



Ricerca di Sistema elettrico

# Analisi ai carichi parziali e strategie di controllo di un ciclo trans-critico ibridizzato con una pompa di calore

G. Messina, G. Cevolani, A. Giovannelli, G. Di Lorenzo

## ANALISI AI CARICHI PARZIALI E STRATEGIE DI CONTROLLO DI UN CICLO TRANS-CRITICO IBRIDIZZATO CON UNA POMPA DI CALORE (LA3.33)

Giuseppe Messina (ENEA), Gianluca Cevolani, Ambra Giovannelli, Giuseppina Di Lorenzo (Roma Tre)

Dicembre 2021

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità 2021

Obiettivo: *Sistema Elettrico*

Progetto: 1.2 Sistemi di accumulo, compresi elettrochimico e power to gas, e relative interfacce con le reti

Linea di attività: *LA3.33 Integrazione P2G/sistemi generazione elettrica innovativi: cicli a sCO<sub>2</sub> ibridizzati con sistemi di accumulo – analisi off-design e controllo*

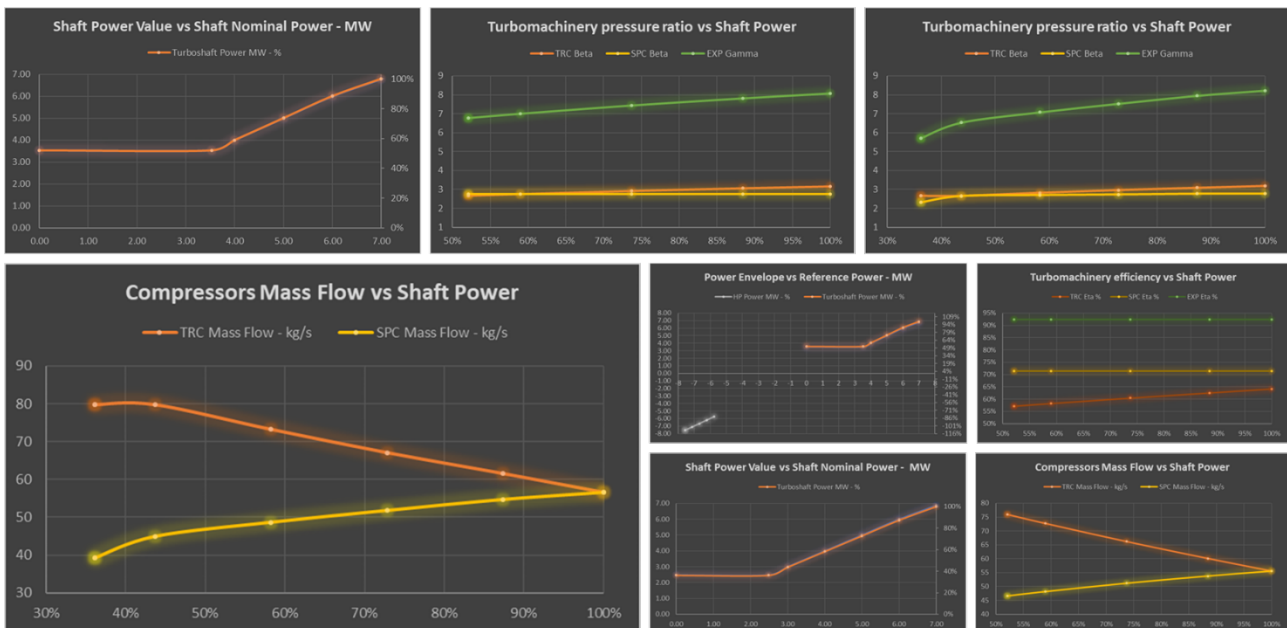
Responsabile del Progetto: Giulia Monteleone, ENEA

## Indice

SOMMARIO E SINTESI GRAFICA.....	3
1 INTRODUZIONE.....	4
2 MODELLO DI ACCOPPIAMENTO DELLE TURBOMACCHINE.....	5
2.1 CURVE CARATTERISTICHE .....	5
a) 2.1.1 <i>Compressore transcritico</i> .....	5
b) 2.1.2 <i>Compressore supercritico</i> .....	6
c) 2.1.3 <i>Espansore</i> .....	6
2.2 ALGORITMO DI ACCOPPIAMENTO DELLE TURBOMACCHINE .....	7
d) 2.2.1 <i>Bilancio di massa</i> .....	7
e) 2.2.2 <i>Bilancio di energia</i> .....	7
f) 2.2.3 <i>Modulo di ottimizzazione</i> .....	8
3 RISULTATI.....	10
3.1 REGOLAZIONE SENZA VIGV.....	10
3.2 REGOLAZIONE CON VIGV .....	11
4 CONCLUSIONI .....	12

