



Ricerca di Sistema elettrico

GA.M.E.S. (GAs Monitoring by Emission Spectroscopy): adeguamento del supervisore per la gestione delle criticità, versione prototipale

C. Stringola, D. Zola, E. Giulietti, S. Scaglione, A. Gentili

GA.M.E.S. (GAs Monitoring by Emission Spectroscopy): adeguamento del supervisore per la gestione delle criticità, versione prototipale

C. Stringola, D. Zola, E. Giulietti, S. Scaglione, A. Gentili

Dicembre 2020 (Aprile 2021)

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 (PTR_19_21)

WP3: "Power to Gas" (P2G)

LA3.25: Integrazione P2G/sistemi generazione elettrica innovativi: fuel-flexibility – realizzazione e test sezione H2-AGATUR e sperimentazione ROMULUS

Responsabile del Progetto: Ing. Eugenio Giacomazzi, ENEA

Indice

SOMMARIO	4
1 INTRODUZIONE	4
2 DESCRIZIONE SINTETICA DEL FUNZIONAMENTO DI GA.M.E.S. (EX D.O.E.S)	6
3 ALGORITMI PER L’AUTOMAZIONE DI GA.M.E.S.	8
3.1 PROGRAMMA DI GESTIONE DELLE CRITICITÀ COMPLESSIVE DEL SISTEMA GA.M.E.S.	11
3.2 DESCRIZIONE DEI DIAGRAMMI DI FLUSSO PER LA GESTIONE DELLE CRITICITÀ DEI SINGOLI SOTTOSISTEMI	13
4 IMPLEMENTAZIONE DEGLI ALGORITMI DI FUNZIONAMENTO	20
4.1 PROGETTO LABVIEW: DEFINIZIONE DELLE VARIABILI CONDIVISE (BOOLEANE, NUMERICHE E STRINGHE).....	20
4.2 SIMULAZIONE DEI SOTTOSISTEMI DI D.O.E.S.-GA.M.E.S.	23
4.3 PROTOTIPO DI GESTIONE DELLE CRITICITÀ DI GA.M.E.S.	26
4.3.1 Controllo della Fase di Vuoto	26
4.3.2 Controllo dei parametri della Pompa Turbomolecolare	29
4.3.3 Controllo dei parametri del Generatore RF e degli Spettrometri.....	31
5 CONCLUSIONI.....	32
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	32
7 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	33

Sommario

L'attività svolta durante il secondo anno del Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 (PTR_19_21) per quanto riguarda la seconda parte della **Linea di Attività (LA) n.25** intitolata *“Integrazione P2G/sistemi generazione elettrica innovativi: fuel-flexibility – realizzazione e test sezione H2-AGATUR e sperimentazione ROMULUS”*, riguardante lo sviluppo hardware/software dello strumento D.O.E.S. (*Detection of Oxygen by Emission Spectroscopy*), che è stato rinominato a partire dal 2020, GA.M.E.S. (Gas Analysis Monitoring System), si è focalizzata sullo sviluppo del prototipo del supervisore dello strumento che integra le automazioni dei singoli sottosistemi.

Per garantire una maggiore autonomia e affidabilità del sistema è stato necessario affrontare due questioni:

1. lo sviluppo dell'**automatizzazione** dei singoli sottosistemi nel supervisore e la possibilità di avere il controllo e la lettura dei vari parametri in una sala operativa remota, in modo che possa operare in maniera stand-alone e con controllo remoto per lunghi periodi senza danneggiarsi;
2. lo sviluppo di una serie di **salvaguardie** prototipali in modo che D.O.E.S.-GA.M.E.S. sia in grado di andare in autoprotezione in caso di regimi dannosi per lo strumento.

Nel documento verranno descritti gli algoritmi per l'automazione e la gestione delle criticità dello strumento D.O.E.S.-GA.M.E.S., e la loro implementazione in ambiente LabVIEW.

1 Introduzione

Il Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 (PTR_19_21), della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale prevede tre diversi Work Package di progetto. In particolare, il Work Package che riguarda le attività di ricerca presenti in questo documento è il WP3, intitolato *“Power to Gas”* (P2G), perché le sue attività coprono le tecnologie della catena P2G e P2L (*“Power to Liquid”*), compresa la generazione elettrica flessibile da TurboGas (TG) come soluzione integrata per aumentare la sicurezza del sistema elettrico, per favorire la sua progressiva decarbonizzazione e la penetrazione delle energie rinnovabili.

L'obiettivo finale del WP3 è quindi quello di supportare l'infrastruttura di rete elettrica e garantire la diffusione delle energie rinnovabili, attraverso tre sotto-obiettivi:

1. sviluppare i sistemi di accumulo P2G finalizzati allo storage dell'eccesso di produzione da vRES (*“variable Renewable Energy Sources”*), ossia dalle fonti di energia rinnovabile non programmabili;
2. sviluppare sistemi innovativi per la produzione di H₂ e la sua conversione a CH₄;
3. studiare la fuel flexibility di impianti TurboGas.

Negli impianti TG risulta importante monitorare i gas combusti in modo che si possa seguire online il processo di combustione e di conseguenza l'efficienza della combustione stessa. Durante il precedente triennio di ricerca, l'ENEA ha sviluppato un sistema avanzato di monitoraggio delle specie chimiche nei gas combusti di scarico denominato D.O.E.S. (*Detection of Oxygen by Emission Spectroscopy*) [1-8]. Il significato dell'acronimo indica che, in origine, lo sviluppo dello strumento riguardava il monitoraggio dell'ossigeno in impianti di ossi-combustione senza fronte di fiamma. Lo sviluppo del sistema ha poi portato a investigare l'estensione delle sue possibilità al fine di consentire il monitoraggio, almeno semiquantitativo, di altre specie presenti nei gas di post combustione. Per tale motivo il sistema ha assunto il nome di GA.M.E.S. (*GAS Monitoring by Emission Spectroscopy*) [9]

Il sistema GA.M.E.S. utilizza la spettroscopia ottica di emissione nell'intervallo spettrale che va dall'ultravioletto (UV) al vicino infrarosso (NIR). La spettroscopia ottica in emissione permette di individuare gli elementi atomici e molecolari presenti in una miscela di gas mediante l'innesco di un plasma confinato in una regione spaziale e acquisendo lo spettro emesso.

Lo sviluppo del sistema GA.M.E.S. aveva come obiettivo finale, (che non coincideva con gli obiettivi dichiarati nel PTR perché incompatibili con le risorse e i tempi richiesti):

- la possibilità di essere interfacciato a sezioni d'impianto anche poco accessibili,
- di essere gestito completamente in remoto,
- di operare, a regime, in maniera stand-alone,
- di acquisisce gli spettri di emissione, identificare la presenza di alcune specie chimiche presenti nei gas (fumi) di postcombustione, quali H₂O, N₂, CO₂, CO, O₂, determinare la loro variazione percentuale relativa nel tempo.

Allo stato attuale, il piano di sviluppo dello strumento all'interno delle attività PTR ha permesso lo sviluppo di tutto quelle parti riguardanti la possibilità di avere un funzionamento in modo stand alone e in remoto dello strumento in tutto quello che riguarda il funzionamento dello strumento e l'acquisizione degli spettri dei gas di post-combustione. Ad oggi lo strumento può essere interfacciato a impianti di combustione e da remoto possono essere acquisiti gli spettri di emissione. L'affidabilità dei sottosistemi hardware/software ha dimostrato la possibilità di utilizzare lo strumento senza interruzione per diverse ore. Per avere la piena potenzialità dello strumento stand-alone, minimizzando quindi la necessità di un monitoraggio del personale anche da remoto, si dovrebbero effettuare sessioni di test portando lo strumento in condizioni critiche e per lunghe sessioni in modalità debug. In questa annualità sono stati sviluppati gli algoritmi già discussi in termini di diagrammi di flusso nella relazione *"Automatizzazione dei singoli sottosistemi di acquisizione e controllo del sistema DOES"* che hanno lo scopo di correggere in modo automatico le principali criticità identificate e che potrebbero compromettere l'operatività dello strumento.

Lo strumento oltre che funzionare correttamente in tutte le sue parti deve acquisire gli spettri. Lo scopo iniziale di D.O.E.S. era monitorare l'ossigeno ma dal 2019 abbiamo investigato la possibilità di estendere l'analisi alle principali specie presenti nei gas di combustione quali CO₂, O₂, H₂O, CO. L'acquisizione degli spettri e la loro analisi doveva servire ad identificare cambiamenti di regime nel sistema di combustione.

Al momento, l'analisi degli spettri acquisiti automaticamente viene svolta off-line e l'algoritmo utilizzato per fornire i dati utili per il monitoraggio del regime può essere implementato in un software che per essere realizzato necessita di ulteriori risorse. La descrizione dell'algoritmo off-line è descritta in un altro Rapporto Tecnico del PTR 2020 dal titolo: *"Sviluppo di un algoritmo off-line per l'analisi degli spettri dei gas di combustione in un bruciatore in scala di laboratorio"*.

2 Descrizione sintetica del funzionamento di GA.M.E.S. (ex D.O.E.S)

Una descrizione più dettagliata del sistema D.O.E.S – GA.M.E.S. è riportata nel Rapporto Tecnico in Ref. [7] , e di seguito si descriverà sinteticamente il regime in cui lo strumento acquisisce gli spettri e si accennerà alle principali criticità che possano interrompere l'acquisizione degli spettri o peggio portare al danneggiamento dello strumento.

Nella **Figura 1** è mostrato uno schema dello strumento.

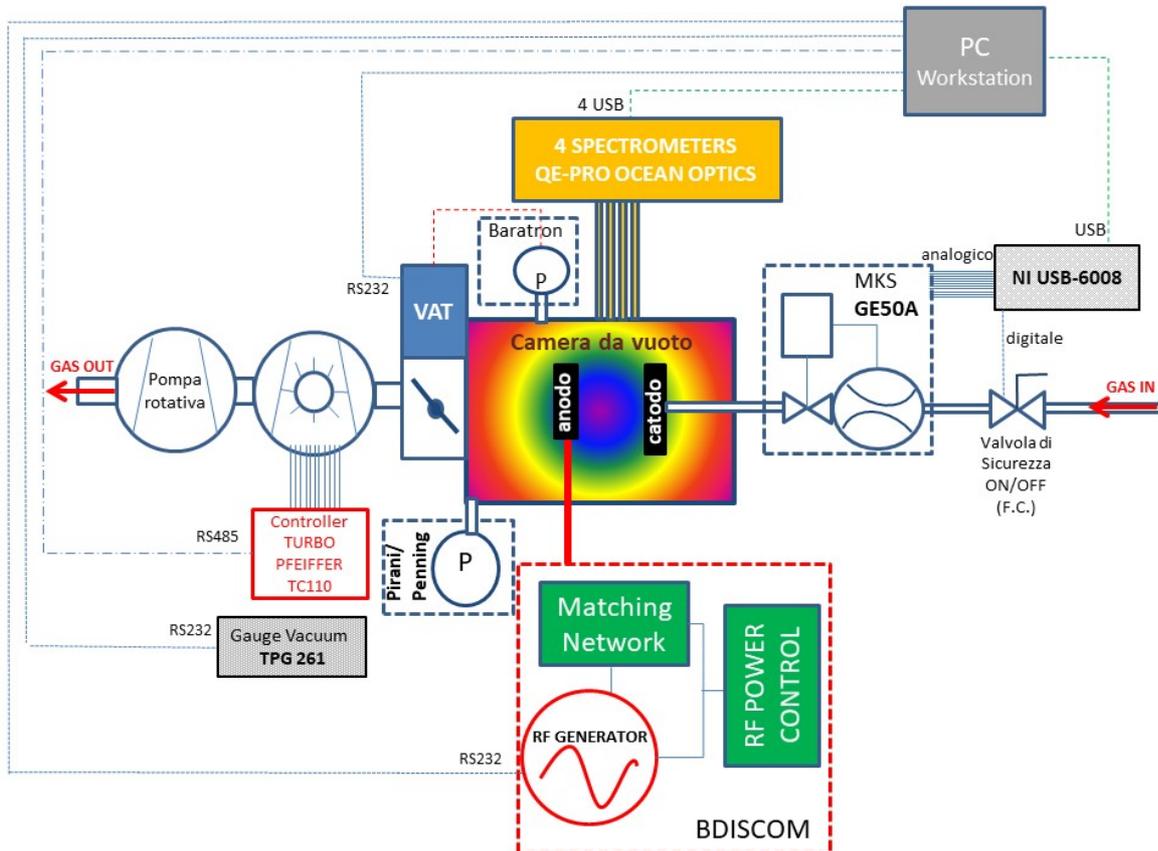


Figura 1. Schema attuale del sistema GA.M.E.S.

Il regime in cui lo strumento acquisisce gli spettri di emissione dei gas è caratterizzato dall'aver una pressione in camera di $50.0 \cdot 10^{-2}$ mbar (5 Pa) ottenuta mediante la pompa turbomolecolare avendo un flusso costante di gas di circa 20 sccm regolato dal flussimetro in ingresso MKS GE50A. La stabilità del valore di pressione è ottenuto grazie alla valvola a farfalla autoregolante VAT montata all'ingresso della pompa turbomolecolare. La VAT è retroazionata dal misuratore di pressione capacitivo BARATRON che garantisce un'elevata accuratezza nella misura della pressione. In condizioni di stabilità la VAT è aperta al 20% della sua apertura massima. Con queste condizioni di pressione, il generatore RF della BDISCOM eccita l'accensione del plasma e mediante la sua matching network mantiene il valore di tensione di self-bias tra anodo e catodo al valore costante di 300 V. I quattro spettrometri QEPRO della Ocean Optics misurano, ciascuno nel suo intervallo spettrale, gli spettri emessi del gas che fluisce in camera e i tutti i dati operativi vengono registrati sul disco del PC in cui è in esecuzione anche il programma di controllo e gestione di GA.M.E.S. che è stato scritto in LabVIEW

In condizioni normali la turbina compie 90.000 giri al minuto con un assorbimento del motore di circa 3 Watt. All'aumentare del carico sulla turbina, il motore assorbe più corrente senza che il numero dei giri diminuisca. Ciò comporta un incremento della temperatura del motore e dei cuscinetti della turbina. Al di sopra dei 60 W, i giri della turbina diminuiscono e al di sopra di una certa temperatura, (80°C circa), la pompa si spegne

perché va in protezione. In assenza di flusso di gas, la pompa turbomolecolare può funzionare con la valvola a farfalla completamente aperta se i valori di pressione misurati sono inferiori a 10^{-2} mbar. Al di sopra di questo valore, la pompa turbomolecolare deve essere spenta ed il pre-vuoto in camera viene ottenuto mediante la sola pompa rotativa posta a valle della pompa turbomolecolare Pfeiffer HIPACE 80.

