



Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente

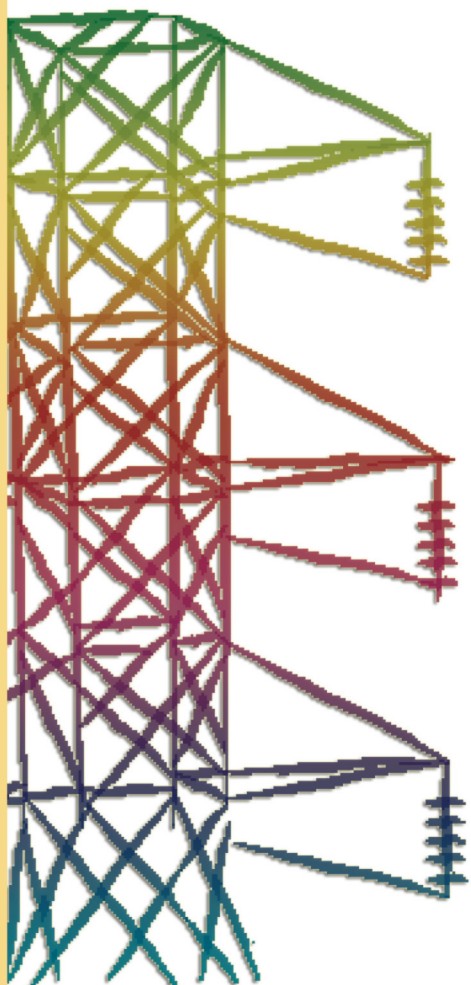


Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Definizione delle caratteristiche funzionali di un impianto sperimentale di simulazione di sistemi ibridi MCFC-turbina con potenze nell'ordine del MW e sviluppo del relativo sistema di simulazione

Cinzio Arrighetti, Daniele Pierini





Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Definizione delle caratteristiche funzionali di un impianto sperimentale di simulazione di sistemi ibridi MCFC-turbina con potenze nell'ordine del MW e sviluppo del relativo sistema di simulazione

Cinzio Arrighetti, Daniele Pierini



DEFINIZIONE DELLE CARATTERISTICHE FUNZIONALI DI UN IMPIANTO SPERIMENTALE DI
SIMULAZIONE DI SISTEMI IBRIDI MCFC-TURBINA CON POTENZE NELL'ORDINE DEL MW E
SVILUPPO DEL RELATIVO SISTEMA DI SIMULAZIONE

Cinzio Arrighetti, Daniele Pierini (Dipartimento di Meccanica e aeronautica dell'Università di
Roma La Sapienza)

Aprile 2009

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Produzione e fonti energetiche

Tema: Celle a combustibile per applicazioni stazionarie cogenerative

Responsabile Tema: Angelo Moreno, ENEA

ABSTRACT.....	4
1 OGGETTO.....	6
1.1 Inquadramento storico del progetto	7
1.2 Finalità del contratto	7
2 VERIFICA DEL LAYOUT DI IMPIANTO	9
2.1 Realizzazione dell'impianto.....	9
2.1.1 Criteri di progetto.....	10
2.1.2 Caratteristiche costruttive dell'emulatore	12
2.1.3 Caratteristiche costruttive del gruppo Microturbina Turbec T100	14
2.1.4 Unità a gas prevista in futuro	19
2.1.5 Attività di installazione e montaggio	20
2.1.6 Attività residue previste per il periodo dal 01/04/2009 al 31/12/2009	26
2.2 Strumenti di simulazione	26
2.2.1 Generalità	26
2.2.2 Schema del sistema simulato	27
2.2.3 Caratteristiche generali dei sistemi simulativi sviluppati	28
2.3 Modelli e simulazioni in ambiente IPSEpro	29
2.3.1 Simulazioni: input/output.....	33
2.3.2 Approssimazione polinomiale dei diagrammi caratteristici.....	34
2.4 Modelli ex-novo e relativi codici in FORTRAN. Simulazioni.....	37
2.4.1 Impostazioni di base dei modelli	37
2.4.2 Codici di calcolo	41
2.4.3 File ODCUES00	42
2.4.4 Files ODGPFM01, ODGPFM02.....	42
2.4.5 Esempi di simulazioni numeriche del sistema CUE/MGT	43
3 ANALISI DELLE PROBLEMATICHE DI MISURA E DIAGNOSTICA	44
3.1 Documentazione di riferimento (fonte AFCo).....	45
3.2 Hardware/Software	45
4 IMPOSTAZIONE DELLE CAMPAGNE SPERIMENTALI	47
4.1 Documenti di riferimento.....	47
4.2 Campagne sperimentali.....	47
Allegato I – Tabulati file ODCUES00	50
Allegato II - Tabulati file ODGPFM01.....	52
Allegato III – Tabulati file ODGPFM02.....	55

ABSTRACT

Nell'ambito delle recenti attività di sviluppo dei microimpianti ibridi di potenza costituiti da una unità di celle a combustibile a carbonati fusi (MCFC) e da un gruppo turbogas (MGT) sottoposto, si riferisce qui sugli studi compiuti in collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Meccanica e Aeronautica dell'Università di Roma "La Sapienza" nel periodo 1.09.2008-31.03.2009.

E' stato verificato il lay-out dell'impianto che viene attualmente installato nella sede de La Casaccia dell'ENEA, destinato alla sperimentazione sistematica di diverse unità turbogas, di potenza nominale pari o superiore a 100 kW, accoppiate ad un emulatore, di progettazione Ansaldo, atto all'emulazione flessibile di unità MCFC di taglia uguale o superiore a 500 kW. In particolare, lo studio del lay-out è stato condotto per la fascia di potenze installate dell'unità compatta (CU) delle celle compresa fra 500 e 1000 kW.

Lo studio funzionale, in sede previsionale, dell'intero impianto è stato inoltre effettuato a mezzo di più modelli simulativi originali, estesi all'unità emulatrice (CUE) e all'unità turbogas, sviluppati adottando, per la prima, i corrispondenti dati progettuali reali e, per la seconda, una schematizzazione realistica – basata sui diagrammi caratteristici del compressore e della turbina – di validità estremamente generale e flessibile ai fini di descrivere il comportamento di qualsiasi gruppo MGT commerciale o di eventuale concezione "ad hoc". Le simulazioni che costituiscono il collaudo dei codici numerici hanno investito l'intero intervallo di esercizio del gruppo ibrido attualmente in allestimento in ENEA. I risultati, pienamente soddisfacenti e in linea con quelli attesi, permettono di assumere i codici di simulazione numerica sviluppati quali strumenti a largo spettro per l'analisi previsionale fine di futuri altri gruppi ibridi di caratteristiche e taglie diverse.

Gli studi sopra accennati hanno consentito inoltre di meglio caratterizzare le apparecchiature di misura, controllo e regolazione che dovranno essere inserite all'interno di un sistema ibrido del tipo qui contemplato.

E' stato inoltre pianificato, in concordanza con ENEA e con Ansaldo, un nutrito programma sperimentale da condurre, non appena sarà completato l'allestimento del primo sistema ibrido in Casaccia, ai fini di un collaudo-tipo dei gruppi qui allo studio. In particolare, si ritiene di notevole interesse programmare una prima campagna sperimentale preliminare intesa al rilevamento diretto dei diagrammi caratteristici del turbocompressore e della turbina. Successivamente, si prevede una serie di prove di simulazione della fase di pressurizzazione della CU, verificando la stabilità dell'unità MGT, ai fini di caratterizzare un protocollo operativo di pressurizzazione e connessione delle due unità del sistema ibrido. In seguito, verrà condotta una serie di prove di simulazione della

CU al variare del carico elettrico ad essa richiesto, al fine di caratterizzare le conseguenti condizioni di esercizio a cui sottoporre l'unità MGT e le relative modalità di regolazione dell'intero sistema, validando nel contempo le risultanze previsionali offerte dalle simulazioni numeriche. Infine, si prevede una campagna di prove indirizzate alle necessarie verifiche delle catene di regolazione inserite nel circuito del gruppo turbogas.

1 OGGETTO

Questo documento ha lo scopo di confermare l'adeguatezza della configurazione dell'impianto emulatore di Sistemi Celle a Combustibile (FCS) pressurizzati tipo MCFC, che è in fase di assemblaggio, nell'ambito del progetto FISR ENEA, presso la sede di ENEA della Casaccia (Roma), unitamente ad un Sistema Aria di Processo (APS) per impianto ibrido di taglia 500kW. Al contempo, si delineano i dati di processo e le relative caratteristiche costruttive dell'impianto di simulazione riferito a taglie intorno al MW, adattando al nuovo assetto i modelli di simulazione delle principali apparecchiature già in parte sviluppati per la taglia da 500 kW e i futuri sistemi APS di taglia superiore che verranno sperimentati.

Nel documento sono descritti i sistemi aria di processo (APS), basati su una microturbina Turbec T100 ed un turbogas Volvo Aero VT600, e sono indicati i principali dati di processo all'interfaccia tra i precedenti APS e Fuel Cells System di taglia rispettivamente 500kW ed 1 MW.

Evidenziando le relative differenze funzionali si verificano la bontà degli accorgimenti adottati da AFCo per rendere compatibili i due sistemi.

Il documento definisce in secondo luogo la configurazione scelta per la realizzazione presso ENEA Casaccia dell'impianto emulatore di FCS, sulla base dei dati di processo precedentemente menzionati, descrivendone lo stato dimensionale nelle condizioni di funzionamento richieste e producendo un elenco dei principali componenti necessari alla realizzazione.

Per la definizione e l'applicazione della matrice di prove dell'impianto in assetto base per l'ampliamento al MW sono state affrontate delle simulazioni numeriche con due strumenti distinti (l'ambiente IPSEpro e il linguaggio Fortran).

Il documento, infine, fornisce l'elenco e la descrizione delle prove oggetto del contratto e la finalità delle singole prove sperimentali necessarie per lo sviluppo di un sistema aria di processo per impianti di taglia 500 kW e l'ottimizzazione di APS per impianti di taglia fino a 1 MW. La modalità delle prove viene definita a seguito della progettazione esecutiva del sistema emulatore (per opera di AFCo), e a seguito della progettazione dell'assemblaggio emulatore/fuel cells.

1.1 Inquadramento storico del progetto

In un'area destinata alla installazione di impianti sperimentali presso il Centro Ricerche ENEA della Casaccia di Roma, nell'ambito del progetto FISR "Sviluppo delle tecnologie delle celle a combustibile e dei sistemi per le loro applicazioni", è stato realizzato un impianto emulatore per celle a combustibile per sistemi MCFC ed è attualmente in fase finale di assemblaggio.

L'impianto ha la funzione di riprodurre le condizioni operative di un sistema ibrido MCFC - MGT e pertanto la configurazione sperimentale prevede l'integrazione di un sistema 'celle a combustibile' con un sistema aria di processo basato su una micro-turbina a gas Turbec T100 a velocità variabile per taglie fino a 500kW e quindi, in una seconda fase, su altra unità di taglia intorno a 1 MW (è previsto un gruppo VT600 a velocità costante, attualmente in fase di restyling).

1.2 Finalità del contratto

In seno all'Accordo di Programma MSE-ENEA che vede sviluppare il Tema di ricerca 5.2.5.11 "Celle a combustibile per applicazioni stazionarie cogenerative" nasce l'Accordo di Collaborazione tra ENEA e Università degli Studi la Sapienza di Roma per una attività di ricerca dal titolo:

“Definizione delle caratteristiche funzionali di un impianto sperimentale di simulazione di sistemi ibridi MCFC-Turbina con potenze nell'ordine del MW e sviluppo del relativo sistema di simulazione”

In particolare, per quanto concerne le celle a carbonati fusi (MCFC) è in fase finale di assemblaggio presso il Centro Ricerca ENEA della Casaccia un emulatore di sistema MCFC per prove di ottimizzazione di sistemi ibridi MCFC/MGT. L'emulatore è stato progettato per sistemi da 500 kW, tuttavia l'Ansaldo Fuel Cell (AFCO) sta rapidamente evolvendo verso sistemi nell'ordine del MW. Si è reso quindi necessario espandere le capacità del sistema emulatore per poter procedere anche a sperimentazione di impianti di potenza superiore ai 500kW.

In tale quadro si inserisce l'attività di ricerca affidata all'Università "La Sapienza" di Roma, attività il cui scopo principale è stato quello di verificare, in collaborazione con ENEA, le caratteristiche dell'impianto emulatore per taglie sino ad almeno un MW e di adattare nel contempo al nuovo assetto i modelli di simulazione numerica dell'intero sistema MCFC/MGT già in parte sviluppati per la taglia da 500 kW.

Il contratto oggetto della presente relazione prevedeva l'espletamento delle seguenti attività:

- ob. A. 3.1.1 Verifica del layout di impianto nel nuovo assetto (1 MW);
- ob. A. 3.1.2. Analisi delle problematiche di misura e diagnostica;
- ob. A. 3.1.3 Impostazione del programma di prove sperimentali.

Le attività descritte nel seguito sono state svolte con il supporto di AFCo e sono state rivolte alla supervisione dell'impianto emulatore e alla redazione della relativa matrice di prove sperimentali da condurre.

La conclusione dell'attività di verifica del layout dell'impianto di taglia maggiore, iniziata dopo la formalizzazione del Sottocontratto tra ENEA e Università "La Sapienza", firmato il 07/07/2008, era inizialmente prevista per il 31/12/2008; successivamente, ai fini di un adeguato completamento, si è resa necessaria una proroga di tre mesi , che è stata accolta, per cui i termini di scadenza del contratto è stato posticipato al 31/03/2009. A partire dalla specifica tecnica AFCo, "Requisiti per l'impianto emulatore di un sistema MCFC", sono stati effettuati alcuni incontri tecnici tra ENEA ed AFCo al fine di analizzare nel dettaglio tutti i requisiti relativi all'assetto del sistema da un MW, congelare i principali dati di processo del sistema di riferimento ed infine giungere alla definizione delle verifiche/prove funzionali richieste dalla sperimentazione.

Sono state evidenziate 5 condizioni critiche, superate le quali, si potuto affermare il raggiungimento della totale compatibilità fra i due assetti e quindi considerare idonea la configurazione dell'impianto. In particolare, si sono analizzate le seguenti incompatibilità, verificandone la loro sussistenza o meno:

- (a) del sistema APS (Sistema Aria Processo), basato su una microturbina da 100kW, inadatta ad elaborare le portate in gioco nell'impianto da un MW ;
- (b) del vessel nel sistema FCS (fuel cell system);
- (c) di ingombri fra i relativi gruppi turbogas T100 e VT600;
- (d) del dimensionamento del piping dovuto alle maggiori portate elaborate;
- (e) della portata massima del generatore di vapore;
- (f) della compartimentazione antincendio per l'uso esclusivo dell'impianto in assetto base.

Partendo da un'analisi di dettaglio dei requisiti richiesti per il corretto funzionamento in assetto da un MW, si è giunti alla definizione dei dati dimensionanti per l'impianto e della possibile configurazione d'impianto in grado di soddisfare i requisiti richiesti, risolvendo le sopra elencate incompatibilità (a), (b), (e), come già descritto nello STATO DI AVANZAMENTO DELLA RICERCA AL 30 SETTEMBRE 2008, il quale si integra con il presente rapporto con i rimanenti punti (c), (d), (f). Quest'ultimo punto si è evidenziato in corso d'opera a seguito di motivazioni, non solo tecnica, ma più ancora normative, ed è stato affrontato e risolto come descritto in seguito.

2 VERIFICA DEL LAYOUT DI IMPIANTO

Per individuare le principali modifiche e verificare le compatibilità tra l'assetto base dell'impianto pilota e il suo ampliamento, in modo da consentire il passaggio dalla taglia medio - piccola (500 kW) alla taglia media (1MW) dell'emulatore, è stato necessario sia entrare nel dettaglio dei parametri costruttivi dal punto di vista della progettazione (v. cap. 3) sia affrontare e risolvere talune problematiche legate all'effettiva costruzione dell'impianto. Tali problematiche sono principalmente legate alle specifiche del nuovo assetto in vista dell'allocazione di una turbina di taglia superiore.