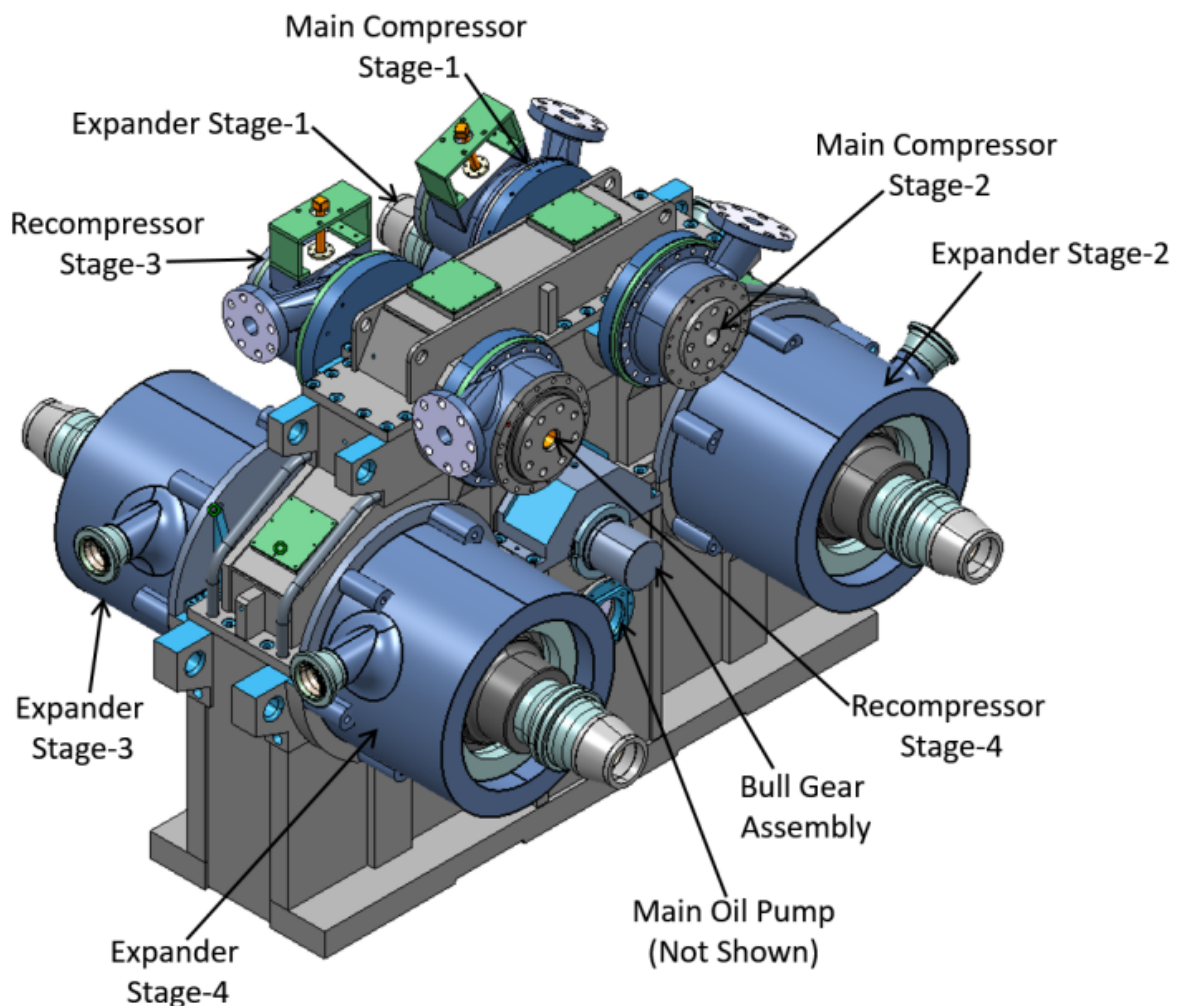
## Sommario e sintesi grafica

Come previsto nel PTR del progetto, sono stati ultimati lavori relativi alla LA 3.33, relativi all'analisi ai carichi parziali e alle strategie di controllo di un ciclo transcritico ibridizzato con una pompa di calore. Nello specifico, è stato predisposto un modello di accoppiamento delle turbomacchine ottimizzato che, a fronte della potenza richiesta all'albero del turbo-gruppo, fornisce una soluzione del bilancio di massa ed energia massimizzando l'efficienza di ciascuna delle turbomacchine. In tutti i casi trattati è stato ipotizzato un regime di rotazione costante, specifico per ciascuna turbomacchina, con linee d'albero integrate in un riduttore di giri. L'algoritmo di accoppiamento delle turbomacchine si basa sul metodo di risoluzione non lineare GRC (Generalised Reduced Gradient) sviluppato Leon Lasdon dell'University of Texas e Alan Waren della Cleveland State University. Questo metodo consente di ottimizzare una funzione obiettivo sulla base di un set predefinito di vincoli e parametri variabili dei quali può essere definito il dominio di esistenza. Sono stati analizzati due casi, il primo prevede la regolazione del turbo-gruppo senza il supporto del VIGV, l'altro con il supporto del VIGV sui compressori transcritico e supercritico. In entrambi i casi la potenza minima è inferiore -100% del carico nominale, caratteristica che conferma la vocazione *prosumer* del ciclo ipotizzato, con effetti promettenti sulla stabilizzazione della rete elettrica in un contesto di crescente penetrazione delle rinnovabili non programmabili. Permane un'ampia discontinuità nell'involuppo operativo complessivo della soluzione impiantistica analizzata, tra l'asse delle potenze positive e l'asse delle potenze negative, discontinuità che viene attenuata, ma non rimossa, dalla regolazione della potenza con VIGV.



## 1 Introduzione

L'analisi ai carichi parziali è stata svolta mediante il calcolo preliminare delle curve di carico del turbo-gruppo utilizzando le curve delle turbomacchine fornite dall'Università di Roma Tre. A tal fine è stato predisposto un modello di accoppiamento ottimizzato che, a fronte della potenza richiesta all'albero del turbo-gruppo, fornisce una soluzione del bilancio di massa ed energia massimizzando l'efficienza delle turbomacchine. Seguendo questa strategia di base è stato possibile ipotizzare delle curve di carico per intervalli discreti della potenza netta all'albero. Successivamente sono stati aggiunti due ulteriori gradi di libertà al modello di accoppiamento, ipotizzando gli effetti della regolazione della portata massica aspirata dei compressori transcritico e supercritico sull'accoppiamento delle turbomacchine e, conseguentemente, sulle curve di carico del turbo-gruppo al variare della potenza richiesta. In tutti i casi trattati è stato ipotizzato un regime di rotazione costante specifico per ciascuna turbomacchina, con linee d'albero integrate in un riduttore di giri (esempio in Figura 1).



*Case of APOLLO Componder from SwRI/Hanwha*

**Figura 1.** Turbo-gruppo con line d'albero integrate in un riduttore di giri. (Fonte: K. Hoopes et Al., "Advanced Gas Turbine and sCO<sub>2</sub> Combined Cycle Power System", Kickoff Meeting DOE Award Number: DE-FE0031619, August 27, 2018)

## 2 Modello di accoppiamento delle turbomacchine

### 2.1 Curve caratteristiche

Le curve caratteristiche delle turbomacchine elaborate da Roma Tre sono state fornite in forma dimensionale, il primo passaggio di calcolo è consistito nella riformulazione delle curve in formato quasi-dimensionale, calcolando le correlazioni funzionali della terna portata quasi-dimensionale ( $M^*$ ) – rapporto di compressione/espansione (**Beta / Gamma**) – efficienza (**Eta**), con:

$$M^* = M \text{ [kg/s]} \cdot T \text{ [K]}^{0.5} / p \text{ [bar]}$$

$$Beta = p_2 / p_1$$

$$Gamma = p_1 / p_2$$

#### 2.1.1 Compressore transcritico

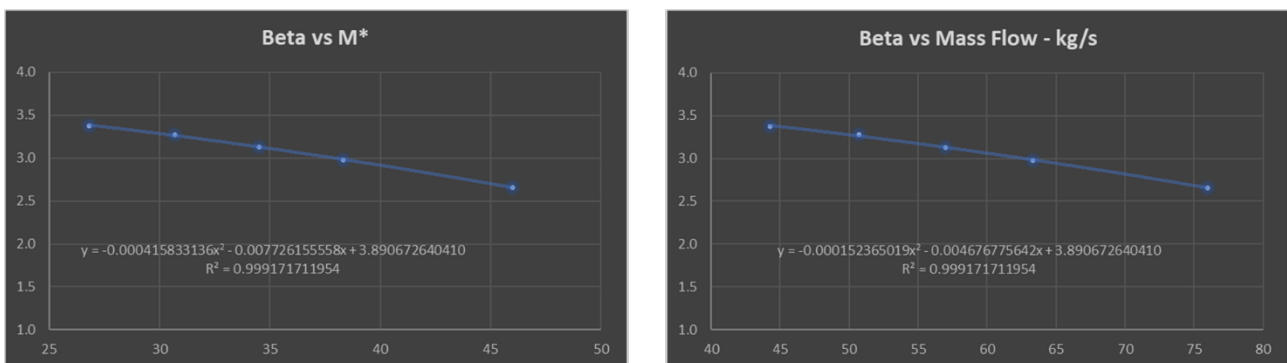


Figura 2. Rapporto di compressione, Beta, in funzione della portata non dimensionale, a sinistra, e della portata massica, a destra.

