



Ricerca di Sistema elettrico

Messa in marcia ed esercizio della sezione di potenza dell'impianto ZECOMIX

G. Messina, A. Assettati, S. Cassani,
A. Grasso, G. Guidarelli, M. Nobili, L. Pagliari

MESSA IN MARCIA ED ESERCIZIO DELLA SEZIONE DI POTENZA DELL'IMPIANTO ZECOMIX

G. Messina, A. Assettati, S. Cassani, A. Grasso, G. Guidarelli, M. Nobili, L. Pagliari (ENEA)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: B. Generazione di energia elettrica a basse emissioni di carbonio

Progetto: B.2 Cattura e sequestro della CO₂ prodotta dall'utilizzo di combustibili fossili

Obiettivo: a. Tecnologie per la cattura della CO₂ in pre combustione

Responsabile del Progetto: Dott.ssa Franca Rita Picchia, ENEA

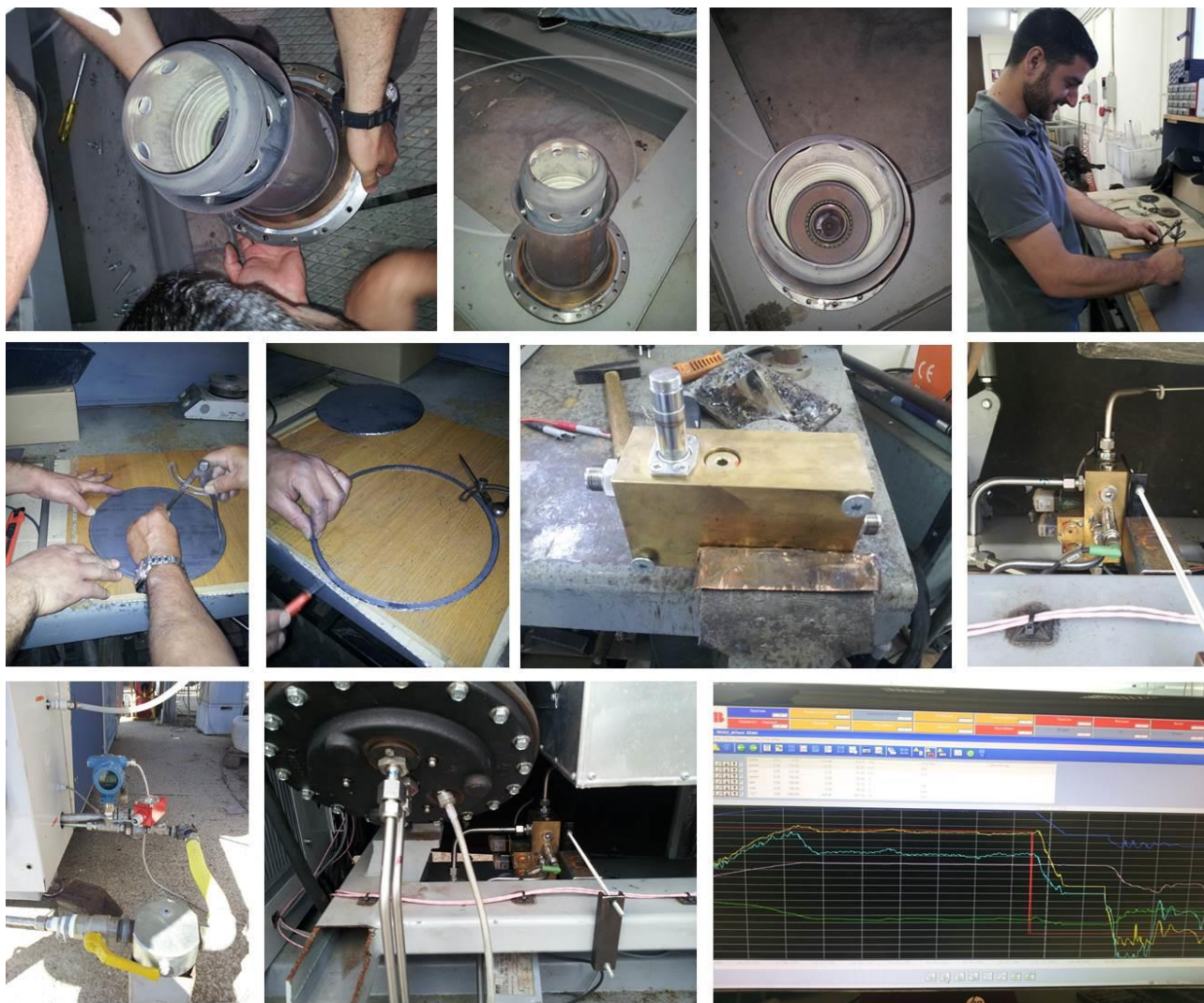
Gli Autori esprimono sincera gratitudine a Enrico Bianchi e Federico Dotta di Turbec S.p.a. per il supporto ricevuto durante la fase di start-up della Turbec T100.

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 LAVORAZIONI MECCANICHE FINALIZZATE ALLO <i>START-UP</i> DELLA μ GT.....	7
3 INTERVENTI SUL SISTEMA DI CONTROLLO DELLA μ GT E REALIZZAZIONE DELL'INTERFACCIA SUL DCS	10
3.1 ATTIVITÀ SUL SISTEMA DI CONTROLLO DELLA μ GT	10
3.2 REALIZZAZIONE DELL'INTERFACCIA OPERATORE SUL DCS DELL'IMPIANTO ZECOMIX	11
3.2.1 <i>Collegamento MODBUS</i>	11
3.2.2 <i>Datalogger</i>	13
3.2.3 <i>Allarmi</i>	16
3.2.4 <i>Sinottico dell'interfaccia operatore</i>	17
3.3 <i>IMPLEMENTAZIONE DELLA STRATEGIA DI CONTROLLO PER L'ESERCIZIO DUAL-FUEL DELLA μGT</i>	20
4 <i>START-UP, TEST SPERIMENTALI E DEFINIZIONE DELLA STRATEGIA DI CONTROLLO PER L'ALIMENTAZIONE DUAL-FUEL</i>	22
4.1 DEFINIZIONE DELLA STRATEGIA DI CONTROLLO PER L'ALIMENTAZIONE DUAL-FUEL DELLA μ GT.....	23
5 CONCLUSIONI.....	30

Sommario

La sezione di potenza dell'impianto ZECOMIX è costituita da una micro turbina a gas (μ GT) Turbec T100 da 100 KW elettrici. Essendo dotata di completa autonomia funzionale, la μ GT può essere contestualmente finalizzata ad attività di ricerca connesse con le tematiche della *fuel-flexibility*. La macchina, acquisita mediante partecipazione ad un'asta fallimentare, non era dotata del combustore originale, sostituito con un prototipo per la combustione *dual-fuel*, peraltro fornito non assemblato alla macchina. In virtù dell'esperienza acquisita sull'installazione e l'avviamento della μ GT dell'impianto AGATUR, si è deciso di affidare alla casa madre la sola manutenzione straordinaria e di eseguire "in house" tutte le attività relative alla movimentazione e al posizionamento della macchina, alla manutenzione ordinaria, alla realizzazione del sistema di alimentazione del combustibile, all'assemblaggio del combustore, alla realizzazione del camino di scarico, al ripristino della "Start condition" del software di controllo, alla connessione MODBUS tra la μ GT e il DCS (Distributed Control System) dell'impianto, alla realizzazione dell'interfaccia grafica di controllo integrata con il DCS e, in conclusione, alla messa in marcia della μ GT. A ciò è seguita l'attività sperimentale che ha consentito di implementare e validare la strategia di controllo per l'esercizio *dual-fuel* della μ GT. La pratica usuale implica l'affidamento delle attività sopra menzionate alla casa madre e/o a ditte esterne specializzate, con rilevanti costi correlati. L'esecuzione a cura del personale ENEA ha pertanto comportato, oltre ad un notevole risparmio economico, una sfida avvincente e rischiosa, raccolta con entusiasmo e vinta con grande soddisfazione.



1 Introduzione

Il crescente impatto sul sistema elettrico delle rinnovabili non programmabili ha posto alla ribalta il tema dello *storage*, quale strumento per incrementare l'efficacia della produzione elettrica da rinnovabili non programmabili, che agisce stoccando il surplus di energia non utilizzabile per renderlo disponibile durante i periodi di mancata produzione o durante i picchi di domanda. Tra le diverse strategie di *storage*, il *Power-to-Gas* (P2G) può giocare un ruolo non trascurabile, soprattutto in termini di *storage stagionale*, grazie alla peculiarità di stoccare in forma chimica il surplus energetico da fonte rinnovabile e renderlo disponibile sotto forma di combustibile "verde" *dove e quando serve*. La catena di conversione energetica eseguibile con il P2G è regolata dalla sequenza *energia elettrica – elettrolisi – idrogeno*, sequenza che può continuare con la *metanazione* e lo stoccaggio e/o la distribuzione del gas naturale sintetico, o con la diretta immissione dell'idrogeno nella rete del gas naturale. Quest'ultima opzione sembra essere tra le più promettenti per il perseguimento di strategie di *storage stagionale*, a causa delle possibili sinergie tra la rete elettrica e la rete del gas naturale che, in questo schema, possono *scambiare energia in forma bi-direzionale*: dalla rete elettrica alla rete gas passando per l'elettrolisi, dalla rete gas alla rete elettrica, sfruttando *l'esercizio flessibile delle turbine a gas*. L'integrazione delle due reti può efficacemente contribuire a rendere il sistema elettrico più flessibile e resiliente, al contempo incrementando lo sfruttamento dell'energia rinnovabile che, pur intermittente e non programmabile, può, grazie allo *storage*, meglio accoppiarsi con la domanda. La contropartita è costituita dall'inevitabile variabilità nel tempo e nello spazio del combustibile distribuito dalla rete gas, tema che, già attuale, sarà sempre di maggiore importanza negli anni a venire. Al P2G si aggiungono altre fonti di potenziale variabilità del combustibile per turbine a gas, quali la crescente distribuzione di gas naturale liquefatto (LNG) o di combustibili gassosi a basso potere calorifico come il biogas. Se sembra oramai essere universalmente riconosciuto il ruolo delle turbine a gas nella crescente richiesta di *flessibilità operativa*, sembra altrettanto evidente che tale flessibilità si coniuga nei termini *flessibilità di carico e flessibilità di combustibile*. Termini, quelli appena citati, inevitabilmente interconnessi sia con la riduzione delle emissioni tout court e, più specificamente, con la riduzione del minimo tecnico ambientale delle turbine a gas, sia, più intrinsecamente, con l'affidabilità delle macchine stesse. Conseguentemente si ritiene di grande attualità l'esigenza di "*knowledge*" sull'utilizzo di *miscele combustibili per turbogas alternative al gas naturale* e contenenti, oltre al metano, percentuali significative di idrogeno e inerti.

La micro-turbina (μ GT) Turbec T100 oggetto delle attività descritte nel presente documento, è stata acquisita quale sezione di potenza dell'impianto ZECOMIX, tuttavia, essendo dotata di completa autonomia funzionale, può essere contestualmente finalizzata ad attività di ricerca connesse con le tematiche della *fuel-flexibility*.

La μ GT è stata acquisita dall'ENEA mediante partecipazione ad un'asta fallimentare che, pur comportando una notevole riduzione dei costi di acquisto dell'attrezzatura, ha implicato l'esecuzione di tutte le attività necessarie all'installazione e all'avviamento. Al momento dell'acquisizione la T100 non era dotata del combustore originale di fabbricazione Turbec, che era stato sostituito con il prototipo ARI100 di costruzione ANSALDO, finalizzato all'esercizio della T100 in modalità *dual-fuel*. Il prototipo si presentava tuttavia non assemblato al corpo macchina e in condizioni tali da non consentire la messa in marcia della stessa. Si è così deciso di affidare la manutenzione straordinaria della T100 alla casa madre, che ha eseguito tutti i controlli di routine avvalendosi di un combustore originale di proprietà, assemblato alla macchina al solo scopo di effettuare il collaudo di fine manutenzione. Eseguito il collaudo, la μ GT è stata quindi consegnata all'ENEA priva di combustore. Il prototipo ARI100 è stato affidato alla ditta che ne ha eseguito la costruzione, con l'obiettivo di effettuare i controlli non distruttivi necessari alla verifica dimensionale e funzionale dell'oggetto, rimandando all'atteso buon esito dei test l'eventuale commessa per le lavorazioni necessarie al ripristino operativo del prototipo. Unitamente alla manutenzione del prototipo ARI100, rimanevano da eseguire tutte le attività necessarie alla messa in marcia della μ GT, che includevano la realizzazione del sistema di alimentazione del combustibile e del camino di scarico, la realizzazione dell'interfaccia di connessione al sistema di controllo dell'impianto, la configurazione del software della T100, il primo avviamento. Considerata l'indisponibilità del combustore ARI100 e la natura prototipale dello stesso, è parso inoltre opportuno eseguire il primo avviamento e la successiva campagna sperimentale, esercendo la

macchina nelle condizioni più prossime all'assetto originale, con l'obiettivo di escludere impropri addebiti di eventuali mal funzionamenti all'accoppiamento non standard tra la μ GT e il prototipo ARI100. L'esecuzione della procedura sopra descritta poneva di fronte a due possibili scelte:

- a) commissionare al costruttore della T100 l'intera attività, inclusa la fornitura dei materiali e della manodopera specializzata operante sul sito;
- b) eseguire l'intera attività avvalendosi delle professionalità interne al Laboratorio e dell'esperienza acquisita sugli impianti AGATUR e ZECOMIX.

La prima alternativa si presentava più costosa, meno rischiosa e, probabilmente, non definitiva, visto il carattere sperimentale delle attività che coinvolgono la T100. La seconda scelta presentava in ogni caso dei costi unitamente a rischi molto maggiori. Tuttavia, *se portato a termine con successo*, lo svolgimento delle attività "in house" avrebbe consentito di acquisire un bagaglio di esperienze e competenze direttamente spendibile nel corso della successiva attività sperimentale che, viceversa, non sarebbe stato accessibile nel caso di affidamento dell'attività a terzi.

Consci dei rischi connessi, si è deciso di svolgere le attività avvalendosi delle professionalità interne al Laboratorio, scelta che, allo stato dei fatti, possiamo senz'altro considerare vincente perché la T100 è stata avviata con successo ed esercita per molte ore con un'affidabilità pari al 100%, mentre tutte le competenze acquisite con l'esecuzione delle attività preliminari, sono ad oggi disponibili e spendibili per le successive attività sperimentali. Nel loro complesso le attività di questa annualità possono essere suddivise in tre fasi:

- 1° fase: lavorazioni meccaniche finalizzate allo *start-up* della μ GT;
- 2° fase: interventi sul sistema di controllo della μ GT e realizzazione dell'interfaccia sul DCS;
- 3° fase: *start-up*, test sperimentali e definizione della strategia di controllo per l'alimentazione *dual-fuel*.

Nelle pagine seguenti si descrivono in dettaglio le tre fasi di cui sopra, con particolare enfasi sulla strategia di controllo definita e sulle evidenze sperimentali che ne dimostrano la fattibilità e l'efficacia.

