

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI
BOLOGNA - CAMPUS DI FORLÌ

FACOLTÀ DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
Corso di Studi in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Triennale

L'IMPIEGO DI MICROTURBINE A GAS PER LA GENERAZIONE DI
ENERGIA DOMESTICA: PROSPETTIVE E CAMPI DI
APPLICAZIONE INNOVATIVI

Relatore:

Prof. Ing. Enrico Corti

Presentata da:

Alessandro Fabbri

Correlatore:

Ing. Giacomo Silvagni

ANNO ACCADEMICO 2022/2023

Abstract

Questo studio esplora l'impiego delle microturbine a gas (MTG) per la generazione di energia domestica, analizzando le prospettive e i campi di applicazione innovativi. Le MTG rappresentano una soluzione compatta e versatile, in grado di soddisfare le esigenze energetiche di gruppi di abitazioni con efficacia ed efficienza.

Attraverso un'analisi delle tecnologie esistenti e delle tendenze di mercato, questo elaborato esamina le potenzialità delle MTG nel contesto dell'energia in ambito residenziale, focalizzandoci sui vantaggi in termini di riduzione dei costi energetici, impatto ambientale e sicurezza dell'approvvigionamento energetico. Inoltre, vengono analizzate le nuove frontiere di applicazione delle MTG, come l'integrazione con fonti rinnovabili e la cogenerazione.

L'indagine fornisce una panoramica dei campi di applicazione innovativi, offrendo spunti per la progettazione e l'implementazione di soluzioni avanzate nel settore della generazione di energia domestica. L'elaborato si conclude evidenziando le prospettive delle MTG nel panorama energetico domestico, sottolineando le sfide e le opportunità per l'adozione su larga scala di tale tecnologia.

Indice

- 1 Introduzione**
- 2 Fondamenti e principi di funzionamento delle microturbine a gas (MTG)**
 - 2.1 Componenti principali**
 - 2.1.1 Configurazioni dei rigeneratori
 - 2.1.2 Geometria delle superfici di scambio termico del rigeneratore
 - 2.2 Tipiche configurazioni delle MTG**
 - 2.3 Stato attuale della tecnologia**
 - 2.3.1 Microturbina Capstone
- 3 Applicazioni residenziali e commerciali**
 - 3.1 Utilizzo delle MTG in ambito residenziale
- 4 Cogenerazione**
 - 4.1 Impianti di cogenerazione: come vengono alimentati?
 - 4.2 Applicazioni degli impianti di cogenerazione
 - 4.2.1 Smart grid
 - 4.3 Quando conviene investire in un impianto di cogenerazione?
 - 4.4 Vantaggi e svantaggi della MCHP nell'utilizzo domestico
 - 4.4.1 Svantaggi economici
- 5 Combustibili e emissioni**
 - 5.1 Trattamento dei combustibili
 - 5.2 Gas naturale
 - 5.3 Emissioni inquinanti
 - 5.3.1 Tecnologie di controllo e abbattimento degli inquinanti
- 6 Materiali impiegati nelle MTG**
 - 6.1 Limiti dei materiali
- 7 Prospettive future**
- 8 Conclusioni**
- 9 Ringraziamenti**
- 10 Bibliografia e sitografia**

1 Introduzione

Nell'attuale panorama energetico globale, la ricerca di soluzioni innovative e sostenibili per la generazione di energia domestica è diventata una priorità imprescindibile. In questo contesto sempre più dinamico, l'impiego delle microturbine a gas emerge come un'opzione promettente, suscitando interesse e attenzione da parte di ricercatori e ingegneri del settore energetico. Questa ricerca si propone di esplorare in profondità le prospettive e i campi di applicazione innovativi legati all'utilizzo delle MTG nella generazione di energia domestica.

L'indagine approfondita su "*L'impiego di microturbine a gas per la generazione di energia domestica: prospettive e campi di applicazione innovativi*" mira ad approfondire le sfide e le opportunità che emergono da un approccio di avanguardia riguardo alla produzione di energia in ambito residenziale e domestico. Le MTG, con le loro dimensioni compatte, la flessibilità operativa ed efficienza, rappresentano una delle tecnologie più interessanti nel panorama della generazione distribuita di energia. Saranno quindi messi in luce i principi su cui si basano le MTG, l'efficienza energetica, l'impatto ambientale e le implicazioni economiche di questa tecnologia, al fine di fornire una visione chiara e completa delle potenzialità e delle limitazioni.

Inoltre, la ricerca si concentrerà sull'identificazione ed analisi dei diversi scenari applicativi che potrebbero emergere dall'adozione diffusa delle MTG nelle abitazioni, esplorando le sinergie con altre fonti energetiche rinnovabili, le opportunità di integrazione con reti intelligenti e le modalità di ottimizzazione della gestione energetica domestica.

2 Fondamenti e principi di funzionamento delle microturbine a gas (MTG) [2][4][5][7]

Nel corso di questo capitolo, analizzeremo la tecnologia delle MTG e i principi di funzionamento del sistema termodinamico. Dal ciclo aperto al ciclo combinato, esploreremo le diverse architetture delle MTG, ponendo in luce i meccanismi che le rendono così affascinanti e versatili.

Le MTG rappresentano una forma avanzata di tecnologia per la generazione di energia, caratterizzate da dimensioni compatte e un design efficiente. Il loro funzionamento si basa sui principi fondamentali della termodinamica e della fluidodinamica, offrendo una soluzione innovativa per la produzione di energia in ambienti residenziali, commerciali e industriali.

Le turbine a gas più elementari seguono un ciclo termodinamico chiamato “ciclo Brayton” (Figura 1) che in prima approssimazione può essere descritto da trasformazioni di compressione ed espansione reversibili e adiabatiche, perciò isoentropiche. Inoltre, non vi sono cadute di pressione tra i componenti per cui si può parlare di trasformazioni isobare.

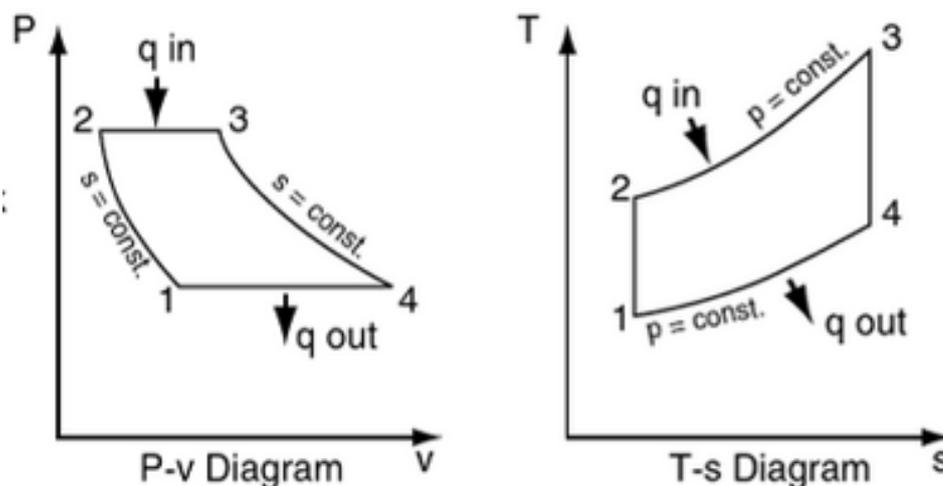


Figura 1: Diagramma pressione-volume e diagramma temperatura-entropia ciclo Brayton ideale [1]

Tale ciclo può essere schematizzato come aperto o chiuso (Figura 2), suddiviso in quattro fasi principali:

- **Compressione isoentropica:** in questa fase, l'aria ambiente viene compressa ad alta pressione nel compressore della turbina a gas. Questo processo avviene in modo isoentropico, il che significa che la temperatura dell'aria aumenta durante la compressione, ma senza scambio di calore con l'esterno.
- **Combustione isobara:** dopo la compressione, l'aria ad alta pressione passa attraverso una camera di combustione, dove viene miscelata con il combustibile

e si verifica la combustione. La combustione avviene a pressione costante, contribuendo a mantenere alta la pressione.

- **Espansione isoentropica:** l'aria calda e ad alta pressione prodotta dalla combustione viene fatta espandere attraverso la turbina. Questo processo avviene isoentropicamente, il che significa che la temperatura e la pressione diminuiscono durante l'espansione. La turbina converte l'energia cinetica dell'aria in lavoro meccanico, alimentando sia il compressore che altri dispositivi collegati (ad esempio, un generatore elettrico).
- **Scarico isobaro:** infine, i gas di scarico vengono espulsi a pressione costante.

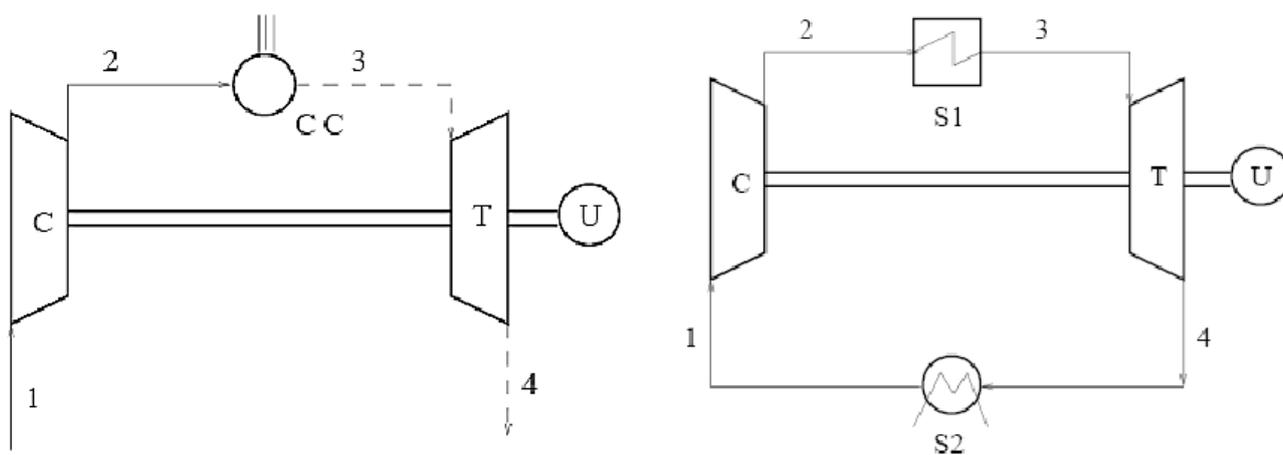


Figura 2: Schema di un impianto di turbina a gas a ciclo aperto e di un impianto di turbina a gas a ciclo chiuso [2]

Nel mondo reale però il funzionamento delle turbine non segue un ciclo termodinamico ideale, come il ciclo Brayton riportato in *Figura 1*, ma segue un “ciclo Brayton reale” a causa di attriti, turbolenze e altri fenomeni fisici e chimici che rendono tutto il processo non ideale con una conseguente diminuzione del rendimento complessivo.

Le MTG, d’altro canto, operano generalmente seguendo un ciclo termodinamico noto come "ciclo Brayton con rigenerazione" (*Figura 3*). Questo ciclo a differenza del ciclo Brayton semplice è caratterizzato da un processo di rigenerazione per migliorarne il rendimento complessivo, oltre alle stesse fasi principali: compressione, combustione, espansione e rigenerazione. Durante la fase di compressione, l'aria atmosferica viene compressa ad alta pressione prima di entrare nella camera di combustione. Qui, il combustibile viene iniettato e bruciato, generando gas ad alta temperatura. Questi gas ad alta energia vengono quindi espansi attraverso una turbina, generando lavoro utile, e infine, la rigenerazione con il fluido caldo in uscita dalla turbina che viene utilizzato per un preriscaldamento del fluido in uscita dal compressore, prima della

combustione, per migliorare l'efficienza complessiva del ciclo. Le macchine e i componenti che usualmente consentono di realizzare il ciclo Brayton sono:

- **Compressione:** il compressore è uno degli elementi chiave delle MTG. Questo dispositivo è responsabile della compressione dell'aria aspirata, aumentandone la pressione prima che entri nella camera di combustione. L'efficienza del compressore è cruciale per il rendimento complessivo dell'impianto, e le moderne MTG spesso impiegano compressori ad alta efficienza per massimizzare le prestazioni.
- **Combustione in camera:** la camera di combustione è il luogo dove avviene la reazione tra il combustibile e l'aria compressa. La combustione di una miscela combustibile-aria viene innescata da uno scintillatore, generando gas ad alta temperatura. Il controllo accurato di questo processo è essenziale per garantire una combustione completa e massimizzare l'efficienza energetica.
- **Espansione in turbina:** dopo la combustione, i gas ad alta temperatura entrano nella turbina, dove la loro espansione viene convertita in lavoro meccanico. La turbina è collegata al compressore mediante un albero di trasmissione, creando un sistema meccanicamente collegato.
- **Rigeneratore:** un aspetto distintivo delle MTG rispetto alle semplici turbine a gas è la rigenerazione, un processo in cui il calore residuo proveniente dai gas di scarico viene recuperato e reiniettato nel ciclo. Questo miglioramento termico aumenta l'efficienza complessiva dell'impianto, contribuendo a rendere le MTG una soluzione energetica maggiormente competitiva.

