

09 Novembre 2017

CogenERazione da Biomassa mEdiante scambiatori con Rivestimenti innOvativi per sistemi EFMGT

F.Armanasco

Biomasse, biocombustibili e tecnologie di conversione

La conversione biochimica

La conversione termochimica

Cogenerazione da biomassa agroforestale: oggi e... domani?

Cicli Rankine a fluido organico

Microturbine a combustione esterna

L'impianto di Zibello

Descrizione d'impianto

Prestazioni, limiti tecnologici e fenomeni di ossidazione

Cerbero

Ricerca materiali

Il processo di alluminizzazione

Biomasse e biocombustibili

Si intende qualsiasi **sostanza organica**, di origine *vegetale* o *animale*, da cui sia possibile ricavare *energia* o attraverso un impiego diretto o previa trasformazione in un combustibile solido, liquido o gassoso

Vengono tipicamente suddivise in funzione del comparto di provenienza

Forestale e agroforestale

Agricolo

Rifiuti

Industriale

Zootecnico



Processi biochimici:

Ottenuti grazie alle *reazioni chimiche* prodotte da enzimi, funghi e microrganismi, che si formano nella sostanza trattata sotto particolari condizioni

Particolarmente adatti per tutte quelle biomasse che presentano un rapporto C/N < 30 e un'umidità alla raccolta superiore al 30% come i reflui zootecnici o la frazione organica dei rifiuti solidi urbani (FORSU)



Processi termochimici:

Basati sull'azione del *calore* il quale trasforma attraverso un comune processo di combustione la biomassa di partenza o direttamente in energia termica, o in altri prodotti, solidi, liquidi o gassosi, successivamente impiegabili sempre a scopi energetici



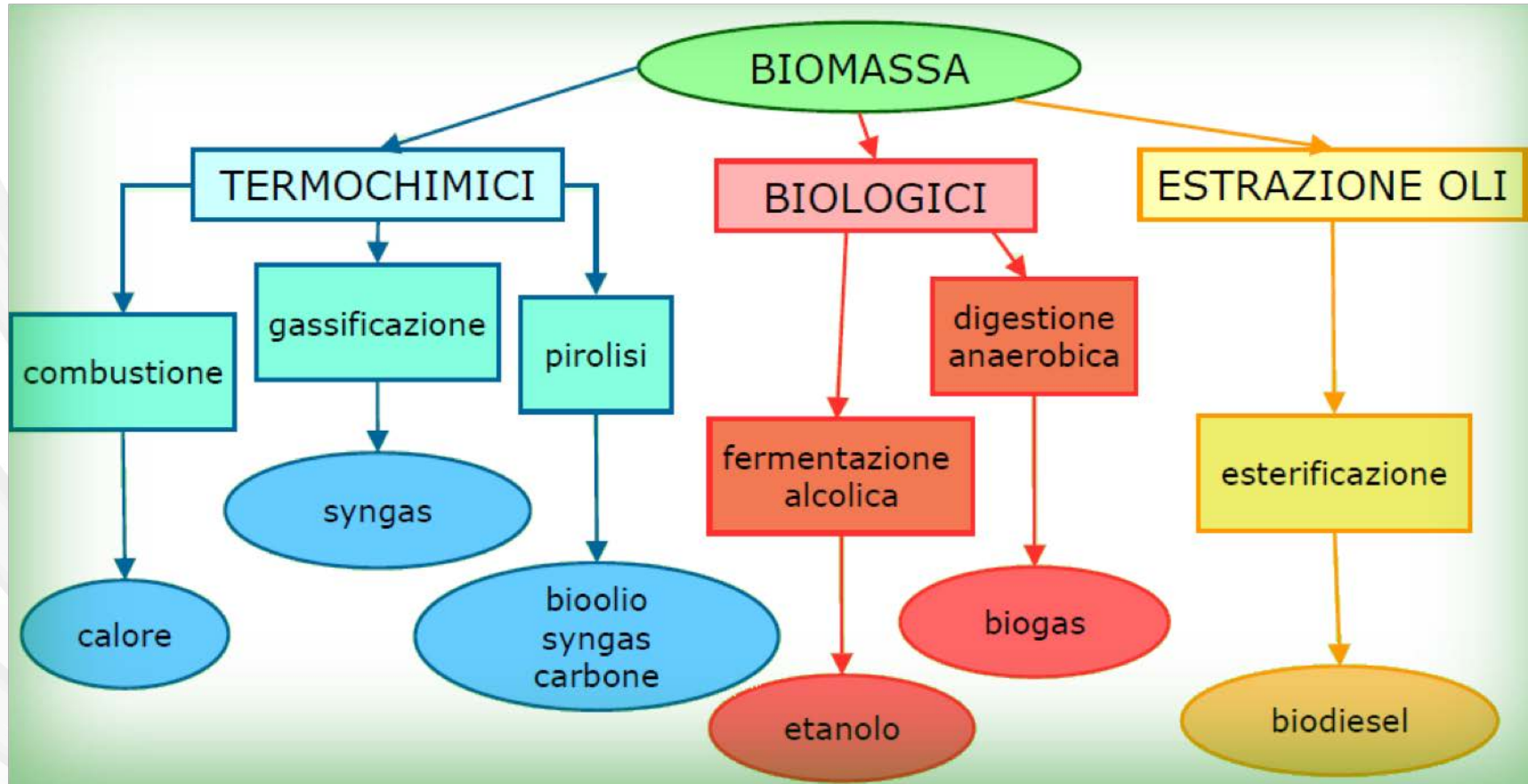


Nei processi *termochimici* sono utilizzabili tutte le biomasse di natura ligneo cellulosa in cui il rapporto C/N abbia valori superiori a 30 e il contenuto d'umidità non superi il 30%

Le biomasse più adatte sono la legna e tutti i suoi derivati e i più comuni sottoprodotti colturali di tipo ligno-cellulosico (paglia di cereali, residui di potatura della vite e dei fruttiferi, ecc.)

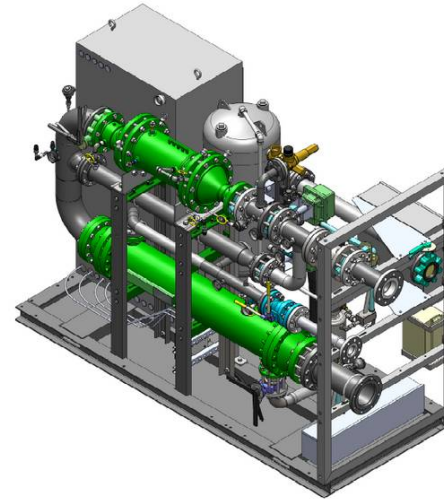


In sintesi



Biomasse del comparto agroforestale... ...combustione diretta e tecnologie

Cicli *ORC* (Organic Rankine Cycle)