2.1 Realizzazione dell'impianto

Come già detto sopra, presso il C.R. ENEA della Casaccia è in fase finale di assemblaggio un impianto emulatore di celle opportunamente flessibile, atto allo studio sperimentale mediante accoppiamento con un gruppi MGT di taglie variabili da 100kW in poi. Con tale impianto sarà possibile simulare sperimentalmente un sistema ibrido costituito da una unità reale a fuel cells a carbonati fusi (CU, ovvero compact unit) e da una unità MGT. L'emulatore consentirà, in particolare, di simulare l'unità a carbonati fusi, con riferimento alla qualità, allo stato termodinamico e alle portate dei fluidi in ingresso e in uscita dell'unità stessa, per tutte le condizioni di funzionamento delle celle reali.

Per quanto riguarda il sito di installazione, in particolare, questo è stato individuato nell'area tecnica all'interno della hall tecnologica dell'edificio F40 (v. fig. 1), già dotata dei servizi necessari ad installazioni impiantistiche; in precedenza l'area era occupata da due impianti, oggi obsoleti, che sono stati smantellati.

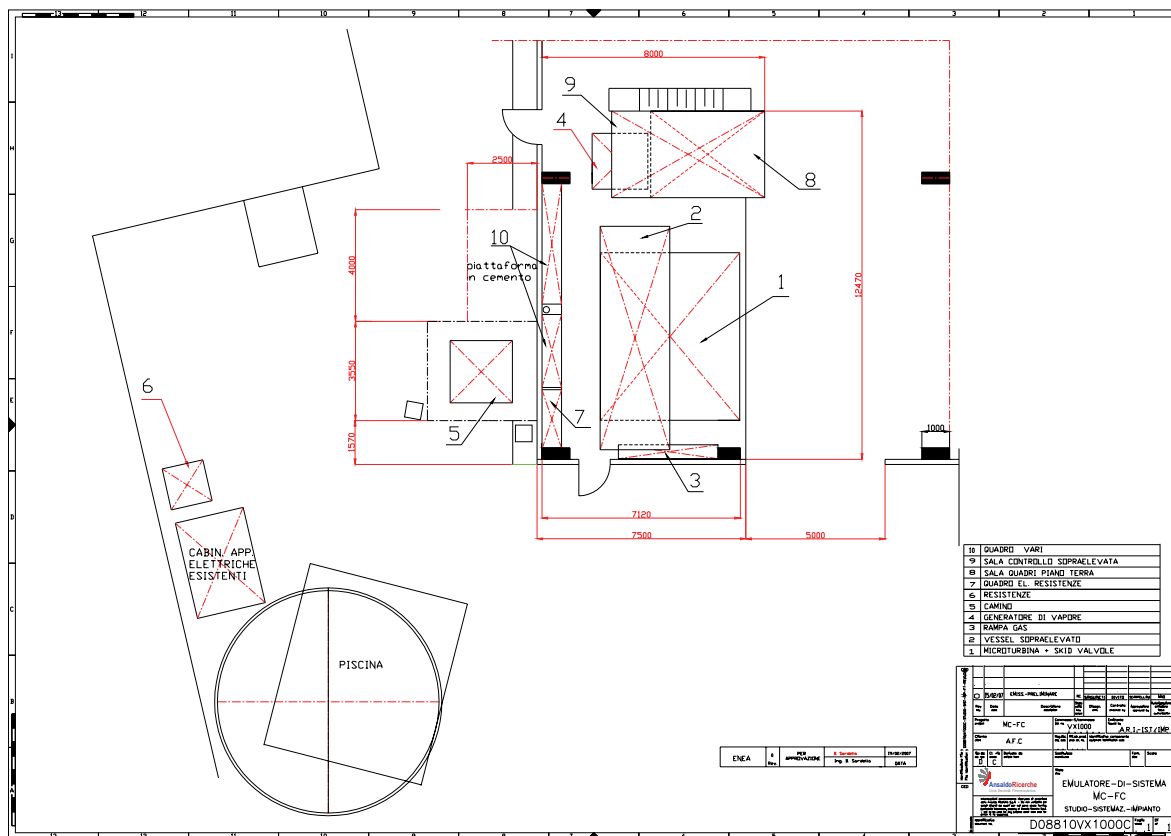


Figura 1: Piantina della Hall Tecnologica dell'F40 interessata per la costruzione del nuovo impianto

2.1.1 Criteri di progetto

L'impianto può essere schematicamente suddiviso nelle seguenti parti principali:

- SISTEMA TURBOGAS, modificato per l'integrazione con gli stack delle celle, comprensivo dei suoi componenti meccanici ed elettrici, dello skid valvole e del suo sistema di controllo e regolazione;
- SISTEMA EMULATORE: il sistema necessario per la simulazione di uno o più stack di celle a combustibile comprensivo di vessel, bruciatore + skid valvole, piping di collegamento e organi di controllo e regolazione;
- SISTEMA SERVIZI: costituito essenzialmente dalle linee alimentazione gas di processo, gas naturale, aria, vapore, azoto, anidride carbonica e dalla linea scarico fumi in atmosfera;
- SISTEMA DI CONTROLLO / SUPERVISIONE.

L'impianto, in termini di componenti, può essere così descritto:

- Vessel internamente coibentato
- Bruciatore inserito nel vessel e asservito a rampa gas pilota/gas principale/aria comburente
- Microturbina Turbec T100

- d. Generatore di Vapore
- e. Strumenti ed organi di controllo
- f. Sistema Scarico Fumi
- g. Linee gas Metano destinate alla Microturbina ed al Generatore di Vapore
- h. Rampe gas N₂, CO₂, Vapore asservite al vessel
- i. Piping impianto e giunti di compensazione
- j. Carpenteria meccanica (strutture di sostegno, supporti, grigliati.....)

Sulla base di requisiti fondamentali quali:

- congruenza con il sito di installazione messo a disposizione da ENEA;
- disponibilità gas di processo;
- flessibilità e modularità al fine di consentire la movimentazione dei componenti ed implementazioni future;
- facilità di gestione operativa, tenendo conto di utilizzare, per quanto possibile, componentistica meccanica ed elettrica di tipo commerciale

è presentato in Figura 2 lo schema della soluzione in sede di progettazione esecutiva, che riporta le linee principali di collegamento tra sistema APS e sistema FCS, i principali organi di controllo, le principali apparecchiature elettriche e meccaniche, le principali linee di alimentazione gas di processo e la linea di scarico fumi in atmosfera.

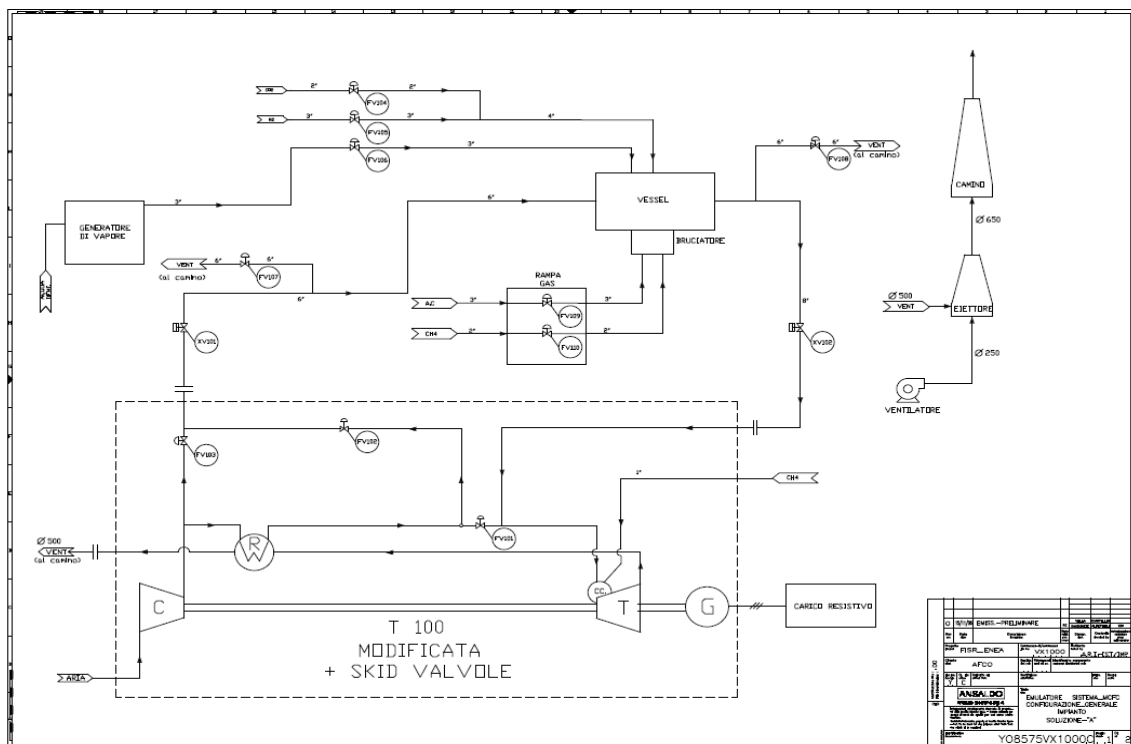


Figura 2: schema di impianto

2.1.2 Caratteristiche costruttive dell'emulatore

L'impianto emulatore dovrà consentire di effettuare i test di integrazione illustrati al cap. 4 con il Sistema Aria di Processo per taglie fino ad 1MW ed è progettato per funzionare con pressioni operative fino a 6 bar a.

L'impianto è realizzato per riprodurre le condizioni operative del sistema MCFC all'interfaccia turbina sia in termini di portate, temperature, pressioni e composizioni, sia in termini di comportamento dinamico; per riprodurre le condizioni richieste l'impianto dovrà disporre di:

- Vessel. Per simulare fedelmente la dinamica del sistema MCFC sarà previsto un serbatoio di volume compreso fra 30 e 60 m³ che verrà inoltre opportunamente coibentato per le prove di riscaldamento del FCS indicate al cap. 4
- Prima linea di sfiato sulla linea di adduzione dell'aria dal compressore al vessel impiegata per garantire le composizioni all'interfaccia con la turbina.
- Seconda linea di sfiato a valle del vessel per garantire la stabilità del sistema.
- Camera di combustione ausiliaria alimentata con metano ed aria comburente per garantire la temperatura degli esausti all'interfaccia.
- Stoccaggio e alimentazione gas tecnici. Per riprodurre le portate e le composizioni all'interfaccia con la turbina saranno previste linee di adduzione CO₂ e N₂.
- Linea alimentazione vapore. Per riprodurre le composizioni all'interfaccia con la turbina sarà prevista una linea di adduzione di vapore prodotto con apposito generatore.
- Linee alimentazione combustibile per la turbina e la camera di combustione ausiliaria.

In particolare per il vessel vengono fornite maggiori specifiche:

SERVIZIO:	Serbatoio per la simulazione delle condizioni di esercizio (P e T) di una cella combustibile
NUMERO PEZZI:	1
CONDIZIONI DI ESERCIZIO:	orizzontale, internamente coibentato
tipo fluido	= Fumi di combustione
P_{nominale}	= 6 bar a
P_{progetto}	= 9 bar a
T_{nominale}	= 50 °C
T_{progetto}	= 400 °C

CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE:

Costruzione e collaudo	=	secondo CEE 97/23 PED
Capacità (netta)	=	max. 40 m ³ min. 36 m ³
Tipo	=	orizzontale
Dimensioni indicative	=	φ 2900 mm L 6500mm
Altezza da piano di appoggio	=	indicativo 450 mm
Attacchi	=	(per tutti si fa riferimento ai dettagli riportati nell'out-line allegato)
Bocchello DN200 con camicia DN350(ingresso aria da turbina)		
Bocchello DN250 con camicia DN400 (uscita fumi verso CC turbina)		
Bocchello DN 80 con camicia DN250 (ingresso vapore)		
Bocchello DN 100 con camicia DN250 (Ingresso Mix N ₂ CO ₂)		
Canotto DN700 con piastra di sostegno interna per posizionamento bruciatore di peso indicativo 150 Kg (posizionato assialmente su uno dei fondi)		
N° 2 Passi d'uomo DN700 (uno su mantello, uno su fondo)		
Bocchello DN50 scarico drenaggio prova idraulica		
N°4 bocchelli DN100 con camicia DN250 per strumentazione		
Bocchello DN150 con camicia DN300 per valvola di sicurezza		
Trattamenti	=	coibentazione interna verniciatura esterna antiruggine
Accessori	=	manometro certificato rubinetto di spurgo manuale scaricatore di condensa golfari per movimentazione e sollevamento

REQUISITI GENERALI:

Servizio operativo: = continuo

Installazione: = in luogo chiuso.

Condizioni climatiche sito:

Minime: Temp. -16°C / Umidità Relativa 25% **Massime:** Temp. +40°C / Umidità Relativa 85%

2.1.3 Caratteristiche costruttive del gruppo Microturbogas Turbec T100

La microturbina della Turbec, compagnia svedese, costituisce il sistema APS (Air Process Sistem), schematizzato in figura 3,

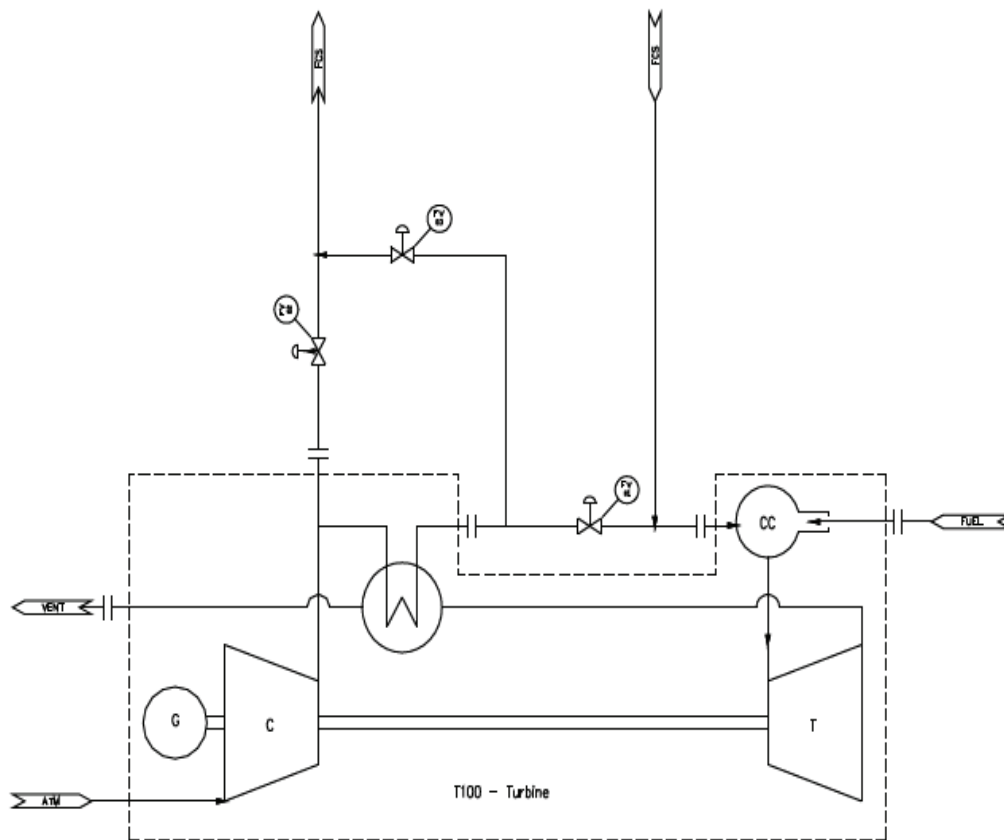


Fig. 3: schema del sistema APS

destinato all'accoppiamento con la MCFC Ansaldo da 500 kW. La potenza nominale erogabile dal gruppo turbogas è di circa 100 kW elettrici.