Nel nostro caso, in cui si deve avere in camera una pressione maggiore di 10^{-2} mbar con la pompa turbomolecolare in funzione, è necessario aumentare l'impedenza d'ingresso della turbomolecolare mediante strozzature attuate dalla VAT. Le condizioni operative della pompa turbomolecolare devono essere tali che il numero dei giri della turbina siano stabilmente 90000 giri/min e le temperature del motore e dei cuscinetti non superino i 50°C .

Per tutti i regimi in cui la pressione in camera non sia quella di acquisizione degli spettri (ad esempio con la camera del plasma a pressione ambiente), il controllo della pressione in camera avviene mediante il misuratore Pirani/Penning e non più attraverso il misuratore di pressione capacitivo.

Durante il regime operativo in cui si acquisiscono gli spettri si deve controllare che non vi siano valori troppo elevati della potenza riflessa del generatore RF e in modo automatico si attuano delle correzioni, quali ad esempio il riadattamento dell'impedenza del circuito di eccitazione del plasma da parte della matching network.

Inoltre, i sensori CCD degli spettrometri sono raffreddati da celle Peltier e durante l'acquisizione degli spettri si deve misurare la temperatura degli spettrometri per evitare che le condizioni ambientali portino ad un aumento della temperatura sulle CCD tali da causare il malfunzionamento dello spettrometro. La temperatura delle CCD è tra 0°C e -10°C .

Infine è stata posta a monte del flussimetro, una valvola solenoidale che interrompe il flusso in camera in caso si verificano eventi non classificabili come fluttuazioni nel sistema da vuoto e che non sono corretti in tempi dell'ordine dei millisecondi dalla VAT che lavora stand-alone. Tali variazioni della pressione possono danneggiare la pompa turbomolecolare. In questo caso lo strumento va in autoprotezione e il generatore RF viene posto in standby e l'acquisizione delle misure viene sospesa. In base al tipo di evento che si è verificato lo strumento può recuperare in automatico l'operatività senza interrompere in modo definitivo le operazioni di monitoraggio.

Sulla base di quanto descritto sono stati implementati degli algoritmi che durante questa annualità sono stati realizzati in LabVIEW

3 Algoritmi per l'automazione di GA.M.E.S.

Per raggiungere l'obiettivo di rendere GA.M.E.S. stand-alone, è stato necessario implementare in house degli algoritmi in LabVIEW che mettano in relazione gli strumenti che compongono il sistema e allo stesso tempo l'algoritmo invii dei comandi ai sottosistemi affinché vengano effettuate delle operazioni che correggano alcune derive del regime dalla stabilità o, nel caso in cui le correzioni falliscano, attivino delle operazioni che mettano il sistema in autoprotezione. Questi algoritmi sono stati sviluppati in forma prototipale.

Nel seguito si illustra, mediante diagrammi di flusso, la logica degli algoritmi che sono stati sviluppati.

Per poter comprendere i diagrammi di flusso si deve fare riferimento alle **Tabella 1**, **Tabella 2** e **Tabella 3** già definite in [7] a cui si rimanda per maggiori dettagli.

In particolare, negli algoritmi, il controllo o l'esecuzione dei sottoprogrammi è determinata dal valore di alcune variabili che sono elencate in **Tabella 1**.

Lo stato di GA.M.E.S. è rappresentato da una variabile principale denominata FLAG_P che è utilizzata per gestire i vari processi e le criticità, e può assumere cinque valori, corrispondenti a cinque diversi colori:

- W, bianco → inizializzazione;
- G, verde → fase stabile;
- Y, giallo → primo livello critico;
- O, arancione → secondo livello critico;
- R, rosso → regime pericoloso con avvio della fase di sospensione/ripristino
- B, nero → interruzione o spegnimento.

In ogni fase in cui si trova ad operare il sistema D.O.E.S.-GA.M.E.S. il valore della variabile FLAG_P definisce le operazioni che devono essere effettuate dai vari sottosistemi.

Per leggere i diagrammi di flusso occorre tener conto che le variabili utilizzate sono del tipo YYY_ZZZ; hanno un acronimo YYY che identifica lo strumento e un suffisso ZZZ, che può non comparire nel nome della variabile, che identifica il tipo di variabile (attributo).

Nel caso di variabili di tipo flag, il nome ha il formato F_YYY, dove YYY identifica sempre lo strumento.

Nella **Tabella 1** sono elencate le variabili flag del programma di gestione di D.O.E.S-GA.M.E.S., il loro significato e i valori assunti [7].

Nella **Tabella 2** sono elencati gli acronimi YYY utilizzati per definire nel nome delle variabili gli strumenti a cui fanno riferimento;

Nella **Tabella 3** sono elencate le variabili utilizzate per ogni sottosistema di GA.M.E.S. riportando nella colonna "Attributo" il suffisso ZZZ, la descrizione e i possibili valori che può assumere.

Infine i prefissi R e W nei diagrammi di flusso indicano il tipo di operazione sulla variabile YYY_ZZZ ovvero un'operazione di lettura sulla variabile (R) o l'assegnazione di un valore alla variabile (W).

Tabella 1. Variabili flag del programma di gestione di D.O.E.S-GA.M.E.S., loro significato e valori assunti [7].

NOME VARIABILE	DESCRIZIONE	TIPO VARIABILE	VALORI
FLAG_P	FLAG_P è la variabile principale di D.O.E.S-GA.M.E.S. ed è utilizzata per gestire i processi e le criticità	FLAG	W = inizializzazione D.O.E.S.; G = GA.M.E.S. stabile, operatività normale; Y = criticità bassa; O = criticità alta; R = errore o condizioni che impongono sospensione o blocco; B = arresto di GA.M.E.S.
F_PR	FLAG Pompa Rotativa	FLAG	OK = risponde in remoto; NOK = non risponde.
F_PT	FLAG Pompa Turbo	FLAG	OK = risponde in remoto; NOK = non risponde.
F_VS	FLAG Valvola Solenoidale	FLAG	OK = risponde in remoto; NOK = non risponde.
F_VAT	FLAG Valvola a farfalla VAT	FLAG	OK = risponde in remoto; NOK = non risponde.
F_FL	FLAG Flussimetro	FLAG	OK = risponde in remoto; NOK = non risponde.
F_RF	FLAG Generatore a Radio Frequenza	FLAG	OK = risponde in remoto; NOK = non risponde.
F_SP	FLAG Spettrometri	FLAG	OK = risponde in remoto; NOK = non risponde.

Tabella 2. Acronimi relativi alla Tabella 1 [7].

STRUMENTO	DESCRIZIONE
PR	Pompa rotativa
PT	Pompa Turbomolecolare
VS	Valvola Solenoidale
VAT	Valvola a farfalla automatica
FL	Flussimetro in ingresso a GA.M.E.S.
RF	Generatore a Radio Frequenza
SP	Spettrometri
PP	Misuratore di pressione Piranni Penning
PB	Misuratore di Pressione capacitivo Baratron (in GA.M.E.S. è gestito dalla VAT)
PC	Computer di D.O.E.S-GA.M.E.S.

Tabella 3. Attributi dello strumento e possibili valori corrispondenti [7].

STRUMENTO	ATTRIBUTO	DESCRIZIONE	VALORE
PR	ST	Stato della Pompa Rotativa, accesa = ON o spenta = OFF	ON / OFF
VS	ST	Stato della Valvola Solenoidale: Aperta = ON Chiusa = OFF	ON / OFF
VAT	ST	Stato della Valvola a Farfalla: accesa = ON; spenta = OFF	ON / OFF
VAT	MOD	Modalità di controllo della VAT: pressione = P; apertura=V	P/V
VAT	VAL	Valore di apertura della VAT in percentuale	0% -100%
VAT	PB	Valore di pressione di feedback della VAT in microbar. Il valore è riferito alla misuratore di pressione capacitivo PB	0 – 100 µbar
FL	ST	Stato del Flussimetro acceso=accesso o spento = OFF	ON / OFF
FL	VAL	Valore del flusso entrante	0-500 sccm
PP	ST	Stato della misuratore di pressione Pirani Penning	ON / OFF
PP	VAL	Valore di pressione misurato (solo lettura)	10 ⁻⁹ mbar÷ 1000mbar
RF	ST	Stato del generatore RF acceso = ON spento = OFF	ON / OFF
RF	MOD	Modalità priorità sul controllo Potenza = P, Tune=T, Load= L, Vbias = V	P, T, L, V
RF	AUTO	AutoTune SI = ON NO = OFF	ON / OFF
RF	PW	Potenza erogata selezionata	0 W – 250 W
RF	PWF	Potenza diretta misurata (solo lettura)	0 W - 250 W
RF	PWR	Potenza riflessa misurata (solo lettura)	0 W - 250 W
RF	TUNE	Valori del tune (matching network)	0% - 100%
RF	LOAD	Valori del load (matching network)	0% - 100%
RF	VB	Valore della tensione di Bias	0 V - 500 V
RF	PWS	Generatore eroga potenza. SI= ON NO = OFF	ON / OFF
RF	REM	Modalità remota o locale Remota = ON, Locale = OFF	OFF
PT	ST	Stato della Pompa Turbomolecolare: accesa = ON spenta = OFF	ON / OFF
PT	GIR	Numero di Giri della pompa in percentuale	0 – 100 %
PT	TMO	Temperatura motore	< 90 °C
PT	TCU	Temperatura cuscinetti della turbina	< 90 °C
PT	TEL	Temperatura dell'elettronica	< 60 °C
SP	ST	Stato degli Spettrometri; acceso = ON spento = OFF	ON / OFF
SP	BKE	Rumore elettronico eliminato: SI = ON; NO = OFF	ON / OFF
SP	BKG	Background acquisito SI = ON; NO = OFF	ON / OFF
SP	INT	Tempo d'integrazione	8 ms – 60000 ms
SP	MED	Medie sugli spettri	1 - 1000
SP	TPn	Temperatura della Peltier dello spettrometro n	< 50°C
SP	TSn	Temperatura della CCD dello spettrometro n	-40 °C ÷ 20 °C
SP	REC	Stato della registrazione degli spettri: SI = ON; NO = OFF	ON / OFF
SP	RST	Inizializzazione spettrometri (Reset)	SI

3.1 Programma di gestione delle criticità complessive del sistema *GA.M.E.S.*

Il componente più fragile del sistema è la Pompa Turbomolecolare (PT), quindi l'algoritmo destinato alla gestione delle criticità ha come livello di controllo prioritario il monitoraggio continuo dei parametri della pompa turbomolecolare quali il numero dei giri, la corrente assorbita e la temperatura dei cuscinetti. La misura di questi parametri e il controllo del regime di funzionamento dei vari sottosistemi volto a mantenerli stabili nel tempo rappresenta un buon metodo per correggere eventuali regimi che potrebbero portare al danneggiamento del sistema.

Nel caso in cui il valore di uno dei parametri sopraelencati dovesse essere al di fuori dei valori consigliati dal costruttore, il flusso dei gas in ingresso può essere diminuito in modo da ridurre il carico sulla Pompa PT. Ovviamente la correzione non deve portare a condizioni in cui il flusso è estremamente piccolo; infatti, *GA.M.E.S.* è tanto più veloce nel rilevare variazioni di composizione chimica nel gas di ingresso quanto più alto è il flusso in ingresso. Per tale motivo il regime ottimale è sempre ottenuto mantenendo l'apertura della valvola a farfalla VAT tra il 20% e il 25% della apertura completa. Inoltre la riduzione del flusso non può mai comportare che in camera la pressione abbia un valore diverso da quello pari a 50 μ bar perché in questo caso anche l'acquisizione degli spettri deve essere interrotta e per valori molto inferiori al valore fissato può spegnersi spontaneamente il plasma con il generatore che continua ad erogare potenza.

Nel caso in cui vi sia un aumento veloce delle temperature dei cuscinetti (PT_TCU) o la diminuzione del numero di giri (PT_GIR) della turbopompa molecolare TP, si può diminuire o bloccare il flusso in ingresso mediante la Valvola solenoideale (VS) e chiudere completamente la VAT fino al ripristino delle condizioni ottimali per la turbomolecolare.

In Figura 2, è riportato il diagramma di flusso dell'algoritmo utilizzato per il controllo complessivo delle criticità durante il funzionamento di *GA.M.E.S.* anche nel caso si parta dall'avvio dello strumento fino allo spegnimento. L'algoritmo è stato modificato rispetto a quello riportato nella relazione in Ref.7 tenendo conto di un errore semantico emerso in fase d'implementazione del software in LabVIEW.