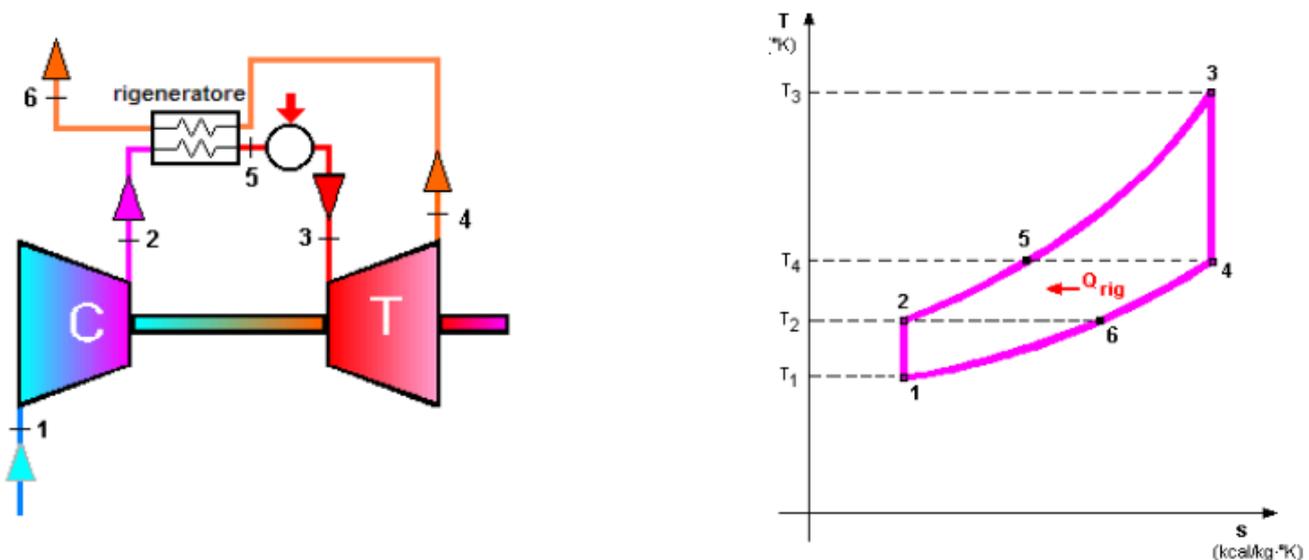


Figura 3: Schema funzionale e diagramma temperatura-entropia ciclo Brayton con rigenerazione [3]

2.1 Componenti principali [8]

Le MTG sono dispositivi compatti che svolgono un ruolo chiave nella generazione di energia distribuita. Comprendono vari componenti che collaborano sinergicamente per convertire l'energia del combustibile in potenza elettrica, con un'attenzione particolare alla massimizzazione dell'efficienza complessiva. Ecco una panoramica dettagliata dei principali componenti di una microturbina a gas:

➤ **Compressore centrifugo** (*Figura 5*):

- *Funzione*: il compressore è il primo componente di una microturbina a gas. Si occupa di comprimere l'aria ambiente aspirata dall'esterno, aumentando la pressione prima di introdurla nel sistema (con rapporti di compressione variabili da 3 a 9 solitamente). Il rapporto di compressione influisce pesantemente sul rendimento (*Figura 4*) e si può “scegliere” consentendo di massimizzare le prestazioni, ovviamente rimanendo nei limiti meccanici e termici dei componenti:

$$r_c = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_4}$$

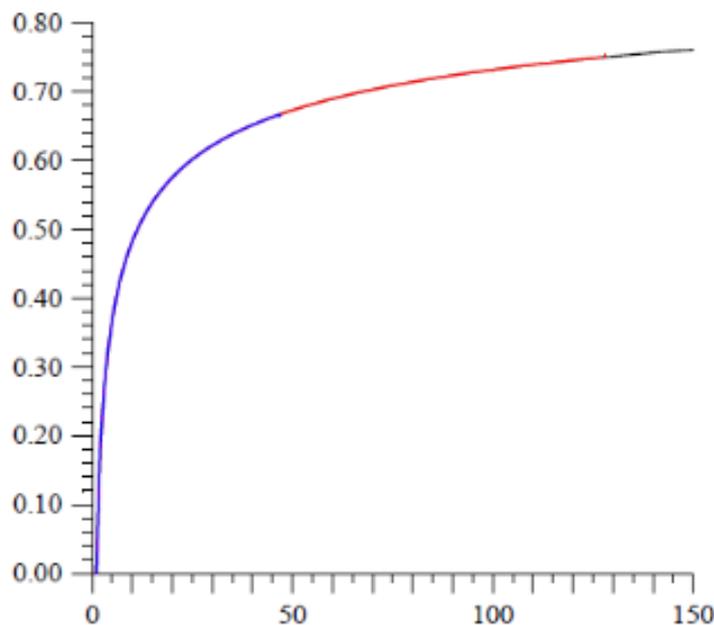


Figura 4: Rendimento termodinamico in funzione del rapporto di compressione [35]

- *Descrizione*: il compressore all'interno di una microturbina a gas è progettato con un'architettura che solitamente comprende un albero rotante accoppiato ad una serie di pale. Queste pale sono strategicamente disposte lungo l'albero e operano con un movimento radiale durante la rotazione. Il loro compito principale è quello di comprimere l'aria proveniente dall'ambiente. Mentre l'albero ruota, le pale agiscono

sulla massa d'aria, aumentandone la pressione e preparandola per il successivo stadio del processo, che consiste nell'ingresso nella camera di combustione.



Figura 5: Stadio del compressore centrifugo [6]

➤ **Combustore:**

- Funzione: il combustore è responsabile della combustione del combustibile miscelato con l'aria compressa, generando così gas di combustione ad alta temperatura.
- Descrizione: nella camera di combustione, il combustibile (solitamente gas naturale) viene miscelato con l'aria compressa e quindi bruciato. La reazione di combustione aumenta la temperatura dei gas, preparandoli per l'espansione successiva attraverso la turbina.

➤ **Turbina centripeta (Figura 6):**

- Funzione: la turbina centripeta converte l'energia termica dei gas di combustione in energia meccanica.
- Descrizione: la turbina è costituita da una serie di stadi, ognuno dei quali comprende una serie di pale montate su un albero rotante. L'espansione dei gas attraverso la turbina fa girare l'albero, generando così l'energia meccanica necessaria per azionare il compressore e il generatore.



Figura 6: Turbine a flusso radiale [6]

➤ **Generatore elettrico:**

- Funzione: questa particolare macchina elettrica è progettata per convertire lavoro meccanico in energia elettrica, seguendo il principio fondamentale delle macchine elettriche, noto come legge di Lorentz.
- Descrizione: dalla legge di Lorentz la forza (F) generata è proporzionale al prodotto del campo magnetico (B), della corrente (I) che attraversa il filo e della lunghezza del filo (L):

$$F = L \cdot B \cdot I$$

Nel contesto specifico di una microturbina a gas, il generatore produce una corrente ad alta frequenza, tipicamente nell'intervallo di 1400-1500 Hz. Tuttavia, per poter utilizzare questa energia elettrica in applicazioni standard, come nell'alimentazione di reti elettriche domestiche, è necessario convertire questa corrente ad alta frequenza in una corrente alternata a frequenze più basse, generalmente a 50-60 Hz. Questa conversione avviene attraverso l'impiego di dispositivi elettronici specializzati, come raddrizzatori e inverter (*Figura 7*), che adattano la frequenza della corrente generata dalla microturbina alla norma comune degli impianti elettrici.

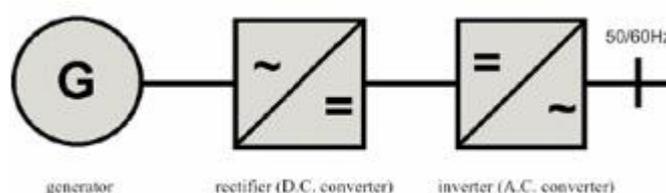


Figura 7: Esempio di sistema di conversione [6]

L'omissione di un riduttore di velocità contribuisce a potenziare l'affidabilità meccanica del dispositivo e a minimizzare le dispersioni di potenza derivanti dalla presenza di meno componenti meccanici mobili. Questa caratteristica si rivela particolarmente vantaggiosa nelle applicazioni cogenerative, consentendo di mantenere elevati livelli di efficienza elettrica anche a carichi parziali. Al contrario, i sistemi di generazione convenzionali sperimentano significativi cali di prestazioni quando non operano a pieno carico.

Descrivere il funzionamento di una macchina elettrica risulta complesso a causa della sua natura multifattoriale, caratterizzata da diversi parametri. Tuttavia, è possibile categorizzare questi parametri in tre gruppi principali:

- **Limiti meccanici:** riguardano le restrizioni legate alla resistenza e alla robustezza delle componenti meccaniche, contribuendo così a garantire un funzionamento sicuro e affidabile.
- **Limiti termici:** coinvolgono le temperature massime sostenibili senza compromettere le prestazioni. Nel contesto di un generatore comune ad esempio, la temperatura massima di 250 °C rappresenta un parametro critico.
- **Limiti elettromagnetici:** considerano le restrizioni associate all'interazione elettromagnetica all'interno del generatore. Ad esempio, un generatore sincrono a magneti permanenti (*PMSG*), da 2 o 4 poli e con magneti contenuti in una matrice in fibra di carbonio (*Figura 8*) è un'opzione efficace, in grado di operare efficientemente anche a temperature superiori a 250°C, dove altri tipi di generatori non riescono ad arrivare.

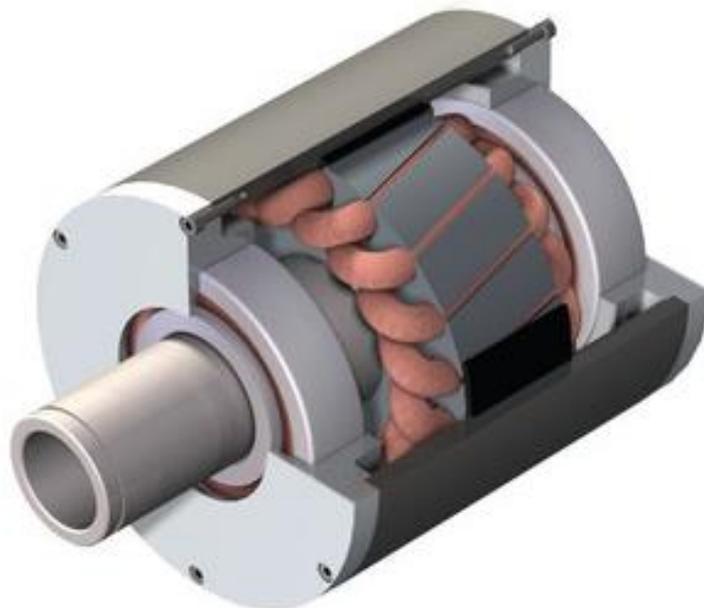


Figura 8: Generatore a magneti permanenti (PMSG) [31]

Oltre a questi parametri il progettista dovrà necessariamente considerare anche la curva caratteristica del generatore (*Figura 9*), che relaziona lunghezza, diametro, velocità di rotazione e potenza generata.

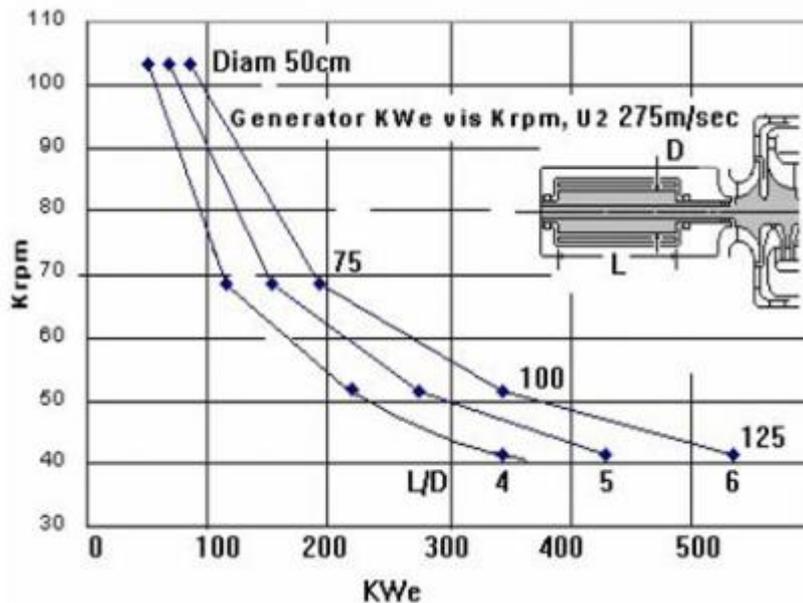


Figura 9: Curve caratteristiche di un generatore [6]

➤ **Albero di trasmissione:**

- Funzione: l'albero di trasmissione collega meccanicamente il compressore, la turbina e il generatore.
- Descrizione: l'albero trasmette il moto rotativo dalla turbina al compressore e al generatore, garantendo così che l'energia meccanica sia trasferita in modo efficiente attraverso i vari componenti del sistema. Date le alte velocità di rotazione l'albero di trasmissione è sostenuto da cuscinetti ad aria o magnetici.

➤ **Sistema di controllo e monitoraggio (power conditioning) [11]:**

- Funzione: questo sistema è responsabile del monitoraggio e del controllo delle operazioni della microturbina, garantendo un funzionamento sicuro ed efficiente.
- Descrizione: il sistema di controllo e monitoraggio utilizza sensori e dispositivi di rilevamento per misurare vari parametri operativi, come temperatura, pressione e velocità di rotazione. Le informazioni raccolte sono utilizzate per regolare la combustione, il carico, la velocità della turbina e altri parametri chiave per ottimizzare le prestazioni. L'impiego di un sistema di "power conditioning" consente di convertire efficientemente la corrente ad alta frequenza prodotta dall'alternatore in bassa frequenza, indipendentemente dal regime di rotazione. Questa trasformazione avviene attraverso una serie di passaggi, mantenendo elevata l'efficienza complessiva del dispositivo (con un rendimento di conversione all'incirca del 80-90%). La variabilità nella velocità di rotazione offre una libertà

operativa che contribuisce a mitigare il noto declino delle prestazioni a carichi parziali, una caratteristica spesso problematica nelle turbine a gas. Questa flessibilità è di grande importanza, soprattutto nei contesti cogenerativi, dove la necessità di adattarsi ai carichi richiesti dagli utenti è frequente.

➤ **Recuperatore (o rigeneratore):**

- *Funzione:* il recuperatore è un componente chiave nel migliorare l'efficienza complessiva della microturbina. Sfrutta il calore dei gas di scarico per preriscaldare l'aria compressa in ingresso, riducendo così la quantità di energia richiesta per il processo di combustione.
- *Descrizione:* il recuperatore è un tipo di scambiatore di calore situato tra la camera di combustione e il compressore. I gas di scarico caldi passano attraverso il recuperatore, trasferendo il calore all'aria in ingresso. Questo processo è essenziale per ottimizzare l'efficienza termica complessiva perché se l'aria viene preriscaldata è necessaria una quantità minore di combustibile per raggiungere la temperatura ideale di ingresso in turbina, permettendo un risparmio di combustibile di circa il 40% rispetto ad una configurazione senza rigeneratore.

2.1.1 Configurazioni dei rigeneratori [6]

Oggi esistono diverse configurazioni di rigeneratori caratterizzate da affidabilità ed efficienza adeguate ad integrarsi con successo nelle microturbine. Nel processo di progettazione di un rigeneratore per le MTG, la libertà di stabilire la configurazione dello scambiatore è vincolata da diverse considerazioni chiave. Questi vincoli includono: la necessità di allineare la direzione dei flussi di gas con il resto del sistema, il requisito di un accoppiamento chiuso con le macchine rotanti per formare un sistema compatto, l'introduzione di un condotto di by-pass per il fluido caldo.

In termini di configurazioni, ne esistono principalmente due tipologie. La prima, chiamata "Anular Wrap-Around Recuperator" (*Figura 10*), si caratterizza per un accoppiamento chiuso e compatto tra le macchine rotanti e lo scambiatore di calore rigenerativo. Questa configurazione offre vantaggi come una buona aerodinamica dei flussi di gas, con conseguenti basse perdite di carico, una ridotta emissione di rumore e l'eliminazione di condotti esterni e dispositivi di dilatazione termica.