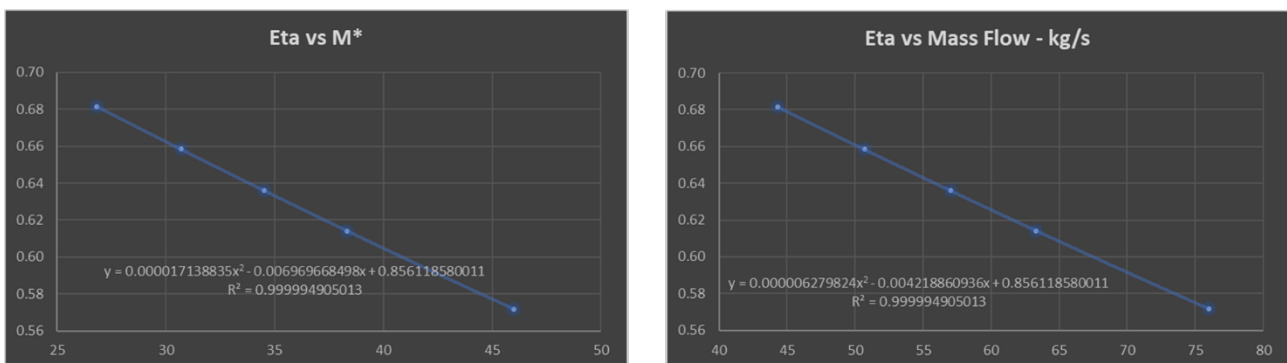


Figura 3. Efficienza, Eta, in funzione della portata non dimensionale, a sinistra, e della portata massica, a destra.

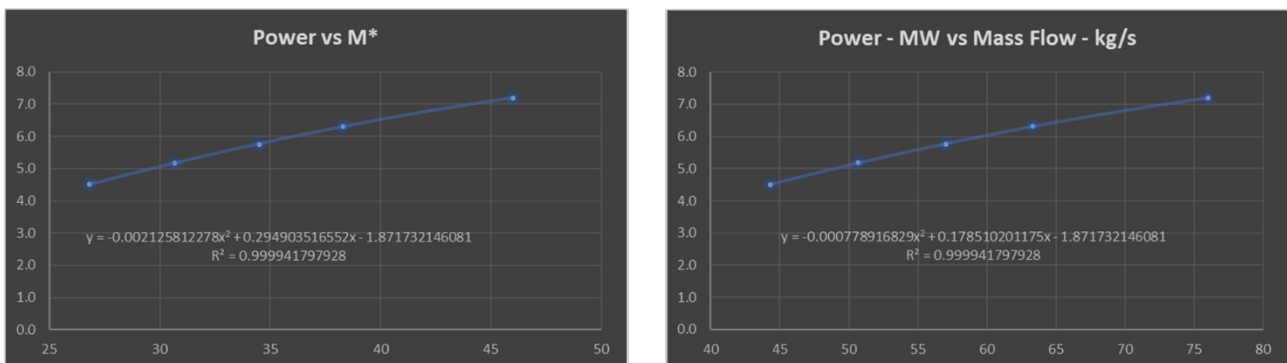
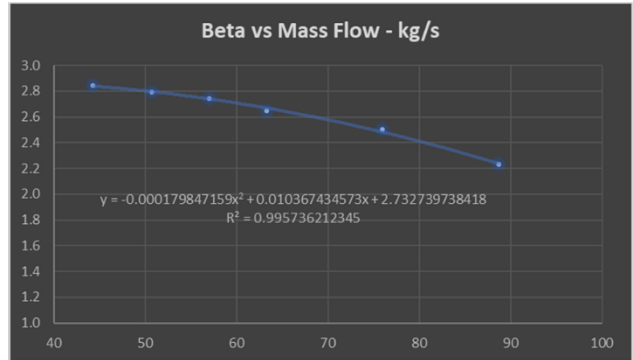
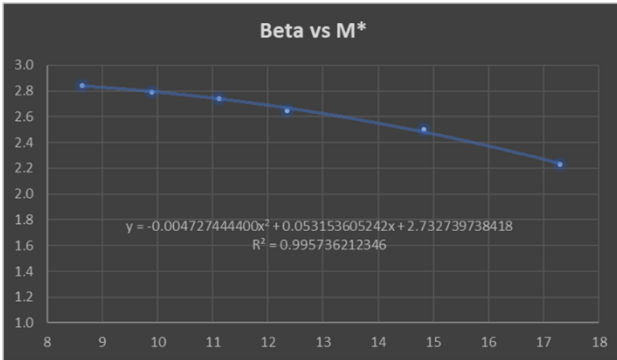
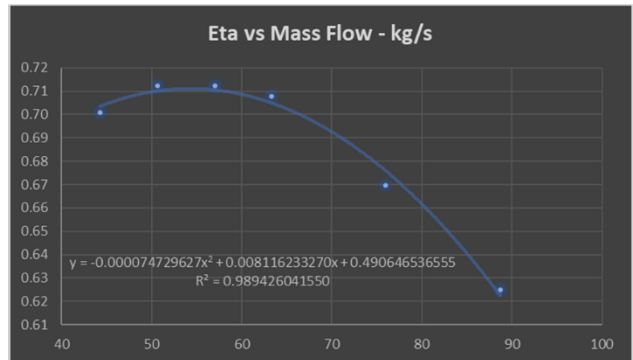
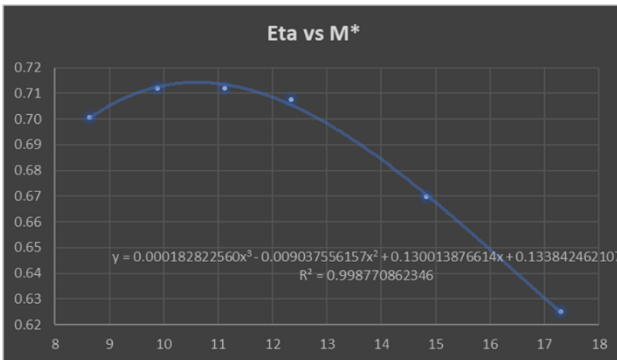


Figura 4. Potenza (MW) in funzione della portata non dimensionale, a sinistra, e della portata massica, a destra.

