta b_5 = h_{ul,5} - h_{el,5} - T_0(s_{ul,5} - s_{el,5})$$

dove

$h_{ul,5}$  e  $s_{ul,5}$  sono rispettivamente l'entalpia e l'entropia dell'acqua allo stato liquido calcolate per i valori:

$$T_{u,5} = 80^\circ\text{C} \text{ e } p_5 = 3 \text{ bar}$$

mentre

$h_{el,5}$  e  $s_{el,5}$  sono rispettivamente l'entalpia e l'entropia dell'acqua allo stato liquido calcolate in corrispondenza di:

$$T_{e,5} = 60^\circ\text{C} \text{ e } p_5 = 3 \text{ bar}$$

La temperatura dell'ambiente è posta:

$$T_0 = 20^\circ\text{C}$$

Il flusso di exergia è dato dal prodotto:

$$\psi = G \cdot \Delta b \quad (32)$$

In questo caso risulta:

$$\psi_5 = G_5 \cdot \Delta b_5$$

Sapendo che la potenza complessiva è uguale alla portata in massa moltiplicata per la variazione di entalpia specifica, si ricava il valore della portata:

$$G = \Phi / \Delta h \quad (33)$$

Per il componente 1 la portata vale:

$$G_5 = \Phi_{th1} / \Delta h$$

$$G_5 = \Phi_{th1} / \Delta h = 73.78 \text{ kg/s}$$

Avendo assunto per il calore specifico dell'acqua il valore:

$$c_{p,H_2O} = 4.186 \text{ kJ/kgK}$$

In definitiva il flusso exergetico del prodotto della Caldaia vale:

$$\psi_5 = G_5 \cdot \Delta b_5 = 899 \text{ kW}$$

$\psi_5 = 899 \text{ kW}$  flusso exergetico del prodotto del componente caldaia.

**Componente 2, CHILLER A COMPRESSIONE**, composto da chiller a compressione alimentato elettricamente;

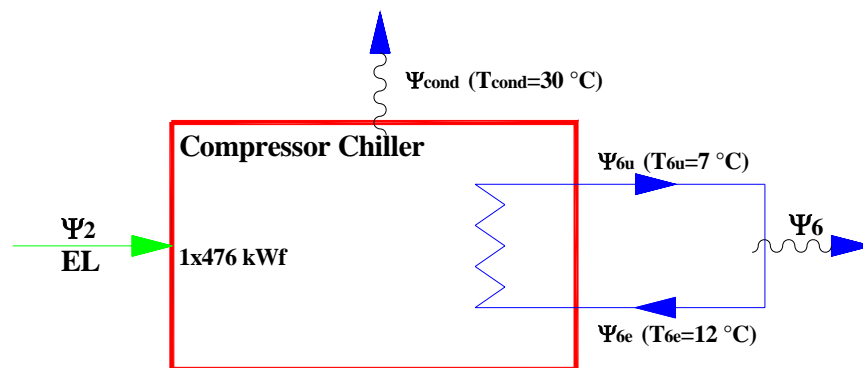


Figura 15: Schema Componente Chiller a compressione

Alla fonte elettrica è stato attribuito un indice exergetico di conversione uguale a 1 trattandosi di energia di tipo meccanico.

$\psi_2 = 100 \text{ kW}$  flusso exergetico della risorsa del componente chiller a compressione.

Il chiller elettrico a compressione è una macchina funzionante secondo un ciclo inverso che ha come obiettivo la produzione di freddo, cioè la sottrazione di calore a temperatura inferiore a quella ambiente; anche in questo caso il corrispondente flusso exergetico viene calcolato come differenza del flusso exergetico associato alla portata in massa dell'acqua uscente e di quella entrante

Dall'equazione di bilancio (1) del flusso exergetico applicata al componente 2 si ricava il suo prodotto:

$$\psi_6 = \psi_2 - \psi_{D,2}$$

$\psi_{D,2}$  rappresenta le perdite di exergia per irreversibilità.

La potenza frigorifera del componente 2 vale:

$$\Phi_{f2} = 476 \text{ kW}_f$$

la portata si calcola con la formula (33)

$$G_6 = \Phi_{f2} / \Delta h = 22.73 \text{ kg/s}$$

Avendo assunto:

$$c_{p,H2O} = 4.186 \text{ kJ/kgK}$$

$$T_{u,6} = 7 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{e,6} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$$

Calcolando l'exergia distrutta per irreversibilit  attraverso l'equazione dedotta dalla (9):

$$\Psi_{D,2} = T_0 \cdot [G_6 \cdot (s_{ul,6} - s_{el,6}) + \Phi_{cond2} / T_{cond2}] = 63.30 \text{ kW}$$

dove

$$\Phi_{cond2} = 576 \text{ kW}$$

ed   stata ipotizzata una temperatura al condensatore pari a:

$$T_{cond2} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

Applicando l'equazione di bilancio si trova:

$$\psi_6 = 36.70 \text{ kW} \text{ flusso exergetico del prodotto del chiller a compressione.}$$

**Componente 3, CHP+ABS CHILLER**, impianto di cogenerazione composto da un motore a combustione interna accoppiato ad un chiller ad assorbimento, il componente integrato   alimentato a gas naturale.

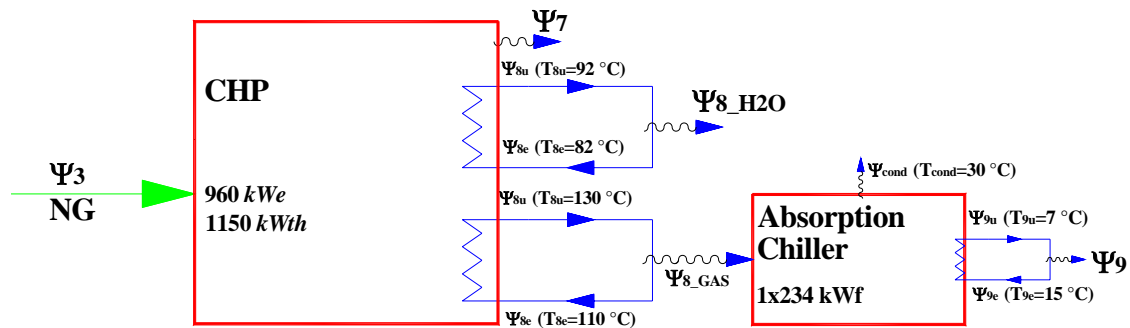


Figura 16: Schema Componente Co-generatore e Chiller ad assorbimento

Il componente integrato cogeneratore e chiller ad assorbimento ha un motore a combustione interna che produce lavoro elettrico. L'acqua che circola attorno al sistema cilindro-pistone viene scaldata a 92°C e mandata al sistema di teleriscaldamento al quale cede calore tornando a 82°C. Una parte dei fumi del sistema cilindro-pistone sprigionati a 130°C fuoriesce al camino a 110°C e una parte viene utilizzata per alimentare il chiller per far evaporare l'acqua della miscela di Bromuro di Litio. Il chiller ad assorbimento invia alla rete di teleriscaldamento acqua fredda a 7°C che torna a 15°C dopo aver sottratto calore. Nella stagione invernale il chiller ad assorbimento è spento perciò una parte dell'energia termica dei fumi viene utilizzata nella rete di teleriscaldamento aumentandone presumibilmente la portata.

Il componente integrato cogeneratore e chiller ad assorbimento è alimentato a gas naturale, il flusso exergetico si calcola quindi utilizzando il potere calorifico inferiore.