Nelle seguenti figure sono rappresentate la microturbina nel suo insieme (figura 4), il suo schema di funzionamento (figura 5) e lo schema della parte relativa alla conversione di energia meccanica sino alla immissione in rete dell'energia elettrica (figura 6).

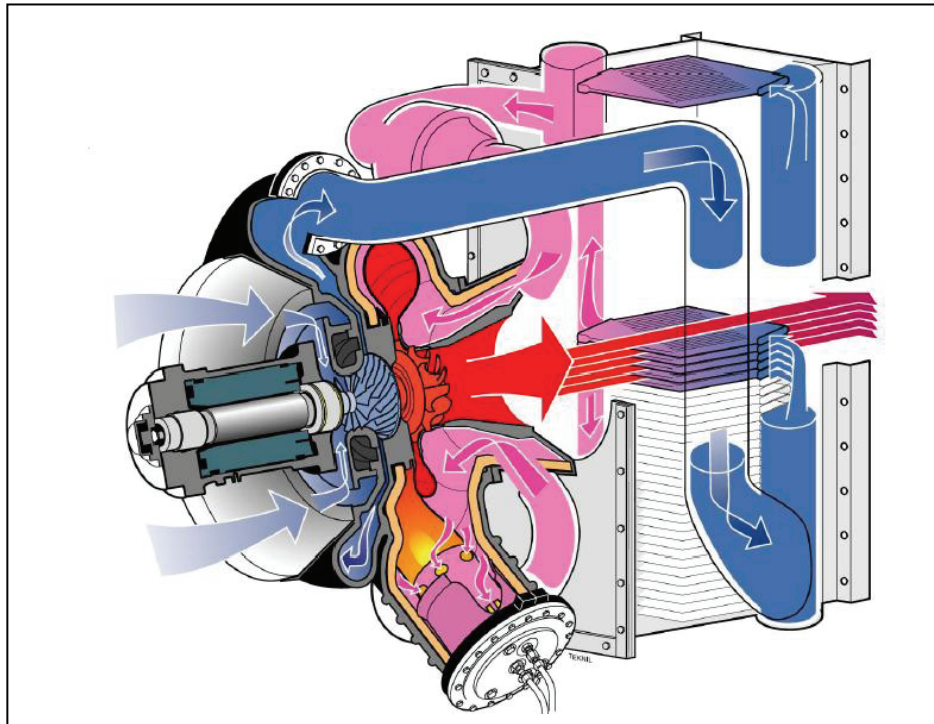


Fig. 4 - Insieme del gruppo microturbina a gas T100

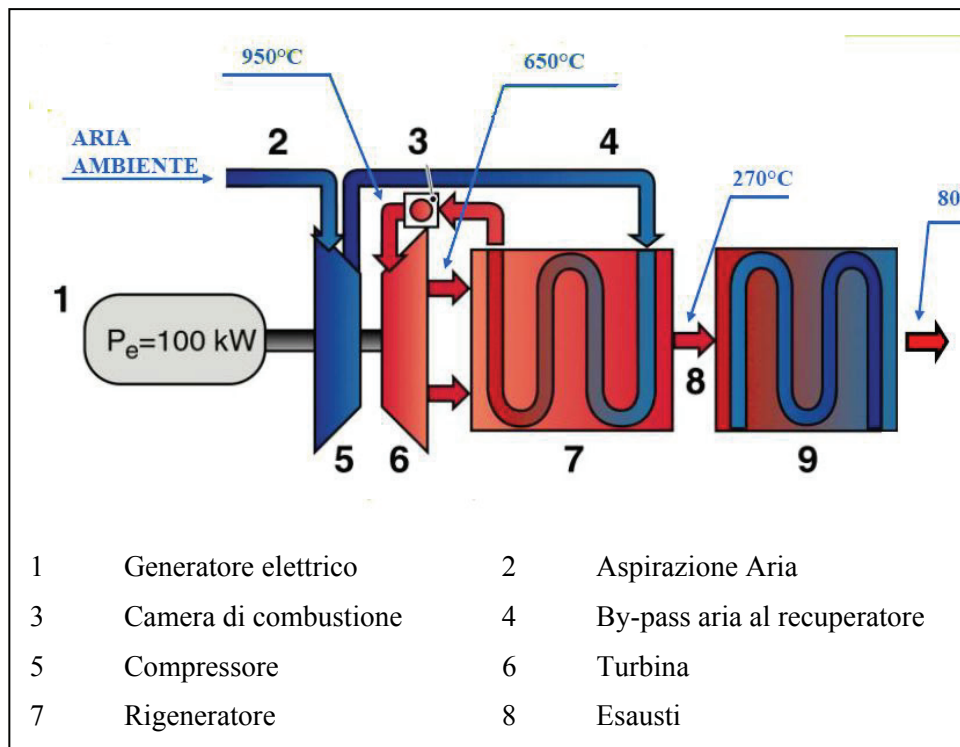


Fig. 5 - Principio di funzionamento della TurbecT100

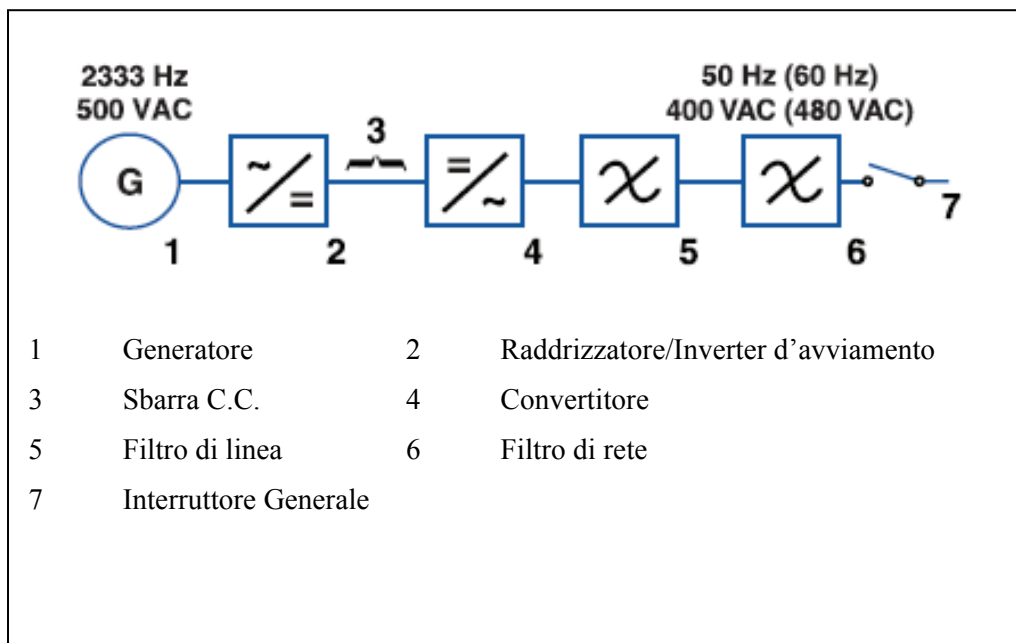


Fig. 6 - Schema di messa in rete dell'impianto

Il modulo di microgenerazione Turbec T100 è un'unità di cogenerazione alimentata a gas metano che produce elettricità e, su opzione, anche calore cogenerativo (acqua calda). Il modulo è adatto per installazione indoor, ed è predisposto con prese d'aria per la ventilazione esterna; esso è composto da :

- Microturbina a gas con rigeneratore;
- Sistema elettrico;
- Scambiatore a gas di scarico;
- Sistema di gestione e controllo;
- Gruppo di alimentazione in pressione del gas metano;
- Scambiatore cogenerativo (opzionale).

La microturbina che equipaggia il modulo è una turbina ad alta velocità (70.000 rpm nominali) monoalbero, sul quale sono montati i due poli a magneti permanenti. Il rotore del generatore è calettato sullo stesso albero delle turbomacchine.

Generatore

Generatore trifase ad alta frequenza con rotore a magneti permanenti, con cuscinetti a sfere (lato compressore) e a rulli (lato opposto).

Rigeneratore

Nel rigeneratore l'aria compressa viene preriscaldata tramite scambio termico ad opera dei gas di scarico con conseguente aumento del rendimento termodinamico del ciclo.

Sistema elettrico

Il generatore produce elettricità ad alta frequenza che viene convertita ai valori standard di rete dal convertitore di potenza gestito e controllato dal Power Module Controller (PMC). Per l'avviamento della microturbina il processo viene invertito ed il generatore funge da motore d'avviamento.

Scambiatore cogenerativo

Lo scambiatore cogenerativo è del tipo aria-acqua in contro corrente. I gas di scarico, a valle dello scambiatore, vengono rilasciati in atmosfera tramite un camino.

Supervisione e controllo

Il modulo di microcogenerazione T100 è controllato e gestito in modo automatico e non necessita di personale di conduzione dedicato. In caso di problemi il sistema esegue automaticamente una procedura di distacco dalla rete e di spegnimento della macchina. Nel PMC vengono memorizzate le anomalie e lo stesso può essere usato per spegnere, accendere o monitorare la microturbina. La T100 può essere gestita anche da un controllo remoto (via modem).

I principali dati di funzionamento della Turbec vengono riportati nella figura 7

General identification	
Usage	Indoor/ Outdoor
Dimension	Width 900 mm
	Height 1810 mm
	Length 2770 mm
Weight	T100 P 2250-2750 kg (*)
	T100 PH 2770-3100 kg (*)
Fuel	Natural gas (**)
(*) Indoor / Outdoor	
(**) Different fuel is available with modification on standard unit (biogas, diesel, kerosene, methanol, LPC)	
Gas turbine	
Compressor type	Centrifugal
Turbine type	Radial
Type of combustion chamber	Lean pre-mix
Number of combustion chamber	1
Pressure in combustion chamber	4,5 bar(a)
Turbine inlet temperature	950 °C
Number of shaft	1
Nominal speed	70000
Consumption of lubrication oil	<3 ltrs/year (6000h operation)
Electrical data	
Voltage output	400/230 V AC, 3 phases
Frequency output	50 Hz (60 Hz)
Fuel requirements	
Pressure min/max	0.02/1.0 bar(g)
Temperature min/max	0/60 °C
Lower heating value	38-50 MJ/kg
Hot water installation (Power & Heat)	
Thermal output(hot water)	155 kW (±5) @ 70-90° C
Total efficiency	77% (±1) @ 70-90° C
Min water inlet temperature	50 °C
Max water outlet temperature	150° C
Max water pressure	25 bar (g)
Exhaust gas temperature	90 °C @ 70-90° C
Performance data	
Electrical output	100 kW (±3)
Electrical efficiency	30% (±1)
Fuel consumption	333 kW
Exhaust gas flow	0,80 kg/s
Exhaust gas temperature	270 °C
Noise level	70 dBA at 1 meter
Volumetric exhaust gas emission at 15% O ₂ and 100% load	
NO _x	< 15 ppm/v = 32 mg /MJ fuel
CO	< 15 ppm/v = 18 mg/MJ fuel
Turbec T100 is fully certified by CARB (Californian Air Resource Board)	
Maintenance	
The simple and rugged design of the T100 power module provides for a durable operation during many years. Expected life time of main components are listed below:	
Gas turbine engine:	> 60 000 hrs
Recuperator:	> 60 000 hrs
Combustor:	> 30 000 hrs
	(some parts < 30 000 hrs)

Fig. 7 - Dati caratteristici della Turbec T100

2.1.4 Unità a gas prevista in futuro

Il sistema turbogas prescelto per l'adeguamento dell'impianto alla taglia 1 MW è quello Volvo Aero gruppo AB modello VT600. Esso sarà in grado di fornire ed elaborare le maggiori portate richieste dal gruppo fuel cells. Al contempo è in grado di erogare, nelle condizioni nominali e iso, una potenza elettrica di 600 kW con un heat rate dichiarato di 16038 kJ/kW, dal quale si evince un'efficienza elettrica del 22,44% e una potenza termica di 1670 kW con un'efficienza del 62,46%, fornendo acqua calda a 75/100°C.

La tipologia di impianto presa in considerazione prevede un turbogas collegato ad un generatore sincrono per la produzione di potenza elettrica e uno scambiatore di calore, a valle della turbina, atto a recuperare il calore dei gas di scarico per produrre acqua calda, come raffigurato nella schematizzazione di figura 8.

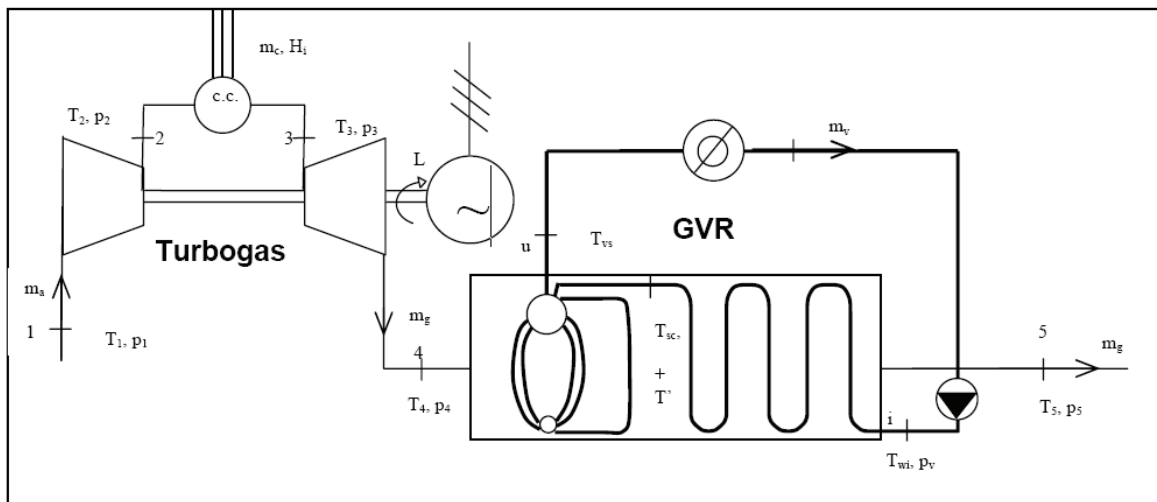


Figura 8: Schematizzazione di un impianto cogenerativo con una turbina a gas e generatore di vapore saturo a un livello di pressione

I principali dati di funzionamento della VT600 vengono riportati nella Fig. 9.

General Specifications:

- 655 kW (878 hp) at ISO conditions
- Industrial, one shaft simple-cycle
- Centrifugal compressor
 - 1-stage
 - 9:1 pressure ratio
 - 3.61 kg/s (7.96 lb/s) airflow
- Combustion system
 - Conventional type single can
 - Single gas injection
- Turbine
 - Axial flow
 - 2-stage
 - 38 400 rpm

Figura 9: specifiche del gruppo turbogas VT600

2.1.5 Attività di installazione e montaggio

ENEA ha collaborato con AFCo alla definizione della configurazione dell'impianto di emulazione e prova turbine, effettuata nell'ambito di attività precedenti. In prima analisi si è proceduto all'allestimento del sito per l'installazione dello stesso. Per utilizzare il sito designato sono state effettuate le operazioni di smantellamento dei due impianti che precedentemente lo occupavano, dopo aver espletato la prescritta procedura di disinventariamento.



Figura 10: Foto di una parte della Hall F40 dopo lo smantellamento degli impianti

Di seguito vengono illustrate, in ordine cronologico le fasi relative all'installazione dei componenti. Nel periodo finale dell'anno 2008 è stato posizionato il vessel all'interno dell'area ad esso predestinata.