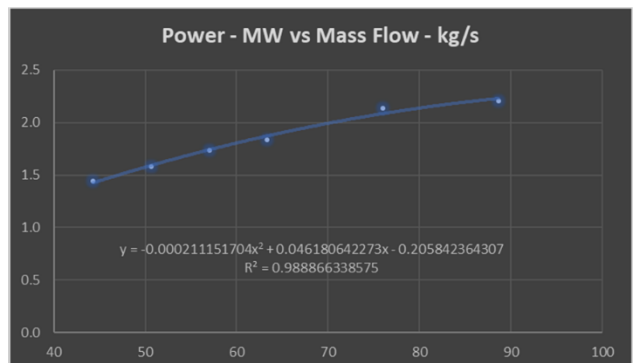
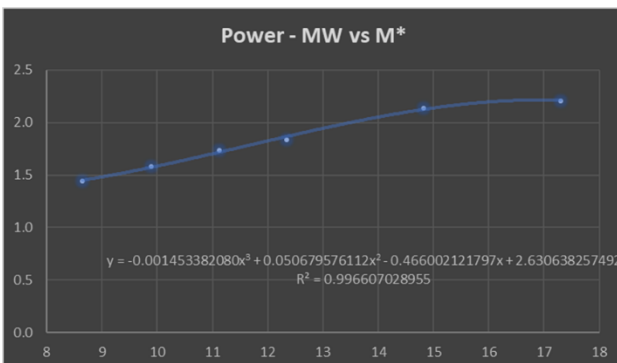
### 2.1.2 Compressore supercritico



**Figura 5.** Rapporto di compressione, Beta, in funzione della portata non dimensionale, a sinistra, e della portata massica, a destra.

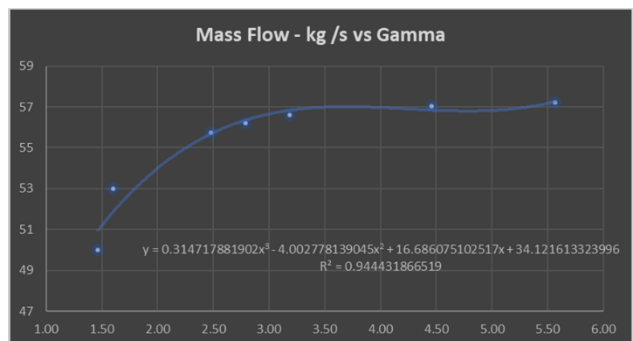
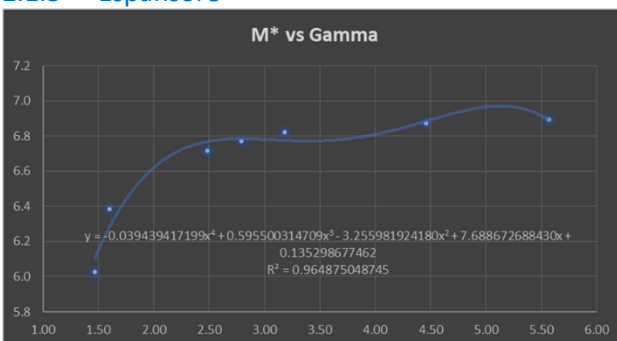


**Figura 6.** Efficienza, Eta, in funzione della portata non dimensionale, a sinistra, e della portata massica, a destra.



**Figura 7.** Potenza (MW) in funzione della portata non dimensionale, a sinistra, e della portata massica, a destra.

### 2.1.3 Espansore



**Figura 8.** Portata non dimensionale, a sinistra, e portata massica, a destra, in funzione del rapporto di espansione Gamma.

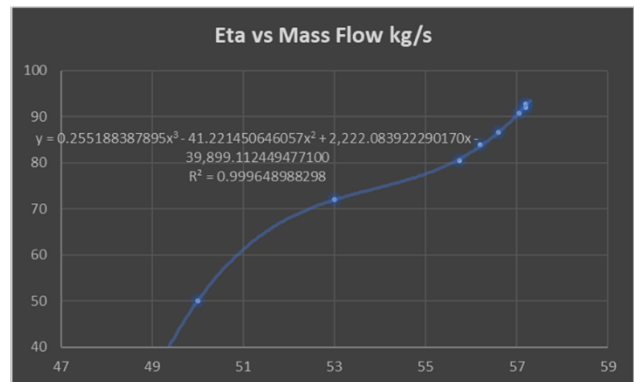
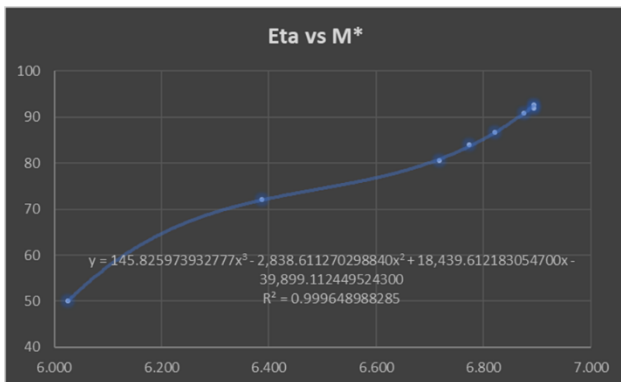


Figura 9. Efficienza,  $\eta$ , in funzione della portata non dimensionale, a sinistra, e della portata massica, a destra.

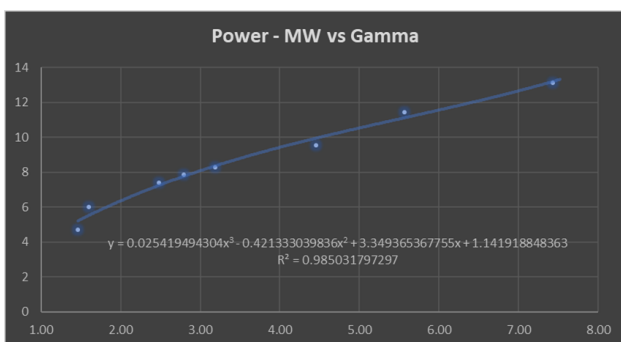


Figura 10. Potenza (MW) in funzione del rapporto di espansione  $\Gamma$ .

## 2.2 Algoritmo di accoppiamento delle turbomacchine

L'algoritmo di accoppiamento delle turbomacchine si basa sul metodo di risoluzione non lineare GRC (Generalised Reduced Gradient) sviluppato da Leon Lasdon dell'University of Texas e Alan Waren della Cleveland State University. Questo metodo consente di ottimizzare una funzione obiettivo sulla base di un set predefinito di vincoli e parametri variabili dei quali può essere definito il dominio di esistenza. Nel caso in questione, l'algoritmo può essere scomposto in tre moduli che possono essere rappresentati in forma sequenziale ed implementati simultaneamente. I tre moduli eseguono rispettivamente: (i) il bilancio di massa, (ii) il bilancio di energia e (iii) l'ottimizzazione della funzione obiettivo.