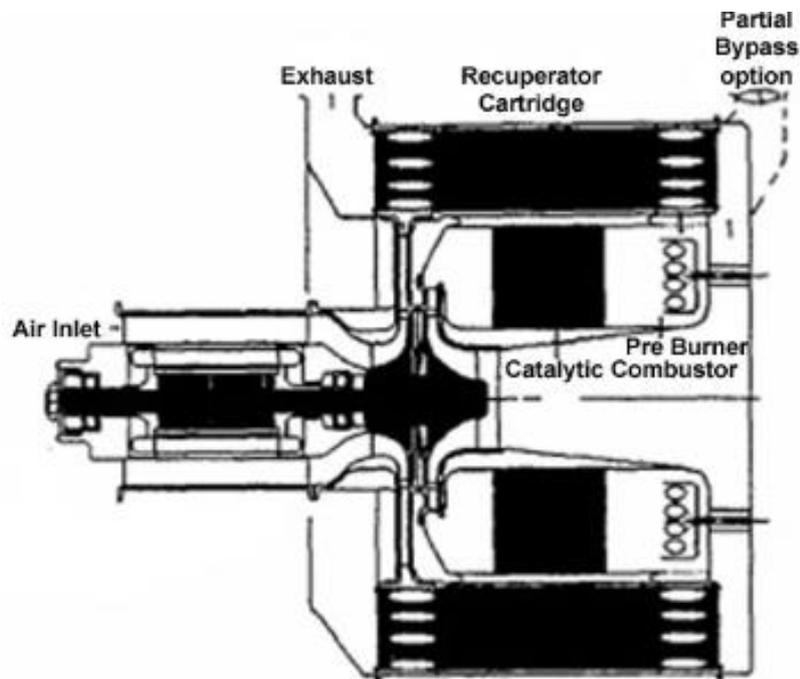


Figura 10: Rigeneratore di tipo Anular Wrap-Around [6]

La seconda tipologia, chiamata "Rear-Mounted Recuperator" (Figura 11), prevede l'installazione di un rigeneratore convenzionale a forma di cubo dietro e in linea con le macchine rotanti. Questo approccio è adatto sia per combustori tubolari che anulari e risulta vantaggioso in situazioni in cui è necessario un facile by-pass dei gas caldi per applicazioni cogenerative, l'utilizzo di un combustore esterno o scambiatore di calore per bruciare combustibili derivanti da biomasse, e l'accoppiamento con le celle a combustibile.

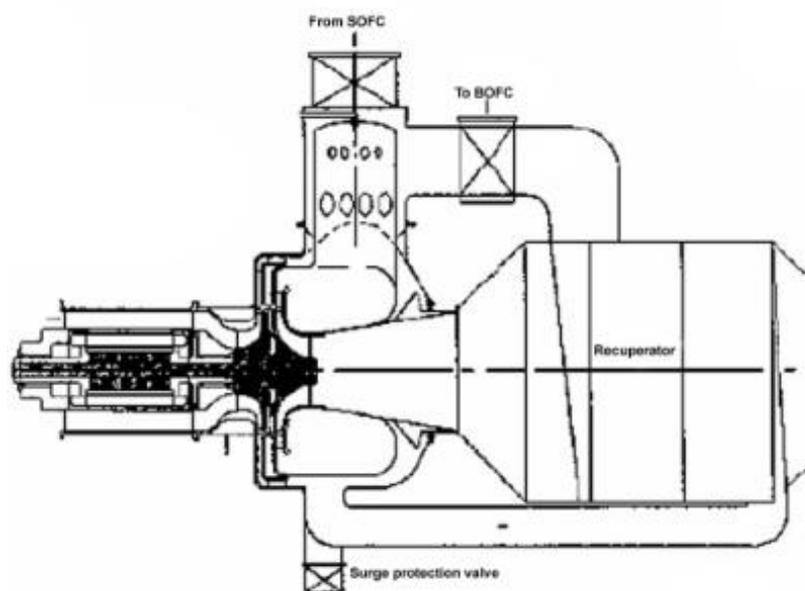


Figura 11: Rigeneratore di tipo Rear mounted [6]

2.1.2 Geometria delle superfici di scambio termico del rigeneratore [6]

Attualmente, si riscontrano due principali categorie di rigeneratori impiegati nelle microturbine a gas, entrambi caratterizzati da dimensioni compatte e elevate efficienze, mantenendo allo stesso tempo un costo ragionevole.

Vi sono due tipiche configurazioni: il primo tipo è rappresentato dal rigeneratore a superficie primaria (*Figura 12*), il secondo è il rigeneratore dotato di superficie alettata (*Figura 13-14*).



Figura 12: Rigeneratore con superficie di tipo primaria [6]

Nei rigeneratori a superficie primaria, l'intera superficie si dimostra al 100% efficace.

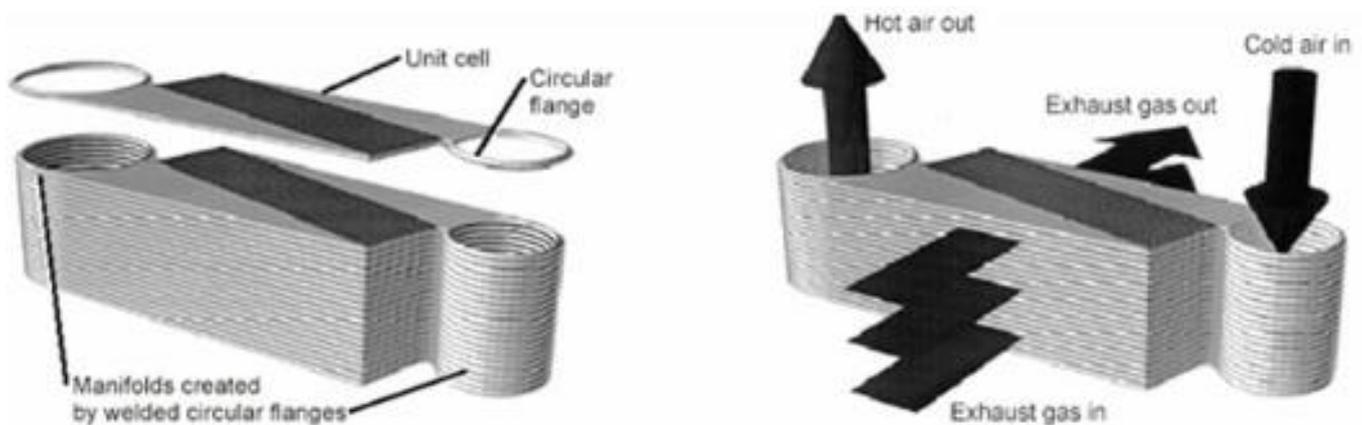


Figura 13: Rigeneratore con superficie di tipo alettata [6]



Figura 14: Profilo delle superfici alettate [6]

Parallelamente, occorre menzionare i rigeneratori con superficie alettata. Nel corso del tempo, le prestazioni e l'integrità strutturale di questi rigeneratori hanno continuato a migliorare costantemente, trovando applicazione in una vasta gamma di contesti nelle MTG.

2.2 Tipiche configurazioni delle MTG [8]

Le tipiche configurazioni delle MTG variano in base a diversi fattori, compresi i requisiti di potenza, l'efficienza energetica e l'utilizzo previsto del calore generato. Ecco alcune delle configurazioni più comuni:

- **Ciclo aperto (simple cycle):** questa configurazione è la più basilare, caratterizzata da una MTG che opera senza alcun sistema di recupero del calore. Dopo la combustione, i gas di scarico vengono direttamente espulsi nell'ambiente. Questo approccio è semplice ed economico, ma ha un'efficienza energetica evidentemente inferiore rispetto alle configurazioni a ciclo combinato.
- **Ciclo combinato (combined cycle):** la configurazione a ciclo combinato integra un recuperatore, che sfrutta il calore dei gas di scarico per preriscaldare l'aria in ingresso. Questo miglioramento termico aumenta l'efficienza complessiva del ciclo. In alcuni casi, i gas di scarico raffreddati vengono ulteriormente utilizzati per applicazioni di cogenerazione o per generare vapore, contribuendo a massimizzare l'utilizzo dell'energia termica.
- **Sistemi cogenerativi (Combined Heat and Power - CHP):** le MTG in configurazione *CHP* sono progettate per massimizzare sia la produzione di energia elettrica che l'utilizzo del calore. Questo tipo di impianto è spesso impiegato in applicazioni industriali o residenziali, dove la necessità di riscaldamento o di processi termici è significativa.
- **Configurazioni a uno o due alberi:** le MTG possono essere progettate con un singolo albero o due alberi. Nei modelli a unico albero, una singola turbina di espansione aziona sia il compressore che il generatore. Nei modelli a due alberi, una turbina guida il compressore, mentre una seconda turbina alimenta il

generatore. Questa suddivisione consente di ottimizzare la velocità di funzionamento delle diverse sezioni, migliorando l'efficienza complessiva.

2.3 Stato attuale della tecnologia

Al giorno d'oggi, lo stato della tecnologia delle MTG è caratterizzato da notevoli progressi e una crescente adozione in una varietà di settori grazie alla loro dimensione compatta e versatilità operativa, ma anche grazie ad altre particolarità con cui vengono caratterizzate:

Efficienza energetica avanzata: grazie a continui miglioramenti nella progettazione e nell'ingegneria, le MTG hanno raggiunto livelli elevati di efficienza energetica. Uno dei pilastri fondamentali di questo successo è proprio l'implementazione dei recuperatori, che sfruttano in modo “intelligente” il calore proveniente dai gas di scarico. Questa tecnologia avanzata ha consentito di ottimizzare il ciclo termodinamico, migliorando sensibilmente l'efficienza complessiva delle microturbine con valori nell'intervallo tra 70-85%.

Integrazione con tecnologie avanzate: la vera forza delle MTG risiede nella loro capacità di integrarsi con tecnologie all'avanguardia. Sistemi di controllo computerizzati, sensori intelligenti e dispositivi di monitoraggio remoto sono diventati parte integrante di queste unità, permettendo un funzionamento più efficiente, diagnostica predittiva e gestione ottimizzata delle prestazioni. Questa sinergia tra hardware avanzato e intelligenza computazionale sta definendo un nuovo standard di affidabilità ed efficienza delle microturbine.

Uso in applicazioni distribuite: le MTG stanno rivoluzionando il concetto di generazione di energia distribuita. La loro adozione è ormai comune in settori critici come l'industria manifatturiera, l'edilizia, l'oil&gas, i data center e gli impianti di cogenerazione. La presenza diffusa di queste tecnologie contribuisce in modo significativo a migliorare l'affidabilità delle reti energetiche locali, garantendo un approvvigionamento energetico stabile e maggiormente efficiente.

Minore impatto ambientale: in un'epoca in cui la sostenibilità ambientale è al centro delle preoccupazioni globali, le microturbine a gas emergono come soluzioni volte alla riduzione delle emissioni. Con la preferenza per combustibili a minor impatto ambientale, come il gas naturale, e grazie a progettazioni avanzate dei combustori, queste tecnologie sono diventate estremamente vicine alle tematiche della transizione “green”. La loro contribuzione alla riduzione delle emissioni è fondamentale per un futuro approvvigionamento energetico sostenibile.

Ricerca e sviluppo continuo: l'industria delle MTG non si ferma mai nel perseguire l'eccellenza. Investimenti massicci in ricerca e sviluppo sono indirizzati verso l'ulteriore miglioramento delle prestazioni, la riduzione dei costi e la soluzione di sfide specifiche. L'ottimizzazione della progettazione dei componenti, il continuo affinamento del ciclo termodinamico e l'esplorazione di nuovi materiali sono solo alcune delle molte aree di ricerca che alimentano questo costante progresso.

Applicazioni cogenerative (CHP): un altro aspetto chiave delle MTG è la loro versatilità nelle applicazioni cogenerative (*CHP*) o più precisamente chiamate microcogenerazione (*MCHP*). La capacità di utilizzare il calore generato durante il processo di generazione di energia per scopi termici (in aggiunta al normale utilizzo elettrico), come il riscaldamento degli edifici o processi industriali, massimizza l'utilizzo dell'energia prodotta dalle MTG (nell'ordine del 60-80%). Questa caratteristica contribuisce significativamente a una maggiore efficienza complessiva del sistema.

2.4.1 Microturbina Capstone [1][2]

Uno degli esempi più significativi di microturbine per la cogenerazione è rappresentato dalla MTG Capstone C30 (*Figura 15*). Questa particolare turbina è progettata per generare fino a 30 kW di potenza elettrica e 85 kW di potenza termica. Il suo funzionamento può avvenire sia in modalità indipendente che collegata alla rete elettrica nazionale; Questo modello di MTG è progettato per operare in maniera modulare, consentendo l'installazione di più unità per soddisfare le esigenze energetiche specifiche di un'applicazione. Inoltre, è progettata con la capacità di adattarsi a variazioni di carico che le rende adatte a contesti in cui la richiesta di energia è fluttuante nel tempo offrendo così una maggior flessibilità d'uso (sia in contesti industriali che in contesti domestici). A regime massimo, questa microturbina raggiunge un'efficienza elettrica che può superare il 30%.

Sono caratterizzate da un assemblaggio dei componenti che mira a semplificare le operazioni di manutenzione, essenziale in ambienti in cui non è possibile mantenere l'impianto inattivo (anche per brevi periodi) massimizzando la disponibilità di energia.

Inoltre, sono dotate di sistemi di controllo avanzati che consentono il monitoraggio remoto delle prestazioni. Questa funzionalità permette un'analisi in tempo reale delle condizioni operative, facilitando la diagnosi dei problemi e ottimizzando le prestazioni dell'impianto



Figura 15: MTG Capstone C30 per la microgenerazione [29]

Molti modelli di microturbine Capstone hanno ottenuto certificazioni ambientali che confermano il loro impegno per la sostenibilità. L'uso di fonti di combustibile più pulite e le ridotte emissioni contribuiscono agli sforzi per ridurre l'impatto ambientale della produzione di energia. Inoltre, quando si tratta di produzione combinata di calore ed elettricità, si possono ottenere rendimenti fino all'85%.

3 Applicazioni residenziali e commerciali

Le MTG stanno guadagnando popolarità nelle applicazioni residenziali grazie alla loro versatilità e efficienza. Uno dei principali utilizzi è la generazione di energia elettrica, fungendo sia da fonte principale che di backup durante interruzioni di rete. La capacità di operare in modo continuo assicura un approvvigionamento energetico costante per le abitazioni. Un elemento distintivo delle microturbine è la loro capacità di cogenerazione, ovvero la produzione simultanea di elettricità e calore. Questo aspetto le rende ideali per il riscaldamento domestico, consentendo l'utilizzo del calore residuo per riscaldare l'acqua o gli ambienti. Questa integrazione migliora l'efficienza energetica complessiva, riducendo i costi e l'impatto ambientale delle richieste energetiche quotidiane. La dimensione compatta delle microturbine le rende adatte anche per spazi limitati nei contesti residenziali. Inoltre, la bassa rumorosità operativa garantisce un comfort abitativo senza disturbi e rumori eccessivi. Per migliorare ulteriormente l'efficienza, le microturbine possono essere integrate con altre fonti di energia rinnovabile come pannelli solari, creando soluzioni energetiche ibride sostenibili per le abitazioni: ad esempio durante le ore di luce solare la produzione di energia può essere dominata dai pannelli solari senza utilizzare le microturbine; inoltre, l'elettricità prodotta dai pannelli solari può essere integrata con quella prodotta dalle microturbine se la richiesta di energia aumenta notevolmente. Questo approccio contribuisce a ridurre la dipendenza dalle fonti tradizionali e promuove un approvvigionamento energetico sostenibile.