2 Lavorazioni meccaniche finalizzate allo *start-up* della μ GT

Quando le attività descritte nel presente documento hanno avuto inizio, la μ GT Turbec T100 dell'impianto ZECOMIX era stata posizionata sul sito predisposto e connessa alla rete elettrica mediante quadro di interfaccia. La μ GT era priva del combustore prototipo ARI100, spedito presso la ditta costruttrice per l'esecuzione di controlli preliminari alla successiva manutenzione. Mancava inoltre del tutto il sistema di alimentazione del combustibile, composto essenzialmente dal *piping* di connessione delle valvole di controllo, dalle valvole di controllo stesse, dalle valvole di intercettazione manuali e remotizzate e dal filtro combustibile. Era inoltre necessario provvedere al rabbocco del lubrificante che si presentava sotto il livello di sicurezza e alla installazione del condotto di evacuazione dei gas di scarico della macchina. Si è ritenuto inoltre opportuno eseguire il primo *start-up* della μ GT nell'assetto originale, che implica l'installazione del combustore di manifattura Turbec, ciò per intercettare eventuali anomalie e mal funzionamenti della macchina prima dell'installazione del prototipo ARI100 e, di conseguenza, evitare impropri addebiti all'accoppiamento non standard tra la μ GT e il combustore prototipo. Il laboratorio IPSE è dotato dell'impianto AGATUR, basato anch'esso sull'esercizio di una T100 alimentata a gas naturale. Considerata la momentanea fermata dell'impianto a causa di lavorazioni per la riconfigurazione dell'assetto impiantistico, si è deciso di smontare il sistema di combustione della μ GT di AGATUR, assemblarlo sulla T100 di ZECOMIX ed eseguire lo *start-up* della μ GT alimentata a gas naturale. Le due macchine, pur essendo entrambe di produzione Turbec, presentano una differente disposizione della flangia di accoppiamento del combustore che, a causa del particolare assetto operativo di AGATUR, è stata sensibilmente ruotata rispetto all'asse longitudinale della macchina. Tale premessa ha aggiunto ulteriori complicazioni al già non banale trasferimento del sistema di combustione da una macchina all'altra, comportando il completo rifacimento

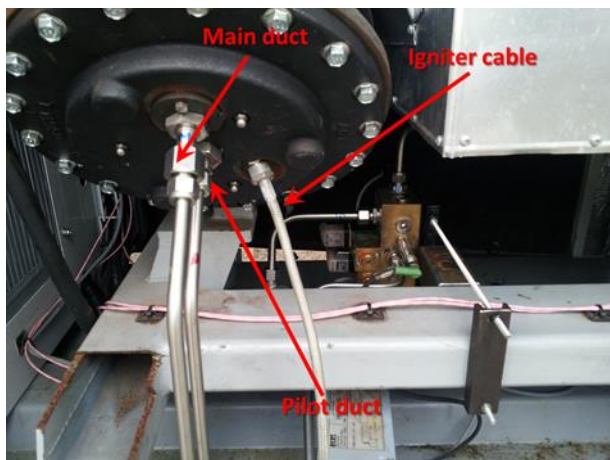


Figura 1. Dettaglio dei tratti terminali di alimentazione *main* e *pilot* e del cavo di alimentazione dell'accenditore.



Figura 2. Il combustore Turbec durante la fase di estrazione dalla μ GT di AGATUR

dei condotti di adduzione del combustibile. Per procedere all'estrazione del combustore dalla μ GT di AGATUR, è stato necessario disaccoppiare la connessione elettrica che alimenta l'accenditore e successivamente rimuovere i tratti terminali dei condotti di alimentazione del combustibile ai bruciatori *pilot* e *main* (Figura 1). Tali tratti collegano l'uscita dal blocco valvole di regolazione con l'ingresso ai rispettivi bruciatori e sono realizzati mediante tubazioni Swagelok® opportunamente sagomate. Una volta effettuata la disconnessione delle alimentazioni elettrica e del combustibile, è stato possibile procedere alla rimozione della flangia, quindi alla rimozione dell'accenditore dal corpo del combustore e, infine, all'estrazione del combustore stesso (Figura 2). In questa fase è particolarmente importante la corretta estrazione dell'accenditore che, essendo particolarmente sensibile agli urti per la natura dei materiali di cui è composto, deve essere smontato dal combustore e trasportato separatamente. In seguito alla rimozione del combustore, la flangia di accoppiamento sul corpo macchina è stata coperta per evitare l'ingresso di detriti e polvere all'interno della μ GT.

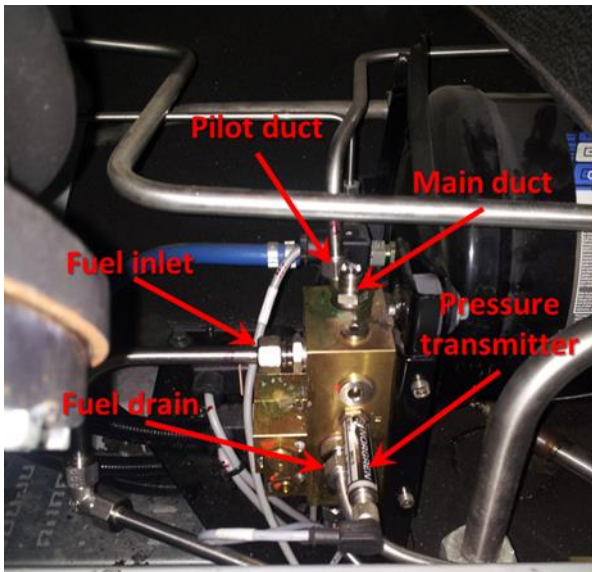


Figura 3. Dettaglio delle connessioni al blocco valvole di alimentazione.



Figura 4. Realizzazione della guarnizione in grafite armata alloggiata sulla flangia del combustore.

Successivamente alla rimozione del combustore si è proceduto allo smontaggio del sistema di alimentazione, che comprende il blocco valvole di regolazione ed evacuazione (Figura 3), le valvole di sezionamento manuale e remotizzata, il filtro e i condotti di alimentazione.

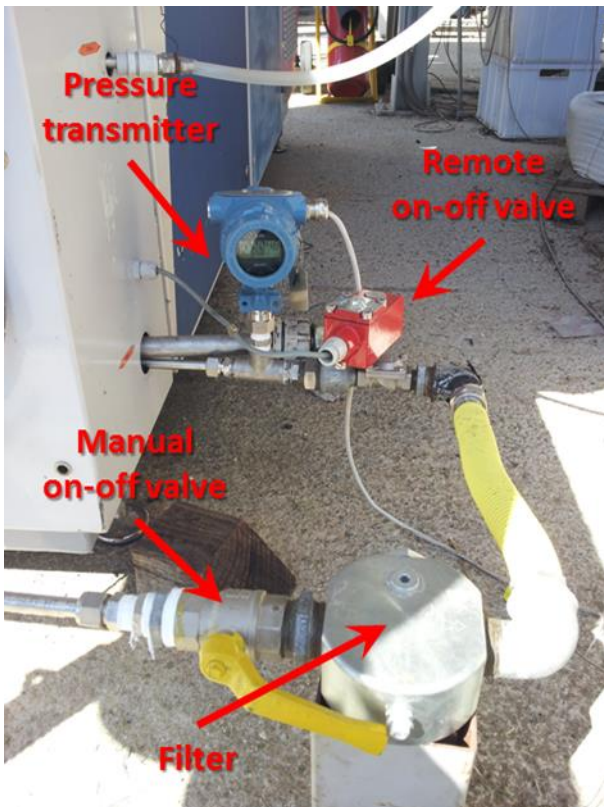


Figura 5. Dettaglio degli elementi che compongono la linea di adduzione del combustibile al blocco valvole di regolazione.

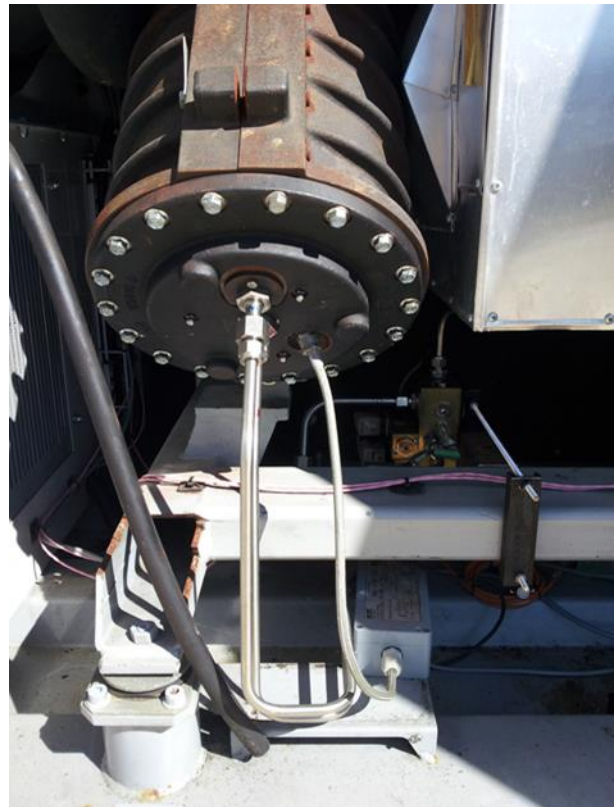


Figura 6. Il combustore Turbec dopo l'assemblaggio sulla μ GT di ZECOMIX.

Una volta rimosso il sistema di combustione dalla μ GT di AGATUR, tutti i componenti sono stati trasferiti sull'impianto ZECOMIX, dove è stata effettuata la pianificazione delle modifiche necessarie per eseguire

l'assemblaggio dei componenti sulla nuova macchina. Nello specifico è stato necessario sostituire la guarnizione alloggiata sulla flangia del combustore, che è stata sagomata a mano da un foglio di grafite armata (Figura 4). E' stato inoltre necessario realizzare ex novo tutti i condotti del sistema di alimentazione del combustibile, ad esclusione dell'assemblato composto dalla valvola di intercettazione manuale, dal filtro e dalla valvola di intercettazione remotizzata, che è stato rimosso pre-assemblato dalla μ GT di AGATUR . A valle di tale assemblato è stato aggiunto un trasmettitore di pressione per la rilevazione della pressione di alimentazione del combustibile (Figura 5).



Figura 7. Posizionamento e collegamento del blocco valvole di regolazione.



Figura 8. Dettaglio del condotto di scarico della μ GT.

La procedura di assemblaggio è iniziata con il posizionamento della guarnizione sulla flangia di connessione del combustore sul corpo macchina, successivamente è stato posizionato il combustore e inserito l'accenditore, quindi è stata serrata la flangia cieca che accoglie le connessioni di alimentazione dei bruciatori e dell'accenditore (Figura 6). In seguito all'assemblaggio del combustore sul corpo macchina, è stato posizionato il blocco valvole di regolazione, quindi si è proceduto al collegamento della linea di adduzione combustibile precedentemente installata, alla connessione delle alimentazioni dei bruciatori *pilot* e *main* e, infine, alla connessione elettrica del sensore di pressione e delle elettrovalvole (Figura 7). L'installazione del condotto di scarico della μ GT ha concluso le lavorazioni meccaniche previste per lo *start-up* della macchina: il condotto è stato realizzando adattando la sezione terminale silenziata fornita da Turbec, che è stata collegata direttamente alla flangia di uscita gas di scarico della μ GT (Figura 8).



Figura 9. Alcune fasi delle operazioni di manutenzione del blocco valvole di regolazione.

Con l'installazione del condotto di scarico, le lavorazioni meccaniche *previste* per l'avviamento della μ GT si sono concluse. Tuttavia, dopo i primi tentativi di avvio della μ GT è stato necessario intervenire nuovamente sul blocco valvole di alimentazione del combustibile a causa di un'anomalia di funzionamento che non consentiva la corretta accensione della macchina. Sospettando il trascinarsi di finissimi residui di lavorazione probabilmente dovuti al recente taglio e alla connessione delle tubature di adduzione del combustibile, il blocco valvole è stato nuovamente rimosso dal corpo macchina e sottoposto a completo

smontaggio per la verifica dell'integrità e la pulizia degli elementi di cui è composto (Figura 9). Il blocco valvole è stato quindi assemblato nuovamente e installato sulla μ GT. Il successivo tentativo di *start-up* della macchina è andato a buon fine, confermando il sospetto sporcamento dell'organo di regolazione.

3 Interventi sul sistema di controllo della μ GT e realizzazione dell'interfaccia sul DCS

Contestualmente all'esecuzione delle lavorazioni meccaniche, è stata intrapresa una corposa attività volta sia al settaggio del software di controllo della μ GT, che doveva essere adattato al nuovo assetto operativo della macchina, sia alla prosecuzione della realizzazione dell'interfaccia di acquisizione e controllo della μ GT realizzata sul DCS (Distributed Control System) dell'impianto ZECOMIX. Di fatto si tratta di due attività molto differenti, per quanto entrambe attinenti all'ambito "software" della μ GT.

3.1 Attività sul sistema di controllo della μ GT

Il settaggio del software di controllo è stato di fondamentale importanza per l'avviamento della μ GT, l'attività è infatti finalizzata alla verifica della "Start condition" che il software di controllo della μ GT impone prima dell'avviamento. Senza tale verifica il software non abilita lo start della macchina (Figura 10).