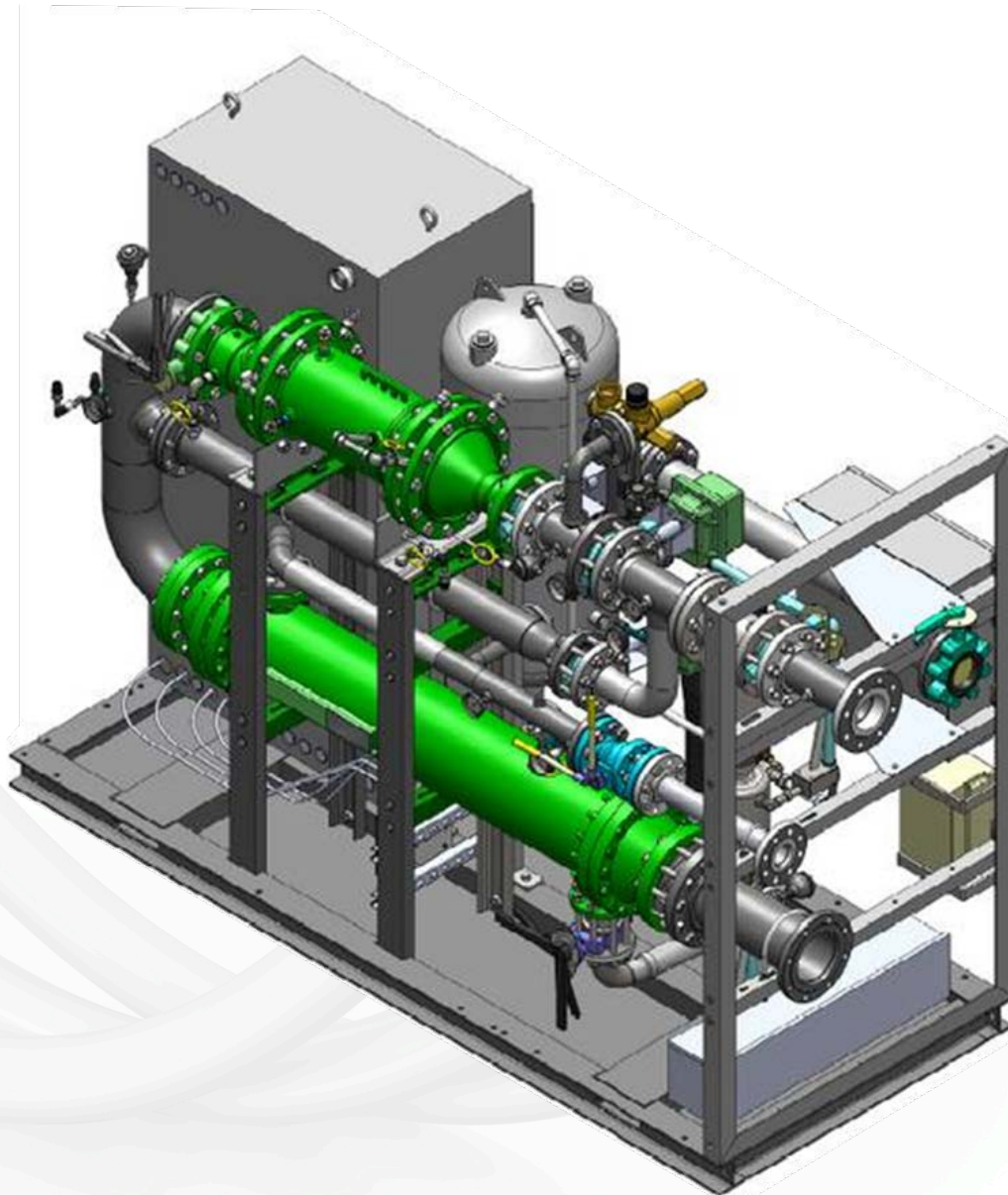
Motori Stirling



EFMGT – turbine a gas a combustione esterna



ORC: una realtà affermata



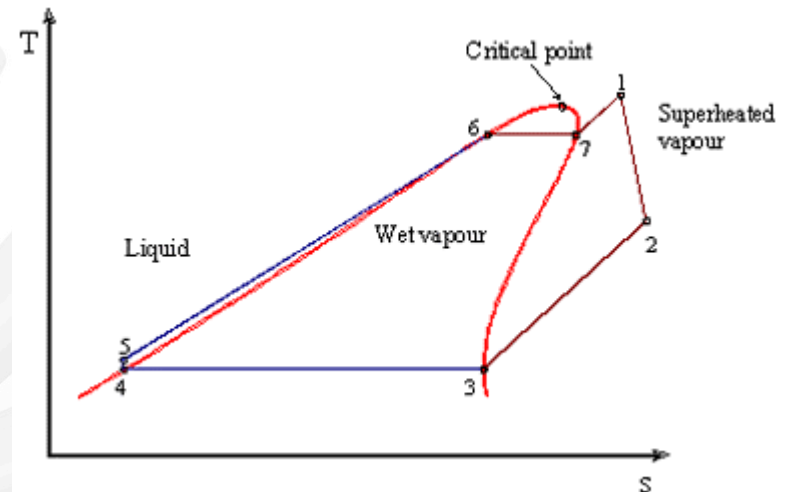
I turbogeneratori **ORC** sono dei cicli Rankine in cui il fluido di lavoro non è acqua ma un *fluido organico* ad elevata massa molecolare

Sono normalmente cicli binari in quanto il fluido vettore del calore, solitamente *olio diatermico*, ed il fluido di lavoro sono due fluidi diversi e separati

Il calore viene introdotto per **combustione esterna** e trasferito al fluido di lavoro tramite uno scambiatore

Possibilità di utilizzare il calore scaricato da *MGT* o *MCI* realizzando così micro cicli combinati gas-vapore

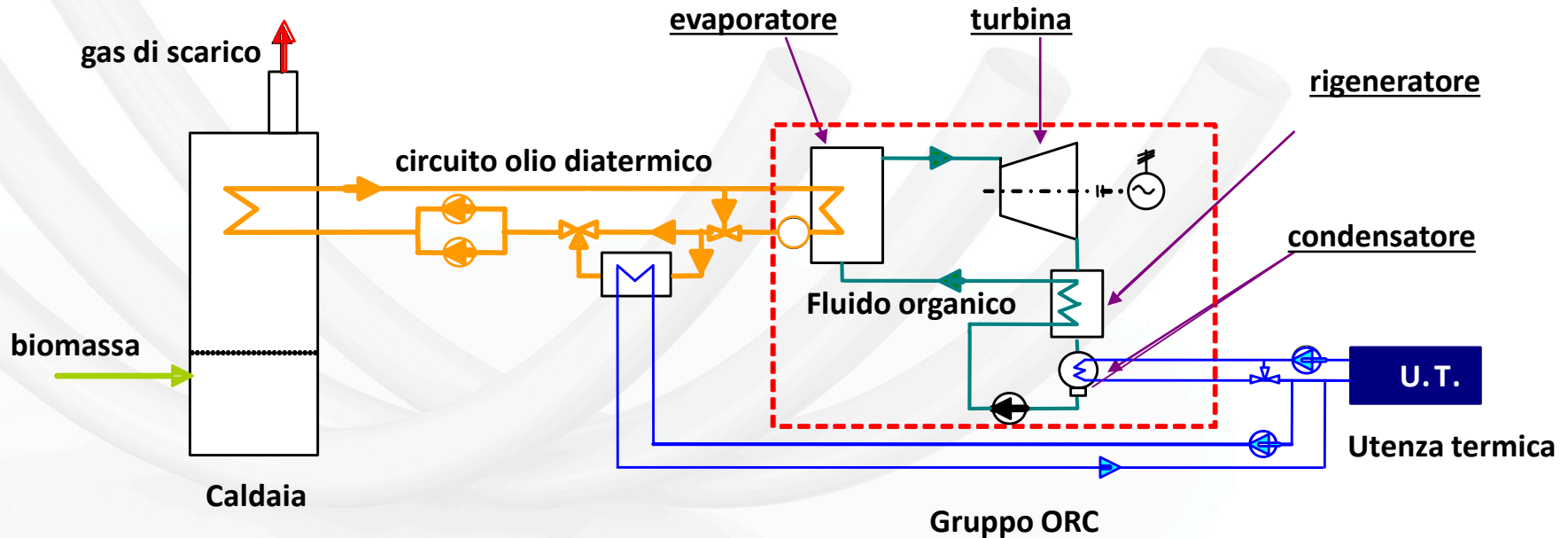
I fluidi di lavoro più impiegati sono i *silossani* e i *refrigeranti*



L'olio diatermico offre numerosi *vantaggi* tra cui *bassa pressione* nella caldaia, *elevata inerzia termica* e sistemi di regolazione *semplici* e sicuri

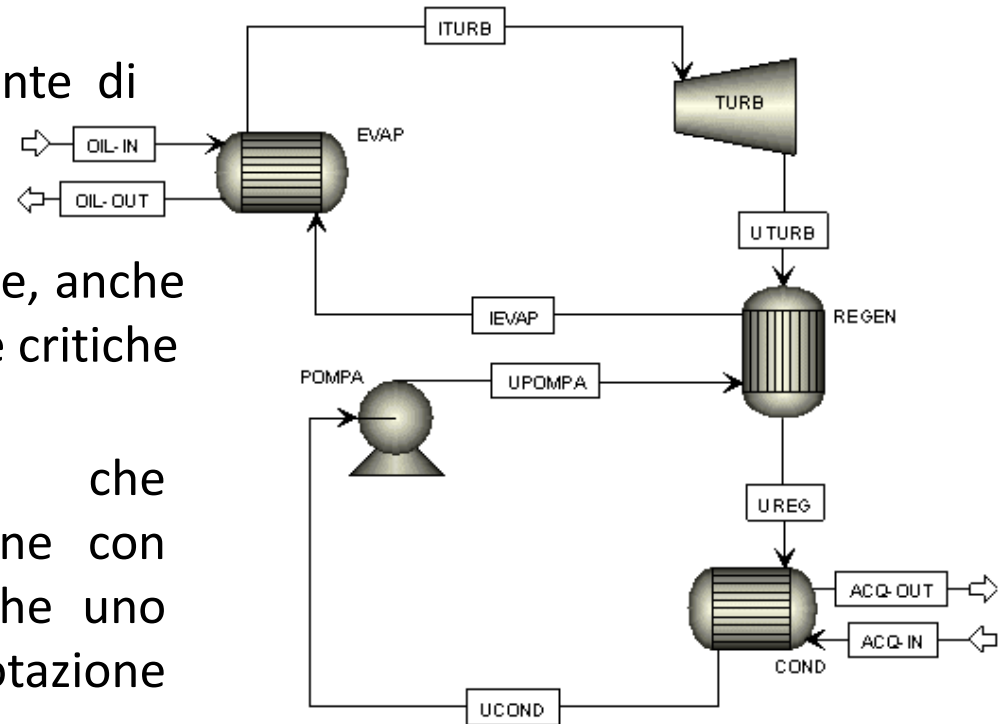
Il calore di condensazione è usato per produrre acqua calda a circa 80-90°C, un livello di temperatura adeguato al *teleriscaldamento*

Il rendimento del ciclo è limitato dalle temperature operative raggiungibili (~310 °C)



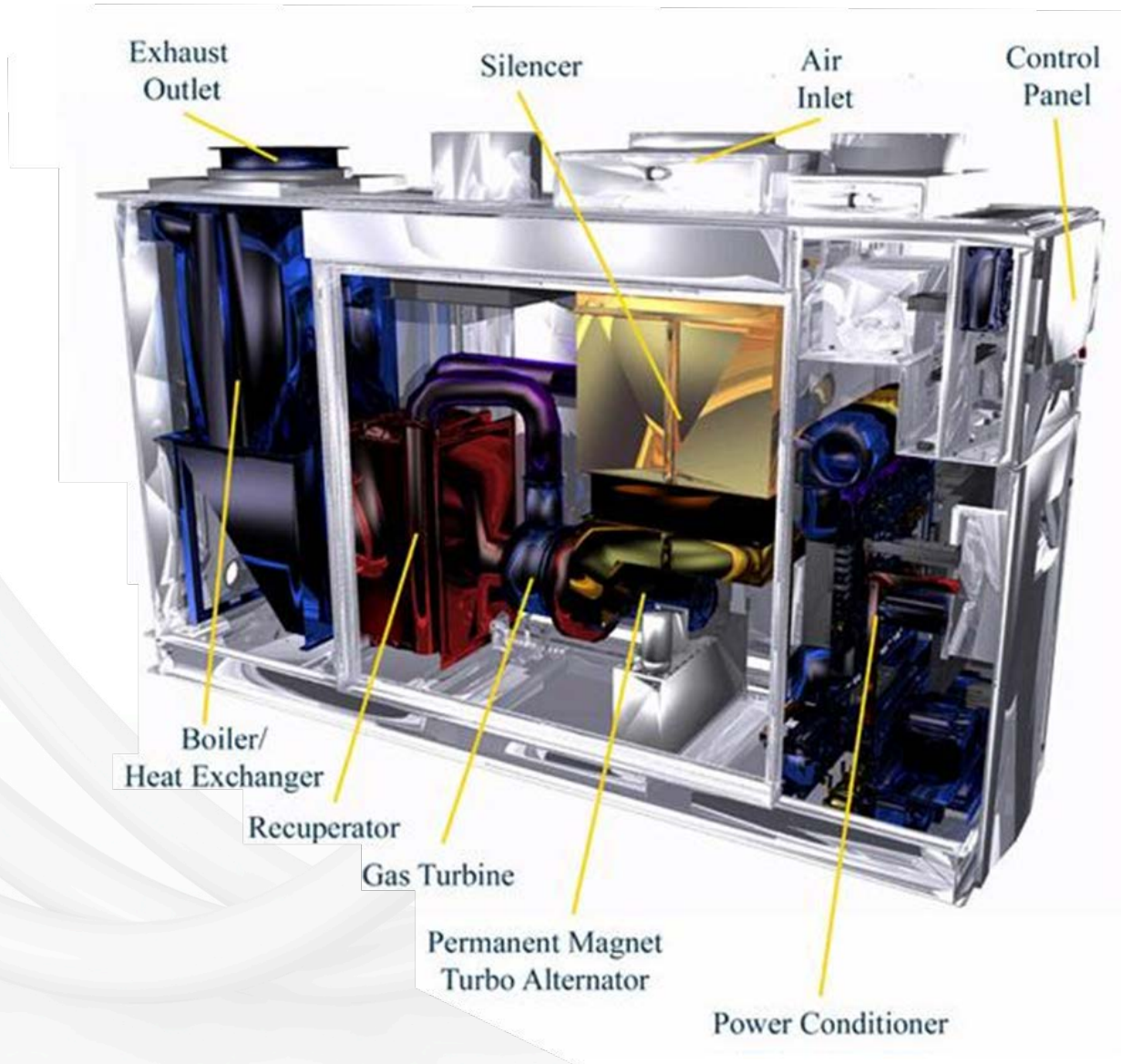
I cicli a fluido organico (ORC) consentono di superare alcuni limiti imposti dall'utilizzo del vapore d'acqua:

- 1 Basse temperature della sorgente di calore (tra i 100 e 400 °C)
- 2 Basse pressioni di vaporizzazione, anche per condizioni prossime a quelle critiche
- 3 Salti entalpici modesti, che comportano l'utilizzo di turbine con numero limitato di stadi (anche uno solo) e dalle velocità di rotazione ridotte



L'impiego di fluidi organici permette quindi una complessiva **riduzione dei costi** dei componenti e la semplificazione del layout dell'impianto

EFMGT... in futuro ne vedremo delle belle



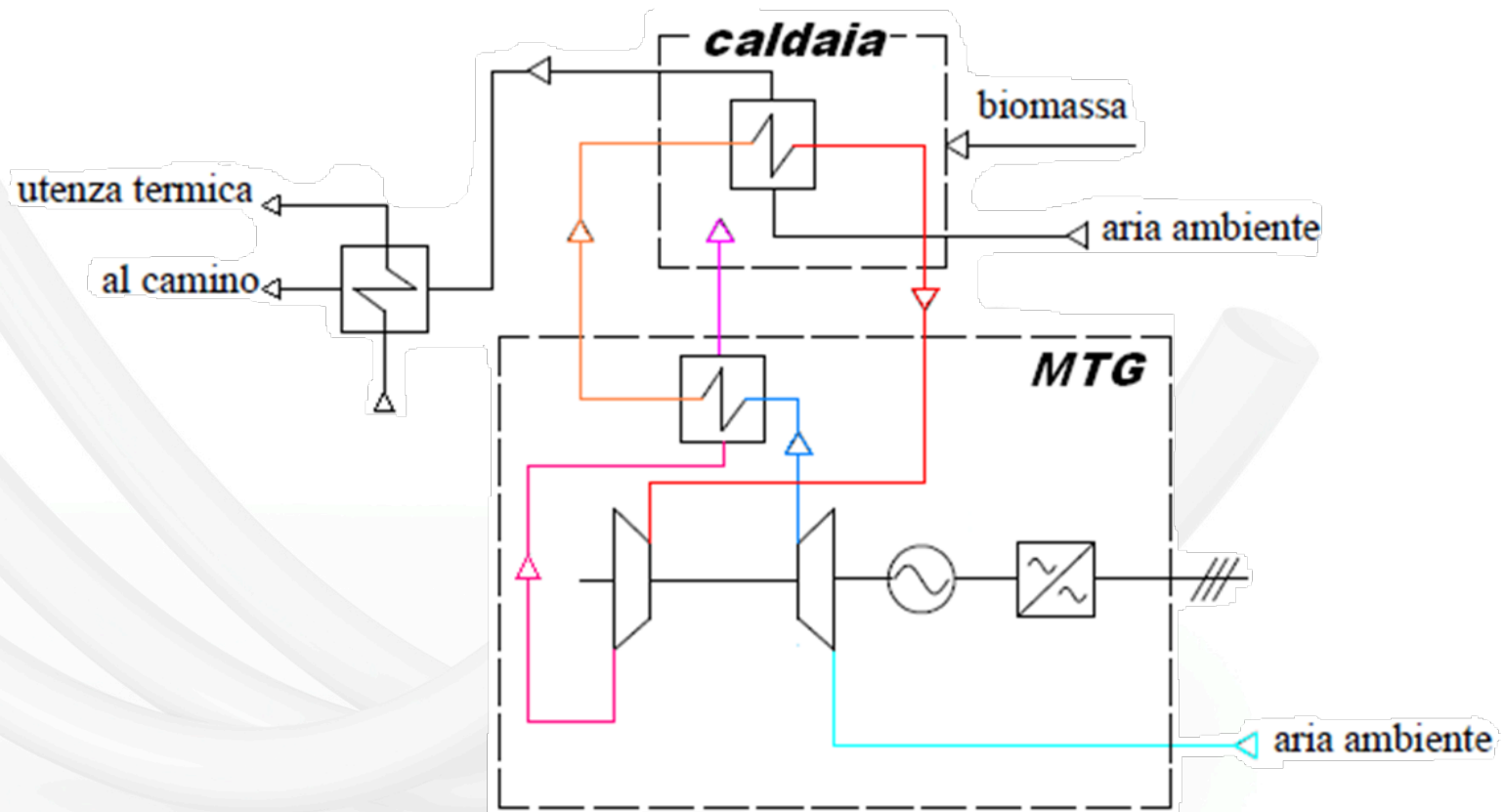
Le microturbine a **combustione esterna** prevedono un completo **disaccoppiamento** tra il ciclo dei gas di combustione e quello del fluido di lavoro, permettendo così l'impiego di biomasse per alimentare il combustore esterno

L'aria elaborata dal compressore, dopo aver attraversato il **rigeneratore**, viene convogliata in caldaia, dove, per mezzo di uno scambiatore raggiunge la temperatura di circa **800 °C**

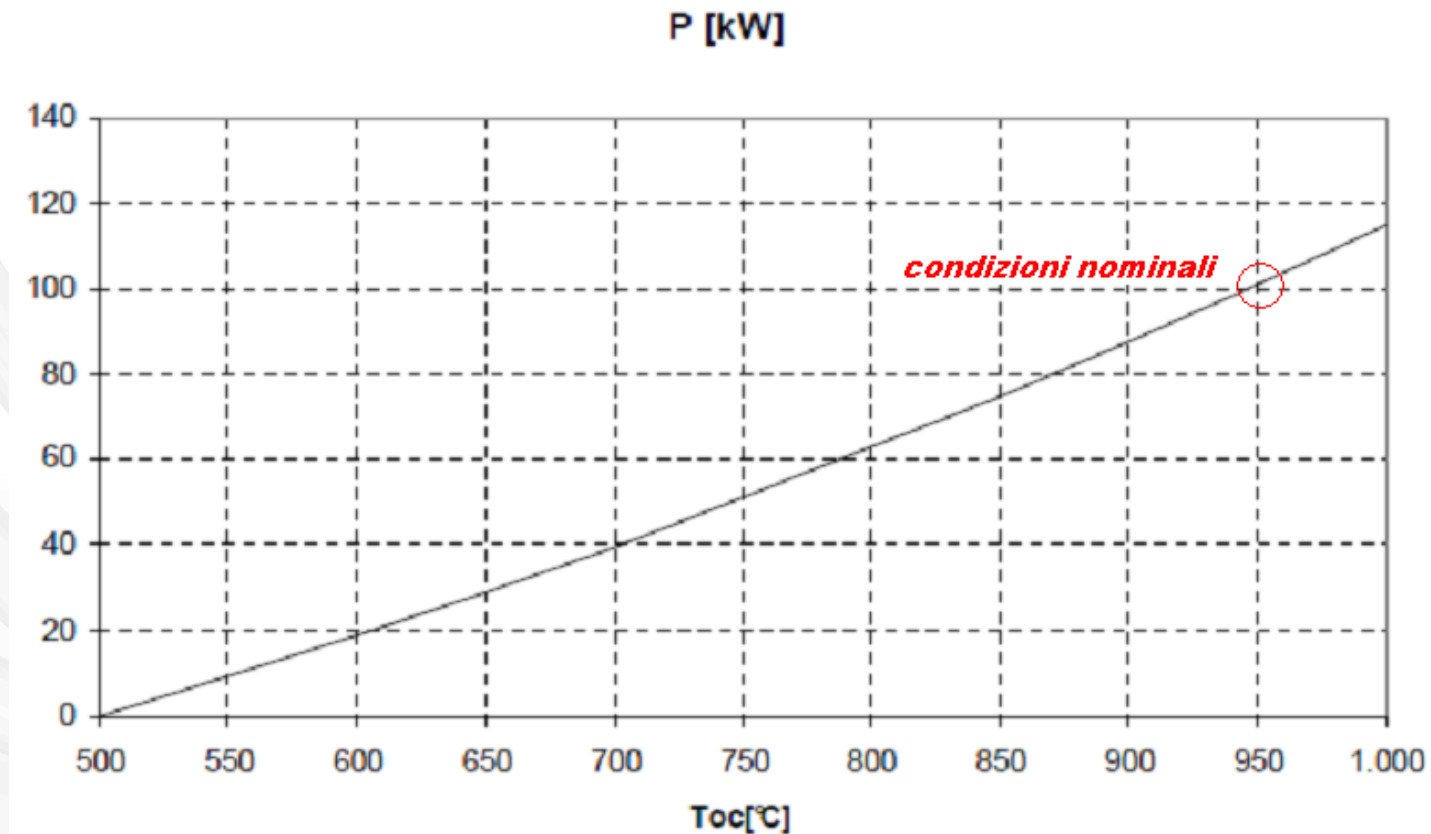
A valle dell'espansione in turbina ($\sim 650^{\circ}\text{C}$), l'aria fluisce attraverso il rigeneratore con lo scopo di preriscaldare l'aria elaborata dal compressore ed **aumentare** quindi **l'efficienza elettrica** del sistema

Il ciclo termodinamico di riferimento, come per le tradizionali MGT, rimane dunque il ciclo **Joule Brayton** rigenerativo

Per **incrementare** ulteriormente **il rendimento** del sistema, la caldaia utilizza come aria primaria di combustione **l'aria di scarico** della microturbina a valle del rigeneratore ad una temperatura di circa **~270°C**



La potenza erogata dalla EFMGT è strettamente legata alla **temperatura dell'aria** proveniente dal combustore esterno e quindi al rendimento stesso di caldaia e, in particolar modo, **all'efficienza dello scambiatore** fumi/aria



Una prospettiva interessante...