Le MTG trovano applicazioni significative anche in contesti commerciali; un settore chiave è rappresentato dall'alimentazione di piccole imprese, uffici, ristoranti e complessi commerciali. La capacità delle microturbine di generare elettricità e calore simultaneamente le rende un'opzione attraente per soddisfare il fabbisogno energetico costante di tali strutture. Nell'industria alberghiera, le microturbine contribuiscono al riscaldamento delle camere e alla fornitura di acqua calda sanitaria, fornendo soluzioni energetiche autonome ed efficienti. Anche nelle piccole e medie imprese manifatturiere, le microturbine possono alimentare impianti e macchinari, adattandosi alle esigenze di produzione variabili. La flessibilità operativa delle microturbine consente loro di rispondere rapidamente alle variazioni di carico, risultando particolarmente adatte per le strutture commerciali con picchi di domanda energetica. Ciò contribuisce a ottimizzare i costi operativi e a massimizzare l'efficienza energetica.

Un aspetto chiave per entrambe le applicazioni è la considerazione dei costi iniziali e del ritorno sull'investimento (*ROI*). Nonostante gli investimenti iniziali possano essere significativi (per applicazioni residenziali, 3-15kW, i costi potrebbero variare da

20'000 a 100'000 euro, mentre per applicazioni commerciali, 30-100kW, siamo in un range che va da 100'000 a oltre 500'000 euro), valutare i risparmi energetici e la possibilità di vendere elettricità, prodotta in eccesso, alla rete urbana può rendere le microturbine un'opzione economicamente vantaggiosa nel tempo.

4 Cogenerazione [13][22]

La cogenerazione rappresenta la produzione simultanea di energia elettrica e calore, realizzata in un unico impianto.

Solitamente, energia elettrica e termica vengono generate separatamente. Le centrali termoelettriche (*Figura 16*), ad esempio, producono energia elettrica ma disperdono in ambiente energia termica a bassa temperatura. Al contrario, le caldaie convertono il combustibile (alto valore termodinamico) in energia termica con basso valore termodinamico.

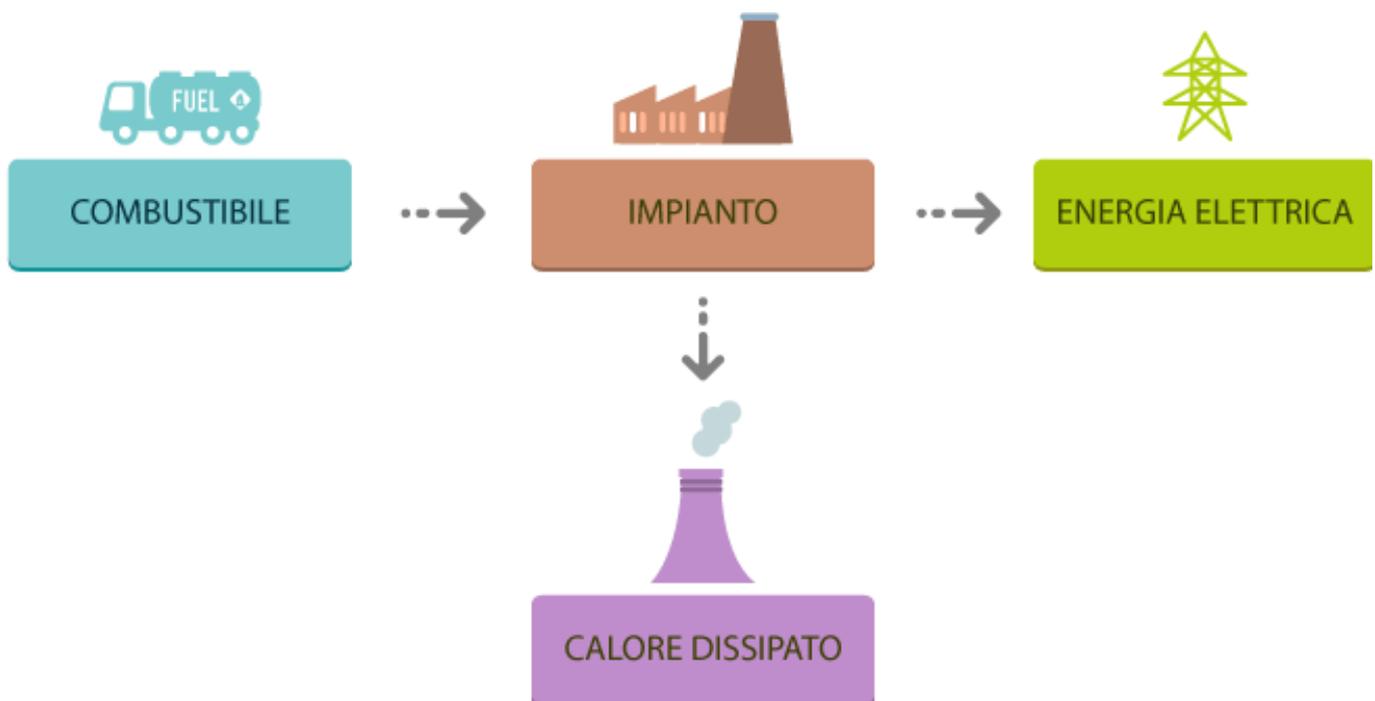


Figura 16: Schema funzionale di un impianto termoelettrico alimentato a combustibile [30]

Nel contesto della cogenerazione, quando un utilizzatore richiede contemporaneamente energia elettrica e termica, potrebbe risultare conveniente sostituire l'installazione di una caldaia e l'acquisto di energia elettrica dalla rete con un sistema integrato, ovvero un impianto cogenerativo. Questo impianto produrrà sia energia elettrica che energia termica, generando un risparmio energetico grazie ad un utilizzo più efficiente del combustibile.

Gli impianti di cogenerazione (*Figura 17*) nascono dall'idea di sfruttare il calore disperso durante la produzione di energia elettrica. L'energia elettrica della quale si sta parlando proviene da impianti motori termici, dove il calore, attraverso un ciclo termodinamico, si trasforma prima in energia meccanica e poi in energia elettrica tramite generatori. Nel processo, non tutto il calore può essere convertito in "lavoro" a causa del secondo principio della termodinamica, e una parte deve essere dissipata

(sotto forma di vapore o fumi di scarico) per mantenere il funzionamento del sistema. Questa parte di calore non sfruttato viene recuperata per la cogenerazione, trovando applicazione sia nell'industria (generalmente sotto forma di vapore) che nell'uso civile (riscaldamento degli edifici).

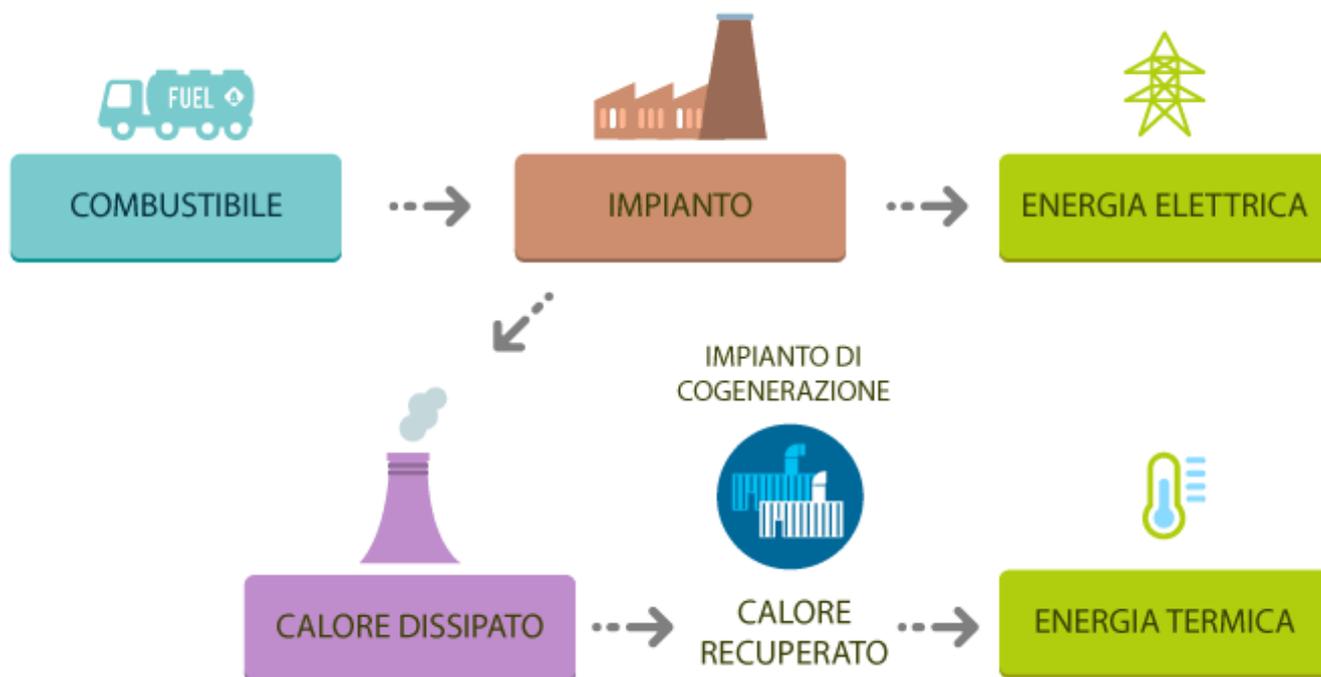


Figura 17: Schema funzionale di un impianto di cogenerazione [30]

È essenziale evidenziare il fatto che il calore disperso non può essere recuperato al 100% e una parte continua a disperdersi anche nel ciclo di produzione combinata. Un impianto può essere classificato come "impianto di cogenerazione" solo se soddisfa specifici indicatori di prestazione stabiliti dall'Autorità per l'Energia Elettrica (AEEG):

- **Efficienza totale del ciclo (Overall Efficiency):** rappresenta la percentuale di energia primaria utilizzata che viene convertita in energia elettrica e termica. Per essere considerato un impianto di cogenerazione, l'efficienza totale del ciclo deve essere significativamente superiore (70-80%) a quella di impianti separati per la produzione di elettricità e calore (spesso inferiori al 40%).
- **Rapporto di utilizzo calore-elettricità (CCHP ratio):** rapporto tra la quantità di calore prodotto e l'elettricità generata. Un alto rapporto indica che l'impianto sta massimizzando l'utilizzo del calore come sottoprodotto.
- **Fattore di carico del calore (Heat Load Factor):** rappresenta la percentuale di carico termico rispetto al carico elettrico. In un impianto di cogenerazione, si mira a bilanciare e ottimizzare l'utilizzo di calore ed elettricità in base alle esigenze dell'applicazione.

Questi indicatori mirano a garantire un effettivo risparmio di combustibile e a evitare uno sbilanciamento eccessivo verso la sola produzione di energia elettrica.

4.1 Impianti di cogenerazione: come vengono alimentati? [36]

All'interno di un sistema di cogenerazione, è possibile utilizzare diverse fonti di combustibile, rappresentanti l'energia primaria:

- Fonti fossili come gas naturale, gasolio, olio combustibile e carbone.
- Combustibili derivanti da rifiuti, come quelli solidi o il biogas proveniente da discariche o impianti di depurazione.
- Biomasse, tra cui cippato legnoso, scarti agricoli e forestali.

Gas naturale e biogas sono particolarmente idonei per alimentare le microturbine. Al contrario, il carbone e le biomasse legnose trovano applicazione principalmente nelle turbine a vapore di grandi dimensioni o nei turbogeneratori *ORC*.

I combustibili gassosi risultano adatti anche per impianti di grandi dimensioni a ciclo combinato o, nel caso di idrogeno, per la “generazione distribuita”. Questa diversificazione nelle fonti di combustibile consente una flessibilità nell’adattamento del sistema di cogenerazione in base alle esigenze specifiche e alle caratteristiche dei diversi motori e generatori utilizzati.

Per avere dei riscontri quantitativi, si possono identificare degli indicatori che forniscono un'idea sull'efficienza dell'utilizzo del combustibile impiegato, tra cui:

- Il rendimento elettrico:

$$\eta_{el} = \frac{L_u}{m_c \cdot H_i} \quad [36]$$

- Il rendimento termico:

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{m_c \cdot H_i} \quad [36]$$

È inoltre possibile calcolare un indice di utilizzo totale del combustibile, *FUF* (*Fuel Utilization Factor*), per l'intero impianto, inclusa la cogenerazione (utilizzando il potere calorifico inferiore):

$$FUF = \frac{L_u + Q_u}{m_c \cdot H_i} \quad [36]$$

Tuttavia, va notato che il *FUF* non può essere considerato un rendimento, perché confronta grandezze di natura diversa. Inoltre, potrebbe presentare valori elevati

anche in presenza di impianti a basso rendimento complessivo. Perciò si utilizza un altro indice, il *PES*, cioè il *risparmio di energia primaria*:

$$PES = \left(1 - \frac{1}{\frac{CHPH_{\eta}}{R_{ef} \cdot H_{\eta}} + \frac{CHPE_{\eta}}{R_{ef} \cdot E_{\eta}}} \right) \cdot 100 \quad [36]$$

dove:

- $CHPH_{\eta} = \frac{H_{CHP}}{F_{CHP}}$ cioè l'energia termica prodotta dall'impianto di cogenerazione in rapporto al combustibile utilizzato da tale impianto;
- $CHPE_{\eta} = \frac{E_{CHP}}{F_{CHP}}$ cioè l'energia elettrica prodotta dall'impianto di cogenerazione in rapporto al combustibile utilizzato da tale impianto;
- $R_{ef} \cdot H_{\eta}$ cioè il valore del rendimento per la sola produzione di energia termica (calore);
- $R_{ef} \cdot E_{\eta}$ cioè il valore del rendimento per la sola produzione di energia elettrica.

Questa formula consente di misurare il risparmio ottenuto in termini di input energetico (energia di alimentazione) mediante la produzione combinata di output, confrontata con la potenziale produzione separata. Tale confronto avviene in impianti con rendimenti pari a $R_{ef} \cdot H_{\eta}$ (produzione separata di calore) e $R_{ef} \cdot E_{\eta}$ (produzione separata di energia elettrica), mantenendo l'output costante. Questo valore può raggiungere il 25-35% in meno rispetto agli impianti convenzionali, svolgendo un ruolo chiave nello sviluppo dei sistemi di cogenerazione. Questi impianti stanno diventando sempre più cruciali nell'ottica di razionalizzare l'uso dell'energia e ridurre i consumi complessivi. Il parametro in questione è uno degli indicatori più rilevanti per valutare il risparmio di energia primaria di un impianto di cogenerazione.

