

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

**Sviluppo di una procedura software
per la stima dei consumi, delle
prestazioni e delle emissioni in tempo
reale di motori a combustione
interna per applicazioni navali**



Relatori

Prof. Federico Millo

Prof. Andrea Piano

Prof. Paolo Squillari

Candidato

Michele Torelli

Dicembre 2025

Sommario

Il presente elaborato descrive lo sviluppo e il funzionamento di un software realizzato in LabView per il calcolo in tempo reale delle prestazioni e delle emissioni dei motori a combustione interna destinati ad applicazioni navali. Il progetto è stato condotto in collaborazione con il "Two Stroke Field Testing Team" di Wärtsilä Italia S.p.A., sede di Trieste. La prima parte introduce i principi teorici necessari alla comprensione dell'architettura e del funzionamento del programma, mentre la seconda analizza le difficoltà incontrate, le soluzioni adottate e i risultati ottenuti. La relazione è stata redatta con un'impostazione simile a quella di un manuale operativo, al fine di renderlo consultabile dagli operatori che utilizzeranno il software a bordo nave o nei laboratori. Questa scelta è stata fatta anche per agevolare coloro che in futuro continueranno lo sviluppo del progetto.

Indice

I	Introduzione	XI
II	Cenni sui motori a combustione interna per applicazioni navali	XII
II.I	Meccanismi delle valvole di scarico e di aspirazione	XIV
II.II	Sistemi di sovralimentazione	XV
II.II.I	Valvola Wastegate	XVI
II.II.II	Combustibili disponibili	XVIII
II.IV	Caso studio motore 7L46F	XIX
II.V	Caso studio motore TA6	XX
III	Panoramica delle attività sperimentali a bordo nave	XXII
III.I	Analisi delle condizioni termodinamiche	XXIII
III.II	Analisi delle emissioni inquinanti	XXIV
III.II.I	Specie chimiche inquinanti e relative tecnologie di rilevazione	XXIV
III.III	Misura della portata di combustibile	XXVII
III.IV	Lettura della velocità di rotazione e della coppia trasmessa	XXVIII
III.V	Analisi della combustione	XXXI
III.VI	Architettura della comunicazione a bordo nave	XXXI
III.VII	Architettura della comunicazione WPC-Labtool	XXXII
IV	Principi teorici del protocollo Modbus	XXXVI
IV.I	Standard RS232	XXXVI
IV.II	Standard RS485	XXXVIII
IV.III	Standard Ethernet	XXXIX
IV.IV	Struttura del protocollo Modbus	XXXIX
IV.V	Esempio di comunicazione	XLIV
V	Struttura del Database SQLite	XLVI
V.I	Tabella t_function	XLVII
V.II	Tabella t_function_versions	XLIX
V.III	Tabella t_function_dependencies	LI
V.IV	Tabella t_function_inputs	LII

V.V	Tabella t_environment_inputs	LIII
V.VI	Tabella t_function_version_inputs	LIV
V.VII	Tabella t_function_outputs	LIV
V.VIII	Tabella t_function_version_outputs	LV
V.IX	Tabella t_conf_communication	LVI
V.X	Tabella t_conf_engines	LX
V.XI	Tabella t_conf_fuel_gas	LXII
V.XII	Tabella t_conf_fuel_hfo	LXIII
V.XIII	Tabella t_conf_fuel_lfo	LXIII
V.XIV	Tabella t_conf_maps	LXIV
V.XV	Tabella t_conf_maps_flowdata	LXIV
V.XVI	Tabella t_conf_maps_surgedata	LXV
V.XVII	Tabella t_conf_TC	LXVI
V.XVIII	Tabella t_confs	LXVII
VI	Funzionamento software WPC	LXIX
VI.I	Implementazione delle funzioni	LXX
VI.I.I	Struttura di una generica funzione	LXXIV
VI.II	Configurazione iniziale	LXXVI
VI.II.I	Configurazione Test Bed	LXXVI
VI.II.II	Configurazione Engine configuration	LXXVII
VI.II.III	Configurazione Fuel system	LXXVIII
VI.II.IV	Configurazione Fuel type	LXXIX
VI.II.V	Configurazione Emission equipment	LXXIX
VI.II.VI	Configurazione Turbocharger	LXXX
VI.II.VII	Configurazione Communication	LXXX
VII	Problemi iniziali e modifiche apportate	LXXXI
VII.I	Comunicazione configurazione-database	LXXXI
VII.I.I	IP2Octet.vi	LXXXII
VII.II	Comunicazione database-programma	LXXXIV
VII.III	Configurazione Python	LXXXIV
VII.III.I	Installazione Python	LXXXV
VII.IV	Problemi di salvataggio	LXXXVI
VII.V	Problemi di lettura DataGrid	LXXXIX
VII.VI	Problemi di lettura UDP	XCIII
VII.VII	Formule in Python	XCIII
VII.VII.I	Lista codici di errori	XCIX
VII.VIII	Problemi di caricamento configurazione	C
VII.IX	Salvataggio mappe SAE nel database	CVII

VII.X	Lettura mappe SAE del compressore	CIX
VII.XI	Funzione F208 per il calcolo della potenza erogata dal motore	CX
VIII	Istruzioni		CXII
VIII.I	Configurazione rete OT	CXII
VIII.II	Configurazione Firewall di Windows	CXIII
VIII.III	Installazione e configurazione Pycharm	CXVI
VIII.IV	Parsing segnali	CXX
VIII.V	Configurazione Wireshark	CXXIII
IX	Conclusioni		CXXVII
Bibliografia		CXXVIII
A	Appendice A: Elenco riassuntivo delle funzioni utilizzate		CXXX
F1	$\dot{m}_{\text{air,nozzle}}$	. . . . .	CXXXI
F2	$\dot{m}_{\text{air,engine}}$	. . . . .	CXXXI
F3	P_{TIVC}}	. . . . .	CXXXII
F4	$T_{\text{TIVC,estimated}}$	. . . . .	CXXXII
F5	V_{TIVC}}	. . . . .	CXXXIII
F6	$\dot{m}_{\text{air,trapped}}$	. . . . .	CXXXIV
F7	$\dot{m}_{\text{air,corrected}}$	. . . . .	CXXXIV
F8	p_{EVC}}	. . . . .	CXXXV
F9	k_{air}}	. . . . .	CXXXV
F10	V_{EVC}}	. . . . .	CXXXVI
F11	T_{EVC}}	. . . . .	CXXXVII
F12	$\dot{m}_{\text{air,engine,EVC}}$	. . . . .	CXXXVII
F13	$\dot{m}_{\text{air,nozzle,EVC}}$	. . . . .	CXXXVIII
F14	$CR_{\text{eff,4T}}$	CXXXVIII
F15	$CR_{\text{eff,EVC}}$	. . . . .	CXXXIX
F16	$BSFC$	. . . . .	CXXXIX
F17	$BSFC_{\text{pilot}}$	. . . . .	CXL
F18	C_{mix}}	. . . . .	CXLI
F19	H_{mix}}	. . . . .	CXLI
F20	N_{mix}}	. . . . .	CXLII
F21	O_{mix}}	. . . . .	CXLIII
F22	S_{mix}}	. . . . .	CXLIV
F24	H_s	. . . . .	CXLIV
F25	k_{DtW}}	. . . . .	CXLV
F26	f_c	. . . . .	CXLVI

F27 $\dot{m}_{\text{exh,CB}}$	.CXLVII
F28 $\dot{m}_{\text{air,CB}}$	.CXLVII
F29 \dot{m}_{CB}	CXLVIII
F30 $\dot{m}_{\text{exh,nozzle}}$	.CXLIX
F31 $\dot{m}_{\text{exh,EC4T}}$	.CXLIX
F32 $\dot{m}_{\text{exh,EC2T}}$	.CL
F33 $BSAC_{\text{nozzle}}$	.CL
F34 $BSAC_{\text{EC4T}}$	.CLI
F35 $BSAC_{\text{EC2T}}$	.CLI
F36 $BSAC_{\text{CB}}$	.CLI
F37 $BSEC_{\text{fuel}}$	.CLI
F38 $BSEC_{\text{pilot}}$	.CLII
F39 $BSFC_{\text{corr}}$	.CLII
F40 $BSFC_{\text{corr,pilot}}$	.CLIV
F41 $p_{1,\text{dyn}}$	.CLIV
F42 $p_{2,\text{dyn,nozzle}}$	.CLV
F43 $p_{2,\text{dyn,EC4T}}$	.CLVI
F44 $p_{2,\text{dyn,EC2T}}$	.CLVII
F45 $p_{2,\text{dyn,CB}}$	.CLVIII
F56 $k_{\text{exh,nozzle}}$	.CLIX
F57 $k_{\text{exh,EC4T}}$	.CLIX
F58 $k_{\text{exh,EC2T}}$	.CLX
F59 $k_{\text{exh,CB}}$	.CLXI
F62 A_{EWG}	.CLXII
F63 ρ_5	.CLXII
F64 $p_{\text{crit,nozzle}}$	.CLXIII
F65 $p_{\text{crit,EC4T}}$	.CLXIII
F66 $p_{\text{crit,EC2T}}$	.CLXIII
F67 $p_{\text{crit,CB}}$	.CLXIV
F68 m_{EWG}	.CLXIV
F69 $m_{\text{EWG,EC4T}}$	.CLXV
F70 $m_{\text{EWG,EC2T}}$	.CLXVI
F71 $m_{\text{EWG,CB}}$	.CLXVII
F72 $\dot{m}_{\text{exh,nozzle,redux}}$	.CLXIX
F73 $\dot{m}_{\text{exh,EC4T,redux}}$	.CLXIX
F74 $\dot{m}_{\text{exh,EC2T,redux}}$	.CLXIX
F75 $\dot{m}_{\text{exh,CB,redux}}$	.CLXX
F76 $p_{\text{dyn5,nozzle}}$	.CLXX
F77 $p_{\text{dyn5,EC4T}}$	.CLXXI

F78 $p_{\text{dyn5,EC2T}}$	.CLXXII
F79 $p_{\text{dyn5,CB}}$	CLXXIII
F80 PIV _{nozzle}	CLXXIV
F81 PIV _{EC4T}	.CLXXV
F82 PIV _{EC2T}	CLXXVI
F83 PIV _{CB}	CLXXVIII
F88 PIT _{nozzle}	CLXXIX
F89 PIT _{EC4T}	CLXXIX
F90 PIT _{EC2T}	.CLXXX
F91 PIT _{CB}	.CLXXX
F92 $\eta_{sv,\text{nozzle}}$	CLXXXI
F93 $\eta_{sv,\text{EC4T}}$	CLXXXI
F94 $\eta_{sv,\text{EC2T}}$	CLXXXI
F95 $\eta_{sv,\text{CB}}$	CLXXXII
F108 $\eta_{TC,\text{ABB}}$	CLXXXIII
F109 $\eta_{TC,\text{ABB,EC4T}}$	CLXXXIII
F110 $\eta_{TC,\text{ABB,EC2T}}$	CLXXXIV
F111 $\eta_{TC,\text{ABB,CB}}$	CLXXXV
F112 $\eta_{TC,\text{CIMAC}}$	CLXXXVI
F113 $\eta_{TC,\text{CIMAC,EC4T}}$	CLXXXVII
F114 $\eta_{TC,\text{CIMAC,EC2T}}$	CLXXXVIII
F115 $\eta_{TC,\text{CIMAC,CB}}$	CLXXXIX
F116 $\eta_{TC,\text{MET}}$	CXCI
F117 $\eta_{TC,\text{MET,EC4T}}$	CXCI
F118 $\eta_{TC,\text{MET,EC2T}}$	CXCII
F119 $\eta_{TC,\text{MET,CB}}$	CXCII
F132 $\eta_{T,\text{ABB,nozzle}}$	CXCIII
F133 $\eta_{T,\text{ABB,EC4T}}$	CXCIII
F134 $\eta_{T,\text{ABB,EC2T}}$	CXCIII
F135 $\eta_{T,\text{ABB,CB}}$	CXCIV
F136 $\eta_{T,\text{CIMAC,nozzle}}$	CXCIV
F137 $\eta_{T,\text{CIMAC,EC4T}}$	CXCV
F138 $\eta_{T,\text{CIMAC,EC2T}}$	CXCV
F139 $\eta_{T,\text{CIMAC,CB}}$	CXCV
F140 $\eta_{T,\text{MET,nozzle}}$	CXCVI
F141 $\eta_{T,\text{MET,EC4T}}$	CXCVI
F142 $\eta_{T,\text{MET,EC2T}}$	CXCVII
F143 $\eta_{T,\text{MET,CB}}$	CXCVII
F144 n_{298}	CXCVIII

F145 V_{298}	CXCVIII
F146 $V_{298,\text{EC4T}}$	CXCIX
F147 $V_{298,\text{EC2T}}$	CC
F148 $V_{298,\text{CB}}$	CC
F149 BSFC_{tot}	CCI
F150 $k_{\text{hum},\text{NOx}}$	CCII
F151 NOx_{corr}	CCII
F152 NOx_{CB}	CCIII
F153 CO_2^{CB}	CCIV
F154 CO_{CB}	CCV
F155 THC_{CB}	CCV
F156 O_2^{CB}	CCVI
F157 $\text{NOx}_{\text{nozzle}}$	CCVII
F158 $\text{CO}_{\text{nozzle}}$	CCVIII
F159 $\text{CO}^{\text{nozzle}}$	CCIX
F160 $\text{THC}^{\text{nozzle}}$	CCX
F161 $\text{O}_2^{\text{nozzle}}$	CCXI
F162 NOx_{EC4T}	CCXII
F163 $\text{CO}_{\text{2}}^{\text{EC4T}}$	CCXII
F164 CO^{EC4T}	CCXIII
F165 THC^{EC4T}	CCXIV
F166 O_2^{EC4T}	CCXV
F167 NOx_{EC2T}	CCXVI
F168 $\text{CO}_{\text{2}}^{\text{EC2T}}$	CCXVI
F169 CO^{EC2T}	CCXVII
F170 THC^{EC2T}	CCXVIII
F171 O_2^{EC2T}	CCXIX
F172 SOx	CCXX
F177 $\dot{m}_{\text{exh, map_compr}}$	CCXX
F178 \dot{m}_{maps}	CCXXI
F179 $\text{BSAC}_{\text{map_compr}}$	CCXXII
F180 $p_{2\text{dyn}}^{\text{map_compr}}$	CCXXIII
F181 $k_{\text{exh}}^{\text{map_compr}}$	CCXXIV
F182 $p_{\text{crit}}^{\text{map_compr}}$	CCXXV
F183 \dot{m}_{EWG}	CCXXV
F184 $\dot{m}_{\text{exh,redux}}^{\text{map_compr}}$	CCXXVII
F185 $p_{\text{dyn5}}^{\text{map_compr}}$	CCXXVII
F186 $\text{PIV}_{\text{map_compr}}$	CCXXVIII
F187 $\text{PIT}_{\text{map_compr}}$	CCXXIX

F188 $\eta_{sv}^{\text{map_compr}}$	CCXXX
F189 η_{TC}^{ABB}	CCXXXI
F190 η_{TC}^{CIMAC}	CCXXXII
F191 η_{TC}^{MET}	CCXXXIII
F192 $\eta_T^{\text{ABB, map_compr}}$	CCXXXIV
F193 $\eta_T^{\text{CIMAC, map_compr}}$	CCXXXIV
F194 $\eta_T^{\text{MET, map_compr}}$	CCXXXV
F196 NO _x ^{map_compr}	CCXXXVI
F197 CO ₂ ^{map_compr}	CCXXXVII
F198 CO ^{map_compr}	CCXXXVIII
F199 THC ^{map_compr}	CCXXXVIII
F200 O ₂ ^{map_compr}	CCXL
F201 $\dot{m}_{\text{fuel,main}}^{\text{map_compr}}$	CCXLI
F202 $\dot{m}_{\text{fuel,pilot}}^{\text{map_compr}}$	CCXLII
F203 CH ₄ ^{CB,map_compr}	CCXLIII
F204 CH ₄ ^{nozzle,map_compr}	CCXLIV
F205 CH ₄ ^{EC4T,map_compr}	CCXLVI
F206 CH ₄ ^{map_compr}	CCXLVII
F207 $\dot{m}_{\text{exh,corr}}^{\text{map_compr}}$	CCXLVIII
F208 $P_{\text{eng,real}}$	CCXLIX

Capitolo I

Introduzione

Il presente elaborato descrive lo sviluppo e il funzionamento di un software realizzato in LabView per il calcolo in tempo reale delle prestazioni e delle emissioni dei motori a combustione interna destinati ad applicazioni navali. Il progetto è stato condotto in collaborazione con il "Two Stroke Field Testing Team" di Wärtsilä Italia S.p.A., sede di Trieste. Il software oggetto di questo lavoro di tesi si inserisce in un ambizioso progetto di automatizzazione e digitalizzazione delle prove di misura che vengono effettuate a bordo nave. Il "Two Stroke Field Testing Team" sta infatti sviluppando una serie di programmi LabView che consentono la gestione delle macchine di misura e la lettura dei relativi dati da remoto, con lo scopo di alleggerire e semplificare il lavoro dell'operatore a bordo nave durante le missioni.

Il programma sviluppato è stato chiamato *Wärtsilä Performance Calculator* (WPC), e come suggerisce il nome, si tratta di un calcolatore che legge in tempo reale le informazioni e i dati raccolti dalle macchine e dai sensori collegati al motore. Tale software è altamente versatile ed è possibile utilizzarlo su configurazioni motori molto diverse tra loro. Funziona sia per motori a 2 tempi che per quelli a 4 tempi, alimentati con combustibile che può essere sia liquido che gassoso e con settaggi e parametri geometrici completamente differenti. Configurando opportunamente il turbogruppo di sovralimentazione del motore, il software può interpolare le mappe SAE di compressore e turbina con le condizioni operative per il calcolo di alcune funzioni, quali la portata dell'aria. In futuro, si vorrebbe equipaggiare tale programma con risultati di simulazioni GTPower per avere un confronto tra le prestazioni ideali e quelle reali a parità di condizioni operative. Questo permetterebbe all'operatore di avvicinarsi alle condizioni ottimali, cercando di ottenere prestazioni migliori sia in termini di prestazioni sia in termini di emissioni inquinanti allo scarico.

Capitolo II

Cenni sui motori a combustione interna per applicazioni navali

I motori a combustione interna progettati, costruiti e sviluppati da Wärtsilä si dividono in due possibili applicazioni: uso stazionario per la produzione di energia elettrica e propulsione di imbarcazioni commerciali (petroliere e portacontainers). In entrambi i casi, è importante che i motori siano molto efficienti, poiché il risparmio di carburante è un aspetto fondamentale, che siano affidabili, sia per ragioni economiche che di sicurezza, e che siano in grado di erogare elevate potenze.

Queste necessità hanno portato allo sviluppo di motori con corse del pistone molto lunghe (fino a qualche metro) che lavorano a regimi di rotazione piuttosto bassi. Elevate corse del pistone minimizzano la superficie di scambio termico, migliorando il rendimento. In particolare, motori automobilistici sono caratterizzati da rapporti corsa-alesaggio circa unitari (0.8 - 1.2); motori per applicazioni navali o per la produzione di energia raggiungono rapporti anche superiori a 4 (un esempio è il WinGD RT-flex50DF). Avere corse del pistone più estese comporta anche una velocità di rotazione del motore minore, con conseguente minore usura dei componenti meccanici in movimento. La velocità di rotazione si riduce poiché corse maggiori sono sinonimo di raggi di manovella più grandi e bielle più lunghe, le quali aumentano le masse alterne e quelle in rotazione.

Un altro parametro utile a definire la natura del motore è il *rapporto di allungamento* λ , ossia il rapporto tra il raggio di manovella e la lunghezza della biella. Per applicazioni automobilistiche vale circa $\frac{1}{4}$, mentre per applicazioni dove si predilige il rendimento, si può scendere fino a $\frac{1}{10}$. Al diminuire di λ , si riduce anche l'angolo di inclinazione della biella a parità di angolo di manovella. Ciò significa avere minori forze di attrito sulle pareti cilindriche.

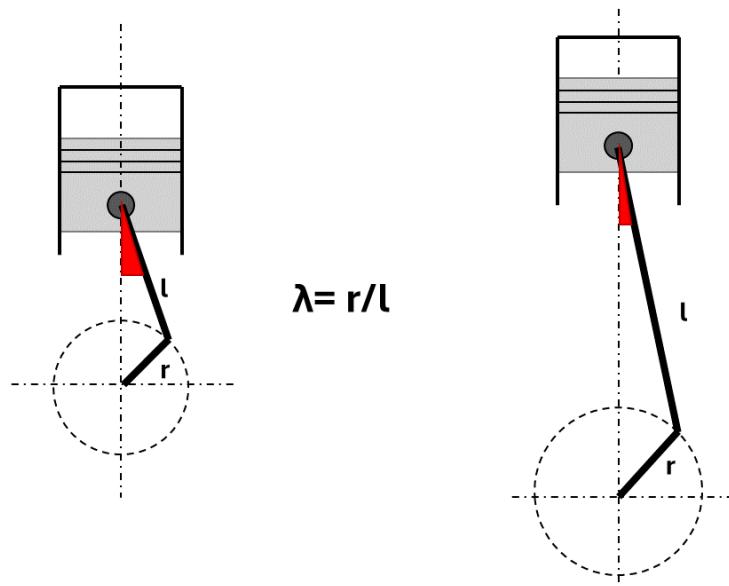


Figura II.I: Schema raffigurante la variazione dell'angolo inclinazione della biella all'aumentare delle lunghezze di biella e manovella

La biella, durante il funzionamento del motore, si comporta come un'asta, ossia un componente meccanico la cui lunghezza è predominante rispetto alle dimensioni trasversali. Ciò significa che può essere sollecitata solo a trazione e compressione, cioè tensioni che si sviluppano lungo l'asse. Quando la biella è inclinata rispetto all'asse del cilindro, si svilupperà una componente normale all'asse del cilindro che causa le forze di attrito tra il pistone e le pareti cilindriche.