La potenza termica derivante dal recupero di acqua calda sul blocco motore è stata assunta pari a:

$$\Phi_{th3,H2O} = 476 \text{ kW}_{th}$$

La potenza termica derivante dal recupero di gas di scarico è stata assunta pari a:

$$\Phi_{th3,GAS} = 690 \text{ kW}_{th}$$

Il combustibile consumato, in termini di portata in massa vale, secondo la (30):

$$m_{c3} = (\Phi_{th3} / \eta_{CHP}) / H_{i,c} = 0.0503 \text{ kg/s}$$

dove:

$$\eta_{CHP} = 0.46 \text{ rappresenta l'efficienza termica del cogeneratore}$$

$$H_{i,c} = 5 \cdot 10^4 \text{ kJ/kg è il potere calorifico inferiore del metano}$$

Pertanto applicando la (29) si ha:

$$\Psi_3 = m_{c3} \cdot H_{i,c} = 2513 \text{ kW}$$

$\Psi_3 = 2513 \text{ kW}$  flusso exergetico della risorsa del componente cogeneratore + chiller ad assorbimento.

Il flusso 7 è un prodotto elettrico quindi  $\Psi_7 = \Phi_7$ :

$\Psi_7 = 970 \text{ kW}$  flusso exergetico prodotto elettrico del componente cogeneratore + chiller ad assorbimento.

Il prodotto 8 è un flusso di calore, pertanto analogamente al flusso 5,  $\psi_8$  si calcola utilizzando la (32):

$$\psi_8 = G_8 \cdot \Delta b_8$$

La variazione di exergia specifica si calcola con la (31):

$$\Delta b_8 = h_{ul,8} - h_{el,8} - T_0 (s_{ul,8} - s_{el,8})$$

dove

$h_{ul,8}$  e  $s_{ul,8}$  sono rispettivamente l'entalpia e l'entropia dell'acqua calcolate per i valori:

$$T_{u,8} = 92 \text{ °C} \text{ e } p_8 = 3 \text{ bar}$$

mentre

$h_{el,8}$  e  $s_{el,8}$  sono rispettivamente l'entalpia e l'entropia dell'acqua calcolate per i valori

$$T_{e,8} = 82 \text{ °C} \text{ e } p_8 = 3 \text{ bar}$$

$T_0 = 20 \text{ °C}$  è la temperatura dell'ambiente.

La portata dell'acqua calcolata utilizzando la (33) vale:

$$G_{8,H2O} = \Phi_{th3,H2O} / \Delta h = 7.9631$$

Avendo assunto:

$$c_{p,H2O} = 4.186 \text{ kJ/kgK}$$

Il flusso exergetico del prodotto calore del componente integrato 3 risulta:

$\psi_8 = 217.2 \text{ kW}$  flusso exergetico prodotto termico calore del componente cogeneratore + chiller ad assorbimento.

Il flusso di exergia associato all'energia termica refrigerante del componente integrato si può calcolare utilizzando l'equazione (7) in cui L non rappresenta una potenza meccanica ma è la risorsa energetica in ingresso al sistema indicata in Fig.16 con  $\psi_{8,GAS}$ , si ha:

$$\Psi_9 = \Psi_{8,GAS} + T_0 \cdot \Delta S_{irr} = G_{9,H2O} \cdot [h_{el,9} - h_{ul,9} - T_0 \cdot (s_{el,9} - s_{ul,9})] - \Phi_{cond3} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{cond3}}\right)$$

Avendo assunto:

$$T_{u,9} = 7 \text{ °C}$$

$$T_{e,9} = 15 \text{ °C}$$

$$\Phi_{cond3} = 605.43 \text{ kW}$$

ed una temperatura al condensatore pari a:

$$T_{cond3} = 30^{\circ}\text{C}$$

risulta

$\psi_9 = 27.40 \text{ kW}$  flusso exergetico prodotto termico refrigerante del componente cogeneratore + chiller ad assorbimento.

**Componente 4, SISTEMA FOTOVOLTAICO**, moduli fotovoltaici.

Il componente numero 4 è costituito da moduli fotovoltaici installati sulla facciata dell'edificio commerciale di ATC per la produzione di energia elettrica (potenza di picco totale  $50 \text{ kW}$ ) e moduli fotovoltaici sui tetti degli edifici (potenza di picco totale di  $100 \text{ kW}$ ).

Il sistema di pannelli fotovoltaici applicati sull'edificio ATC è costituito da 273 moduli. Dei quali 210 sono esposti a SW, 21 a N, 21 a W, 21 a E. L'irraggiamento globale calcolato per esempio in un giorno significativo del mese di gennaio alle ore 11:07 vale  $92,3 \text{ kW}$  considerando un rendimento dei pannelli del 15,3%, l'energia elettrica prodotta risulta:

$$E_{ATC} = G_{ATC} \cdot \eta_{ATC} = 14.12 \text{ kW}$$

Per il sistema di pannelli installati sugli edifici l'irraggiamento vale  $238,2 \text{ kW}$  quindi:

$$E_{CB} = G_{CB} \cdot \eta_{CB} = 45.6 \text{ kW}$$

Con  $\eta_{CB} = 16.1 \%$

$$IRR_{sol} = 92.3 + 283.2 = 375.5 \text{ kW}$$

Assumendo

$$T_{sole} = 5800 \text{ K}$$

Il flusso di exergia della risorsa solare si calcola:

$$\Psi_4 = IRR_{sol} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{sole}}\right) = 356.52 \text{ kW}$$

$\Psi_4 = 356.52 \text{ kW}$  flusso exergetico risorsa solare

mentre

$$\Psi_{10} = \Phi_{10} = E_{ATC} + E_{CB} = 59.6 \text{ kW}$$

$\Psi_{10} = 59.6 \text{ kW}$  flusso exergetico prodotto elettrico del campo fotovoltaico.

I flussi exergetici calcolati sono stati raccolti nella Tab.9 che segue

:

<b>Componente</b>	<b>Fuel (kW)</b>	<b>Product (kW)</b>
<b>1.(Boiler)</b>	$\psi_1 = 7722$	$\psi_5 = 899$
<b>2.(Compressor chiller)</b>	$\psi_2 = 100$	$\psi_6 = 36.7$
<b>3.(CHP+ABS chiller)</b>	$\psi_3 = 2513$	$\psi_7 = 970$ $\psi_8 = 217$ $\psi_9 = 27$
<b>4.(PV System)</b>	$\psi_4 = 356$	$\psi_{10} = 60$

**Tabella 9: Riepilogo dei flussi exergetici risorsa e prodotto per componente relativi allo scenario attuale**

L'analisi exergetica viene eseguita per tutti i componenti e per il sistema nel suo complesso calcolando:

- $\eta_{ex,tot} = 1 - \frac{\Psi_{I,tot}}{\Psi_{F,tot}}$  l'efficienza exergetica totale del sistema
- $\eta_{ex,i} = \frac{\Psi_{I,i}}{\Psi_{F,i}}$  l'efficienza exergetica di ogni componente
- $\Psi_{I,i}$  l'exergia distrutta in ogni componente
- $\delta_i = \frac{\Psi_{I,i}}{\Psi_{F,tot}}$  il difetto di efficienza, espresso come il rapporto tra l'irreversibilità prodotta in un componente ed il combustibile totale consumato dal sistema. Questo parametro indica la distruzione della quantità di exergia in ingresso al sistema effettuata nei diversi componenti del sistema.