Inoltre, il *PES* rappresenta un indice cruciale per qualificare un impianto come *Cogenerazione ad Alto Rendimento (CAR)* (Figura 18). Gli impianti *CAR* godono di diversi vantaggi secondo la normativa vigente, tra cui l'esenzione dall'obbligo di acquisto di certificati verdi (CV) e la possibilità di partecipare al servizio di scambio sul posto.

Taglia Unità	PES
>1 MWe	≥ 10 %
Unità di piccola cogenerazione (>50 kWe ≤1MWe)	> 0
Unità di micro cogenerazione (≤ 50 kWe)	> 0

Figura 18: PES minimi per ritenere l'impianto di CAR [36]

4.2 Applicazioni degli impianti di cogenerazione

Dagli anni '80, la cogenerazione è stata una soluzione adottata principalmente dalle grandi industrie per ottimizzare l'efficienza nella produzione di energia, anche se i costi elevati hanno limitato il suo utilizzo, rendendone difficile l'utilizzo privato e su piccola scala. Tuttavia, con l'avanzare delle tecnologie e l'aumento dei costi energetici, la cogenerazione si è evoluta, diventando più accessibile anche per piccole e medie industrie, strutture ospedaliere e residenziali.

Oggi, la cogenerazione trova applicazioni variegata, sia nell'ambito industriale, dove spesso funge da sistema di autoproduzione, sia in quello civile. L'energia termica prodotta può essere impiegata per processi industriali o per il riscaldamento urbano tramite reti di teleriscaldamento, mentre l'energia elettrica può essere consumata localmente o ceduta alla rete di distribuzione “intelligenti” anche chiamate *smart grid* (o più propriamente, rispetto alle MTG, *microgrid*) (Figura 20).

I settori che traggono maggior beneficio dalla cogenerazione sono quelli con una costante richiesta di energia termica ed elettrica nel tempo, come ospedali, centri sportivi, centri commerciali, industrie alimentari, chimiche e centri urbani.

In campo industriale, gli impianti di cogenerazione hanno una potenza che può variare da 1 MW a oltre 50 MW, rientrando quindi nella categoria di media e grande cogenerazione. Anche nell'ambito civile e residenziale, si possono realizzare impianti di cogenerazione di elevata potenza, ad esempio per fornire energia a ospedali o intere comunità urbane.

Al di sotto di 1 MW, gli impianti rientrano nella categoria di piccola cogenerazione, mentre quelli con una potenza inferiore a 30 kW sono considerati microcogenerazione (*MCHP*), adatti per strutture come alberghi, centri residenziali e anche per il solo uso domestico (Figura 19).



Figura 19: Impianti di microcogenerazione domestica [33] [29]

4.2.1 Smart grid [36]

Le *smart grid*, o reti elettriche intelligenti, rappresentano una pietra miliare nella trasformazione del settore energetico, puntando a migliorare l'efficienza, l'affidabilità e la sostenibilità delle reti di distribuzione elettrica. Questi sistemi integrano tecnologie avanzate di monitoraggio, controllo e comunicazione per ottimizzare la gestione delle risorse energetiche.

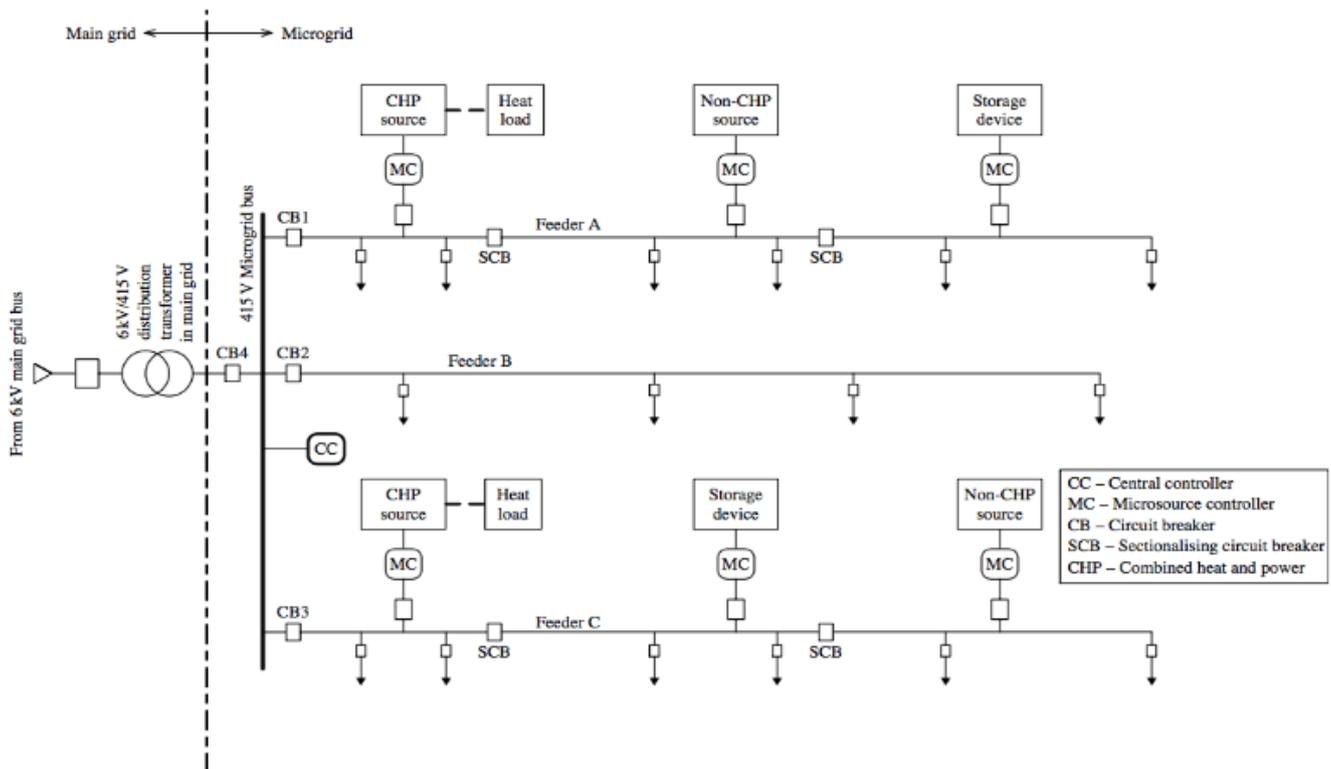


Figura 20: Tipica configurazione di una micro grid [36]

Monitoraggio e gestione attiva: Uno degli elementi chiave delle *smart grid* è il monitoraggio in tempo reale. Sensori avanzati, misuratori intelligenti e sistemi di telemetria consentono di raccogliere dati dettagliati sulla produzione e consumo di energia istante per istante. Queste informazioni permettono una gestione attiva della rete, anticipando e rispondendo dinamicamente alle fluttuazioni della domanda e dell'offerta.

Integrazione di fonti rinnovabili: Le *smart grid* facilitano l'integrazione su larga scala di fonti energetiche rinnovabili, come solare e eolico. La variabilità di queste fonti è gestita in tempo reale, bilanciando la produzione e la richiesta di energia. Ciò favorisce una maggiore penetrazione di energie pulite nella rete, riducendo l'uso di combustibili fossili e le emissioni di gas serra.

Efficienza energetica: Attraverso l'implementazione di tecnologie avanzate di misurazione e controllo, le *smart grid* migliorano l'efficienza energetica. La riduzione delle perdite di trasmissione, la gestione intelligente delle reti di distribuzione e la promozione di comportamenti energetici sostenibili contribuiscono a massimizzare l'utilizzo delle risorse disponibili.

Grid resilience: Le *smart grid* migliorano la resilienza della rete elettrica. La capacità di rilevare e rispondere automaticamente a guasti o interruzioni, isolando sezioni problematiche e ripristinando il servizio in tempi rapidi, aumentando la robustezza complessiva del sistema.

Interattività e coinvolgimento del consumatore: Grazie ai contatori intelligenti e alle applicazioni digitali, i consumatori diventano parte attiva della gestione energetica. Possono monitorare il proprio consumo in tempo reale, ricevere informazioni sulle tariffe dinamiche e partecipare attivamente a programmi di gestione della domanda, promuovendo un utilizzo più consapevole dell'energia.

Sfide e prospettive future: Nonostante i benefici, l'implementazione completa di questa tecnologia incontra sfide tecnologiche, regolatorie e di sicurezza. Le attuali normative e regolamenti potrebbero non essere all'altezza delle nuove dinamiche introdotte dalle *smart grid*. È necessario sviluppare e adattare le normative per supportare l'innovazione e rimuovere ostacoli burocratici che potrebbero rallentare l'adozione delle nuove tecnologie. Tuttavia, il continuo sviluppo tecnologico, l'evoluzione delle politiche energetiche e l'urgente necessità di affrontare i cambiamenti climatici spingono verso una rapida adozione e integrazione delle *smart grid*, un elemento chiave nella transizione verso un sistema energetico più efficiente e sostenibile.

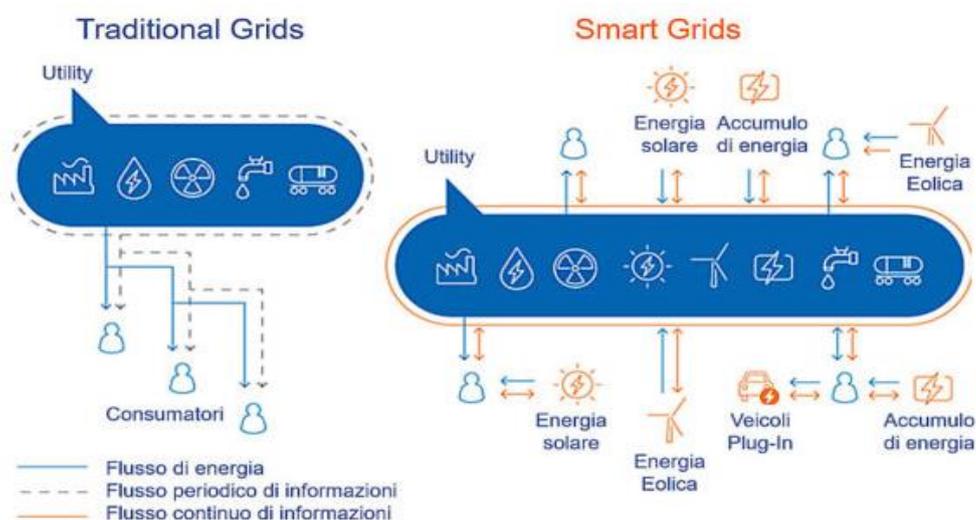


Figura 21: Confronto tra rete tradizionale e smart grid [32]

La rete elettrica tradizionale (*Figura 21*) opera in modo unidirezionale, con il flusso di energia e le informazioni che si spostano in una sola direzione.

Viceversa, una rete intelligente si discosta dal modello tradizionale di generazione centralizzata di energia, introducendo sistemi di generazione distribuita che operano in maniera bidirezionale (*Figura 21*). Questi sistemi producono elettricità da fonti rinnovabili, come impianti fotovoltaici residenziali o aziendali e piccole centrali a biomassa, collegati direttamente alla rete di distribuzione elettrica. Le microturbine a gas sono in grado di avviarsi rapidamente e regolare la produzione in risposta alle variazioni della domanda energetica. Questa flessibilità operativa si allinea con le esigenze delle *smart grid*, che richiedono una gestione dinamica delle risorse in tempo reale, inoltre, forniscono elettricità e calore a livello locale contribuendo alla resilienza della rete, riducendo la dipendenza da grandi centrali elettriche centralizzate. Potrebbero anche essere posizionate in prossimità dei luoghi di utilizzo dell'energia contribuendo a ridurre le perdite derivate dalla trasmissione e della distribuzione dell'energia

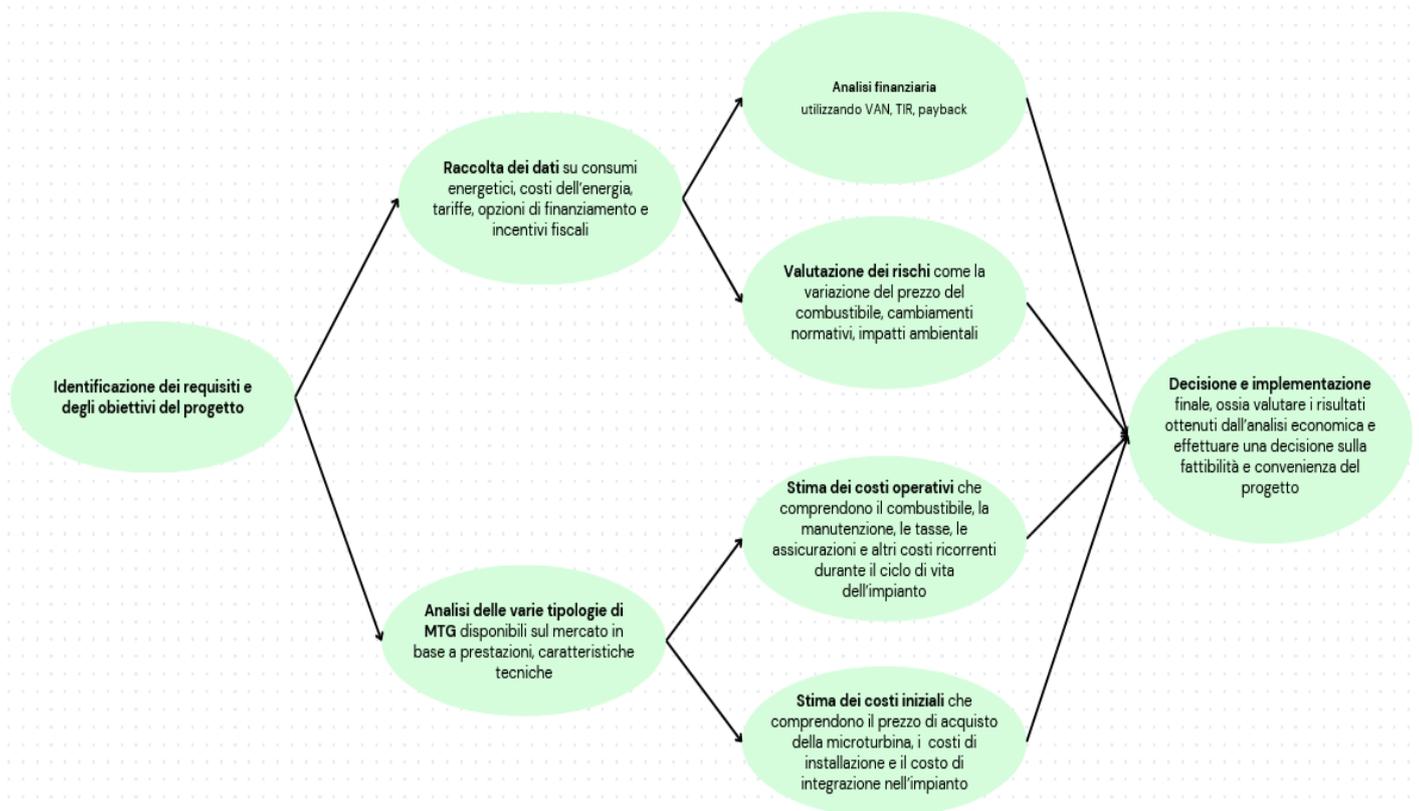
La trasformazione chiave si concentra sulla creazione di una rete in cui questi sistemi possono comunicare e interagire reciprocamente. Poiché le fonti rinnovabili non possono essere programmate, la gestione di sistemi di generazione distribuita richiede un livello di "intelligenza" elevato. Questa intelligenza si riflette nella gestione complessiva del sistema elettrico, permettendogli di gestire in modo localizzato eventuali surplus di energia, ridistribuendoli nelle aree circostanti. L'obiettivo è prevenire o minimizzare eventuali interruzioni nell'erogazione energetica, mantenendo un flusso di energia il più continuo ed efficace possibile garantendo un flusso di energia continuo.