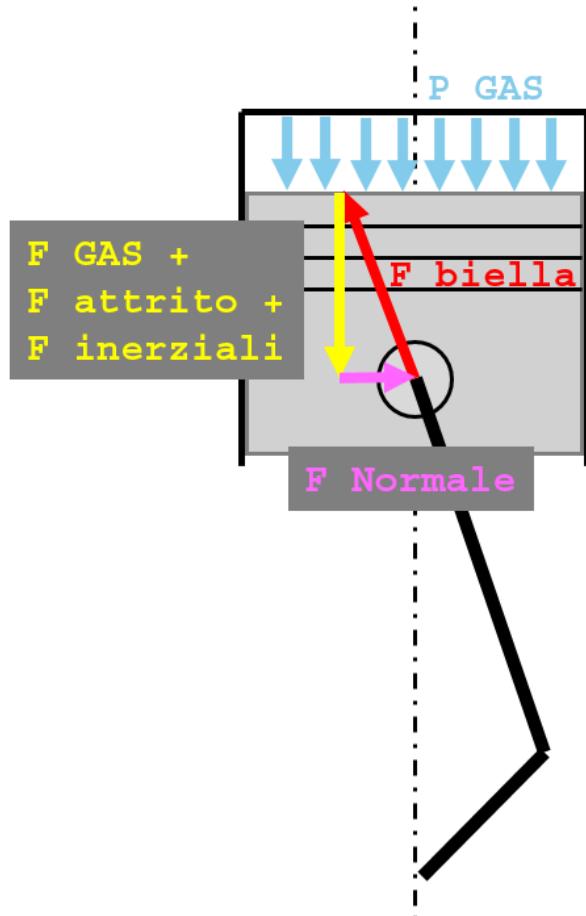


Figura II.II: Triangolo delle forze durante il funzionamento del motore

Come si può dedurre dalla figura II.II, al diminuire dell'inclinazione della biella, si riduce la forza normale e, di conseguenza, anche gli attriti durante il moto.

II.I Meccanismi delle valvole di scarico e di aspirazione

I motori 2 tempi non prevedono valvole di aspirazione ma bensì delle luci sulla superficie cilindrica che vengono scoperte durante la discesa del pistone. Da queste luci entra in camera di combustione la nuova carica di aria fresca proveniente dai collettori di aspirazione. Tali luci vengono coperte con la risalita del pistone e solo successivamente inizia la fase di compressione. A differenza dei motori 2 tempi ad accensione comandata per applicazioni più modeste, i motori 2 tempi ad accensione per compressione di Wärtsilä presentano una grossa valvola di scarico centrale, il cui diametro è poco inferiore rispetto all'alesaggio del pistone. Tale valvola è mossa da un sistema idraulico controllato elettronicamente che permette di cambiare la fasatura di apertura e chiusura durante il funzionamento del motore. Ciò è possi-

bile grazie ad alcuni software specifici presenti nei computer in sala controllo. Un parametro caratteristico dei motori 2 tempi ad accensione per compressione è EVC, ossia Exhaust Valve Closure, il quale rappresenta l'angolo di chiusura della valvola di scarico. È un dato fondamentale poiché al variare di esso, cambia anche il rapporto di compressione effettivo con cui lavora il motore.

I motori 4 tempi invece, presentano solitamente 4 valvole di scarico, quindi una configurazione più simile al campo automobilistico. A differenza dei motori 2 tempi, il meccanismo di apertura e chiusura valvole non è idraulico con comando elettronico, ma è dato da un sistema meccanico, come ad esempio un albero a camme o un sistema aste e bilancieri. Tali sistemi hanno una fasatura fissa e non modificabile tramite software. L'angolo di anticipo di chiusura valvola rispetto al punto morto superiore viene indicato con il parametro TIVC (Technology Intake Valve Closing). L'aspirazione avviene sempre mediante delle luci che vengono scoperte e ricoperte rispettivamente durante le fasi di discesa e risalita del pistone.

II.II Sistemi di sovralimentazione

I motori a combustione interna per applicazioni navali sono sempre sovralimentati, cioè presentano un turbogruppo capace di recuperare l'energia dai gas di scarico e comprimere l'aria aspirata. In particolare, i gas di scarico in uscita dal motore vengono fatti espandere in turbina fino alla pressione ambiente, recuperando energia che viene utilizzata per muovere il compressore montato sullo stesso asse della turbina. Il compressore solitamente è di tipo centrifugo e comprime l'aria aspirata. I turbogruppi si distinguono in monostadio o doppio-stadio: nel primo caso il sistema è composto da un compressore e una turbina, nel secondo caso è composto da due compressori e due turbine in serie, le quali vengono chiamate di alta e bassa pressione.

I motori 2 tempi prevedono solitamente turbogruppi monostadio, ma talvolta, per gestire l'elevata portata di gas e le dimensioni dei componenti meccanici, si utilizzano più turbogruppi in parallelo. Ciò significa che, per esempio, un motore a 18 cilindri in linea può essere diviso in 3 portate che alimentano 6 cilindri ciascuna.

I motori a 4 tempi, invece, possono essere dotati sia di turbogruppi monostadio che di turbogruppi a doppio stadio. La necessità di sviluppare turbogruppi a due stadi deriva dall'applicazione del ciclo Miller; infatti, poiché la corsa di aspirazione disponibile è più breve, la potenza prodotta diminuisce e, per compensare questa riduzione, è necessario aumentare la pressione di sovralimentazione aggiungendo il secondo stadio. Pertanto, un motore a quattro tempi accoppiato con un turbogruppo a due stadi ha prestazioni migliori ed emissioni inquinanti minime, ma, per contro, il sistema risulta essere molto complesso. [1]

Ogni motore sovralimentato presenta una valvola wastegate EWG che consente il controllo della pressione di sovralimentazione. L'EWG è una valvola di bypass che fa defluire una parte della portata dei gas di scarico fuori dalla turbina, scaricandola in ambiente. Nel caso di turbogruppo bistadio, la valvola EWG può essere posizionata solo su una delle due turbine o su entrambe.

II.II.I Valvola Wastegate

Per applicazioni navali, le valvole wastegate sono solitamente valvole a farfalla, mentre in applicazioni automobilistiche si hanno soluzioni più compatte, talvolta integrate nella chiocciola della turbina. La valvola wastegate per motori da nave è esterna alla chiocciola e viene inserita in un circuito di passaggio parallelo alla turbina.

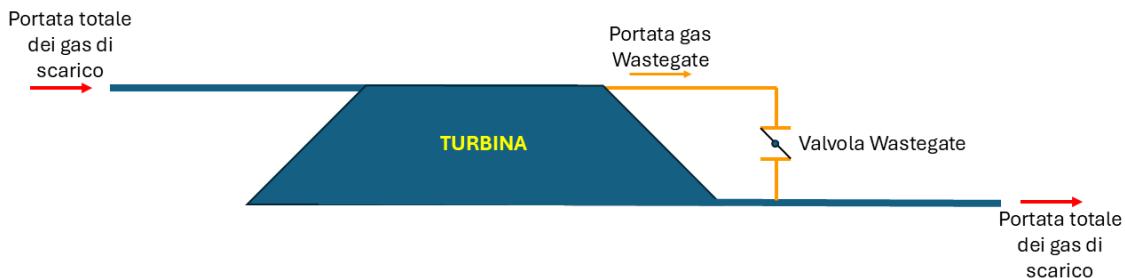


Figura II.III: Schema circuito valvola wastegate in parallelo alla turbina

La curva caratteristica della portata attraverso una valvola a farfalla non è di tipo lineare ma appare come in figura II.IV. Inizialmente, la portata aumenta gradualmente all'aumentare dell'angolo di apertura della farfalla. L'incremento si stabilizza e si mantiene circa costante fino agli ultimi gradi di apertura, per i quali si ha un comportamento asintotico rispetto alla portata nominale.

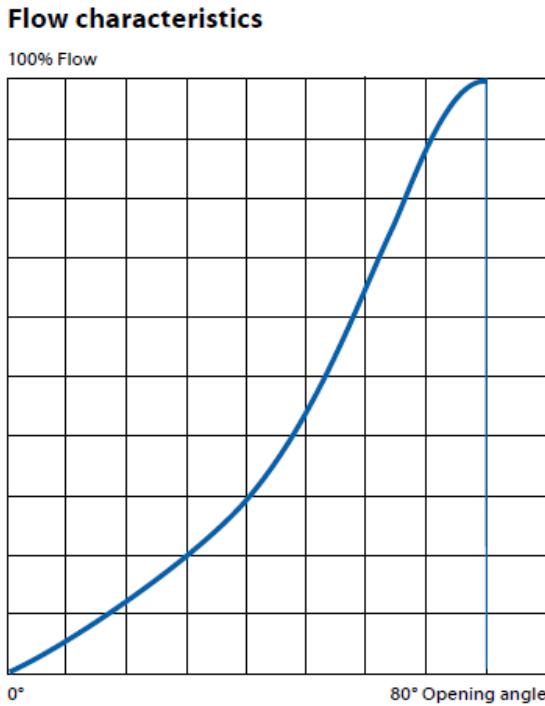


Figura II.IV: Curva caratteristica della portata in funzione dell'angolo di apertura della farfalla

La curva caratteristica della portata può essere approssimata attraverso alcuni coefficienti, il cui valore cambia a seconda della dimensione della valvola e della dimensione nominale delle tubazioni su cui è posizionata. Per poter calcolare la corretta portata che la attraversa, è necessario consultare alcuni coefficienti definiti dal produttore in funzione dell'angolo di apertura e di altri parametri.

Opening Angle (°)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
FLP Factor	0.88	0.86	0.82	0.80	0.74	0.68	0.61	0.60	0.59

Tabella II.1: Factor FLP – Valve Opening Factor (valid for all sizes): indica come varia la portata effettiva in funzione dell'angolo di apertura della valvola. Consente di calcolare la riduzione del flusso rispetto al valore teorico a valvola completamente aperta

Opening Angle (°)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
FL Factor	0.88	0.86	0.82	0.80	0.74	0.68	0.61	0.60	0.59

Tabella II.2: Factor FL – Liquid Pressure Recovery Factor (valid for all sizes): indica la capacità della valvola di recuperare pressione dopo la strozzatura, serve per valutare il rischio cavitazione nell'impianto.

La valvola è installata su tubature che prendono i gas di scarico a monte della turbina e li scaricano a valle. Queste tubature vengono classificate a seconda delle dimensioni e della pressione interna a cui possono essere sottoposte. In particolare, la dimensione è specificata dalla sigla "DN" seguita da un numero che rappresenta l'effettiva misura del diametro nominale in millimetri del condotto. A seconda della

classe di resistenza della tubatura, variano gli attacchi e le flange di accoppiamento, in modo tale da non unire tubature con classi di resistenza diverse. La classe di resistenza è definita dalla sigla "PN" seguita da un numero che rappresenta i bar di pressione nominale a cui può essere sottoposta.

L'azionamento della valvola non è di tipo meccanico ma avviene tramite un sistema pneumatico gestito da un controllo elettronico. Viene regolato in centralina il valore di pressione per il quale aprirsi e l'angolo di apertura in funzione della pressione nelle tubature. Solitamente la valvola Wastegate viene utilizzata solo a carichi molto elevati quindi passa la maggior parte del tempo chiusa, rischiando di bloccarsi in quella posizione. Qualora la valvola rimanesse bloccata, si può ridurre la pressione di sovralimentazione o la velocità della turbina abbassando il carico motore.

II.III Combustibili disponibili

I motori a combustione interna per applicazioni navali sono alimentati solitamente con olio combustibile leggero (Light Fuel Oil - LFO) o olio combustibile pesante (Heavy Fuel Oil - HFO); solo recentemente si è iniziato a sperimentare anche un combustibile gassoso (gas naturale). Il carburante HFO si presenta come una sostanza molto densa a temperatura ambiente, quindi necessita di essere preriscaldato prima di entrare in camera di combustione. Gli LFO invece, hanno caratteristiche più simili ai tradizionali gasoli impiegati in campo automobilistico. Queste tipologie di combustibile, essendo composte da molecole pesanti, tendono ad imbrattare molto la camera di combustione, la testa del pistone e la valvola di scarico, specialmente ai bassi carichi quando in camera si hanno pressioni e temperature inferiori che inibiscono l'accensione per compressione lasciando residui carboniosi. Questo fenomeno può comportare perdite di efficienza del motore e per evitarlo, una recente strategia prevede di effettuare il *downsizing* per far funzionare il motore a carichi maggiori in modo da ridurre i residui carboniosi in camera. Per *downsizing* si intende la riduzione della cilindrata del motore con lo scopo di farlo lavorare a carichi maggiori ottenendo un beneficio sulla combustione e sul consumo specifico di combustibile. Alcuni motori possono essere di tipo *dual fuel*, ovvero possono lavorare sia con alimentazione di gasolio, sia con una miscela magra di aria e gas naturale. Sono solitamente motori ad iniezione indiretta, quindi la miscela aria-gas si realizza prima di entrare in camera. L'inizio della combustione è dato da una piccola iniezione di gasolio che si accende per compressione. Motori di questo tipo presentano benefici in termini di emissioni, ma si ottengono problemi caratteristici del ciclo Otto, come ad esempio la detonazione, ossia il fenomeno di autoaccensione della miscela aria-combustibile durante la compressione.

II.IV Caso studio motore 7L46F

Alcune prove del software WPC sono state effettuate leggendo i dati relativi al motore 7L46F, ossia un motore a combustione interna 4 tempi composto da 7 cilindri in linea. Tale motore viene usato per la propulsione marittima e prevede varie configurazioni possibili, tra cui anche quella alimentata a Diesel presente in laboratorio. In particolare, sono disponibili le seguenti versioni dello stesso motore:

- I. *Wärtsilä 46DF*: motore dual fuel ottimizzato per lavorare con LNG (Gas Naturale Liquefatto) ma che può funzionare anche con combustibili tradizionali.
- II. *Wärtsilä 46F Methanol-ready*: motore Diesel che può essere facilmente convertito a metanolo, poiché condivide alcuni componenti con il motore Wärtsilä 46F Methanol.
- III. *Wärtsilä 46F Methanol*: motore che può funzionare sia a metanolo sia a combustibili tradizionali (Diesel, HFO e LFO).
- IV. *Wärtsilä 46F Diesel*: motore funzionante a combustibili tradizionali.

Il Wärtsilä 7L46F eroga una potenza di circa 8750 kW a circa 600 rpm, il che corrisponde a circa 1250 kW per cilindro. La sigla identificativa del motore suggerisce che l'alesaggio dei pistoni è di 460 mm, mentre la corsa è di 580 mm. [2] Il motore è equipaggiato con il turbogruppo ABB TPL76 CV32 CT45 CD05 CA30 - TV11 TT40 TF10 TN01 TA12. Questa sigla indica la taglia e le caratteristiche di compressore e turbina; in particolare:

- CV32: *Compressor Version 32*. Il 32 rappresenta una numero progressivo definito dal costruttore. Non corrisponde a nessun valore effettivo di alcuna grandezza della macchina, per vedere a cosa corrisponde bisogna cercare la versione sul catalogo. Questo discorso è analogo anche per le sigle successive.
- CT45: *Size of compressor wheel 45*. Questo è uno dei parametri principali di un compressore, poichè stabilisce la taglia della macchina e di conseguenza anche la portata che può elaborare. Maggiore è il numero sulla sigla, maggiore sarà il diametro della girante.
- CD05: *Diffusor version 5*.
- CA30: *Diffuser size 30*. Questo è l'altro parametro principale nella scelta del compressore corretto.
- TV11: *Turbine version 11*. Le sigle che iniziano per "T" fanno riferimento alla turbina; anche in questo caso il numero indica solo un numero progressivo del costruttore con il quale cercare sul catalogo le varie proprietà e caratteristiche.

- TT40: *Blade length 40*. Ogni numero corrisponde ad una diversa altezza delle palette della turbina. Maggiore è il numero sulla sigla, maggiore sarà l'altezza di pala.
- TF10: *Turbine blade stagger angle 10*. Indica l'angolo di svergolamento delle pale della turbina.
- TN01: *Nozzle ring version 1*.
- TA12: *Nozzle ring area 12*. Rappresenta l'area di uscita del fluido quindi questo parametro influenza la contropressione allo scarico che avverte il motore. Maggiore è il numero, maggiore sarà l'area dell'ugello e quindi minore sarà la contropressione.

Ad ogni sigla corrisponde una precisa mappa compressore e una precisa mappa turbina, in quanto ogni sigla definisce una determinata configurazione del turbogruppo. Nell'esempio in esame, si è spiegato il significato di ogni codice, ma bisogna specificare che tale significato vale solo per il costruttore ABB. Utilizzando un turbogruppo diverso, di un altro costruttore, cambieranno le sigle e le modalità di identificazione della configurazione.

II.V Caso studio motore TA6

Il motore denominato TA6 è un motore WinGD RT-flex50DF, ossia un motore 2 tempi, 6 cilindri in linea in grado di funzionare sia con combustibile gassoso (LNG) che con combustibile liquido. Il TA6 è caratterizzato da un alesaggio di 500 mm e una corsa di 2050 mm. Come tutti i motori 2 tempi per applicazioni navali, lavora a bassi regimi di rotazione (90-125 rpm) [3] e ciò consente di calettare direttamente l'elica responsabile della propulsione all'albero motore, senza avere problemi di cavitàzione.

Come anticipato, è un motore *dual fuel*, cioè è in grado di funzionare sia a gas sia a combustibile liquido. Il funzionamento a combustibile liquido è sempre disponibile a patto che vi sia pressione sufficiente nel rail di iniezione. Il sistema di iniezione è infatti di tipo *common rail* ed è governato da un controllo elettronico, cioè si ha un circuito oleodinamico nel quale si hanno valvole che vengono commutate di posizione elettronicamente dall'automazione del motore. Gli iniettori utilizzati su questa tipologia di motori a combustione interna differiscono da quelli impiegati in campo automobilistico. In particolare, sulle vetture e sui mezzi tradizionali si hanno iniettori governati da un solenoide monostabile, quindi affinché si abbia l'iniezione, si deve mantenere eccitata la bobina. La regolazione di combustibile iniettato avviene grazie ad una regolazione in frequenza della tensione. Si alimenta la bobina

con un picco di tensione iniziale che ha il compito di vincere le inerzie e gli attriti; mentre una volta sollevato lo spillo, si fornisce una serie di impulsi e spegnimenti al solenoide. In questo modo, la bobina risente di una tensione media che si può vedere come una media pesata in funzione della frequenza. Variando la frequenza degli impulsi, la tensione media che il solenoide sente varierà di conseguenza. L'eccitazione del solenoide dura tipicamente qualche decina di millisecondi, altrimenti si rischia di bruciare il solenoide.

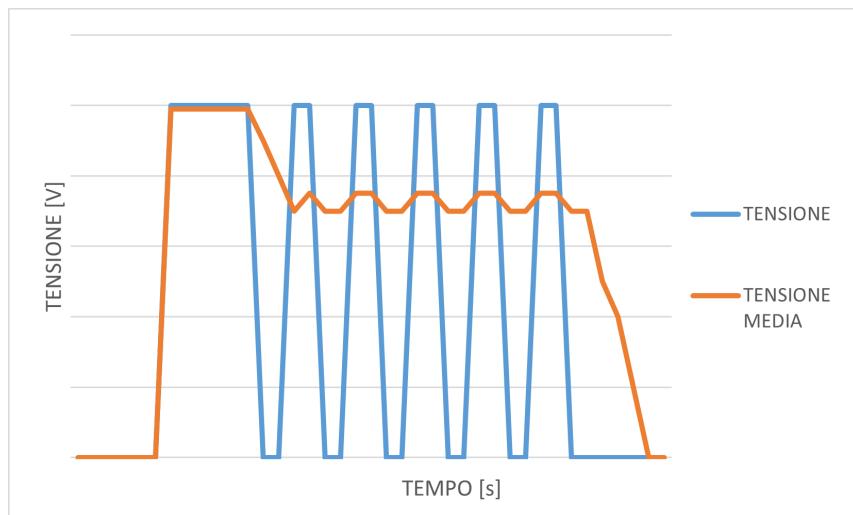


Figura II.V: Andamento qualitativo della tensione di alimentazione del solenoide negli impianti di alimentazione in campo automobilistico

Nel caso del motore TA6 si ha invece un solenoide bistabile, cioè un dispositivo che, quando viene alimentato, commuta la sua posizione e la mantiene fino all'eccitamento successivo. Per l'iniezione su questo tipo di motori, si ha quindi bisogno di un'eccitazione di inizio che solleva lo spillo e una di fine che lo richiude.