Figura 11: Fasi di predisposizione allo scarico del vessel



Figura 12: Fasi di scarico del vessel

Il posizionamento del vessel, del peso di 12 tonnellate, è stato effettuato utilizzando il carroponte di cui è munita la hall e una coppia di pattini posti sotto la sella del serbatoio.

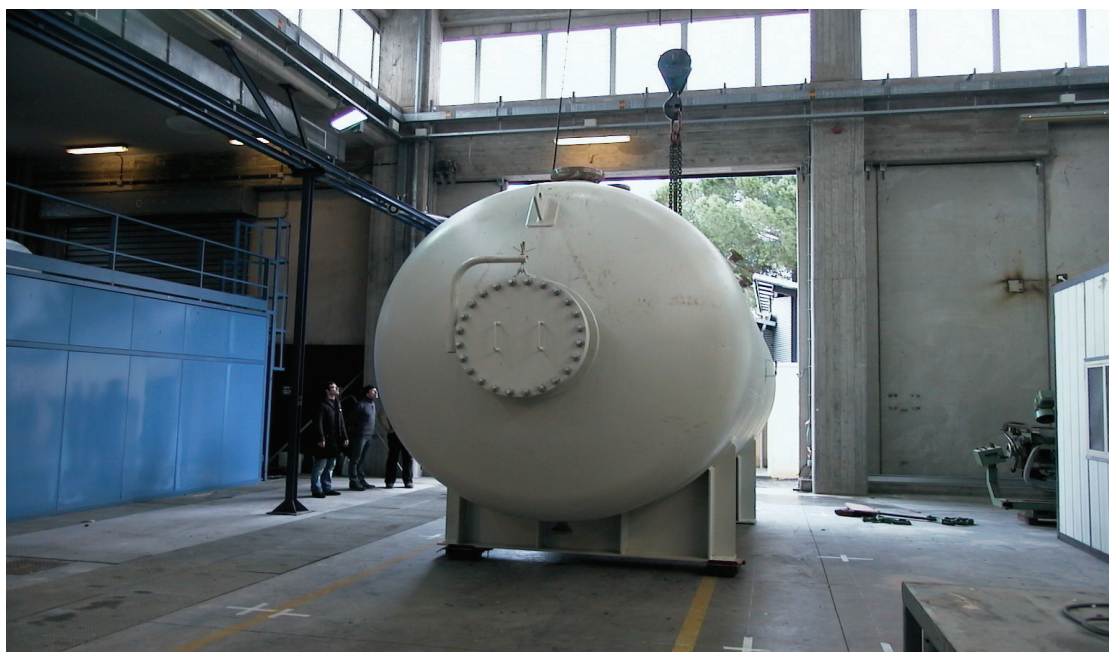


Figura 13: Fasi di posizionamento del vessel

Successivamente sono iniziate le opere di coibentazione interna del serbatoio, al fine di isolare l'esterno dalle alte temperature di funzionamento.



Figura 14: Fasi coibentazione con materiale refrattario in polvere



Figura 15: corso d'opera dell'attività di coibentazione



Figura 16: Fine coibentazione interna

Nel contempo si sono svolte le attività di cantiere per il montaggio del camino all'esterno della hall,



Figure 17: camino



Figura 18: connessioni camino attraverso la parete

con la relativa connessione attraverso la parete (fig. 18)

Da ultimo è stato posizionato il generatore di vapore secondo il layout stabilito da AFCo.



Figura 19: Installazione del generatore di vapore

2.1.6 Attività residue previste per il periodo dal 01/04/2009 al 31/12/2009

Per il completamento dell'impianto ai fini del conseguimento dell'assetto definitivo, in vista del collaudo finale, si rendono necessarie le attività residue di seguito elencate:

- installazione Gruppo turbogas;
- installazione carpenteria di sostegno;
- collegamenti piping;
- cablaggi parte elettrica;
- adeguamento della hall ai fini del rispetto della normativa antincendio.

2.2 Strumenti di simulazione

2.2.1 Generalità

Sia nell'ambito degli studi previsionali sul comportamento funzionale del sistema ibrido di potenza CUE/MGT (Compact Unit Emulator/Micro Gas-Turbine), attualmente in fase di allestimento presso ENEA - Casaccia, sia con riferimento ai prossimi studi sperimentali sul sistema medesimo, si è da molto tempo ritenuta quanto mai opportuna la realizzazione di strumenti di simulazione numerica. Il loro impiego, infatti, è e sarà di notevole utilità allo scopo di conseguire diversi obiettivi, fra i quali principalmente:

- la conduzione di attendibili analisi previsionali delle prestazioni del sistema in allestimento e, conseguentemente, del sistema nella sua versione industriale - in cui è presente, in luogo dell'emulatore CUE, l'unità MCFC (Molten Carbonate Fuel Cells) - per qualsiasi condizione di carico delle celle a combustibile;
- la fornitura di informazioni quantitative, parimenti attendibili, sulle condizioni di esercizio (composizione chimica, portata e stato termodinamico degli efflussi) di tutti i componenti dell'impianto (Emulatore, Compressore, Turbina, Camera di combustione ausiliaria, Mixers etc) e di ogni condotto di collegamento fra i medesimi;
- la definizione degli intervalli di lavoro per ogni strumento di misura e/o di controllo da inserire nell'impianto;
- le indicazioni fondamentali delle modalità con cui condurre la regolazione dell'intero sistema ai fini dell'adeguamento progressivo del suo esercizio al variare del diagramma di carico richiesto dalle utenze;
- la capacità di effettuare agevolmente e flessibilmente una reciproca validazione fra le analisi delle simulazioni numeriche e quelle sperimentali;

- la conseguente possibilità di usare sistematicamente, a partire da un prossimo futuro, gli strumenti simulativi messi a punto - in occasione degli studi attuali sull'unità CUE/MGT di costruzione AFC0-Turbec - quali strumenti metodologici ai fini della definizione dei componenti più idonei, all'interno o all'esterno degli scenari commerciali, nel rispetto delle specifiche progettuali di qualsivoglia sistema ibrido che preveda l'accoppiamento di uno o più stack di Fuel Cells, costituenti una CU operante ad elevata temperatura, con una unità MGT.

2.2.2 Schema del sistema simulato

La Fig. 20 illustra lo schema di un generico sistema ibrido costituito dall'emulatore CUE di una CU di Fuel Cells e di una unità MGT.

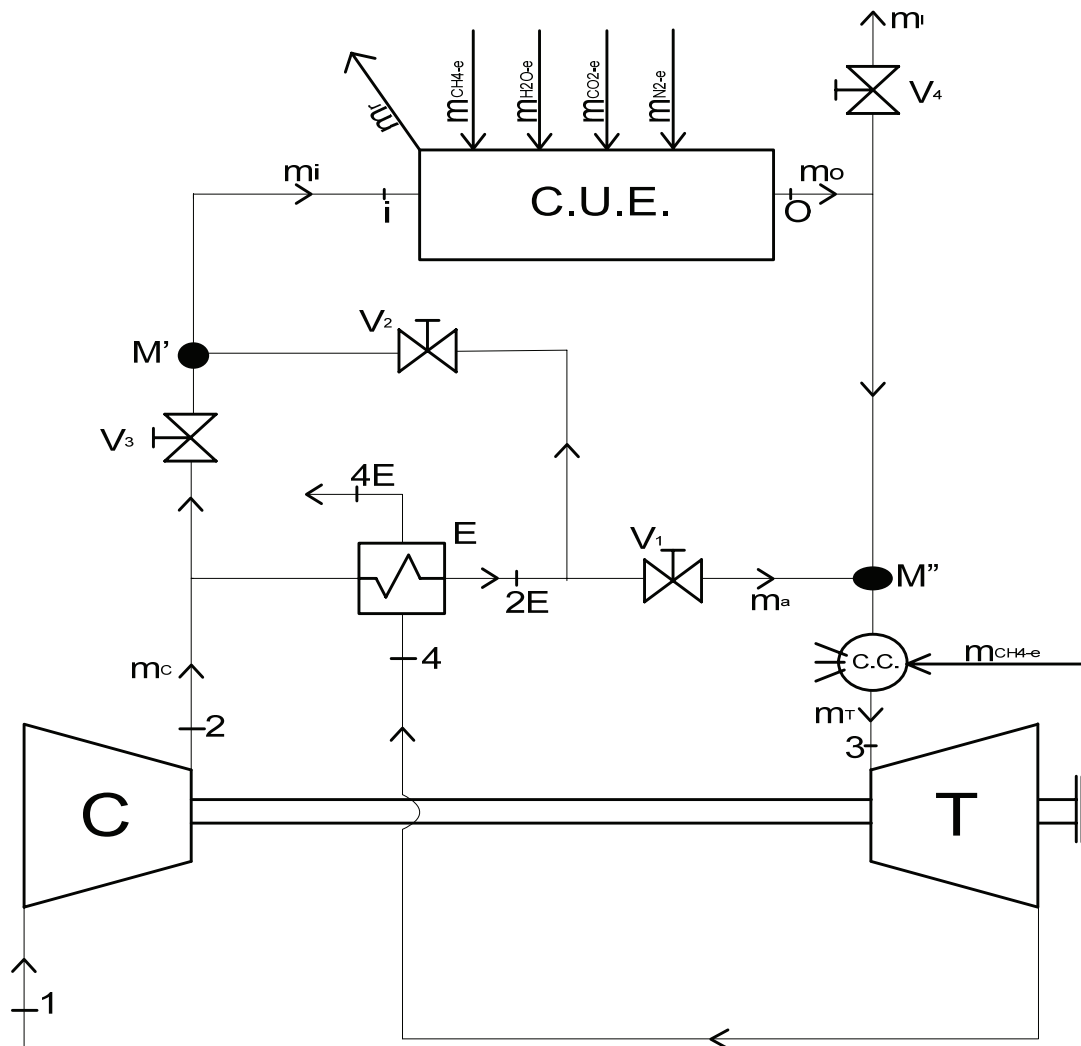


Figura 20: Schema funzionale del sistema CUE/MGT

Tale schema è ovviamente coerente con gli schemi di processo AFCo corrispondenti al sistema attualmente in allestimento presso la sede de La Casaccia dell'ENEA. Le sezioni (i) ed (o) indicano rispettivamente inlet e outlet dell'emulatore CUE. Le sezioni (1) e (2) sono quelle di ingresso e uscita del compressore C, le (3) e (4) quelle di ingresso e uscita della turbina T. Infine, le sezioni (2E) e (4E) sono, rispettivamente, quella del gas compresso preriscaldato a valle del compressore e quella dei gas combusti postraffreddati a valle della turbina per effetto dello scambiatore E di recupero; nel caso di scambiatore non operativo gli stati termodinamici 2E, 4E dei fluidi coincideranno rispettivamente con gli stati 2, 4.

La valvola V1, quando aperta, consente il convogliamento diretto di una frazione della portata di mandata del compressore alla turbina, a seguito del miscelamento (nel Mixer M²) con la portata di mandata della CU e dell'eventuale post-combustione nella Camera di combustione c.c. alimentata a metano. La valvola V2, quando aperta, consente la calibrazione – se necessaria - della temperatura di ingresso alla CU a mezzo del Mixer M², ove una modesta frazione della portata di aria compressa e riscaldata nello scambiatore E ad opera dei gas di scarico della turbina si miscela con la portata (totale o parziale) di mandata del compressore destinata alla CU. Il grado di apertura della valvola V3 governa il collegamento fra mandata del compressore e alimentazione della CU. La valvola V4, infine, quando aperta, consente il rigetto all'esterno dell'eventuale portata di mandata della CU esuberante rispetto alla richiesta della turbina.

Lo schema a black-box dell'emulatore CUE evidenzia le alimentazioni esterne di combustibile (metano), vapor d'acqua, anidride carbonica e azoto necessarie al fine di fornire e calibrare le rispettive portate affinché, per ogni condizione di carico della CU, l'emulatore CUE consenta il mantenimento delle corrispondenti condizioni operative richieste (composizioni chimiche, portate, stato termodinamico) all'ingresso e all'uscita della CU medesima. E' altresì indicata la porzione della portata di alimentazione all'ingresso (i) del CUE che, in seno a quest'ultimo, viene espulsa al fine di renderne le condizioni operative in ingresso e in uscita coerenti con quelle della CU emulata.

2.2.3 Caratteristiche generali dei sistemi simulativi sviluppati

Tutti gli strumenti di simulazione allestiti nel corso del presente lavoro considerano il sistema ibrido CUE/MGT in condizioni di esercizio stazionarie per qualsivoglia condizione di carico richiesta alla CU. Essendo, per ciascuna condizione di carico suddetta, imposti i valori dei parametri caratterizzanti gli efflussi all'ingresso (i) e all'uscita (o) dell'emulatore CUE (in conformità con le corrispondenti condizioni operative della CU, provenienti dai risultati progettuali della stessa CU), l'intero sistema di cui allo schema di Fig. 2.2.3.1 può utilmente essere scisso nei

due gruppi fondamentali (CUE e MGT) che vengono risolti pertanto separatamente. Ciò offre, oltre ad uno snellimento generale delle procedure risolventi, il vantaggio di poter effettuare, separatamente per i due sottosistemi CUE e MGT, analisi di sensibilità del loro comportamento e delle loro prestazioni al variare dei valori dei rispettivi parametri “esterni”; in particolare, al variare degli stati termodinamici dei fluidi alimentanti l’uno e l’altro sottosistema.

Per quanto concerne gli strumenti simulativi da realizzare, si è convenuto di adottare, a favore di completezza e sicurezza, una duplice via. Da un lato, si è inteso avvalersi, in continuità con precedenti esperienze condotte da ENEA sia nel settore energetico qui in parola sia in altri, dell’ambiente di simulazione a largo spettro IPSEpro per i sistemi energetici; dall’altro, si è ritenuta molto utile la parallela costruzione di un package di programmazione ex-novo in linguaggio tradizionale (FORTRAN), finalizzato in chiave generale e flessibile alla famiglia specifica dei sistemi energetici qui considerati (gruppi ibridi CUE/MGT).

Tale scelta, indubbiamente più onerosa per il duplice impegno su due procedure molto diverse fra loro sia su piano metodologico che operativo, conduce peraltro alla disponibilità di due strumenti per più aspetti complementari: il primo (ambiente IPSEpro), meno esigente in termini di modellistica fisico-matematica e numerica del sistema in esame, dotato di flessibilità abbastanza ampia nei confronti della descrizione funzionale - da parte dell’operatore esterno - del sistema da simulare ma, nel contempo, inevitabilmente – come sempre si riscontra in ogni ambiente simulativo a largo spettro – molto esigente e “pesante” sotto l’aspetto del protocollo operativo del trasferimento-dati, soprattutto in input; il secondo (package di programmazione costruito autonomamente e sviluppato in linguaggio tradizionale), fortemente più esigente in termini di impostazione fisico-matematica e numerica del sistema in esame, dotato di flessibilità e generalità ancor più ampia nell’ambito della specifica famiglia dei sistemi considerati nella fattispecie e, infine, decisamente meno oneroso e più snello in termini di trasferimento-dati in input.

I due strumenti simulativi di cui sopra – il primo curato prevalentemente dall’ing. D. Pierini e il secondo dal prof. C. Arrighetti - sono oggetto dei prossimi due punti 2.3 e 2.4.

2.3 Modelli e simulazioni in ambiente IPSEpro

Per sviluppare i modelli dei componenti ed effettuare le simulazioni dell’impianto è stato utilizzato IPSEpro 3.1®, un software di simulazione statica realizzato dalla società austriaca SimTech (Simulation Technology) e messo a disposizione dal dipartimento TER-IDROCOMB del Centro Ricerche ENEA – Casaccia.