4.3 Quando conviene investire in un impianto di cogenerazione?

L'implementazione di un sistema di cogenerazione non costituisce automaticamente un risparmio energetico ed economico in ogni contesto, richiedendo una valutazione accurata delle condizioni specifiche in cui verrà installato il cogeneratore.

Un'analisi approfondita del consumo energetico e del carico termico, considerando la potenza massima richiesta e le variazioni di carico durante il giorno, il mese e la stagione, è fondamentale. Questa valutazione implica simulazioni dettagliate di diverse configurazioni impiantistiche per valutare la fattibilità tecnica ed economica, nonché l'efficienza e il rendimento delle soluzioni proposte.

Alcuni fattori generali devono essere presi in considerazione, come la vicinanza fisica dell'utenza termica all'impianto di cogenerazione, garantendo che le necessità di riscaldamento siano in prossimità dell'impianto, minimizzando le perdite dovute al trasporto dell'energia termica. È essenziale che la richiesta di energia termica ed elettrica avvenga contemporaneamente, e bisogna considerare la compatibilità delle temperature, poiché non tutti gli impianti cogenerativi erogano calore alla stessa temperatura. La flessibilità dell'impianto è un aspetto essenziale, poiché, nonostante la domanda di calore ed energia elettrica possa verificarsi contemporaneamente, potrebbero presentarsi momenti in cui una richiesta è proporzionalmente superiore all'altra. La convenienza economica di un progetto di cogenerazione è inoltre influenzata significativamente dalle condizioni contrattuali per la fornitura e la cessione dell'energia. Ad esempio, la possibilità di vendere l'energia elettrica prodotta in surplus a prezzi vantaggiosi e di acquistare il combustibile a condizioni agevolate può incrementare notevolmente la redditività del sistema.



Flow chart del processo di valutazione economica per MTG

4.4 Vantaggi e svantaggi della MCHP nell'utilizzo domestico [25]

L'implementazione di impianti di cogenerazione risponde alla necessità di ottimizzare l'efficienza nella produzione di energia elettrica, sfruttando in modo congiunto il calore residuo destinato alla dissipazione in altri ambiti, come quelli industriali o civili.

Il primo beneficio derivante da un sistema *MCHP* si traduce in una significativa riduzione del consumo di energia primaria, dato che la stessa fonte energetica può essere impiegata sia per la generazione di elettricità che per produrre calore (*Figura 22*). Questo risultato comporta un aumento complessivo dell'efficienza (fino all' 80-90% rispetto alle centrali elettriche tradizionali che hanno un'efficienza complessiva inferiore al 50%), con una conseguente diminuzione dei consumi energetici che si attesta intorno al 35-40%.

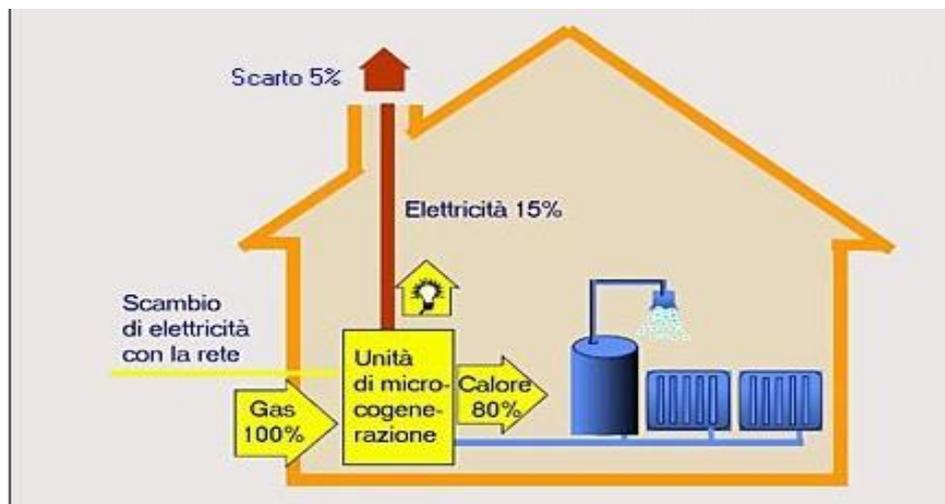


Figura 22: Flusso di energia in un impianto di MCHP domestica [34]

Un vantaggio cruciale che deriva da questo approccio è legato alla tutela ambientale. La produzione di energia termoelettrica vede una drastica diminuzione delle emissioni di sostanze inquinanti, riducendo in maniera significativa l'impatto ambientale associato a questo tipo di produzione.

Vi sono anche altri vantaggi meno noti, ma altrettanto importanti, correlati alle peculiarità degli impianti di cogenerazione. Spesso posizionati in prossimità delle utenze, questi impianti riducono le perdite di trasmissione durante la distribuzione e il trasporto dell'energia, una riduzione fino al 10-15%. Inoltre, grazie alla loro tipica modalità di funzionamento stand-alone, minimizzano i rischi di interruzioni nell'alimentazione energetica dovute a problemi di rete, garantendo continuità dell'alimentazione anche fino al 99% del tempo.

Infine, da non trascurare, oltre al vantaggio economico derivante dalla riduzione dei consumi di energia primaria, si aggiungono gli incentivi disponibili per chi decide di investire in un sistema di cogenerazione.

La decisione di installare un sistema di microcogenerazione in abitazioni o edifici è principalmente guidata dall'aspettativa di risparmio economico a lungo termine. Tuttavia, è fondamentale sottolineare l'importanza di una valutazione attenta per garantire che le ore annuali di utilizzo effettivo portino a un vantaggio energetico sufficiente a coprire i maggiori costi iniziali, gestionali e di manutenzione rispetto alla generazione separata.

In teoria, il sistema di microcogenerazione produce elettricità più conveniente rispetto all'acquisto dalla rete, sfruttando il calore naturale generato dal sistema per integrare o sostituire la caldaia domestica (*Figura 23*). L'elettricità in eccesso è meno costosa rispetto a quella prodotta dalle centrali elettriche tradizionali, grazie al suo consumo locale che elimina le perdite nella trasmissione e data la ridotta distanza tra impianto e consumatore.



Figura 23: Consumi domestici di energia per usi finali [34]

La microcogenerazione richiede inoltre un 30-40% in meno di combustibile rispetto alla generazione separata di energia elettrica e termica, mantenendo un output produttivo paragonabile. In media, l'investimento nell'impianto si ripaga entro 4-5 anni, considerando un utilizzo di almeno 3000-4000 ore l'anno con un tasso di autoconsumo del 100% dell'energia elettrica prodotta.

La microcogenerazione domestica, sebbene promettente per i suoi vantaggi, affronta una serie di sfide che richiedono un'attenta considerazione prima di essere adottata come soluzione energetica per abitazioni.

Questi impianti richiedono necessariamente una gestione tecnica complessa, che può generare costi aggiuntivi per la formazione del personale o per l'impiego di specialisti

per la manutenzione. La manutenzione regolare e i costi operativi continui sono ulteriori aspetti da considerare, anche se gli impianti di microgenerazione sono generalmente più efficienti rispetto a soluzioni tradizionali. Inoltre, requisiti tecnologici e di compatibilità possono influenzare la scelta e l'efficacia del sistema. Alcuni sistemi di microgenerazione possono occupare uno spazio considerevole, rendendoli poco pratici in ambienti domestici più ristretti o in contesti urbani con limitazioni di spazio.

L'efficienza massima della microgenerazione si realizza quando la domanda di elettricità e calore è costante nel tempo. Tuttavia, in situazioni in cui la richiesta varia notevolmente, l'efficienza può diminuire, mettendo a rischio i potenziali risparmi energetici. La manutenzione regolare e i costi operativi continui sono ulteriori aspetti da considerare, anche se gli impianti di microgenerazione sono generalmente più efficienti rispetto a soluzioni tradizionali. Inoltre, requisiti tecnologici e di compatibilità con la struttura ospitante possono influenzare la scelta e l'efficacia del sistema.

4.4.1 Svantaggi economici [28]

Uno dei principali ostacoli è rappresentato dall'investimento iniziale, da 100'000 fino a 500'000 euro, necessario per l'installazione di un sistema di microgenerazione, che può risultare elevato e potenzialmente proibitivo per molti utenti. Da aggiungere ad essi vi sono anche i costi di manutenzione.

Il periodo di ammortamento dell'investimento iniziale può essere relativamente lungo, specialmente in contesti in cui i costi dell'energia sono bassi. La durata della restituzione del capitale può influenzare la convenienza economica dell'impianto. In termini di ritorno sull'investimento, nonostante i potenziali risparmi energetici, il periodo di recupero può essere considerevole. I benefici economici a lungo termine dipendono da vari fattori, come i costi del combustibile, le tariffe energetiche e gli incentivi governativi, infatti i cambiamenti nelle politiche energetiche o nelle leggi fiscali possono avere un impatto sugli incentivi e sulle detrazioni fiscali disponibili per gli impianti di cogenerazione. Variazioni di questo tipo possono influire sulla redditività dell'investimento, perciò una valutazione equilibrata di questi aspetti è essenziale per determinare se la microgenerazione domestica sia una scelta adeguata, bilanciando i vantaggi energetici con le sfide pratiche ed economiche.

L'integrazione di microturbine a gas richiede una pianificazione e una gestione molto dettagliata. Questa complessità operativa può comportare costi aggiuntivi, specialmente in situazioni in cui è necessario coordinare l'impianto con altre fonti di energia (es. pannelli solari).

5 Combustibili e emissioni

Le microturbine, benché progettate principalmente per utilizzare il gas naturale come principale fonte di combustibile, dimostrano una notevole flessibilità nell'operare con una vasta gamma di carburanti. Tra questi, figurano i combustibili liquidi, come l'olio distillato, i gas di petrolio liquefatto come le miscele di propano e butano, i gas acidi non elaborati provenienti direttamente da alcuni pozzi di gas, il biogas generato dalla degradazione biologica di rifiuti organici, quali gas da discarica, gas di digestione dei fanghi e gas di digestione dei rifiuti animali, i gas di scarico industriali provenienti da fiamme e processi in raffinerie, impianti chimici e acciaierie, i gas manufatti ottenuti da processi di gassificazione o pirolisi, e persino biomasse trattate.

Tuttavia, l'adozione di combustibili alternativi non è priva di sfide significative. La presenza di contaminanti rappresenta un ostacolo, in particolare i componenti gassosi acidi, quali H_2S , acidi alogenati, HCN derivante da ammoniaca, sali e composti contenenti metalli, e vari composti organici alogenati, di zolfo, azoto e silicio, oltre agli oli. Questi contaminanti possono generare problematiche durante il processo di combustione. Ad esempio, durante la combustione, i composti alogenati e di zolfo possono dar luogo alla formazione di acidi alogenati, SO_2 , SO_3 e, in alcuni casi, alle emissioni di H_2SO_4 . Tali acidi presentano il potenziale di corrodere l'attrezzatura a valle del processo, richiedendo pertanto precauzioni aggiuntive.

Un aspetto cruciale è rappresentato dalla presenza di ossidi di azoto (NO_x), derivati dall'ossidazione dell'azoto legato al combustibile durante la combustione. Questo fenomeno richiede particolare attenzione, dato che le emissioni di NO_x possono avere impatti significativi sull'ambiente e sulla salute umana. Le particelle solide e i liquidi, nel caso di combustibili gassosi, devono essere mantenuti a concentrazioni estremamente basse per evitare la corrosione e l'erosione dei componenti. Di conseguenza, è imperativo implementare vari passaggi di lavaggio del combustibile, separazione delle gocce e filtrazione, specialmente quando i livelli di contaminanti superano le specifiche stabilite dai produttori delle microturbine.

Un esempio pratico e rilevante è dato dal gas di discarica, noto per la sua composizione variabile e la presenza di contaminanti come composti di cloro, zolfo, acidi organici e composti di silicio. La gestione di tali contaminanti richiede un approccio personalizzato e procedure di trattamento preliminare, per garantire che i gas alimentino le microturbine con livelli di purezza accettabili, quali il lavaggio del combustibile, la separazione delle gocce e la filtrazione.

5.1 Trattamento dei combustibili [24]

I procedimenti per gestire i combustibili, ossia renderli utilizzabili secondo le norme vigenti e tenendo ulteriormente conto dei limiti dei materiali della microturbina, sono principalmente di tre tipologie come menzionato nel paragrafo sopra:

1. **Lavaggio:** il lavaggio del combustibile è cruciale per rimuovere impurità gassose, particolato solido e contaminanti che potrebbero compromettere l'efficienza e la durata della microturbina. Nel caso di biogas proveniente da discariche, un sistema di lavaggio può coinvolgere scrubber chimici che rimuovono composti nocivi come H_2S , riducendo l'usura e prolungando la vita utile della turbina.
2. **Separazione delle gocce:** la separazione delle gocce è essenziale quando si utilizzano combustibili liquidi, evitando che le gocce d'olio o altri liquidi raggiungano la camera di combustione. Nei sistemi che operano con distillati di petrolio, vengono spesso impiegati separatori centrifughi (*Figura 24*) che sfruttano la forza centrifuga per separare le gocce d'olio dal combustibile, garantendo un flusso più pulito alla turbina.