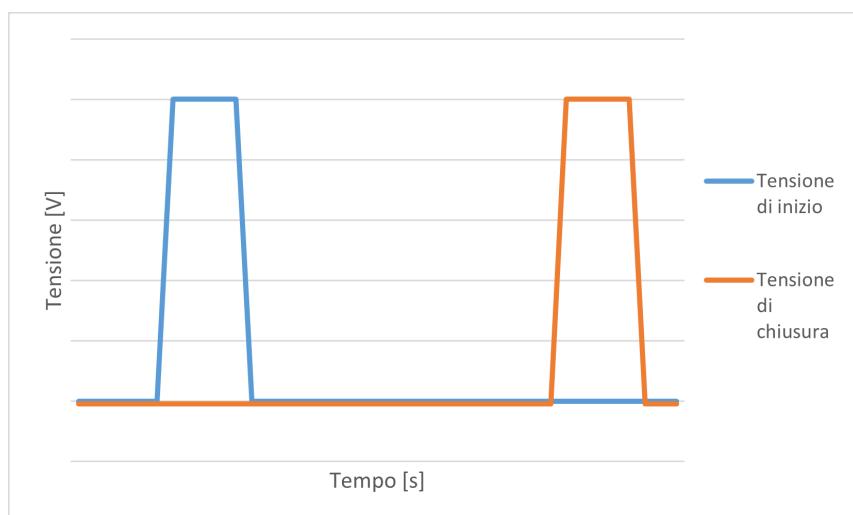


Figura II.VI: Andamento qualitativo della tensione di alimentazione del solenoide bistabile nel motore TA6

Capitolo III

Panoramica delle attività sperimentali a bordo nave

Lo scopo principale dei test che vengono effettuati a bordo nave consiste nel monitorare il funzionamento del motore e il rispetto delle normative antinquinamento promosse dall'IMO (International Maritime Organization). Tali normative risultano sempre più stringenti e si focalizzano principalmente sulle emissioni di ossidi di azoto (NOx) e delle sostanze responsabili dell'effetto serra. I limiti sulle specie chimiche inquinanti e climalteranti vengono espressi per unità di potenza erogata dal motore (g/kWh); per questo motivo è nata la necessità di sviluppare un software calcolatore che restituisse valori di emissioni direttamente confrontabili con quelli riportati sulle normative. Discorso analogo vale anche per il consumo di carburante, il quale viene definito BSFC (Brake Specific Fuel Consumption) ed espresso anch'esso in g/kWh. Per poter raccogliere tutti i dati necessari ai calcoli e ai vari software, gli operatori a bordo nave devono:

- I. misurare le condizioni termodinamiche;
- II. analizzare le emissioni allo scarico;
- III. misurare le portate di combustibile;
- IV. leggere la velocità di rotazione dell'albero motore e la coppia applicata;
- V. Analizzare la combustione attraverso opportuni software che basano i propri calcoli sulle condizioni termodinamiche rilevate.

Talvolta, per analisi più specifiche o commissioni particolari, può essere richiesto qualche ulteriore dato, come ad esempio le temperature in precisi punti all'interno della camera di combustione o su alcune zone di alcuni componenti meccanici (valvole, pistoni,...), oppure l'analisi dei circuiti di olio lubrificante e acqua motore.

Il programma WPC, durante il lavoro oggetto di questo elaborato, è stato sviluppato

leggendo i dati di alcuni motori presenti nei laboratori di Wärtsilä Italia. In questo caso si aveva accesso ad una quantità molto maggiore di dati, in quanto in laboratorio vengono controllati anche tanti parametri ausiliari, disponendo di sensori e capacità che spesso a bordo nave sono difficili da reperire.

III.I Analisi delle condizioni termodinamiche

Per condizioni termodinamiche si intendono principalmente pressione, temperatura e umidità dell'aria o del fluido in uno o più punti dell'impianto. In particolare, è richiesto agli operatori di rilevare le condizioni relative a 6 diversi punti: ambiente, nei condotti a monte del compressore, in quelli a valle del compressore, nei receiver (ingresso motore), nei condotti di ingresso turbina e in quelli allo scarico della turbina. Tra l'uscita del compressore e l'ingresso al motore, le condizioni termodinamiche dell'aria variano in quanto è presente uno scambiatore di calore che ha lo scopo di raffreddare il fluido a seguito della compressione. In questo modo si evitano temperature in camera di combustione troppo elevate, le quali metterebbero a dura prova l'affidabilità dei componenti meccanici, oltre che a comportare emissioni maggiori di ossidi di azoto.

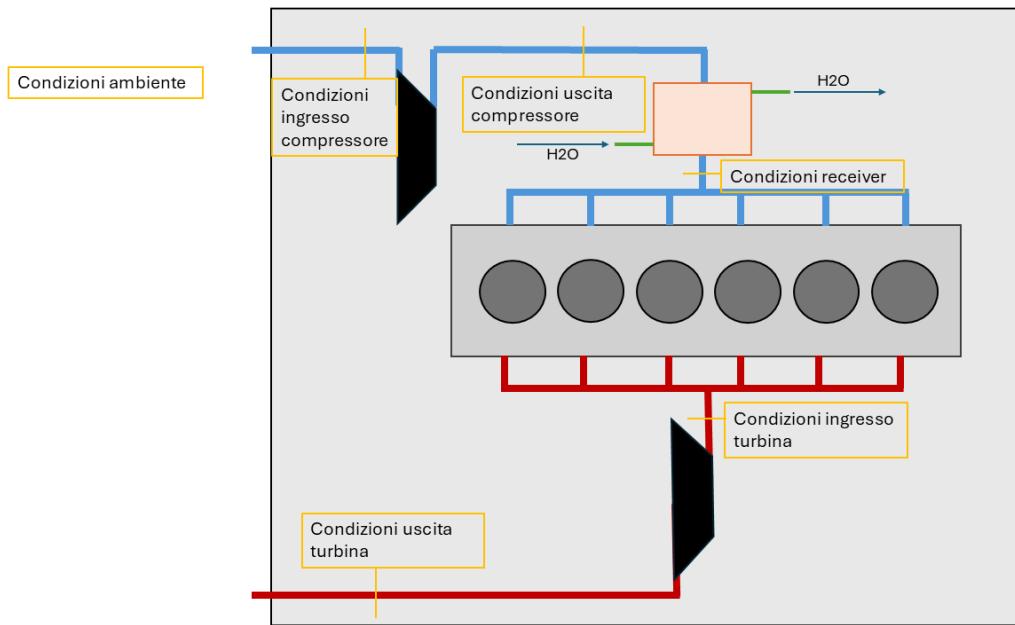


Figura III.I: Schema impianto motore

Queste grandezze vengono misurate attraverso alcuni sensori digitali, come termocoppe e trasduttori di pressione. Tali dispositivi sono solitamente connessi a schede di acquisizione dati chiamate QLI50. Queste schede vengono collegate ad un processore o alla centralina motore per ricevere l'alimentazione e le procedure ne-

cessarie per effettuare le misurazioni. Sul processore è installato il software Labtool che rende i dati leggibili all'operatore e ne consente la memorizzazione o l'invio ad altri dispositivi.

III.II Analisi delle emissioni inquinanti

La misura viene effettuata attraverso appositi macchinari facilmente trasportabili, che prelevano un campione dei gas di scarico dai condotti, lo analizzano e restituiscono la concentrazione delle specie chimiche presenti in valore percentuale o parti per milione, a seconda della sostanza. In particolare, si ha un filtro riscaldato che preleva una portata di gas di scarico dell'ordine di qualche litro al minuto, la mantiene a 180°C fino all'ingresso del macchinario successivo. È importante che i gas non perdano temperatura nel trasporto, altrimenti si rischia la condensazione dell'acqua, la quale potrebbe legarsi ad alcune specie chimiche alterando le reali concentrazioni. Il flusso di gas caldo entra in un frigo ad effetto Peltier, il quale raffredda i gas fino a 5°C per condensare l'acqua presente ed espellerla tramite una pompa di drenaggio. Successivamente il flusso viene inviato all'analizzatore dei gas, il quale ha anch'esso un piccolo chiller che garantisce la corretta temperatura dei gas di scarico per l'analisi delle specie inquinanti. Wärtsilä utilizza due modelli di *Horiba*, ossia un costruttore giapponese di strumenti di precisione. Dispone di *Horiba PG250* e *Horiba PG350*, le quali sono una l'evoluzione dell'altra. La principale differenza tra le due è la diversa modalità di comunicazione con dispositivi terzi. La PG250 invia dati secondo protocollo di comunicazione Modbus RS232C seriale, mentre la Horiba PG350 invia i dati misurati via Modbus ethernet (approfondimento di questi due protocolli al capitolo IV).

III.II.I Specie chimiche inquinanti e relative tecnologie di rilevazione

Gli **ossidi di azoto**, indicati con NO_x , rappresentano una delle specie chimiche soggette ai limiti di emissione più stringenti e comprendono sia il monossido di azoto (NO) che il biossido di azoto (NO_2). Gli NO_x si formano ad alte temperature, quindi solitamente si ottengono le massime concentrazioni con combustioni complete e prossime al caso ideale. Questi inquinanti sono responsabili dello smog fotochimico e possono causare irritazioni alle vie respiratorie umane.

I macchinari Horiba riescono a valutare le concentrazioni di NO_x attraverso il principio della chemiluminescenza. Lo strumento necessita di Ozono O_3 , il quale viene fatto reagire con l'ossido di azoto (NO) per ottenere ossigeno e una forma eccitata di NO_2 . Tale forma risulta instabile e tenderà a tornare alla forma base, emettendo

energia sotto forma di una luce, la cui entità sarà proporzionale alla concentrazione di ossidi di azoto. Questa tecnologia si basa su un principio valido esclusivamente per gli NO, quindi si deve avere un NO_x converter che trasformi gli NO_x allo scarico in NO. [4]

L'**anidride carbonica CO₂** è un gas inerte con proprietà climalteranti. È uno di quei gas responsabili dell'effetto serra e del conseguente cambiamento climatico. La CO₂ è un naturale prodotto della combustione poiché deriva dall'ossidazione delle molecole carboniose.

L'anidride carbonica viene valutata tramite un impianto NDIR, il quale confronta la luce a infrarossi (emessa dalla cella) che attraversa i gas di scarico con la luce a infrarossi di pari intensità e frequenza che attraversa un gas noto di riferimento. Tale metodo rientra nella famiglia dei metodi a infrarossi non dispersivi. Con metodi simili si leggono anche le concentrazioni di CO e SO₂.

Il **monossido di carbonio CO** è un gas incolore e inodore tossico per gli esseri umani. È il tipico prodotto di una combustione in carenza di ossigeno e può essere ridotta la sua concentrazione, completando l'ossidazione in CO₂.

Come la CO₂, anche il monossido di carbonio può essere valutato attraverso un NDIR. In figura III.II, si ha un emettitore di luci ad infrarossi che illumina la cella di misura, la quale viene alimentata alternativamente da gas di scarico e gas di riferimento. La luce che attraversa la cella e i gas arriva al *Beam splitter*, ossia un sistema ottico che sdoppia il segnale luminoso e consente la misura in contemporanea di CO e SO₂. A valle del divisore, si ha il *detector*, ossia un componente formato da una membrana che registra le oscillazioni di pressione dovute alla diversa energia trasportata dalla luce durante le fasi di funzionamento. Queste oscillazioni di pressione sono poi convertite in un segnale digitale di uscita. Ogni ramo di misura si divide a sua volta in due componenti: main e comp. Il main rappresenta l'effettiva misura, mentre il secondo è il ramo di compensazione. La centralina esegue dei calcoli per depurare la misura dagli effetti di compensazione e interferenza e restituisce la concentrazione delle specie chimiche (CO e SO₂). [5]

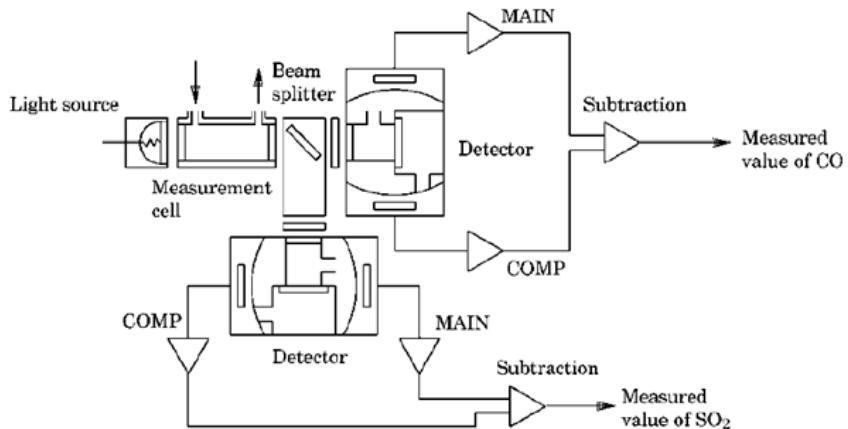


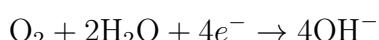
Figura III.II: Schema di un impianto NDIR

Gli ossidi di zolfo SO_x sono un gruppo di composti chimici formati da ossigeno e zolfo. I principali SO_x che si possono trovare allo scarico del motore sono SO₂ e SO₃, e derivano principalmente dalla tipologia del combustibile utilizzato. Infatti, le benzine moderne e gli altri combustibili più comuni, presentano solo tracce di zolfo al proprio interno; discorso diverso per carbone, petrolio e gas naturale, ossia per quei combustibili tipici di applicazioni navali o per produzione di energia. Gli SO_x sono considerati inquinanti atmosferici e possono contribuire all'inquinamento dell'aria e alla formazione dell'acido solforico (H₂SO₄) e delle polveri sottili nell'atmosfera. [6]

L'ossigeno O₂ non rientra tra le specie chimiche inquinanti ma viene comunque misurato dal macchinario. È importante conoscere la sua concentrazione nei gas di scarico poiché consente di calcolare la portata dell'aria attraverso il metodo del *Carbon Balance*, ossia una formulazione che si basa sul bilancio tra la quantità di carbonio in ingresso al motore e quella in uscita.

La concentrazione di ossigeno viene valutata mediante una cella galvanica, cioè un dispositivo elettrochimico che converte energia chimica in energia elettrica attraverso una reazione spontanea di ossido-riduzione. La cella è composta da un anodo realizzato in oro, un catodo in piombo, mentre come elettrolita si può avere l'idrossido di potassio KOH o il cloruro di potassio KCl. Agli elettrodi viene collegata un'opportuna resistenza elettrica; i gas di scarico attraversano una membrana permeabile e l'ossigeno viene deossidato dall'anodo. La reazione elettrochimica genera una forza elettromotrice che sarà proporzionale alla concentrazione di ossigeno nel gas. [5]

Sull'anodo:



Sul catodo:



III.III Misura della portata di combustibile

La portata di combustibile può essere misurata in vari modi. Può avvenire infatti attraverso un flussometro oppure attraverso un "Gravity tank", ossia un serbatoio strumentato con delle celle di carico che misurano la variazione di massa in un certo intervallo di tempo. Di solito i flussometri si basano sul principio delle forze di Coriolis o sul principio degli ultrasuoni. Le forze di Coriolis sono quelle forze che derivano dallo scorrere di un fluido all'interno di un tubo vibrante, e che tendono a flettere o torcere il tubo stesso. Queste forze generano piccole deformazioni che vengono rilevate da appositi sensori posizionati opportunamente. Lo sfasamento tra i segnali dei vari sensori risulta proporzionale alla portata massica del fluido. È possibile anche determinare la densità del fluido grazie alla frequenza di vibrazione del tubo. I flussometri di questo tipo sono quindi molto apprezzati per la semplicità di utilizzo e la loro affidabilità. Il principale aspetto negativo è che bisogna modificare il normale circuito del combustibile e quindi si possono montare solo quando la portata nei tubi è nulla.

I flussometri ad ultrasuoni sono dispositivi composti da una o più coppie di trasduttori, che vengono posizionati in senso longitudinale su un tubo e non necessitano di alcuna modifica del circuito. Per ogni coppia di trasduttori si ha un emettitore di segnali ad ultrasuoni ed un ricevitore. In particolare, il trasduttore emettitore genera una serie di impulsi sonori che vengono trasmessi all'interno della tubazione e nel fluido. L'onda sonora propaga fino al contatto con la parete, viene riflessa e poi captata dal trasduttore ricevitore. I trasduttori, in realtà, possono invertire il loro funzionamento, cioè il ricevitore può funzionare anche da emettitore e viceversa. Ogni misura viene quindi effettuata sia nella direzione in cui scorre il flusso sia nella direzione contraria. La differenza di tempo trascorso tra invio del segnale e ricezione nei due sensi è proporzionale alla velocità. Qualora tale differenza dovesse essere nulla, il fluido all'interno della tubazione è fermo.

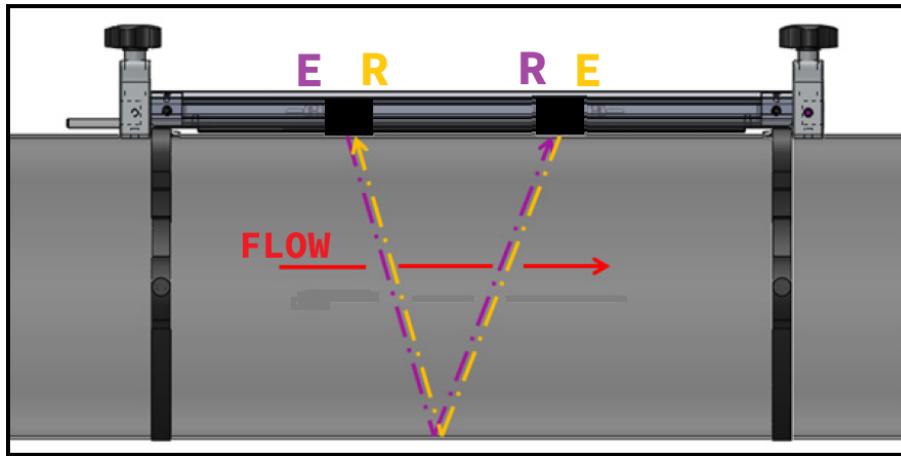


Figura III.III: Schema funzionamento di un generico flussometro ad ultrasuoni

A differenza del flussometro basato sulle forze di Coriolis, questo strumento è più semplice da installare ma meno affidabile, in quanto potrebbe leggere valori errati nel caso di moto turbolento all'interno del condotto.

In alternativa ai flussometri, si può ricorrere ad un *Gravity tank* per la lettura della portata di combustibile. Questa tecnologia si basa su un approccio gravimetrico, si misura quindi una variazione di forza peso in un intervallo di tempo. Il serbatoio da cui viene prelevato il combustibile è strumentato con sensori capacitivi, cioè sensori composti da due superfici conduttrici separate da uno strato intermedio di dielettrico. In particolare, una delle due superfici è la parete stessa del serbatoio, mentre la seconda è la bilancia di supporto e il dielettrico è l'aria tra esse interposta. Al variare della quantità di combustibile contenuta nel serbatoio, varierà la distanza con la bilancia, provocando una variazione di capacità elettrica, che viene tradotta in un segnale di tensione.

A bordo nave e in laboratorio, si hanno più portate di combustibile da conoscere. Si ha infatti che solo una porzione della portata prelevata dal serbatoio finisce effettivamente in camera di combustione; la rimanente è utilizzata per il funzionamento del sistema di iniezione e ritorna al serbatoio. Si avrà anche una minima parte di perdite, le quali hanno un circuito di ricircolo dedicato. Il software WPC è stato sviluppato in modo tale che sia possibile distinguere le varie portate e che solo quella netta che arriva in camera, venga utilizzata nei calcoli.

III.IV Lettura della velocità di rotazione e della coppia trasmessa

La velocità di rotazione dell'albero motore viene valutata mediante un encoder magnetico posizionato sul volano. L'encoder è uno strumento che converte il movimento

rotatorio in segnali elettrici digitali per indicare posizione, velocità e direzione. Questo strumento è composto da un sensore magnetico posto ad una distanza minima dai denti presenti sul volano del motore. Durante il funzionamento del motore, il sensore è esposto alternativamente a denti e cavità. Quando è affacciato al dente, il campo magnetico aumenta per effetto Hall, cioè quel fenomeno fisico in cui si genera una tensione elettrica in un conduttore attraversato da corrente e immerso in un campo magnetico. La tensione che viene generata risente della velocità di rotazione dell'albero, in quanto varia anche il tempo di esposizione del sensore al dente. Lo stesso sistema è utilizzato anche per misurare la velocità di rotazione della turbina, con la differenza che questa, invece di avere una normale ruota dentata, presenta una ruota con uno o due soli denti.

La coppia trasmessa all'albero motore viene valutata invece attraverso alcuni estensimetri incollati sull'albero. Si utilizzano rosette estensimetriche a 45° , poiché le tensioni dovute alla torsione si sviluppano a 45° rispetto all'asse dell'albero. Gli estensimetri sfruttano il principio della variazione della resistenza elettrica in risposta alla deformazione meccanica di un materiale, quindi devono essere alimentati da un circuito elettrico, che di solito corrisponde al *Ponte di Wheatstone*. Tale circuito non può essere alimentato via cavo come un normale circuito in quanto si trova sopra ad un componente in rotazione. L'alimentazione elettrica avviene attraverso un accoppiamento induttivo tra una bobina e una banda induttiva aderente all'albero motore. La bobina è esterna e in posizione fissa ad una certa distanza dalla banda. La bobina, quando viene eccitata, provoca un campo magnetico che induce corrente elettrica sulla banda, la quale finisce per alimentare il circuito elettrico del Ponte di Wheatstone.

La lettura della velocità di rotazione e la lettura della coppia trasmessa vengono trasmesse all'utente e a Labtool attraverso la telemetria.