IPSEpro® lavora su piattaforma Windows® ed è estremamente flessibile per la riproduzione computerizzata di molte tipologie di processi appartenenti alle ingegnerie industriali. Il software permette la risoluzione di problemi rappresentabili tramite delle reti discrete di componenti ed i loro

collegamenti; è quindi possibile simulare il comportamento sia di singoli elementi, sia di impianti completi o di loro porzioni.

Il software è caratterizzato da una elevata flessibilità, in quanto permette di modificare il modello proposto per gli elementi presenti nella libreria del codice, o, se necessario, di crearne nuovi, implementando modelli termodinamici che più si adattano alla descrizione del modello desiderato.

Il pacchetto informatico di IPSEpro® si compone di due ambienti, MDK e PSE: il primo è l'ambiente di sviluppo del modello dei componenti, mentre il secondo è l'ambiente di simulazione dell'impianto.

MDK (Model Development Kit) è l'ambiente nel quale è possibile progettare i modelli dei singoli componenti utilizzati nella schematizzazione degli impianti, mediante trascrizione del modello numerico in linguaggio apposito, chiamato MDL (Model Development Language).

PSE (Process Simulator Environment) è l'ambiente di processo, ovvero la parte del software propriamente dedicata alle simulazioni. Tramite una comoda interfaccia grafica è possibile “disegnare” l'impianto desiderato a partire da una libreria che raccoglie le architetture-tipo dei diversi elementi contemplabili. Una volta realizzate le connessioni, imposti i valori dei parametri e definite le variabili in gioco è possibile lanciare la simulazione.

Modello utilizzato

Il modello matematico preso come riferimento per la descrizione funzionale delle due turbomacchine è quello proposto da Wang, il quale permette di ricostruire le mappe della turbina e del compressore tramite equazioni parametriche. La versatilità specifica del modello di Wang risiede nella presenza di alcuni parametri, agendo sui quali è possibile ricavare andamenti sufficientemente fedeli rispetto a quelli sperimentali; l'individuazione dei corretti valori dei parametri è la chiave per ottenere delle corrette simulazioni.

Le variabili utilizzate sono ridotte e normalizzate rispetto alle condizioni nominali, come verrà esposto nei paragrafi successivi. Per quanto concerne la provenienza e la descrizione delle grandezze in gioco si rimanda alla memoria: “General characteristics of single shaft microturbine set at variable speed operation and its optimization” di Wei Wang, Ruixian Cai *, Na Zhang, Applied Thermal Engineering vol. 24 (2004), pagg. 1851–1863.

Modello compressore

Per il rapporto di compressione si considera l'espressione polinomiale:

$$\beta_c = \dot{\beta}_c \cdot \beta_{c0} = (c_1(\dot{n}_c) \cdot \dot{G}_c^2 + c_2(\dot{n}_c) \cdot \dot{G}_c + c_3(\dot{n}_c)) \cdot \beta_{c0}$$

Il rendimento è definito dall'espressione:

$$\eta_c = \dot{\eta}_c \cdot \eta_{c0} = \left\{ \left[1 - c_4 \cdot (1 - \dot{n}_c)^2 \right] \cdot \left(\frac{\dot{n}_c}{\dot{G}_c} \right) \cdot \left(2 - \frac{\dot{n}_c}{\dot{G}_c} \right) \right\} \cdot \eta_{c0}$$

Modello turbina

Per quanto riguarda il rapporto di espansione si considera la formula di Flügel

$$\beta_t = \left[\sqrt{1 + \left[\left(\frac{1}{\beta_{t0}^2} - 1 \right) \cdot \left(\dot{G}_t \cdot \frac{1}{\alpha} \right)^2 \right]} \right]^{-1}$$

Il rendimento è definito dall'espressione:

$$\eta_t = \dot{\eta}_t \cdot \eta_{t0} = \left\{ \left[1 - t_4 \cdot (1 - \dot{n}_t)^2 \right] \cdot \left(\frac{\dot{n}_t}{\dot{G}_t} \right) \cdot \left(2 - \frac{\dot{n}_t}{\dot{G}_t} \right) \right\} \cdot \eta_{t0}$$

Modello emulatore

Per la simulazione dell'emulatore si è effettuata un'analisi della Compact Unit vista come un black box, imponendo il rispetto dei bilanci di massa e di energia; gli input all'emulatore sono costituiti da portate entranti di aria, metano, vapore, anidride carbonica e azoto; i valori delle portate saranno commisurate – per ciascuna condizione di carico delle fuel cells considerata - ai prescritti valori, per le sezioni di ingresso e uscita della CU, delle portate, delle composizioni chimiche e degli stati termodinamici degli efflussi. Pertanto il modello fisico dell'emulatore è composto da una camera di combustione, dove reagiscono ossigeno e metano e da tre iniettori (rispettivamente per vapore, anidride carbonica e azoto) opportunamente alloggiati in una camera di calma all'interno dell'emulatore.

Le condizioni operative da assegnare all'emulatore al fine di attuare una corretta simulazione sono:

- la portata dell'aria in ingresso
- la temperatura dell'aria in ingresso
- la pressione dell'aria in ingresso

- la composizione dell'aria in ingresso (standard)
- la portata del gas in uscita
- la temperatura del gas in uscita
- la pressione del gas in uscita
- la composizione del gas in uscita

In definitiva il modello contempla un impianto gestito da opportune regolazioni delle portate di metano, vapore, anidride carbonica, azoto ed aria spillata (figura 5.14), modulate in modo da garantire le reali condizioni in ingresso e in uscita della Compact Unit.

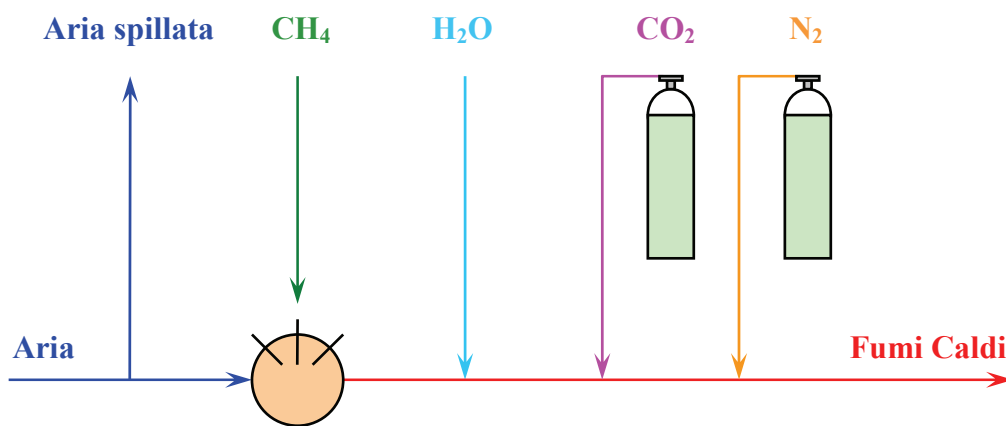


Figura 21: Rappresentazione schematica dell'emulatore

L'ambiente IPSEpro® si presta favorevolmente ai fini della costruzione del modello brevemente descritto sopra e della sua risoluzione numerica. Nel paragrafo successivo verrà esposta in dettaglio la simulazione dell'emulatore, corredata dei risultati ottenuti relativi alle diverse portate coinvolte.

2.3.1 Simulazioni: input/output

Le tabelle 1 e 2 riportano rispettivamente i dati caratterizzanti le simulazioni effettuate e i principali risultati di tali simulazioni.

Tabella1: Dati di Input

		<i>Carico alle fuel cells</i>			
		100%	75%	50%	25%
Temperatura Aria Ingresso Compact Unit [°C]		200	200	200	200
Pressione Aria Ingresso Compact Unit [bar]		4	4	4	4
Portata Aria Ingresso Compact Unit [kg/s]		0.767	0.521	0.307	0.129
Temperatura Gas Uscita Compact Unit [°C]		650	650	650	650
Pressione Gas Uscita Compact Unit [bar]		4	4	4	4
Portata Gas Uscita Compact Unit [kg/s]		0.876	0.603	0.360	0.155
Composizione Uscita Compact Unit [%W]	O ₂	0.1014	0.0907	0.0752	0.0509
	H ₂ O(vapore)	0.1429	0.1556	0.1738	0.2022
	CO ₂	0.0748	0.0817	0.0885	0.0996
	N ₂	0.6809	0.6720	0.6625	0.6473
Variazione % Metano		100.0%	75.0%	50.0%	25.0%
Variazione % Aria		100.0%	68.0%	40.0%	16.8%
Variazione % Acqua		100.0%	75.0%	50.0%	25.0%

Tabella 2: Dati di output riferiti all'emulatore

Voce	valori	valori	valori	valori
Portata Metano Ingresso Compact Unit [kg/s]	0.0114	0.007978	0.00487	0.00212
Portata H2O Ingresso Compact Unit [kg/s]	0.09946	0.07591	0.05163	0.02657
Portata N2 Ingresso Compact Unit [kg/s]	0.1791	0.1369	0.09427	0.04958
Portata CO2 Ingresso Compact Unit [kg/s]	0.03406	0.02738	0.0185	0.009611

Per i gas tecnici iniettati all'interno del vessel, il valore di temperatura corrisponde a quella ambiente (15° C). Per il vapore, invece, il valore di temperatura è duecento gradi Celsius e quello di pressione è di sei bar.

2.3.2 Approssimazione polinomiale dei diagrammi caratteristici

Nella prospettiva di implementare il modello delle turbomacchine da simulare in ambiente IPSEpro sono state analizzate le curve caratteristiche di una turbina e di un compressore di prestazioni analoghe a quelle del gruppo Turbec T100. Sono state, quindi, ricavate le espressioni polinomiali approssimanti suddette curve effettuando una serie di best-fitting a velocità costante delle seguenti grandezze: per il compressore, rapporto di compressione in funzione della portata; per la turbina, portata e rendimento adiabatico in funzione del reciproco del rapporto di espansione. Per quanto concerne l'approssimazione analitica del rendimento del compressore si rende necessario un approfondimento ulteriore in quanto il diagramma collinare disponibile presenta una forma tormentata di difficile interpretazione in termini polinomiali. Si prevede, una volta completato lo studio svolto, di inserire le rappresentazioni analitiche delle curve caratteristiche nell'ambiente IPSEpro, analogamente a quanto svolto nel corso delle simulazioni in FORTRAN di cui al punto successivo.

Tabella 3: Coefficienti dei polinomi $\beta = f(m)$ per il compressore

Rotor speed [rpm]	c1	c2	c3	C4
21609	1,00E-13	-1,00E+09	4,15E+04	7,34E-01
36004	-5,00E+11	-4,00E+08	3,27E+04	8,91E-01
43201	8,00E+12	-2,00E+09	1,06E+05	-2,15E-01
50399	-2,00E+12	1,00E+08	1,14E+04	1,77E+00
57596	-1,00E+12	-6,00E+07	3,06E+04	1,65E+00
64810	-1,00E+13	-4,00E+09	3,90E+05	1,63E+01
68409	8,00E+12	-3,00E+09	3,62E+05	-9,91E+00
72008	-3,20E+01	-2,00E+08	3,91E+04	3,20E+00
75607	3,00E-13	-1,00E+10	2,00E+06	-7,78E+01
79205	0,00E+00	0,00E+00	-6,00E+03	7,15E+00
82804	0,00E+00	0,00E+00	-9,60E+03	7,97E+00

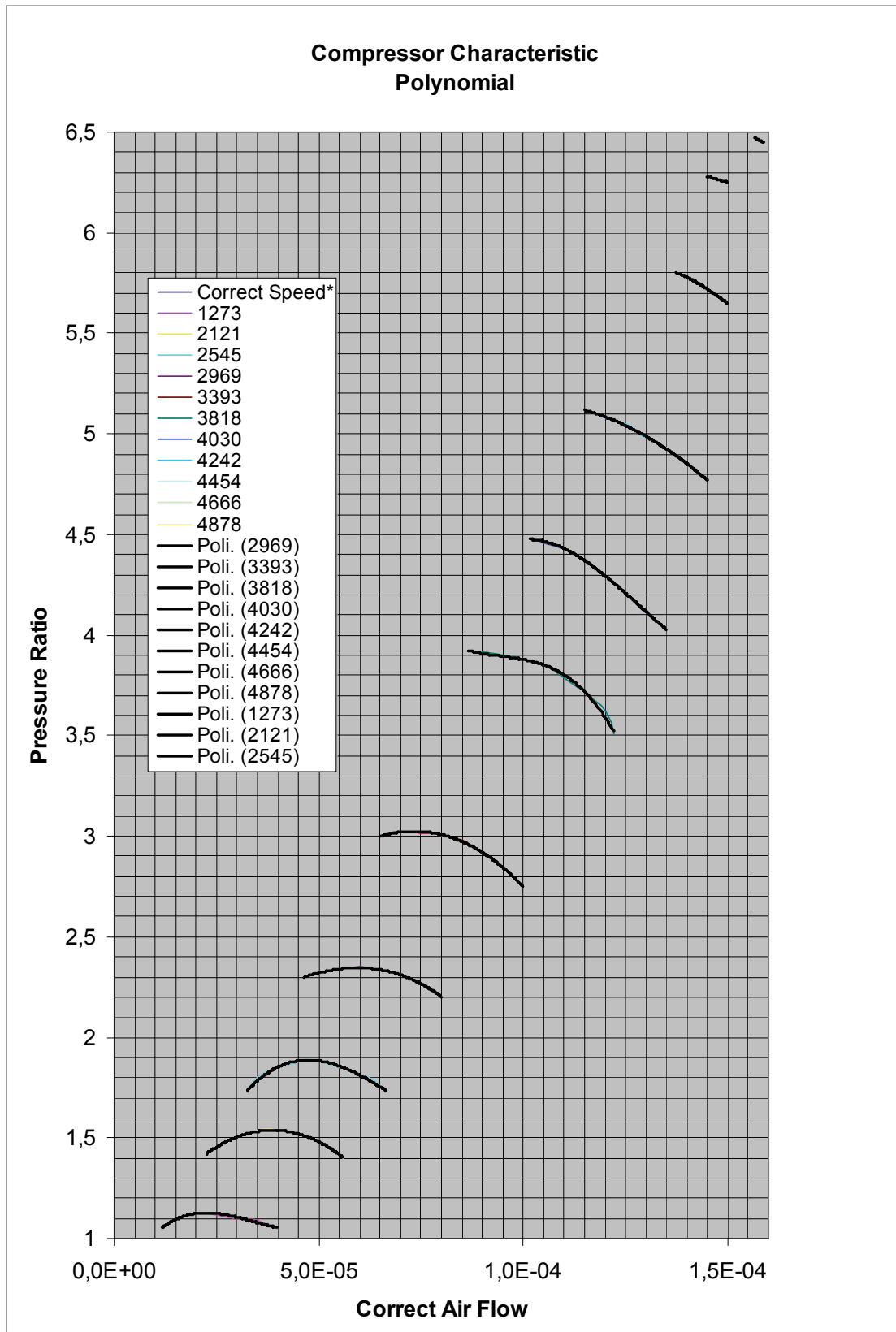


Figura 22- Ccurve polinomiali della caratteristica del compressore del gruppo T100

Tabella 4: Coefficienti dei polinomi $m = f(\beta)$ per la turbina

Rotor speed [rpm]	c0	c1	c2	c3	C4
38873	-0,18	2,56	-13,10	28,82	-16,27
43734	-0,18	2,49	-12,86	28,72	-16,64
48592	-0,16	2,32	-12,20	27,79	-16,50
53454	-0,13	1,89	-10,23	24,21	-14,47
58311	-0,09	1,34	-7,65	19,28	-11,43
63173	–	0,21	-2,49	9,49	-5,16
68031	–	0,16	-1,96	7,93	-3,94
72888	–	0,12	-1,56	6,73	-3,02
77750	–	0,08	-1,16	5,49	-1,99

2.4 Modelli ex-novo e relativi codici in FORTRAN. Simulazioni

2.4.1 Impostazioni di base dei modelli

L'emulatore della Compact Unit (CU) e il gruppo Micro-GasTurbine (MGT), che costituiscono l'unità attualmente in fase di allestimento presso ENEA-Casaccia, sono stati oggetto della costruzione di due modelli numerici, programmati in linguaggio tradizionale FORTRAN, atti a simulare – come già detto in precedenza (v. 2.2) – separatamente i due sottosistemi (CUE e MGT) in condizioni di esercizio stazionarie per un qualsiasi carico richiesto alla CU.