I risultati dell'analisi exergetica sono espressi nella Tab.10:

<b>Componente</b>	<b>Fuel (kW)</b>	<b>Product (kW)</b>	<b><math>\Psi_{I,i}</math> (kW)</b>	<b><math>\eta_{ex,i}</math> (%)</b>	<b><math>\delta_i</math> (-)</b>
<b>1.(Boiler)</b>	$\psi_1 = 7722$	$\psi_5 = 899$	$\psi_{I,1} = 6824$	11,64	0,6380
<b>2.(Compressor chiller)</b>	$\psi_2 = 100$	$\psi_6 = 367$	$\psi_{I,2} = 63$	36,70	0,0059
<b>3.(CHP+ABS chiller)</b>	$\psi_3 = 2517$	$\psi_7 = 970$ $\psi_8 = 217$ $\psi_9 = 27$	$\psi_{I,3} = 1303$	48,25	0,1218
<b>4.(PV System)</b>	$\psi_4 = 356$	$\psi_{10} = 60$	$\psi_{I,4} = 297$	16,72	0,0278
<b>TOTALE</b>	$\psi_{F,TOT} = 10695$	$\psi_{P,TOT} = 2540$	$\psi_{I,TOT} = 8487$		

Tabella 10: Risultati analisi exergetica relativi allo scenario base

$$\eta_{ex,tot} = 1 - \frac{\Psi_{I,tot}}{\Psi_{F,tot}} = 0.2065$$

Le perdite maggiori di exergia si verificano, come noto, nella caldaia che presenta anche il rendimento minore ed il difetto di efficienza maggiore.

La Tab.11 mostra il dettaglio dei flussi energetici ed exergetici per i vari componenti; la rappresentazione grafica dei flussi energetici in entrata e in uscita è riportata in figura 17 mentre la figura 18 presenta, utilizzando lo stesso schema, i flussi exergetici.

Le due figure permettono un confronto immediato dei flussi e consentono di notare che i flussi risorsa espressi attraverso la grandezza energia e quella exergia non cambiano perché si tratta di un combustibile fossile per il componente caldaia e per quello integrato cogeneratore e chiller ad assorbimento; di fonte elettrica per il chiller a compressione e di fonte solare per il sistema di pannelli fotovoltaici.

Sul lato dei prodotti il flusso prodotto della caldaia espresso in termini exergetici risulta quello maggiormente penalizzato e ciò è evidente quando il confronto si sposta sui rendimenti. Il rendimento exergetico della caldaia si riduce di oltre 1/6 rispetto a quello energetico.

<b>Componente</b>	$\phi_F$ <i>kW</i>	$\phi_P$ <i>kW</i>	$\eta_{EN}$	$\psi_F$ <i>kW</i>	$\psi_P$ <i>kW</i>	$\eta_{EX}$
<b>1.(Boiler)</b>	$\phi_1 = 7722$	$\phi_5 = 6178$	0.80	$\psi_1 = 7722$	$\psi_5 = 899$	0.12
<b>2.(Compressor chiller)</b>	$\phi_2 = 100$	$\phi_6 = 476$	4.76	$\psi_2 = 100$	$\psi_6 = 37$	0.37
<b>3.(CHP+ABS chiller)</b>	$\phi_3 = 2517$	$\phi_7 = 970$ $\phi_8 = 1168$ $\phi_9 = 234$	0.85	$\psi_3 = 2517$	$\psi_7 = 970$ $\psi_8 = 217$ $\psi_9 = 27$	0.48
<b>4.(PV System)</b>	$\phi_4 = 376$	$\phi_{10} = 60$	0.16	$\psi_4 = 356$	$\psi_{10} = 60$	0.17

Tabella 11: Flussi energetici ed exergetici in entrata e in uscita dei componenti analizzati e relativi rendimenti

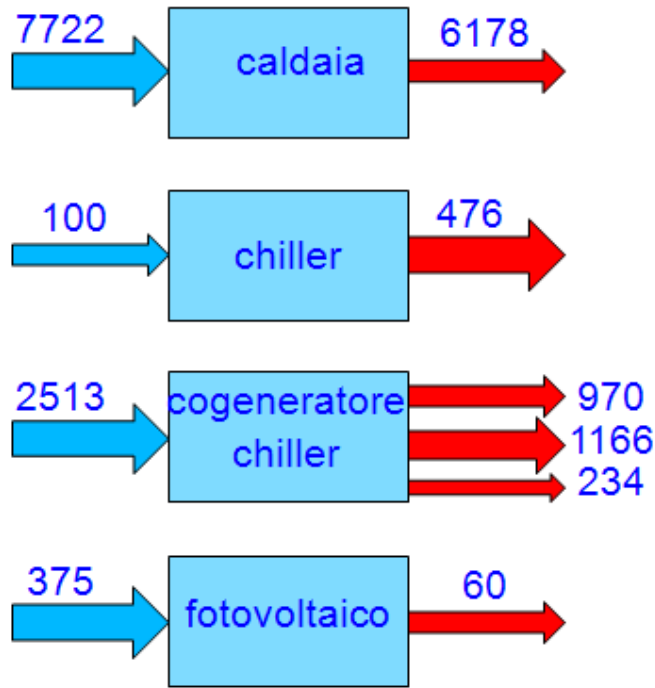


Figura 17: Flussi energetici in entrata e in uscita per componente

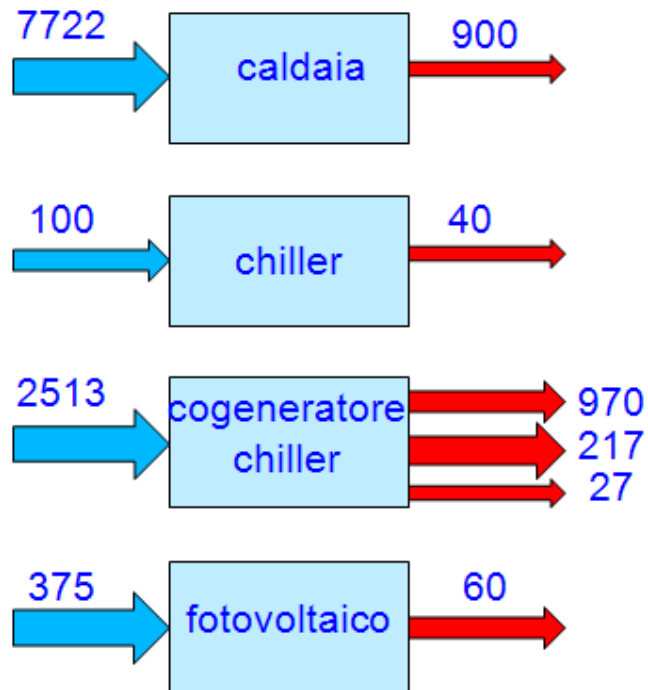


Figura 18: Flussi exergetici in entrata e in uscita per componente

Nella Fig.19 se si focalizza l'attenzione sui due componenti che rispondono alla domanda termica del sistema quartiere, è possibile notare che il salto maggiore tra i rendimenti avviene, come già detto, per la caldaia che utilizza un combustibile nobile ad elevato contenuto exergetico per produrre acqua calda a bassa temperatura (80°C) usando di fatto solo il 12% (basso rendimento exergetico) del contenuto exergetico della fonte primaria di partenza.

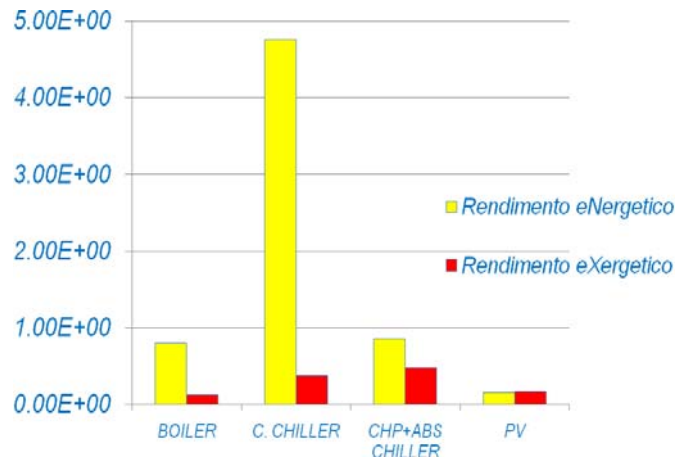


Figura 19: Efficienze energetiche ed exergetiche dei componenti costituenti il sistema

I risultati ottenuti esaminando i rendimenti sono confermati dall'analisi degli altri parametri di valutazione utilizzati. La perdita maggiore di exergia avviene infatti nel componente caldaia che è quello che presenta anche il valore più elevato del difetto di efficienza. La quantità di exergia distrutta nella caldaia risulta alta anche rispetto alle risorse utilizzate dal sistema.