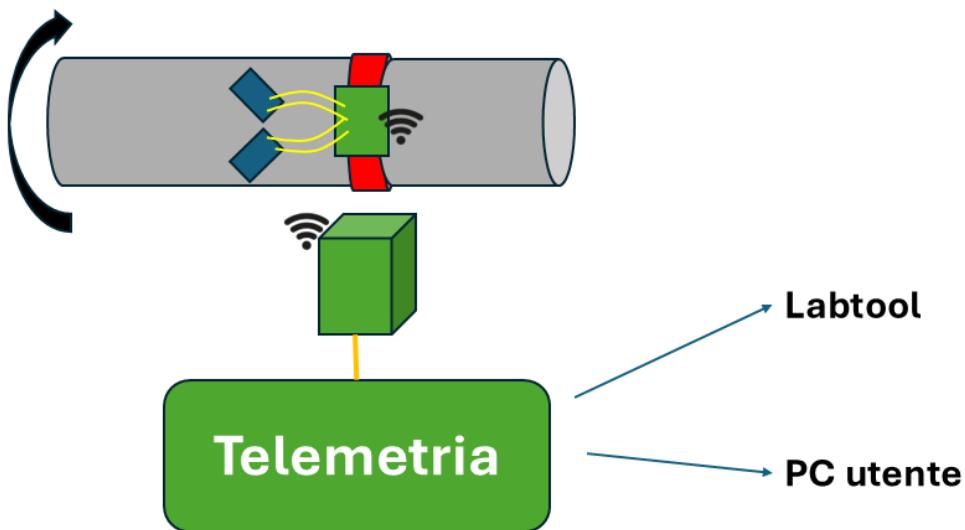


Figura III.IV: Schema del funzionamento della telemetria e della banda capacitiva di alimentazione per circuito estensimetrico

Una volta a conoscenza della velocità di rotazione e della coppia trasmessa è possibile determinare facilmente la potenza disponibile all'albero motore. La potenza può essere valutata anche in altre maniere, come ad esempio attraverso il freno ad acqua presente nei banchi prova di Wärtsilä. Il freno ad acqua è un freno idraulico composto da una parte statorica e una rotorica, connessa mediante flange all'albero motore. L'acqua viene convogliata nell'intercapedine tra il rotore e lo statore, dove viene trascinata in rotazione dal movimento del rotore stesso. Questo movimento causa attrito, che a sua volta trasmette la rotazione allo statore, generando una coppia motrice che agisce sulla cassa statorica. Per valutare l'entità di questa coppia, è necessario applicare un momento frenante, ovvero una forza G applicata a una certa distanza b dall'asse di rotazione [1].

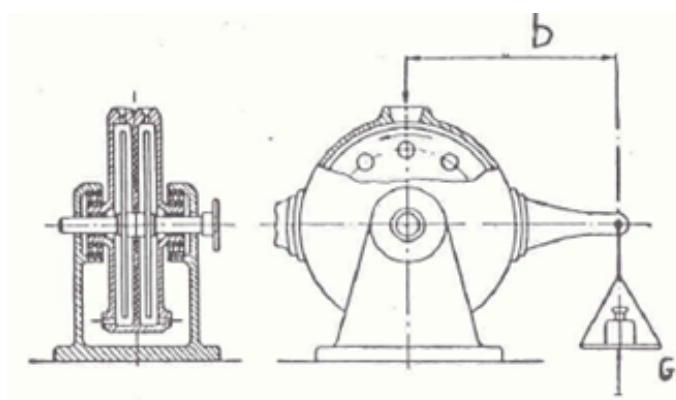


Figura III.V: Schema di funzionamento del freno ad acqua

In alternativa è possibile utilizzare un alternatore, ossia una macchina elettrica che consente di modulare la resistenza meccanica all'albero motore.

A bordo nave invece, la potenza viene calcolata direttamente dalla strumentazione di bordo che equipaggia la plancia di controllo.

III.V Analisi della combustione

L'analisi della combustione a bordo nave avviene solitamente mediante un software di *Dewesoft*, ossia un'azienda specializzata in programmi e dispositivi per la raccolta, l'elaborazione e l'analisi dei dati. In particolare, il software Dewesoft utilizzato consente di rappresentare e analizzare la combustione e il ciclo motore. Raccoglie grandi volumi di dati ad elevate frequenze (100 000 Hz) che, se inviati direttamente all'utente, saturerebbero la comunicazione provocando problemi o interruzioni. Per questo, prima di essere inviati all'utente in sala di controllo, i dati devono essere filtrati. Di solito, sono richiesti solo i valori principali del ciclo motore, quindi la pressione massima e la temperatura massima che si raggiungono all'interno della camera di combustione [4].

In laboratorio si hanno disponibili anche altri strumenti, come ad esempio alcuni software di AVL, di WinGD o di Konsberg. Questi programmi di lettura dati motore consentono anche il controllo dei principali parametri che determinano il comportamento del motore. È possibile infatti gestire l'antropo di iniezione, l'angolo di chiusura valvola sui motori 2 tempi e distribuire in modo più o meno omogeneo la quantità di combustibile tra i vari iniettori. Ogni modifica comporta una variazione del ciclo motore e quindi variano le temperature e le pressioni in camera di combustione. Tali software consentono una rappresentazione in tempo reale degli andamenti di pressione in camera, frazione di massa bruciata, quantità di combustibile iniettato e stima del rilascio termico.

III.VI Architettura della comunicazione a bordo nave

In figura III.VI è riportato uno schema riassuntivo dell'architettura della comunicazione tra i vari strumenti di misura e l'utilizzatore a bordo nave. In laboratorio si ha un impianto analogo ma presenta un maggior numero di sensori e dispositivi connessi alla rete.

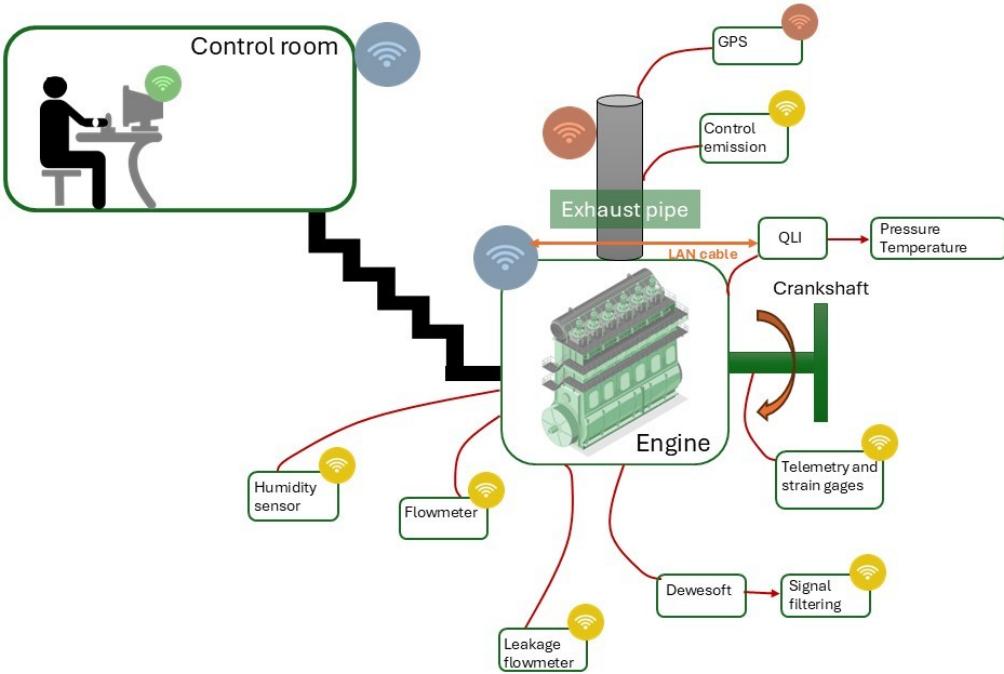


Figura III.VI: Schema riassuntivo dell'architettura della comunicazione tra i vari strumenti a bordo nave

Al centro dell'immagine è raffigurato il motore, sul quale vengono collegati i vari sensori e gli strumenti di misura. Ogni dispositivo è connesso ad una rete wifi privata la quale consente la condivisione in tempo reale dei dati misurati all'operatore in sala di controllo. In particolare, i singoli sensori (simboli gialli in figura III.VI) comunicano al modem wifi posto sul motore, che si differenzia per una maggiore frequenza di lavoro e una maggiore velocità di trasmissione dati. Tale modem invia i dati raccolti dai sensori al modem presente nella sala di controllo, al quale è connesso l'operatore con il proprio PC. [4]

III.VII Architettura della comunicazione WPC-Labtool

Per poter funzionare correttamente, il programma WPC necessita di comunicare costantemente con **Labtool**, ossia un software di acquisizione dati che permette di:

- I. visualizzare in tempo reale i dati letti dagli strumenti collegati via Modbus
- II. controllare i dispositivi ad esso connessi via Modbus
- III. calcolare in tempo reale vari parametri
- IV. registrare e memorizzare i dati in grafici e trend per uno studio successivo
- V. auto-creare un file Excel, chiamato "Snapshot, che consente di esportare i valori mediati dei dati misurati.

Labtool è un programma modulare, composto da processi separati e indipendenti in grado di dialogare grazie ad una comunicazione multicast UDP. [7] In particolare, i moduli sono sei:

- I. *ProcessManager.exe*: è il programma principale, controlla l'inizio e la fine della comunicazione, definisce gli ordini di lavoro degli altri moduli monitorando il loro stato. Il *ProcessManager.exe* si presenta come una schermata con tante finestre quanti sono i processi lanciati.
- II. *Logger process*: i loggers sono dei processi master Modbus che consentono la comunicazione con dispositivi esterni. Dato che le comunicazioni possono essere di diverso tipo (seriale, ethernet, UDP, ...) i loggers cambieranno a seconda del tipo di comunicazione. Ogni logger è identificato da un nome univoco e contiene tutti i *data points* che condividono lo stesso indirizzo IP o porta COM (a seconda della natura della comunicazione). I *Points* sono i singoli input o output assegnati ad un specifico logger.
- III. *MMI.exe*: l'acronimo sta per Machine-Man-Interface e come suggerisce il nome, è una finestra di interfaccia per l'utente dalla quale è possibile vedere stampati a video i valori di uno o più Points di un Logger. La schermata è completamente personalizzabile dall'utente, il quale può inserire anche schemi o immagini dell'impianto per spiegare il significato dei Points riportati. È possibile anche inserire tasti, tramite i quali comandare a distanza le applicazioni in LabView e, indirettamente, anche gli strumenti di misura.
- IV. *Datasaver.exe*: è il modulo responsabile alla creazione dei file di salvataggio nel database e registrarvi all'interno le registrazioni fatte dai sensori. Il database di Labtool non è il database SQLite descritto al capitolo V. I dati salvati sul database Labtool possono essere utilizzati anche da programmi terzi per diagrammare trend o per fare post-analisi.
- V. *MQNameServer.exe*: è il processo che controlla che non siano stati aperti due Labtool con lo stesso indirizzo del server.
- VI. *PointInfo.exe*: è il processo che indica i ponti e i loggers di Labtool.

Quando Labtool viene utilizzato per leggere dei dati dai dispositivi ad esso connessi, il *Logger Process* legge con un preimpostato intervallo di campionamento il valore dei Points di interesse dallo strumento attraverso il protocollo Modbus TCP. Tali valori vengono poi inviati mediante protocollo multicast UDP agli altri processi, come ad esempio *MMI.exe* e il *Datasaver.exe*.

Quando invece dalla *MMI.exe* si manda un comando per il dispositivo connesso, viene inviato un segnale UDP con il nuovo valore definito dall'utente, che viene letto

dal *Datasaver.exe* il quale aggiornerà il database. La stringa di dati UDP viene letta anche dal *Logger Process* il quale invia un output allo strumento connesso.

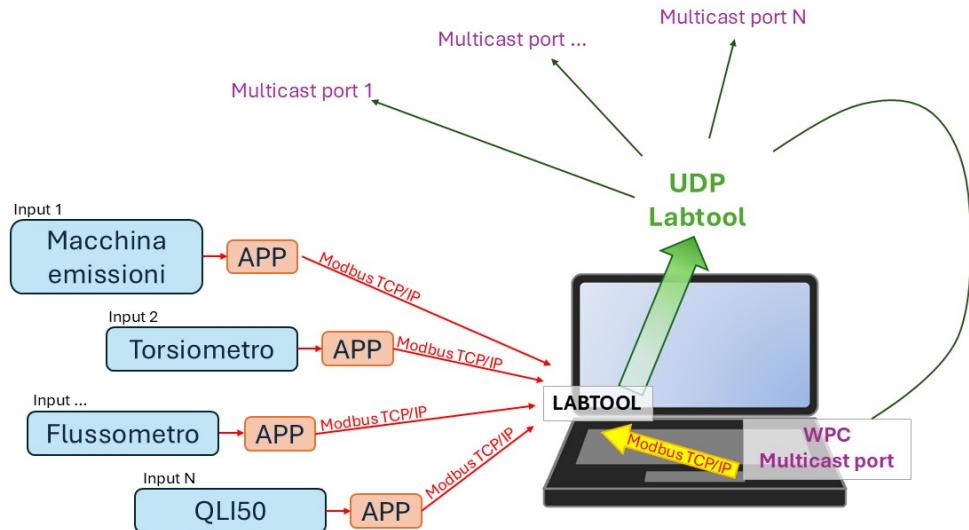


Figura III.VII: Schema riassuntivo dell'architettura della comunicazione

In figura III.VII, è riportato uno schema riassuntivo della comunicazione tra strumenti e Labtool. In particolare, ogni macchinario acquisisce dati e li manda, tramite una comunicazione Modbus a doppio senso, ad un'applicazione LabView, la quale genera i loggers necessari per poter dialogare con il Labtool installato sul PC. Solitamente questa prima comunicazione è di tipo Ethernet TCP/IP, ma ci possono essere alcune eccezioni che necessitano di una comunicazione Modbus seriale; in tal caso si inserisce un convertitore che trasforma la comunicazione da seriale a Ethernet. Tale dispositivo può essere un N-Port o un M-gate. Un M-Gate è un dispositivo che consente di trasformare un segnale Modbus seriale di ingresso (su rete RS-232/422/485) in un segnale Modbus Ethernet di uscita con protocollo TCP. In questo modo, il dispositivo connesso al PC può essere raggiunto tramite indirizzo IP della porta. Un N-Port esegue un compito simile, ma invece di convertire il protocollo di ingresso, crea una porta COM virtuale mantenendo il segnale invariato. [4]

Una volta giunto all'applicazione LabView, il segnale prosegue verso Labtool secondo protocollo Modbus TCP. La comunicazione Labtool-LabView è anch'essa a doppio senso, in quanto essendo Labtool un *master*, ha bisogno di inviare segnali ai vari *slave* per ricevere i dati raccolti. Labtool è un software capace di dialogare esclusivamente via Modbus e necessita di un logger specifico per ogni slave, quindi per poter stabilire una corretta connessione, serviranno tanti logger quanti sono gli

slave con cui deve interfacciarsi.

I dati di input al Labtool vengono poi raggruppati e trasmessi in streaming via UDP tutti assieme all'indirizzo UDP configurato. Questo continuo flusso di dati viene poi "sniffato" dai vari dispositivi connessi, come ad esempio il software WPC in esame. Ogni "sniffatore" filtra il flusso continuo di dati in streaming attraverso la porta multicast. Dopo aver raccolto i dati, il software WPC elabora i calcoli e restituisce i risultati, i quali verranno rinviati al Labtool per via Modbus TCP, comunicando con la porta Ethernet impostata in fase di comunicazione. In particolare, per convenzione interna, si è deciso di numerare le porte Ethernet con numeri a tre cifre: la prima cifra è sempre 6, mentre le due successive corrispondono all'*ID application*. In figura V.XIV tale porta è chiamata 619, in quanto si è dato come ID il numero 19.

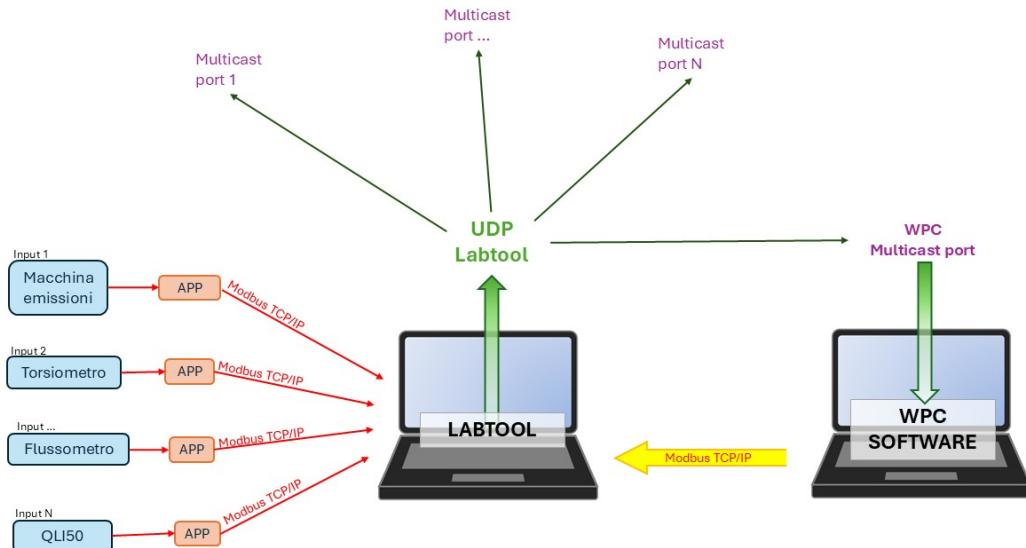


Figura III.VIII: Schema riassuntivo dell'architettura della comunicazione tra due computer distinti

Come anticipato nel capitolo V.IX, è possibile utilizzare anche un'architettura a due computer: uno sul quale è installato Labtool per la lettura dei dati motore e un secondo sul quale è installato il software WPC LabView. Il funzionamento rimane analogo a quanto illustrato per il caso ad un solo PC. Bisogna solo configurare diversamente la comunicazione, inserendo invece del Localhost, l'indirizzo IP della porta con cui il PC con il software LabView, comunica con la rete UDP. In particolare, è stata utilizzata proprio questa seconda configurazione durante i test effettuati per il progetto di tesi.

Capitolo IV

Principi teorici del protocollo Modbus

Il protocollo Modbus è un protocollo di comunicazione che può avvenire sia attraverso rete seriale che rete Ethernet. Un’ulteriore distinzione è legata al formato dei dati trasmessi, infatti si distingue in Modbus ASCII, che prevede dati in formato ASCII, e in Modbus RTU, che invece scambia dati in formato esadecimale.

IV.I Standard RS232

Nel caso di Modbus seriale, la comunicazione può avvenire su standard RS232 o RS485. Lo standard RS232 è una comunicazione tra due dispositivi resa possibile attraverso un cavo DB9 o DB25. In particolare, il collegamento minimo affinché si abbia dialogo, prevede l’utilizzo dei pin 2 (RXD) e 3 (TXD), ossia quelli relativi rispettivamente alla ricezione e alla trasmissione di dati. In tal caso avviene tramite un cavo incrociato, cioè un cavo che collega il pin RXD del primo dispositivo con il pin TXD del secondo. [8]

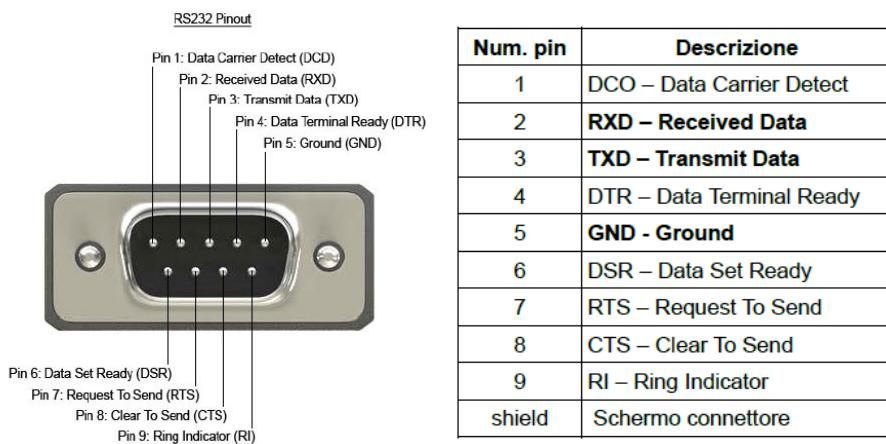


Figura IV.I: Presa DB9 con descrizione dei pin

Esistono applicazioni in cui l'incrocio non è necessario poiché lo effettua uno dei dispositivi direttamente. Tali dispositivi sono identificati dalla sigla DCE (Data Communication Equipment), mentre quelli che necessitano del cavo incrociato sono detti DTE (Data Terminal Equipment). La comunicazione è possibile solo se si definisce il Baud Rate, ossia la velocità espressa come bit al secondo, e la porta COM attraverso la quale avviene la comunicazione.