### 2.2.1 Bilancio di massa

Il bilancio di massa viene eseguito numericamente secondo la sequenza rappresentata in Figura 11: l'algoritmo ricerca una soluzione facendo variare simultaneamente la portata corretta del compressore transcritico, la percentuale di fluido da inviare alla sezione di accumulo, due regolazioni della portata in massa correlate con l'eventuale presenza delle palettature a calettamento variabile dei compressori (VIGV). Si ipotizza un regime di rotazione costante per tutte le turbomacchine e una sostanziale traslazione sull'asse delle portate corrette delle curve caratteristiche dei compressori al variare della regolazione della portata in massa. In uscita al modulo si ottengono le portate in massa elaborate, i rapporti di compressione/espansione delle turbomacchine e le corrispondenti pressioni di ingresso e uscita, l'eventuale percentuale di correzione della portata elaborata eseguita, la percentuale della portata massica da avviare alla sezione di accumulo. L'assenza del VISV sui compressori viene interpretata dall'algoritmo vincolando le due regolazioni della portata in massa ad un regime fisso del 100%.

### 2.2.2 Bilancio di energia

Le variabili in uscita dell'eventuale soluzione trovata nel modulo del bilancio di massa costituiscono le variabili in ingresso del modulo del bilancio di energia. Nel modulo (Figura 12) viene calcolata la potenza per ciascuna



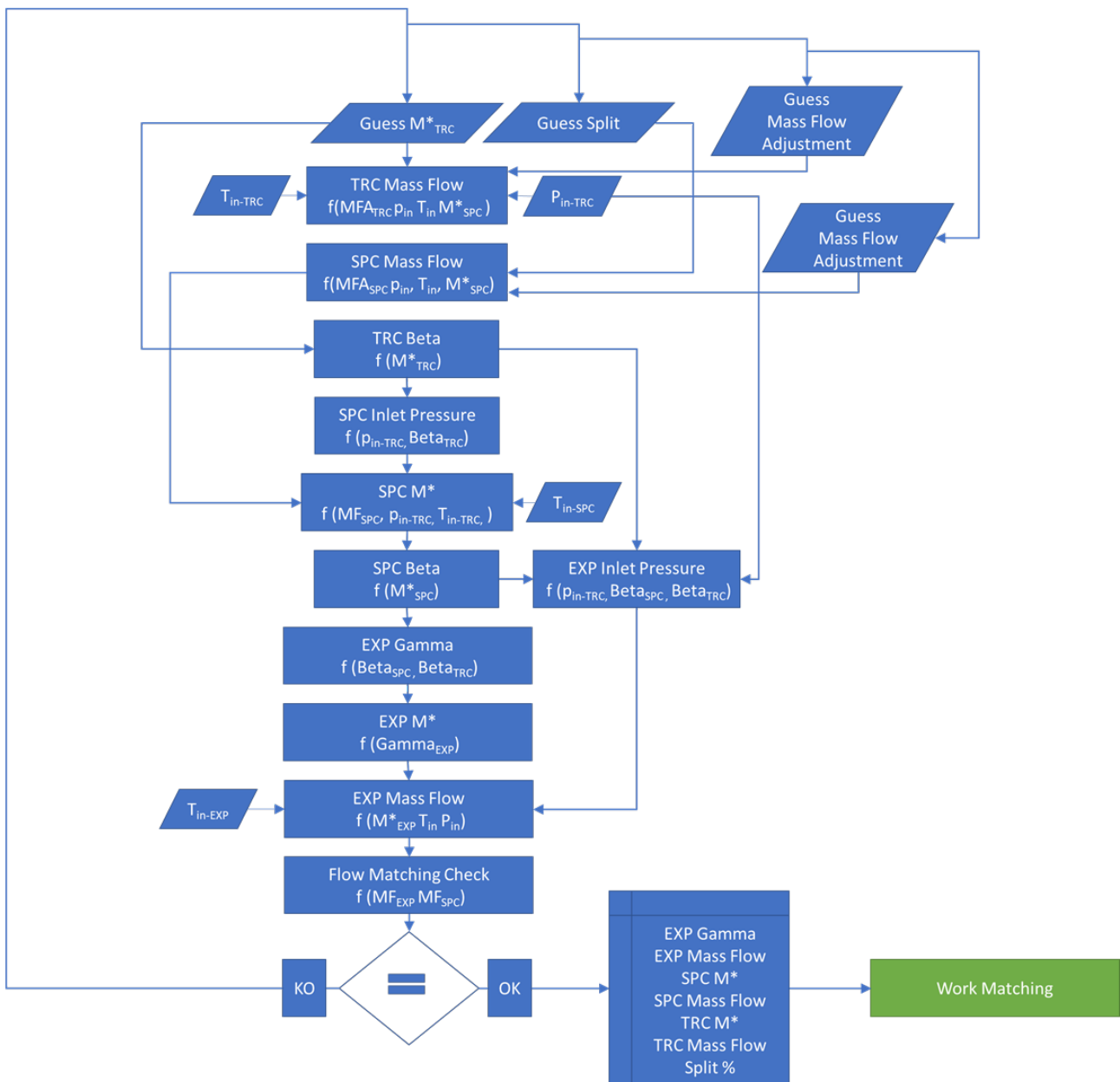


Figura 11. Diagramma a blocchi del modulo per il bilancio di massa.

turbomacchina e verificato il soddisfacimento del vincolo di potenza confrontando la potenza netta all'albero con un valore di set point preimpostato. Se il vincolo viene verificato, il valore di potenza netta all'albero ottenuta rappresenta la variabile in uscita del modulo del bilancio di energia e una delle variabili in ingresso del modulo di ottimizzazione.

### 2.2.3 Modulo di ottimizzazione

Il modulo di ottimizzazione (Figura 13) massimizza il valore delle efficienze delle turbomacchine coerentemente con il vincolo di potenza richiesto. Utilizza come parametri in ingresso i valori delle efficienze delle turbomacchine calcolate nel modulo del bilancio di massa e il valore di potenza netta all'albero che soddisfa il vincolo del set point preimpostato. Questi parametri formano il vettore della funzione obiettivo