<b>Componente</b>	<b><math>\Psi_{I,i}</math> (kW)</b>	<b><math>\delta_i</math> (-)</b>
<b>1.(Boiler)</b>	$\Psi_{I,1} = 6824$	0,6380
<b>2.(Compressor chiller)</b>	$\Psi_{I,2} = 63$	0,0059
<b>3.(CHP+ABS chiller)</b>	$\Psi_{I,3} = 1303$	0,1218
<b>4.(PV System)</b>	$\Psi_{I,4} = 297$	0,0278

Tabella 12: Exergia distrutta e difetto di efficienza nello scenario base

L'analisi dello scenario di riferimento mette in evidenza le criticità del caso base in termini di efficiente sfruttamento delle risorse primarie: le maggiori criticità (maggiori irreversibilità) sono associate al

componente caldaia per il quale entrambi i parametri di valutazione segnalano una bassa qualità sotto l'aspetto delle trasformazioni della grandezza exergia, sia per quanto riguarda l'operazione di trasformazione (alto valore di exergia distrutta) sia per quel che riguarda il consumo di risorsa totale in ingresso al sistema (alto valore del difetto di efficienza).

D'altra parte la combinazione per entrambi gli indicatori di valori critici è riferibile solo al componente caldaia, infatti il componente integrato che pure presenta un alto valore di exergia distrutta elabora una piccola parte della risorsa totale in ingresso al sistema; stesso discorso per il campo fotovoltaico al quale è attribuibile una bassa efficienza exergetica ma un basso valore del difetto di efficienza pertanto un eventuale intervento su questi ultimi due componenti non comporterebbe benefici significativi.

Dalle considerazioni sopra è evidente che è conveniente proporre una diversa opzione nello scenario alternativo sul componente caldaia.

## 5 CASE-STUDY: SCENARIO ALTERNATIVO

Lo scenario alternativo proposto prevede la sostituzione del Componente Caldaia con un componente integrato costituito da un cogeneratore dalle stesse caratteristiche tecniche di quello già installato e da pompe di calore. Il componente è dimensionato per coprire completamente (ed esattamente) la produzione termica della caldaia: sia tramite il recupero termico diretto dal cogeneratore, sia tramite la valorizzazione termica della potenza elettrica prodotta dal cogeneratore stesso, trasformata in calore tramite l'utilizzo delle pompe di calore.

Il nuovo componente viene progettato supponendo di dover rispondere ad un fabbisogno termico di 2147 MWh, pari all'energia termica prodotta dalla caldaia nello scenario base.

Ragionando in termini di potenza, il criterio che ha guidato la scelta è stato il seguente:

se la caldaia esistente ha una potenza termica di  $6178 \text{ kW}_{th}$  ed il nuovo cogeneratore ha una potenza termica di  $1166 \text{ kW}_{th}$  allora le pompe di calore dovranno possedere una potenza termica di  $5012 \text{ kW}_{th}$ .

La Tabella che segue riporta in dettaglio le caratteristiche delle pompe di calore scelte, che in base alle taglie disponibili (si sono considerati dei modelli commerciali a catalogo) coprono il carico con 8 unità, con una potenza termica complessiva di  $5014 \text{ kW}_{th}$ .

	<i>5x2502</i>	<i>1x2002</i>	<i>2x0901</i>			
<b>kW<sub>th</sub></b>	<b>784.00</b>	<b>620.00</b>	<b>237.00</b>	<i>Potenza termica tot</i>	<b>5014.00</b>	<b>kW<sub>th</sub></b>
<b>kW<sub>el</sub></b>	<b>176.00</b>	<b>144.00</b>	<b>57.00</b>	<i>Potenza assorbita tot</i>	<b>1138.00</b>	<b>kW<sub>el</sub></b>
<b>kg/s</b>	<b>37.46</b>	<b>29.62</b>	<b>11.32</b>			
<b>kg/s</b>	<b>29.05</b>	<b>22.74</b>	<b>8.60</b>			
	<b>4.45</b>	<b>4.31</b>	<b>4.16</b>			

**Tabella 13: Caratteristiche pompe di calore**

I componenti del nuovo sistema sono:

**Componente 1, CHP**, composto da un cogeneratore con un motore a combustione interna alimentato a gas naturale;

**Componente 2, COMPONENTE FITTIZIO**, costituito da una giunzione nella quale confluisce il prodotto elettrico del cogeneratore che sommato ad una quota di energia elettrica prelevata dalla rete alimenta le pompe di calore;

**Componente 3, POMPE DI CALORE**, composto da 8 pompe di calore la cui risorsa è rappresentata dal prodotto del componente fittizio;

**Componente 4, CHILLER A COMPRESSIONE**, composto da chiller a compressione alimentato elettricamente;

**Componente 5, CHP+ABS CHILLER**, impianto di co-generazione accoppiato ad un chiller ad assorbimento alimentato a gas naturale;

**Componente 6, SISTEMA FOTOVOLTAICO**, moduli fotovoltaici.

Tra i flussi entranti si registrano: il **gas naturale** che alimenta i due cogeneratori e l'**energia elettrica**. Mentre, per le ipotesi fatte, i flussi uscenti non cambiano ma rispetto allo scenario base l'energia termica prodotta dalle caldaie è scomposta in due flussi: il flusso termico prodotto dal nuovo cogeneratore e quello prodotto dalle pompe di calore.

I flussi energetici espressi in kW relativi al modello di scenario alternativo sono presentati nella Tab.14:

<b>Componente</b>	<b>Fuel (kW)</b>	<b>Product (kW)</b>
<b>1.(CHP1)</b>	$\phi_{1,NG} = 2513$	$\phi_{7,T\_C} = 1166$ $\phi_{8,ELE} = 970$
<b>2.(Componente fittizio)</b>	$\phi_{2,ELE} = 1138$	$\phi_{3,ELE} = 1138$
<b>3.(Pompe di calore)</b>	$\phi_{3,ELE} = 1138$	$\phi_{9,T\_C} = 5014$
<b>4.(Compressor chiller)</b>	$\phi_{4,ELE} = 100$	$\phi_{10,T\_F} = 476$
<b>5.(CHP2+ABS chiller)</b>	$\phi_{5,NG} = 2513$	$\phi_{11,ELE} = 970$ $\phi_{12,T\_C} = 1166$ $\phi_{13,T\_F} = 234$
<b>6.(PV System)</b>	$\phi_{6,SOL} = 376$	$\phi_{14,ELE} = 60$

Tabella 14: Flussi energetici entranti ed uscenti per componente

La configurazione impiantistica dello scenario alternativo è rappresentata nello schema di Fig.20:

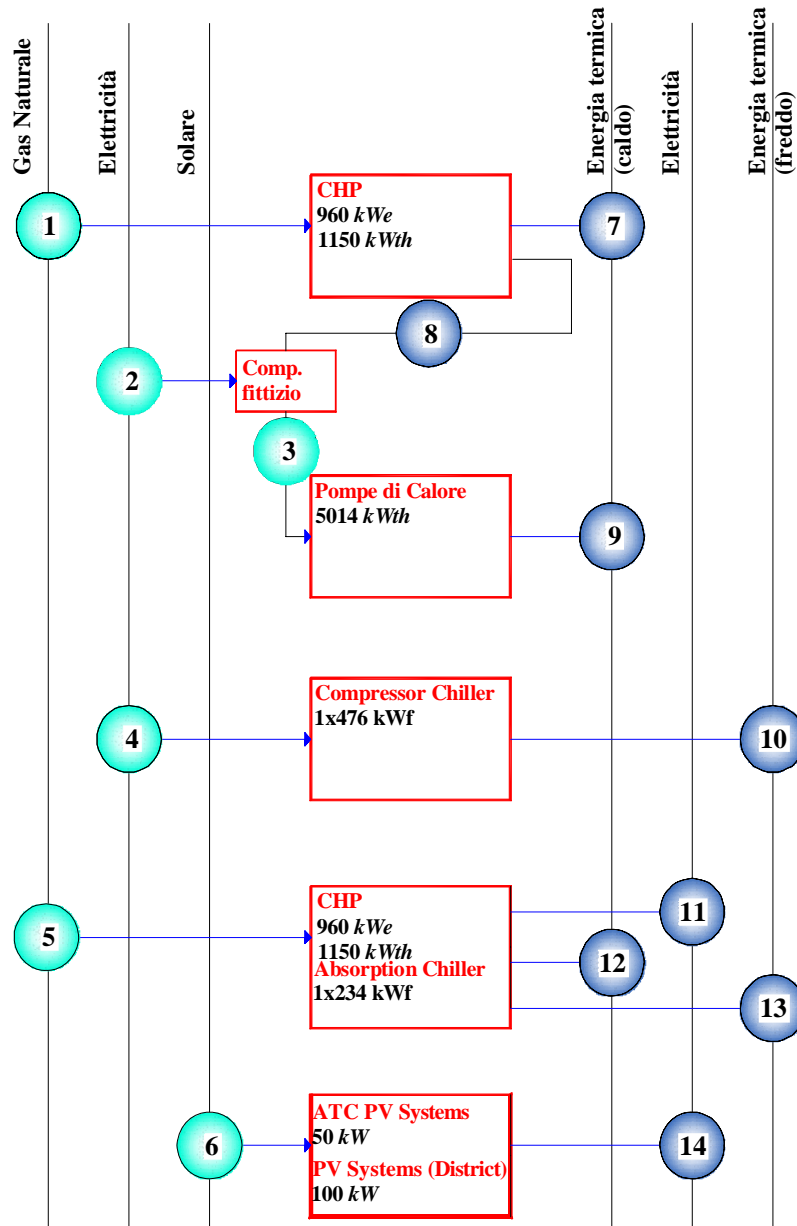


Figura 20: Modello scenario alternativo

## 5.1 L'ANALISI ENERGETICA E AMBIENTALE

L'analisi  $WTT_{EN}$  è stata condotta per lo scenario alternativo utilizzando i parametri

$$WTT_{EN,NG}=0.0567 (MJ_{xt}/MJ_f)$$

$$WTT_{EN,ELE}=1.8700 (MJ_{xt}/MJ_f)$$

Attraverso la procedura proposta per il calcolo del  $TTW_{EN}$  sono stati ricavati i parametri per i due cogeneratori:

$$TTW_{EN,CHP1}=1.1774$$

$$TTW_{EN,CHP2}=1.0612$$

La Tab.15 riassume gli indici  $WTT_{EN}$ ,  $TTW_{EN}$  e  $WTW_{EN}$  per ogni componente. Il fabbisogno finale di energia primaria necessaria al funzionamento del nuovo sistema è pari a 5882 MWh. Emerge in maniera evidente che in termini di risorse utilizzate la nuova configurazione impiantistica prevede un consumo minore rispetto al caso base che era di 7627 MWh (come riportato in Tab.7).

BILANCIO ENERGETICO							
		$TTW$		$TTW$	$WTT$	$WTT$	$WTW$
	MWh <sub>p</sub>	MWh <sub>t</sub> /MWh <sub>p</sub>		MWh <sub>t</sub>	MWh <sub>x</sub> /MWh <sub>t</sub>	MWh <sub>x</sub>	MWh <sub>PR</sub>
Energia elettrica importata	1051.00	1.00	Energia elettrica importata	1051	1.87	1965.37	3016.37
Energia elettrica autoprodotta (CHP1)	337.10	1.1774	Natural Gas importato (CHP1)	397	0.0567	23	419
Energia elettrica autoprodotta (CHP2)	4123	1.0612	Natural Gas importato (CHP2)	4375	0.0567	248	4623
Energia elettrica assorbita (PC)	58.23	1.00	Energia elettrica assorbita (PC)	58	1.87	109	167
Energia termica prodotta (CHP1)	405.21	1.1774	Natural Gas importato (CHP1)	477	0.0567	27	504
Energia termica prodotta (CHP2)	4956	1.0612	Natural Gas importato (CHP2)	5259	0.0567	298	5557
Energia elettrica esportata	-3276	1.00	Energia elettrica esportata	-3276	1.87	-6125	-9401
Energia elettrica autoprodotta (ATC PV Systems)	54.00	6.30	Energia solare	340	0.00	0	340
Energia elettrica autoprodotta (District PV Systems)	104.00	6.30	Energia solare	655	0.00	0	655
							5882
							Fabbisogno finale energia primaria

Tabella 15: Bilancio energetico  $WTW_{EN}$  relativo allo scenario alternativo

Nella Tab.15 compare, tra i componenti, la quota di energia elettrica che le pompe di calore devono prelevare dalla rete, mentre l'energia elettrica prodotta dal cogeneratore e assorbita dalle pompe viene computata nel bilancio del cogeneratore.

L'istogramma seguente mette in risalto che il "costo energetico" maggiore è attribuibile al componente 5, il cogeneratore 2, per via degli elevati consumi.

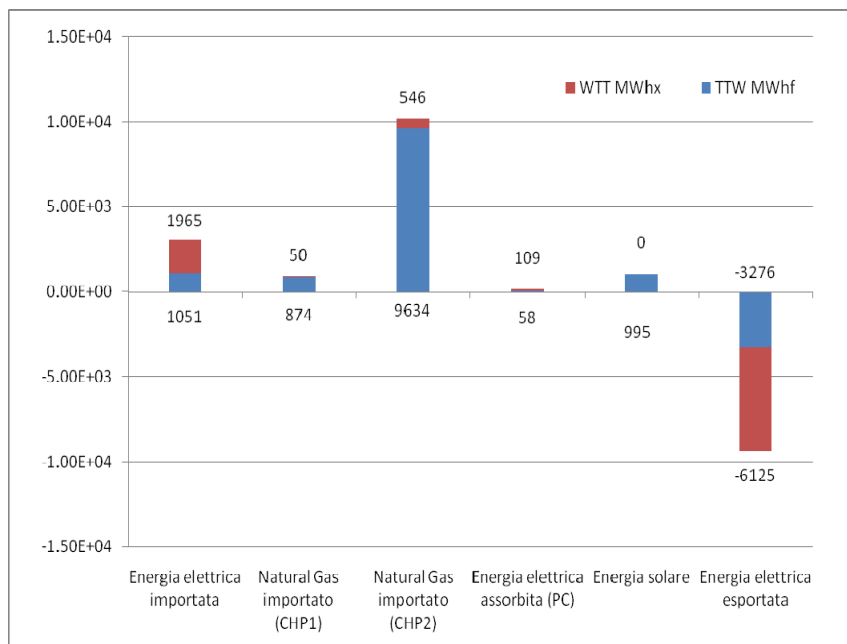


Figura 21: Iistogramma relativo ai parametri  $WTT_{EN}$  e  $TTW_{EN}$  relativo allo scenario alternativo

Il bilancio di energia primaria, nell'istogramma di Fig.22, mostra che il fabbisogno del sistema, a parità di energia elettrica esportata ossia di energia primaria equivalente in uscita, è diminuito perché è diminuita l'energia primaria necessaria al sistema per il proprio sostentamento.