L'unità in parola, in cui l'emulatore della CU sostituisce la CU medesima allo scopo di sperimentare agevolmente e flessibilmente il comportamento a carico variabile del gruppo MGT senza sopportare gli oneri e i rischi dell'impiego di fuel-cells, corrisponde al gruppo ANSALDO-Turbec con CU da 500 kW e Turbogas T100 a velocità variabile da 100 kW; tuttavia, lo stesso emulatore della CU potrà essere impiegato nella simulazione sperimentale di unità ibride di maggiore potenza (già prevista l'unità con CU da 1000 kW e Turbogas VT600) dotate di gruppo turbogas a velocità variabile o costante.

Le simulazioni numeriche consentono di quantificare in sede previsionale, da un lato, la modulazione dei parametri operativi dell'emulatore (CUE) al variare del carico elettrico richiesto dalle utenze alla CU simulata e, dall'altro, la modulazione dei parametri di esercizio del gruppo MGT ai fini del conseguimento delle più favorevoli prestazioni globali dell'unità ibrida.

Per ciascuna condizione di carico, sia per la simulazione del CUE che per quella del gruppo MGT, sono assegnati in ingresso i dati:

- Portata in massa, pressione, temperatura e composizione chimica in inlet (i) del CUE;
- Portata in massa, pressione, temperatura e composizione chimica in outlet (o) del CUE.

Per quanto concerne il modello termodinamico dei fluidi presenti, tenuto conto della loro natura e delle condizioni termodinamiche in cui operano in seno all'impianto, essi sono trattati come gas perfetti a calori specifici variabili con la temperatura. Le miscele gassose presenti in gran parte dei componenti dell'impianto sono di conseguenza, come ben noto, anch'esse trattate come gas perfetti il cui modello termodinamico è definito dalla loro composizione. Per i singoli gas entranti nel sistema, la legge del calore specifico a pressione costante in funzione della temperatura assoluta è stata assimilata a quella offerta dal Perry (Chemical Engineers' Handbook, Ed. McGraw-Hill). Tale legge è stata ulteriormente trasformata in termini di funzione polinomiale - a mezzo di un opportuno fitting - per quei gas la cui legge indicata dal Perry non è di tale tipo; ciò ai fini di unificare la forma di tale funzione per i vari fluidi in gioco, a favore della razionalizzazione strutturale dei codici di calcolo.

Il CUE, trattandosi di un vessel dotato di multipli ingressi e uscite e sede di combustione, è modellato a "black-box"; in funzione delle condizioni operative imposte dai dati di progetto della CU alle sue sezioni di inlet (i) e di outlet (o) per la specifica condizione di carico in esame, vengono valutate le portate dei fluidi somministrati dall'esterno (combustibile CH₄, vapor d'acqua, CO₂ e N₂) - dei quali sono assegnati i corrispondenti stati termodinamici - sulla base delle relazioni stechiometriche della combustione del metano e dei bilanci di massa e di energia in gioco. Il potere calorifico inferiore del metano puro è assunto pari a 50000 kJ/kg e viene considerato utilizzato a meno di un rendimento di combustione assegnato.

I componenti fondamentali del gruppo MGT (v. ancora la Fig. 2.2.3.1) sono: il compressore C, la turbina T, la camera di combustione ausiliaria c.c. e lo scambiatore rigenerativo E.

La descrizione funzionale delle due turbomacchine è affidata ai corrispondenti diagrammi caratteristici (reali o presunti) - descritti in termini di variabili e parametri "ridotti" - di cui è opportuno, ai fini operativi, possedere o produrre la forma analitica (ad es. a mezzo di trattamento dei dati originali attraverso opportuni processi di best-fitting di funzioni in due variabili), come è stato fatto nel presente lavoro. Per quanto concerne i lavori specifici di compressione e di espansione, sulla base del corrispondente rendimento - calcolato sulla base dei diagrammi caratteristici delle turbomacchine - essi vengono valutati considerando i salti entalpici rigorosi, sia in sede di riferimento (isoentropica) che in sede reale, senza far ricorso a trasformazioni politropiche "equivalenti".

La camera di combustione ausiliaria, alimentata a metano, viene modellata in base ai propri bilanci di massa e di energia e alle relazioni stechiometriche della combustione del metano, assumendo un determinato valore del rendimento di combustione.

Lo scambiatore rigenerativo è ipotizzato, in linea con la realtà, a superficie e operante in contro-corrente; le sue prestazioni sono coerenti con un valore imposto della sua efficienza.

Nella simulazione del gruppo MGT, vengono assegnati in ingresso: le condizioni ambiente dell'aria all'aspirazione del compressore (Sez. 1); le perdite di carico nella camera di combustione ausiliaria (cc) e allo scarico della turbina (td); la temperatura del metano che alimenta la cc; le efficienze eff della c.c. (cc), dello scambiatore recuperatore (re), i rendimenti meccanici del compressore e della turbina (mc, mt). I dati di uscita essenziali sono: velocità di rotazione (rpm) del gruppo turbina/compressore; portate in massa mf al compressore, alla turbina, eventuale portata "perduta" (l) allo scarico del CUE, eventuale portata "aggiunta" (a) alla turbina (prelevata a mezzo di by-pass a valle del compressore), eventuale frazione della portata in (i) preriscaldata a valle del compressore; eventuale portata di metano alla camera di combustione ausiliaria (cc); pressioni, temperature e densità nelle sezioni fondamentali del circuito; lavori specifici e potenze del compressore e della turbina, potenza meccanica netta alla flangia di accoppiamento turbina/convertitore elettrico.

Sono previste varie caratterizzazioni di esercizio dell'impianto (v. Fig.2.2.3.1):

a) Scambiatore non operativo

a1) Valvole: V1 chiusa, V2 chiusa, V3 aperta, V4 aperta

a2) Valvola V1 aperta, V2 chiusa, V3 aperta, V4 chiusa

b) Scambiatore operativo

b1) Valvole: V1 chiusa, V2 aperta, V3 aperta, V4 aperta

b2) Valvole: V1 aperta, V2 chiusa, V3 aperta, V4 chiusa

b3) Valvole: V1 aperta, V2 aperta, V3 aperta, V4 chiusa

I casi a1) e b1) sono quelli in cui la portata uscente dal CUE è ridondante rispetto alla necessità di smaltimento della turbina (alti carichi) e quindi è necessario modulare, attraverso la valvola V4, la portata alla turbina scaricando all'esterno una parte (l) della portata (o) in corrispondenza dell'uscita dal CUE. Nel caso a1) la temperatura del gas compresso (Sez.2) sarà uguale a quella imposta all'ingresso del CUE (Sez. i) e la pressione del gas compresso dovrà essere modulata, a mezzo della V3, per ridurla a quella imposta nella Sez. i; nel caso b1) la pressione del gas compresso sarà uguale a quella imposta nella Sez. i e la temperatura del gas compresso sarà modulata, per raggiungere il valore imposto in tale sezione, a mezzo della V2 e del miscelatore M'.

Negli altri casi, la portata all'uscita del CUE risulta deficitaria ai fini dello smaltimento in turbina (medi e bassi carichi) e quindi la V4 è chiusa (portata "perduta" (l) nulla), mentre sarà aperta la V3, consentendo un "addendum" (a) di portata di gas compresso che, bypassando il CUE, confluirà in turbina miscelandosi in M" con la portata uscente da (o). Nel caso a2) la portata addizionale (a) viene utilizzata nelle condizioni di uscita dal compressore; per quanto concerne pressione e temperatura del gas compresso, valgono le stesse condizioni descritte per il caso a1). Nel caso b2) lo scambiatore produce il riscaldamento della portata addizionale (a) senza intervenire sulla temperatura della portata di ingresso al CUE (V2 chiusa), in quanto per pressione e temperatura del gas compresso valgono ancora le condizioni descritte nel caso a1); nel caso b3), invece, valgono le condizioni descritte nel caso b1) e la temperatura all'ingresso del CUE sarà modulata al valore imposto (V2 aperta).

In analogia con altri studi, precedenti e attuali, di ENEA in collaborazione con l'Università "La Sapienza" di Roma, si è assunto di utilizzare la camera di combustione ausiliaria (cc) solo nel caso in cui il gruppo turbocompressore non risulti autosostenuto (potenza meccanica netta negativa, corrispondente ai bassi carichi); in tal caso si alimenta la c.c. ausiliaria con una portata di metano sufficiente a garantire l'autosostentamento del gruppo (potenza meccanica netta nulla). Tuttavia, sarà immediato predisporre in alternativa, se ritenuto opportuno, la procedura di calcolo ed i relativi codici al fine di valutare le condizioni operative (fra le quali la portata di metano necessaria) da adottare per ottenere alla flangia, a parità di carico elettrico richiesto alla CU, una potenza meccanica netta positiva e prefissata (oppure commisurata con l'ottimizzazione di una prescelta funzione-obiettivo).

Ai fini della generica simulazione del gruppo MGT a velocità variabile, associata ad un determinato carico richiesto alla CU, per l'aria nello stato di fine compressione (Sez. 2) si può prescrivere, in alternativa: 1) il valore della temperatura eguale a quello richiesto all'ingresso nella CU (Sez. i), imponendo alla corrispondente pressione un valore non inferiore a quello di processo della stessa CU; 2) il valore della pressione eguale a quello di processo della CU, imponendo alla corrispondente temperatura un valore non inferiore a quello richiesto in ingresso dalla stessa CU. In questo secondo caso l'uso dello scambiatore di recupero sarà obbligatorio e non opzionale in quanto si renderà necessaria la calibrazione della temperatura dell'aria compressa.

Si aggiunge infine che il modello del gruppo MGT realizzato ed i rispettivi codici sono predisposti per l'assunzione di gruppi turbogas a velocità variabile (accoppiati quindi a opportuni utilizzatori elettrici dotati di raddrizzatore e inverter atti a fornire in uscita corrente a 50 periodi); tuttavia sarà immediato generare una versione del modello predisposta per gruppi a velocità

costante, come già previsto per sistemi di potenza maggiore, rispetto a quella del sistema a velocità variabile qui considerato, da sviluppare e sperimentare in un prossimo futuro.

2.4.2 Codici di calcolo

I modelli succintamente descritti in 2.4.1 sono stati sviluppati e tradotti in codici di calcolo in linguaggio FORTRAN, realizzando due packages di programmazione. Il primo di essi è costituito da un unico codice, denominato CUES (Compact Unit Emulator Simulation), finalizzato alla simulazione dell'emulatore (CUE) della Compact Unit, mentre il secondo si articola nelle due edizioni 01 e 02 di un codice, denominato GPOFSM (Gas Plant Operating Simulation – Free Model) finalizzato alla simulazione del gruppo micro-turbogas (MGT).

I files standard di input e di output del codice CUES portano rispettivamente i nomi IDCUES00 e ODCUES00; quelli del codice GPOFSM portano invece i nomi IDGPFM00 per il file di input e ODGPFM01, ODGPFM02 per il file di output, rispettivamente per le edizioni 01, 02 del codice.

Le due edizioni 01 e 02 del codice GPOFSM si differenziano fra loro nei termini delle corrispondenti opzioni di impostazione 1) e 2) definite alla conclusione del precedente par. 2.4.1. Nell'Edizione 01 si impone che la temperatura dell'aria compressa (Sez. 2) sia pari a quella prescritta all'ingresso del CUE (Sez. i), mentre la pressione viene, in modesta misura, ridotta modulandola tramite valvola (V3); nell'Edizione 02 si impone invece che il compressore fornisca l'aria in uscita (Sez. 2) ad una pressione pari a quella richiesta dal CUE all'ingresso (Sez. i), mentre il modesto incremento della temperatura è affidato allo scambiatore di recupero E.

Inoltre, la sigla FM (Free Model) sta ad indicare che i modelli funzionali del compressore e della turbina sono “liberi” nel senso che possono venire flessibilmente introdotti nel codice in termini di diagrammi caratteristici delle turbomacchine, contrariamente a quanto adottato in versioni del codice precedentemente realizzate, ove erano stati introdotti modelli molto semplificativi – e inevitabilmente non accurati – di tali diagrammi caratteristici, sul tipo del modello di Wang.

Le unità di misura usate nei files di input e di output di tutti i codici sono le seguenti:

velocità di rotazione (rotational speed, rpm): giri/min

portata in massa (mass flow): kg/s

pressione assoluta (abs. pressure): bar

temperatura: °C

energie specifiche (specific energies): kJ/kg

densità di massa (mass density): kg/m³

Potenza (Power): kW

Si descrive di seguito il contenuto dei files di output per i codici realizzati.

2.4.3 File ODCUES00

<u>Grandezza</u>	<u>Descrizione</u>
LHVCH4	Potere calorifico inferiore di CH4
tcH2Oe	Temperatura del vapor d'acqua esterno
tce	Temperatura dei fluidi esterni CH4, CO2, N2
pi, tci	Pressione e temperatura in (i)
po, tco	Pressione e temperatura in (o)
mfi, mfo	Portate in (i) e in (o)
fmN2o, fmO2o, fmH2Oo, fmCO2Oo	Frazioni in massa del gas in (o)
mfu, mfr	Portata utilizzata in CUE = mfi-mfr e mfr (rigettata)
hi, mdi	Entalpia e densità in (i)
mfCH4e, mfH2Oe, mfCO2e, mfN2e	Portate dei fluidi entranti nel CUE
hCH4e, hH2Oe, hCO2e, hN2e	Entalpie dei fluidi entranti nel CUE
ho, mdo	Entalpia e densità in (o)

2.4.4 Files ODGPFM01, ODGPFM02

<u>Grandezza</u>	<u>Descrizione</u>
LHVCH4	Potere calorifico inferiore di CH4
tcCH4	Temperatura del metano fornito in cc
pi, tci	Pressione e temperatura in (i)
po, tco	Pressione e temperatura in (o)
mfi, mfo	Portate in (i) e in (o)
fmN2o, fmO2o, fmH2Oo, fmCO2Oo	Frazioni in massa del gas in (o)
p2, tc2, tc2E	Pressione in (2), temperature in (2) e (2E)
effc	Rendimento adiabatico di compressione
mfc, mft	Portate del compressore e della turbina
mfl, mfa (*)	Portata perduta e portata aggiunta
p3, tc3	Pressione e temperatura in (3)
p4, tc4, tc4E	Pressione in (4) e temperature in (4) e (4E)
efft	Rendimento adiabatico di espansione
effcc,effre	Rendimenti della cc e dello scambiatore di recupero E

effmc,effmt	Rendimenti meccanici del compressore e della turbina
rpm	Velocità di rotazione dell'albero
Wc, Wt	Lavori specifici del compressore e della turbina
Pc, Pt, Pn	Potenze del compressore, della turbina e potenza mecc. netta
Jre, Jcc	Indice binario (0/1) di operatività di E e della cc
mfCH4	Portata di CH4 in cc
mftC	Portata in turbina in condizioni di Choking
Ri=Rc	Costante del gas in (i) e nel compressore
Ro	Costante del gas in (o)
Rt	Costante del gas in turbina
mdi, mdc	Densità del gas in (i) e all'uscita del compressore
mdo, mdt	Densità del gas in (o) e all'ingresso in turbina

(*) Nel caso del file ODGPFM02 viene inserita la portata mfc_{re} in luogo di mfa nel caso di mfa nulla (alti carichi alla CU) e in luogo di mfl nel caso di mfl nulla; mfc_{re} è quella porzione della portata di aria compressa convogliata in (i) che viene inviata allo scambiatore di recupero ai fini della calibrazione della temperatura del gas in (i) a mezzo del miscelatore M'.