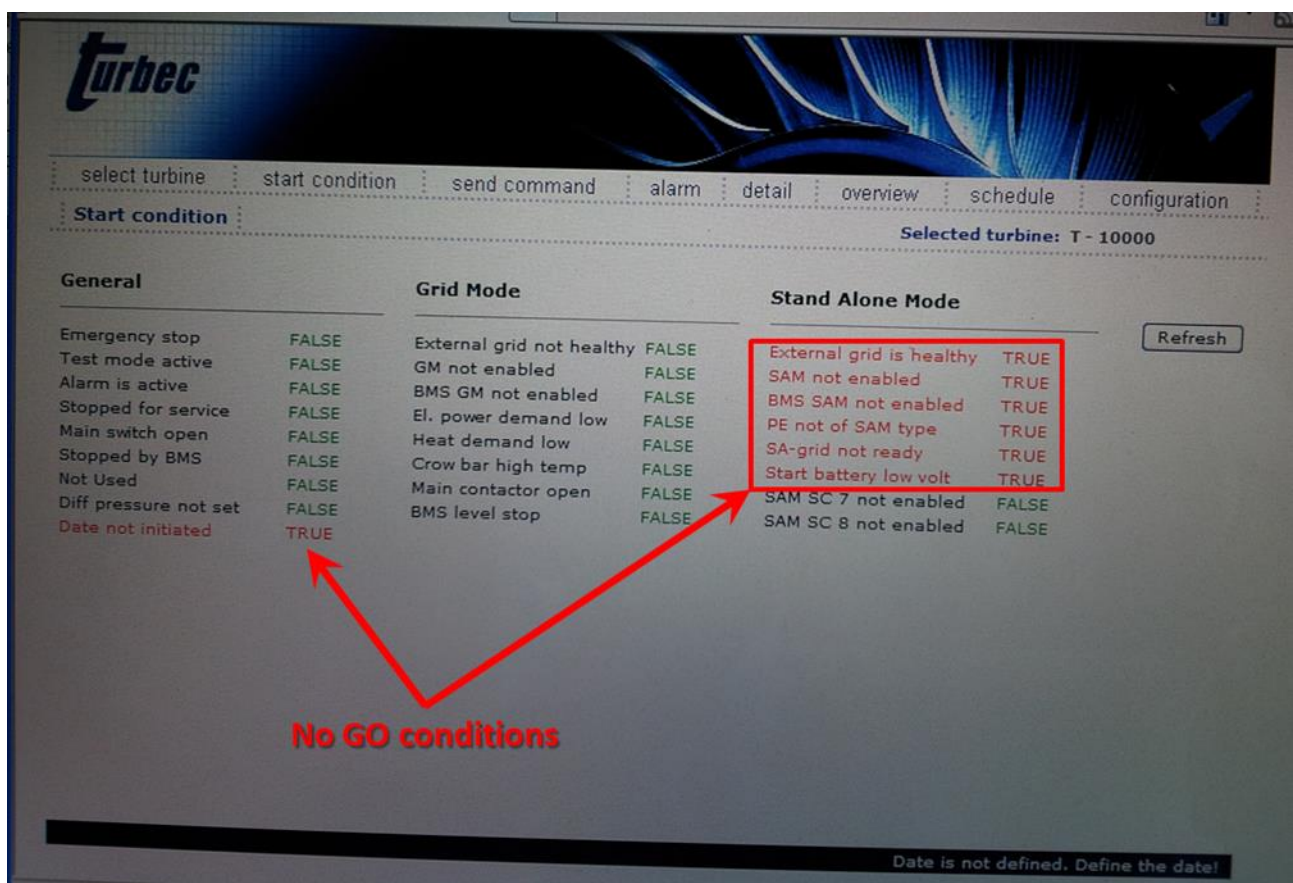


Figura 10. Schermata riassuntiva della "Start condition" tratta dall'interfaccia web della T100.

Alla prima accensione, la "Start condition" della μ GT si presentava come in Figura 10, quindi è stato necessario risolvere tutte le condizioni di blocco prima di procedere allo *start-up*. Questa attività è di solito eseguita da personale esperto della casa madre, perché richiede l'accesso alle pagine di configurazione del software di controllo della macchina. Tuttavia, in virtù dell'esperienza già acquisita nell'esercizio dell'impianto AGATUR, le condizioni di blocco sono state per la gran parte risolte dal personale ENEA. Nello specifico, tutte le condizioni di blocco espresse nella parte destra della Figura 10, sono state risolte con

relativa rapidità, non si riusciva tuttavia a risolvere il blocco in basso a sinistra della Figura 10, che si riferisce al corretto settaggio della data di riferimento del software di controllo. Per quanto il blocco possa sembrare di minore importanza rispetto agli altri, di fatto, non consente l'abilitazione allo *start* e, peggio, non si sapeva come risolverlo. E' stata pertanto contattata Turbec, la casa costruttrice della macchina, che con grande spirito di collaborazione ha fornito, senza oneri, il supporto telefonico, la documentazione e le informazioni necessarie a mettere in atto la procedura per il corretto settaggio della data. Tale procedura una volta implementata dal personale ENEA ha consentito di risolvere quest'ultimo blocco all'abilitazione dello start.

3.2 Realizzazione dell'interfaccia operatore sul DCS dell'impianto ZECOMIX

La realizzazione dell'interfaccia operatore della μ GT nel DCS ZECOMIX è finalizzata ai seguenti obiettivi:

- visualizzazione grafica e archiviazione delle grandezze principali;
- creazione del sinottico;
- controllo avanzato.

Il sistema di controllo della μ GT prevede solamente l'archiviazione dei primi 20 secondi degli ultime tre avviamenti della macchina, allocati in una memoria interna *accessibile off-line* tramite apposita applicazione. L'interfaccia web fornita dal costruttore consente il monitoraggio di tutte le grandezze significative della μ GT con una risoluzione massima di 5 secondi. La presentazione dei dati è organizzata in diverse pagine web che devono essere aperte simultaneamente per una visione d'insieme dei dati e non esiste un sinottico della macchina. L'interfaccia web della μ GT, che verrà integrata tramite browser web incorporato nell'interfaccia operatore ABB, costituisce in ogni caso l'unico strumento per la configurazione a basso livello della macchina.

3.2.1 Collegamento MODBUS

Il PLC della μ GT offre la possibilità di comunicare in lettura e scrittura mediante protocollo MODBUS senza tuttavia mettere a disposizione un'interfaccia di gestione. La realizzazione dell'interfaccia di comunicazione MODBUS rappresenta "l'ossatura" dell'interfaccia operatore realizzata sul DCS dell'impianto ZECOMIX e consente di gestire, visualizzare e acquisire le grandezze monitorate dal PLC e di attivare le procedure che

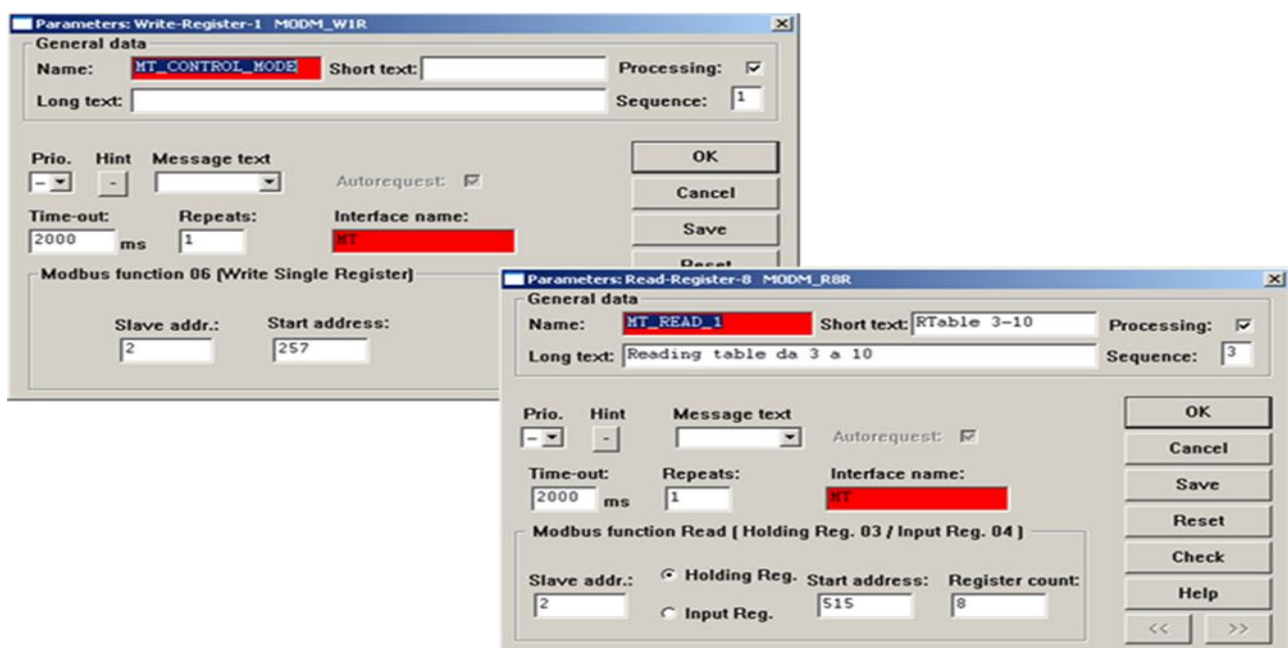


Figura 11. ABB Control Builder. Configurazione dei blocchi di lettura/scrittura MODBUS.

consentono l'esercizio μ GT, quali lo *START*, lo *STOP* e il settaggio del *SET point* di potenza, per citare le più importanti. Per la lettura/scrittura dei registri MODBUS disponibili sul sistema di controllo della T100 sono stati utilizzati dei blocchi funzionali da libreria che eseguono il comando MODBUS "03" e "06", rispettivamente per la lettura degli "Holding Register" (singoli e a blocchi di 8) e la scrittura di "Single Register" (Figura 12). Il *Functional Block Diagram* (FBD) dell'acquisizione tramite MODBUS dei parametri

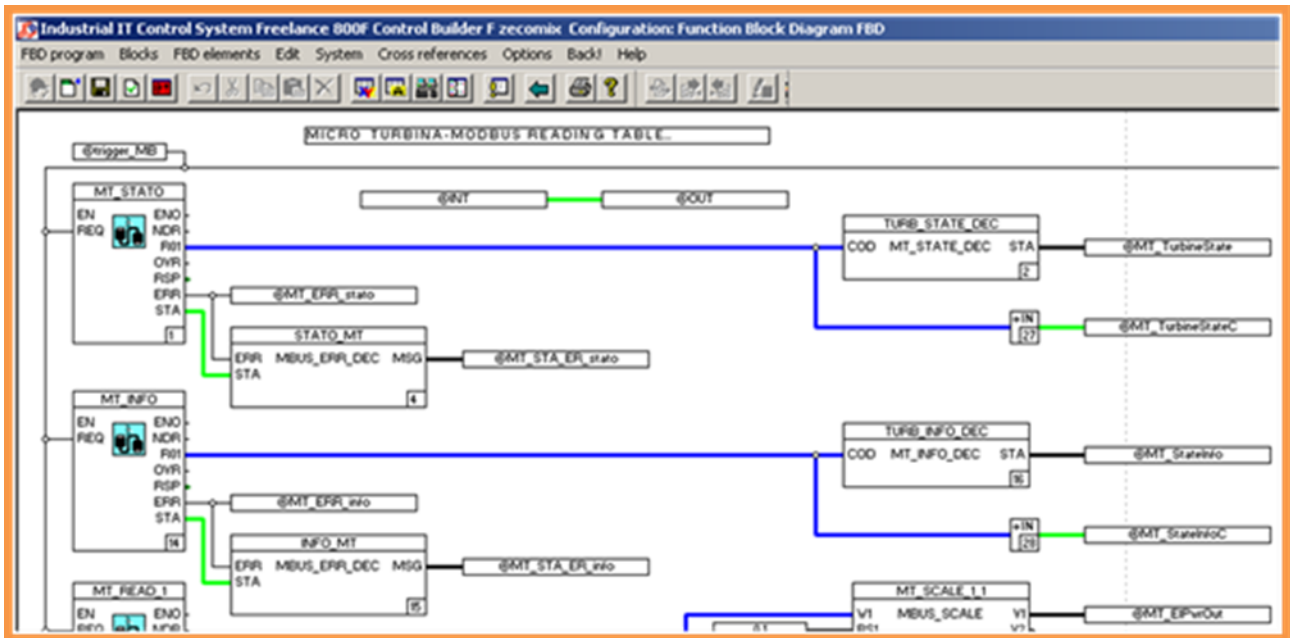


Figura 12. ABB Control Builder. FBD per la gestione della comunicazione MODBUS con la μ GT.

della Turbina, in analogia con gli FBD di acquisizione tramite moduli di I/O delle variabili dell'impianto, è strutturato come una catena lettura *segnalazione di errore - condizionamento*. L'errore di lettura viene segnalato a sinottico con il lampeggiamento di tutti i display delle variabili corrispondenti a quel blocco e viene decodificato per conoscere il tipo di problema rilevato; il cumulativo di tutti i blocchi viene segnalato come errore a interfaccia operatore. Sono stati utilizzati 7 blocchi di lettura e 5 di lettura/scrittura per un totale di 34 registri letti e 5 letti/scritti. Dei 34 registri in lettura 24 sono dedicati al monitoraggio di grandezze misurate, 3 sono codifiche di stato e 7 sono codifiche a bit delle segnalazioni di *Warning*, *Fault* e *Restart*. I 5 registri in scrittura sono dedicati rispettivamente a 3 *SET point*, 1 *set* della modalità di controllo (codice numerico) e 6 comandi con codifica a bit.

Tabella 1. Indirizzi MODBUS dei registri in lettura sul PLC della TURBEC T100, assegnazione delle variabili e suddivisione sui blocchi di lettura a DCS (continua nella pagina successiva).

	Descrizione	Unità di misura	Indirizzo MODBUS	Data type	Blocco	Variabile
1	Status turbina		513	INT	MT_STATE	MT_TurbineState
2	Status information		514	INT	MT_INFO	MT_StateInfo
3	Electrical power output	kW	515	INT	MT_READ_1	MT_EIPwrOut
4	Site water temperature	deg C	517	INT	MT_READ_1	MT_SiteWaterT
5	Exhaust gas temperature	deg C	519	INT	MT_READ_1	MT_ExhaustGasT
6	Heat exchanger outlet water temperature	deg C	521	INT	MT_READ_1	MT_HeatExOutWatT
7	Heat exchanger bypass position	% open	522	INT	MT_READ_1	MT_HeatExBypPos
8	Turbine speed	%	523	INT	MT_READ_2	MT_TurbSpeed
9	Mechanical vibration	g	524	INT	MT_READ_2	MT_MechVibr
10	Fuel valve inlet pressure	bar	525	INT	MT_READ_2	MT_FuelVInPress
11	Air filter pressure drop	Pa	526	INT	MT_READ_2	MT_AirFiltPrsDrp
12	Pilot fuel valve cmd	%	527	INT	MT_READ_2	MT_PilFuelVICmd

13	Main fuel valve cmd	%	528	INT	MT_READ_2	MT_MaiFuelVICmd
14	Air inlet temperature	deg C	529	INT	MT_READ_2	MT_AirInletT
15	Turbine outlet temperature (TOT)	deg C	530	INT	MT_READ_2	MT_TurbOutT
16	Generator temperature	deg C	531	INT	MT_READ_3	MT_GenTemp
17	PE DC link voltage	VDC	532	INT	MT_READ_3	MT_PE_DC_linkV
18	Bearing inlet oil temperature	deg C	533	INT	MT_READ_3	MT_BearInOilT
19	Ball bearing oil temperature	deg C	534	INT	MT_READ_3	MT_BallBearOilT
20	Roller bearing oil temperature	deg C	535	INT	MT_READ_3	MT_RollBearOilT
21	Operation hours	h	536	INT	MT_READ_3	MT_OperHours
22	Running hours	h	537	INT	MT_READ_3	MT_RunnHours
23	Number of starts		538	INT	MT_READ_3	MT_NumbOfStars
24	Produced electrical energy	kWh	539	INT	MT_READ_4	MT_ProdEleEnrg
25	Running hours (fine reading)	h	553	INT	MT_READ_5	MT_RunnHours_f
26	Produced electrical energy (fine reading)	kWh	554	INT	MT_READ_5	MT_ProdEleEnrg_f

Tabella 2. Indirizzi MODBUS dei registri in scrittura sul PLC della TURBEC T100, assegnazione delle variabili e suddivisione sui blocchi di scrittura a DCS.