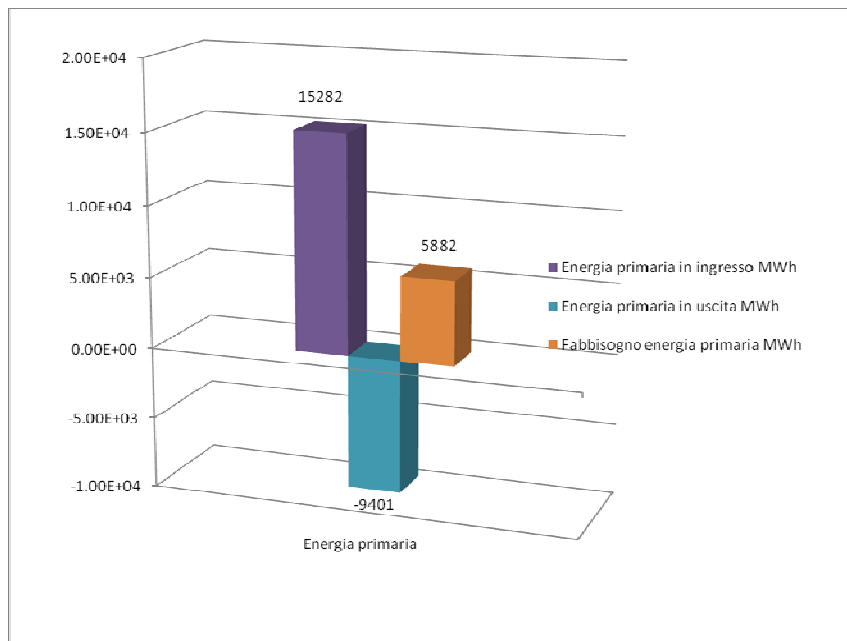


Figura 22: Bilancio di energia primaria relativo allo scenario alternativo

L'analisi  $WTW_{AMB}$  è stata condotta per lo scenario alternativo utilizzando i parametri

$$WTT_{AMB,NG}=0.010 \text{ (t/MWh}_f\text{)}$$

$$WTT_{AMB,ELE}=0.435 \text{ (t/MWh}_f\text{)}$$

I parametri  $TTW_{AMB}$  si riferiscono ai fattori di emissione caratteristici degli impianti.

$$TTW_{AMB,NG}=0.202 \text{ t}_{CO_2}/MWh$$

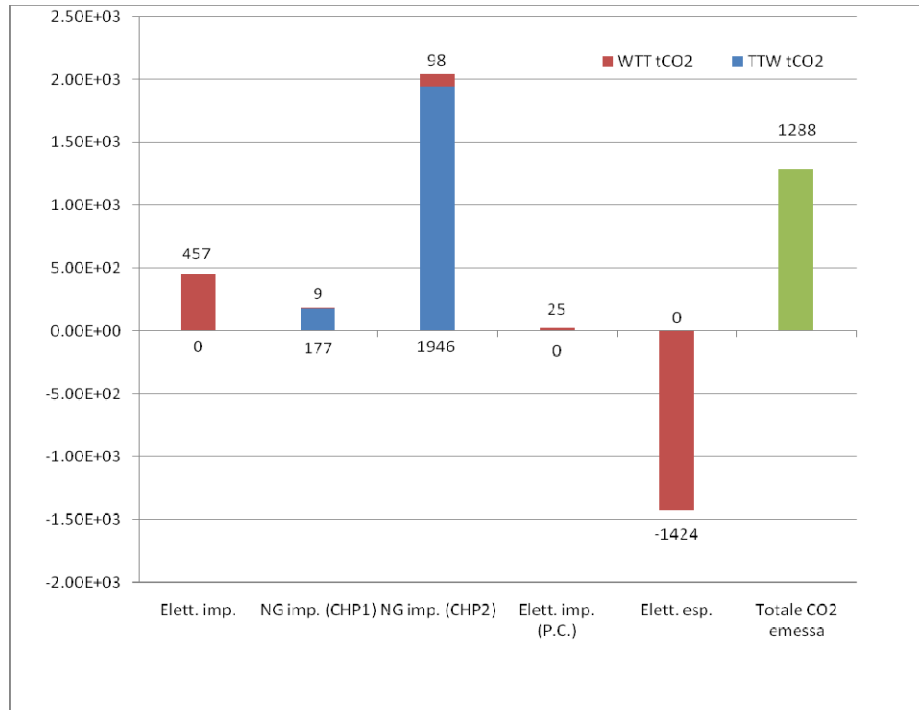
Il  $TTW_{AMB,ELE}$  è posto uguale a 0 perché si suppone che i dispositivi di uso finale alimentati elettricamente non comportino emissione di  $CO_2$ .

L'analisi  $WTW_{AMB}$ , condotta per l'intero sistema e riassunta nella Tab.16, ha consentito di calcolare la  $CO_2$  emessa per anno dal quartiere che per lo scenario alternativo è pari a 1288  $t_{CO_2}$  che verrà poi confrontato successivamente col caso base.

<b>BILANCIO AMBIENTALE</b>						
	<i>WTT</i>	<i>WTT</i>	<i>TTW</i>	<i>TTW</i>	<i>WTW</i>	
<i>MWh<sub>f</sub></i>	<i>t<sub>CO2</sub>/MWh<sub>f</sub></i>	<i>t<sub>CO2</sub></i>	<i>t<sub>CO2</sub>/MWh</i>	<i>t<sub>CO2</sub></i>	<i>t<sub>CO2</sub></i>	
1051.00	0.435	457	0.000	0	457	<i>Elettricità importata</i>
396.90	0.010	4	0.202	80	84	<i>Natural Gas (CHP1)</i>
4374.80	0.010	45	0.202	884	928	<i>Natural Gas (CHP2)</i>
58.23	0.435	25	0.000	0	25	<i>Elettricità imp.(PC)</i>
477.10	0.010	5	0.202	96	101	<i>Natural Gas (CHP1)</i>
5258.78	0.010	54	0.202	1062	1116	<i>Natural Gas (CHP2)</i>
-3275.50	0.435	-1424	0.000	0	-1424	<i>Elettricità esportata</i>
		-835.02		2122.53	1288	<i>Totale CO<sub>2</sub> emessa</i>

Tabella 16: Bilancio ambientale  $WTW_{AMB}$  relativo allo scenario alternativo

L'istogramma dell'analisi ambientale evidenzia come l'elettricità esportata consenta di abbattere le emissioni di CO<sub>2</sub> dovute al cogeneratore già esistente che ha dei consumi elevati.



**Figura 23: Istogramma relativo ai parametri  $WTT_{AMB}$  e  $TTW_{AMB}$  per lo scenario alternativo**

Pertanto il confronto tra i due scenari attraverso i due indicatori (energia primaria e CO<sub>2</sub> totale emessa) ha evidenziato che lo scenario alternativo apporta miglioramenti in termini di sfruttamento delle risorse e di impatto ambientale.

## 5.2 L'ANALISI EXERGETICA

L'analisi exergetica viene nuovamente eseguita per tutti i componenti e per il sistema nel suo complesso calcolando: l'efficienza exergetica totale del sistema,  $\eta_{ex,tot}$ ; l'efficienza exergetica di ogni componente,  $\eta_{ex,i}$ ; l'exergia distrutta in ogni componente,  $\Psi_{I,i}$  e il difetto di efficienza,  $\delta_i$ .