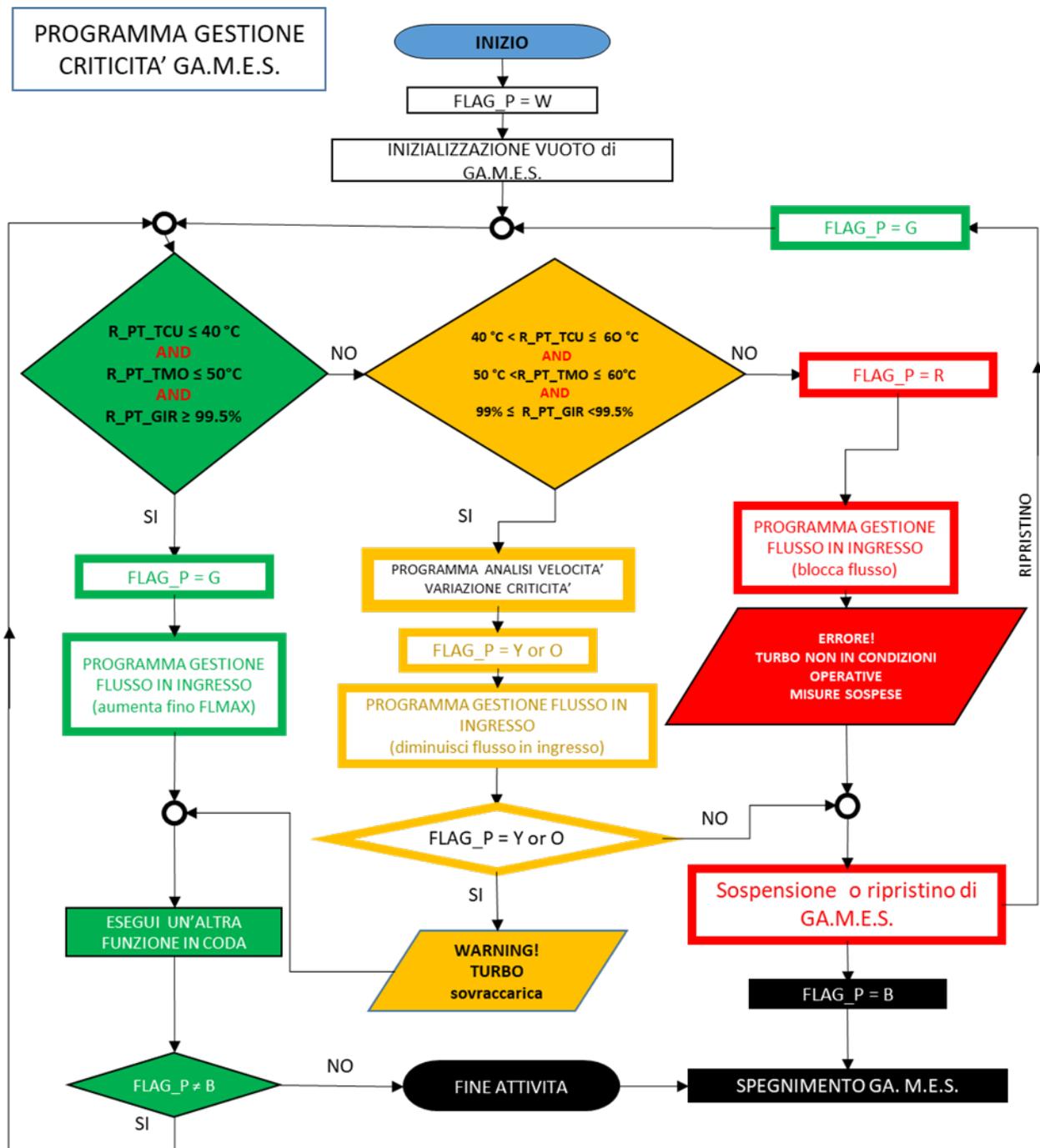


Figura 2. Gestione delle criticità complessive del sistema GA.M.E.S. [7].

L'algoritmo ha la seguente logica:

- I. Nel caso in cui si accenda il GA.M.E.S., la variabile FLAG_P = W e viene quindi avviato il sottoprogramma relativo all'inizializzazione di GA.M.E.S. Tra le varie operazioni che vengono eseguite, si menziona il raggiungimento delle condizioni iniziali che abilitano l'acquisizione degli spettri; in particolare, in questo regime, la pressione nella camera del plasma è pari a 50 μbar, il flusso in ingresso è non nullo e il plasma è acceso. Se le operazioni iniziali vanno a buon fine e non vi è alcun errore che indichi malfunzionamento dei sottosistemi o emergano problemi che richiedano la manutenzione, (quali ad esempio perdite di vuoto sull'impianto), il programma entra in un ciclo chiuso da cui si esce solamente nel caso in cui GA.M.E.S. viene spento.

- II. GA.M.E.S. si spegne tutte le volte che si ha un errore irreversibile, un regime pericoloso che non può essere corretto in modo automatico, l'operatore decide la fine dell'attività di monitoraggio. In questo caso FLAG_P = B e viene eseguito il sottoprogramma che spegne tutti gli strumenti di GA.M.E.S.
- III. Durante il ciclo normale di funzionamento di GA.M.E.S., il FLAG_P può assumere il valore G, Y, O, R che indicano livelli crescente di criticità. Il livello di criticità viene determinato sostanzialmente dai parametri di funzionamento della pompa turbomolecolare. In particolare vengono continuamente acquisite le temperature del motore (TMO) e dei cuscinetti della turbina (TCU) e il numero percentuale dei giri della turbina (GIR).
- IV. Così come illustrato nel diagramma di flusso, In base al valore di TMO, TCU e GIR il programma seleziona il livello di criticità.
- V. Nel caso che non vi sia alcuna criticità allora FLAG_P = G. Il sottoprogramma di gestione flusso può operare una correzione sul flusso in ingresso volto ad avere il massimo flusso sostenibile dalla pompa turbomolecolare (20 sccm).
- VI. Nei casi in cui TMO, TCU e GIR siano nell'intervallo in cui il regime è critico ma non pericoloso allora il FLAG_P = Y or O. Il sottoprogramma di "gestione del flusso" per diminuire il carico sulla pompa turbomolecolare diminuisce il flusso tanto più velocemente quanto più permane lo stato di criticità. Si passa dallo stato FLAG_P = Y a quello di FLAG_P = O se la correzione non cambia la derivata dell'incremento positivo dei parametri menzionati.
- VII. Se TMO e TCU > 60° C e GIR < 99% allora la pompa turbomolecolare è in condizioni di operatività critica e il livello di criticità diventa R e si passa immediatamente al sottoprogramma di "SOSPENSIONE E RIPRISTINO".
- VIII. Ogni condizione di errore che si originasse in qualsiasi componente di GA.M.E.S. durante l'esecuzione del programma determina una condizione di FLAG_P = R nella gestione remota del singolo componente di GA.M.E.S., (ad esempio: strumento che non risponde in remoto).
- IX. Se GA.M.E.S. si trova nei regimi caratterizzati dal valore di FLAG_P=G, Y, O, il monitoraggio non viene interrotto. Il sottoprogramma dedicato al monitoraggio dei gas registra gli spettri, li elabora e fornisce l'andamento temporale della percentuale relativa dell'ossigeno nel gas in ingresso. Relativamente a questa ultima funzionalità non è stata ancora completato il progetto dell'algoritmo che consente di fare tale operazione on-line ma come dichiarato negli obiettivi dell'annualità è possibile realizzare questa analisi off-line sugli spettri acquisiti on-line.

Un'altra criticità non ancora controllata può essere rappresentata dalla non accensione del plasma nella fase di avvio, che può essere corretta aumentando temporaneamente la potenza trasferita dal generatore RF, sospendendo la retroazione sul valore di self-bias. In queste fasi l'acquisizione degli spettri è sospesa.

L'esperienza acquisita effettuando i test in laboratorio e sugli impianti hanno mostrato che su diverse ore di funzionamento G.A.M.E.S. acquisisce gli spettri stabilmente e i sistemi automatici integrati nella valvola VAT e del Generatore di RF garantiscono stabilità nelle caratteristiche del plasma e la ripetibilità delle misure.

3.2 *Descrizione dei diagrammi di flusso per la gestione delle criticità dei singoli sottosistemi*

GA.M.E.S. ha diversi sottosistemi e per ognuno di questi è stato realizzato un algoritmo che ne controlla il funzionamento, questi algoritmi sono collegati all'algoritmo di controllo principale come se fossero sottoprogrammi che funzionano ciascuno in real-time

1. **Fase di inizializzazione del Vuoto di GA.M.E.S. (Figura 3):** Quando si avvia il programma di controllo di GA.M.E.S. il FLAG_P ha sempre il valore W e il sistema viene inizializzato, ma questo non vuol dire che i sottosistemi di GA.M.E.S. siano tutti spenti e inattivi. Può accadere infatti che vi sia stata un'interruzione improvvisa durante il monitoraggio, (crash o riavvio imprevisto del PC) e all'avvio del programma non tutto sia spento. All'avvio del sottoprogramma di inizializzazione il cui diagramma di

flusso è mostrato in **Figura 3**, viene spento il generatore di RF, si chiudono la Valvola Solenoidale VS, il Flussimetro FL, la Valvola a farfalla VAT e si inizializzano gli Spettrometri (SP). Controlla che lo strumento abbia risposto, altrimenti parte il sottoprogramma di gestione degli errori che in base al valore dei flag degli strumenti, individua il sottosistema che non risponde e cerca di ripristinarlo. Se fallisce va tutto in arresto. Se all'avvio la pompa turbomolecolare (PT) è già in funzione, allora viene chiamato il sottoprogramma di gestione della pompa turbomolecolare. In questo sottoprogramma si cerca di ripristinare il corretto stato di inizializzazione:

- a) Se la pompa turbomolecolare (PT) è in uno stato operativo corretto, la Pompa Rotativa (PR) è già accesa e la pressione in camera misurata dal Pirani Penning (PP) è inferiore a $7.0 \cdot 10^{-2}$ mbar, il programma di gestione della pompa turbomolecolare apre la VAT al 100% (VAT_VAL=100) e ritorna al programma chiamante nel punto indicato nel diagramma di flusso in **Figura 3** e l'inizializzazione continua saltando alcuni passi.
- b) Se la PT è ancora in uno stato operativo corretto, la PP_VAL < $7.0 \cdot 10^{-2}$ mbar ma la PR è spenta, viene accesa la Pompa Rotativa (PR) e si scrive W_VAT_VAL=100 e il sottoprogramma di gestione della pompa turbomolecolare ritorna al programma chiamante nel punto indicato nel diagramma di flusso in **Figura 3**, saltando gli stessi passi.
- c) Negli altri casi in cui non vi è malfunzionamento di PT, PR e PP, il programma di gestione opera nella direzione di produrre la condizione descritta al punto a).
- d) In caso di malfunzionamento di uno dei componenti, il programma di gestione delle criticità richiama il sottoprogramma di gestione degli errori.

Nel caso in cui la PT non fosse già accesa:

- a. viene accesa la PR, e la VAT viene aperta completamente: W_VAT_VAL =100.
- b. Quando PP_VAL raggiunge un valore pari a $PP_VAL=7 \cdot 10^{-2}$ mbar, viene avviata la PT (PT_S = ON). La camera di GA.M.E.S. viene pompata fino al raggiungimento del vuoto base pari $PP_VAL=10^{-6}$ mbar. Durante la fase in cui la turbo sta pompando per raggiungere il vuoto limite un sottoprogramma controlla che i parametri operativi della PT siano nella norma.
- c. Se i due valori di set point della pressione non vengono raggiunti in un tempo predefinito vuol dire che c'è una perdita nella linea o le pompe hanno qualche problema.
- d. Se in questa fase uno degli strumenti di GA.M.E.S. non risponde il programma richiama il sottoprogramma della gestione degli errori.

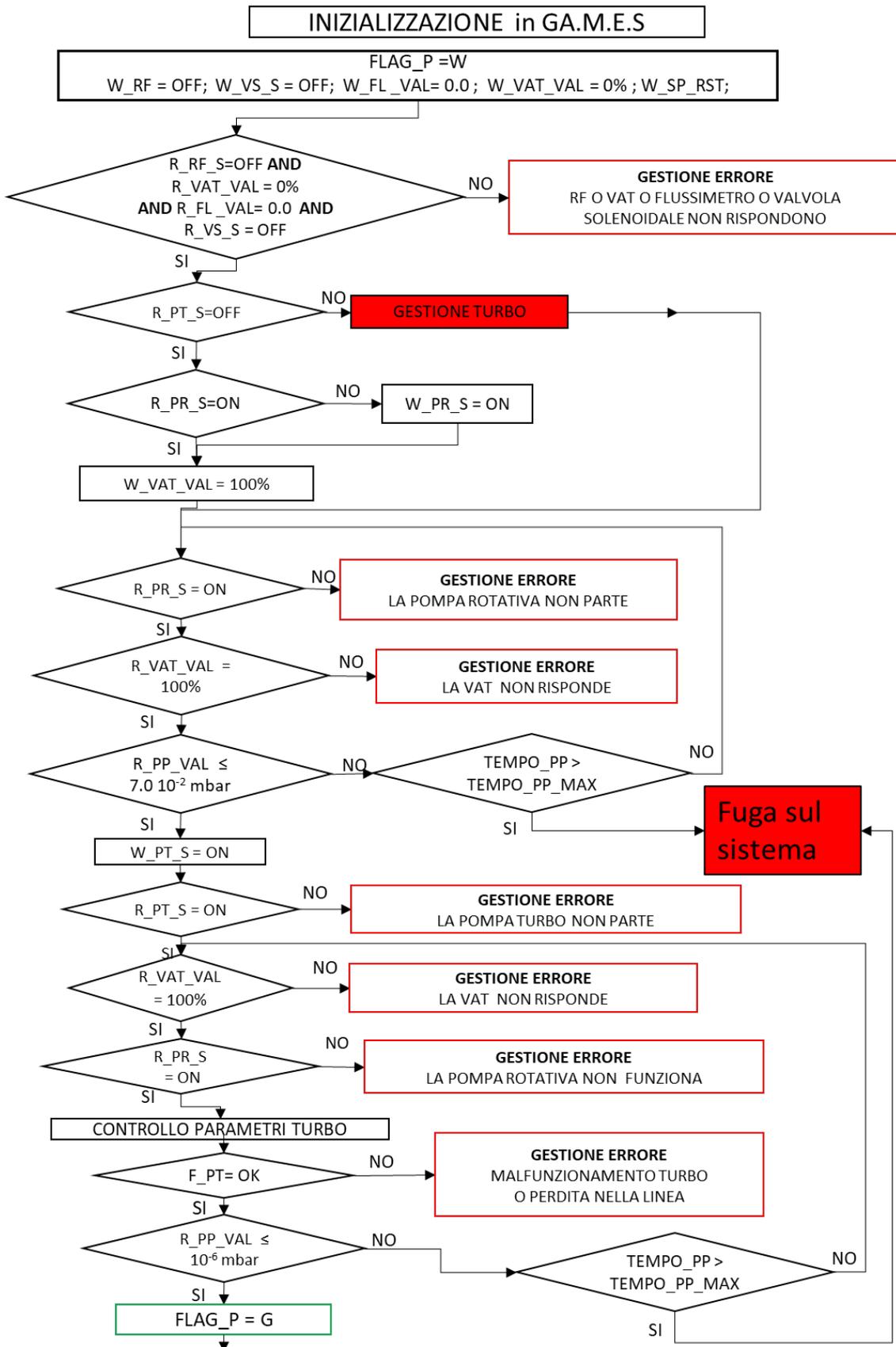


Figura 3. Diagramma della fase di inizializzazione del vuoto in G.A.M.E.S.