	Descrizione	Unità di misura	Indirizzo MODBUS	Data Type	Blocco	Variabile
1	Control Mode		257	INT	MT_CONTROL_MODE	MT_SET_CtrlMode
2	Electrical power refernece	kW	258	INT	MT_ELEC_PWR_REF	MT_ElecPwrRef
3	Water temperature reference	deg C	259	INT	MT_WTR_T_REF	MT_Wtr_T_Ref
4	Power factor referencece		260	INT	MT_PWR_FACT_REF	MT_PwrFactRef
5,1	Enable control mode change via MODBUS		261,1	UINT	MT_COMMANDS	MT_Enab_CTRL_cng
5,2	Start signal		261,2			MT_Start
5,3	Alarm reset comand		261,3			MT_AlrmReset
5,4	Power Factor (lead/lag)		261,4			MT_PwrFactor
5,5	Enable grid mode		261,5			MT_EnabGridMode
5,6	Enable Stand alone		261,6			MT_EnabStandAln

3.2.2 Datalogger

Le variabili della μ GT lette tramite MODBUS sono state raggruppate su 4 blocchi Trend in base al tipo di grandezza e al range di variazione. La nomenclatura utilizzata nel datalogger di ZECOMIX è stata implementata secondo la convenzione:

Name *TRnn_xxxx_X*

essendo *nn* il numero progressivo, *xxxx* la descrizione/*skid* e *X* la grandezza rilevata (Figure 14 e 15). Lo stesso *trend* sulla stazione operatore (SO) 2 ha una numerazione progressiva incrementata di 20 (e.g. "TR1_gssf_T" è il *trend* delle temperature del gassificatore sulla SO1, sulla stazione SO2 lo stesso *trend* si chiama "TR21_gssf_T"). I *trend* da 1 a 15 e da 21 a 35 includono tutto il *datalogger*. I *trend* da 16 a 20 e da 36 a 40, contrassegnati con "OP" nel *Long text* sono *trend* operatore creati per riproporre variabili già acquisite in un raggruppamento stabilito dall'operatore in base alle esigenze operative (e.g. "TR19_GassPar" è il grafico di riepilogo dei parametri della gassificazione). La numerazione dei *trend* operatore si interrompe a 20 (40) e riprende da 60 (80) per evitare sovrapposizioni (e.g. il sesto *trend* operatore creato per la μ GT è "TR61_MT" sulla SO1 e "TR81_MT" sulla SO2).

Name	T	Area name	R	Short text	Long text
TR102_MT_test	S	No Area	+	OS3	MT - test
TR103_MT_test	S	No Area	+	OS3	MT - test
TR104_MT_test	S	No Area	+	OS3	MT - test
TR105_MT_test	S	No Area	+	OS3	MT - test
TR11	S	No Area	+	OS1	Varie
TR12	S	No Area	+	OS1	Varie
TR13	S	No Area	+	OS1	Varie(N2, gassificat., CH4)
TR14	S	No Area	+	OS1	Varie (aria, mixer)
TR15	S	No Area	+	OS1	Gassificatore - caricamento
TR18_CRBT_MONIT	S	No Area	+	OS1	OP - Carbonatatore - riepilogo
TR19_GassPar	S	No Area	+	OS1	OP - Parametri gassificazione
TR20_se_wgs	S	No Area	+	OS1	OP - water gas shift
TR31	S	No Area	+	OS2	Varie
TR32	S	No Area	+	OS2	Varie
TR33	S	No Area	+	OS2	Varie(N2, gassificat., CH4)
TR34	S	No Area	+	OS2	Varie (aria, mixer)
TR35	S	No Area	+	OS2	Gassificatore - caricamento
TR38_CRBT_MONIT	S	No Area	+	OS2	OP - Carbonatatore - riepilogo
TR39_GassPar	S	No Area	+	OS2	OP - Parametri gassificazione
TR40_se_wgs	S	No Area	+	OS2	OP - water gas shift
TR45_crbt_T	S	No Area	+	OS3	Temperature del carbonatatore
TR48_crbt_DP	S	No Area	+	OS3	DeltaP e varie del carbonatat.
TR62_MT_test	S	No Area	+	OS1	MT - test
TR1_gssf_T	S	Gassificatore	+	OS1	Temperature del gassificatore
TR21_gssf_T	S	Gassificatore	+	OS2	Temperature del gassificatore
TR22_gssf_P	S	Gassificatore	+	OS2	Pressioni del gassif.(e FT315)
TR23_gssf_F	S	Gassificatore	+	OS2	Portate del gassificatore
TR24_gssf_DP	S	Gassificatore	+	OS2	DeltaP e altre T del gassif.
TR2_gssf_P	S	Gassificatore	+	OS1	Pressioni del gassif.(e FT315)
TR3_gssf_F	S	Gassificatore	+	OS1	Portate del gassificatore
TR4_gssf_DP	S	Gassificatore	+	OS1	DeltaP e altre T del gassif.
TR16_crbt_fluid	S	Carbonatatore	+	OS1	OP - fluidizzazione
TR25_crbt_T	S	Carbonatatore	+	OS2	Temperature del carbonatatore
TR26_crbt_P	S	Carbonatatore	+	OS2	Pressioni del carbonatatore
TR27_crbt_F	S	Carbonatatore	+	OS2	Portate del carbonatatore
TR28_crbt_DP	S	Carbonatatore	+	OS2	DeltaP e varie del carbonatat.
TR36_crbt_fluid	S	Carbonatatore	+	OS2	OP - fluidizzazione
TR5_crbt_T	S	Carbonatatore	+	OS1	Temperature del carbonatatore
TR6_crbt_P	S	Carbonatatore	+	OS1	Pressioni del carbonatatore
TR7_crbt_F	S	Carbonatatore	+	OS1	Portate del carbonatatore
TR8_crbt_DP	S	Carbonatatore	+	OS1	DeltaP e varie del carbonatat.
TR10_trbn	S	Turbina	+	OS1	F, P e T della turbina
TR30_trbn	S	Turbina	+	OS2	F, P e T della turbina
TR61_MT	S	Turbina	+	OS1	Parametri principali turbina
TR81_MT	S	Turbina	+	OS2	Parametri principali turbina
TR_MT_1_T	S	Turbina	+	OS1	Temperature di uscita
TR_MT_2	S	Turbina	+	OS1	Turbina - varie
TR_MT_21_T	S	Turbina	+	OS2	Temperature di uscita

Figura 14. ABB Control Builder (1/2). Tabella dei blocchi di acquisizione del DCS di ZECOMIX. "Area name" indica lo *skid*, mentre i trend con variabili da *skid* diversi sono classificati "No Area". "Short text" è utilizzato per indicare la SO. "Long text" è un campo libero per la descrizione.

TR_MT_22	S	Turbina	+	OS2	Turbina - varie
TR_MT_23	S	Turbina	+	OS2	Turbina - varie
TR_MT_24_T	S	Turbina	+	OS2	Temperature interne
TR_MT_3	S	Turbina	+	OS1	Turbina - varie
TR_MT_4_T	S	Turbina	+	OS1	Temperature interne
TR29_cmprs	S	Compressore	+	OS2	P e T del compressore
TR9_cmprs	S	Compressore	+	OS1	P e T del compressore
TR17_GC_2-3	S	GC	+	OS1	OP - gas carbonatatore
TR37_GC_2-3	S	GC	+	OS2	OP - gas carbonatatore
TR_GC_1	S	GC	+	OS1	Acq. misure stream 1 - OS 1
TR_GC_10_H2S	S	GC	+	OS1	Acq. misure H2S str.1-6 - OS1
TR_GC_11_H2S	S	GC	+	OS1	Acq. misure H2S str.7-9 - OS1
TR_GC_12_stato	S	GC	+	OS1	Stato GC
TR_GC_2	S	GC	+	OS1	Acq. misure stream 2 - OS 1
TR_GC_21	S	GC	+	OS2	Acq. misure stream 1 - OS 2
TR_GC_22	S	GC	+	OS2	Acq. misure stream 2 - OS 2
TR_GC_23	S	GC	+	OS2	Acq. misure stream 3 - OS 2
TR_GC_24	S	GC	+	OS2	Acq. misure stream 4 - OS 2
TR_GC_25	S	GC	+	OS2	Acq. misure stream 5 - OS 2
TR_GC_26	S	GC	+	OS2	Acq. misure stream 6 - OS 2
TR_GC_27	S	GC	+	OS2	Acq. misure stream 7 - OS 2
TR_GC_28	S	GC	+	OS2	Acq. misure stream 8 - OS 2
TR_GC_29	S	GC	+	OS2	Acq. misure stream 9 - OS 2
TR_GC_3	S	GC	+	OS1	Acq. misure stream 2 - OS 3
TR_GC_30_H2S	S	GC	+	OS2	Acq. misure H2S str.1-6 - OS2
TR_GC_31_H2S	S	GC	+	OS2	Acq. misure H2S str.7-9 - OS2
TR_GC_32_stato	S	GC	+	OS2	Stato GC
TR_GC_4	S	GC	+	OS1	Acq. misure stream 2 - OS 4
TR_GC_5	S	GC	+	OS1	Acq. misure stream 2 - OS 5
TR_GC_6	S	GC	+	OS1	Acq. misure stream 2 - OS 6
TR_GC_7	S	GC	+	OS1	Acq. misure stream 2 - OS 7
TR_GC_8	S	GC	+	OS1	Acq. misure stream 8 - OS 1
TR_GC_9	S	GC	+	OS1	Acq. misure stream 9 - OS 1

Figura 15. ABB Control Builder (2/2). Tabella dei blocchi di acquisizione del DCS di ZECOMIX.

Per le variabili acquisite da MODBUS si è stato scelto di riprendere la numerazione (tabella 3), quindi si ha:

$TR_{XX_nn_X}$

essendo XX l'abbreviazione della sezione d'impianto (e.g. " $TR_{MT_1_T}$ " è il *trend* delle temperature della μ GT). In concomitanza con l'installazione della μ GT è stata creata una terza SO in ambiente DigiVIS, quale ausilio alla visualizzazione dei *trend*. Sulla nuova SO non sono stati implementati nuovi sinottici ma solo un set di 4 nuovi grafici per il monitoraggio di alcune grandezze di rilievo durante lo svolgimento dei test sull'impianto.

Tabella 3. Datalogger della μ GT su DCS ZECOMIX (continua nella pagina successiva).

Nome trend	Traccia	Variabile	Descrizione
TR_MT_1_T	1	MT_TurbOutT	°C
	2	MT_ExhaustGasT	°C
TR_MT_2	1	MT_TurbSpeed	%
	2	MT_PilFuelVICmd	%
	3	MT_MaiFuelVICmd	%
	4	MT_EIPwrOut	kW
	5	MT_PE_DC_linkV	V
TR_MT_3	1	MT_FuelVInPress	bar
	2	MT_AirFiltPrsDrp	Pa
	3	Fuel_deltaP	bar
	4	MT_MechVibr	g
	5	MT_TurbineStateC	-
	6	MT_StateInfoC	-
TR_MT_4_T	1	MT_GenTemp	°C
	2	MT_BearInOilT	°C
	3	MT_BallBearOilT	°C
	4	MT_RollBearOilT	°C
	5	MT_AirInletT	°C

Tabella 4. Riepilogo della numerazione dei trend presenti nel datalogger di ZECOMIX.

Numerazione	Descrizione	SO	Quantità
1-15	Datalogger	1	15
16-20	Trend operatore (prima parte)	1	5
21-35	Datalogger (copia)	2	15
36-40	Trend operatore (copia)	2	5
41-55	Datalogger (copia)	3	2
56-60	Trend operatore (copia)	3	0
61-65	Trend operatore (seconda parte)	1	2
66-80	Non utilizzati		
81-85	Trend operatore (seconda parte)	2	1
86-100	Non utilizzati		
101-105	Trend operatore (seconda parte)	3	4
GC_1-12	Datalogger del GC	1	12
GC_21-32	Datalogger del GC (copia)	2	12
MT_1-4	Datalogger della μ GT	1	4
MT_21-24	Datalogger della μ GT (copia)	2	4

3.2.3 Allarmi

Il sistema di controllo della T100 rende disponibili su MODBUS 6 registri da 16 bit per un totale di 96 segnalazioni di allarme suddivise in 7 categorie:

1. *Information*
2. *Warning*
3. *Fault and restart*
4. *Fault (needs reset)*
5. *Fault (main contact failure)*
6. *Fault – GAS detected*
7. *Emergency.*

La gestione degli allarmi è stata implementata utilizzando blocchi “M_BIN” della libreria Freelance e realizzando 6 nuovi *Functional Block Diagram* (Figura 16). Dal lato dell’interfaccia operatore il DigiVIS

permette la notifica degli allarmi tramite “*banner*”, avvisi acustici e registro eventi. Inoltre sulla pagina di controllo della μ GT gli allarmi sono visualizzati istantaneamente sotto forma di pannelli a spie (paragrafo successivo). Delle 96 segnalazioni di allarme disponibili dal sistema di controllo della turbina ne vengono utilizzate 85 suddivise su tre livelli di priorità: 25 *Fault di Priorità 1*, 50 *Restart di Priorità 2* e 10 *Warning di Priorità 3* (Figure 17 e 18).