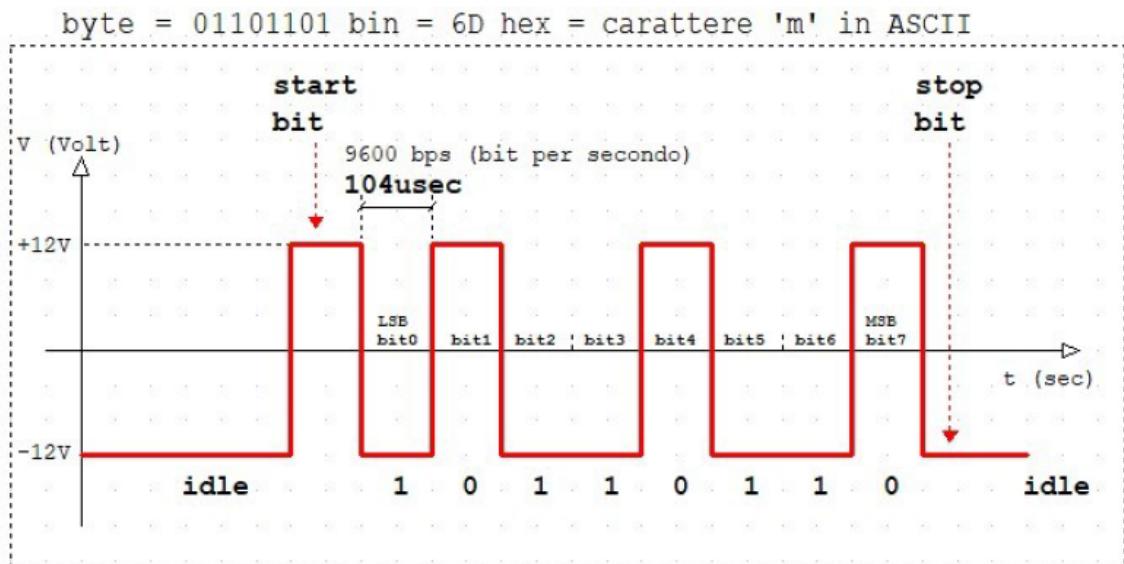


Figura IV.II: Grafico illustrante l'andamento della tensione durante la trasmissione di un generico dato via Modbus

La trasmissione dei dati avviene grazie ad un segnale di tensione, che oscilla tra -12 e +12 Volt. Ciò implica che il segnale che transita tra i pin RX e TX è espresso rispetto ad un valore di tensione di riferimento che corrisponde al potenziale della terra GND, ossia 0V. Il segnale sulla linea TX viene mantenuto normalmente a -12V fino al segnale di start, il quale lo commuta a +12V. Segue poi la sequenza di 8 bit che trasportano l'informazione. Il livello di +12V corrisponde al livello logico 0, mentre il livello logico 1 corrisponde ad un segnale di -12V. La stringa di bit viene chiusa dal segnale di stop (-12V). Prima dello stop, è possibile avere anche un bit di parità per il controllo della correttezza del byte scambiato. Talvolta, come per i segnali TTL, i valori di tensione possono variare tra 0V (0) e 5V (1). Il protocollo Modbus seriale RS232 non è adatto alla comunicazione tra più dispositivi, come ad esempio quella master-slave. Il suo utilizzo è limitato anche a causa del fatto che la distanza massima di collegamento di due porte COM è di circa 15 metri, oltre si rischia di perdere informazioni. [8]

IV.II Standard RS485

La principale differenza tra il protocollo Modbus RS485 e quello RS232 è rappresentata dal fatto che lo standard RS485 si basa su un segnale di tensione di tipo differenziale, cioè misurato sempre tra due terminali. I due terminali viaggiano solitamente su collegamenti incrociati in modo tale che un eventuale disturbo esterno modifichi in ugual misura entrambi i fili, mantenendo costante il valore differenziale. Non essendo riferito alla terra GND, il segnale di tensione non potrà mai essere sbilanciato e quindi la comunicazione risulta più robusta ed affidabile, consentendo di coprire distanze ben maggiori rispetto allo standard RS232. [8]

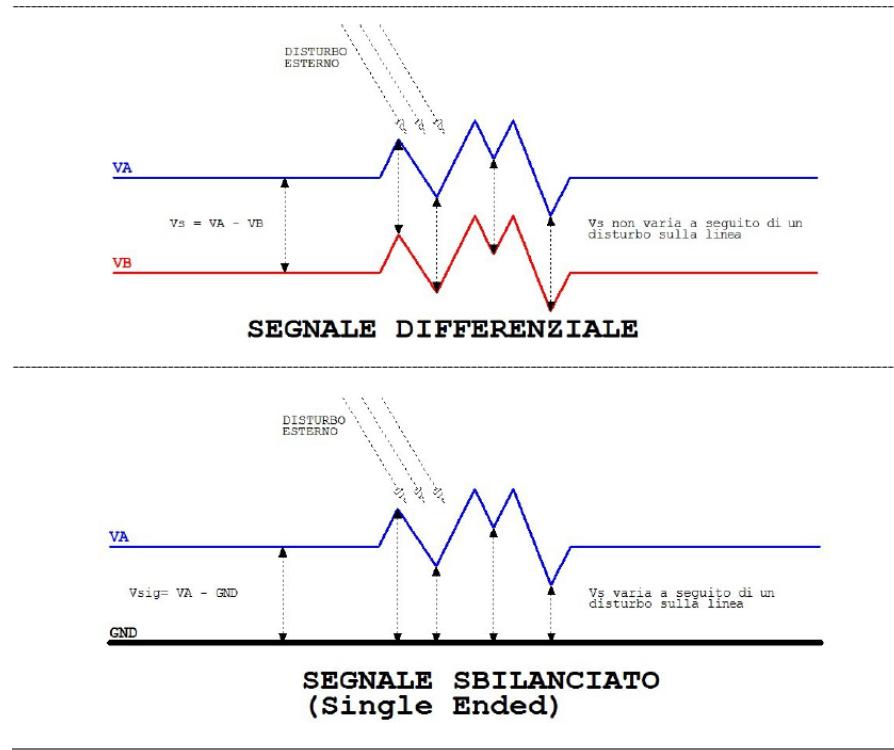


Figura IV.III: Grafico illustrante la differenza tra segnale differenziale e singolo sbilanciato

Rispetto allo standard RS232, variano i valori di tensione tipici; infatti, solitamente la tensione varia tra 1,5 e 3,5 Volt. La comunicazione tramite Modbus RS485 si può dividere in due categorie: half-duplex e full-duplex. Nel caso di comunicazione half-duplex il dato transita in una sola direzione; quindi, un solo dispositivo alla volta può trasmettere informazioni al bus. Ciò richiede che la comunicazione sia coordinata per evitare sovrapposizioni. Nel caso full-duplex invece, il dato può transitare in entrambe le direzioni contemporaneamente. [8] [9] Altra caratteristica rilevante dello standard RS485 è la capacità di far comunicare più dispositivi, consentendo una comunicazione di tipo master-slave.

IV.III Standard Ethernet

Il protocollo Modbus Ethernet è una tipologia di comunicazione che sfrutta gli indirizzi IP dei vari dispositivi e i protocolli TCP o UDP per farli dialogare tra loro. Attraverso protocolli TCP, si garantisce una connessione più sicura e stabile, dato che prima dell'invio di dati si deve stabilire la comunicazione tra i due dispositivi. In questo modo si garantisce la trasmissione in modo ordinato dei dati, senza rischiare alcuna perdita di informazioni. Tramite UDP si realizza invece una comunicazione più rapida, adatta allo streaming di informazioni in tempo reale, poiché lo slave invierà dati indipendentemente dal fatto che il master sia pronto o meno. La maggior rapidità dell'UDP è a discapito dell'affidabilità; un Modbus TCP/IP risulta più robusto, ordinato e affidabile. Una rete Modbus Ethernet è capace di funzionare sia attraverso rete cablata (porta LAN) sia attraverso una rete Wi-Fi. [4]

IV.IV Struttura del protocollo Modbus

La comunicazione attraverso il protocollo Modbus seriale RS485 è realizzata mediante un cavo bifilare che unisce in parallelo tutti i dispositivi presenti sulla linea. Essendo un protocollo di tipo master-slave, sarà sempre presente un solo dispositivo master e almeno un dispositivo slave. In particolare, si possono collegare fino a 31 slave su uno stesso bus comune, ma nel caso in cui si inserissero ripetitori bus, il numero massimo si può espandere fino a 247.

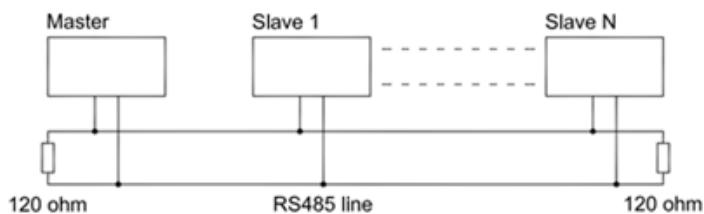


Figura IV.IV: Schema di una tipica struttura di una comunicazione Modbus RS485 a due fili

Come si evince dallo schema, nel circuito sono presenti due resistenze elettriche da 120 Ohm, le quali hanno il compito di evitare l'alterazione della forma d'onda del segnale stesso. Il circuito è alimentato da una serie di impulsi e, nel caso venissero a meno queste due resistenze, il segnale rischia di perdere la forma ad onda quadra, compromettendo la lettura. Senza le resistenze, il segnale rischia di essere disturbato dall'effetto di scarica dei condensatori, fino al caso limite in cui la scarica si sovrappone al segnale successivo. Tale effetto viene amplificato aumentando la frequenza dei segnali. Sul diagramma sottostante, è riportata anche una soglia di misura, che indica il livello di tensione minimo che riesce a rilevare il circuito per consentire la comunicazione. [4]

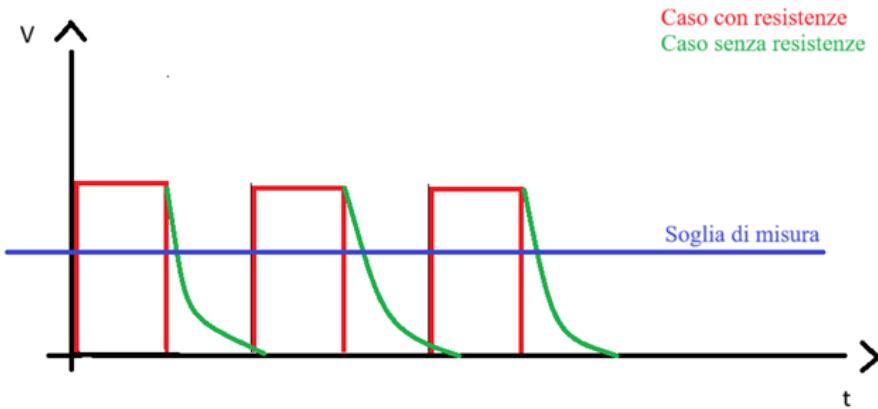


Figura IV.V: Raffigurazione della differenza tra un segnale di tensione derivante da un circuito con resistenze e un segnale derivante da un circuito senza resistenze

La comunicazione viene sempre avviata dal master, il quale può inviare una richiesta ad un singolo slave (unicast) o a tutti quelli connessi (broadcast). Il protocollo Modbus Ethernet è invece un protocollo sempre di tipo master-slave, con le comunicazioni che possono avvenire secondo quattro modalità: unicast, broadcast, multicast e anycast. La comunicazione è unicast se si ha un solo mittente che parla con un solo destinatario. È detta broadcast qualora un mittente dialoghi con tutti i dispositivi collegati alla medesima rete. Se invece il mittente parla ad un gruppo selezionato si è nel caso di comunicazione multicast. Nel caso di anycast, il mittente comunica al destinatario più vicino. Il protocollo Modbus presenta una struttura su più livelli, i quali vengono definiti dal modello ISO OSI. Tale modello definisce 7 diversi livelli di comunicazione, ognuno dei quali ha una propria struttura e una propria funzione. Non è detto però che ogni protocollo sfrutti tutti i livelli durante la comunicazione; infatti, il protocollo Modbus RS485 ne utilizza solo due. Il modello prevede i seguenti livelli:

- I. **Physical layer:** Definisce le caratteristiche elettriche e meccaniche della tecnologia che trasmette il dato. I protocolli di questo livello definiscono per esempio il tipo di connettore o la forma del segnale elettrico.
- II. **Data Link layer:** permette il trasferimento affidabile e senza errori del dato al livello superiore. Questo livello prende l'informazione e aggiunge un'intestazione e una coda, invia poi una conferma di ricezione al livello mittente.
- III. **Network layer:** è il livello addetto al routing, cioè allo smistamento dei pacchetti di dati in base al loro indirizzo e alla definizione del percorso ottimale per raggiungerlo. Un esempio di questo livello è il protocollo IP che associa un indirizzo diverso ad ogni dispositivo in rete.

IV. Trasport layer: Deve garantire il corretto ordine dei pacchetti senza che vi siano perdite di dati o generazione di errori. Esempi possono essere i protocolli TCP e UDP.

V. Session layer: Stabilisce e chiude una comunicazione tra due terminali connessi alla rete. Permette anche di ristabilire una connessione persa, partendo dal punto in cui è avvenuta l'interruzione. Per sessione si intende la trasmissione dei dati e si compone di tre fasi: avvio e apertura, lavoro, chiusura.

VI. Presentation layer: si occupa della compressione e della cifratura dei dati, trasformandoli in una modalità standardizzata.

VII. Application layer: fornisce un'interfaccia di rete verso le comuni applicazioni software. Un esempio è il protocollo HTTP dei siti internet. [10]

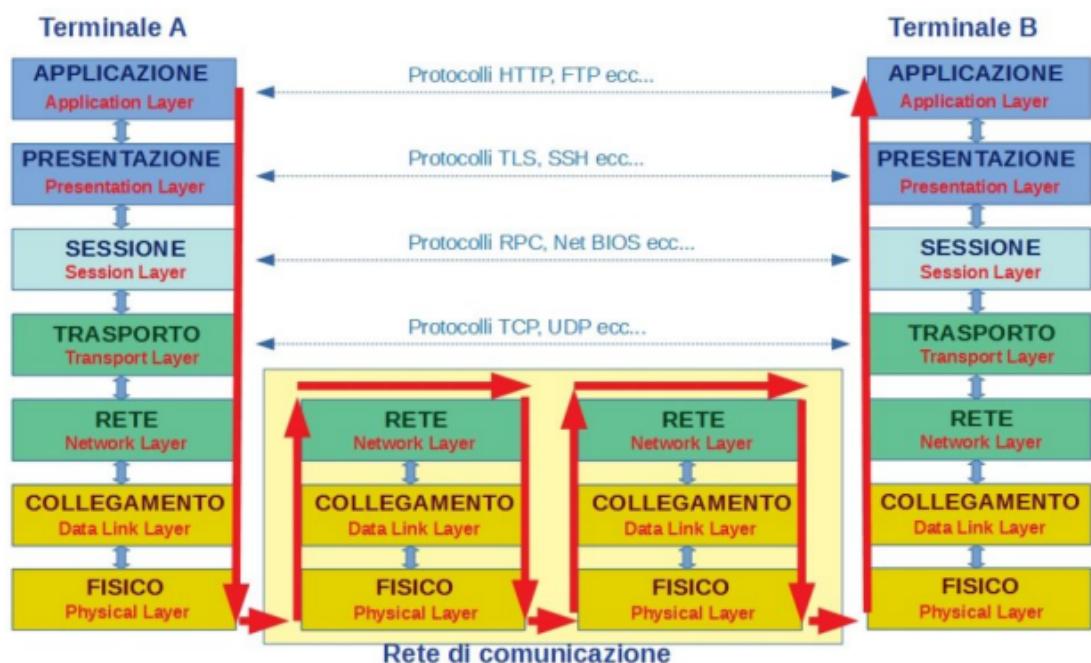


Figura IV.VI: Modello ISO OSI

Ogni livello aggiunge quindi informazioni al dato di partenza. Le informazioni che vengono inserite dipendono dai protocolli utilizzati.

IMBUSTAMENTO MULTIPLO

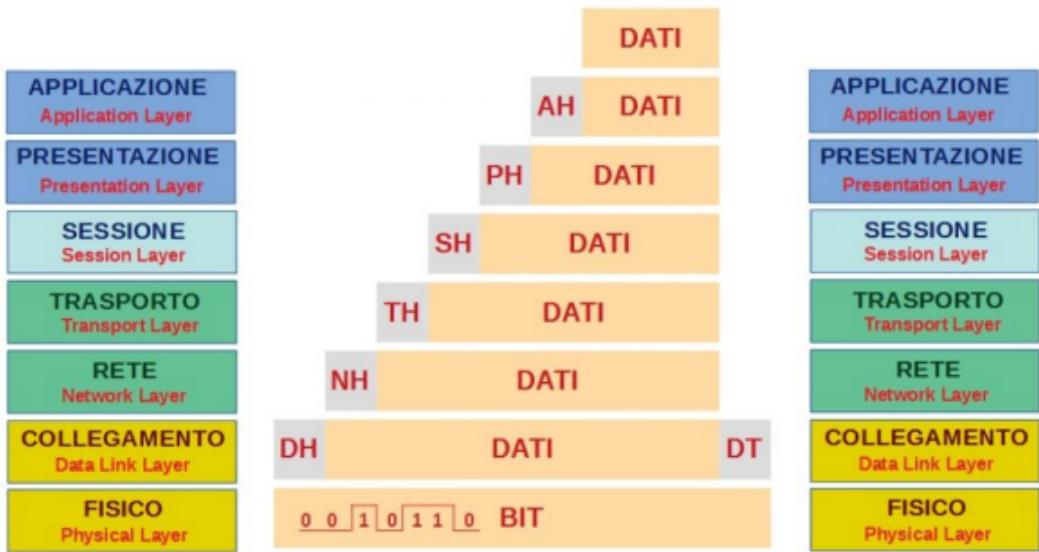


Figura IV.VII: Gestione dei dati secondo il modello ISO OSI

Il protocollo Modbus RS485 lavora con soli due livelli del modello ISO OSI. Il Data Link Layer si occupa dello scambio dei bytes tra i due dispositivi, prescindendo il significato. L'Application Layer invece, si occupa del significato. [9]

Il master invia la comunicazione inviando un pacchetto di bytes, il quale ha una struttura sempre uguale poiché definita dal Data Link layer.

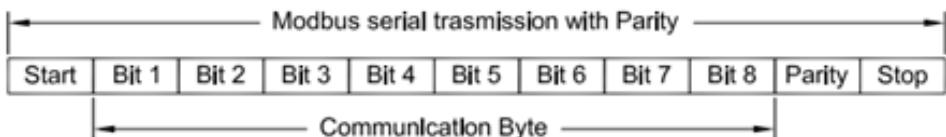


Figura IV.VIII: Struttura di una generica stringa di dati relativa al Data Link Layer

L'unica differenza si può presentare negli ultimi due bytes. In figura infatti è riportato il codice CRC che rappresenta il controllo degli errori per protocollo Modbus RTU. Qualora si avesse un protocollo basato sul linguaggio ASCII, gli ultimi due bytes sarebbero identificati dalla sigla LCR. Nel caso invece di comunicazione Ethernet, risulterebbero assenti in quanto le funzioni di controllo errori sono incluse direttamente nel protocollo TCP.

Il primo byte rappresenta l'indirizzo dello slave con cui comunicare. Se assume valore 0, allora la comunicazione è broadcast e quindi trasmessa a tutti gli slave connessi. Invece, i numeri da 1 a 247 rappresentano in modo univoco gli indirizzi dei singoli slave.

Il campo Function occupa un byte e contiene il codice comando della specifica richiesta allo slave. Il byte Function può essere seguito da una serie di bytes (massimo

252 bytes) che contengono informazioni aggiuntive al codice funzione. L'insieme del codice funzione e del campo dati viene definito Protocol Data Unit PDU e rappresenta la parte utile alla comunicazione.

Tutti gli slave connessi sul bus riceveranno la stringa con la richiesta, ma solo lo slave indirizzato procederà alla risposta, gli altri rimangono in attesa. Ogni risposta deve avvenire entro un certo limite di tempo, altrimenti si rischia di rallentare la comunicazione e la trasmissione di dati. Per questo motivo, il master ha un tempo prefissato entro il quale deve ricevere la risposta: se superato, ignora quella richiesta e invia la successiva. [9]

Ogni byte inviato attraverso la stringa, viene trasmesso come una sequenza di 11 bit totali, comprendendo anche il bit di start, di parity e di stop.

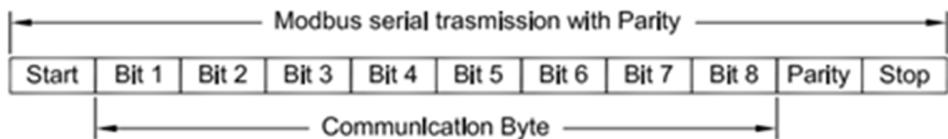


Figura IV.IX: Struttura di una generica stringa di dati relativa al Data Link Layer

Il bit di start vale sempre zero, mentre quello di stop ha sempre valore unitario. Il bit di parità serve a controllare gli errori su un byte del dato, ma può essere opzionale e quindi non è detto che sia sempre presente. Quando assente viene automaticamente posto pari ad 1 e quindi il frame è come se avesse un doppio byte di stop. [9]

L'Application layer si occupa del significato della PDU, la quale viene suddivisa in un primo campo di un byte che definisce l'operazione da svolgere, e da una possibile ma non obbligatoria serie di dati aggiuntivi.

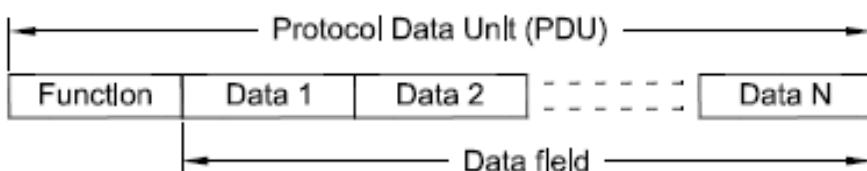


Figura IV.X: Struttura di una generica PDU

Il campo dati può contenere al massimo 252 bytes, in quanto la lunghezza massima di un frame è di 256 bytes.