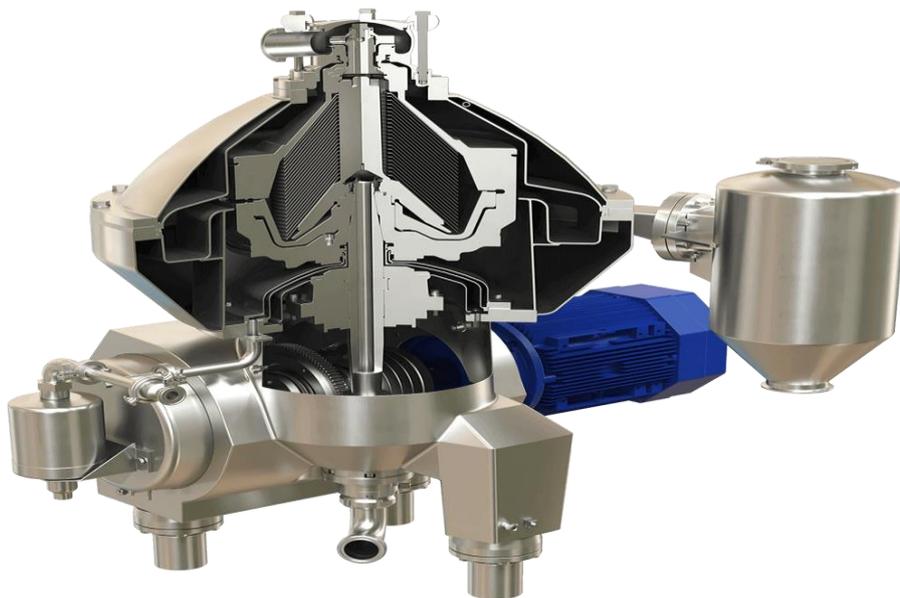


Figura 24: Separatore centrifugo

3. **Filtrazione:** i filtri sono utilizzati per rimuovere contaminanti solidi o particelle fini presenti nel combustibile, proteggendo i componenti critici della microturbina da danni e usura. Nei casi in cui si utilizzano gas di processo provenienti da impianti industriali, sistemi di filtrazione avanzati, come filtri a maniche (*Figura 25*) o filtri elettrostatici, possono catturare particelle sottili e garantire un combustibile pulito.



Figura 25: Filtro a maniche per MTG

5.2 Gas naturale [8]

Nei casi in cui si utilizza il gas naturale come combustibile per le microturbine, i passaggi di lavaggio, separazione delle gocce e filtrazione possono variare leggermente rispetto a quelli adottati per altri tipi di combustibili. Ecco come questi processi potrebbero essere applicati specificamente al gas naturale:

1. **Lavaggio:** sebbene il gas naturale sia generalmente più pulito rispetto ad altri combustibili, potrebbe comunque contenere tracce di impurità come solfuri e umidità. Il lavaggio potrebbe coinvolgere sistemi di desolfurazione e asciugatura per rimuovere queste impurità. L'uso di solventi selettivi per la rimozione di H_2S , seguito da processi di asciugatura mediante adsorbitori molecolari, può garantire che il gas naturale sia conforme alle specifiche richieste dalla microturbina.
2. **Separazione delle gocce:** nei casi in cui il gas naturale è trasportato attraverso condotte che potrebbero condensare l'umidità, è essenziale separare le gocce d'acqua per evitare danni alla turbina. Ciò potrebbe comportare l'uso di separatori lamellari o sistemi *demister* per eliminare l'umidità (Figura 26).

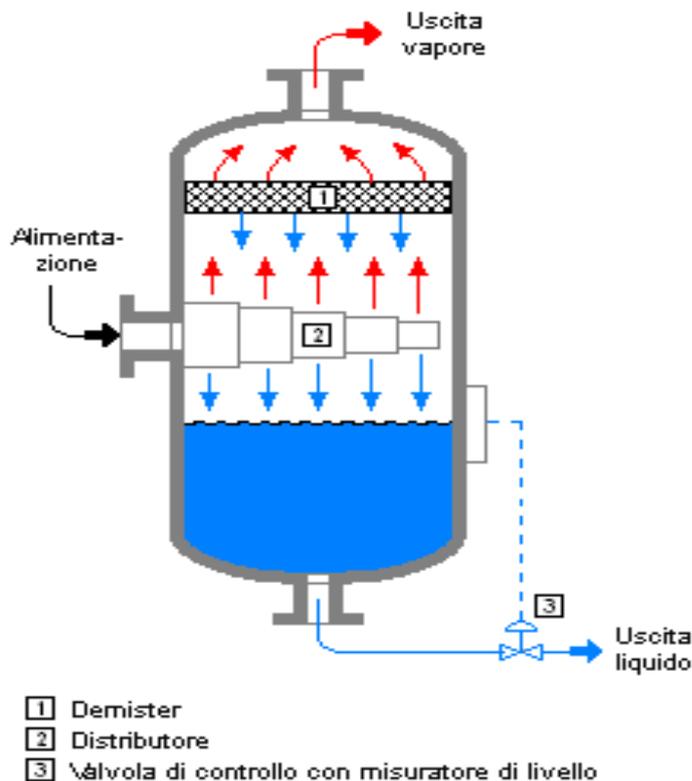


Figura 26: Demister per la separazione liquido-vapore [42]

3. **Filtrazione:** i filtri sono utilizzati per rimuovere eventuali particelle solide o contaminanti presenti nel gas naturale. Filtri a cartuccia o filtri a gravità possono essere implementati per garantire un gas pulito prima della combustione. L'installazione di filtri a media porosa fine può catturare eventuali particelle in sospensione, proteggendo efficacemente i componenti critici della microturbina.

Perciò anche se il gas naturale è noto per il suo livello di purezza elevato rispetto ad altri combustibili, i processi di preparazione del combustibile sono comunque cruciali per garantire un funzionamento efficiente e prolungare la durata della vita della microturbina. Le specifiche tecniche dei sistemi di preparazione del combustibile possono variare in base alle caratteristiche specifiche del gas naturale utilizzato e agli standard richiesti dalla microturbina in uso.

5.3 Emissioni inquinanti [21] [23]

Come qualsiasi macchina che adotta un processo di combustione, le MTG, generano emissioni inquinanti che richiedono attenzione e gestione. Le principali emissioni inquinanti associate alle microturbine includono ossidi di azoto (NO_x), monossido di carbonio (CO), idrocarburi non combustibili (HC) e particolato.

Come detto nel capitolo precedente le microturbine utilizzano diverse fonti di combustibile, tra cui gas naturale, biogas, *GPL* e altri combustibili. La natura della combustione e la composizione chimica del combustibile influenzano direttamente le emissioni. Di seguito, vengono esaminate le principali emissioni:

1. **Ossidi di azoto (*NO_x*):** la formazione di *NO_x* è intrinseca alla combustione ad elevate temperature; si legano facilmente all'*H₂O* per formare acidi.
2. **Monossido di carbonio (*CO*):** il *CO* è un prodotto della combustione incompleta (essendo la prima reazione che porta a formare *CO₂*) e può essere controllato ottimizzando il rapporto combustibile-aria e garantendo una buona miscelazione.
3. **Idrocarburi non combustibili (*HC*):** gli *HC* sono costituiti da idrocarburi non bruciati e possono essere controllati attraverso la progettazione di sistemi di combustione efficienti e il monitoraggio continuo delle condizioni operative.
4. **Particolato:** le microturbine alimentate a gas naturale generalmente producono basse quantità di particolato. Tuttavia, combustibili alternativi come il biogas o la biomassa possono generare quantità rischiose di particolato.

L'adozione di tecnologie avanzate, come sistemi di combustione premiscelata magra, catalizzatori e filtri, è fondamentale per ridurre le emissioni inquinanti delle microturbine. Inoltre, la manutenzione regolare e il monitoraggio continuo delle prestazioni sono essenziali per garantire che le microturbine operino con efficienza e rispettino le normative anti-inquinamento. Un esempio specifico dello sviluppo tecnologico raggiunto con il controllo delle emissioni inquinanti si ha con la MTG Capstone C30 (vedi *Figura 15*) (*Figura 27*):

Costruttore e modello	Potenza (kW)	Portata gas di scarico (kg/s)	NO _x ppm (15% O ₂)	CO ppm (15% O ₂)	Rumore dB (A) (10 m)
Capstone C30	30	0.31	<9	n.d.	58

Figura 27: Tabella esplicativa dell'inquinamento della MTG Capstone C30 [39]

5.3.1 Tecnologie di controllo e abbattimento degli inquinanti [21]

Diversi sistemi di abbattimento delle emissioni sono impiegati per garantire che questi sistemi energetici siano conformi alle normative ambientali e contribuiscano a promuovere una produzione più pulita di energia.

- **Combustione premiscelata magra (*DLN*):** le microturbine spesso adottano la tecnologia di combustione premiscelata magra per ridurre le temperature di

combustione e, di conseguenza, le emissioni di ossidi di azoto (NO_x). Questo sistema miscela il combustibile con l'aria prima di entrarvi, eliminando le zone di alta temperatura che favoriscono la formazione di NO_x .

- **Tecnologie di ricircolo dei gas di scarico (EGR):** l'impiego di sistemi di ricircolazione dei gas di scarico consente di ridurre le temperature di combustione, limitando così la produzione di NO_x . Questa pratica contribuisce a mantenere le emissioni entro i limiti consentiti dalle normative ambientali.
- **Catalizzatori metallici (Figura 28):** l'utilizzo di catalizzatori specializzati è comune per ridurre gli ossidi di azoto (NO_x) e i composti organici volatili (COV) generati durante la combustione. I catalizzatori per NO_x convertono gli ossidi di azoto in azoto atmosferico, contribuendo significativamente alla riduzione delle emissioni nocive. Quelli per COV promuovono l'ossidazione di composti organici, trasformandoli in gas inerti e acqua. L'impiego di catalizzatori rappresenta una strategia efficace per migliorare la qualità dell'aria rilasciata durante il processo di combustione.

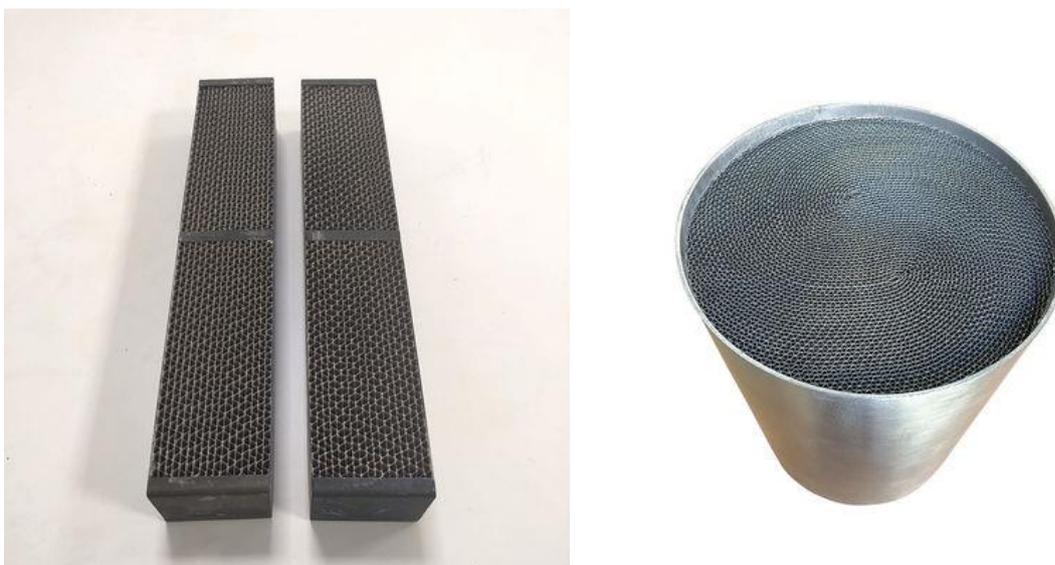


Figura 28: Catalizzatori metallici per NO_x [40]

- **Filtrazione avanzata:** per le microturbine che utilizzano combustibili alternativi come il biogas o la biomassa, i sistemi di filtrazione avanzata, come filtri a maniche (Figura 26 sopra) o filtri elettrostatici, sono essenziali per trattenere le particelle e garantire che le emissioni di particolato siano conformi alle norme ambientali.
- **Sistemi di riduzione selettiva catalitica (SCR) (Figura 29):** gli SCR sono progettati per abbattere gli ossidi di azoto convertendoli in azoto molecolare e acqua attraverso reazioni chimiche catalizzate. Questi sistemi richiedono l'iniezione di agenti riducenti come l'ammoniaca o l'urea per promuovere le reazioni di riduzione.

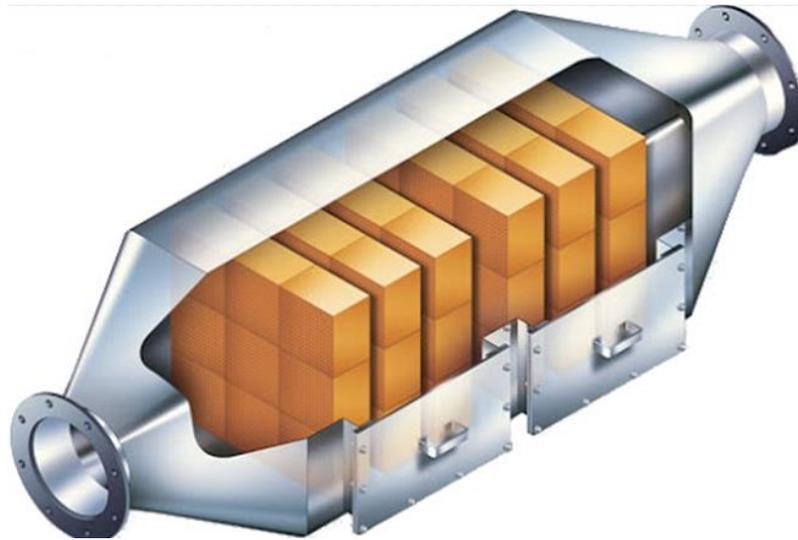


Figura 29: Catalizzatore SCR per NO_x [41]

- **Monitoraggio periodico delle emissioni:** sistemi di monitoraggio continuo delle emissioni sono implementati per garantire la conformità in tempo reale con le normative ambientali. Questi sistemi forniscono dati in tempo reale sulle emissioni, consentendo un intervento tempestivo per la correzione di eventuali anomalie.

L'adozione congiunta di queste tecnologie di abbattimento delle emissioni contribuisce a garantire che le microturbine a gas siano non solo efficienti dal punto di vista energetico ma anche rispettose dell'ambiente, sostenendo gli sforzi per una produzione energetica sostenibile e a basso impatto ambientale.

6 Materiali impiegati nelle MTG [16][17]

Le microturbine a gas, ingegnerizzate per massimizzare l'efficienza energetica, richiedono l'impiego di materiali avanzati capaci di resistere a condizioni operative estreme. Questi materiali devono garantire durabilità, resistenza alla corrosione, e prestazioni affidabili in ambienti caratterizzati da temperature elevate e cicli di carico variabili. Esaminiamo più attentamente alcuni dei materiali predominanti:

➤ Leghe a base di nichel:

- *Inconel*: questi acciai in lega nichel-cromo-molibdeno offrono un'elevata resistenza alla corrosione, all'ossidazione e alle alte temperature, rendendola ideale per componenti interni come le pale della turbina (*Figura 30*).



Figura 30: Turbina con rivestimento in Inconel [38]

➤ Ceramiche avanzate:

- *Carburo di silicio*: apprezzato per la sua eccezionale resistenza alla corrosione e alle alte temperature, il carburo di silicio trova applicazione in aree soggette a condizioni estreme, come la camera di combustione.
- *Nitrato di alluminio*: una ceramica refrattaria con proprietà meccaniche elevate ad alta temperatura, spesso utilizzata nelle sezioni ad alta temperatura delle microturbine.