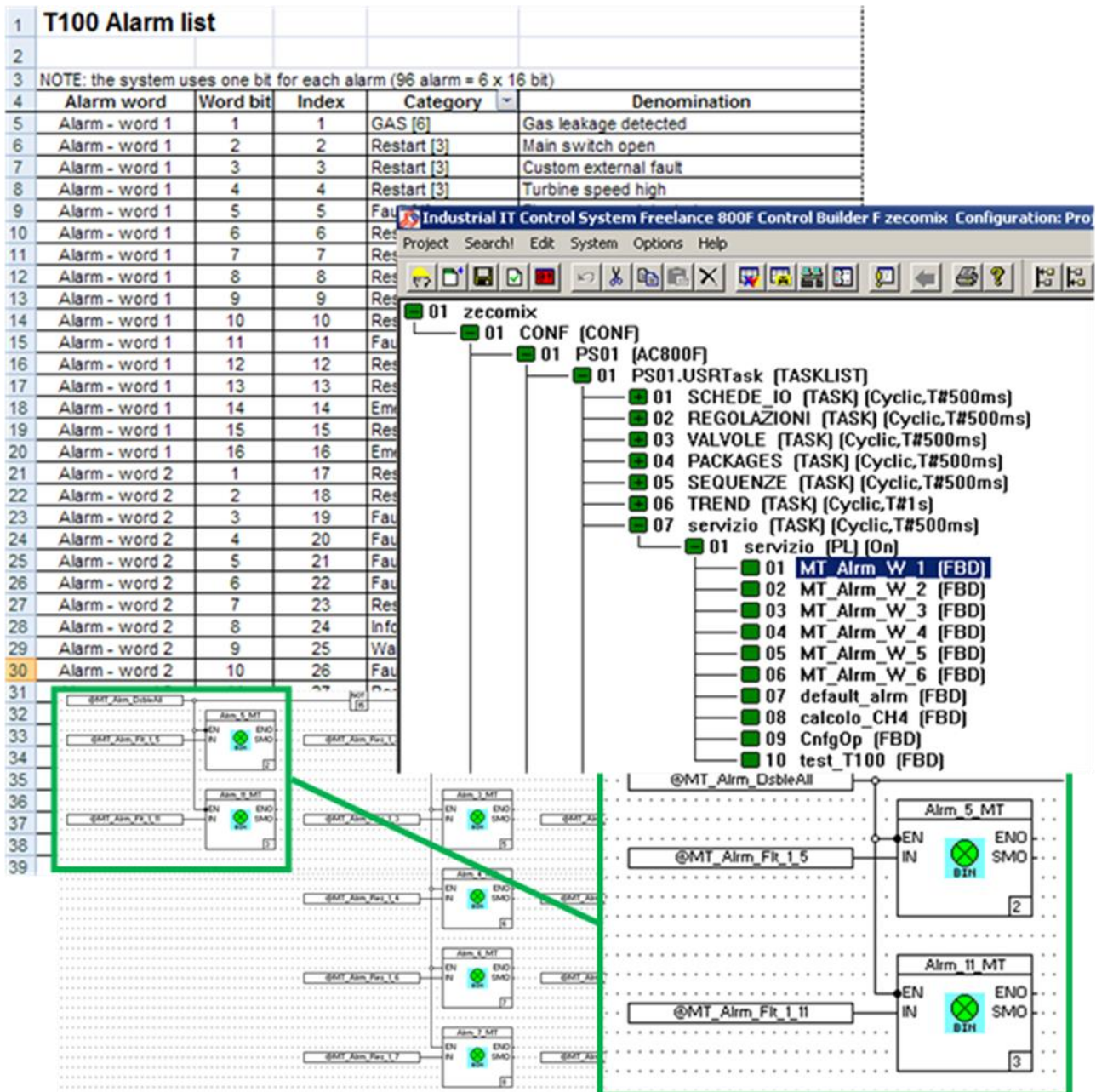


Figura 16. ABB Control Builder. Implementazione allarmi.

3.2.4 Sinottico dell'interfaccia operatore

La realizzazione dell'interfaccia operatore della T100 sul DCS ZECOMIX è avvenuta in due fasi successive; nella prima fase è stata realizzata una pagina grafica sotto forma di pannello di controllo suddiviso in 4 sezioni: pannello dei comandi, pannello dello stato e della lettura variabili operative, pannello degli allarmi e pannello delle Digital Input del PLC (Figura 19). In seguito è stata implementata una pagina grafica contenente un sinottico della turbina (Figura 20). Questo tipo di interfaccia ha dimostrato la sua efficacia nelle fasi di test della μ GT, dalle prime accensioni al *debug* dell'applicazione stessa. E' attualmente in corso

la revisione della pagina grafica con l'obiettivo di ottenere un'interfaccia più evoluta, tipo *dashboard*, in grado di integrare strumenti grafici di tipo *plot* e *bar graph*. Il pannello comandi per l'esercizio della μ GT è collocato nella parte sinistra della pagina grafica "Turbina_Tab" ed è suddiviso in 6 sezioni: "Change Control Mode", "Commands", "Electrical Power Ref.", "Power Factor Ref.", "Power Factor" e "Grid Mode" (Figura 19).

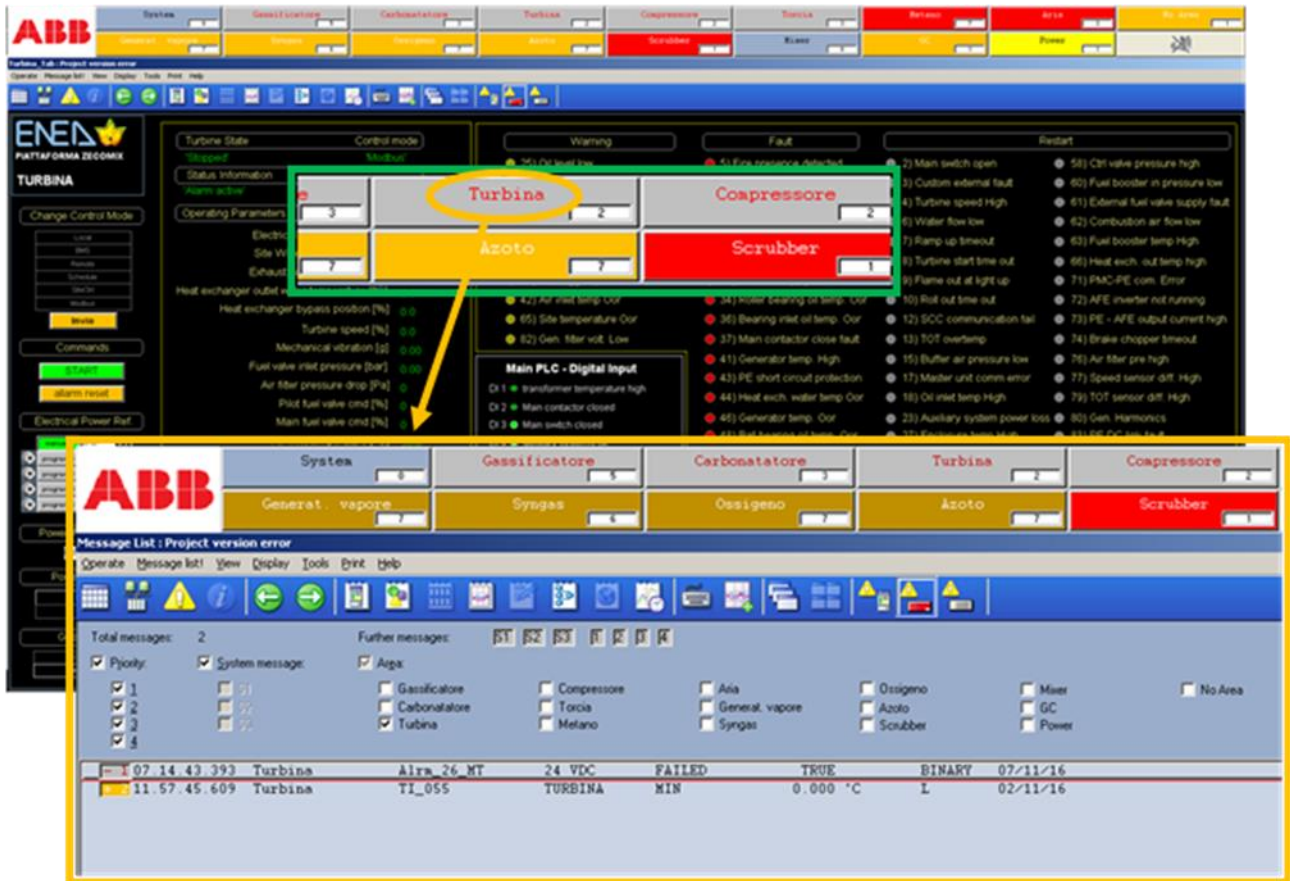


Figura 17. Interfaccia operatore ABB DigiVis. Gestione allarmi.

Warning	Fault	Restart
● 25) Oil level low	● 5) Fire presence detected	● 2) Main switch open
● 30) OP-PMC com. Error	● 11) Max number of restart att.	● 3) Custom external fault
● 31) Oil temp. Low	● 19) Ball bearing oil temp. High	● 4) Turbine speed High
● 32) Air filter pressure drop high	● 20) Roller bearing oil temp. High	● 6) Water flow low
● 33) Air filter pressure drop Oor	● 21) Engine vibration High	● 7) Ramp up timeout
● 35) Over load in Stand Alone mode	● 22) Auxiliary system failed	● 8) Turbine start time out
● 38) Ext. triggered phone call	● 26) 24 VDC supply failed	● 9) Flame out at light up
● 42) Air inlet temp Oor	● 34) Roller bearing oil temp. Oor	● 10) Roll out time out
● 65) Site temperature Oor	● 36) Bearing inlet oil temp. Oor	● 12) SCC communication fail
● 82) Gen. filter volt. Low	● 37) Main contactor close fault	● 13) TOT overtemp
		● 58) Ctrl valve pressure high
		● 60) Fuel booster in pressure low
		● 61) External fuel valve supply fault
		● 62) Combustion air flow low
		● 63) Fuel booster temp High
		● 66) Heat exch. out temp high
		● 71) PMC-PE com. Error
		● 72) AFE inverter not running
		● 73) PE - AFE output current high
		● 74) Brake chopper timeout

Figura 18. Interfaccia operatore ABB DigiVis. Particolare del pannello allarmi.



Figura 19. Interfaccia operatore DigiVis. Particolari della pagina grafica della µGT.

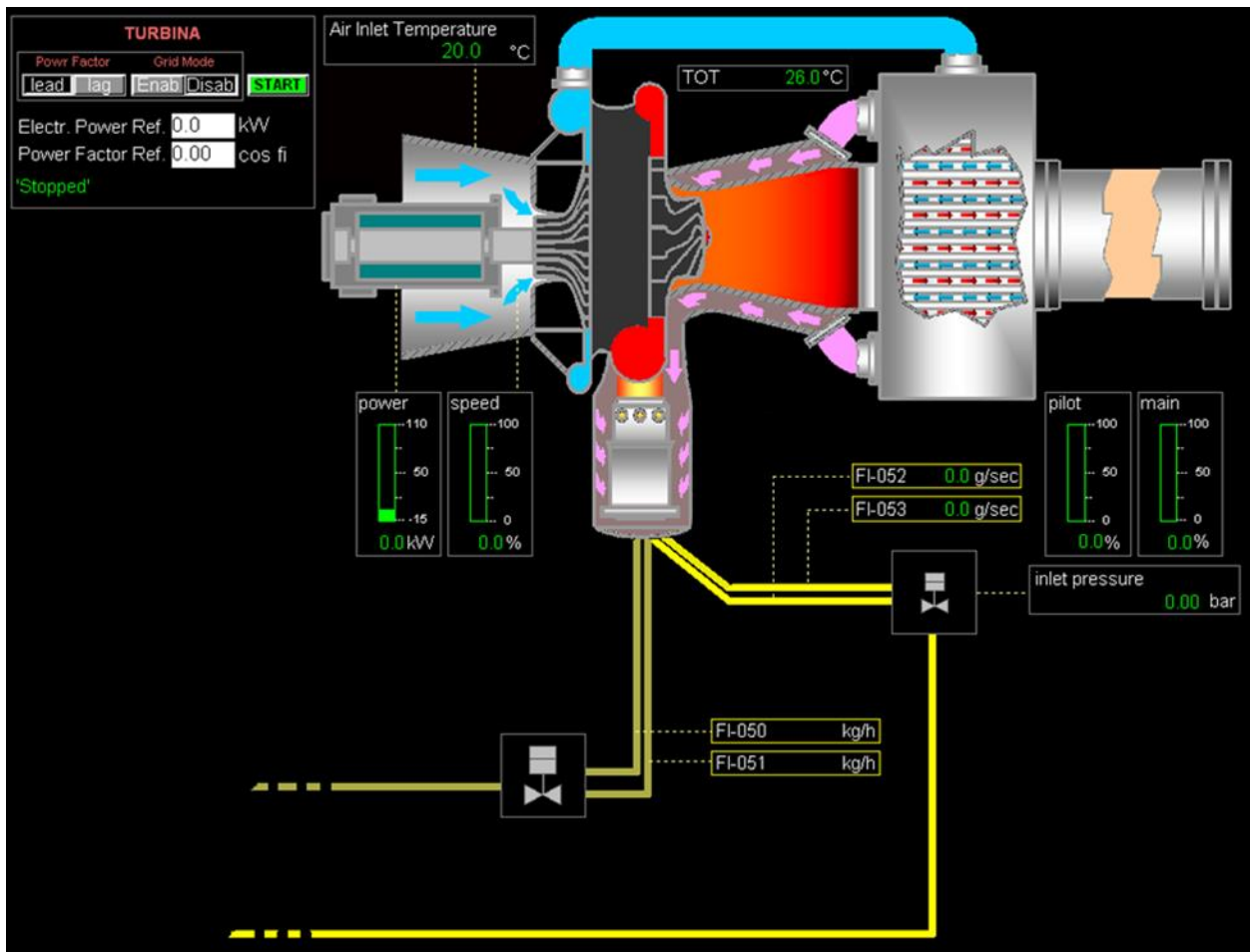


Figura 20. Interfaccia operatore DigiVis. Sinottico della µGT.

3.3 Implementazione della strategia di controllo per l'esercizio dual-fuel della μ GT

Una volta ottenuta una versione stabile, seppur non definitiva, dell'interfaccia operatore, l'attività si è concentrata sull'indagine delle logiche di controllo interne al PLC della μ GT e sull'implementazione di una strategia di controllo per la gestione dell'alimentazione *dual-fuel* della macchina, che può essere riassunta nei punti di seguito indicati:

- realizzazione di uno strumento di automazione, integrato nell'interfaccia operatore, per l'esecuzione automatica di procedure di esercizio della μ GT;
- implementazione di un sistema di controllo operante in serie al sistema Turbec, basato sull'intercettazione e il condizionamento mediante DCS dei segnali inviati alle valvole di controllo della μ GT.

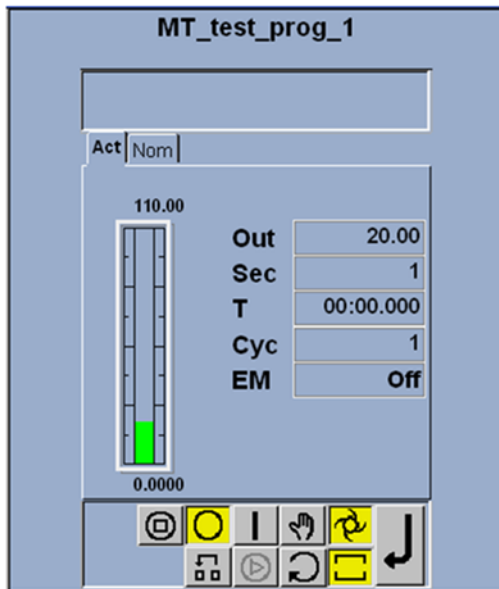
La realizzazione dello strumento di automazione ha come obiettivo contingente l'esecuzione automatica di procedure ripetitive caratterizzate da una gestione stringente dei tempi di esecuzione che, pertanto, sono meglio gestibili se eseguite mediante l'implementazione di algoritmi programmati nell'ambiente Freelance di ABB, su cui insiste il DCS dell'impianto ZECOMIX. L'obiettivo più a lungo termine consiste nella realizzazione e nell'utilizzo di strumenti dello stesso tipo per l'esecuzione dello *switch* da gas naturale a syngas durante l'esercizio *dual-fuel* della μ GT. Lo strumento implementato è basato sull'utilizzo del blocco di libreria "Time Scheduler" (TS), permette di programmare una serie di valori del *SET point* in funzione del tempo. In particolare il blocco TS genera una funzione che l'utente definisce attraverso una tabella "valore-durata" contenente al massimo 32 valori. Da pannello operatore si possono richiamare due tabelle corrispondenti a due diversi TS. La programmazione dei TS è possibile solo da Control Builder. Sono stati creati due programmi per lo svolgimento di test di esercizio della μ GT in conformità a matrici definite in precedenza (Figura 20).

	test 1	test 2	test 3	test 4	test 5	test 6	test 7	test 8	test 9	test 10	
t [hh.mm.ss]	set point value	set point value	set point value	set point value	set point value	set point value	set point value	set point value	set point value	set point value	
1	6.00.00	20(start)	30(start)	40(start)	50(start)	60(start)	70(start)	80(start)	90(start)	100(start)	110(start)
2	6.30.00	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
3	7.00.00	30	40	50	60	70	80	90	100	110	100
4	7.30.00	40	50	60	70	80	90	100	110	100	90
5	8.00.00	50	60	70	80	90	100	110	100	90	80
6	8.30.00	60	70	80	90	100	110	100	90	80	70
7	9.00.00	70	80	90	100	110	100	90	80	70	60
8	9.30.00	80	90	100	110	100	90	80	70	60	50
9	10.00.00	90	100	110	100	90	80	70	60	50	40
10	10.30.00	100	110	100	90	80	70	60	50	40	30
11	11.00.00	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20
12	11.30.00	100	90	80	70	60	50	40	30	20	stop
13	12.00.00	90	80	70	60	50	40	30	20	stop	
14	12.30.00	80	70	60	50	40	30	20	stop		
15	13.00.00	70	60	50	40	30	20	stop			
16	13.30.00	60	50	40	30	20	stop				
17	14.00.00	50	40	30	20	stop					
18	14.30.00	40	30	20	stop						
19	15.00.00	30	20	stop							
20	15.30.00	20	stop								
	16.00.00	stop									

Figura 21. Matrice di riferimento utilizzata per l'esecuzione dei test di esercizio automatizzati.