Durante la comunicazione, lo slave espone al master delle “risorse”, le quali non vengono identificate direttamente con l’indirizzo fisico di memoria del dispositivo, ma attraverso il concetto di “oggetto”. Esistono

Tipo di oggetto	Dimensione	Accesso	Descrizione
Discrete Inputs	1 bit	Solo lettura	Ingressi digitali
Coils	1 bit	Lettura e scrittura	Uscite digitali
Input register	16 bit	Solo lettura	Ingressi analogici
Holding register	16 bit	Lettura e scrittura	Parametri configurabili

Tabella IV.1: Tipologie di oggetti Modbus e loro caratteristiche

Ogni oggetto ha un indirizzo Modbus (da 0 a 65535), che viene usato nel messaggio PDU per identificarlo. Questo indirizzo non corrisponde direttamente alla posizione fisica nella memoria dello Slave, ma sarà lo slave a tradurre l'indirizzo Modbus alla variabile interna. L'indirizzo Modbus è suddiviso per prefissi, ciò significa che ogni oggetto è identificato da un preciso prefisso.

Tipo di oggetto	Prefisso	Range numerico	Indirizzo PDU
Coils	0x	00001-09999	0000-9998
Discrete inputs	1x	10001-19999	0000-9998
Input register	3x	30001-39999	0000-9998
Holding register	4x	40001-49999	0000-9998

Tabella IV.2: Indirizzi Modbus e loro caratteristiche

IV.V Esempio di comunicazione

La comunicazione si instaura con l'invio della richiesta da parte del master, che si ipotizzi essere di lettura di holding register (codice funzione 03).

RICHIEDA ALLO SLAVE - 8 Bytes							
INDIRIZZO SLAVE	FUNZIONE	INDIRIZZO INIZIALE		NUMERO DI REGISTRI		CRC	
		HIGH	LOW	HIGH	LOW	HIGH	LOW
0F	03	00	00	00	05	84	E7

Figura IV.XI: Struttura di una generica richiesta del master ad uno slave

La richiesta appare quindi come una stringa di 8 bytes, ciascuno dei quali è definito da una parola a 16 bit. La risposta che ne deriva sarà del tipo:

RISPOSTA DELLO SLAVE												
INDIRIZZO SLAVE	FUNZIONE	NUMERO DI BYTE DEL DATO	VALORE DEI REGISTRI – DATO RICHIESTO								CRC	
			REGISTRO 0		REGISTRO 1		REGISTRO 2		REGISTRO 3		REGISTRO 4		HIGH	LOW
0F	03	0A	00	00	00	F0	00	00	7D	00	00	00	DA	5B

Figura IV.XII: Struttura di una generica risposta di uno slave al master

Al massimo si possono leggere 125 registri, poiché per ogni lettura si occupano 2 byte della PDU. In tal caso, si avrebbero quindi 250 bytes occupati dai dati dei registri letti a cui si aggiungono i 3 bytes iniziali e i 2 finali di controllo errori. Per definizione una stringa può contenere al massimo 256 bytes, in questo caso si giunge a saturazione a 255 bytes, in quanto con la lettura di un ulteriore registro, il numero totale di byte impegnati salirebbe a 257. Come visto in precedenza, ogni byte scambiato viene definito da una stringa di 11 bit (8 di dati, uno di start, uno si stop e uno di parity). Ciò significa che per invio della richiesta e lettura dati, si scambiano un totale di 2893 bit.

Capitolo V

Struttura del Database SQLite

Lo sviluppo del programma oggetto di tesi, è stato possibile tramite il software LabVIEW, ossia un linguaggio di programmazione basato su un approccio "icon-based". Ciò significa che, invece di avere un codice di istruzioni composto da parole e formule (come avviene in Matlab o in Python), il codice risulta essere un'interfaccia grafica composta da quadratini collegati tra loro attraverso dei fili. LabVIEW utilizza un dataflow in cui la sequenza di esecuzione è rappresentata dal flusso di dati lungo i fili monodirezionali che collegano le varie icone, le quali possono rappresentare strutture di dati o funzioni.

I programmi scritti con questo linguaggio di programmazione prendono il nome di *VI*, acronimo di "Virtual Instrument". Ogni VI è composto da due finestre: *Block Diagram* e *Front Panel*. Il primo è dove si realizza il vero e proprio codice, mentre il secondo è l'interfaccia visibile all'utilizzatore. [1] [11]

Il programma sviluppato è concettualmente semplice, in quanto si tratta di un software che legge i dati del motore, li analizza e calcola ad ogni istante alcuni parametri come consumi, potenza erogata o emissioni. Si è dovuto, tuttavia, costruire una solida struttura capace di comunicare con i vari sensori sul motore, di effettuare velocemente i calcoli richiesti, di integrarsi con Python per la gestione delle formule matematiche e di utilizzare un database SQLite per la gestione delle dipendenze e delle varie configurazioni motore.

Per l'archiviazione delle informazioni di supporto ai calcoli è stato sviluppato un database relazionale "lv database" in SQLite. Il database (abbreviato DB) è un insieme di tavole, tra di loro correlate, in cui sono archiviati i dati ed in cui ogni record di tali tavole è univocamente identificato da una o più "keys" o "ID". [1]

Il database è composto da una serie di tavole, ognuna delle quali contiene dati necessari allo svolgimento dei calcoli.

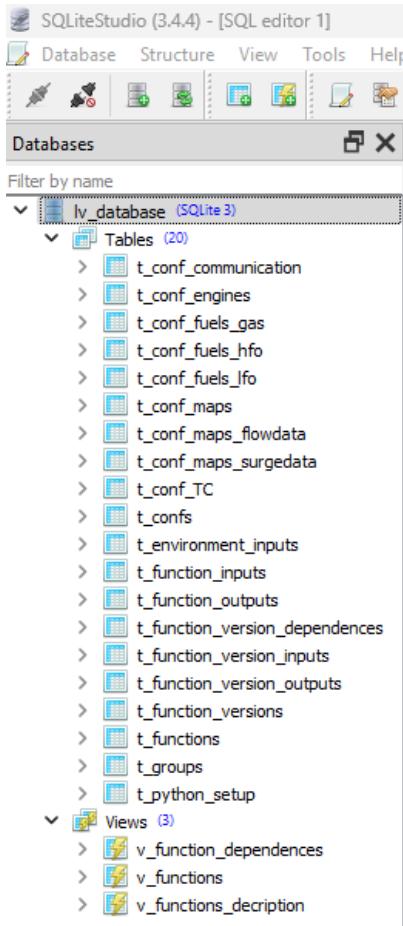


Figura V.I: Struttura database con tutte le tabelle esposte

In figura V.I, si notano anche tre voci finali che differiscono dalle precedenti. Sono etichettate come *Views* e indicano che le funzioni sono state realizzate in modo "intelligibile", cioè in modo tale che l'utente possa vedere il nome della funzione al posto dell'ID.

V.I Tabella t_function

Come si evince dalla figura V.I, il database contiene la cartella *t_functions*, la quale racchiude tutte le funzioni scritte in linguaggio Python necessarie al funzionamento del programma LabView. Ogni funzione al suo interno è identificata univocamente da un numero intero progressivo rappresentato dalla colonna *id_function*. La seconda colonna indica il nome imposto alla formula, che per convenzione interna corrisponde al risultato atteso, anticipato da una sigla progressiva. La terza colonna mostra invece l'inizio del codice Python.

	id_function	name	formula
1	2404	F1_m_nozzle.VI	def F1(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):...
2	2405	F2_m_aireng_nozzle.VI	def F2(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):...
3	2406	F3_p_TIVC.VI	def F3(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):...
4	2407	F4_T_TIVC.VI	def F4(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):...
5	2408	F5_V_TIVC.VI	def F5(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):...
6	2409	F6_m_aireng_EC4T.VI	def F6(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):...
7	2410	F7_m_EC4T.VI	def F7(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):...
8	2411	F8_p_EVC.VI	def F8(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):...
9	2412	F9_kair.VI	def F9(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):...
10	2413	F10_V_EVC.VI	def F10(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):...
11	2414	F11_T_EVC.VI	def F11(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):...
12	2415	F12_m_aireng_EC2T.VI	def F12(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):...
13	2416	F13_m_EC2T.VI	def F13(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):...
14	2417	F14_ECR_EC4T.VI	def F14(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):...
15	2418	F15_ECR_EC2T.VI	def F15(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):...
16	2419	F16_BSFC_fuel.VI	def F16(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):...
17	2420	F17_BSFC_pilot.VI	def F17(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):...
18	2421	F18_Fuelmixcont_C.VI	def F18(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):...
19	2422	F19_Fuelmixcont_H.VI	def F19(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):...
20	2423	F20_Fuelmixcont_N.VI	def F20(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):...
21	2424	F21_Fuelmixcont_O.VI	def F21(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):...
22	2425	F22_Fuelmixcont_S.VI	def F22(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):...
23	2426	F24_Specific_humidity.VI	def F24(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):...
24	2427	F25_kDtW.VI	def F25(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):...
25	2428	F26_carbon_factor.VI	def F26(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):...

Figura V.II: Porzione della cartella contenente tutte le formule madri

Ogni funzione presente in questa sezione del database è una formula madre, ossia una formula in cui gli input sono gestiti come variabili generiche, in quanto cambiano a seconda della configurazione motore impostata. Una volta inseriti i dati relativi al motore, il programma prende la formula che deve calcolarsi e adatta gli input in base ai dati disponibili. Così facendo, la formula prende il nome di formula figlia, in quanto avrà la stessa struttura di quella madre ma differisce per gli input.

Per esempio, la formula madre per il calcolo del coefficiente isoentropico dell'aria k_{air} è la seguente:

$$k_{air} = ((T_1)^2 + (T_2)^2)(-1.2 \cdot 10^{-7}) + \frac{2.78 \cdot 10^{-5}(T_1 + T_2)}{2} + 1.40324 \quad (\text{V.I})$$

A seconda della configurazione motore impostata dall'utente, le temperature T1 e T2 possono assumere nomenclature differenti. In particolare, nel caso si abbia un turbogruppo a doppio stadio, bisogna specificare se le temperature T1 e T2 si riferiscono a monte e valle del primo stadio o del secondo. Dalla stessa formula madre si possono ottenere in questo caso tre formule figlie con la medesima struttura:

$$\text{monostadio: } k_{air} = (T_1^2 + T_2^2)(-1.2 \cdot 10^{-7}) + \frac{2.78 \cdot 10^{-5}(T_1 + T_2)}{2} + 1.40324 \quad (\text{V.II})$$

$$\text{bistadio bassa pressione: } k_{air} = ((T_{1,LP})^2 + (T_{2,LP})^2)(-1.2 \cdot 10^{-7}) + \frac{2.78 \cdot 10^{-5}(T_{1,LP} + T_{2,LP})}{2} + 1.40324 \quad (\text{V.III})$$

$$\text{bistadio alta pressione: } k_{air} = ((T_{1,HP})^2 + (T_{2,HP})^2)(-1.2 \cdot 10^{-7}) + \frac{2.78 \cdot 10^{-5}(T_{1,HP} + T_{2,HP})}{2} + 1.40324 \quad (\text{V.IV})$$

V.II Tabella t_function_versions

È facile capire quindi, che variando la configurazione del motore, nasceranno diverse versioni della stessa formula madre. Ogni versione viene salvata nella cartella *t-functions_version*, ossia una delle varie cartelle presenti nel database, come si può notare in figura V.I. In tale cartella sono salvate tutte le possibili varianti delle formule madri, ma ciò non significa che tutte le formule madri prevedano diverse versioni.

	<i>id_function</i>	<i>id_version</i>	<i>description</i>	<i>calculate</i>	<i>Engine4T</i>	<i>Engine2T</i>	<i>One_stage</i>	<i>Two_Stage</i>	<i>Fuel_oil</i>	<i>Gas</i>	<i>AirNozzle</i>	<i>NOx_DRY</i>	<i>NOx_VET</i>	<i>THC_DRY</i>	<i>THC_VET</i>	<i>CO2</i>	<i>CO</i>	<i>O2</i>	<i>ABB</i>	<i>CIMAC</i>	<i>MET</i>	<i>Wastegate</i>	<i>Waste</i>
1	2404	1	<i>m_nozzle</i> [kg/s]	0	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2405	1	<i>m_airing_nozzle</i> [kg/s]	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	2406	1	<i>T_TIVC_Pa</i>	0	1	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4	2407	1	<i>T_TIVC_C</i>	0	1	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5	2408	1	<i>V_TIVC_ms</i>	0	1	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
6	2409	1	<i>m_airing_FCAT_kg/s</i>	1	1	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
7	2410	1	<i>m_ECAT_kg/s</i>	0	1	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
8	2411	1	<i>pEVC_Pa</i>	0	0	1	1	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
9	2412	1	<i>kair_[]</i>	0	2	2	1	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
10	2412	2	<i>kair_LP_[]</i>	0	2	2	0	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
11	2412	3	<i>kair_HP_[]</i>	0	2	2	0	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
12	2413	1	<i>V_EVC_ms</i>	0	0	1	1	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
13	2414	1	<i>T_EVC_C</i>	0	0	1	1	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
14	2415	1	<i>m_airing_FCCT_kg/s</i>	0	0	1	1	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
15	2416	1	<i>m_ECT_kg/s</i>	0	0	1	1	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
16	2417	1	<i>ECR_FCAT_[]</i>	1	1	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
17	2418	1	<i>ECR_ECAT_[]</i>	1	0	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
18	2419	1	<i>BSFC_fueloil_g/kWh</i>	1	2	2	2	2	2	1	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
19	2419	2	<i>BSFC_gas_g/kWh</i>	1	2	2	2	2	2	0	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
20	2420	1	<i>BSFC_pilot_g/kWh</i>	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
21	2421	1	<i>Fueloil_mixcont_C_%</i>	0	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
22	2421	2	<i>Gas_mixcont_C_%</i>	0	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
23	2422	1	<i>Gas_mixcont_H_1%</i>	0	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
24	2422	2	<i>Gas_mixcont_H_1%</i>	0	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
25	2423	1	<i>Fueloil_mixcont_N_%</i>	0	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
26	2423	2	<i>Gas_mixcont_N_%</i>	0	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
27	2424	1	<i>Fueloil_mixcont_O_%</i>	0	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
28	2424	2	<i>Gas_mixcont_O_%</i>	0	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
29	2425	1	<i>Fueloil_mixcont_S_%</i>	0	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
30	2425	2	<i>Gas_mixcont_S_%</i>	0	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
31	2426	1	<i>Specific_humidity_lgh20/kgairdry</i>	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
32	2427	1	<i>kHNV_fueloil_[]</i>	0	2	2	2	2	1	0	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2
33	2427	2	<i>kHNV_gas_[]</i>	0	2	2	2	2	0	1	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2
34	2428	1	<i>Carbon_factor_fueloil_[]</i>	0	2	2	2	2	1	0	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2
35	2428	2	<i>Carbon_factor_gas_[]</i>	0	2	2	2	2	0	1	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2
36	2429	1	<i>m_evh_CB_fueloil_kg/h</i>	0	2	2	2	2	1	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
37	2429	2	<i>m_evh_CB_gas_kg/h</i>	0	2	2	2	2	0	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
38	2430	1	<i>m_airing_CB_fueloil_kg/s</i>	1	2	2	2	2	1	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Figura V.III: Porzione della tabella contenente tutte le possibili versioni delle varie formule salvate nel database.

Nell'immagine V.III sono mostrate solo le prime 38 formule figlie, ma in tale tabella sono contenute in totale 524 versioni, derivanti da 161 formule madri. A conferma del fatto che non tutte le funzioni possano avere più versioni, si può notare che la prima equazione ad ammettere più versioni di se stessa sia quella contraddistinta dall'ID 2411, che corrisponde alla formula del coefficiente isoentropico dell'aria poc'anzi descritta. Per capire quali formule possono variare a seconda della configurazione motore, basta porre l'attenzione sulla terza colonna, ossia la colonna nominata *Id_version*, dove ogni versione viene identificata da un numero intero progressivo a partire da 1.

In figura V.III, sono mostrate anche una serie di colonne che riportano nomi di variabili della configurazione motore. La colonna *calculate* indica se il risultato di quella funzione deve essere mostrato una volta calcolato durante l'esecuzione del programma. La relativa casella di ogni funzione può assumere solo due valori: 1, se il risultato finale deve essere mostrato come output assieme agli altri valori ottenuti, mentre in caso contrario si avrà 0. Le colonne successive esprimono le condizioni di calcolabilità, quali il tipo di motore, il tipo di turbogruppo, il tipo di combustibile, la disponibilità dell'air-nozzle,

la presenza degli analizzatori di gas, il tipo di analisi, lo standard per il calcolo del rendimento del turbogruppo e la posizione della valvola wastegate. [1] Si hanno in totale 20 colonne che rappresentano tutte le casistiche possibili dei parametri appena citati. Ogni formula figlia presente in tabella ha bisogno di condizioni diverse per essere calcolata, in quanto ognuna avrà differenti input richiesti. Ciò significa anche che non tutti i parametri saranno sempre utili per il calcolo di ogni versione. Ciò è stato mostrato anche negli esempi riportati con le equazioni V.II, dove appunto la prima avrà input diversi dalle altre due, alle quali non serviranno gli input della prima.

Si è deciso di filtrare gli input necessari attraverso delle condizioni di calcolabilità, ossia, per ogni funzione, le caselle relative ai vari parametri di configurazione (tipologia motore, tipologia carburante,...) vengono riempite con dei valori numerici che possono variare tra 0 e 2. Se la casella contiene uno 0, significa che la funzione non è calcolabile per quella configurazione. Per esempio, la formula V.II del coefficiente isoentropico dell'aria per il caso monostadio, avrà uno 0 nella casella relativa alla colonna "two stages". Viceversa, le formule relative al caso bistadio avranno la cella con valore unitario, il quale indica che la funzione è calcolabile in quella configurazione. Il valore 2 invece indica che la condizione associata a quel campo non influenza la calcolabilità della funzione.

	function	id_version	description	calculate	Engine4T	Engine2T	One_stage	Two_Stage	
4	2407	1	T_TIVC_[C]	0	1	0	2	2	
5	2408	1	V_TIVC_[m3]	0	1	0	2	2	
6	2409	1	m_aireng_EC4T_[kg/s]	1	1	0	2	2	
7	2410	1	m_EC4T_[kg/s]	0	1	0	2	2	
8	2411	1	p_EVC_[Pa]	0	0	1	1	0	
9	2412	1	kair_[]	0	2	2	1	0	
10	2412	2	kair_LP_[]	0	2	2	0	1	
11	2412	3	kair_HP_[]	0	2	2	0	1	

Figura V.IV: Tabella relativa alle condizioni di calcolabilità della formula del k_{air} .

Le condizioni di calcolabilità vengono applicate per tutti i parametri di configurazione dell'impianto che si sta valutando, creando così una matrice di calcolabilità, in cui ogni casella può assumere solo i tre valori precedentemente descritti. In questo modo il programma è in grado di snellire il numero di formule che si deve portare dietro ad ogni ciclo di calcolo, alleggerendo il carico sulla memoria RAM del PC. Infatti LabView, per i suoi calcoli, si appoggia esclusivamente sulla RAM del computer e gestisce le operazioni con una logica definita dal flusso dei dati trasmessi lungo i fili monodirezionali che collegano i vari blocchetti delle funzioni. Altri linguaggi di programmazione, come ad esempio Matlab o Python, eseguono le operazioni in base all'ordine con cui sono state scritte nel codice, cioè eseguono in ordine le righe del codice.

Le funzioni vengono quindi filtrate a seconda della matrice di calcolabilità, ottenuta in base alle scelte effettuate dall'utente in fase di configurazione. In questo modo il programma LabView, invece che calcolare sempre 524 versioni differenti, calcola solo quelle filtrate dalla matrice di calcolabilità, riducendo notevolmente lo sforzo computazionale. Affinché fosse possibile gestire un tale sistema si è dovuto implementare un algoritmo che permettesse al software di riconoscere e calcolare solo quelle funzioni coerenti con la matrice di calcolabilità.

Le ultime due colonne della tabella *t_function_versions* sono chiamate rispettivamente "id_group" e "order_in_group". Queste non rappresentano condizioni di calcolabilità ma servono per raggruppare famiglie di dati nell'*Output.vi*, ossia il VI che mostra in maniera riassuntiva input e output del programma WPC. La colonna "id_group" riporta numeri compresi tra 0 e 21, ed ogni numero è associato ad una pagina da mostrare. "order_in_group" indica invece la posizione di quel dato all'interno della pagina i-esima.