- 2. Gestione del flusso dei gas in ingresso (Figura 4):** Il sottoprogramma di gestione del flusso deve garantire che il monitoraggio sia continuo senza che vi siano interruzioni nell'acquisizione a causa di regimi critici della pompa turbomolecolare causati dal flusso troppo alto in ingresso. Allo stesso tempo, il flusso deve essere sempre il massimo possibile perché ciò riduce i tempi di risposta rispetto a variazioni della concentrazione dei gas nella miscela che avvengono nella linea a monte di GA.M.E.S. Questo è l'algoritmo più complicato perché in questo sottoprogramma si determinano le correzioni sul flusso in ingresso in modo da avere il migliore regime possibile ed eventuali correzioni siano effettuate velocemente ed efficacemente.

Lo stato di GA.M.E.S. nel momento in cui viene eseguito il sottoprogramma è quello in cui la VAT è in modalità VAT_MOD = P con retroazione data dal valore di pressione PB_VAL= 50 μ bar misurata dal sensore capacitivo Baratron, molto più preciso del Pirani Penning. La Valvola Solenoideale (VS) è aperta e il flusso FL_VAL ha un valore maggiore di 0.

Le azioni che il sottoprogramma esplica dipendono dal valore del FLAG_P:

- a) FLAG_P = G. Lo stato di GA.M.E.S. non è critico. Se FL_VAL < FLMAX and VAT_VAL < 25% allora FL_VAL viene aumentato di una frazione di flusso data $CG \times FLMAX$. Il coefficiente CG è determinato da un controllo PID software.
Se FL_VAL = FLMAX OR VAT_VAL = 25% non viene eseguito alcun controllo sul flusso.
- b) Il programma di gestione criticità ha determinato che PT non è in un regime ottimale quindi il PID control determina un coefficiente CY e viene ridotto il flusso in ingresso secondo $FL_VAL = FL_VAL - CY \times FLMAX$
- c) FLAG_P=O. Il programma di gestione criticità ha determinato che la turbo nonostante le correzioni in atto non ritorna in un regime ottimale quindi il flusso viene ridotto ancora più velocemente. Il coefficiente del PID control sarà ora $CO > CY$
- d) FLAG_P non ha nessuno dei precedenti valori. Viene bloccato il flusso, chiusa la valvola solenoideale e chiusa la valvola a farfalla.
- e) Può accadere che FL_VAL vada a zero durante le fasi di correzioni del flusso per FLAG_P=Y oppure FLAG_P=O è quindi non è possibile in questo modo continuare ad acquisire gli spettri. Il sottoprogramma cambia lo stato critico di GA.M.E.S ponendo FLAG_P=R.

Se il controllo remoto dei sottosistemi non rivela errori, il sottoprogramma ritorna al programma chiamante altrimenti il controllo passa alla gestione degli errori.

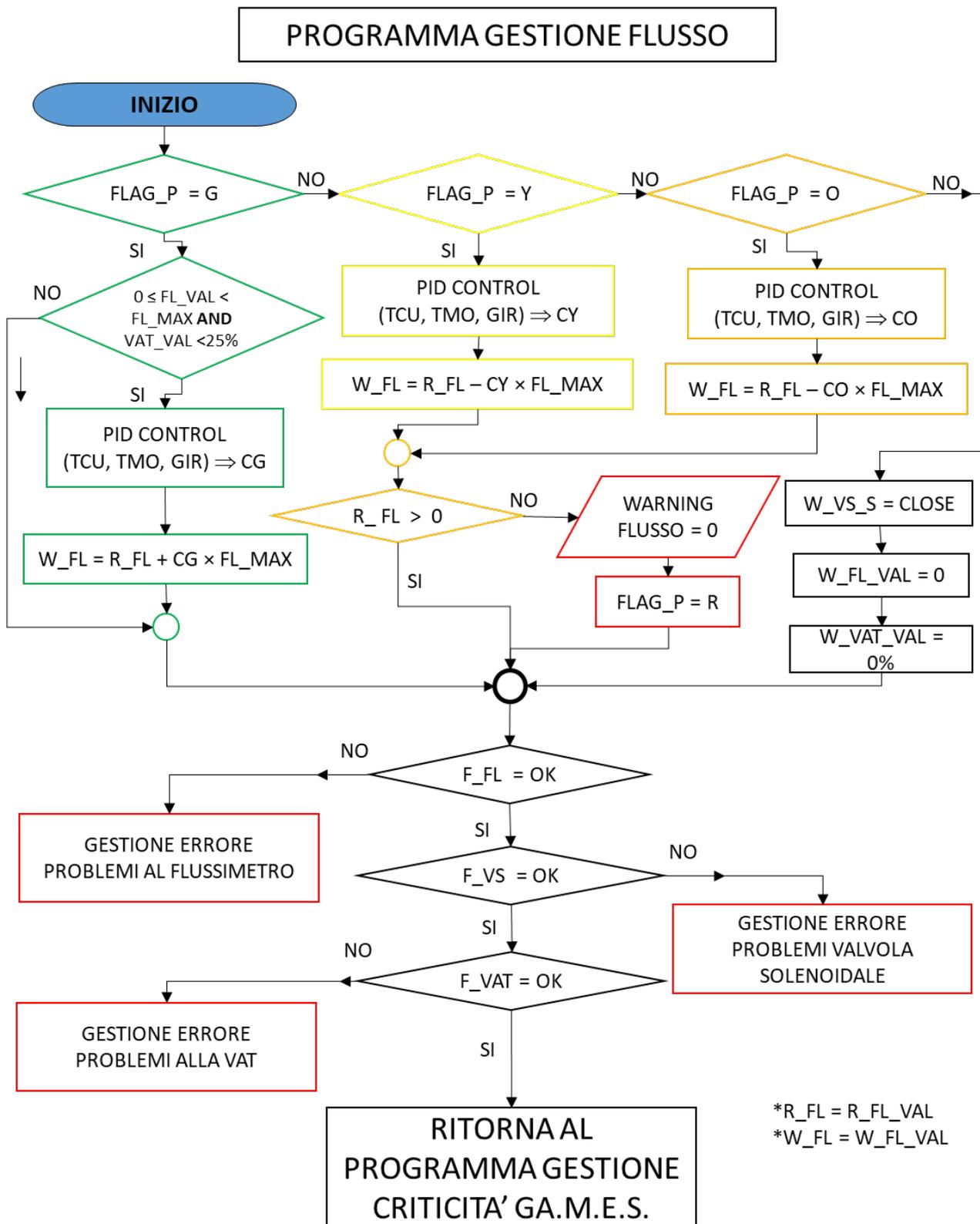


Figura 4. Diagramma della gestione del flusso dei gas in ingresso al sistema [7].

3. **Programma di gestione delle criticità del Generatore di RF (Figura 5):** Anche questo è un sottoprogramma del programma gestione criticità di GA.M.E.S. Questo programma deve garantire che il Valore della tensione di Bias (VB) sia costante e che la potenza riflessa sia trascurabile. Il Generatore di RF e la Matching Network sono già automatizzati a livello hardware. Il compito del sottoprogramma è monitorare il funzionamento e, in caso di problemi, gestire il malfunzionamento o attuare delle correzioni. Se il FLAG_P ha il valore G, Y, O allora il programma controlla che la potenza emessa è automaticamente retro-azionata al valore di self-bias ai capi dell'anodo e del catodo che deve rimanere costante (300 V). Monitora che la potenza riflessa sia al massimo l'1% della potenza diretta. In caso contrario agisce sulla Matching Network per minimizzarla (comando AUTO TUNE). Se Il FLAG_P ha un valore diverso da G, Y, O allora spegne il generatore RF.

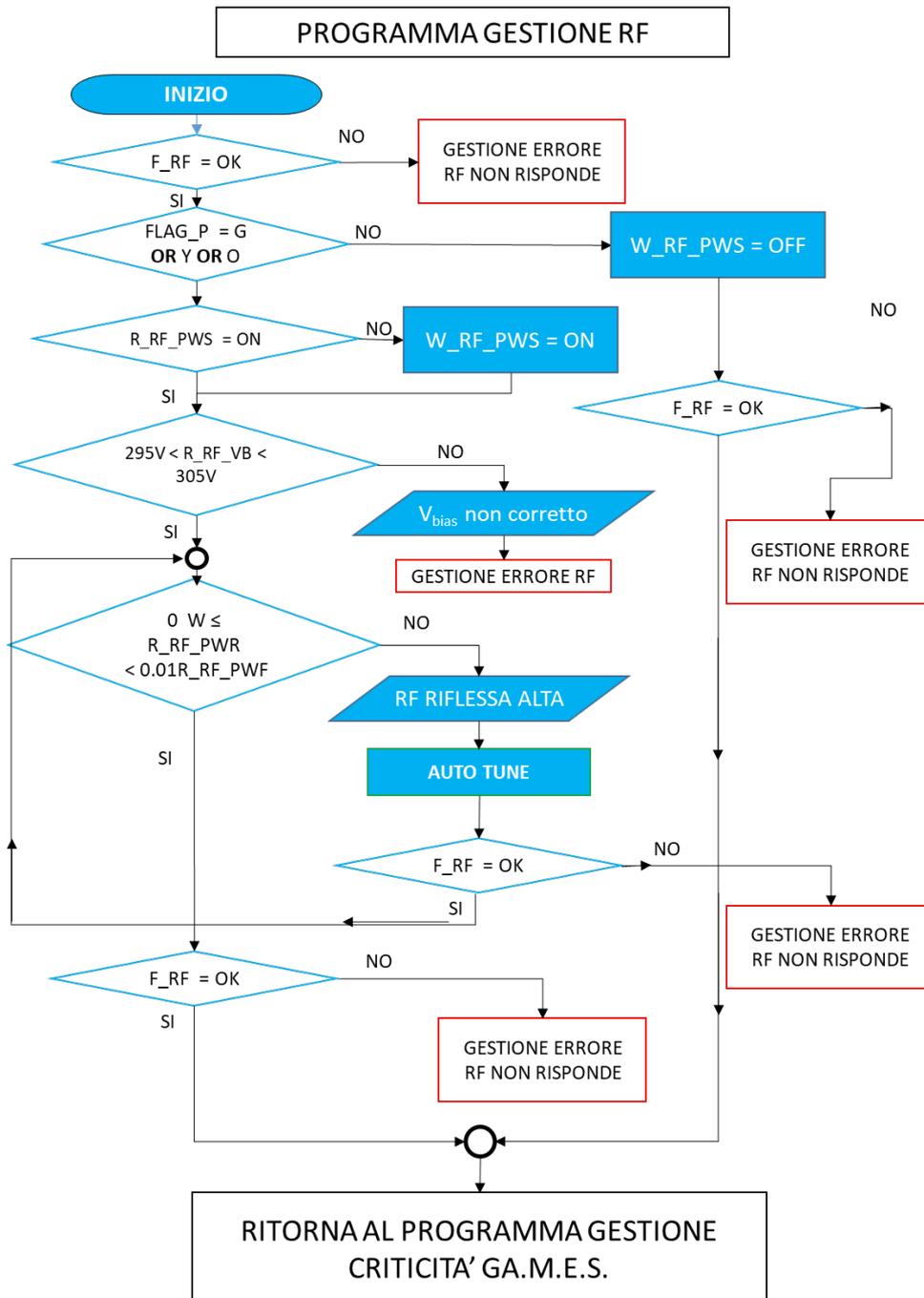


Figura 5. Diagramma di flusso del programma di gestione delle criticità del Generatore a RF [7].

4. **Programma di gestione delle criticità degli Spettrometri (Figura 6):** L'emissione ottica del plasma è raccolta da 4 fibre ottiche UV grade (con core da 600 μm) ed è acquisita mediante 4 diversi Spettrometri QE-PRO della Ocean Optics collegati a un PC tramite hub USB, i cui spettri sono acquisiti tramite un software in LabVIEW; attualmente si acquisisce uno spettro completo ogni 0.5 sec. Possibili criticità in questa fase potrebbero essere dovute all'instabilità del plasma che potrebbero essere corrette agendo sul Generatore di RF, inoltre la temperatura ambiente elevata potrebbero portare la temperatura delle Peltier, che raffreddano le CCD, a valori al di sopra dei 50 °C.