Scenario:

- Promettente soluzione per lo sfruttamento *locale* di combustibili a basso costo, quali ad esempio la biomassa di origine agro-forestale
- Lo sfruttamento sempre più razionale di risorse rinnovabili potrebbe portare in un prossimo futuro allo sviluppo di *piccole centrali* poste al servizio di mini reti di teleriscaldamento nell'ambito residenziale e/o terziario
- *Tecnologia molto promettente* garantendo i vantaggi tipici delle MTG unitamente alle ottime prestazioni raggiungibili dal punto di vista energetico
- Ampie possibilità di adottare *soluzioni impiantistiche innovative*



avrei un paio di domande ...



...**esisteranno** davvero

...a che **temperature** funziona

...con che **materiali**

...ma le turbine non si **rovinano**

...chissà le **prestazioni**

bla
bla bla
bla
bla bla bla
bla
bla
bla
bla
bla
bla
bla

L'impianto di Zibello



L'impianto: componenti principali

2 Caldaie da 450kW alimentate a biomassa

2 scambiatori fumi - aria

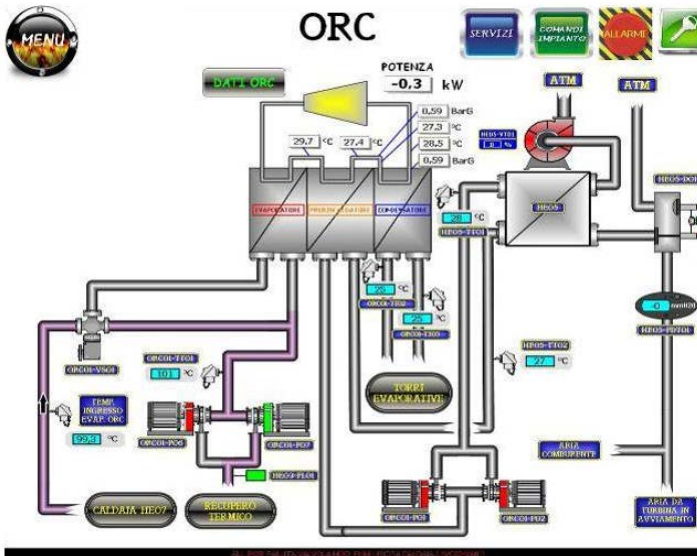
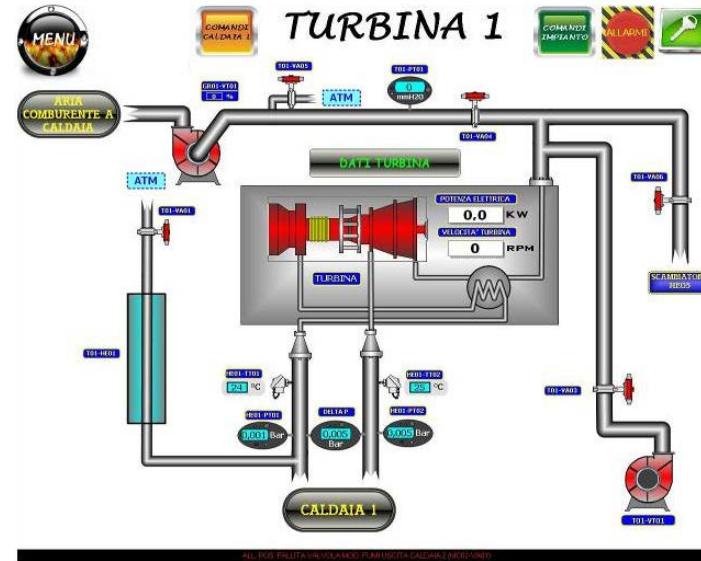
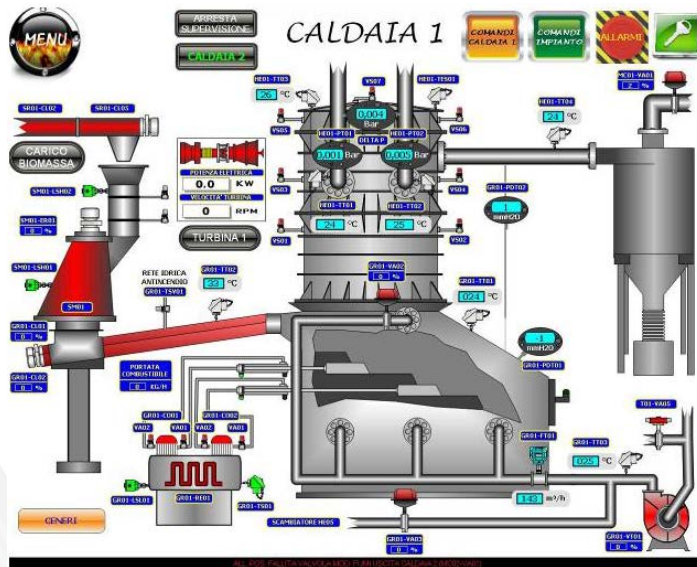
2 MTG Turbec T100 in configurazione EFMGT

Deposito a cielo aperto e sotto tettoia

1 scambiatore fumi/acqua surriscaldato da ~600kW

1 turbogeneratore ORC Calnetix

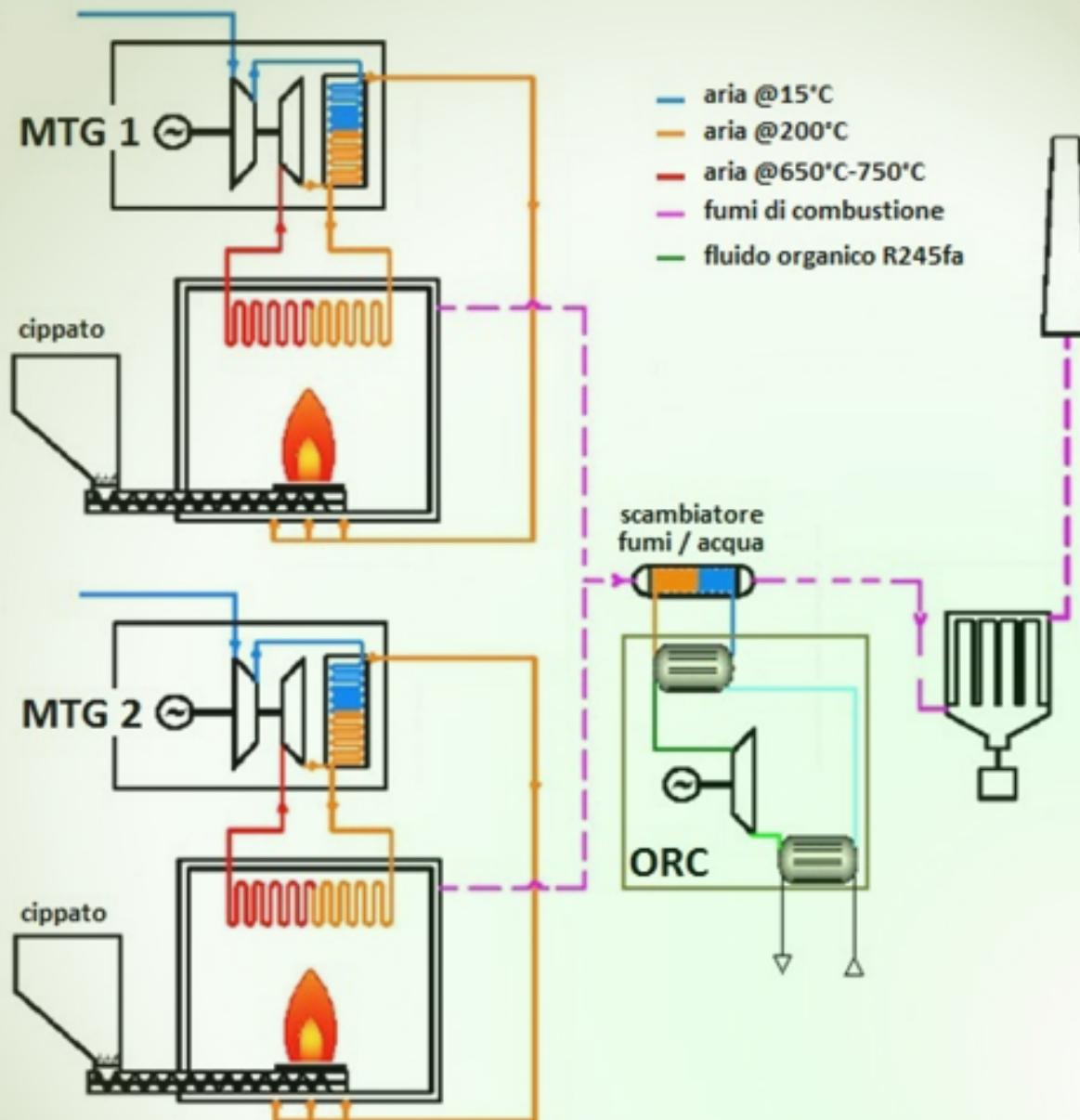
L'impianto: supervisione e controllo



Tutte le grandezze vengono acquisite ed elaborate da un PLC sul quale è implementato un software dedicato per la gestione d'impianto

Tramite finestre dedicate è possibile indagare lo stato dei principali componenti

L'impianto: schema di processo



EFMGT: il modello Turbec T100



Assenza camera di combustione



Compressore e turbina sono entrambe macchine radiali calettate sullo stesso albero insieme al generatore

Il combustore: alcuni dettagli

La potenza termica al focolare è di circa 450 kW ed il rendimento termico è superiore al 90%.