2.4.5 Esempi di simulazioni numeriche del sistema CUE/MGT

Sono allegati a queste note i tre files di output ODCUES00, ODGPFM01, ODGPFM02 relativi ad una simulazione completa dell'unità CUE/MGT attualmente in fase di allestimento presso ENEA-Casaccia.

Il file ODCUES00 è composto da dodici simulazioni del sottosistema CUE, a mezzo del codice CUES, corrispondenti a quattro diverse condizioni di carico elettrico alla CU (100%, 75%, 50%, 25%) per tre diverse temperature del vapor d'acqua introdotto (170, 200, 250 °C). Le simulazioni in parola si riferiscono a condizioni operative della CU a 3.5 bar con temperatura di ingresso di 200 °C e di uscita a 650 °C.

Il file ODGPFM01 comprende sette simulazioni del sottosistema MGT, a mezzo del codice GPOSFM01, con temperatura dell'aria in (2) prescritta e uguale a quella in (i). La prima simulazione corrisponde al 100% del carico alla CU e, risultando nulla la portata aggiunta (a), tale simulazione prevede che lo scambiatore E non sia operativo. Le successive sei simulazioni corrispondono al 75%, al 50% e al 25% del carico alla CU, ripetute sia in caso di scambiatore non operativo che operativo; in tali simulazioni è nulla la portata perduta (l) e positiva la portata aggiunta (a).

Il file ODGPFM02 comprende quattro simulazioni del sottosistema MGT, a mezzo del codice GPOSFM02, con pressione dell'aria in (2) prescritta e uguale a quella in (i). Tali simulazione corrispondono al 100%, al 75%, al 50% e al 25% del carico alla CU e si riferiscono tutte alla condizione di scambiatore operativo, sempre comunque necessaria ai fini della calibrazione della temperatura del gas all'uscita del compressore.

Nelle simulazioni al 100% del carico richiesto alla CU risulta sempre positiva la portata "perduta" (l) e nulla quella "aggiunta" (a), viceversa per tutte le altre ipotesi di carico alla CU contemplate; nel caso del 25% del carico si rende inoltre necessario l'utilizzo della camera di combustione supplementare (c.c.) ai fini dell'autosostentamento del gruppo turbina/compressore.

La composizione dei files di output è stata pianificata in modo tale da visualizzare sia i dati di input caratterizzanti le condizioni operative della simulazione sia i risultati di output caratterizzanti le prestazioni dei sottosistemi in esame.

3 ANALISI DELLE PROBLEMATICHE DI MISURA E DIAGNOSTICA

Le attività previste per il raggiungimento dell'obiettivo A.3.1.2 sono:

- (a) Analisi preliminare della strumentazione di campo per l'assetto base da 500 kW
- (b) Individuazione delle specifiche per il nuovo assetto da 1MW
- (c) Verifica della compatibilità della strumentazione relativamente a :
 - diagnostica
 - regolazione
 - catena di controllo.

Il raggiungimento dell'obiettivo A3.1.2 è previsto per il 31/12/2008, attualmente, in linea con il sotto obiettivo (a), si sono raccolte tutte le informazioni necessarie e sufficienti (dati di progetto, caratteristiche costruttive, condizioni ambientali) per la definizione dell' hardware del sistema di controllo e supervisione dell'impianto emulatore di sistema MCFC (TURBOCELL) da 500kW. Esse sono contenute nel rapporto tecnico allegato al documento STATO DI AVANZAMENTO DELLA RICERCA AL 30 SETTEMBRE 2008. I punti (b) e (c) sono in fase di elaborazione in take data, sono stati affrontati e risolti come di seguito riportato.

3.1 Documentazione di riferimento (fonte AFCo)

- GENERAL PIPING SPECIFICATION only applicable to pipelines outside the vessel
S-07685AB9000C rev. 3
- Emulatore - Elenco Linee – I-09260VX1000C - rev. 2
- Emulatore di sistema MCFC - P&ID diagram Y-09062VX1000C rev. 4
- Impianto Emulatore – Lay out D09734VX1000C
- Isometrici Tubazioni D09736VX1000C
- Isometrici Posizionamento Supporti D-09737VX1000C
- Giunti I09738VX1000C
- Elenco molle I09739VX1000C
- Impianto emulatore – Disegni supporti D-09726VX1000C

3.2 Hardware/Software

Per i punti (b) e (c), si è proceduto ad un'attenta analisi dei singoli componenti per l'impianto in assetto base, in termini di strumentazione di misura e regolazione, nonché di piping.

Per la strumentazione di misura si fa riferimento a:

1. Misuratori e Trasmettitori Pressione
 - Trasmettitori di pressione
 - Trasmettitori di pressione differenziale per misure portata
2. Elementi primari per misure di portata (vcone)
3. Misuratori di portata
 - Trasmettitori di portata
4. Manometri
5. Termocoppie
 - Termoresistenze e trasmettitori di temperatura

Per gli organi di manovra si fa riferimento a:

1. Valvole Autoregolatrici
2. Valvole ON/OFF
3. Valvole Regolazione
4. Valvole Sicurezza

Per ciascuna linea di piping è stata raccolta una serie di dati sensibili quali: tipologia di fluido, pressione e temperatura operativa, massima pressione, pressione e temperatura di design. Questi valori sono stati confrontati con i corrispettivi valori dell'impianto in assetto da un Megawatt e si riscontrata la compatibilità nei fondo scala degli strumenti presenti con quelli necessari al funzionamento nell'assetto ampliato. Si conferma che le velocità dei fluidi evolventi attraverso le pipe lines attuali, ma con le pressioni e le portate di assetto maggiore sono compatibili con gli standard di letteratura. In particolare si riportano, in forma aggregata, le specifiche utilizzate per l'impianto ampliato. Sono forniti i range minimo e massimo.

operating pressure [bar a]	max. operating pressure [bar a]	operating temperature [°C]	design pressure [bar a]	design temperature [°C]	DN
1-12	1-14	Amb. - 650	1,5 - 16	50 - 680	15 - 500

Più in dettaglio sono forniti i dati di processo dell'impianto megawatt.

INLET AIR		
Pressare	Atmospheric	bar a.
Temperature	Ambient	°C
AIR TO FCS		
Mass flow rate	1500÷6000	kg/h
Nominal pressare	4	bar a.
Temperature range	150÷500	°C
Pressare range	2.5÷6	bar a.
EXHAUST FROM FCS		
Mass flow rate	1900÷6000	kg/h
Nominal pressare	4	bar a.
Temperature range	amb÷650	°C
Pressare range	2.5÷6	bar a.
Limit molar composition under on load conditions		
O ₂	9	%
N ₂	64	%
CO ₂	5	%
H ₂ O	22	%

Dalla compatibilità della strumentazione, ne deriva una serie di vantaggi come la possibilità di utilizzare anche tutto l'impianto elettrico per l'alimentazione dei sistemi (24 VDC) e lasciare le

stesse intensità (20 mA) e lo stesso numero di segnali per gli output digitali delle catene di controllo.

Si conferma che, lato software, il sistema di controllo risulta essere di tipo modulare, facilmente espandibile e completamente configurabile tramite stazione di ingegneria. Questo ne faciliterà il suo impiego una volta ampliata la taglia dell'impianto.

4 IMPOSTAZIONE DELLE CAMPAGNE SPERIMENTALI

4.1 Documenti di riferimento

S06840AB9000C rev. 0

S06957AB9000C Sviluppo di sistemi combinati cella turbina attraverso la realizzazione e sperimentazione di un emulatore di un sistema MCFC

4.2 Campagne sperimentali

Sull'impianto verranno eseguite le prove funzionali d'integrazione Fuel Cells System/Air Process System e d'ottimizzazione delle condizioni di esercizio dei componenti, descritte nel seguito. Queste prove dovranno consentire l'individuazione dei limiti di stabilità, la comprensione delle dinamiche di funzionamento del sistema in esame al fine dell'ottimizzazione dello stesso e/o delle logiche di regolazione e controllo.

Le modalità di prova saranno definite nel dettaglio durante lo svolgimento della seconda fase di progetto esecutivo dell'impianto sperimentale FISR_ENEA, una volta prodotti gli schemi di marcia dei sistemi APS e dell'impianto emulatore e definite le logiche di controllo dei turbogas modificati. Dalle analisi di confronto fra i due assetti, di cui all'obiettivo 3.1.1, si è evidenziata un'estrema analogia dei due sistemi non solo nella configurazione (entrambe costituiti da sistema turbogas unito allo stesso sistema emulatore), ma anche in termini di temperature e pressioni di lavoro, vedi fig. 23.

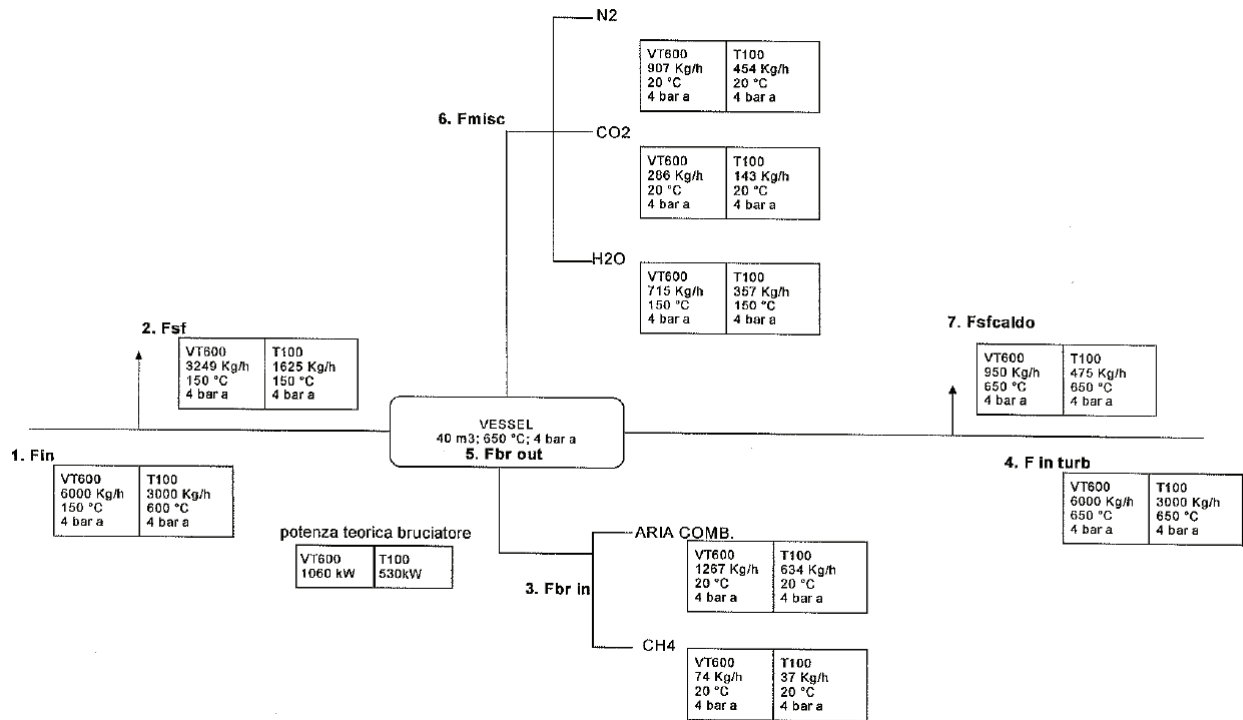


Figura 23-Confronto input/output vessel nei due impianti da 500kW e 1MW rispettivamente basati sull'utilizzo della microturbina T100 e dal gruppo turbogas VT600

E' lecito pensare, in prima analisi, alla possibilità di utilizzare la stessa matrice di prove sperimentali dell'impianto da 500kW anche per l'impianto in assetto maggiore. Le prove sono di seguito elencate.

Verifiche preliminari

Verifiche di stabilità del sistema APS

Verifica fase di pressurizzazione e connessione

Verifica di stabilità del APS al variare della portata di gas al FCS

Verifiche delle catene di regolazione del sistema aria di processo

Fase di carico

Fase di riscaldamento

Verifica di stabilità camera di combustione con differenti composizioni del comburente

Prove per ottimizzazione dell'integrazione APS/FCS

In relazione alle maggiori portate evoluenti, sono tuttora al vaglio possibili situazioni critiche che rendano incompatibili delle prove o che costringano a modificare le rampe di riscaldamento o raffreddamento in fase di dinamico della prova.

In definitiva le suddette prove si eseguiranno a step di carico differenti: 100%, 75%, 50%, 25%. Sfruttando i numerosi punti di misura delle grandezze in gioco, si consiglia il tracciamento delle reali curve caratteristiche delle macchine (compressore e turbina) in modo da ottimizzare i modelli di simulazione visti nei capitoli precedenti. In prospettiva è utile anche avere dati sperimentali sul funzionamento off design dell'impianto.

Allegato I – Tabulati file ODCUES00

Code CUES		Compact Unit Emulator Simulation							by C. ARRIGHETTI	
idfile	odfile	LHVCH4	tcH2Oe	tce	pi	tci	po	tco		
IDCUES00	ODCUES00	50000	170.00	15.00	3.5000	200.00	3.5000	650.00		
mfi	mfo	fmN2o	fmO2o	fmH2Oo	fmCO2o	mfu	mfr	hi	mdi	
.7670	.8760	.6809	.1014	.1429	.0748	.5534	.2136	446.12	2.5665	
mfCH4e	mfH2Oe	mfCO2e	mfN2e	hCH4e	hH2Oe	hCO2e	hN2e	ho	mdo	
.01031	.10199	.03718	.17311	527.60	859.80	191.84	286.28	1041.13	1.2283	

Code CUES		Compact Unit Emulator Simulation							by C. ARRIGHETTI	
idfile	odfile	LHVCH4	tcH2Oe	tce	pi	tci	po	tco		
IDCUES00	ODCUES00	50000	170.00	15.00	3.5000	200.00	3.5000	650.00		
mfi	mfo	fmN2o	fmO2o	fmH2Oo	fmCO2o	mfu	mfr	hi	mdi	
.5210	.6030	.6720	.0907	.1556	.0817	.3566	.1644	446.12	2.5665	
mfCH4e	mfH2Oe	mfCO2e	mfN2e	hCH4e	hH2Oe	hCO2e	hN2e	ho	mdo	
.00728	.07745	.02925	.13239	527.60	859.80	191.84	286.28	1056.39	1.2213	

Code CUES		Compact Unit Emulator Simulation							by C. ARRIGHETTI	
idfile	odfile	LHVCH4	tcH2Oe	tce	pi	tci	po	tco		
IDCUES00	ODCUES00	50000	170.00	15.00	3.5000	200.00	3.5000	650.00		
mfi	mfo	fmN2o	fmO2o	fmH2Oo	fmCO2o	mfu	mfr	hi	mdi	
.3070	.3600	.6625	.0752	.1738	.0885	.1919	.1151	446.12	2.5665	
mfCH4e	mfH2Oe	mfCO2e	mfN2e	hCH4e	hH2Oe	hCO2e	hN2e	ho	mdo	
.00451	.05243	.01947	.09171	527.60	859.80	191.84	286.28	1078.60	1.2103	

Code CUES		Compact Unit Emulator Simulation							by C. ARRIGHETTI	
idfile	odfile	LHVCH4	tcH2Oe	tce	pi	tci	po	tco		
IDCUES00	ODCUES00	50000	170.00	15.00	3.5000	200.00	3.5000	650.00		
mfi	mfo	fmN2o	fmO2o	fmH2Oo	fmCO2o	mfu	mfr	hi	mdi	
.1290	.1550	.6473	.0509	.2022	.0996	.0684	.0606	446.12	2.5665	
mfCH4e	mfH2Oe	mfCO2e	mfN2e	hCH4e	hH2Oe	hCO2e	hN2e	ho	mdo	
.00205	.02674	.00981	.04799	527.60	859.80	191.84	286.28	1113.27	1.1935	