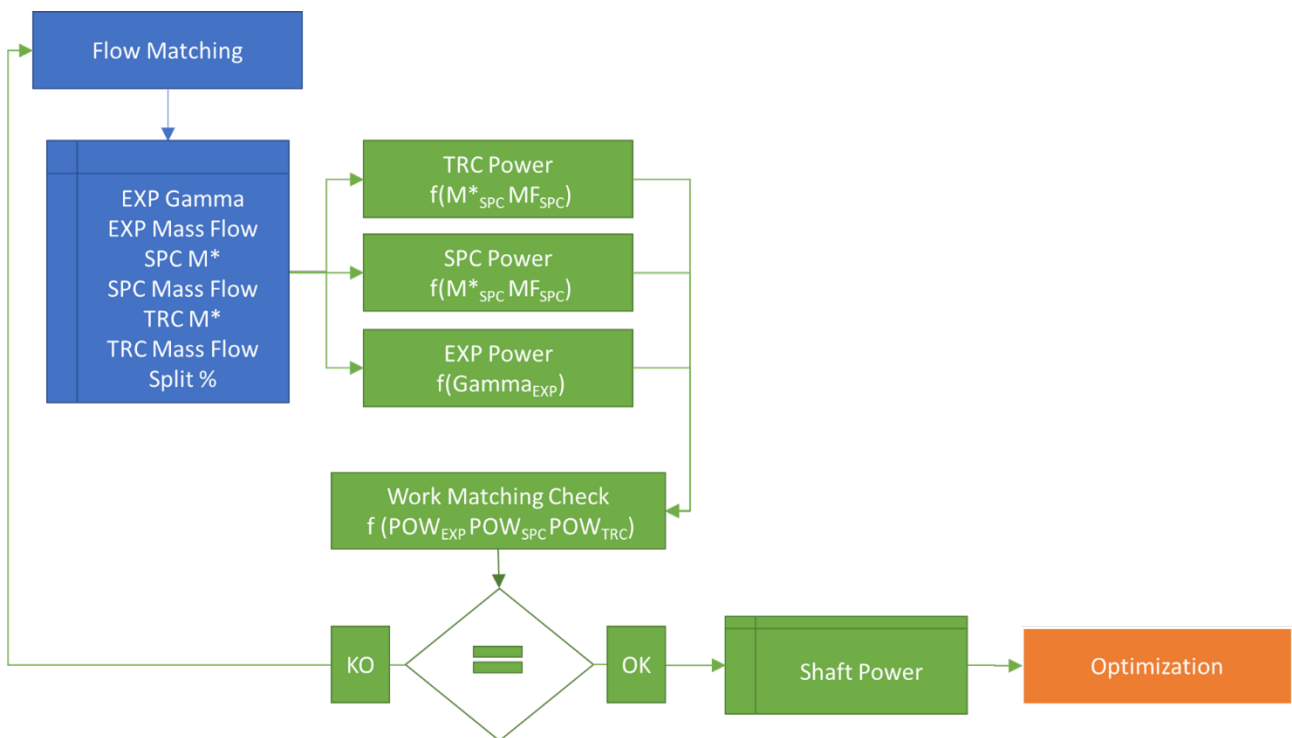


Figura 12. Diagramma a blocchi del modulo per il bilancio di energia.

che deve essere massimizzata. La soluzione fornita dal modulo di ottimizzazione, se trovata, è rappresentata dal vettore costituito da tutte le variabili elaborate nei moduli del bilancio di massa e di energia che massimizzano le efficienze delle turbomacchine nel rispetto del vincolo di potenza netta all'albero rispetto al set point preimpostato.

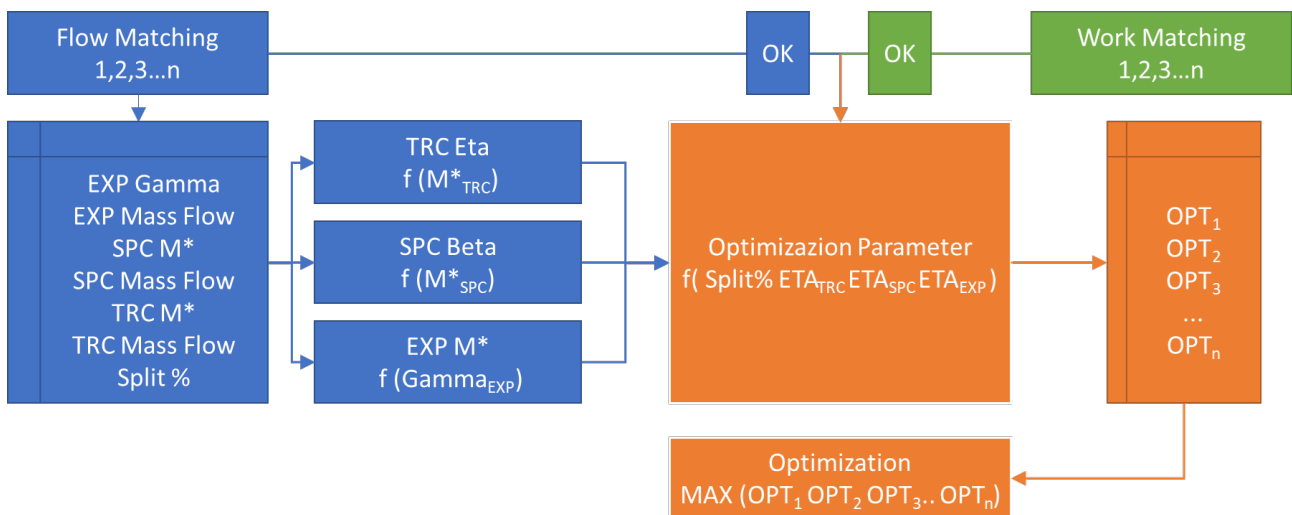


Figura 13. Diagramma a blocchi del modulo di ottimizzazione.

### 3 Risultati

Il modello di accoppiamento delle turbomacchine sopra descritto è stato utilizzato per massimizzare le efficienze delle turbomacchine ai carichi parziali e definire i limiti dell'involuppo operativo del turbo-gruppo sulla base della strategia di regolazione adottata. Sono stati analizzati due casi, il primo prevede la regolazione del turbo-gruppo senza il supporto del VIGV, l'altro con il supporto del VIGV sui compressori transcritico e supercritico.

#### 3.1 Regolazione senza VIGV

Le soluzioni trovate con il modello di accoppiamento delle turbomacchine hanno consentito di individuare soluzioni nell'intervallo operativi compreso tra il 52% (Minimum-Load) e il 100% (Nominal-Load), con valori della potenza rispettivamente di 3.53 MW e 6.78 MW e un margine di regolazione della potenza pari al 48% (Figura 14). In assetto Heat-Pump è possibile ottenere potenze negative nell'intervallo compreso tra -83% e -106%, con valori della potenza rispettivamente di -5.64 MW e -7.2 MW e un margine di regolazione del 23%.

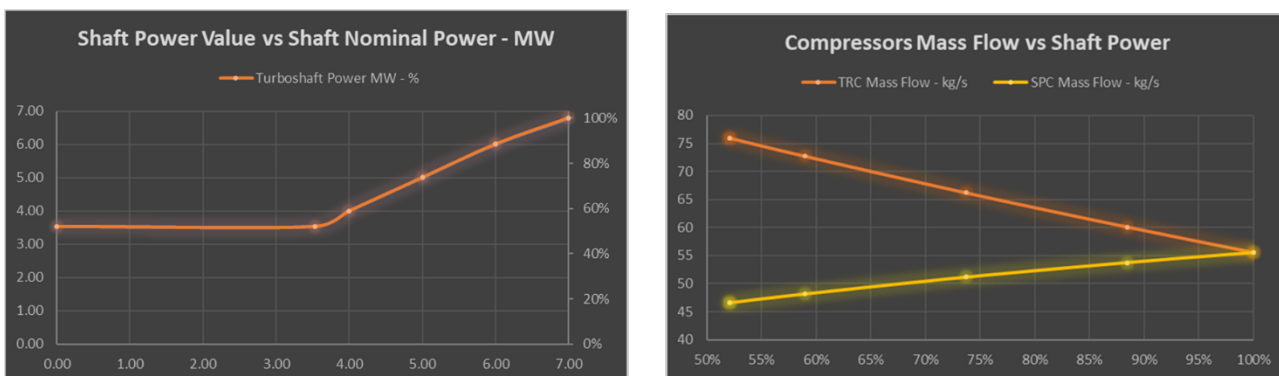


Figura 14. Potenza netta all'albero in funzione del set point di potenza (sinistra), portate massiche dei compressori transcritico e supercritico al variare del set point di potenza.