Progettato e realizzato allo scopo di poter utilizzare biomassa con contenuto di umidità fino al 35 %
L'aria di scarico della microturbina viene utilizzata come aria primaria dalla caldaia al fine di massimizzare l'efficienza del ciclo

Il ciclo a recupero a bassa entalpia



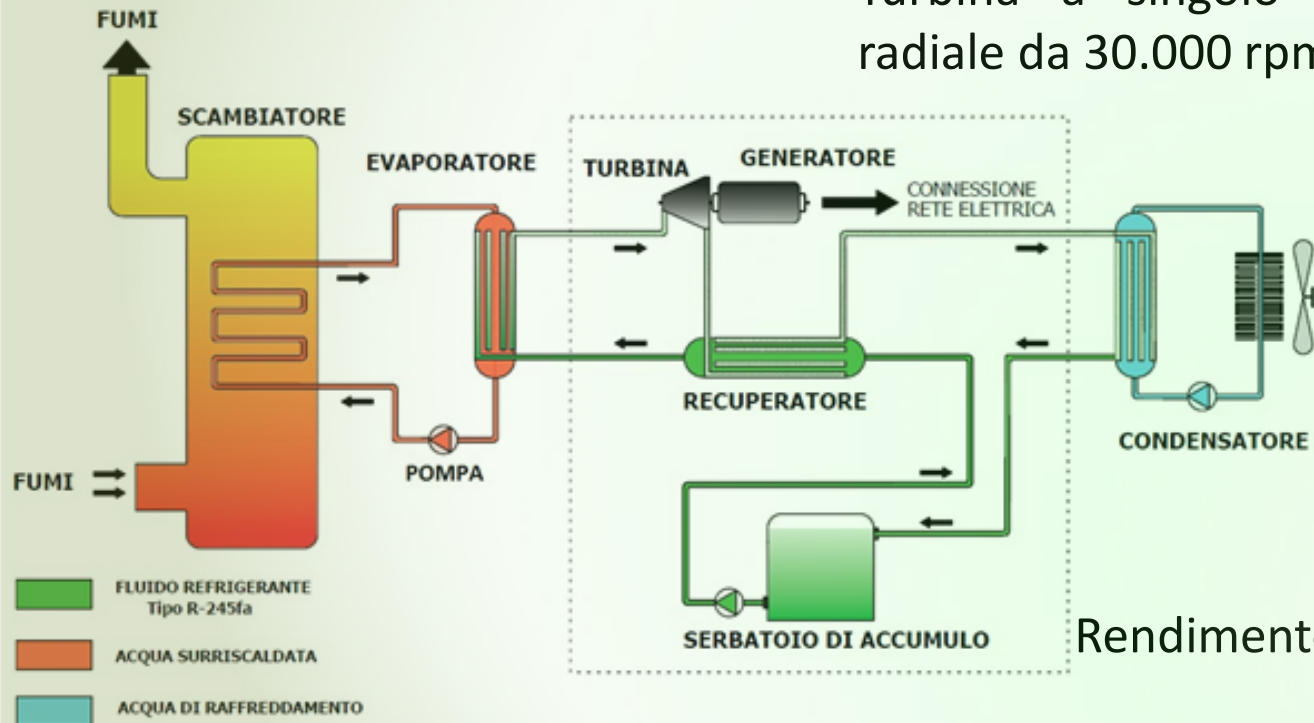
Turbogeneratore ORC da 125 kW

Fluido di lavoro R245fa

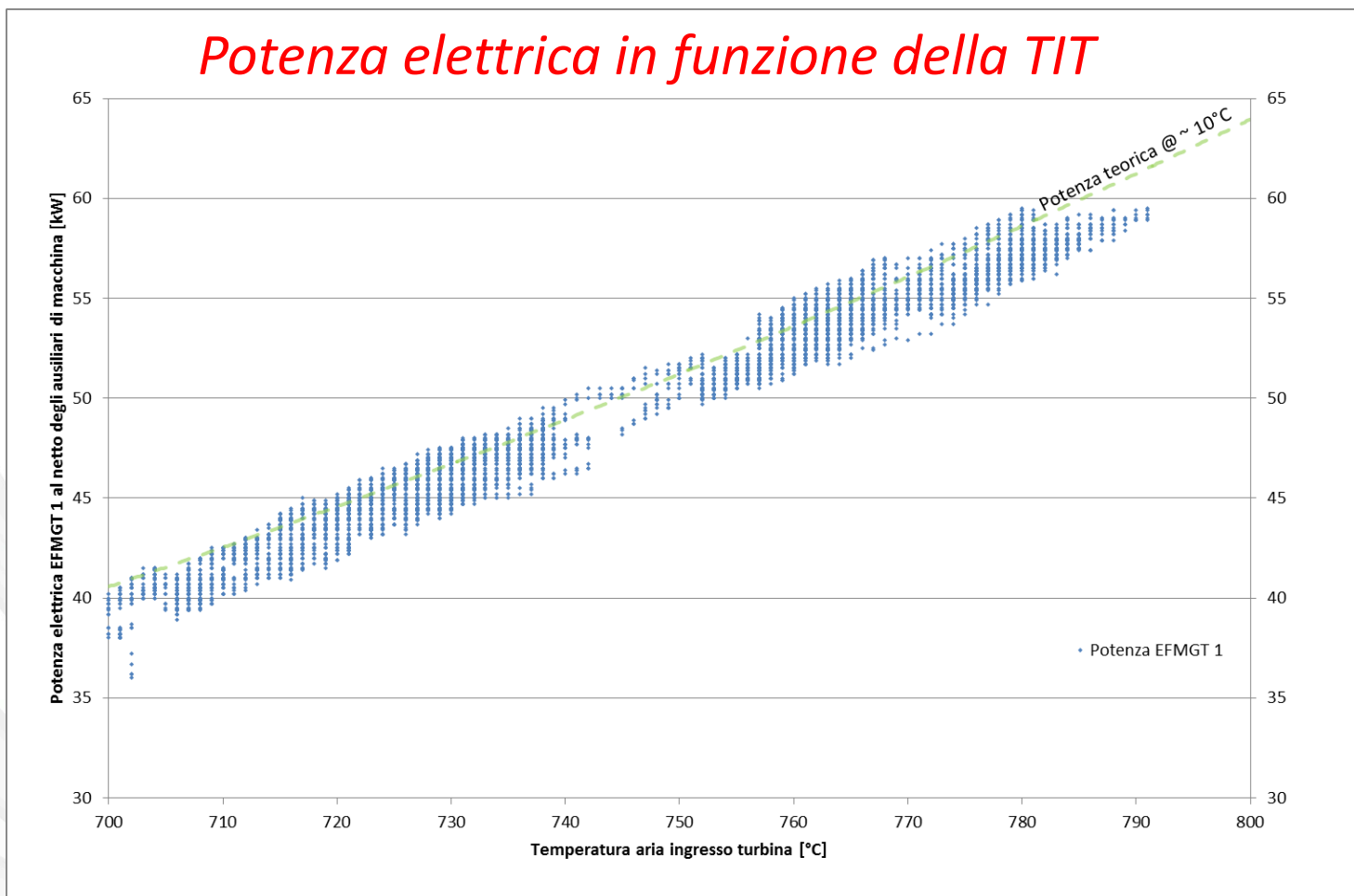
Potenza in ingresso ~ 600kW

Acqua surriscaldata (@150°C) come fluido vettore

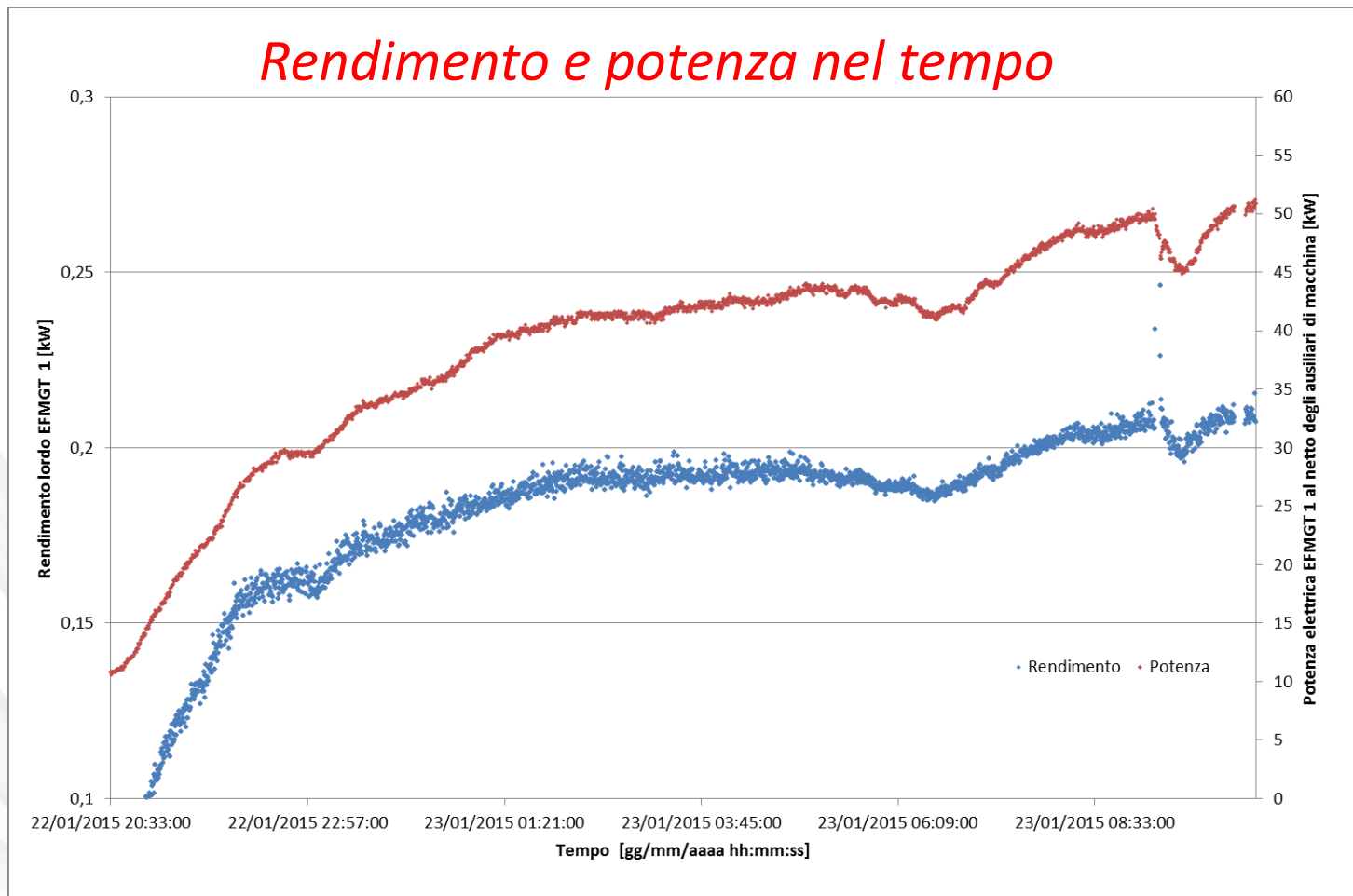
Turbina a singolo stadio a flusso radiale da 30.000 rpm



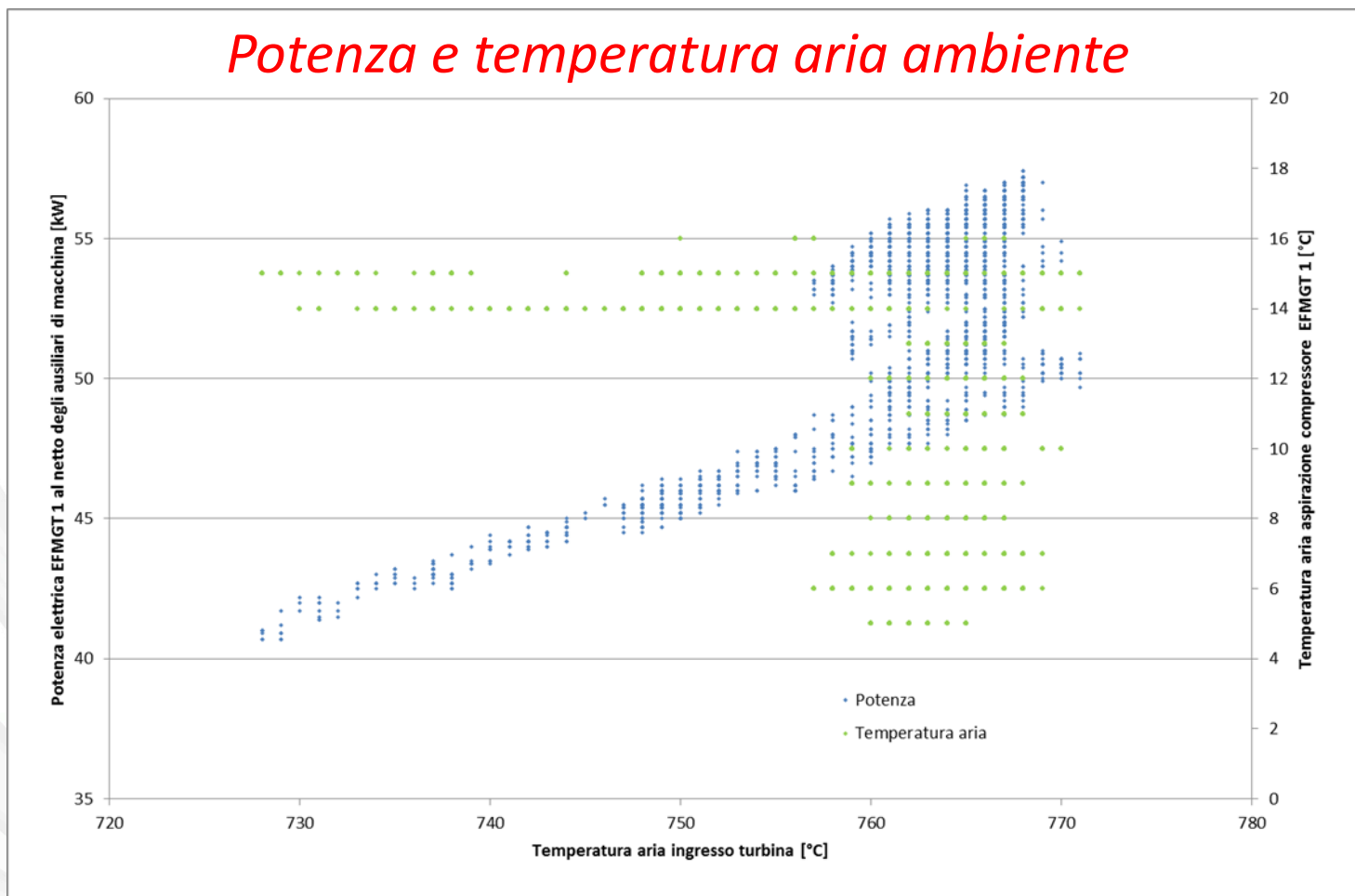
Rendimento lordo ~ 14%