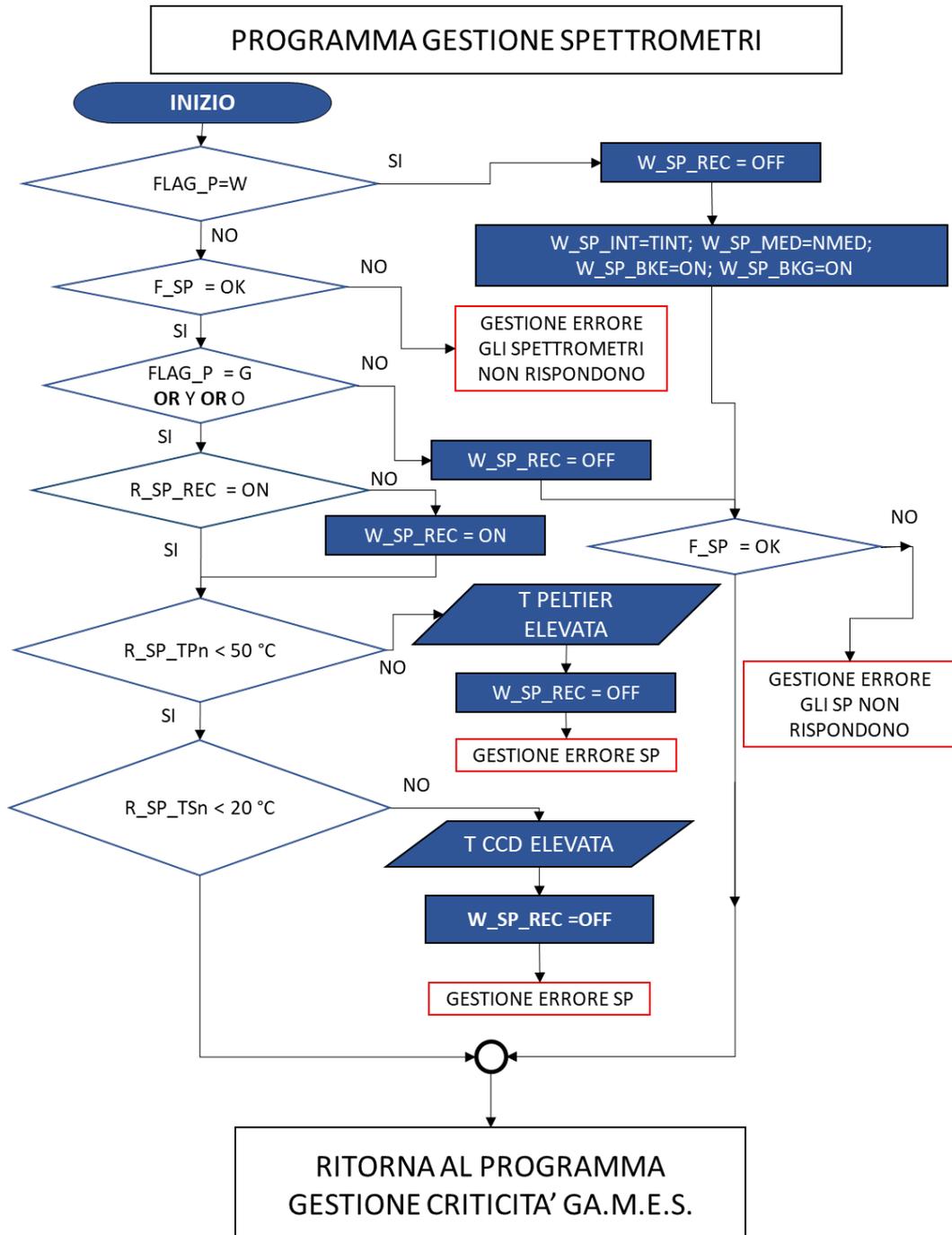
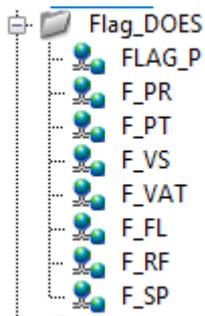


Figura 6. Diagramma della sezione relativa alla gestione delle criticità degli Spettrometri [7].

4 Implementazione degli algoritmi di funzionamento

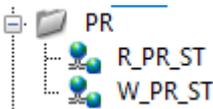
4.1 Progetto LabVIEW: definizione delle variabili condivise (booleane, numeriche e stringhe)

Partendo dalle **Tabella 1**, **Tabella 2** e **Tabella 3** sono state definite alcune variabili (**Figura 7 ÷ Figura 15**) all'interno del progetto LabVIEW che si occupa della gestione delle criticità del sistema D.O.E.S.- GA.M.E.S. I nomi delle variabili condivise dei sottosistemi presentano il prefisso "W_" (Write) per i valori che si vogliono impostare, e "R_" (Read) per i valori che da leggere.



	Path	Name	Var Type	Data Type	Network-Published	RT FIFO	Logging	Alarming	Scaling	Initial Value	Description: Enable	Description: Description
FLAG_P	...lib/SV_DOES/Flag_DOES/	FLAG_P	Network-Publis...	String	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)		(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Flag principale di DOES (W,G,Y,O,R,B)
F_PR	...lib/SV_DOES/Flag_DOES/	F_PR	Network-Publis...	Boolean	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)		(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Flag Pompa Rotativa OK/NOK (T/F)
F_PT	...lib/SV_DOES/Flag_DOES/	F_PT	Network-Publis...	Boolean	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)		(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Flag Pompa Turbo OK/NOK (T/F)
F_VS	...lib/SV_DOES/Flag_DOES/	F_VS	Network-Publis...	Boolean	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)		(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Flag Valvola Solenoide OK/NOK (T/F)
F_VAT	...lib/SV_DOES/Flag_DOES/	F_VAT	Network-Publis...	Boolean	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)		(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Flag Valvola VAT OK/NOK (T/F)
F_FL	...lib/SV_DOES/Flag_DOES/	F_FL	Network-Publis...	Boolean	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)		(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Flag Flussimetro OK/NOK (T/F)
F_RF	...lib/SV_DOES/Flag_DOES/	F_RF	Network-Publis...	Boolean	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)		(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Flag Generatore RF OK/NOK (T/F)
F_SP	...lib/SV_DOES/Flag_DOES/	F_SP	Network-Publis...	Boolean	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)		(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Flag SPetrometri OK/NOK (T/F)

Figura 7. Variabili condivise per il programma di gestione GA.M.E.S. in Tabella 1.



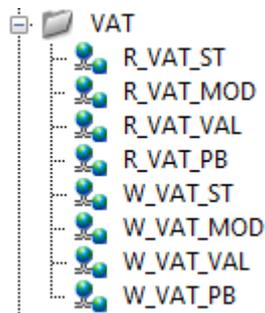
	Path	Name	Var Type	Data Type	Network-Published	RT FIFO	Logging	Alarming	Scaling	Initial Value	Description: Enable	Description: Description
R_PR_ST	...lib/SV_DOES/PR/	R_PR_ST	Network-Publis...	Boolean	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)		(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Stato della Pompa Rotativa ON/OFF (T/F)
W_PR_ST	...lib/SV_DOES/PR/	W_PR_ST	Network-Publis...	Boolean	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)		(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Stato della Pompa Rotativa ON/OFF (T/F)

Figura 8. Stato (ST) della Pompa Rotativa (PR) per il programma di gestione GA.M.E.S. (Tabella 2 e Tabella 3).



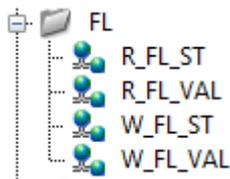
	Path	Name	Var Type	Data Type	Network-Published	RT FIFO	Logging	Alarming	Scaling	Initial Value	Description: Enable	Description: Description
R_VS_ST	...lib/SV_DOES/VS/	R_VS_ST	Network-Publis...	Boolean	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)		(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Stato della Valv...
W_VS_ST	...lib/SV_DOES/VS/	W_VS_ST	Network-Publis...	Boolean	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)		(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Stato della Valv...

Figura 9. Stato (ST) della Valvola Solenoide (VS) per il programma di gestione GA.M.E.S. (Tabella 2 e Tabella 3).



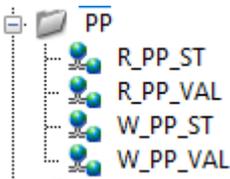
	Path	Name	Var Type	Data Type	Network-Published	RT FIFO	Logging	Alarming	Scaling	Initial Value	Description: Enable	Description: Description
R_VAT_ST	...lib/SV_DOES/VAT/	R_VAT_ST	Network-Publis...	Boolean	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)		(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Stato della valvola a farfalla ON/OFF (T/F)
R_VAT_MOD	...lib/SV_DOES/VAT/	R_VAT_MOD	Network-Publis...	Boolean	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)		(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Modalità di controllo della VAT P/V (T/F)
R_VAT_VAL	...lib/SV_DOES/VAT/	R_VAT_VAL	Network-Publis...	Double	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)		(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Valore di apertura della VAT (%)
R_VAT_PB	...lib/SV_DOES/VAT/	R_VAT_PB	Network-Publis...	Double	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)		(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Valore della pressione di feedback della VAT (ubar)
W_VAT_ST	...lib/SV_DOES/VAT/	W_VAT_ST	Network-Publis...	Boolean	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)		(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Stato della valvola a farfalla ON/OFF (T/F)
W_VAT_MOD	...lib/SV_DOES/VAT/	W_VAT_MOD	Network-Publis...	Boolean	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)		(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Modalità di controllo della VAT P/V (T/F) - P: Pressione V: Apertura
W_VAT_VAL	...lib/SV_DOES/VAT/	W_VAT_VAL	Network-Publis...	Double	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)		(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Valore di apertura della VAT (%)
W_VAT_PB	...lib/SV_DOES/VAT/	W_VAT_PB	Network-Publis...	Double	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)		(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Valore della pressione di feedback della VAT (ubar)

Figura 10. Attributi della Valvola Solenoide (VAT) per il programma di gestione GA.M.E.S. (Tabella 2 e Tabella 3).



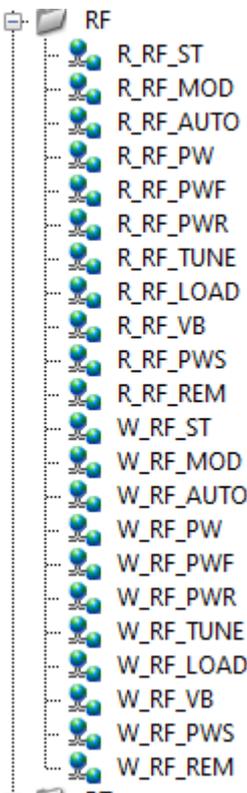
	Path	Name	Var Type	Data Type	Network-Published	RT FIFO	Logging	Dea	Alarming	Scaling	Initial Value	Description: Enable	Description: Description
R_FL_ST	...lib/SV_DOES/FL/	R_FL_ST	Network-Publis...	Boolean	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Stato del flussimetro ON/OFF (T/F)
R_FL_VAL	...lib/SV_DOES/FL/	R_FL_V...	Network-Publis...	Double	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Valore del flusso entrante (sccm)
W_FL_ST	...lib/SV_DOES/FL/	W_FL_ST	Network-Publis...	Boolean	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Stato del flussimetro ON/OFF (T/F)
W_FL_VAL	...lib/SV_DOES/FL/	W_FL_...	Network-Publis...	Double	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Valore del flusso entrante (sccm)

Figura 11. Attributi del Flussimetro (FL) per il programma di gestione GA.M.E.S. (Tabella 2 e Tabella 3).



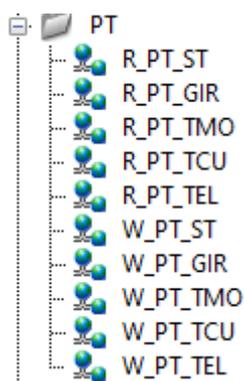
	Path	Name	Var Type	Data Type	Network-Published	RT FIFO	Logging	Dea	Alarming	Scaling	Initial Value	Description: Enable	Description: Description
R_PP_ST	...lib/SV_DOES/PP/	R_PP_ST	Network-Publis...	Boolean	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Stato del misuratore di pressione Pirani Penning ON/OFF (T/F)
R_PP_VAL	...lib/SV_DOES/PP/	R_PP_VAL	Network-Publis...	Double	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Valore di pressione misurato dal Pirani Penning (mbar)
W_PP_ST	...lib/SV_DOES/PP/	W_PP_ST	Network-Publis...	Boolean	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Stato del misuratore di pressione Pirani Penning ON/OFF (T/F)
W_PP_VAL	...lib/SV_DOES/PP/	W_PP_VAL	Network-Publis...	Double	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Valore di pressione misurato dal Pirani Penning (mbar)

Figura 12. Attributi del misuratore di pressione Pirani Penning (PP) per il programma di gestione GA.M.E.S. (Tabella 2 e Tabella 3).



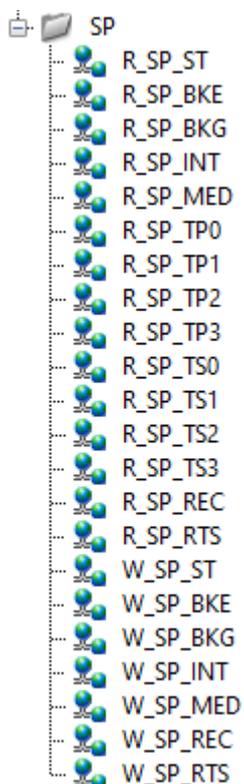
	Path	Name	Var Type	Data Type	Network-Published	RT FIFO	Logging	Dea	Alarming	Scaling	Initial Value	Description: Enable	Description: Description
R_RF_ST	...lib/SV_DOES/RF/	R_RF_ST	Network-Publis...	Boolean	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Stato del generatore RF ON/OFF (T/F)
R_RF_MOD	...lib/SV_DOES/RF/	R_RF_MOD	Network-Publis...	String	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Modalità priorità sul controllo (P/T/L/V)
R_RF_AUTO	...lib/SV_DOES/RF/	R_RF_AUTO	Network-Publis...	Boolean	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	AutoTune ON/OFF (T/F)
R_RF_PW	...lib/SV_DOES/RF/	R_RF_PW	Network-Publis...	Double	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Potenza erogata selezionata (W)
R_RF_PWF	...lib/SV_DOES/RF/	R_RF_PWF	Network-Publis...	Double	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Potenza diretta misurata (W)
R_RF_PWR	...lib/SV_DOES/RF/	R_RF_PWR	Network-Publis...	Double	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Potenza riflessa misurata (W)
R_RF_TUNE	...lib/SV_DOES/RF/	R_RF_TUNE	Network-Publis...	Double	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Valore del Tune - matching network
R_RF_LOAD	...lib/SV_DOES/RF/	R_RF_LOAD	Network-Publis...	Double	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Valore del Load - matching network
R_RF_VB	...lib/SV_DOES/RF/	R_RF_VB	Network-Publis...	Double	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Valore della tensione di Bias
R_RF_PWS	...lib/SV_DOES/RF/	R_RF_PWS	Network-Publis...	Boolean	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Generatore eroga potenza? (T/F)
R_RF_REM	...lib/SV_DOES/RF/	R_RF_REM	Network-Publis...	Boolean	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Modalità Remota o Locale R/L (T/F)
W_RF_ST	...lib/SV_DOES/RF/	W_RF_ST	Network-Publis...	Boolean	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Stato del generatore RF ON/OFF (T/F)
W_RF_MOD	...lib/SV_DOES/RF/	W_RF_MOD	Network-Publis...	String	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Modalità priorità sul controllo (P/T/L/V)
W_RF_AUTO	...lib/SV_DOES/RF/	W_RF_AUTO	Network-Publis...	Boolean	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	AutoTune ON/OFF (T/F)
W_RF_PW	...lib/SV_DOES/RF/	W_RF_PW	Network-Publis...	Double	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Potenza erogata selezionata (W)
W_RF_PWF	...lib/SV_DOES/RF/	W_RF_PWF	Network-Publis...	Double	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Potenza diretta misurata (W)
W_RF_PWR	...lib/SV_DOES/RF/	W_RF_PWR	Network-Publis...	Double	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Potenza riflessa misurata (W)
W_RF_TUNE	...lib/SV_DOES/RF/	W_RF_TUNE	Network-Publis...	Double	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Valore del Tune - matching network
W_RF_LOAD	...lib/SV_DOES/RF/	W_RF_LOAD	Network-Publis...	Double	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Valore del Load - matching network
W_RF_VB	...lib/SV_DOES/RF/	W_RF_VB	Network-Publis...	Double	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Valore della tensione di Bias
W_RF_PWS	...lib/SV_DOES/RF/	W_RF_PWS	Network-Publis...	Boolean	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Generatore eroga potenza? (T/F)
W_RF_REM	...lib/SV_DOES/RF/	W_RF_REM	Network-Publis...	Boolean	..., Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Modalità Remota o Locale R/L (T/F)

Figura 13. Attributi del generatore a Radio Frequenza (RF) per il programma di gestione GA.M.E.S. (Tabella 2 e Tabella 3).