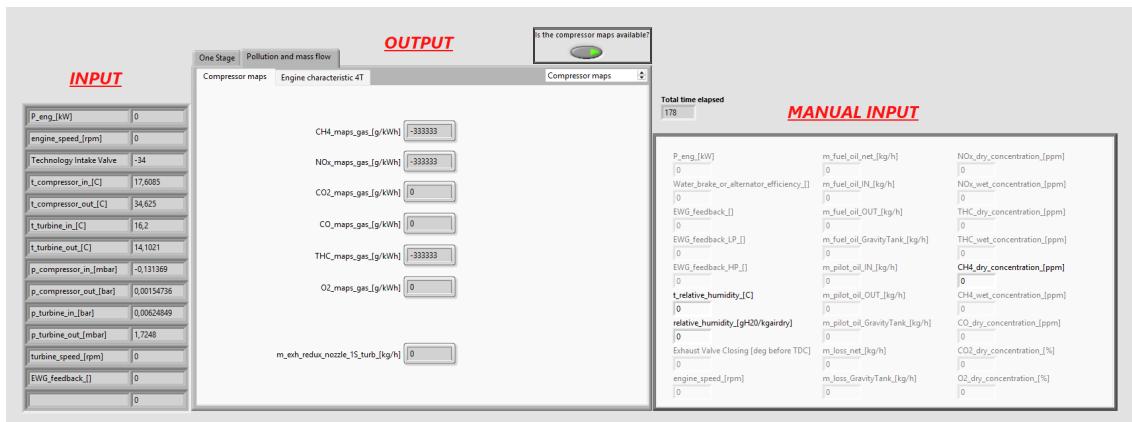


Figura V.V: Schermata principale dell'*Output.vi* in cui si mostrano i risultati dei calcoli e relativi dati di input. In particolare, le colonne "id_group" e "order_in_group" fanno riferimento alle variabili presenti nella sezione "MANUAL INPUT"

V.III Tabella t_function_dependencies

Alcune funzioni, per essere calcolate, necessitano di alcuni dati derivanti da altre formule. Si sviluppa quindi una catena delle dipendenze che lega tra loro formule diverse. Un esempio è la formula per il calcolo della portata d'aria misurata tramite un air nozzle. Dalla formula madre si distinguono due formule figlie, il cui discriminante è lo stato fisico del combustibile (gassoso o liquido).

$$F_{30,1} = \dot{m}_{exhnozzle} = 3600 * m_{air-eng,nozzle} + P_{eng} * (BSFC_{fuel-oli} + BSFC_{pilot}) \quad (\text{V.V})$$

$$F_{30,2} = \dot{m}_{exhnozzle} = 3600 * m_{air-eng,nozzle} + P_{eng} * (BSFC_{gas} + BSFC_{pilot})$$

Entrambe le versioni dipendono direttamente dal calcolo del BSFC, ossia del consumo specifico di carburante per unità di potenza, e dal calcolo della massa d'aria,

la quale per essere calcolata dipende a sua volta da un'altra funzione. La tabella *t_function dependences* mostra quindi come le funzioni siano dipendenti tra di loro. È composta da 4 colonne: le prime due fanno riferimento all'ID e alla versione della formula da calcolare, le restanti due colonne esprimono rispettivamente ID e versione della funzione da cui dipendono direttamente. Nel caso una formula abbia più dipendenze di primo livello, in tabella si avranno più righe relative a tale formula.

	<i>id_function</i>	<i>id_version</i>	<i>id_function_dep</i>	<i>id_version_dep</i>
58	2431	1	2430	1
59	2431	2	2430	2
60	2432	1	2405	1
61	2432	1	2419	1
62	2432	1	2420	1
63	2432	2	2405	1
64	2432	2	2419	2
65	2432	2	2420	1
66	2433	1	2409	1
67	2433	1	2419	1
68	2433	1	2420	1
69	2433	2	2409	1
70	2433	2	2419	2
71	2433	2	2420	1
--	2434	1	2415	1

Figura V.VI: Tabella relativa alle dipendenze dirette della formula della portata d'aria.

È importante che ogni versione delle formule, sia associata ad un'unica versione della formula che crea la dipendenza. In figura V.VI la formula 2432 ha più dipendenze dirette (2405, 2419 e 2420); nessuna però, si ripete con due versioni differenti per una stessa versione della funzione 2432. Qualora ci fosse stata anche la versione 2 della funzione 2419 sotto alla numero 2432, il programma di calcolo sarebbe andato in errore.

V.IV Tabella *t_function_inputs*

In questa tabella vengono salvati tutti gli input necessari per il calcolo di una funzione madre. Si hanno cinque colonne distinte in cui sono riportati nell'ordine: ID della funzione, ID dell'input, nome dell'input, tipologia del dato e infine l'unità di misura.

Considerando l'esempio della formula V.I fatto in precedenza, questa necessita, come segnali di input, le temperature di ingresso e uscita del compressore. Ogni input sarà caratterizzato da un numero progressivo che parte dallo zero.

	id_function	id_input	name	datatype	unit
25	2410	2	1S_2S_[]	double	NULL
26	2411	0	p0_[mbar]	double	NULL
27	2411	1	p_turbine_in_[bar]	double	NULL
28	2411	2	engine_speed_[rpm]	double	NULL
29	2411	3	stroke_[m]	double	NULL
30	2412	0	t_compressor_in_[C]	double	NULL
31	2412	1	t_compressor_out_[C]	double	NULL
32	2413	0	bore_[m]	double	NULL
33	2413	1	stroke_[m]	double	NULL
34	2413	2	compression_ratio_[]	double	NULL
35	2413	3	rod_to_crank_ratio_[]	double	NULL
36	2413	4	Exhaust Valve Closing [deg before TDC]	double	NULL
37	2414	0	p0_[mbar]	double	NULL
38	2414	1	p_receiver_[bar]	double	NULL

Figura V.VII: Tabella relativa agli input della formula madre per il calcolo del coefficiente isoentropico dell'aria.

V.V Tabella t_environment_inputs

In questa tabella sono contenuti tutti i dati raccolti dai vari sensori con cui il motore è equipaggiato, e che diventano gli input alle varie formule durante il calcolo. Nella prima colonna si ha *id_env_input*, cioè un numero intero progressivo che viene associato ad ogni input richiesto dalle funzioni.

	id_env_input	name	datatype	unit
1	0	t0_[C]	double	NULL
2	1	t_compressor_in_[C]	double	NULL
3	2	t_compressor_out_LP_[C]	double	NULL
4	3	t_compressor_in_HP_[C]	double	NULL
5	4	t_compressor_out_[C]	double	NULL
6	5	t_receiver_[C]	double	NULL
7	6	t_exhaust_manifold_[C]	double	NULL
8	7	t_turbine_in_[C]	double	NULL
9	8	t_turbine_in_LP_[C]	double	NULL
10	9	t_turbine_out_[C]	double	NULL
11	10	p0_[mbar]	double	NULL
12	11	p_compressor_in_[mbar]	double	NULL
13	12	p_compressor_out_LP_[bar]	double	NULL
14	13	p_compressor_in_HP_[mbar]	double	NULL
15	14	p_compressor_out_[bar]	double	NULL
16	15	p_receiver_[bar]	double	NULL
17	16	p_turbine_in_[bar]	double	NULL
18	17	p_turbine_in_LP_[bar]	double	NULL
19	18	p_turbine_out_[mbar]	double	NULL
20	19	engine_speed_[rpm]	double	NULL
21	20	Cylinder number z	double	NULL
22	21	Bore [mm]	double	NULL
23	22	Stroke [mm]	double	NULL

Figura V.VIII: Porzione di tabella t_environment_inputs.

V.VI Tabella t_function_version_inputs

Questa tabella consente di identificare un input specifico di una determinata versione di una funzione madre [1]. In pratica, mette assieme le informazioni di formula madre, versione, input e ID dell'input.

	id_function	id_input	id_version	id_env_inp	minimum	maximum	scale	offset
25	2410	2	1	107	0	0	1	0
26	2411	0	1	10	0	0	1	0
27	2411	1	1	16	0	0	1	0
28	2411	2	1	19	0	0	1	0
29	2411	3	1	22	0	0	1	0
30	2412	0	1	1	0	0	1	0
31	2412	1	1	4	0	0	1	0
32	2412	0	2	1	0	0	1	0
33	2412	1	2	2	0	0	1	0
34	2412	0	3	3	0	0	1	0
35	2412	1	3	4	0	0	1	0
36	2413	0	1	21	0	0	1	0
37	2413	1	1	22	0	0	1	0
38	2413	2	1	23	0	0	1	0
39	2413	3	1	24	0	0	1	0
40	2413	4	1	26	0	0	1	0
41	2414	0	1	10	0	0	1	0
	2414	1	1	15	0	0	1	0

Figura V.IX: Porzione di tabella t_environment_inputs raffigurante il caso della formula per il k_{air} .

Si può constatare dalla figura

fig:t_function_version_inputs ha una prima colonna in cui viene riportato l'id_function, nella seconda invece si ha l'id_input. Nell'esempio della formula V.I, si hanno solamente due input possibili, come mostrato in figura V.VII, e ciò determina due possibili casi per ogni versione della funzione (terza colonna della tabella).

V.VII Tabella t_function_outputs

È analoga alla tabella t_function_input, l'unica differenza sta nel fatto che sono elencati e numerati progressivamente tutti gli output delle varie funzioni.

	id_function	id_output	name	datatype	unit
1	2404	0	m_nozzle_[kg/s]	double	kg/s
2	2405	0	m_aireng_nozzle_[kg/s]	double	kg/s
3	2406	0	p_TIVC_[Pa]	double	Pa
4	2407	0	T_TIVC_[C]	double	°C
5	2408	0	V_TIVC_[m3]	double	m^3
6	2409	0	m_aireng_EC4T_[kg/s]	double	kg/s
7	2410	0	m_EC4T_[kg/s]	double	kg/s
8	2411	0	p_EVC_[Pa]	double	Pa
9	2412	0	kair_[]	double	-
10	2413	0	V_EVC_[m3]	double	m^3
11	2414	0	T_EVC_[C]	double	°C
12	2415	0	m_aireng_EC2T_[kg/s]	double	kg/s
13	2416	0	m_EC2T_[kg/s]	double	kg/s
14	2417	0	ECR_EC4T_[]	double	-
15	2418	0	ECR_EC2T_[]	double	-

Figura V.X: Porzione di tabella t_output raffigurante il caso della formula per il k_{air} .

La tabella è alquanto semplice visto che la totalità o quasi delle formule utilizzate restituisce un unico risultato, quindi ogni formula avrà solo un output e sarà il numero 0. Nelle altre colonne è riportato il nome del risultato e la relativa unità di misura.

V.VIII Tabella t_function_version_outputs

Il principio è analogo alla tabella relativa agli input, quindi si rappresentano tutte le varie combinazioni di output per una funzione madre a seconda della versione selezionata.

	id_function	id_output	id_version	minimum	maximum	scale	offset
1	2404	0	1	0	0	1	0
2	2405	0	1	0	0	1	0
3	2406	0	1	0	0	1	0
4	2407	0	1	0	0	1	0
5	2408	0	1	0	0	1	0
6	2409	0	1	0	0	1	0
7	2410	0	1	0	0	1	0
8	2411	0	1	0	0	1	0
9	2412	0	1	0	0	1	0
10	2412	0	2	0	0	1	0
11	2412	0	3	0	0	1	0
12	2413	0	1	0	0	1	0
13	2414	0	1	0	0	1	0
14	2415	0	1	0	0	1	0
15	2416	0	1	0	0	1	0
16	2417	0	1	0	0	1	0

Figura V.XI: Porzione di tabella t_version_output raffigurante il caso della formula per il k_{air} .

Come visto nella sezione precedente, la formula relativa al coefficiente isoentropico dell'aria (V.I) in esempio ha un solo output possibile quindi si avranno solamente tre casistiche in tabella.

V.IX Tabella t _ conf _ communication

In figura V.I, si può notare che il database è suddiviso in due macro aree: una parte relativa a tutte le funzioni e una parte relativa alle configurazioni. La parte inherente alle funzioni è caratterizzata da tutte quelle tabelle il cui nome inizia con *t_function_...* ed è stata descritta nelle sezioni precedenti; ora verranno analizzate una ad una le prime dieci tabelle presenti nell'elenco interno al database. I dati inseriti in queste tabelle fanno riferimento alla configurazione fatta dall'utente nelle varie schede del programma che si aprono una volta lanciato. In particolare, una volta aperto il software e messo in esecuzione, si aprirà la schermata iniziale relativa al *main.vi*, nella quale l'utente può far partire il calcolatore oppure modificare la configurazione, schiacciando il pulsante "Edit Settings".

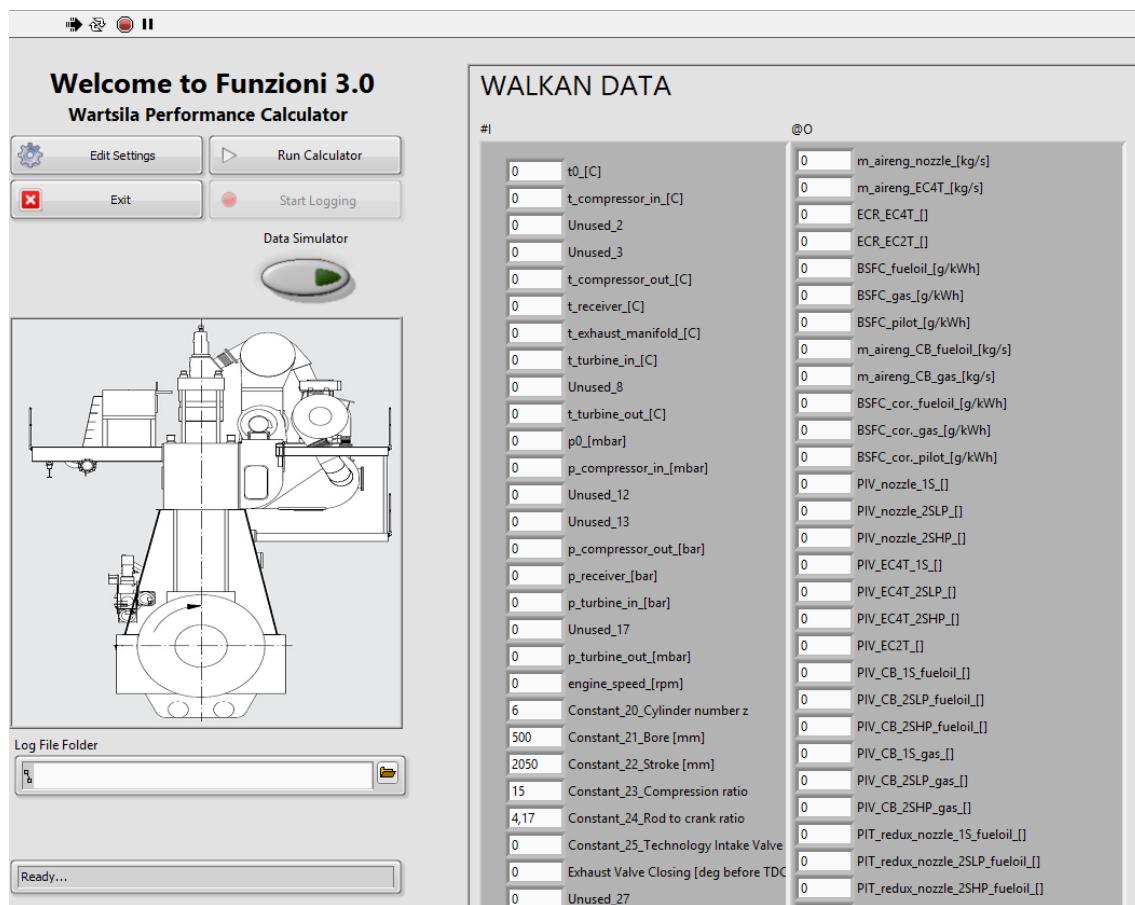


Figura V.XII: Schermata di avvio del software.

Tramite il primo tasto in alto a sinistra, si aprirà una nuova schermata relativa

all'*Envirnoment.vi*, dove viene chiesto all'utente di configurare l'impianto per poter leggere correttamente i dati ed eseguire i calcoli.

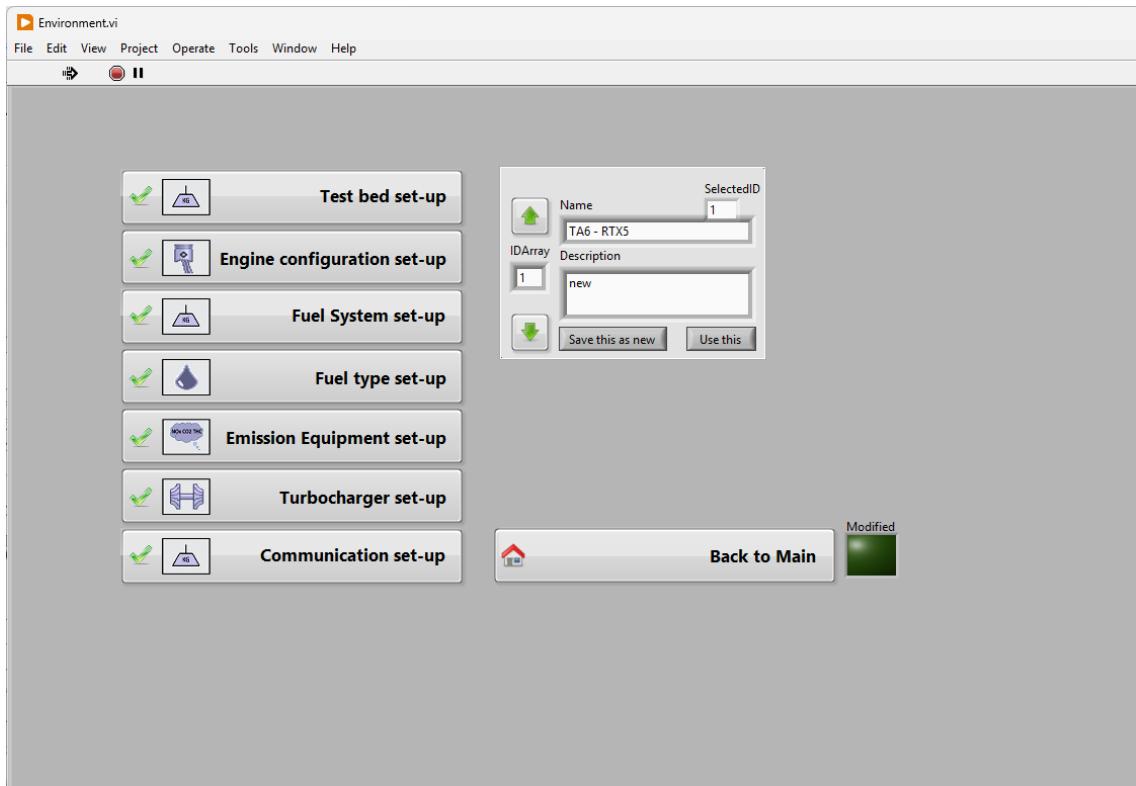


Figura V.XIII: Schermata relativa all'Environment.vi che si apre all'avvio del software.

Ogni tasto della colonna di sinistra mostrata in figura V.XIII rappresenta un sotto-ambiente da configurare per far funzionare il programma. In questa sezione si descriverà la configurazione della comunicazione e la tabella che ne deriva sul database.

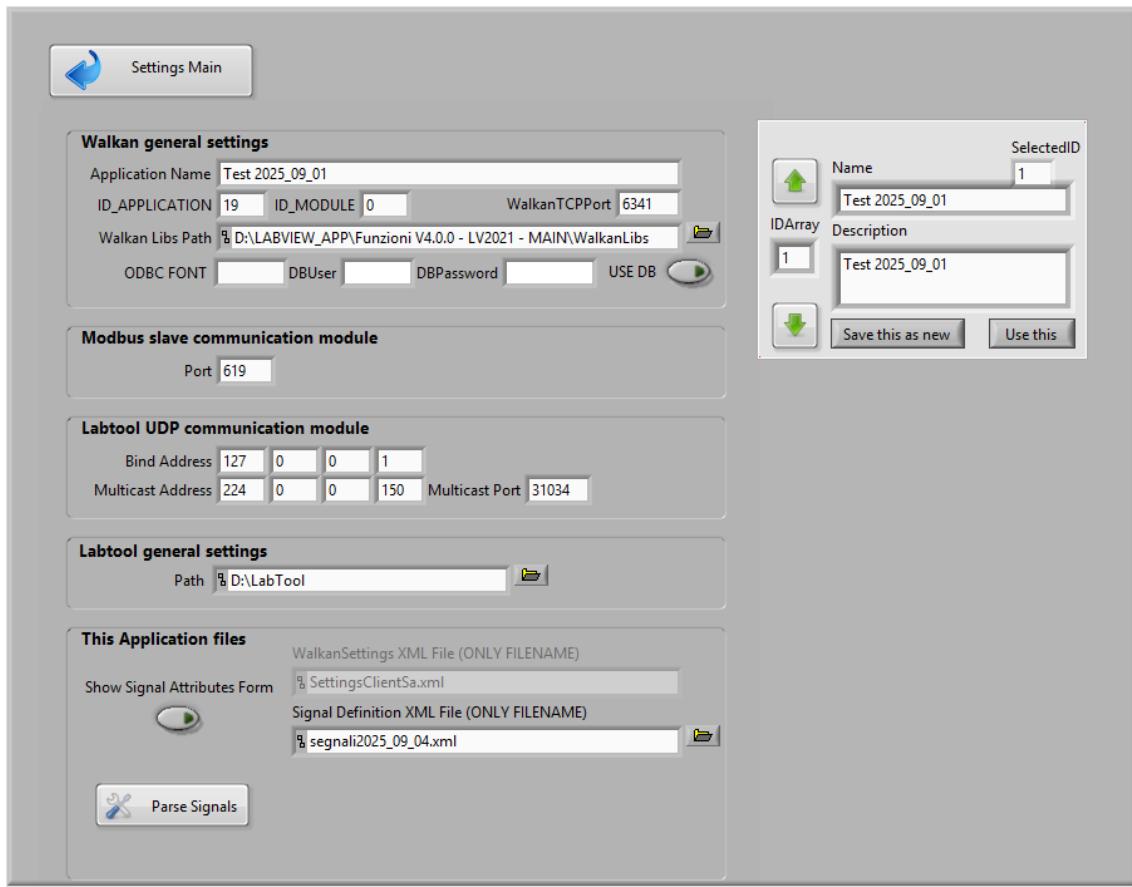


Figura V.XIV: Pagina di configurazione della comunicazione tra software WPC e database.