Un incremento di circa **25°C** della temperatura dell'aria in aspirazione turbina (TIT) comporta un incremento della potenza elettrica erogata pari a circa **5,5kW**



Rendimento lordo di macchina superiore al **20%** @TIT >750 °C

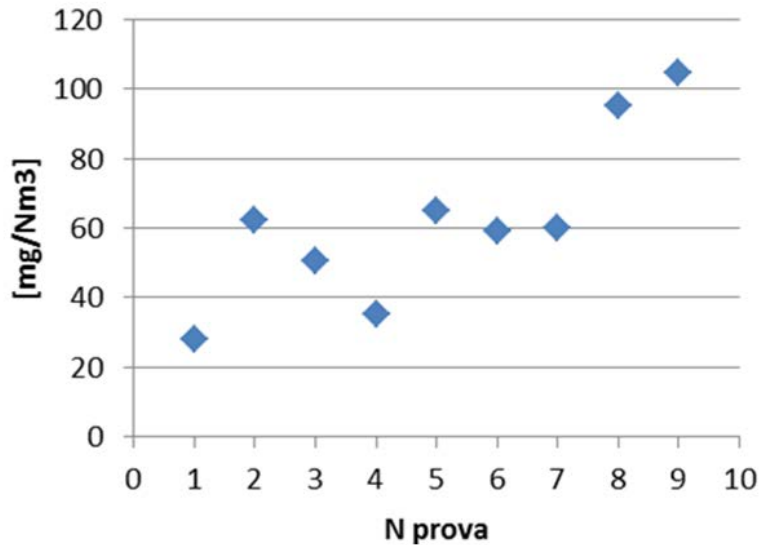


La variazione di potenza registrata è risultata pari a circa **1 kW/°C**



Determinazione delle polveri totali

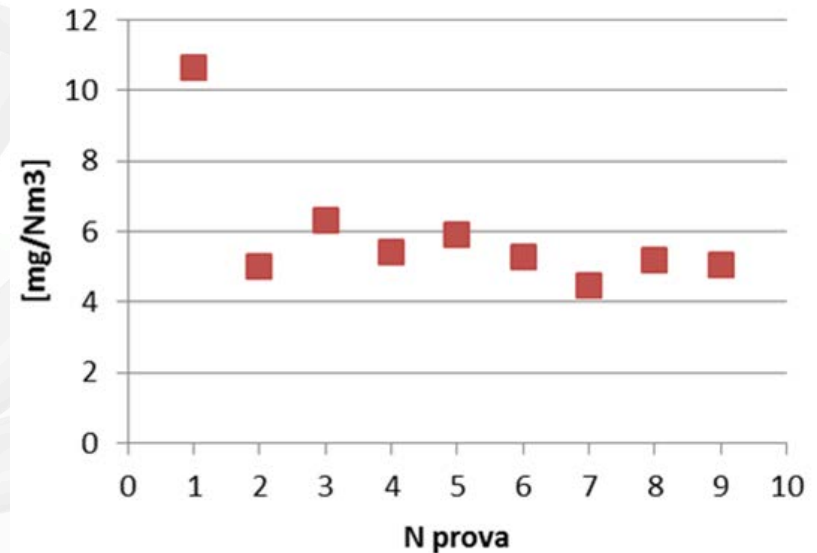
senza filtro a manica



✓ Concentrazioni di polveri nei fumi al di sotto del limite di legge di 100 mg/Nm³ per quasi tutte le misure effettuate

✓ Concentrazione media pari a ~ 62 mg/Nm³

con filtro a manica



✓ Riduzione del materiale particellare rilasciato in atmosfera mediamente superiore all'80%.

✓ Concentrazione media pari a ~ 5,9 mg/Nm³



Sembra facile

ma...