Code CUES		Compact Unit Emulator Simulation							by C. ARRIGHETTI	
-----------	--	----------------------------------	--	--	--	--	--	--	------------------	--

Code CUES Compact Unit Emulator Simulation by C. ARRIGHETTI

idfile	odfile	LHVCH4	tcH2Oe	tce	pi	tci	po	tco	
IDCUES00	ODCUES00	50000	250.00	15.00	3.5000	200.00	3.5000	650.00	
mfi	mfo	fmN2o	fmO2o	fmH2Oo	fmCO2o	mfu	mfr	hi	mdi
.5210	.6030	.6720	.0907	.1556	.0817	.3525	.1685	446.12	2.5665
mfCH4e	mfH2Oe	mfCO2e	mfN2e	hCH4e	hH2Oe	hCO2e	hN2e	ho	mdo
.00704	.07799	.02991	.13552	527.60	1019.95	191.84	286.28	1056.39	1.2213

Code CUES Compact Unit Emulator Simulation by C. ARRIGHETTI

idfile	odfile	LHVCH4	tcH2Oe	tce	pi	tci	po	tco	
IDCUES00	ODCUES00	50000	250.00	15.00	3.5000	200.00	3.5000	650.00	
mfi	mfo	fmN2o	fmO2o	fmH2Oo	fmCO2o	mfu	mfr	hi	mdi
.3070	.3600	.6625	.0752	.1738	.0885	.1891	.1179	446.12	2.5665
mfCH4e	mfH2Oe	mfCO2e	mfN2e	hCH4e	hH2Oe	hCO2e	hN2e	ho	mdo
.00434	.05280	.01992	.09383	527.60	1019.95	191.84	286.28	1078.60	1.2103

Code CUES Compact Unit Emulator Simulation by C. ARRIGHETTI

idfile	odfile	LHVCH4	tcH2Oe	tce	pi	tci	po	tco	
IDCUES00	ODCUES00	50000	250.00	15.00	3.5000	200.00	3.5000	650.00	
mfi	mfo	fmN2o	fmO2o	fmH2Oo	fmCO2o	mfu	mfr	hi	mdi
.1290	.1550	.6473	.0509	.2022	.0996	.0670	.0620	446.12	2.5665
mfCH4e	mfH2Oe	mfCO2e	mfN2e	hCH4e	hH2Oe	hCO2e	hN2e	ho	mdo
.00196	.02692	.01004	.04908	527.60	1019.95	191.84	286.28	1113.27	1.1935

Allegato II - Tabulati file ODGPFM01

GPOSFM01 - Gas Plant Operating Simulation (Free Model) Ed.01 - by C.ARRIGHETTI

Ed	idfile	odfile	LHVCH4	tcCH4	hCH4	pi	tci	po	tco	
01	IDGPFM00	ODGPFM01	50000	15.00	527.60	3.5000	200.00	3.5000	650.00	
mfi	mfo	fmN2o	fmO2o	fmH2Oo	fmCO2o	p2	tc2	tc2E	effc	
.7670	.8760	.6809	.1014	.1429	.0748	4.0902	200.00	200.00	.7810	
mfc	mft	mfl	mfa	p3	tc3	p4	tc4	tc4E	efft	
.7670	.7201	.1559	.0000	3.5000	650.00	1.0000	441.78	441.78	.8468	
effcc	effre	effmc	effmt	rpm	Wc	Wt	Pc	Pt	Pn	
.9800	.9000	.9500	.9500	68119	185.30	260.11	142.12	187.30	28.33	
Jre	Jcc	mfCH4	mftC	Ri=Rc	Ro	Rt	mdi	mdc	mdo	mdt
0	0	.00000	.7332	288.22	308.68	308.68	2.5665	2.9993	1.2283	1.2283

GPOSFM01 - Gas Plant Operating Simulation (Free Model) Ed.01 - by C.ARRIGHETTI

Ed	idfile	odfile	LHVCH4	tcCH4	hCH4	pi	tci	po	tco	
01	IDGPFM00	ODGPFM01	50000	15.00	527.60	3.5000	200.00	3.5000	650.00	
	mfi	mfo	fmN2o	fmO2o	fmH2Oo	fmCO2o	p2	tc2	tc2E	effc
	.5210	.6030	.6720	.0907	.1556	.0817	4.1658	200.00	200.00	.7935
	mfc	mft	mfl	mfa	p3	tc3	p4	tc4	tc4E	efft
	.6633	.7453	.0000	.1423	3.5000	576.05	1.0000	383.31	383.31	.8391
	effcc	effre	effmc	effmt	rpm	Wc	Wt	Pc	Pt	Pn
	.9800	.9000	.9500	.9500	67162	185.28	234.54	122.89	174.80	36.70
Jre	Jcc	mfCH4	mftC	Ri=Rc	Ro	Rt	mdi	mdc	mdo	mdt
0	0	.00000	.7673	288.22	310.43	306.19	2.5665	3.0547	1.2213	1.3461

GPOSFM01 - Gas Plant Operating Simulation (Free Model) Ed.01 - by C.ARRIGHETTI

Ed	idfile	odfile	LHVCH4	tcCH4	hCH4	pi	tci	po	tco	
01	IDGPFM00	ODGPFM01	50000	15.00	527.60	3.5000	200.00	3.5000	650.00	
	mfi	mfo	fmN2o	fmO2o	fmH2Oo	fmCO2o	p2	tc2	tc2E	effc
	.5210	.6030	.6720	.0907	.1556	.0817	4.1605	200.00	387.61	.7927
	mfc	mft	mfl	mfa	p3	tc3	p4	tc4	tc4E	efft
	.6548	.7368	.0000	.1338	3.5000	608.55	1.0000	408.08	378.30	.8445
	effcc	effre	effmc	effmt	rpm	Wc	Wt	Pc	Pt	Pn
	.9800	.9000	.9500	.9500	67052	185.27	245.43	121.32	180.84	44.10
Jre	Jcc	mfCH4	mftC	Ri=Rc	Ro	Rt	mdi	mdc	mdo	mdt
1	0	.00000	.7529	288.22	310.43	306.39	2.5665	3.0508	1.2213	1.2956

GPOSFM01 - Gas Plant Operating Simulation (Free Model) Ed.01 - by C.ARRIGHETTI

Ed	idfile	odfile	LHVCH4	tcCH4	hCH4	pi	tci	po	tco	
01	IDGPFM00	ODGPFM01	50000	15.00	527.60	3.5000	200.00	3.5000	650.00	
	mfi	mfo	fmN2o	fmO2o	fmH2Oo	fmCO2o	p2	tc2	tc2E	effc
	.3070	.3600	.6625	.0752	.1738	.0885	4.1714	200.00	200.00	.7942
	mfc	mft	mfl	mfa	p3	tc3	p4	tc4	tc4E	efft
	.7170	.7706	.0000	.4100	3.5000	467.95	1.0000	302.23	302.23	.8032
	effcc	effre	effmc	effmt	rpm	Wc	Wt	Pc	Pt	Pn
	.9800	.9000	.9500	.9500	67796	185.30	191.03	132.86	147.21	.00
Jre	Jcc	mfCH4	mftC	Ri=Rc	Ro	Rt	mdi	mdc	mdo	mdt
0	1	.00068	.8348	288.22	313.27	300.13	2.5665	3.0588	1.2103	1.5736

GPOSFM01 - Gas Plant Operating Simulation (Free Model) Ed.01 - by C.ARRIGHETTI

Ed	idfile	odfile	LHVCH4	tcCH4	hCH4	pi	tci	po	tco
01	IDGPFM00	ODGPFM01	50000	15.00	527.60	3.5000	200.00	3.5000	650.00

mfi	mfo	fmN2o	fmO2o	fmH2Oo	fmCO2o	p2	tc2	tc2E	effc	
.3070	.3600	.6625	.0752	.1738	.0885	4.1720	200.00	300.17	.7944	
mfc	mft	mfl	mfa	p3	tc3	p4	tc4	tc4E	efft	
.7154	.7684	.0000	.4084	3.5000	480.54	1.0000	311.17	262.19	.8077	
effcc	effre	effmc	effmt	rpm	Wc	Wt	Pc	Pt	Pn	
.9800	.9000	.9500	.9500	67780	185.30	195.27	132.57	150.05	3.00	
Jre	Jcc	mfCH4	mftC	Ri=Rc	Ro	Rt	mdi	mdc	mdo	mdt
1	1	.00000	.8270	288.22	313.27	299.96	2.5665	3.0593	1.2103	1.5482

GPOSFM01 - Gas Plant Operating Simulation (Free Model) Ed.01 - by C.ARRIGHETTI

Ed	idfile	odfile	LHVCH4	tcCH4	hCH4	pi	tci	po	tco	
01	IDGPFM00	ODGPFM01	50000	15.00	527.60	3.5000	200.00	3.5000	650.00	
mfi	mfo	fmN2o	fmO2o	fmH2Oo	fmCO2o	p2	tc2	tc2E	effc	
.1290	.1550	.6473	.0509	.2022	.0996	4.1556	200.00	200.00	.7918	
mfc	mft	mfl	mfa	p3	tc3	p4	tc4	tc4E	efft	
.7360	.7655	.0000	.6070	3.5000	500.79	1.0000	325.30	325.30	.8090	
effcc	effre	effmc	effmt	rpm	Wc	Wt	Pc	Pt	Pn	
.9800	.9000	.9500	.9500	67971	185.28	197.41	136.38	151.12	.01	
Jre	Jcc	mfCH4	mftC	Ri=Rc	Ro	Rt	mdi	mdc	mdo	mdt
0	1	.00348	.8224	288.22	317.66	295.23	2.5665	3.0472	1.1935	1.5318

GPOSFM01 - Gas Plant Operating Simulation (Free Model) Ed.01 - by C.ARRIGHETTI

Ed	idfile	odfile	LHVCH4	tcCH4	hCH4	pi	tci	po	tco	
01	IDGPFM00	ODGPFM01	50000	15.00	527.60	3.5000	200.00	3.5000	650.00	
mfi	mfo	fmN2o	fmO2o	fmH2Oo	fmCO2o	p2	tc2	tc2E	effc	
.1290	.1550	.6473	.0509	.2022	.0996	4.1546	200.00	314.39	.7916	
mfc	mft	mfl	mfa	p3	tc3	p4	tc4	tc4E	efft	
.7372	.7652	.0000	.6082	3.5000	503.49	1.0000	326.94	240.45	.8094	
effcc	effre	effmc	effmt	rpm	Wc	Wt	Pc	Pt	Pn	
.9800	.9000	.9500	.9500	67982	185.31	197.82	136.60	151.36	.00	
Jre	Jcc	mfCH4	mftC	Ri=Rc	Ro	Rt	mdi	mdc	mdo	mdt
1	1	.00199	.8215	288.22	317.66	294.79	2.5665	3.0465	1.1935	1.5288

Allegato III – Tabulati file ODGPFM02

 GPOSFM02 - Gas Plant Operating Simulation (Free Model) Ed.02 - by C.ARRIGHETTI

Ed	idfile	odfile	LHVCH4	tcCH4	hCH4	pi	tci	po	tco	
02	IDGPFM00	ODGPFM02	50000	15.00	527.60	3.5000	200.00	3.5000	650.00	
	mfi	mfo	fmN2o	fmO2o	fmH2Oo	fmCO2o	p2	tc2	tc2E	effc
	.7670	.8760	.6809	.1014	.1429	.0748	3.5000	190.26	415.68	.7168
	mfc	mft	mfl	mfcre	p3	tc3	p4	tc4	tc4E	efft
	.7670	.7285	.1475	.0324	3.5000	650.00	1.0000	440.20	430.17	.8531
	effcc	effre	effmc	effmt	rpm	Wc	Wt	Pc	Pt	Pn
	.9800	.9000	.9500	.9500	65445	175.30	262.05	134.46	190.91	39.83
Jre	Jcc	mfCH4	mftC	Ri=Rc	Ro	Rt	mdi	mdc	mdo	mdt
1	0	.00000	.7342	288.22	308.68	308.68	2.5665	2.6204	1.2283	1.2283

 GPOSFM02 - Gas Plant Operating Simulation (Free Model) Ed.02 - by C.ARRIGHETTI

Ed	idfile	odfile	LHVCH4	tcCH4	hCH4	pi	tci	po	tco	
02	IDGPFM00	ODGPFM02	50000	15.00	527.60	3.5000	200.00	3.5000	650.00	
	mfi	mfo	fmN2o	fmO2o	fmH2Oo	fmCO2o	p2	tc2	tc2E	effc
	.5210	.6030	.6720	.0907	.1556	.0817	3.5000	176.76	379.94	.7782
	mfc	mft	mfa	mfcre	p3	tc3	p4	tc4	tc4E	efft
	.6683	.7503	.1473	.0750	3.5000	603.78	1.0000	402.05	349.36	.8530
	effcc	effre	effmc	effmt	rpm	Wc	Wt	Pc	Pt	Pn
	.9800	.9000	.9500	.9500	63623	161.47	246.23	107.92	184.76	61.92
Jre	Jcc	mfCH4	mftC	Ri=Rc	Ro	Rt	mdi	mdc	mdo	mdt
1	0	.00000	.7564	288.22	310.43	306.07	2.5665	2.6991	1.2213	1.3040

 GPOSFM02 - Gas Plant Operating Simulation (Free Model) Ed.02 - by C.ARRIGHETTI

Ed	idfile	odfile	LHVCH4	tcCH4	hCH4	pi	tci	po	tco	
02	IDGPFM00	ODGPFM02	50000	15.00	527.60	3.5000	200.00	3.5000	650.00	
	mfi	mfo	fmN2o	fmO2o	fmH2Oo	fmCO2o	p2	tc2	tc2E	effc
	.3070	.3600	.6625	.0752	.1738	.0885	3.5000	183.75	287.52	.7452
	mfc	mft	mfa	mfcre	p3	tc3	p4	tc4	tc4E	efft
	.7373	.7903	.4303	.1143	3.5000	469.74	1.0000	298.91	232.92	.8243
	effcc	effre	effmc	effmt	rpm	Wc	Wt	Pc	Pt	Pn
	.9800	.9000	.9500	.9500	64865	168.63	196.15	124.33	155.02	16.40
Jre	Jcc	mfCH4	mftC	Ri=Rc	Ro	Rt	mdi	mdc	mdo	mdt
1	0	.00000	.8305	288.22	313.27	299.63	2.5665	2.6578	1.2103	1.5724

 GPOSFM02 - Gas Plant Operating Simulation (Free Model) Ed.02 - by C.ARRIGHETTI

Ed	idfile	odfile	LHVCH4	tcCH4	hCH4	pi	tci	po	tco	
02	IDGPFM00	ODGPFM02	50000	15.00	527.60	3.5000	200.00	3.5000	650.00	
	mfi	mfo	fmN2o	fmO2o	fmH2Oo	fmCO2o	p2	tc2	tc2E	effc
	.1290	.1550	.6473	.0509	.2022	.0996	3.5000	189.73	280.23	.7189
	mfc	mft	mfa	mfcrc	p3	tc3	p4	tc4	tc4E	efft
	.7649	.7927	.6359	.0860	3.5000	458.46	1.0000	290.18	211.44	.8135
	effcc	effre	effmc	effmt	rpm	Wc	Wt	Pc	Pt	Pn
	.9800	.9000	.9500	.9500	65401	174.76	186.87	133.68	148.13	.01
Jre	Jcc	mfCH4	mftC	Ri=Rc	Ro	Rt	mdi	mdc	mdo	mdt
1	1	.00173	.8460	288.22	317.66	294.48	2.5665	2.6235	1.1935	1.6245