Figura 31: compressore con rivestimento in materiale ceramico [38]

➤ **Materiali compositi:**

- *Fibra di carbonio:* grazie alla sua leggerezza e alta resistenza, la fibra di carbonio viene impiegata per ridurre il peso di componenti strutturali senza comprometterne la robustezza.
- *Matrici polimeriche:* questi materiali rinforzano i compositi, contribuendo a migliorarne la resistenza.

➤ **Acciai inossidabili:**

- *Austenitici:* acciai come l'inox 316 offrono buona resistenza alla corrosione e sono adatti per parti esterne e non critici in termini di temperatura.

6.1 Limiti dei materiali [10]

Operando in ambienti ad alta temperatura e subendo cicli termici e meccanici intensi, le MTG richiedono materiali di altissima qualità per garantire affidabilità e prestazioni ottimali nel lungo periodo.

Uno dei principali limiti è rappresentato dalla fatica termica e meccanica. Le microturbine a gas sperimentano cicli continui di riscaldamento e raffreddamento, provocando tensioni che possono portare a guasti irreparabili. Per contrastare questo fenomeno, è cruciale sviluppare leghe e adottare trattamenti termici mirati che minimizzino gli effetti della fatica ciclica.

La corrosione ad alta temperatura rappresenta un altro ostacolo, a cui sono principalmente esposte le camere di combustione, lavorando in ambienti estremamente caldi e in presenza di gas combusti e non, sono suscettibili alla corrosione che può compromettere la durata delle componenti. Materiali avanzati,

come leghe nichel-cromo-molibdeno, sono essenziali per resistere a questa minaccia. Inoltre, le particelle solide nei gas di combustione possono causare erosione e imbrattamento delle superfici, generando cavità e riducendo di conseguenza l'efficienza. La lotta contro questo problema richiede l'utilizzo di materiali più prestazionali e resistenti all'erosione, spesso rivestiti con strati ceramici protettivi. A questo si lega l'ossidazione, un problema da sempre risentito in ambienti ad alta temperatura e ricchi di ossigeno. Proteggere i componenti da processi ossidativi richiede l'adozione di coating protettivi o l'impiego di materiali intrinsecamente resistenti all'ossidazione come leghe di nichel-cromo, leghe di cromo-alluminio e ceramiche appositamente progettate.

La resilienza, ossia la capacità del componente di assorbire l'energia degli urti e delle vibrazioni, dissiparla in modo efficace e mantenere le sue proprietà strutturali senza subire danni permanenti, è un aspetto cruciale per le MTG. Materiali con proprietà di smorzamento e resistenza alle vibrazioni sono essenziali per garantire l'integrità strutturale nel lungo periodo.

Infine, le microturbine a gas spesso operano con cicli di carico variabili, esponendo i materiali a stress dinamici continui. Sviluppare leghe in grado di sopportare cicli di carico variabili senza subire danni permanenti è un elemento chiave per garantire un'elevata affidabilità in varie condizioni operative, essenziale data la loro versatilità.

7 Prospettive future

Questa tecnologia presenta promettenti prospettive per il futuro dell'energia. Tra gli sviluppi chiave, si prevede un focus significativo sull'efficienza e le prestazioni. L'utilizzo di materiali avanzati, tra cui leghe ad alte prestazioni e compositi, insieme a sistemi di raffreddamento innovativi, consentirà temperature di combustione più elevate, aumentando l'efficienza complessiva e perciò il rendimento globale del sistema.

La diversificazione dei combustibili rappresenta un'altra prospettiva di ricerca, con un'attenzione particolare a biogas e combustibili sostenibili. Tecnologie di purificazione del biogas e processi di gassificazione più avanzati saranno implementati per gestire in modo efficiente la crescente necessità di adottare combustibili "green" portando le emissioni inquinanti al minimo. Difatti il settore mira a ridurre ulteriormente le emissioni (già diminuite notevolmente negli ultimi anni) attraverso l'integrazione di tecnologie di post-trattamento avanzate. L'uso diffuso di catalizzatori selettivi e sistemi di ricircolo dei gas di scarico contribuirà a mantenere le emissioni a livelli minimi. Il monitoraggio continuo delle emissioni, attraverso sistemi avanzati, garantirà il controllo preciso in base alle condizioni operative.

L'integrazione delle microturbine con fonti rinnovabili è parte integrante del panorama energetico futuro. L'implementazione di sistemi di stoccaggio dell'energia avanzati, come batterie ad alta capacità, bilancerà la produzione intermittente da fonti rinnovabili, garantendo una fornitura continua di energia. Parallelamente l'evoluzione verso sistemi ibridi richiederà sincronizzazione e controllo avanzato per massimizzare l'efficienza complessiva. Questi sistemi saranno progettati per adattarsi alle varie tecnologie energetiche, garantendo la massima flessibilità. L'espansione delle applicazioni delle microturbine a gas richiederà sviluppi complessi nei sistemi di integrazione. Sistemi di cogenerazione avanzati saranno integrati nelle reti intelligenti per massimizzare la distribuzione di energia e calore in modo dinamico. Lo sviluppo di tecnologie di manutenzione predittiva sarà cruciale per ottimizzare l'affidabilità, prolungare la durata operativa e massimizzare l'efficienza energetica delle microturbine.

L'impiego di sensori avanzati e tecnologie IoT consentirà la raccolta di dati in tempo reale per una valutazione accurata delle condizioni operative, prevedendo interventi di manutenzione. Infine, l'adozione su larga scala delle microturbine dovrà passare per l'introduzione di incentivi governativi e politiche di supporto a questa tecnologia. Standardizzazioni e interoperabilità semplificheranno l'integrazione con le infrastrutture esistenti. La collaborazione tra sviluppatori di tecnologie, istituzioni di

ricerca, governi e industrie sarà fondamentale per garantire la transizione verso un futuro energetico sostenibile e avanzato.

8 Conclusioni

Dall'analisi dei loro principi di funzionamento alla considerazione delle sfide e delle soluzioni legate alle emissioni inquinanti e dai materiali impiegati alle prospettive future, emerge chiaramente che queste tecnologie rappresentano un tassello fondamentale nel quadro dell'energia sostenibile e dell'efficienza energetica. Tale tecnologia offre una soluzione flessibile e versatile per una vasta gamma di applicazioni, da quella residenziale a quella industriale. La loro capacità di diversificazione le rende un elemento chiave nella transizione verso un mix energetico più pulito e sostenibile. Affrontare le sfide delle emissioni inquinanti è stato un punto focale della discussione, con l'adozione di tecnologie come la combustione premiscelata magra e i catalizzatori, che dimostrano l'enorme potenziale per ridurre significativamente l'impatto ambientale delle microturbine.

L'analisi dei materiali impiegati ha evidenziato la necessità di costante innovazione e ricerca per superare le sfide legate a temperature elevate e all'usura. Tuttavia, gli sviluppi recenti nei componenti critici indicano progressi significativi nella realizzazione di materiali più robusti e resistenti.

Guardando al futuro, le microturbine a gas promettono di svolgere un ruolo cruciale nelle reti energetiche intelligenti, nella produzione distribuita e nelle applicazioni mobili.

La miniaturizzazione e l'aumento dell'efficienza aprono nuove prospettive, contribuendo a plasmare il panorama energetico futuro.

In definitiva, questo studio ha esplorato il mondo complesso e affascinante delle microturbine a gas, mettendo in luce la loro importanza nella transizione della produzione di energia verso soluzioni avanzate e sostenibili. Con la continua innovazione e l'impegno nella ricerca, queste tecnologie hanno il potenziale di ridefinire il nostro approccio alla produzione e distribuzione di energia, contribuendo in modo significativo alla costruzione di un mondo più sostenibile e consapevole.

9 Ringraziamenti

La conclusione di questa tesi rappresenta non solo un traguardo accademico, ma anche l'opportunità di esprimere la mia profonda gratitudine a tutti coloro che hanno contribuito in modo significativo al mio percorso.

Ai miei genitori per il loro costante supporto e la dedizione che hanno dimostrato nel guidarmi attraverso ogni fase di questo viaggio. Il vostro credere in me, il vostro amore incondizionato, sono state la forza che ha alimentato il mio impegno, e vi sono grato per essere stati una fonte inesauribile di ispirazione e per ogni sacrificio che avete fatto per consentirmi di raggiungere questo importante obiettivo.

Ai miei nonni, le vostre storie, i vostri consigli saggi, la vostra presenza, il vostro sostegno, il vostro amore sono un tesoro che porterò per sempre nel cuore.

Ad Agata, un ringraziamento speciale. Grazie per la tua pazienza infinita, per il tuo continuo sostegno emotivo, per aver sempre creduto in me, per la forza che mi hai dato per andare avanti e per aver condiviso con me le gioie e le sfide di questo cammino. La tua costante presenza e il tuo costante amore hanno reso ogni passo più prezioso. Sei le radici che mi hanno dato stabilità. Sei la persona che auguro a tutti di trovare. Sei l'amore che auguro a tutti di provare. Ti amo.

Ai miei amici e amiche, la vostra compagnia, le risate e il sostegno reciproco hanno reso tutto più leggero.

Un grazie a tutti coloro che hanno contribuito, anche in piccolo, al mio percorso. Ogni parola di conforto, ogni consiglio, ogni gesto di gentilezza sono stati parte fondamentale del mio cammino. Ve ne sarò eternamente grato.

Un ringraziamento al Professore Enrico Corti e all'Ingegnere Giacomo Silvagni.

Bibliografia e sitografia

- [1] Claire Soares, *Microturbines: Applications for Distributed Energy Systems*.
- [2] Bandini Alice, *Analisi delle prestazioni di impianti a gas, vapore e combinati*, Relatore: Davide Moro, Università di Bologna, Tesi di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica.
- [3] Ciclo Brayton turbine a gas, My LIUC, MatSup, <https://my.liuc.it/MatSup/2011/Y90304/SEIND-02-TG.pdf>
- [4] Valentin Boicea, *Essentials of Natural Gas Microturbines*.
- [5] Claire Soares, *Gas Turbines: A Handbook of Air, Land and Sea Applications*.
- [6] Penzo Marco, *Microturbine a gas: caratteristiche e impiego come sorgenti di energia ad uso residenziale*.
- [7] Donna Ciafone, *Gas Turbines: Technology, Efficiency and Performance*.
- [8] Boyce Meherwan, *Gas Turbine Engineering Handbook*.
- [9] Paul Breeze, *Gas-Turbine Power Generation*.
- [10] National Research Council, Division on Engineering and Physical Sciences, National Materials Advisory Board, Commission on Engineering and Technical Systems, and Committee on Coatings for High-Temperature Structural Materials, *Coatings for High-Temperature Structural Materials: Trends and Opportunities*.
- [11] Norman S. Nise, *Control Systems Engineering*.
- [12] Louay Chamra, Pedro Mago, *Micro-CHP Power Generation for Residential and Small Commercial Buildings*.
- [13] R. Beith, *Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems: Advanced Design, Performance, Materials and Applications*.
- [14] Roger Reed, *The superalloys: fundamentals and application*.
- [15] G. W. Goward, D. H. Boone, *Mechanisms of Formation of Diffusion Aluminide Coatings on Nickel-Base Superalloys*.
- [16] D. L. Ruckle, D. S. Duvall, *Ceramic Thermal Barrier Coatings for Turbine Engine Components*.

- [17] Committee on Coatings for High-Temperature Structural Materials, Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council, *Coatings for high-temperature structural materials: trends and opportunities*.
- [18] A. B. M. Aguiar, J. O. P. Pinto, C.Q. Andrea, and L. A. H. Nogueira, *Modeling and simulation of natural gas microturbine application for residential complex aiming technical and economical viability analysis*.
- [19] Adrian-Valentin Boicea, Gianfranco Chicco, Pierluigi Mancarella, *Optimal operation of a 30kW natural gas microturbine*.
- [20] Lozza, Giovanni, Dipartimento di energetica - Politecnico di Milano, *Turbine a gas e cicli combinati*.
- [21] Arthur H. Lefebvre, Dilip R. Ballal, *Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions*.
- [22] Maryam Mohammadi Maghanki, Barat Ghobadian, Gholamhassan Najafi, Reza Janzadeh Galogah, *Micro combined heat and power (MCHP) technologies and applications*.
- [23] Timothy C. Lieuwen, Vigor Yang, *Gas Turbine Emissions*.
- [24] Philip P. Walsh, Paul Fletcher, *Gas Turbine Performance*.
- [25] Özgür Göl, *Micro-Cogeneration: Towards Decentralized Energy Systems*.
- [26] H. I. Onowiona, V. I. Ugursal, *Residential cogeneration systems: review of the current technology*.
- [27] Robert Schafrik, Robert Sprague, *Superalloy technology: a perspective on critical innovations for turbine engines*.
- [28] Paul Breeze, *Combined Heat and Power: Effective Energy Solutions for a Sustainable Future*.
- [29] <https://www.infobuildenergia.it/appfondimenti/la-microcogenerazione-nel-settore-civile/>
- [30] <https://www.intergen.it/cogenerazione-come-funziona-quali-vantaggi/>
- [31] <https://www.meccalte.com/it/prodotti/alternatori/magneti-permanenti>
- [32] <https://www.lumi4innovation.it/smart-grid-cose-e-come-funziona/>

- [33] <https://www.rispostaserramenti.com/microcogenerazione-domestica-in-15-anni-avra-una-crescita-esponenziale-e-soppiantera-la-caldaia/>
- [34] <http://www.consulente-energia.com/microcogenerazione-domestica-conviene.html>
- [35] http://www.fedoa.unina.it/664/1/Tesi_Dottorato_Pontecorvo.pdf
- [36] Di Costanzo Francesco, *Dimensionamento ed analisi transitoria di un impianto solare termodinamico con microturbina a gas collegata ad una microgrid tramite PMSG*, Relatori: Ch.ma Prof.ssa Maria Cristina Cameretti, Ch.mo Prof. Davide Lauria, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica.
- [37] <https://vta.cc/it/prodotti/tecnologia-dellacqua/vta-microturbine>
- [38] https://www.politesi.polimi.it/retrieve/a81cb059-6a7e-616b-e053-1605fe0a889a/2010_07_Bartolo_05.pdf
- [39] https://www.ambientediritto.it/dottrina/Politiche%20energetiche%20ambientali/politiche%20e.a/micro_cogenerazione_sileo.htm
- [40] <https://italian.catalystdpf.com/supplier-442247-metallic-catalyst-substrates>
- [41] http://stephenisme.altervista.org/articoli-e-documenti/catalizzatori-nox/?doing_wp_cron=1708349124.5742969512939453125000
- [42] <https://it.wikipedia.org/wiki/Demister>
- [43] <https://blog.apros.it/2020/11/18/microcogenerazione-domestica/>