Per aumentare ulteriormente gli indici prestazionali bisogna poter operare a temperature di processo più elevate, anche superiori agli 800 °C



Ma lavorare a queste temperature favorisce i fenomeni ossidativi dei materiali che costituiscono gli elementi scambianti – attualmente AISI 310

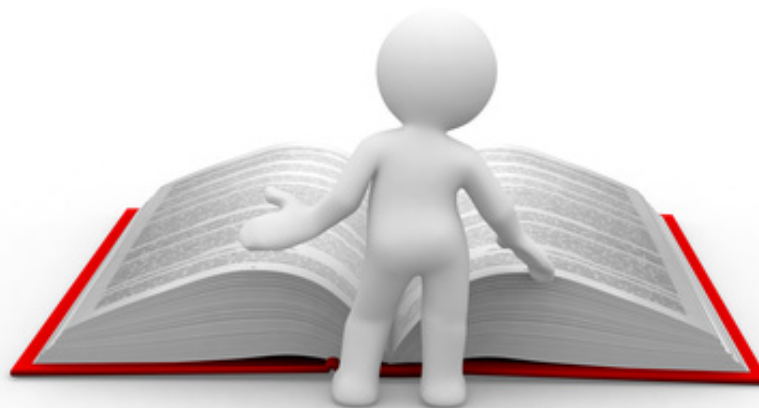


Per le fasi di collaudo e messa a punto, così come per lo svolgimento delle normali operazioni di pulizia, è necessario un numero elevato di manovre di avviamento ed arresto del sistema



Ma i transitori termici che ne conseguono possono facilmente causare il distacco degli ossidi che si sono precedentemente formati

Il particolato solido e i fenomeni erosivi



... serve una soluzione

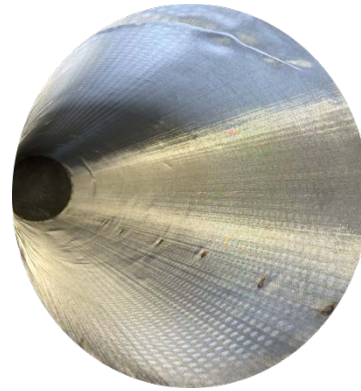
L'aria che espande in turbina non trasporti particolato solido

- ✓ Non ci sia particolato solido in circolazione
- ✓ Il particolato solido in circolazione non possa raggiungere la turbina

Il particolato solido che investe la turbina non la danneggi

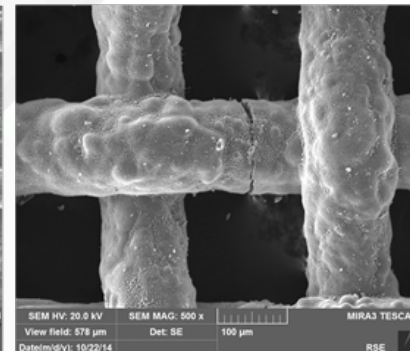
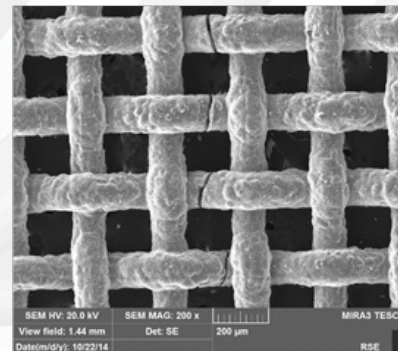
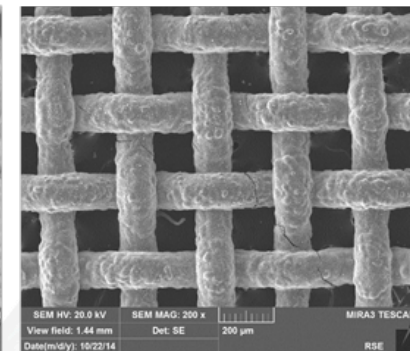
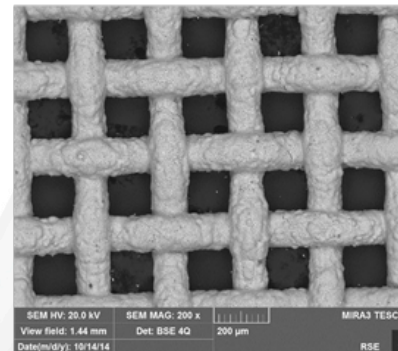
- ✓ La turbina non sia sensibile all'erosione da parte del particolato
- ✗ Il particolato che viene trasportato dal flusso gassoso non sia aggressivo nei confronti del materiale con cui è realizzata la turbina

I dispositivi di protezione



Filtri a cartuccia in rete metallica realizzata in acciaio inox **AISI 316**

La sezione di luce ha forma quadrata con lato pari a **235 μm** (60 mesh)

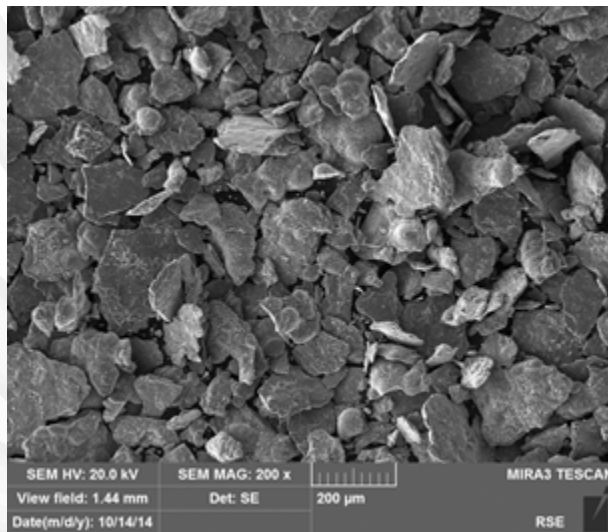


Le analisi di laboratorio

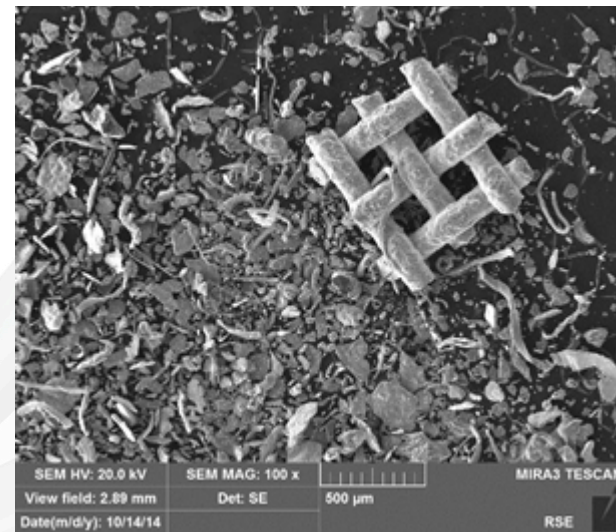


La polvere è composta essenzialmente da ossidi metallici, con prevalenza di ossido di ferro e di cromo

Pre filtro



Post filtro





La presenza di **frammenti di rete** nelle polveri prelevati a valle dei dispositivi di protezione mostra l'inadeguatezza del sistema di protezione adottato

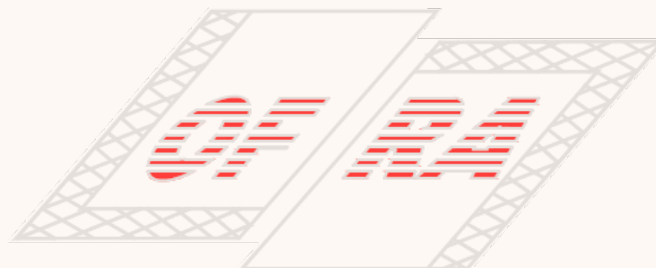
Analisi granulometriche evidenziano che le dimensioni del particolato solido sono sufficienti per produrre **fenomeni erosivi** anche rilevanti

THE PROBLEM IS
NOT THE PROBLEM;
THE PROBLEM IS YOUR
ATTITUDE ABOUT
THE PROBLEM

- Captain Jack Sparrow



CogenERazione da Biomassa mEdiante scambiatori con Rivestimenti innOvativi per sistemi EFMGT



Proposta di progetto ammessa al finanziamento del Bando di gara per la selezione di progetti di ricerca di sistema elettrico di cui al decreto del Ministro dello sviluppo economico 30 giugno 2014

I principali obiettivi

- ✓ Individuazione di **materiali** economicamente sostenibili e adeguati ad operare a temperature compatibili con i **rendimenti** attesi per la turbina
- ✓ Individuazione di processi di **alluminizzazione** per ridurre i fenomeni di ossidazione a carico dei materiali che costituiscono lo scambiatore
- ✓ Studio di un processo di **ripristino in sito** del rivestimento interno dello scambiatore
- ✓ Studio di processi di **pulizia** dello scambiatore e di **filtraggio** del fluido termovettore





Resistenza meccanica

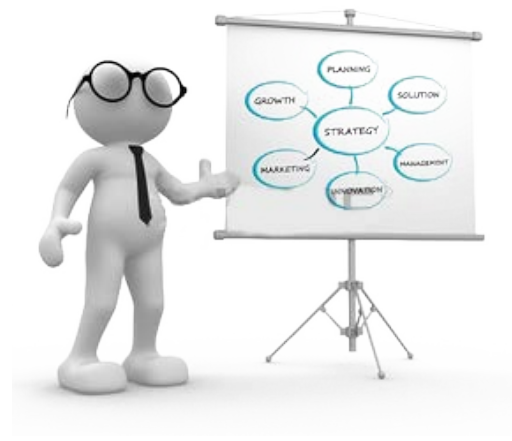
Il materiale dello scambiatore dovrà resistere, in condizioni di altissima temperatura di parete (dell'ordine degli 850°C), alla pressione di processo (3,5 bar g).

Il materiale dovrà avere una tensione di lavoro (σ) alla temperatura t non superiore alla tensione massima ammissibile (σ_{amm}) in regime di scorrimento viscoso (creep)

$$\text{Tensione di lavoro } (\sigma) \leq \text{Tensione ammissibile } (\sigma_{amm})$$

Trattabilità al processo di alluminizzazione

Il materiale dovrà presentare buone caratteristiche microstrutturali superficiali e nei primi strati interni quando viene sottoposto ad alluminizzazione tramite un processo di diffusione.