Ogni TS ha una sua pagina grafica suddivisa in tre aree: area del grafico, area delle informazioni di esecuzione e pannello dei comandi. Il programma può essere messo in pausa tramite il pulsante "STOP". Commutando su *SET point* manuale il valore impostato è l'ultimo utilizzato. I TS implementati sono stati

testati con successo e hanno dimostrato l'affidabilità necessaria all'esercizio automatizzato e sicuro della μ GT. L'esperienza acquisita sarà utilmente spendibile per l'automazione dello *switch* da gas naturale a syngas, che si tradurrà nella definizione di un algoritmo atto a replicare il protocollo di *switch* testato sperimentalmente.







-  **ON: restituisce i valori del programma**
-  **OFF: restituisce il valore del primo step**
-  **STOP: rimane in pausa sul set-point attuale**
-  **SKIP: salta al set-point successivo**

Figura 22. ABB DigiVis. Pannello di comando del "Time Scheduler".

4 Start-up, test sperimentali e definizione della strategia di controllo per l'alimentazione dual-fuel

Il primo avviamento della μ GT può considerarsi l'apice delle attività descritte nelle sezioni precedenti e, soprattutto, la verifica sostanziale dell'efficacia del lavoro svolto. Risolte le numerose problematiche iniziali, dopo il primo *start-up* (Figura 23) la T100 è stata esercita con continuità nel corso dell'annualità, con un'affidabilità sostanzialmente pari al 100%. Sono state eseguite numerose sessioni sperimentali finalizzate a due principali obiettivi:

1. l'acquisizione dei dati di performance della μ GT in condizioni ambiente e di carico significative per la validazione del modello numerico della macchina;
2. il test di strategie di controllo volte all'esercizio *dual-fuel* della μ GT.

L'acquisizione dei dati di performance è stata condotta cercando di sfruttare il più possibile l'escursione termica giornaliera, al fine di valutare la sensibilità della macchina alla temperatura ambiente che, come noto, è una variabile ambientale di grande impatto sulle prestazioni dei cicli turbogas. A tal fine sono state eseguite alcune sessioni di esercizio giornaliere con *start-up* alle 6:00 AM, in modo da intercettare i valori minimi di temperatura ambiente. Come atteso, in queste condizioni la μ GT ha esibito il picco di potenza, generando 109,5 KW per un intervallo di tempo significativo, con un surplus di potenza pari a circa il 10% rispetto al valore di targa (Figura 24). Le sessioni di esercizio successive sono state eseguite sfruttando gli strumenti di automazione implementati sul DCS di ZECOMIX, valutando al contempo l'affidabilità degli stessi. Nello specifico, sono stati implementati due strumenti per la programmazione del *SET point* di potenza della macchina che consentono, rispettivamente, variazioni a "gradino" ad intervalli di tempo costanti (Figura 25) e a "rampa"(Figura 26). Entrambe le strategie di programmazione sono state implementate per indurre specifiche risposte del sistema di controllo della μ GT e ricavare informazioni e dati utili alla taratura del modello numerico della macchina.

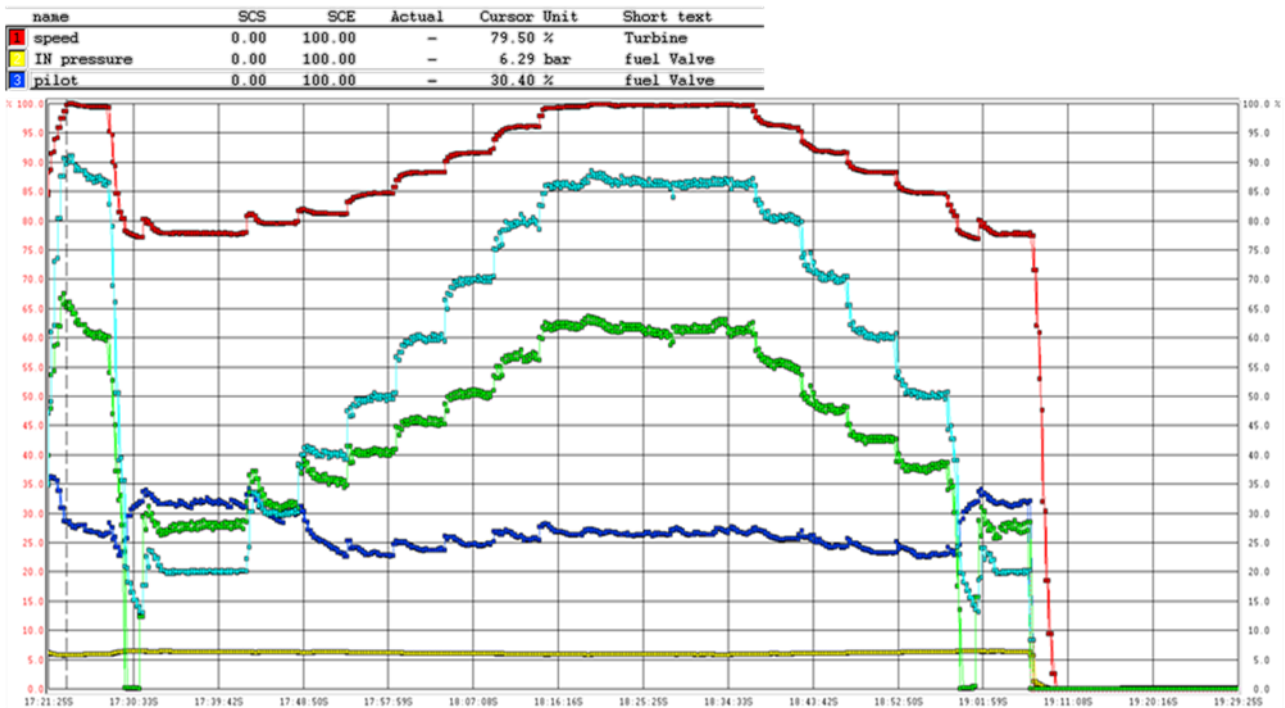


Figura 23. Acquisizione dati del primo *start-up* della μ GT.

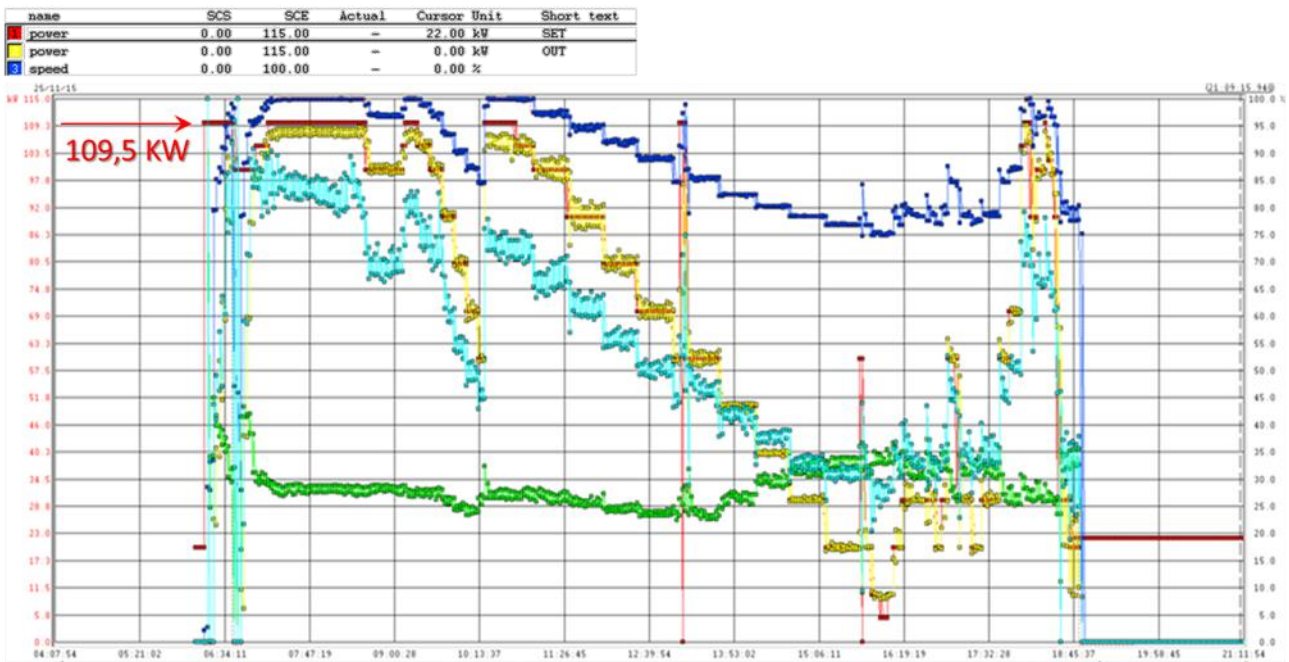


Figura 24. Acquisizione dati di una sessione di test programmata per valutare la sensibilità della performance della μ GT alla temperatura ambiente.

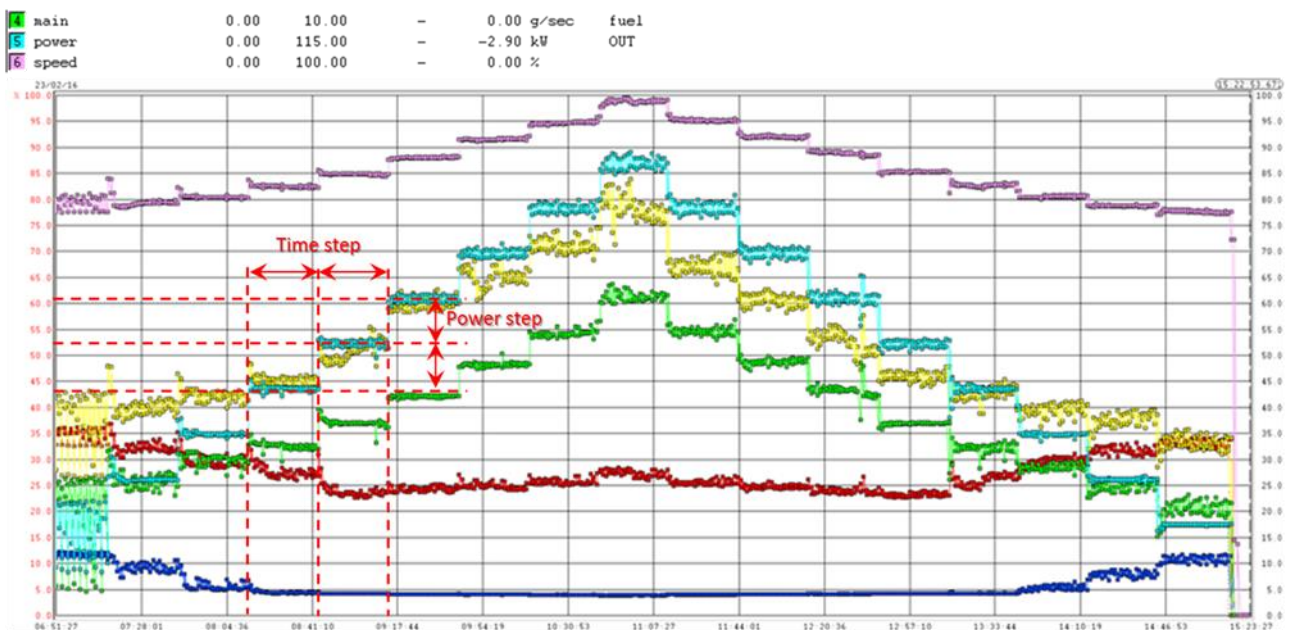


Figura 25. Acquisizione dati di una sessione di test automatizzata mediante TS per l'esecuzione di variazioni della SET point di potenza a gradini da 10 kW a intervalli di tempo regolari.