	Path	Name	Var Type	Data Type	Network-Published	RT FIFO	Logging	e Dec	Alarming	Scaling	Initial Value	Description: Enable	Description: Description
R_PT_ST	...lib/SV_DOES/PT/	R_PT_ST	Network-Publis...	Boolean	... 0, Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Stato della pompa turbomolecolare ON/OFF (T/F)
R_PT_GIR	...lib/SV_DOES/PT/	R_PT_GIR	Network-Publis...	Double	... 0, Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Numero di giri della pompa turbomolecolare (%)
R_PT_TMO	...lib/SV_DOES/PT/	R_PT_TMO	Network-Publis...	Double	... 0, Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura motore della pompa turbomolecolare (°C)
R_PT_TCU	...lib/SV_DOES/PT/	R_PT_TCU	Network-Publis...	Double	... 0, Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura cuscinetti turbina della pompa turbomolecolare (°C)
R_PT_TEL	...lib/SV_DOES/PT/	R_PT_TEL	Network-Publis...	Double	... 0, Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura dell'elettronica della pompa turbomolecolare (°C)
W_PT_ST	...lib/SV_DOES/PT/	W_PT_ST	Network-Publis...	Boolean	... 0, Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Stato della pompa turbomolecolare ON/OFF (T/F)
W_PT_GIR	...lib/SV_DOES/PT/	W_PT_GIR	Network-Publis...	Double	... 0, Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Numero di giri della pompa turbomolecolare (%)
W_PT_TMO	...lib/SV_DOES/PT/	W_PT_TMO	Network-Publis...	Double	... 0, Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura motore della pompa turbomolecolare (°C)
W_PT_TCU	...lib/SV_DOES/PT/	W_PT_TCU	Network-Publis...	Double	... 0, Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura cuscinetti turbina della pompa turbomolecolare (°C)
W_PT_TEL	...lib/SV_DOES/PT/	W_PT_TEL	Network-Publis...	Double	... 0, Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura dell'elettronica della pompa turbomolecolare (°C)

Figura 14. Attributi della Pompa Turbomolecolare (PT) per il programma di gestione GA.M.E.S. (Tabella 2 e Tabella 3).



	Path	Name	Var Type	Data Type	Network-Published	RT FIFO	Logging	e Dec	Alarming	Scaling	Initial Value	Description: Enable	Description: Description
R_SP_ST	...lib/SV_DOES/SP/	R_SP_ST	Network-Publis...	Boolean	... Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Stato degli spettrometri ON/OFF (T/F)
R_SP_BKE	...lib/SV_DOES/SP/	R_SP_BKE	Network-Publis...	Boolean	... Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Rumore elettronico eliminato? (T/F)
R_SP_BKG	...lib/SV_DOES/SP/	R_SP_BKG	Network-Publis...	Boolean	... Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Background acquisito? (T/F)
R_SP_INT	...lib/SV_DOES/SP/	R_SP_INT	Network-Publis...	Int32	... Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Tempo di integrazione (ms)
R_SP_MED	...lib/SV_DOES/SP/	R_SP_MED	Network-Publis...	Int32	... Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Medie sugli spettri
R_SP_TP0	...lib/SV_DOES/SP/	R_SP_TP0	Network-Publis...	Double	... Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura della Peltier Spettrometro 0 (°C)
R_SP_TP1	...lib/SV_DOES/SP/	R_SP_TP1	Network-Publis...	Double	... Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura della Peltier Spettrometro 1 (°C)
R_SP_TP2	...lib/SV_DOES/SP/	R_SP_TP2	Network-Publis...	Double	... Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura della Peltier Spettrometro 2 (°C)
R_SP_TP3	...lib/SV_DOES/SP/	R_SP_TP3	Network-Publis...	Double	... Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura della Peltier Spettrometro 3 (°C)
R_SP_TS0	...lib/SV_DOES/SP/	R_SP_TS0	Network-Publis...	Double	... Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura della CCD Spettrometro 0 (°C)
R_SP_TS1	...lib/SV_DOES/SP/	R_SP_TS1	Network-Publis...	Double	... Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura della CCD Spettrometro 1 (°C)
R_SP_TS2	...lib/SV_DOES/SP/	R_SP_TS2	Network-Publis...	Double	... Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura della CCD Spettrometro 2 (°C)
R_SP_TS3	...lib/SV_DOES/SP/	R_SP_TS3	Network-Publis...	Double	... Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura della CCD Spettrometro 3 (°C)
R_SP_REC	...lib/SV_DOES/SP/	R_SP_REC	Network-Publis...	Boolean	... Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Stato della registrazione degli spettri ON/OFF (T/F)
R_SP_RTS	...lib/SV_DOES/SP/	R_SP_RTS	Network-Publis...	Boolean	... Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Inizializzazione spettrometri (T/F)
W_SP_ST	...lib/SV_DOES/SP/	W_SP_ST	Network-Publis...	Boolean	... Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Stato degli spettrometri ON/OFF (T/F)
W_SP_BKE	...lib/SV_DOES/SP/	W_SP_BKE	Network-Publis...	Boolean	... Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Rumore elettronico eliminato? (T/F)
W_SP_BKG	...lib/SV_DOES/SP/	W_SP_BKG	Network-Publis...	Boolean	... Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Background acquisito? (T/F)
W_SP_INT	...lib/SV_DOES/SP/	W_SP_INT	Network-Publis...	Int32	... Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Tempo di integrazione (ms)
W_SP_MED	...lib/SV_DOES/SP/	W_SP_MED	Network-Publis...	Int32	... Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Medie sugli spettri
W_SP_REC	...lib/SV_DOES/SP/	W_SP_REC	Network-Publis...	Boolean	... Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Stato della registrazione degli spettri ON/OFF (T/F)
W_SP_RTS	...lib/SV_DOES/SP/	W_SP_RTS	Network-Publis...	Boolean	... Multiple Writers	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	<input checked="" type="checkbox"/>	Inizializzazione spettrometri (T/F)

Figura 15. Attributi degli Spettrometri (SP) per il programma di gestione GA.M.E.S. (Tabella 2 e Tabella 3).

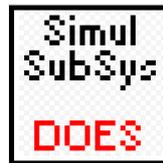
4.2 Simulazione dei sottosistemi di D.O.E.S.-GA.M.E.S.

Per testare la risposta del programma delle criticità (“Gestione Criticità DOES.vi”) si è reso necessario sviluppare un *Simulatore* delle risposte dei vari componenti del sistema D.O.E.S. - GA.M.E.S., in cui poter modificare i valori di alcuni attributi dei vari sottosistemi.

Per esempio se nel Simulatore (S_; **Figura 16**) la temperatura cuscinetti della Pompa Turbomolecolare (PT_TCU) supera i 40°C (S_R_PT_TCU > 40°C) il programma di gestione delle criticità (**Figura 17**) segnala che la Turbopompa è sovraccarica (**Figura 18**) e prova a diminuire il flusso di gas per tentare di fare rientrare la temperatura sotto il valore di soglia stabilita (**Figura 19**). Se ad una eccessiva diminuzione del flusso la temperatura non è ancora rientrata a valori ottimali, viene segnalata una situazione di allarme di maggiore gravità che richiede la sospensione o il blocco del sistema (**Figura 20**). Nel caso in cui invece la temperatura rientrasse nel valore stabilito, GA.M.E.S. troverebbe una nuova condizione di equilibrio e continuerebbe il suo normale funzionamento.

Anche in caso di mancato raggiungimento o perdita della condizione di vuoto all’interno della camera del plasma, il sistema segnala una anomalia grave tale da richiedere lo spegnimento (**Figura 21**).

Il *Simulatore* consente quindi di testare le varie situazioni di anomalie previste nei diagrammi di flusso (**Figura 3 ÷ Figura 2**), così da permettere l’adeguamento del programma di gestione delle criticità (**Figura 17**).



S_Flag_P
W = inizializzazione D.O.E.S.

W = inizializzazione D.O.E.S.;
G = D.O.E.S. stabile, operatività normale;
Y = criticità bassa;
O = criticità alta;
R = errore o condizioni che impongono sospensione o blocco;
B = arresto di D.O.E.S.

N.B: S_; sta per Simul

Flag_P
G
Step Flag_P=W

S_R_PP_VAL (PPenning) 1.0E-6
Disturba PP_VAL R_PP_VAL < 7 E-2
1.0E-6 < 1 E-6

S_R_PB_VAL (PBaratron) 1.0E-6

SENSORI DI PRESSIONE

POMPA ROTATIVA
S_F_PR S_R_PR_ST
FLAG Pompa Rotativa

TURBOPOMPA
S_F_PT F_PT S_R_PT_ST S_R_PT_TCU S_R_PT_TMO S_R_PT_GIR
FLAG Pompa Turbo
39 38 99.7

VALVOLA A FARFALLA
S_F_VAT F_VAT S_R_VAT_VAL VAT_MOD
FLAG Valvola VAT
18 Pressione

CONTROLLO DI FLUSSO
S_F_FL S_R_FL_VAL
FLAG Flussimetro
5

VALVOLA SOLENOIDALE
S_F_VS F_VS S_R_VS_ST
FLAG Valvola Solenoideale

GEN RADIO-FREQUENZA
S_F_RF F_RF S_R_RF_ST S_R_RF_PWS S_R_RF_AUTO S_R_RF_VB S_R_RF_PWF S_R_RF_PWR
FLAG Generatore RF
300 5 0.01

SPETTROMETRI
S_R_SP_REC S_R_SP_INT S_R_SP_TP0 S_R_SP_TP1 S_R_SP_TP2 S_R_SP_TP3
S_F_SP F_SP S_R_SP_BKE S_R_SP_BKG S_R_SP_MED S_R_SP_TS0 S_R_SP_TS1 S_R_SP_TS2 S_R_SP_TS3
FLAG Spettrometri
500 1 38 38 38 38
18 18 18 18

error out
status code
source
STOP

Figura 16. Simulatore (S_;) dei sottosistemi dello strumento GA.M.E.S.

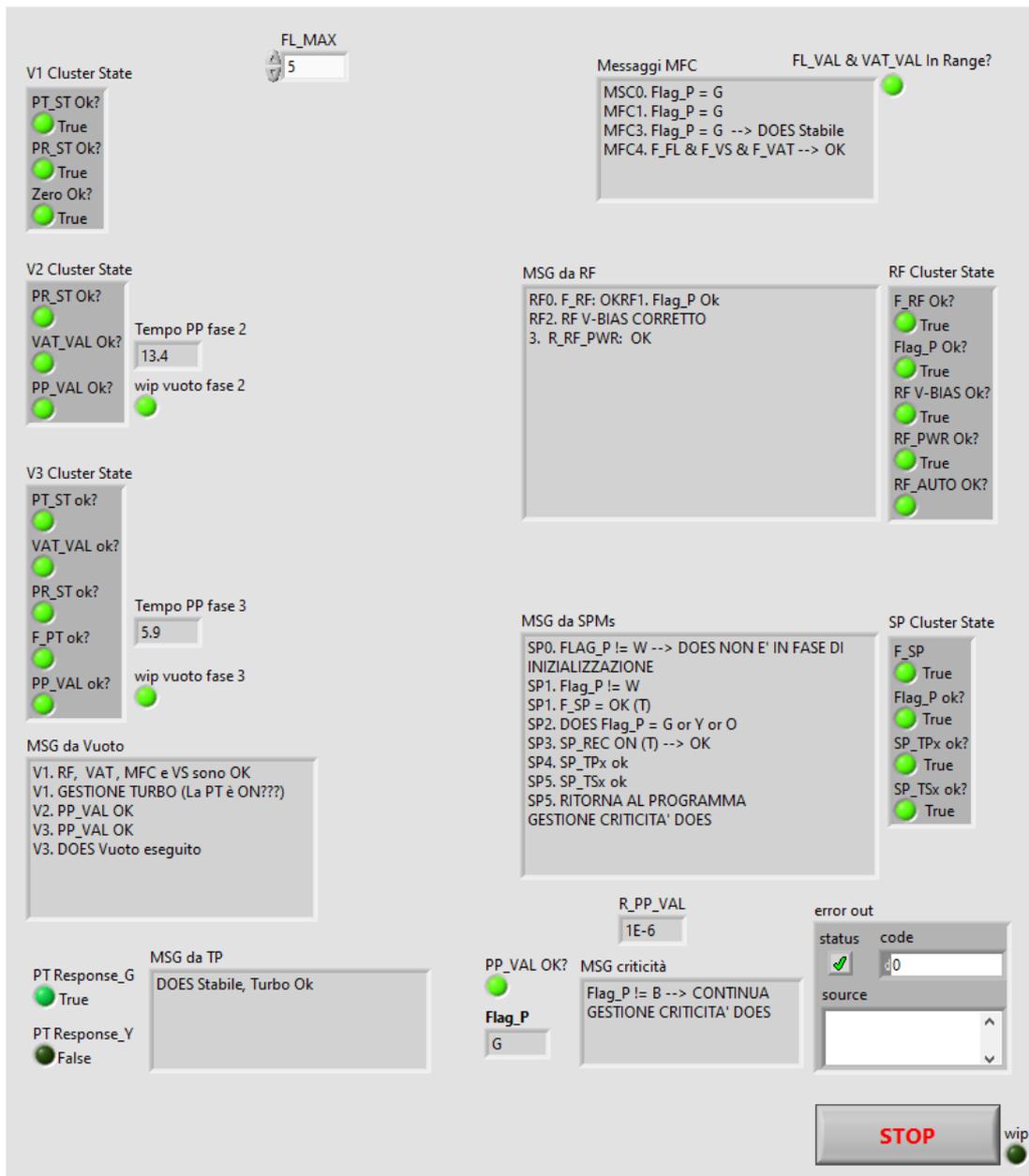


Figura 17. Programma per la gestione delle criticità.