I risultati dell'analisi exergetica per il nuovo scenario sono espressi nella Tab.17:

<b>Componente</b>	<b>Fuel (kW)</b>	<b>Product (kW)</b>	<b><math>\Psi_{I,i}</math> (kW)</b>	<b><math>\eta_{ex,i}</math> (%)</b>	<b><math>\delta_i</math> (-)</b>
<b>1.(CHP1)</b>	$\psi_1 = 2513$	$\psi_7 = 217$ $\psi_8 = 970$	$\psi_{I,1} = 1330$	47.16	0.2350
<b>2.(Componente fittizio)</b>	$\psi_2 = 1138$	$\psi_3 = 1138$	$\psi_{I,2} = 0$	100	0
<b>3.(Pompe di calore)</b>	$\psi_3 = 1138$	$\psi_9 = 357$	$\psi_{I,3} = 781$	31.36	0.1380
<b>4.(Compressor chiller)</b>	$\psi_4 = 100$	$\psi_{10} = 37$	$\psi_{I,4} = 63$	36.70	0.0112
<b>5.(CHP2+ABS chiller)</b>	$\psi_5 = 2513$	$\psi_{11} = 970$ $\psi_{12} = 217$ $\psi_{13} = 27$	$\psi_{I,5} = 1303$	48.25	0.2302
<b>6.(PV System)</b>	$\psi_6 = 356$	$\psi_{14} = 60$	$\psi_{I,6} = 297$	16.72	0.0525
<b>TOTALE</b>	$\psi_{F,TOT} = 5659$	$\psi_{P,TOT} = 1885$	$\psi_{I,TOT} = 3774$		

Tabella 17: Risultati analisi exergetica relativi allo scenario proposto

$$\eta_{ex,tot} = 1 - \frac{\Psi_{I,tot}}{\Psi_{F,tot}} = 0.3331$$

Le perdite maggiori di exergia si verificano nel cogeneratore 1 che è quello che consuma più risorsa come dimostra il difetto di efficienza ( $\delta_i$ ) che per lo stesso componente ha il valore più alto.

La Tab.18 mostra il dettaglio dei flussi energetici ed exergetici per i vari componenti.

I flussi risorsa espressi attraverso la grandezza energia e quella exergia non cambiano perché si tratta di un combustibile fossile per i co-generatori; di fonte elettrica per le pompe di calore ed il chiller a compressione e di fonte solare per il sistema di pannelli fotovoltaici.

Sul lato dei prodotti il flusso prodotto dalle pompe di calore espresso in termini energetici prima ed exergetici dopo subisce un forte abbattimento passando da 5014 kW a 357kW, il confronto tra i rendimenti energetici ed exergetici permette valutare correttamente la reale efficienza delle pompe di calore.

I rendimenti energetici ed exergetici calcolati per ciascuno dei componenti sono presenti nella Tab.18. La Fig.24 mostra l'istogramma dei rendimenti energetici ed exergetici per ciascun componente del sistema proposto. Per tutti i componenti il rendimento energetico risulta maggiore di quello exergetico pertanto una valutazione delle prestazioni di sistema basata esclusivamente su tale parametro rischia di essere fuorviante.

La Tab.19 riassume infine i risultati dell'analisi exergetica in termini di exergia distrutta e difetto di efficienza per componente.

<b>Componente</b>	<b>Fuel <math>\phi_F</math></b> <b>(kW)</b>	<b>Product <math>\phi_P</math></b> <b>(kW)</b>	$\eta_{EN}$	$\psi_F$	$\psi_P$	$\eta_{EX}$
<b>1.(CHP1)</b>	$\phi_1 = 2513$	$\phi_7 = 1166$ $\phi_8 = 970$	0.85	$\psi_1 = 2513$	$\psi_7 = 217$ $\psi_8 = 970$	0.47
<b>2.(Componente fittizio)</b>	$\phi_2 = 168$	$\phi_3 = 1138$	1.00	$\psi_2 = 168$	$\psi_3 = 1138$	1.00
<b>3.(Pompe di calore)</b>	$\phi_3 = 1138$	$\phi_9 = 5014$	0.87	$\psi_3 = 1138$	$\psi_9 = 357$	0.31
<b>4.(Compressor chiller)</b>	$\phi_4 = 100$	$\phi_{10} = 476$	4.76	$\psi_4 = 100$	$\psi_{10} = 37$	0.36
<b>5.(CHP2+ABS chiller)</b>	$\phi_5 = 2513$	$\phi_{11} = 970$ $\phi_{12} = 1166$ $\phi_{13} = 234$	0.85	$\psi_5 = 2513$	$\psi_{11} = 970$ $\psi_{12} = 217$ $\psi_{13} = 27$	0.48
<b>6.(PV System)</b>	$\phi_6 = 376$	$\phi_{14} = 60$	0.16	$\psi_6 = 356$	$\psi_{14} = 60$	0.17

Tabella 18: Rendimenti energetici ed exergetici dei componenti per lo scenario proposto

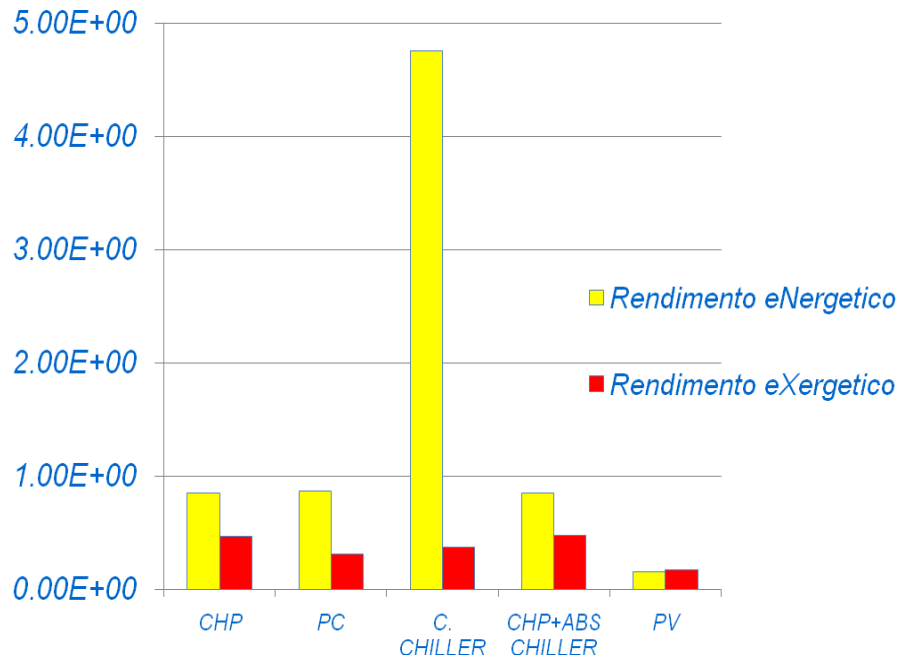


Figura 24: Efficienze energetiche ed exergetiche dei componenti costituenti il sistema proposto

<b>Componente</b>	<b><math>\Psi_{l,i}</math> (kW)</b>	<b><math>\delta_i</math> (-)</b>
<b>1.(CHP1)</b>	$\psi_{1,1} = 1330$	0.2350
<b>2.(Componente fittizio)</b>	$\psi_{1,2} = 0$	0
<b>3.(Pompe di calore)</b>	$\psi_{1,3} = 781$	0.1380
<b>4.(Compressor chiller)</b>	$\psi_{1,4} = 63$	0.0112
<b>5.(CHP2+ABS chiller)</b>	$\psi_{1,5} = 1303$	0.2302
<b>6.(PV System)</b>	$\psi_{1,6} = 297$	0.0525

Tabella 19: Exergia distrutta e difetto di efficienza nello scenario alternativo

## 6 CONFRONTO SCENARI

La Tab.20 sintetizza i parametri exergetici, energetici ed ambientali in base ai quali è stata condotta l'analisi.