4.1 Definizione della strategia di controllo per l'alimentazione dual-fuel della μ GT

La definizione del protocollo di *switch* implica una profonda conoscenza della macchina e del suo sistema di controllo che, in ogni caso, si presenta chiuso ad interventi esterni dell'utente ed è pertanto da considerarsi imm modificabile senza l'intervento di personale specializzato Turbec. In estrema sintesi, la procedura di *switch* da gas naturale a syngas implica la disponibilità di due elementi di sistema, uno hardware e uno software, che devono "comunicare" con il sistema di controllo della μ GT. L'hardware è costituito da due sistemi di alimentazione del combustibile, composti dalle valvole di regolazione, dalle relative linee di

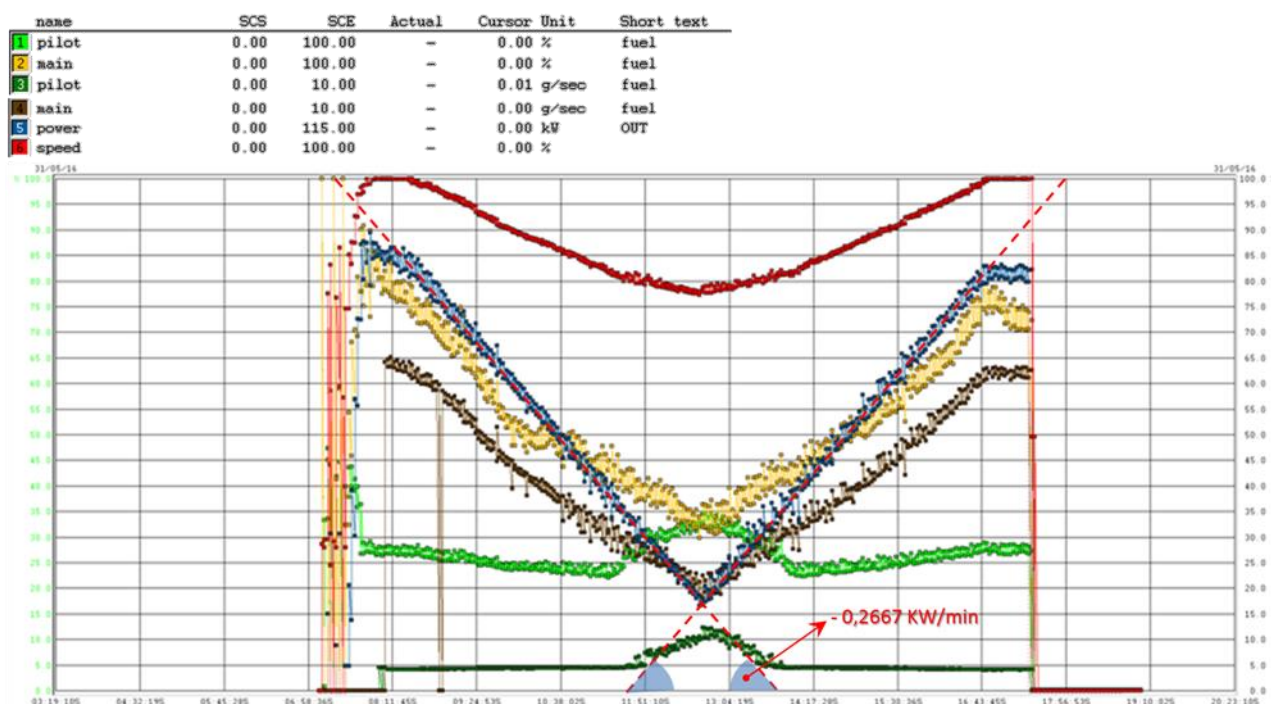


Figura 26. Acquisizione dati di una sessione di test automatizzata mediante TS per l'esecuzione di variazioni continue del SET point di potenza secondo una rampa di pendenza prestabilita.

alimentazione e dall'elettronica di attuazione. Si avrà pertanto un blocco valvole di regolazione per il gas naturale e un suo omologo per il syngas. Le valvole di regolazione sono attuate mediante un segnale 0-20 mA gestito dal PLC della macchina, pertanto verrà applicato lo stesso standard anche per il sistema di alimentazione a syngas. Il software sarà costituito da alcuni blocchi di regolazione simili ai TS descritti in precedenza, ma con un algoritmo dedicato, che gestirà la transizione da un sistema di alimentazione all'altro. La procedura di *switch* in corso di implementazione può essere suddivisa in tre fasi:

1. avviamento della μ GT a gas naturale e regimazione termica al carico elettrico di riferimento di riferimento per lo *switch*;
2. a carico elettrico costante, *switch* da gas naturale a syngas mediante attenuazione dell'alimentazione premiscelata a gas naturale e corrispondente incremento dell'alimentazione premiscelata a syngas;
3. completa chiusura dell'alimentazione premiscelata a gas naturale, sostentamento stabile mediante combustione premiscelata syngas e mantenimento dell'alimentazione alla linea pilota a gas naturale.

Come già detto in precedenza, il sistema di controllo della T100 non è accessibile a livello utente, è stata quindi *implementata e testata* una procedura in grado di intervenire a valle del PLC della T100 e di costringere il sistema di controllo ad "adeguarsi" ed eventualmente a compensare la perturbazione causata dallo *switch*. L'obiettivo è stato raggiunto intercettando il segnale 0-20 mA che, in uscita dal PLC, movimentava le valvole di alimentazione del combustibile. Tale segnale, inviato via cavo al PLC del DCS di ZECOMIX, viene condizionato e quindi inviato ad uno o entrambi i blocchi valvole di regolazione della μ GT (Figura 27). Il condizionamento del segnale viene attuato seguendo uno specifico algoritmo di regolazione tarato per gestire lo *switch* del combustibile mantenendo la combustione a potenza termica costante. L'algoritmo di condizionamento è costituito da cinque operazioni elementari:

1. copia del segnale in uscita dal PLC della T100 (MGT)
2. duplicazione del segnale copiato
3. attenuazione del segnale in uscita verso il blocco valvole a gas naturale (NGV)

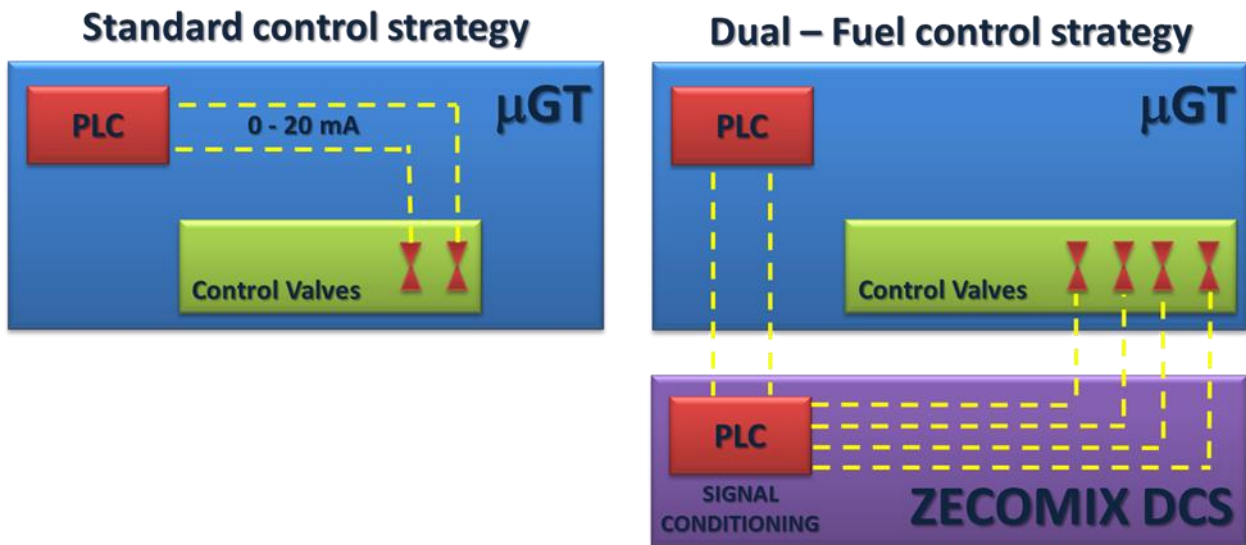


Figura 27. Confronto tra la sequenza di controllo standard della μ GT e la sequenza di controllo implementata per l'esercizio *dual-fuel*.

4. incremento del segnale in uscita verso il blocco valvole a syngas (SGV)
5. invio dei segnali generati ai blocchi valvole.

L'attenuazione del segnale NGV e il corrispondente incremento del segnale SGV vengono implementati secondo rampe prestabilite che si concluderanno con il trasferimento completo del segnale (MGT) emesso dal PLC della T100 verso il blocco valvole a syngas. Il sistema di controllo della μ GT viene quindi "ingannato" e continuerà a controllare la macchina sulla base dei feedback ricevuti, correggendo i disturbi generati da eventuali squilibri energetici dovuti alla sostituzione del combustibile. La pendenza delle rampe di attenuazione e incremento rispettivamente dei segnali NGV e SGV, ovvero il tempo necessario a gestire la transizione, verrà definita sperimentalmente, secondo una matrice sperimentale costituita da rampe progressivamente più ripide, assumendo comunque le rampe a simmetria speculare (Figura 28). In altri termini, la pendenza delle rampe sarà uguale in valore assoluto ma di segno opposto, quindi in un istante qualsiasi dello *switch* si avrà:

$$\left\{ \begin{array}{l} NGV = K \cdot MGT \\ SGV = (1 - K) \cdot MGT \\ 0 \leq K \leq 1 \\ switch\ start \rightarrow K = 1 \\ swicht\ end \rightarrow K = 0 \end{array} \right.$$

L'esecuzione dello *switch* secondo l'algoritmo sopra specificato, può in generale generare tre diverse condizioni:

1. *switch* con eccesso di potenza (+E);
2. *switch* con difetto di potenza (-E);
3. *switch* perfettamente bilanciato (N).

La condizione "+E" si verifica quando l'attenuazione del segnale NGV e il corrispondente incremento del segnale SGV generano un eccesso di potenza termica, ovvero l'introduzione del syngas sovra-compensa la riduzione di gas naturale generando la reazione del sistema di controllo della μ GT e la conseguente *deriva negativa* del segnale MGT. La condizione "-E" si verifica nella situazione opposta, quando l'attenuazione del

segnale NGV e il corrispondente incremento del segnale SGV generano un difetto di potenza termica, ovvero l'introduzione del syngas sotto-compensa la riduzione di gas naturale generando la reazione del sistema di controllo della μ GT e la conseguente *deriva positiva* del segnale MGT. La condizione "N", possibile ma improbabile, occorre quando l'attenuazione del segnale NGV e il corrispondente incremento

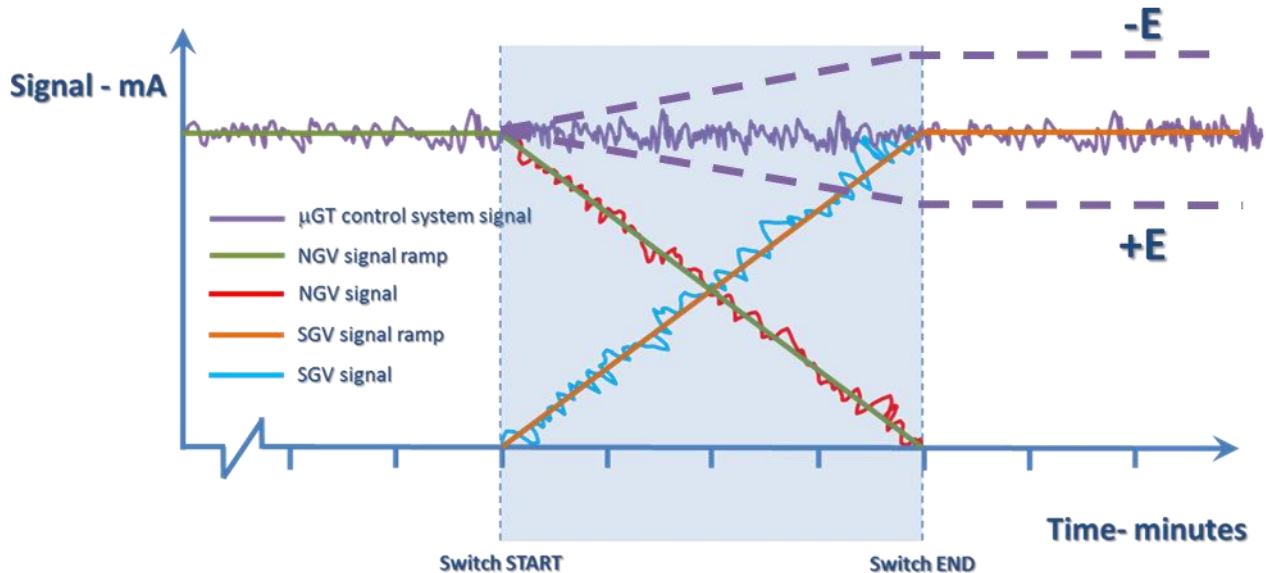


Figura 28. Previsione dell'andamento dei segnali MGT, NGV e SGV durante l'esecuzione dello *switch* del combustibile di alimentazione. Le spezzate tratteggiate in viola indicano la deriva del segnale MGT nelle condizioni "+E" e "-E".

del segnale SGV generano un perfetto bilanciamento della potenza termica, in altre parole, quando l'introduzione del syngas compensa la riduzione di gas naturale, senza provocare alcuna correzione del sistema di controllo della μ GT (Figura 28). In ciascuna delle tre condizioni, l'azione combinata dei segnali NGV, SGV e MGT, quest'ultimo soggetto alle correzioni del sistema di controllo della μ GT, consente l'effettuazione dello *switch* senza sostanziali sbilanciamenti di potenza, a patto di imporre pendenze di rampa compatibili con i tempi di reazione del PLC della T100. L'ipotesi sopra esposta è stata verificata sperimentalmente mediante un test di condizionamento del segnale NGV con valori di "K" rispettivamente maggiori, uguali e minori dell'unità (Figura 29). Il test, oltre a confermare quanto ipotizzato, ha permesso di valutare l'ordine di grandezza del tempo necessario ad eseguire lo *switch*, sulla base della reazione del sistema di controllo al disturbo provocato dal condizionamento del segnale. Nello specifico, la Figura 29 illustra l'acquisizione dati di un test effettuato sulla μ GT in una finestra temporale che include lo *start-up* e lo *shut-down*. Le curve acquisite insistono su un'area suddivisa in sette fasce e riassumono il comportamento della μ GT che, esercita a potenza costante, viene sottoposta al condizionamento del segnale NGV. Le fasce a sfondo bianco includono i domini di funzionamento durante i quali il segnale NGV non è stato condizionato ($K = 1$, NGV = MGT), mentre le fasce a sfondo azzurro e verde, includono i domini di funzionamento nei quali il segnale è stato condizionato con valori di K rispettivamente minori e maggiori di uno. Osservando lo sviluppo del test a partire da sinistra, la prima fascia con $K = 1$ descrive l'avviamento e la successiva regimazione termica della macchina a 50 KW. Durante la finestra temporale successiva, il segnale NGV è stato condizionato imponendo progressivamente valori decrescenti di K, a partire da $K = 1$. Ogni condizionamento del segnale con $K < 1$ ha provocato una proporzionale riduzione del segnale di apertura della valvola *main* (MGT) e ha conseguentemente indotto la risposta del sistema di controllo della μ GT, che ha reagito ripristinando l'apertura originaria della valvola incrementando il segnale MGT. Questa correzione (*deriva -E*) è proseguita fino al superamento della soglia del 100%, oltre la quale il sistema di controllo non può più "reagire" avendo ormai raggiunto i 20 mA del segnale MGT. Il dominio di funzionamento ove il sistema di controllo della μ GT non può compensare il condizionamento del segnale NGV è rappresentato dalla fascia orizzontale a sfondo giallo, mentre la correlazione diretta tra la mancata

compensazione e le conseguenti riduzioni di portata combustibile e, quindi, di potenza, è evidenziata nei riquadri a sfondo rosa. Da quanto osservato è possibile trarre un'immediata conclusione: il tempo di reazione del sistema di controllo consente di compensare agevolmente il condizionamento del segnale, come si evince osservando le curve relative alla potenza generata e alla portata combustibile della linea *main*, entrambe mantenute costanti o fronte del continuo condizionamento del segnale NGV.