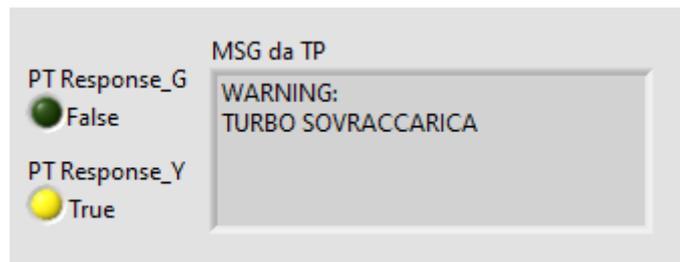


Figura 18. Situazione di warning per la Turbopompa.



Figura 19. Situazione in cui viene abbassato il flusso per tentare di abbassare la temperatura.

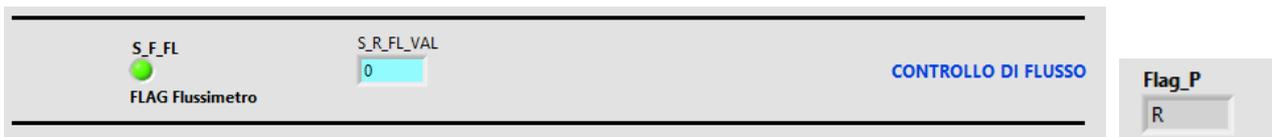


Figura 20. Situazione in cui a flusso azzerato la temperatura non si è abbassata.

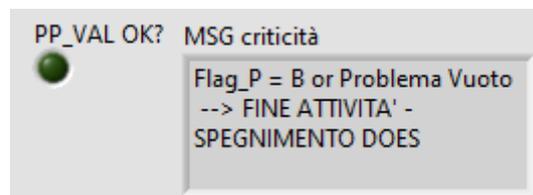


Figura 21. Situazione di spegnimento del GA.M.E.S. in caso di problemi di vuoto non raggiunto o perso.

4.3 Prototipo di gestione delle Criticità di G.A.M.E.S.



Seguendo quanto indicato nel flusso di **Figura 2**, è stato sviluppato un prototipo di programma per la gestione delle criticità (**Figura 17**). Questo fa uso di moduli brevemente descritti in seguito.

4.3.1 Controllo della Fase di Vuoto

Dopo alcune “inizializzazioni delle variabili” (ad esempio la modalità di controllo della VAT posta inizialmente come controllo in apertura, o posizione apertura %; **Figura 22**), segue l’ “Inizializzazione del Vuoto” (**Figura 23**) che è stata, rispetto al diagramma di flusso (**Figura 3**), suddivisa in tre fasi:

- **FASE 1 (Figura 24)**: viene spento il generatore RF (RF_ST=OFF), si chiudono la valvola solenoide VS (VS_ST=OFF), il flussimetro FL (FL_VAL=0), la valvola a farfalla VAT (VAT_VAL=0), e si inizializzano gli spettrometri (SP_RTS=TRUE).
- **FASE 2 (Figura 25) e FASE 3 (Figura 26)**: sono fasi il cui ciclo è controllato dal tempo massimo di raggiungimento della pressione desiderata misurata dal Pirani Penning (TEMPO_PP_MAX).

Se la *fase di Vuoto* andrà a termine positivamente, seguirà un Loop che terminerà per intervento di un operatore, oppure per aver rilevato delle criticità gravi.

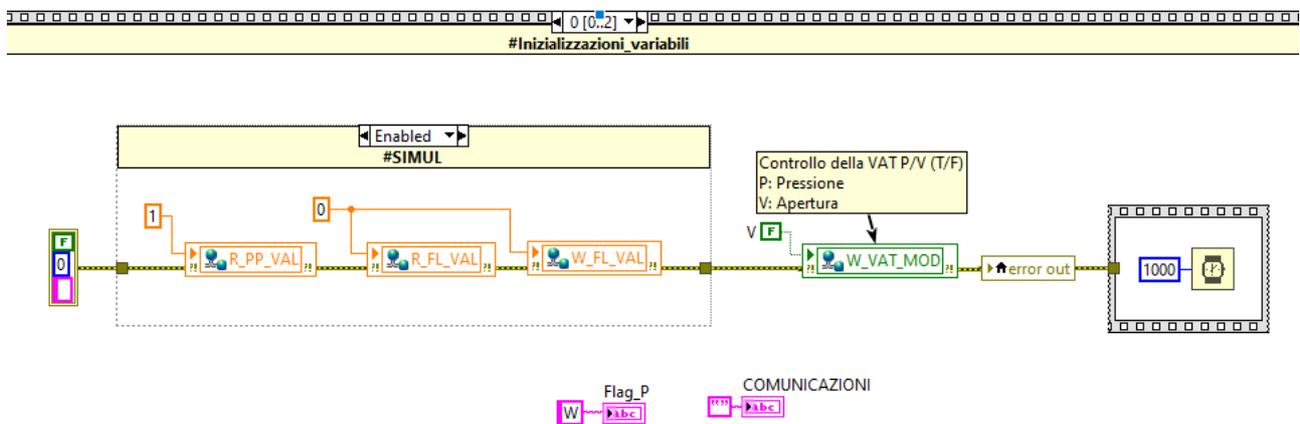


Figura 22. Inizializzazione delle variabili.

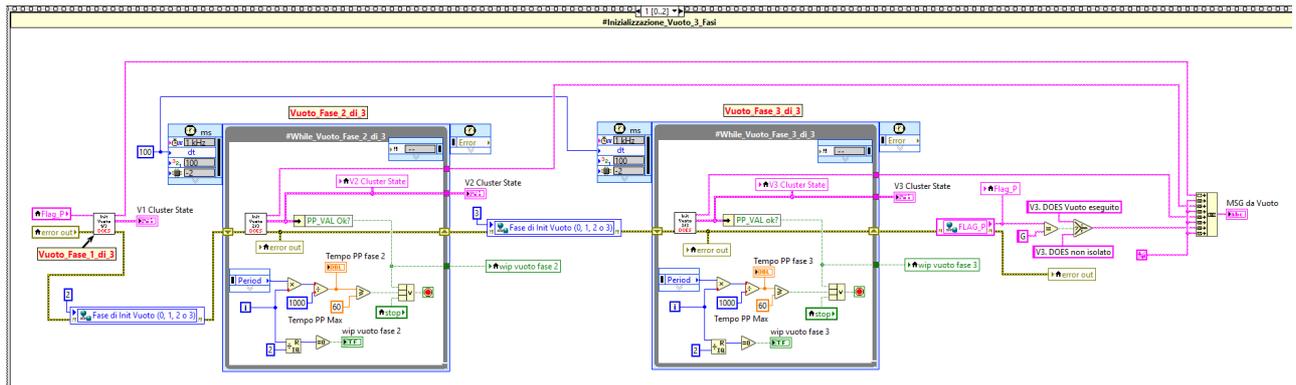


Figura 23. Inizializzazione del Vuoto, che è suddivisa in 3 fasi.

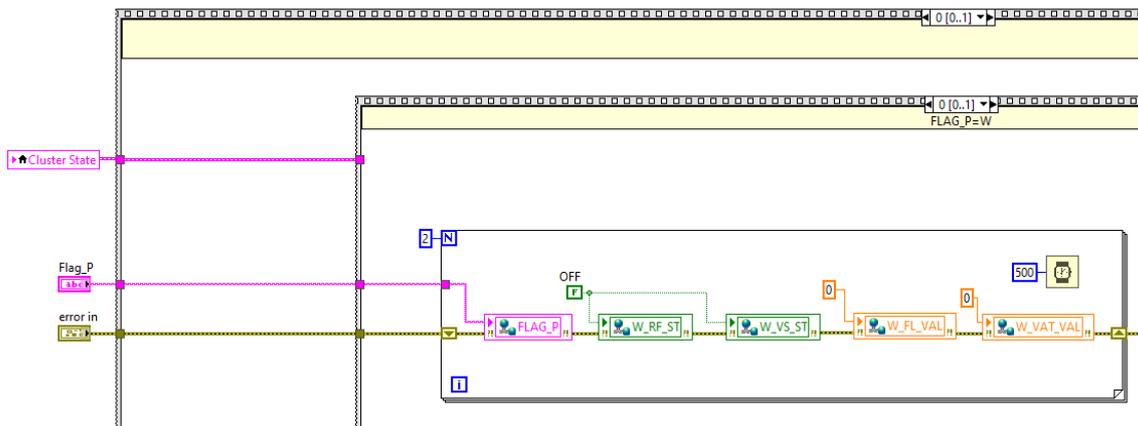


Figura 24. Particolare della FASE 1 di 3 del Vuoto nel sistema GA.M.E.S.

4.3.2 Controllo dei parametri della Pompa Turbomolecolare

Superata la fase di Vuoto, vengono controllate le seguenti variabili relative alla Pompa Turbomolecolare PT (Figura 27):

- a) PT_TCU: Temperatura CUscinetti ($^{\circ}\text{C}$) $\leq 40^{\circ}\text{C}$,
- b) PT_TMO: Temperatura MOtore ($^{\circ}\text{C}$) $\leq 50^{\circ}\text{C}$,
- c) PT_GIR: numero di GIRi (%) $\geq 99.5\%$.

Se soddisfatta la condizione "DOES Stabile" (Response_G = True; Response_Y = False), la Pompa Turbomolecolare si trova in condizioni ottimali, viene impostato il FLAG_P = G e viene eseguito il modulo della "gestione flusso in ingresso" che, in questa condizione, aumenterà il flusso di gas in ingresso al GA.M.E.S. (fino a FL_MAX).

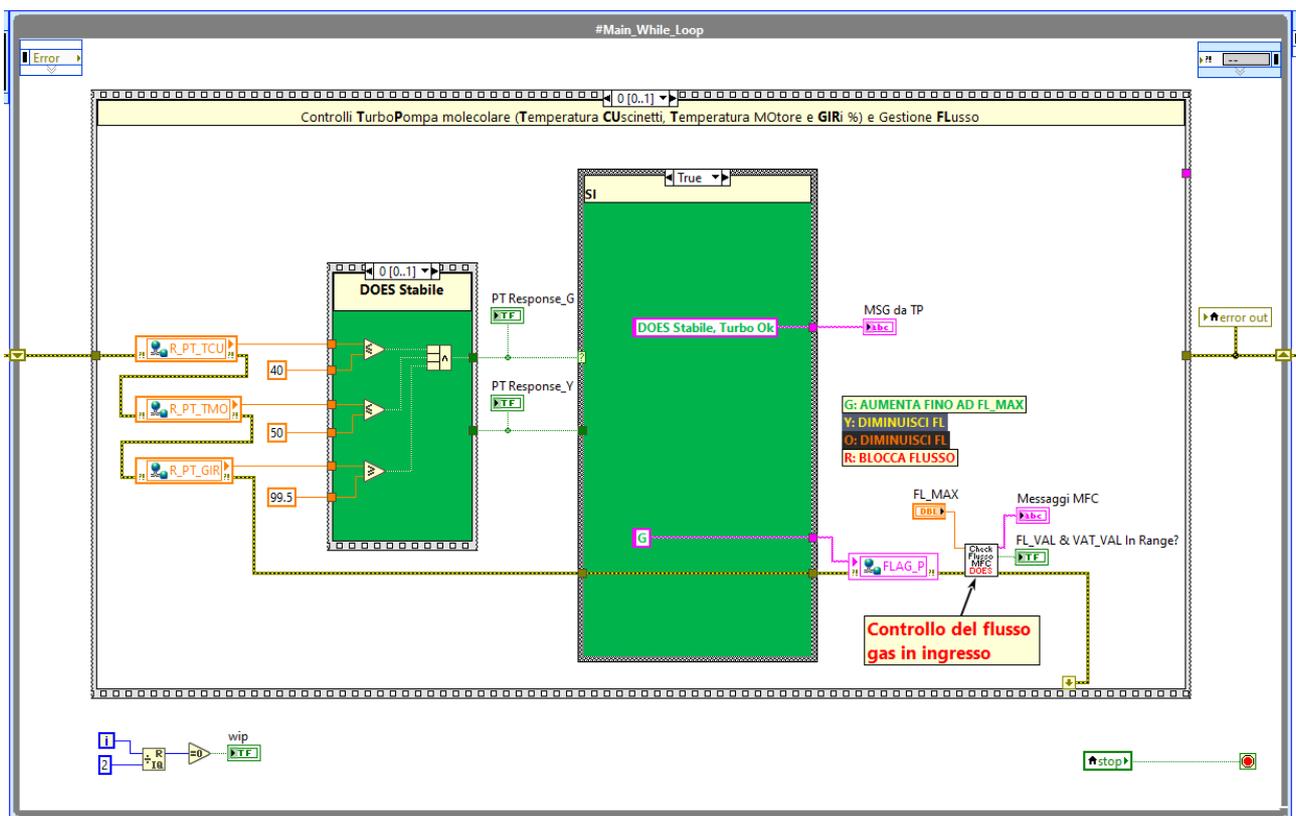


Figura 27. Controllo delle variabili Pompa Turbomolecolare e gestione flusso GA.M.E.S. stabile.