	$\Phi_{P,TOT}$ (kW)	$\Psi_{F,TOT}$ (kW)	$\Psi_{P,TOT}$ (kW)	$\Psi_{I,TOT}$ (kW)	$\eta_{ex,tot}$	$E_{PR}$ MWh	$CO_2$ t/anno
<b>Scenario base</b>	9085	$\Psi_{F,TOT} = 10695$	$\Psi_{P,TOT} = 2540$	$\Psi_{I,TOT} = 8487$	0.2065	6631	1646
<b>Scenario proposto</b>	9085	$\Psi_{F,TOT} = 5659$	$\Psi_{P,TOT} = 1885$	$\Psi_{I,TOT} = 3774$	0.3331	4886	1287

Tabella 20: Confronto scenari

E' importante sottolineare che, a parità di prodotto energetico nelle due configurazioni, lo scenario proposto prevede un miglioramento dell'efficienza exergetica globale (Analisi EXergetica), un minor consumo di energia primaria (Analisi ENergetica) ed un minor impatto ambientale espresso in termini di tonnellate di anidride carbonica emessa (Analisi Ambientale).

I risultati di ciascuna analisi sono illustrati negli istogrammi seguenti.

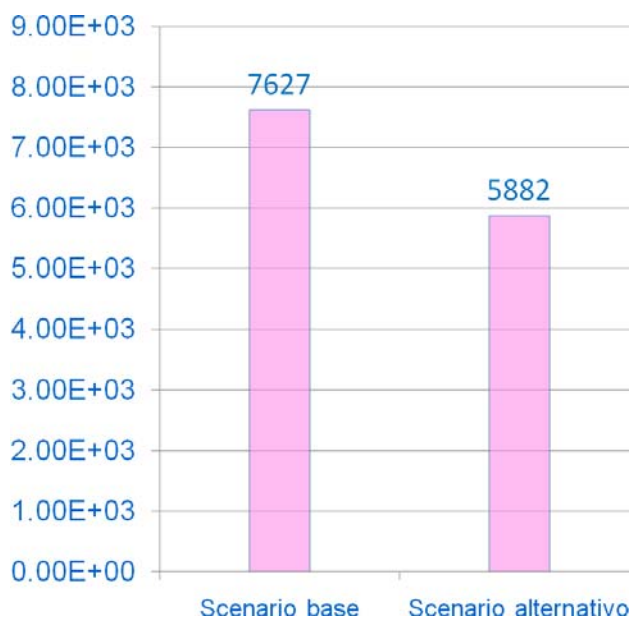


Figura 25: Confronto parametri energetici

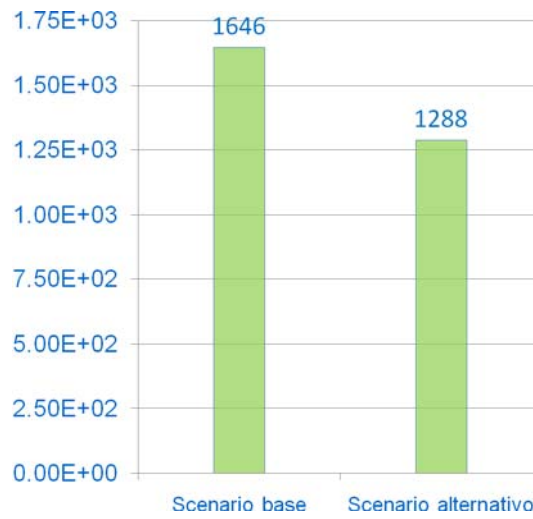


Figura 26: Confronto parametri ambientali

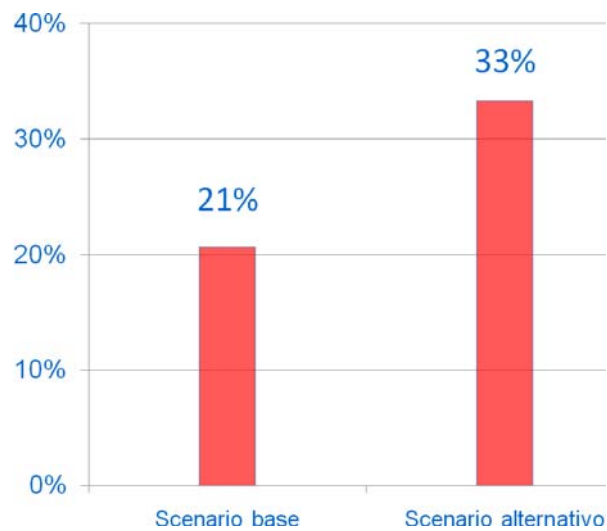


Figura 27: Confronto parametri exergetici

Si osserva che il fabbisogno di energia primaria si è ridotto del 23% grazie allo scenario alternativo, dello stesso ordine è la riduzione della CO<sub>2</sub> emessa che è del 22%. Riguardo l'efficienza exergetica si osserva un aumento significativo infatti si passa dal 21% al 33% che corrisponde a un incremento relativo di più di un terzo.

**BREVI OSSERVAZIONI CONCLUSIVE:**

Attraverso il suggerimento di interventi nei processi di produzione e gestione sostenibile dell'energia, il lavoro vuole fornire indicazioni di tutela ambientale e indirizzi per il governo del territorio, a tal fine la scelta di studiare ambiti urbani è apparsa la più naturale ed appropriata per ricercare ed applicare soluzioni utili a ridurre il nostro impatto ambientale e diminuire le emissioni da gas serra.

In conclusione questo lavoro ha raggiunto gli obiettivi prefissati :

- Sono state analizzate le principali caratteristiche dei sistemi energetici urbani
- E' stata approfondita una metodologia per lo studio dei suddetti sistemi
- E' stato sviluppato un caso studio che ha una caratteristica di replicabilità fondamentale per applicazioni reali dei metodi a realtà metropolitane più o meno estese e complesse; tale lavoro richiede una fase necessaria di acquisizione dei dati energetici e tecnologici, e una fase di elaborazione dei dati e di analisi dei risultati

## **7 RINGRAZIAMENTI**

La ricerca è stata realizzata grazie al sostegno della Fondazione TELIOS, società ONLUS che ha come obiettivo la diffusione e la promozione delle energie rinnovabili e della sostenibilità.

Si ringraziano il Prof. Massimo Santarelli e il Prof. Marco Torchio, del Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino per il coordinamento scientifico del progetto.

## 8 BIBLIOGRAFIA

[1] Alberto Clò, "Il rebus energetico", Il Mulino

[2] Università di Siena, Dipartimento di Scienze e Tecnologie chimiche e dei biosistemi, "Spin-Eco, studio di sostenibilità della provincia di Siena," Arca onlus

[3] Massimo Santarelli, "Considerazioni termodinamiche, economiche e ambientali nella analisi e ottimizzazione di sistemi energetici" Tesi di Dottorato, rel. Romano Borchiellini, Michele Calì Quaglia

[4] Gianni Comini-Giovanni Cortella, "Energetica generale", Sgeditoriali Padova

[5] DR 2.1a Report on methodology for energy performance assessment in the CONCERTO communities

[6] CONCAWE, EUCAR, Joint Research Center, "Well-To-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context ", 2007

[7] I dati di irraggiamento relativi al sito oggetto del CASE STUDY sono stati ricavati dal servizio di valutazione dell'irraggiamento locale fornito dal JOINT RESEARCH CENTRE di ISPRA tramite il servizio PVGIS