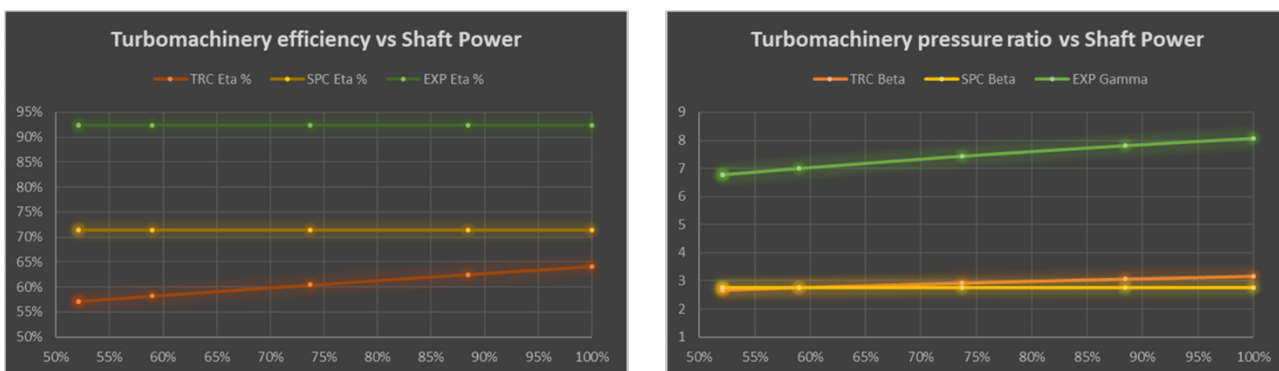


Figura 15. Efficienza delle turbomacchine in funzione della potenza netta all'albero (sinistra), rapporti di compressione dei compressori transcritico e supercritico al variare del set point di potenza.

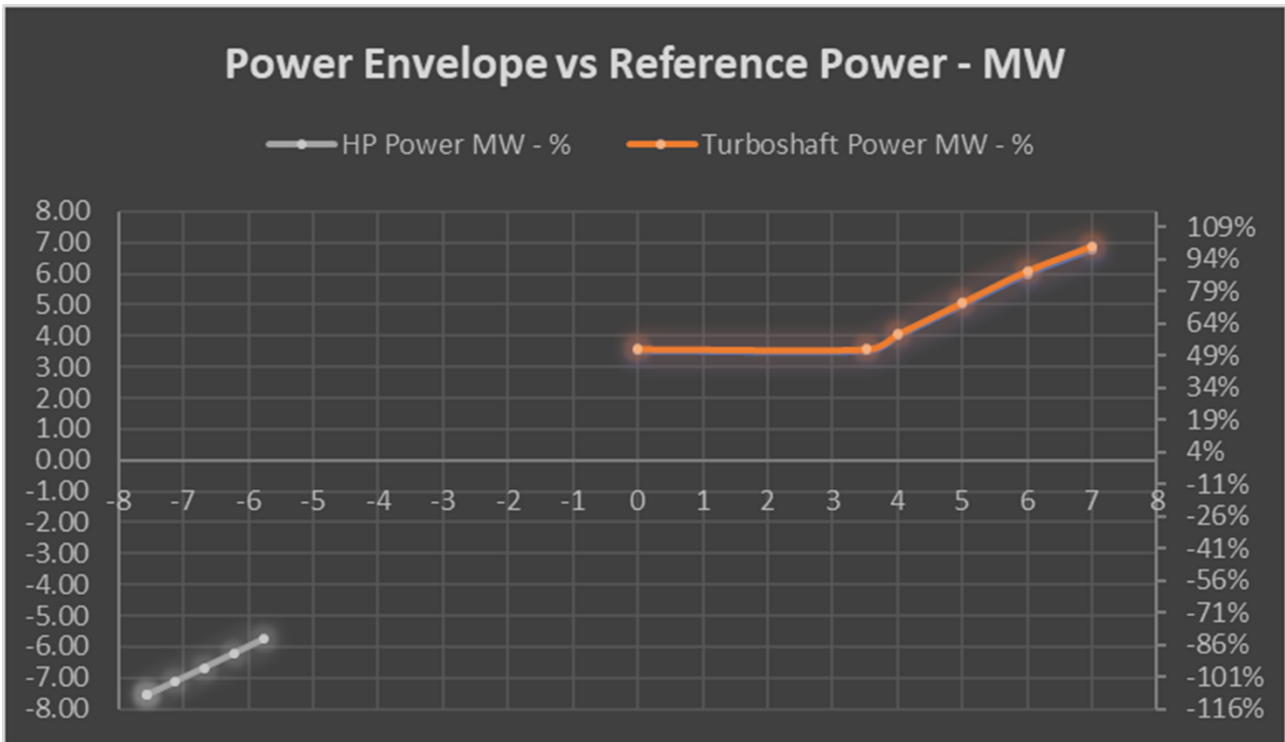


Figura 16. Involuppo operativo risultante dalla regolazione senza VIGV.

### 3.2 Regolazione con VIGV

Le soluzioni trovate con il modello di accoppiamento delle turbomacchine hanno consentito di individuare soluzioni nell'intervallo operativi compreso tra il 36% (Minimum-Load) e il 100% (Nominal-Load), con valori della potenza rispettivamente di 2.48 MW e 6.87 MW e un margine di regolazione della potenza pari al 64% (Figura 19). In assetto Heat-Pump è possibile ottenere potenze negative nell'intervallo compreso tra -84% e -110%, con valori della potenza rispettivamente di -5.64 MW e -7.2 MW e un margine di regolazione del 26%.

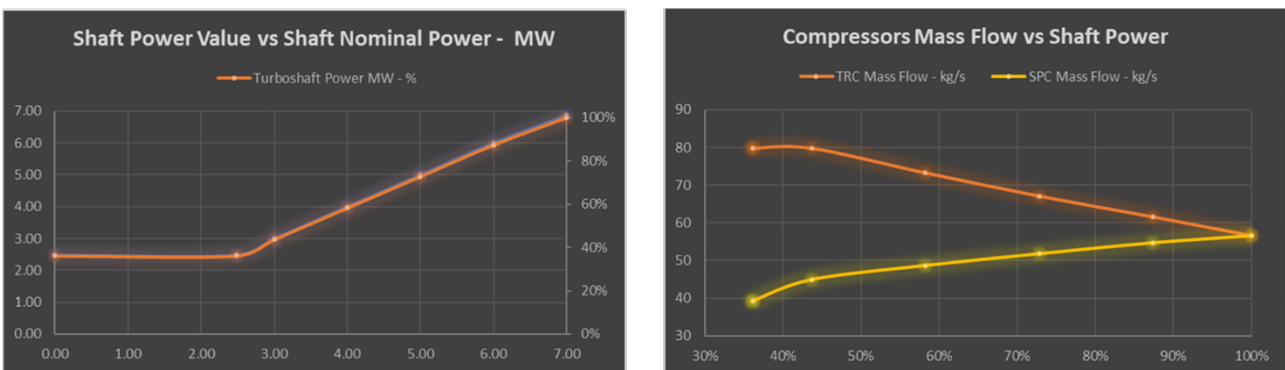


Figura 17. Potenza netta all'albero in funzione del set point di potenza (sinistra), portate massiche dei compressori transcritico e supercritico al variare del set point di potenza.