Potrebbe succedere che il sistema GA.M.E.S. non si trovi nella condizione stabile appena descritta, ma in una condizione di criticità ($Response_G = False$):

- se la criticità è bassa/media allora $Response_Y = True$, e viene impostato $FLAG_P = Y$ (**Figura 28**). Nel caso in cui $FLAG_P = Y$ (o $FLAG_P = O$ – bassa/media criticità) viene eseguito il modulo della “gestione del flusso gas” in ingresso che, in questa condizione, diminuirà il flusso in ingresso al GA.M.E.S., fino ad uscire dalla criticità e riportare il sistema in condizioni stabili.
- se la criticità è grave, allora $Response_Y = False$ e viene impostato $FLAG_P = R$ (**Figura 29**). Nel caso in cui $FLAG_P = R$ (alta criticità) viene eseguito il modulo della “gestione flusso gas” in ingresso che, in questa condizione, porterà all’arresto del flusso (chiusura del flusso, chiusura della Valvola Solenoide e chiusura della VAT), per la salvaguardia della Pompa Turbomolecolare.

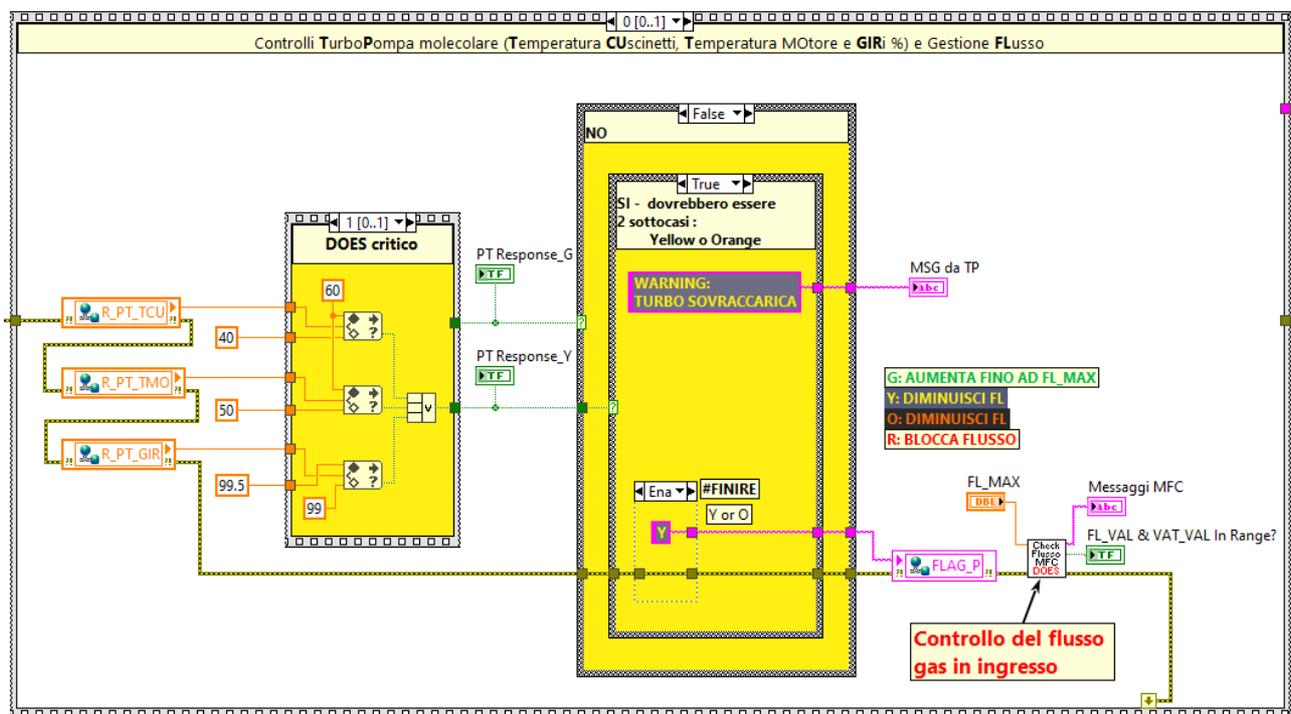


Figura 28. Criticità bassa/media per la gestione del flusso del sistema GA.M.E.S.

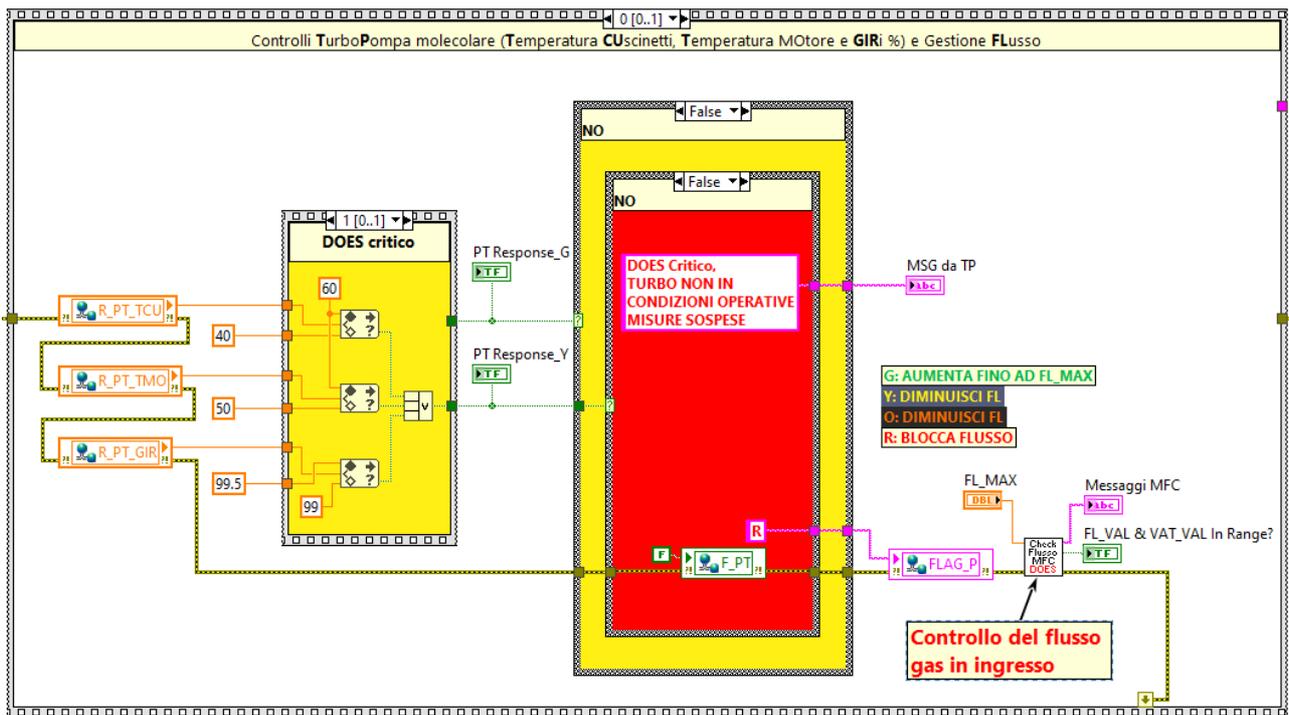


Figura 29. Criticità alta o arresto per la gestione del flusso del sistema GA.M.E.S.

4.3.3 Controllo dei parametri del Generatore RF e degli Spettrometri

Superata la fase di controllo delle condizioni della Pompa Turbomolecolare PT, il programma per la gestione delle criticità prevede ulteriori azioni che riguardano il controllo del Generatore di RF per la formazione del Plasma, ed il controllo del modulo di gestione degli Spettrometri (Figura 30). In caso di condizioni operative tali da richiedere la chiusura del flusso in ingresso, verrà spenta il Generatore RF (e quindi il plasma) e disattivato il salvataggio degli Spettri. Vengono inoltre controllate le temperature interne degli Spettrometri e, nel caso di superamento di soglie precedentemente stabilite (Figura 6), viene richiesto/attuato lo spegnimento degli Spettrometri tramite apposito relè che intercetta le alimentazioni.

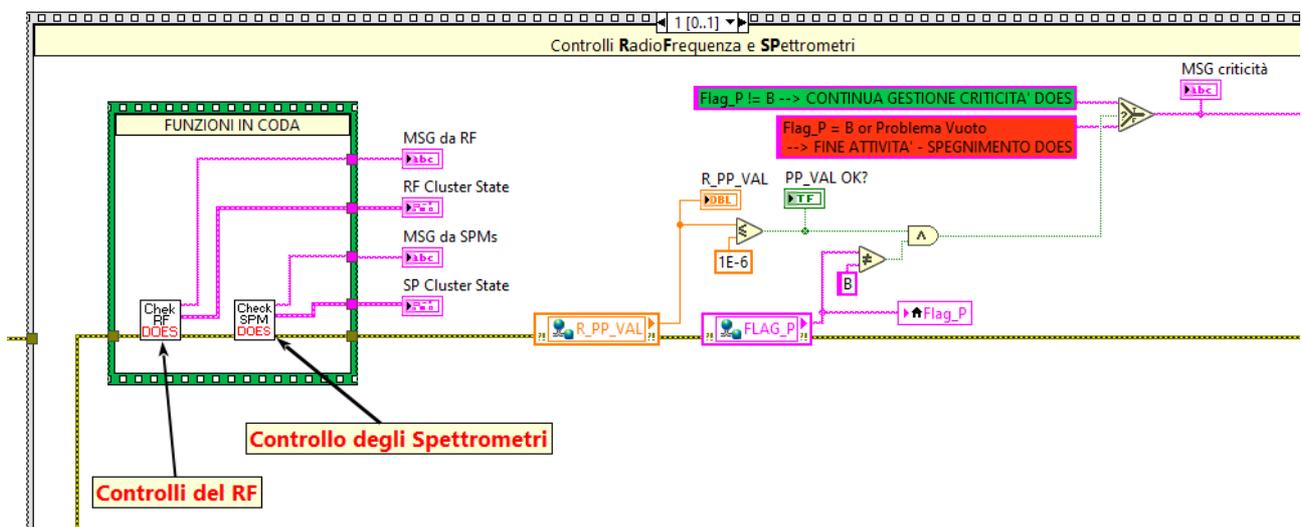


Figura 30. Particolare del programma per il controllo del generatore RF e degli Spettrometri (SP).

5 Conclusioni

L'attività svolta durante questa seconda annualità del Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 ha permesso di:

1. effettuare l'**automatizzazione** dei singoli sottosistemi (strumenti) di acquisizione e di controllo del sistema GA.M.E.S. nel supervisore, con la possibilità di avere il controllo e la lettura dei vari parametri in una sala operativa remota, in modo che possa operare in maniera stand-alone e con controllo remoto per lunghi periodi senza danneggiarsi;
2. sviluppare una serie di **salvaguardie** prototipali in modo che GA.M.E.S. sia in grado di andare in autoprotezione in caso di regimi dannosi per lo strumento.
3. Il software sviluppato in LabVIEW necessita comunque di test e sessioni lunghe di debug per saggiarne l'affidabilità nella risposta così come per qualunque strumento in sviluppo

6 Riferimenti bibliografici

1. S. Scaglione e D. Zola, *"Studio di sistemi ottici innovativi per la misura dell'ossigeno nei prodotti di combustione in regime MILD"*, Settembre 2014, Report RdS/PAR2013/300.
2. S. Scaglione e D. Zola, *"Studio di sistemi ottici innovativi per la misura dell'ossigeno nei prodotti di ossi-combustione"*, Settembre 2015, Report RdS/PAR2014/247.
3. S. Scaglione e D. Zola, *"Studio di sistemi ottici innovativi per la misura dell'ossigeno nei prodotti di ossi-combustione"*, Settembre 2016, Report RdS/PAR2015/256.
4. S. Scaglione, D. Zola e R. Chierchia, *"Sviluppo di uno strumento per il monitoraggio dell'ossigeno nei prodotti di combustione mediante spettroscopia ottica in emissione"*, Settembre 2017, Report RdS/PAR2016/187.
5. S. Scaglione, D. Zola e R. Chierchia, *"Studio di sistemi ottici innovativi per la misura dell'ossigeno nei prodotti di ossi-combustione"*, Settembre 2018, Report RdS/PAR2017/199.
6. S. Scaglione, C. Stringola, D. Zola, E. Giulietti, R. Chierchia, R. Lo Presti, *"Sviluppo del sistema di automazione dello strumento D.O.E.S."*, Dicembre 2018, Report RdS/PAR2018/053.
7. C. Stringola, E. Giulietti, A. Gentili, S. Scaglione, D. Zola, *"Automatizzazione dei singoli sottosistemi di acquisizione e controllo del sistema DOES"*, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA, Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 (PTR_19_21), PTR2019, Classificazione: Report RdS/PTR2019/131, Dicembre 2019.
8. S. Scaglione, D. Zola, A. Gentili, C. Stringola, E. Giulietti, *"Analisi preliminare dei tempi di ritardo del sistema DOES"*, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA, Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 (PTR_19_21), PTR2019, Classificazione: Report RdS/PTR2019/132, Dicembre 2019.
9. C. Stringola, S. Scaglione, G. Troiani, E. Giulietti, D. Zola, A. Gentili, *"Instabilità e fuel-flexibility in miscele con H₂: studio sperimentale applicato all'impianto ROMULUS"*, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA, Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 (PTR_19_21), PTR2020, Classificazione: Report RdS/PTR2020/XXX, Dicembre 2020 (Aprile 2021).

7 Abbreviazioni ed acronimi

BW	bandwidth (Hz)
CCS	Carbon Capture Storage
DI	digital input
DO	digital output
D.O.E.S.	Detection of Oxygen by Emission Spectroscopy
EGR	Exhaust Gas Recirculation
ENEA	Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development
GA.M.E.S.	GAs Monitoring by Emission Spectroscopy
IPSE	Laboratorio Ingegneria dei Processi e dei Sistemi per l'Energia
IR	Infrared
LA	Linea di Attività
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
MTG	MicroTurbina
NG	Natural Gas
NIR	Near InfraRed
P2G	Power to Gas
P2L	Power to Liquid
PAR	Piano Annuale di Realizzazione
PTR	Piano Triennale di Realizzazione
RF	radio frequenza
Syngas	Synthetic Gas, ossia gas di sintesi
SPL	Sound Pressure Level
TG	Turbine a Gas
UV	Ultra Violet, optical range (10 nm – 400 nm)
VIS	Visible radiation, optical range (400-700 nm)
vRES	variable Renewable Energy Sources
WP	Work Packages