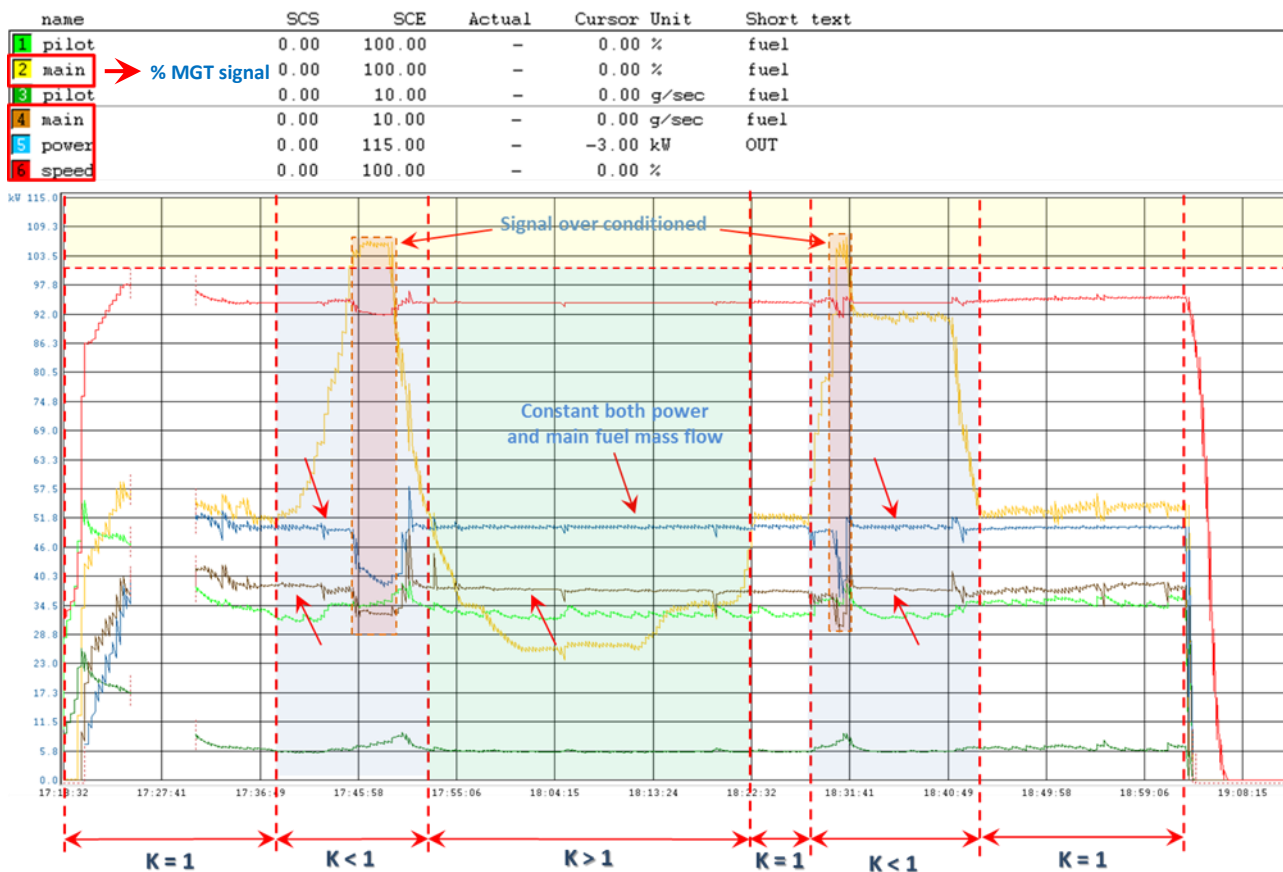


Figura 29. Acquisizione di una sessione di test con condizionamento del segnale NGV. Si nota che al variare dell'apertura della valvola *main* (% del segnale MGT - curva in giallo) la portata combustibile (curva in marrone) e la potenza elettrica (curva in azzurro) rimangono costanti. Fanno eccezione le aree contrassegnate in rosa, dove, a causa del sovra-condizionamento del segnale NGV, il sistema di controllo non riesce a compensare.

La capacità di compensazione del sistema di controllo viene meno solamente quando il segnale di apertura raggiunge il 100%, evenienza che appare ovvia per quanto affermato sopra. La fascia successiva a sfondo verde, descrive il comportamento della μ GT quando il segnale NGV viene condizionato con valori crescenti di K , a partire da $K = 1$. In questo caso la reazione del sistema di controllo (deriva +E) è stata opposta a quanto descritto in precedenza, ma con il medesimo risultato. Ad ogni incremento del valore K , il sistema di controllo ha reagito attenuando il segnale MGT e, di conseguenza, ripristinando l'apertura della valvola *main* in modo tale da garantire la costanza della portata combustibile e, conseguentemente, della potenza elettrica. Anche in questo caso, il tempo di reazione del sistema di controllo consente di compensare agevolmente il condizionamento del segnale di apertura della valvola *main*. Il test sopra descritto dimostra la fattibilità e l'efficacia della strategia di controllo definita per l'esercizio *dual-fuel* della μ GT. L'applicazione della strategia allo *switch* da gas naturale a syngas implica l'implementazione di due rampe speculari con $K_{NG} < 1$ per il gas naturale (NGV) e $K_{SG} = (1 - K_{GN})$ per il syngas (SGV). La transizione a potenza costante sarà garantita dalle correzioni effettuate dal sistema di controllo che reagirà causando una deriva positiva del segnale in caso di difetto di potenza (- E), o una deriva negativa in caso di eccesso di potenza (+ E).

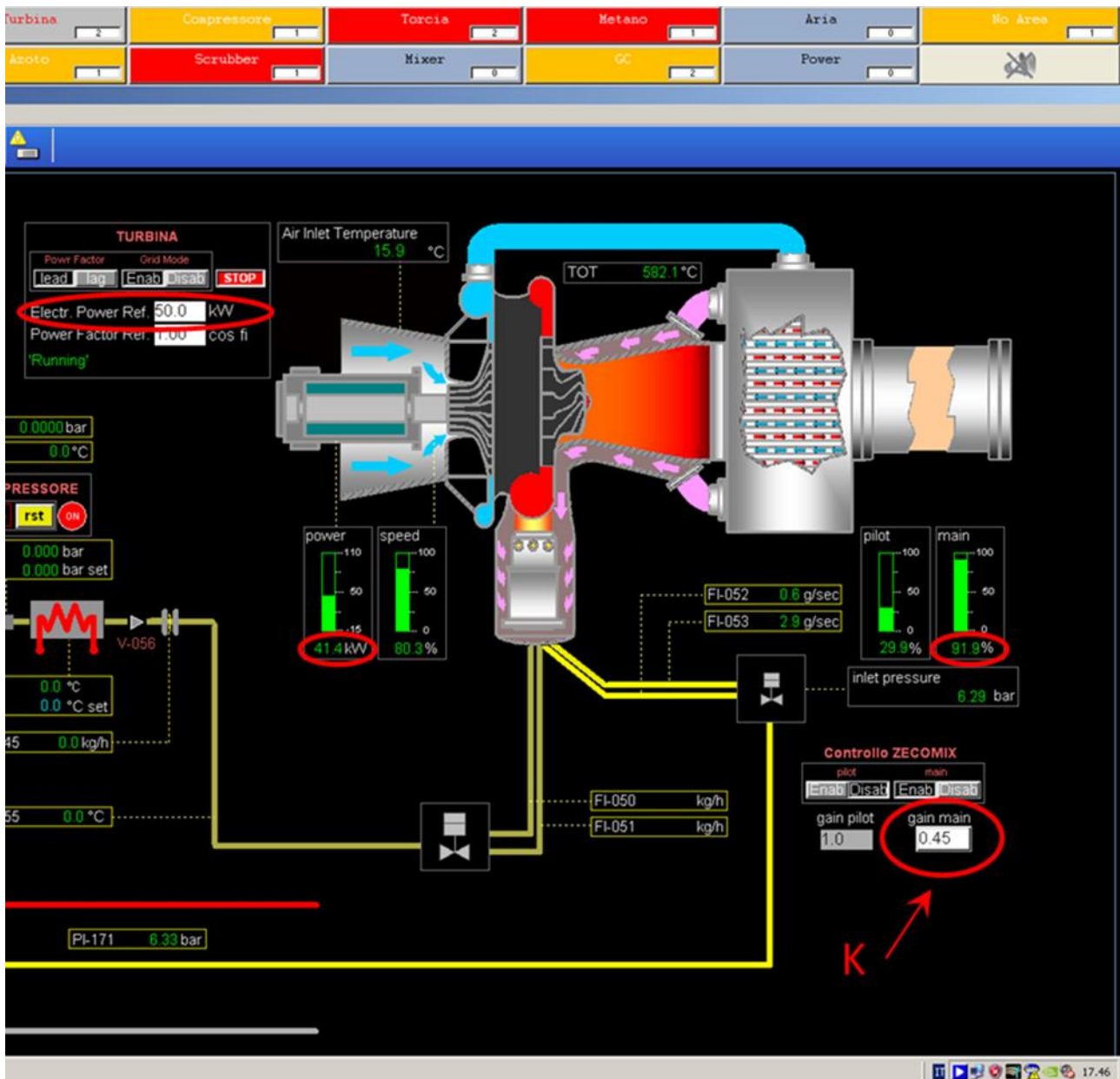


Figura 30. Screenshot del sinottico della μGT a valle dell'evento di sovra-condizionamento del segnale NGV. Si nota il valore di K, l'apertura della valvola *main* (% del segnale MGT) e il valore della potenza. Il sistema di controllo ha già iniziato la fase di riduzione del segnale MGT.

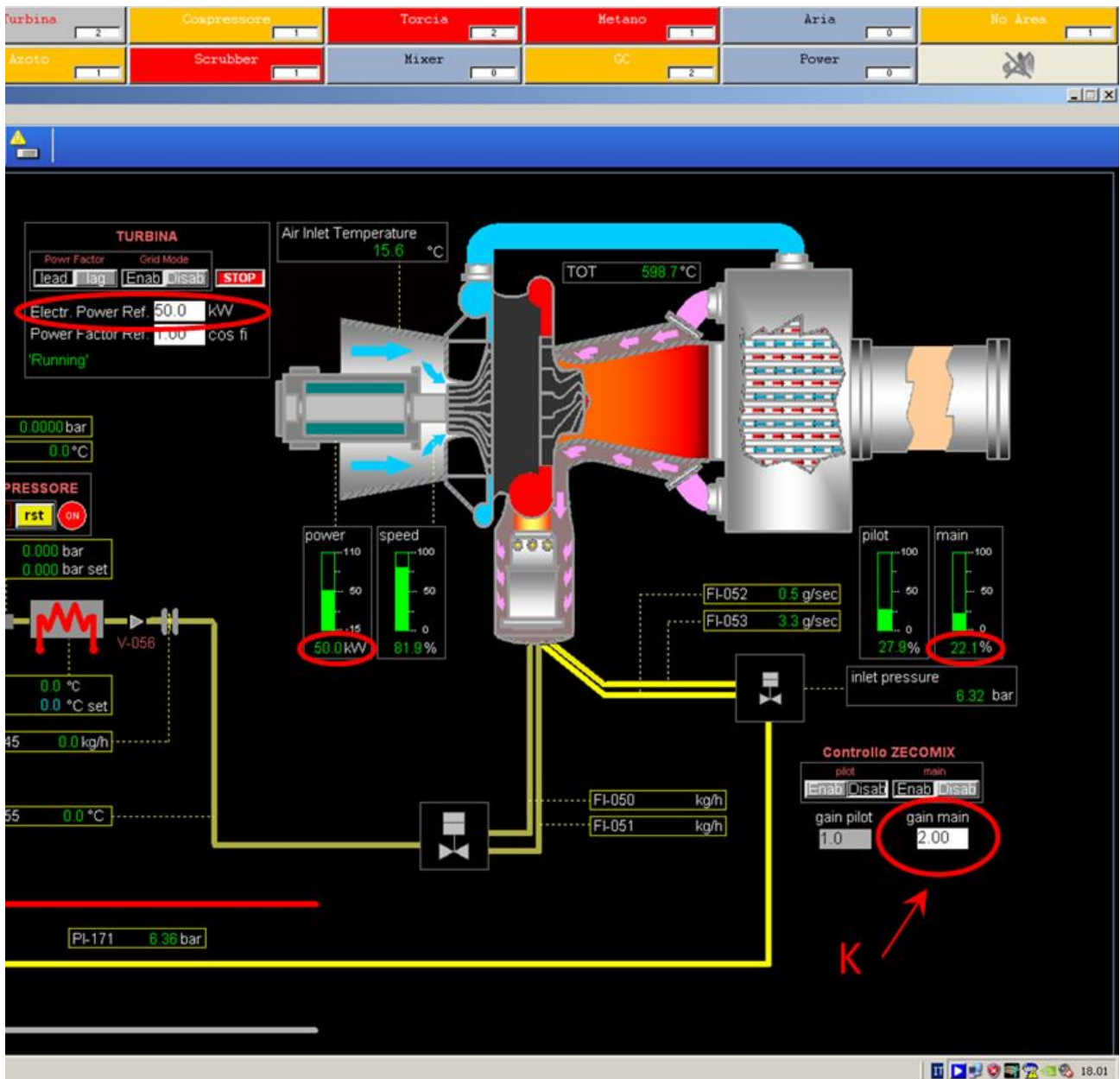


Figura 31. Screenshot del sinottico della μ GT durante il condizionamento del segnale NGV. Si nota il valore di K, l'apertura della valvola *main* (% del segnale MGT) e il valore della potenza. Il segnale MGT è nella fase di deriva negativa, mentre potenza e portata combustibile rimangono in linea con il *SET point*.

5 Conclusioni

Il principale obiettivo delle attività descritte in queste pagine consisteva nella definizione e nella validazione di una strategia di controllo efficace per l'alimentazione dual-fuel della μ GT Turbec T100. Le attività svolte sono da considerarsi preliminari ma fondamentali per la sperimentazione sull'utilizzo di miscele gassose ad alto contenuto di idrogeno e inerti quale combustibile per impianti turbogas. Tutti i test effettuati oltre a confermare la bontà delle scelte effettuate, prima fra tutte, la strategia di controllo per la transizione "a caldo" da gas naturale a syngas, consentono una visione più nitida degli obiettivi futuri. Tra questi, il prossimo passo consisterà nella duplicazione del sistema di alimentazione e nel test della strategia di transizione in condizioni sempre più prossime a quelle reali. Il primo di questa serie di test sarà realizzato eseguendo lo switch da "gas naturale a gas naturale", ovvero con due sistemi di alimentazione gemelli che consentiranno la validazione della procedura e la successiva automatizzazione mediante un algoritmo implementato in ambiente ABB Control Builder.

Quando ci si è posti l'obiettivo di questa annualità, si era consapevoli (forse non completamente) di quanto questo fosse "sfidante", tuttavia c'era contestualmente piena coscienza del valore della squadra impegnata nelle attività descritte. I numerosi test svolti sulla μ GT sono stati al contempo altrettanti test sullo spirito d'iniziativa, sull'entusiasmo, sulle competenze, sulla capacità di risolvere problemi mai affrontati prima.