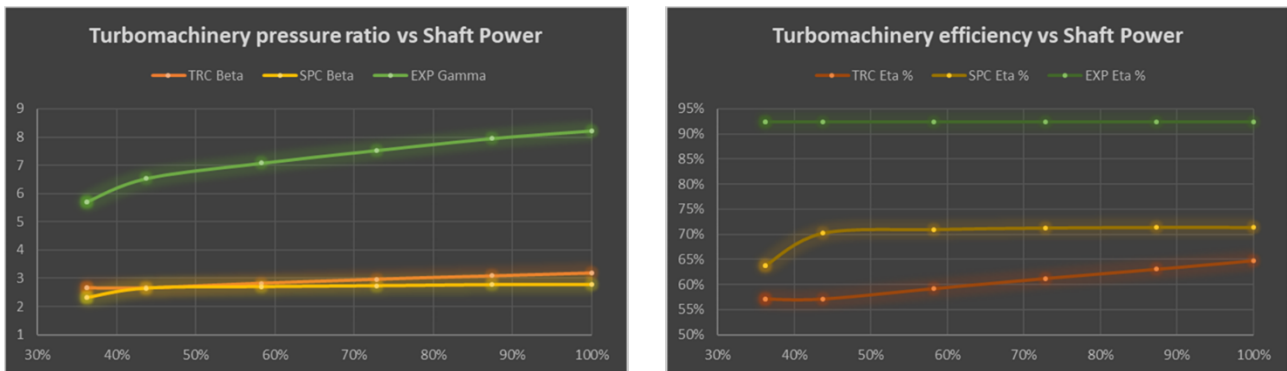


Figura 18. Rapporti di compressione dei compressori trascritico e supercritico (sinistra), efficienza delle turbomacchine (destra) in funzione della potenza netta all'albero.

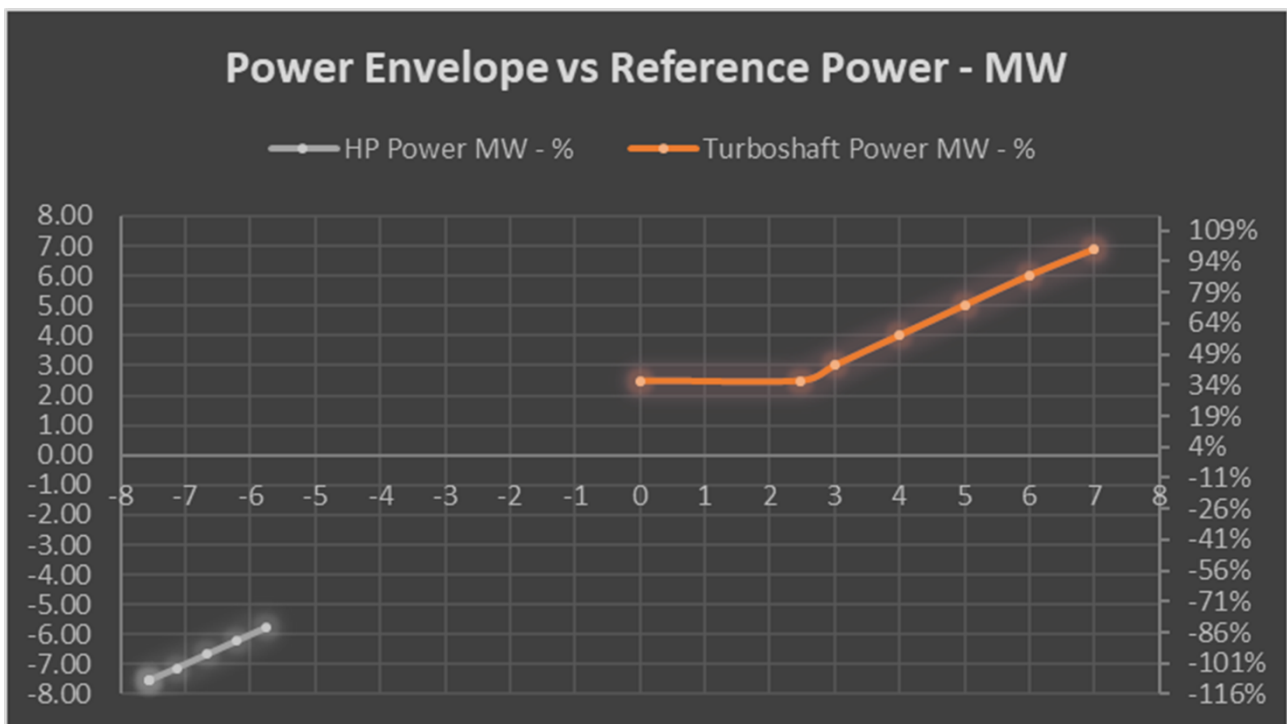


Figura 19. Inviluppo operativo risultante dalla regolazione senza VIGV.

## 4 Conclusioni

L'utilizzo delle curve caratteristiche delle turbomacchine mediante il modello di accoppiamento sviluppato in questa annualità ha evidenziato chiaramente l'effetto della regolazione della portata massica aspirata dai compressori trascritico e supercritico mediante VIGV. L'inviluppo operativo della stessa configurazione di ciclo risulta chiaramente ampliato nel caso, con un incremento del margine di regolazione del 33%, passando dal 48% nel caso senza VIGV al 64% nel caso con VIGV. Effetti simili, ma meno marcati, si riscontrano anche nell'analisi ai carichi parziali in assetto Heat-Pump. In entrambi i casi la potenza minima in assetto Heat-Pump è inferiore -100% del carico nominale, caratteristica che conferma la vocazione *prosumer* del ciclo ipotizzato, con effetti promettenti sulla stabilizzazione della rete elettrica in un contesto di crescente penetrazione delle rinnovabili non programmabili. Permane un'ampia discontinuità nell'inviluppo operativo complessivo, tra l'asse delle potenze positive e l'asse delle potenze negative, discontinuità che viene attenuata, ma non rimossa, dalla regolazione della potenza con VIGV. Questa discontinuità può essere rimossa sfruttando la versatilità del modello di accoppiamento delle turbomacchine realizzato in questa annualità, che può rapidamente essere applicato all'analisi dei carichi parziali di configurazioni impiantistiche differenti, mirate ad ampliare il margine di regolazione e l'inviluppo operativo.