Resistenza all'ossidazione

Il materiale alluminizzato dovrà presentare un'ottima resistenza all'ossidazione nelle condizioni operative richieste ad altissima temperatura. Una serie di test dovranno essere eseguiti per determinare la resistenza all'ossidazione nella condizione di lavoro dell'ordine degli 850 °C.

Resistenza alla corrosione

Il materiale dovrà presentare una buona resistenza alla corrosione intergranulare che si verifica durante i transitori termici (lenti riscaldamenti e raffreddamenti).

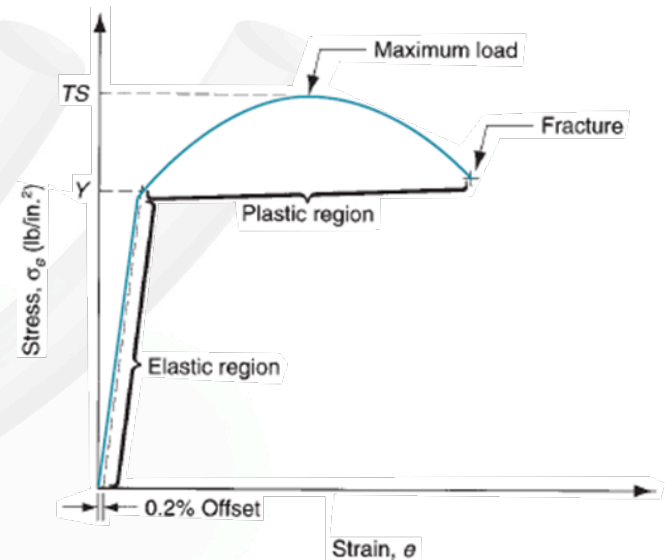


Resistenza all'abrasione (durezza)

Nelle condizioni di temperatura richieste il materiale dovrà avere un'ottima resistenza alle azioni abrasive ed erosive del flusso del fluido di processo.

Resistenza alla frattura (tenacità)

Il materiale dovrà avere una elevata capacità di assorbire energia di deformazione in campo elasto-plastico sotto l'azione di carichi statici prima di fratturarsi.

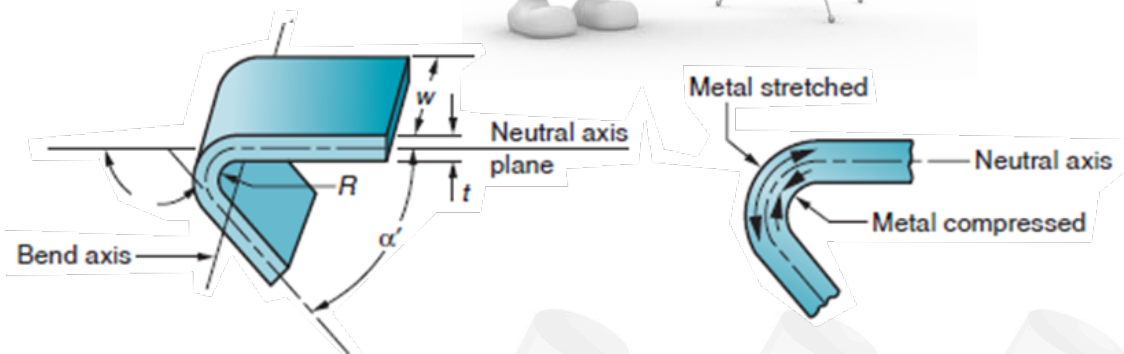




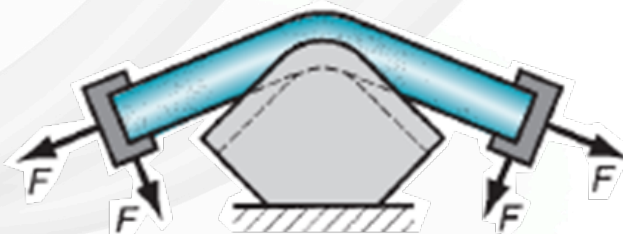
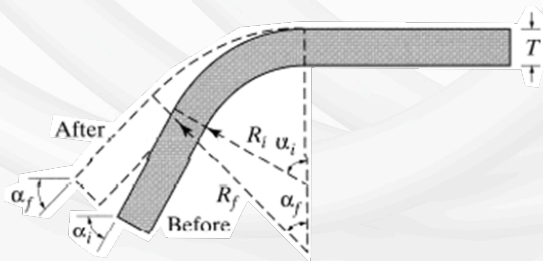
Lavorabilità

Duttilità

Saldabilità



Contenuto ritorno elastico, quando vengono effettuate operazioni di deformazioni plastica (piegatura, etc. ...) il materiale dovrà mantenere la geometria realizzata dalla lavorazione.





Costo

Il costo del materiale non dovrà comprometterne la commercializzazione

Reperibilità

Il materiale dovrà potersi reperire sul mercato in tempi e costi compatibili con la realizzazione di un apparecchiatura industriale commercializzabile



Scelta della tipologia di materiale

La tipologia di materiale che risponde al meglio ai requisiti richiesti risulta essere una lega ferrosa ad alto contenuto di cromo e nichel, ossia un **acciaio inossidabile austenitico**.

Materiali candidati

Tra gli acciai austenitici rispondenti ai requisiti sopra esaminati risultano maggiormente idonei per il progetto i seguenti candidati:

AISI 304 H

AISI 347 H

253 MA (UNS: S 30815)



Prime prove di alluminizzazione

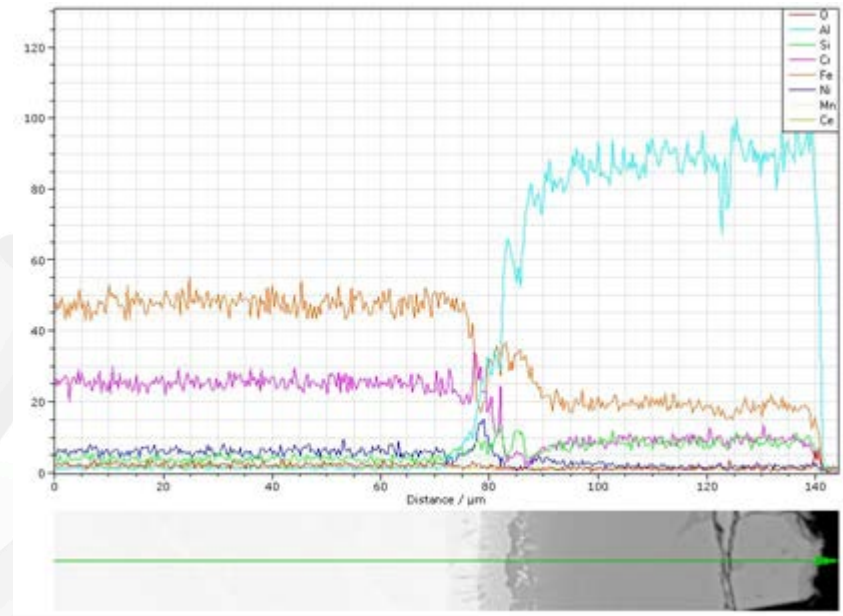
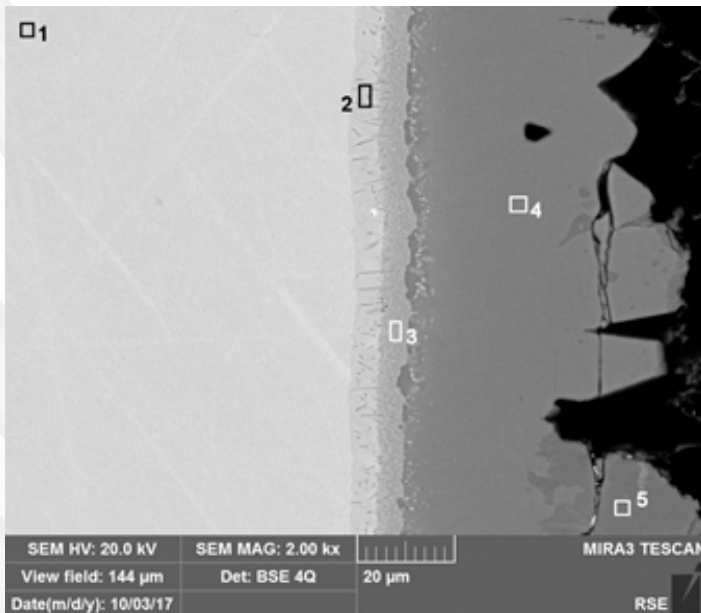


- ✓ Il materiale viene trattato tramite un **processo diffusivo** di alluminizzazione
- ✓ Il trattamento ha l'obiettivo di **aumentare** notevolmente la **resistenza all'ossidazione** che si verifica con le alte temperature e **all'abrasione** causata dalle scaglie di ossido trasportate dal fluido termovettore (aria)



Prime prove di alluminizzazione

- ✓ L' Alluminio **sostituisce** il Nichel durante il trattamento: più elevato è il tenore di Nichel nel materiale di base e più il processo sarà garantito
- ✓ I risultati ottenuti mostrano come il **253 MA** sia il materiale più promettente: si evidenzia la creazione di una **fascia di coating diffusivo** di spessore di circa 11 μm [2] molto compatta e caratterizzata dalla presenza di Al (5% max) e di Si (2% max)



- ✓ Gli strati esterni vanno rimossi con lavaggio chimico – processo replicabile in sito

La strada è ancora lunga...



ma sappiamo dove andare

- ✓ Studio di **geometrie** dello scambiatore che consentano l'accoppiamento ottimale con una **EFMGT** e siano compatibili con i processi di rivestimento diffusivo studiati
- ✓ Realizzazione di un **prototipo di scambiatore** fumi/aria che verrà installato ed esercito presso l'impianto pilota di Zibello (PR)
- ✓ Individuazione di soluzioni sistemistiche per ridurre i cicli di accensione/spegnimento e garantire almeno **6.500 ore/anno** di funzionamento
- ✓ Definizione di un **processo industriale** di coating e rigenerazione in sito adatto al materiale ed alle geometrie individuate



TO BE CONTINUED...



fabio.armanasco@rse-web.it