La pagina di configurazione presenta in alto a destra un piccolo riquadro di colore bianco, nel quale sono riportati i vari settaggi già salvati o usati in precedenza che possono essere caricati. Basterà spostarsi le frecce e leggere il nome del salvataggio fino a quando non si trova quello di proprio interesse. Ogni configurazione memorizzata è identificata da un ID, cioè un numero intero progressivo di riconoscimento.

Qualora si debba creare una nuova configurazione, bisogna modificare le caselle nel modulo di sinistra. In particolare, nel riquadro intitolato *Walkan General Settings* è richiesto di inserire un nome per il nuovo settaggio e un relativo ID. L'ID_Application è un numero progressivo associato ad ogni applicazione LabView. Per convenzione interna, si è deciso che il programma WPC dovesse avere ID 19 o superiore. Bisogna poi inserire la cartella in cui sono conservate le librerie necessarie al software per effettuare i calcoli. Lo stesso ID verrà usato anche per creare un file logger per Labtool, il cui nome sarà del tipo: *WID_Application_Application Name*. Questo file sarà un file in formato XML nel quale vengono salvati tutti gli output di LabView diretti al Labtool.

Nel secondo e nel terzo paragrafo, si possono aggiustare gli indirizzi IP e UDP di comunicazione con il *Labtool*, ossia un software utilizzato da Wärtsilä per raccogliere

dati e gestire processi. In particolare, alla voce *Modbus slave communication module* bisogna inserire il numero della porta UDP con la quale Labview deve comunicare. Il *Multicast Address* è l'indirizzo IP sul quale si fa multicast, cioè è l'indirizzo al quale tutti gli slave coinvolti nella comunicazione devono comunicare i dati secondo le regole del protocollo UDP. L'indirizzo UDP non varia, ma bisogna impostare la corretta *Multicast Port*, ossia la porta dalla quale prelevare i dati di interesse. Tale porta viene identificata da un numero di 5 cifre: le prime due sono sempre 31, mentre le tre successive corrispondono alle ultime 3 cifre dell'indirizzo IP della cella che si vuole analizzare. Il *Bind Address* è un indirizzo che può avere due configurazioni a seconda del sistema che si utilizza. Se si sta usando lo stesso PC sia per Labtool che per LabView, si dovrà inserire come indirizzo il Localhost, che per definizione è 127.0.0.1. Qualora invece si usassero due PC diversi, e quindi il PC usato per LabView debba comunicare con il PC con Labtool, il *Bind Address* corrisponde all'indirizzo IP della porta che collega i due computer. Una breve spiegazione dei protocolli di comunicazione è presente nella sezione IV.

Come si può notare in figura V.XIV, il programma deve sapere la posizione del software installato sul PC e per questo chiede all'utente di inserire il percorso delle cartelle. Infine, in *This Application files* l'utente può eventualmente modificare una sola delle due voci presenti. *SettingsClientSA.xml* è un file di testo in cui vengono salvati tutti i dati appena descritti riguardanti la comunicazione tra software e labtool. Questo file viene sempre creato in automatico e non è possibile cambiarne il nome. Il secondo file "xml" è invece possibile rinominarlo; esso conterrà tutti i dati relativi al *parsing* dei segnali.

Tutti i dati inseriti in questa pagina vengono poi salvati nella pagina `t_conf_-communication` del database, la quale avrà la struttura mostrata in figura V.XV:

lv_database		Table name: t_conf_communication			
	Name	Data type	Primary Key	Foreign Key	
1	ID	INTEGER			
2	Name	STRING			
3	Description	STRING			
4	ID_APPLICATION	STRING			
5	ID_MODULE	STRING			
6	WalkanTCPPort	STRING			
7	ODBC_FONT	STRING			
8	DBUser	STRING			
9	DBPassword	STRING			
10	ModbusPort	STRING			
11	BindAddress	STRING			
12	UDP_Port	STRING			
13	UDP_Multicast_Address	STRING			
14	Signal_Definition_XML_File	STRING			
15	LabtoolPath	STRING			
16	Configuration_Path	STRING			
17	Walkan_Libs_Path	STRING			
18	USEDDB	BOOLEAN			
19	ShowSignalAttributes	BOOLEAN			

Figura V.XV: Struttura della tabella t_conf_communication presente nel database.

In figura V.XV viene mostrata la natura dei dati contenuti nella tabella in esame, ma è possibile visualizzare i valori andando nella pagina "Data".

ID	Name	Description	ID_APPLIC	ID_MODUL	WalkanTCF	ODBC_FONT	DBUser	DBPasswor	ModbusPort	BindAddress	UDP_Port	UDP_Multicast_Address
1	Test 2025_09_01	Test 2025_09_01	19	0	6341				619	127.0.0.1	31034	224.0.0.150
	Signal_Definition_XML_File	LabtoolPath	Configuration_Path	Walkan_Libs_Path					USEDDB	ShowSigna		
	segna12025_09_04.xml	D:\LabTool	SettingsClientSa.xml	D:\LABVIEW_APP\Funzioni V4.0.0 - LV2021 - MAIN\WalkanLibs					0	0		

Figura V.XVI: Dati contenuti nella tabella t_conf_communication

V.X Tabella t_conf_engines

Questa tabella del database contiene tutte le informazioni impostate nella pagina di configurazione intitolata *Engine configuration set-up*, presente nel menu mostrato in figura V.XIII. In particolare, premendo tale pulsante, comparirà una pagina mostrata in figura V.XVII:

 Settings Main

Engine configuration

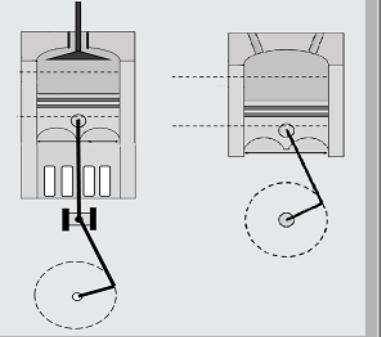
Engine Name

Additional note
Gas fuel - valori inseriti in TA6 14/10/2022

IDArray SelectedID
Name: 1
Description: Gas fuel - valori inseriti in TA6
14/10/2022
Save this as new Use this

Main information

Engine configuration	Engine Type	Engine speed sensor
<input checked="" type="checkbox"/> In line engine	<input checked="" type="checkbox"/> 2T	<input checked="" type="checkbox"/> Online Data
<input type="radio"/> V engine	<input type="radio"/> 4T	<input type="checkbox"/> Offline Data
 In line	 V	Dual Fuel
	<input checked="" type="checkbox"/> Yes	Cylinder number z
	<input type="radio"/> No	<input type="text"/> 6
		Compression ratio



Geometrical information

<input type="text"/> Stroke [mm]
<input type="text"/> Bore [mm]
<input type="text"/> Rod to crank ratio

Valve timing

Technology Intake Valve Closing [deg before TDC] (4T)
<input type="text"/> 0
EVC communication system (2T)
<input checked="" type="checkbox"/> Online Data
<input type="checkbox"/> Offline Data

Figura V.XVII: Pagina di configurazione del motore

La struttura è simile a quanto visto nella sezione di configurazione precedente; infatti, si può notare lo stesso riquadro bianco con il quale è possibile selezionare un salvataggio già esistente. Negli altri riquadri viene chiesto all'utente di inserire i principali parametri del motore, come numero di cilindri, alesaggio o rapporto di compressione; i quali verranno memorizzati nell'apposita pagina del database, intitolata *t_conf_engines* (figura V.XVIII).

	Name	Data type	Primary Key	Fc
1	ID	INTEGER	KEY	
2	Name	STRING		
3	Description	STRING		
4	Rod_to_crank_ratio	DOUBLE (10, 4)		
5	Bore	DOUBLE (10, 4)		
6	Cylinder_number_z	DOUBLE (10, 4)		
7	TIVC	DOUBLE (10, 4)		
8	Compression_ratio	DOUBLE (10, 4)		
9	Engine_Type	BOOLEAN		
10	Dual_Fuel	BOOLEAN		
11	Engine_configuration	BOOLEAN		
12	Stroke	DOUBLE (10, 4)		
13	Engine_speed_sensor	BOOLEAN		
14	EVC_Communication_System	BOOLEAN		

Figura V.XVIII: Tabella del database t_conf_engine

V.XI Tabella t_conf_fuel_gas

La tabella *t_conf_fuel_gas* è composta da dieci colonne che riportano i dati settati nella pagina "Fuel type set-up" dell'Environment.vi. In particolare, sono contenuti i dati della composizione del gas combustibile e ID, nome e descrizione della configurazione salvata.

	Name	Data type	Primary Key	For K
1	ID	INTEGER	KEY	
2	Name	STRING		
3	Description	STRING		
4	C_content	DOUBLE (10, 4)		
5	H_content	DOUBLE (10, 4)		
6	N_content	DOUBLE (10, 4)		
7	O_content	DOUBLE (10, 4)		
8	S_content	DOUBLE (10, 4)		
9	LHV	DOUBLE (10, 4)		
10	AFRatio	DOUBLE (10, 4)		

	ID	Name	Description	C_cont	H_cont	N_cont	O_cont	S_cont	LHV	AFRatio
1	1	aaaa	aaaa	78	10	9.9	2	0.1	50	8

Figura V.XIX: Tabella del database t_conf_fuel_gas

La relativa pagina dell'Environment.vi si mostra come in figura V.XXI:

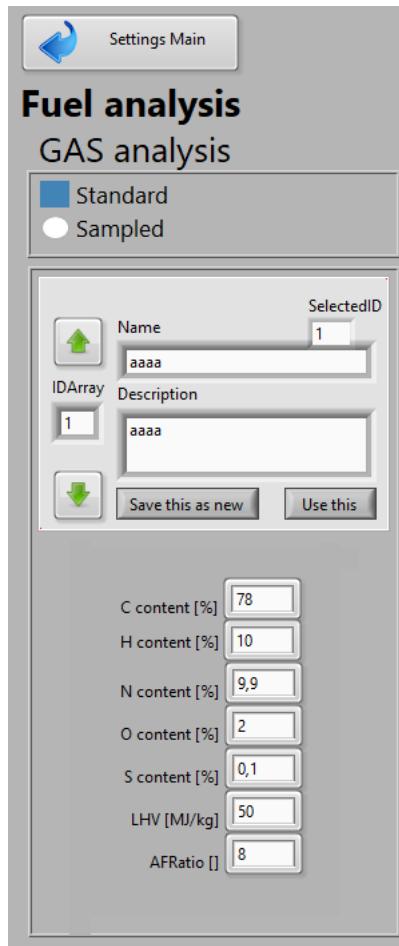


Figura V.XX: Schermata di configurazione proprietà del combustibile gassoso utilizzato

Si può notare che sono presenti due possibilità di scelta sul tipo di gas in uso; in particolare l'utente può decidere di specificare la composizione di un gas combustibile noto oppure settare la composizione di uno standard. Nel caso decidesse di utilizzare quello standard, il software caricherà in automatico una composizione pre-salvata nel database.

V.XII Tabella t_conf_fuel_hfo

Questa tabella appare esattamente uguale a quella in figura V.XIX ed è modificabile sempre dalla schermata "Fuel type set-up" dell'Environment.vi. Qui si avrà una tabella analoga a quella in figura V.XXI in cui però si fa riferimento alla composizione del combustibile HFO piuttosto che del gas.

V.XIII Tabella t_conf_fuel_lfo

Questa tabella appare esattamente uguale a quella in figura V.XIX ed è modificabile sempre dalla schermata "Fuel type set-up" dell'Environment.vi. Qui si avrà una

tabella analoga a quella in figura V.XXI in cui però si fa riferimento alla composizione del combustibile LFO piuttosto che del gas.

V.XIV Tabella t_conf_maps

In questa tabella vengono memorizzati i vari compressori e le varie turbine. In particolare, si riporta il nome del produttore, il modello e alcuni dati aggiuntivi legati al tipo di macchina utilizzata. Ogni macchina memorizzata viene identificata da un codice identificativo progressivo, con il quale può essere richiamata facilmente nelle tabelle successive e all'interno del software WPC.

	ID	PRODUCT	MODEL	TYPE	UNIT_SPEED	TURBINE_COMPRESSOR
1	1	ABB	A175-L	CV07 CT50 CD03 CA40	RPM	0
2	2	ABB	A165-L	CV09 CT60 CD07 CA30 HZTL640313 AN40 XH01 CH03 nose cone	RPM	0
3	3	ABB	A265-L	CV21 CT40 CD14 CA40	RPM	0

Figura V.XXI: Tabella t_conf_maps in cui sono elencati i modelli di compressori memorizzati

V.XV Tabella t_conf_maps_flowdata

In questa tabella sono contenuti i punti che costituiscono le mappe SAE delle turbine e dei compressori salvati. Per ogni modello presente nel database, si hanno 250 punti ottenuti a diversi valori di regime di rotazione. In particolare, ogni punto della mappa esprime la portata di gas, il rapporto di compressione (PIV) e il rendimento del compressore.

	ID_MAP	ID_ROW	RPM	FLOW_RATE	PIV	ETA	
1	2	1	8100	5,58747	1,226	0,58431	
2	2	2	8100	5,49754	1,24317	0,6204	
3	2	3	8100	5,40726	1,25881	0,65197	
4	2	4	8100	5,3167	1,27297	0,67936	
5	2	5	8100	5,2259	1,28585	0,7032	
6	2	6	8100	5,13491	1,29748	0,72368	
7	2	7	8100	5,04374	1,308	0,7413	
8	2	8	8100	4,95245	1,31739	0,75607	
9	2	9	8100	4,86102	1,32586	0,76856	
10	2	10	8100	4,76951	1,33327	0,77855	
11	2	11	8100	4,67791	1,33992	0,78676	
12	2	12	8100	4,58626	1,34568	0,79296	
13	2	13	8100	4,49456	1,3506	0,79732	
14	2	14	8100	4,40281	1,35498	0,80053	
15	2	15	8100	4,31104	1,35895	0,80282	
16	2	16	8100	4,21926	1,36255	0,80437	
17	2	17	8100	4,12747	1,36579	0,80517	
18	2	18	8100	4,03566	1,36874	0,8054	
19	2	19	8100	3,94385	1,37147	0,8052	
20	2	20	8100	3,85204	1,37391	0,80445	
21	2	21	8100	3,76021	1,37609	0,80323	
22	2	22	8100	3,66838	1,37804	0,80157	
23	2	23	8100	3,57655	1,37962	0,79923	
24	2	24	8100	3,48471	1,38095	0,79647	
25	2	25	8100	3,39287	1,38216	0,79351	
26	2	26	10427,4	7,29728	1,40843	0,5944	

Figura V.XXII: Porzione della tabella *t_conf_maps_flowdataincusonoriportatialeunicipuntidellamappaSAE* di un compressore

In figura V.XXII si può notare che la prima colonna è intitolata "ID_MAP". Rappresenta l'indice progressivo con cui è stato salvato il compressore all'interno della pagina *t_conf_maps*

V.XVI Tabella t_conf_maps_surgedata

Questa tabella ha una struttura analoga a quanto mostrato nel capitolo V.XV ma si differenzia per i dati contenuti. Infatti, come suggerisce il nome, qui sono contenuti tutti i punti relativi al limite della zona di surge del compressore; contiene cioè i punti di confine tra la zona di surge e quella del normale funzionamento.

	ID_MAP	ID_ROW	RPM	FLOW_RATE	PIV	
1	1	1	6000,000	4,52583000	1,39369	
2	1	2	6504,900	4,93019000	1,47412	
3	1	3	6973,400	5,36582000	1,5564	
4	1	4	7412,300	5,77730000	1,64127	
5	1	5	7826,600	6,17266000	1,72882	
6	1	6	8220,100	6,58665000	1,81865	
7	1	7	8595,500	7,01699000	1,91118	
8	1	8	8955,300	7,42485000	2,00746	
9	1	9	9301,100	7,84621000	2,10624	
10	1	10	9634,600	8,29586000	2,20718	
11	1	11	9956,800	8,75269000	2,31073	
12	1	12	10269,000	9,21135000	2,41709	
13	1	13	10572,000	9,71666000	2,52611	
14	1	14	10866,500	10,29611000	2,63827	
15	1	15	11153,200	11,09959000	2,7535	
16	1	16	11432,800	11,93411000	2,87179	
17	1	17	11705,600	12,61768000	2,99326	
18	1	18	11972,300	13,19872000	3,11726	
19	1	19	12233,100	13,74752000	3,2434	
20	1	20	12488,500	14,28488000	3,37247	
21	1	21	12738,800	14,81576000	3,50537	
22	1	22	12984,300	15,37940000	3,64223	
23	1	23	13225,200	16,05578000	3,78227	

Figura V.XXIII: Porzione della tabella t_conf_maps_surgedata

V.XVII Tabella t_conf_TC

La tabella t_conf_TC contiene tutte le configurazioni effettuate dell’utente all’interno del programma LabView. Tale tabella è composta da 40 colonne, dove ognuna rappresenta un diverso parametro di configurazione modificabile dall’utilizzatore, come ad esempio numero di stadi, presenza della valvola wastegate, diametri di ingresso e uscita del compressore, ...

ID	Name	Description	Number_of_Stage	Turbo_type	Wg_feedback_signal	Wastegate_size	Wg_config	Compressor_leak	D_turbine_in	D_compressor_in	D_compressor_out	Compressor_Map_SAE	ID_Compressor_Map_SAE	Turbo_Map_SAE	ID_Turbo_D
1	1 aaa	aaa	0	0	0	1	0	1.5	409.6	1000	267	0	0	0	0
2	2 aaa	aaa	1	0	0	0	0	1.5	198	150	150	0	0	0	0
3	3 aaa	aaa	1	0	0	0	0	1.5	198	150	150	0	0	0	0
4	4 aaa	aaa	0	0	0	0	1	1.5	409.6	1000	322.9	0	0	0	0
5	5 aaa	aaa	0	0	0	0	1	1.5	409.6	1000	322.9	0	0	0	0
6	6 aaa	aaa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura V.XXIV: Porzione della tabella t_conf_TC in cui sono mostrate solo le prime delle 40 colonne presenti

V.XVIII Tabella t_conf

In questa pagina del database sono contenute tutte le configurazioni complete che vengono salvate. In particolare, il software unisce tutte le singole configurazioni descritte nei paragrafi precedenti e le inserisce in un'unica tabella composta da 43 elementi.

	Name	Data type	Primary Key	Foreign Key	U
1	ID_CONFIGURATION	INTEGER			
2	Test_cell_Name	STRING			
3	Additional_notes	STRING			
4	k_nozzle	DOUBLE (10, 4)			
5	Internal_diameter_Nozzle	DOUBLE (10, 4)			
6	External_diameter_Nozzle	DOUBLE (10, 4)			
7	Air_Nozzle	BOOLEAN			
8	Communication_System_TORQUE	BOOLEAN			
9	Engine_Torque_system	BOOLEAN			
10	Torque_System_efficiency	BOOLEAN			
11	Communication_System_Gravity_TANK_PILOT	BOOLEAN			
12	Fuel_flow_In_Fuel_flow_Out	BOOLEAN			
13	Gravity_tank_PILOT	BOOLEAN			
14	Communication_System_Flowmeter_PILOT	BOOLEAN			
15	Communication_SYSTEM_GRAVITY_TANK_LOSS	BOOLEAN			
16	Communication_System_Flowmeter	BOOLEAN			
17	Gravity_tank	BOOLEAN			
18	Flowmeter	BOOLEAN			
19	Communication_System_Gravity	BOOLEAN			
20	Communication_SYSTEM_FLOWMETER_LOSS	BOOLEAN			
21	Gravity_Tank_LOSS	BOOLEAN			
22	Flowmeter_LOSS	BOOLEAN			
23	Fuel_Type_In_Use	INTEGER			
24	Two_Parallel_Flowmeter_For_Gas	BOOLEAN			
25	Communication_System_humidity	BOOLEAN			
26	Humidity_sensor	BOOLEAN			
27	Communication_System_CO	BOOLEAN			
28	CO_CO2_O2_sensor	BOOLEAN			
29	Communication_System_THC	BOOLEAN			

Figura V.XXV: Porzione della tabella t_conf

I salvataggi delle configurazioni complessive sono numerati secondo un indice progressivo, e al variare di un solo elemento di una sotto-configurazione, il programma creerà una nuova configurazione complessiva caratterizzata da un ID differente.

In figura V.XXV si può infatti vedere che la prima voce indica appunto un ID progressivo.

Capitolo VI

Funzionamento software WPC

Il software Wärtsilä Performance Calculator (WPC) è stato progettato per effettuare calcoli di performance in tempo reale utilizzando i segnali dei sensori installati sul banco prova o sul motore a bordo nave. Questi segnali sono utilizzati come input per WPC, che può funzionare sia in modalità stand-alone, acquisendo direttamente i dati tramite il software di acquisizione Labtool, sia come parte del server Walkan.
[1]

Quest'ultimo è l'intermediario tra il sistema di monitoraggio e le applicazioni sviluppate in LabView, come ad esempio il software WPC. Le comunicazioni avvengono tramite protocollo Modbus TCP/IP, sia attraverso una rete cablata (cavo Ethernet) che una rete wireless.

Il programma è stato concepito per calcolare in parallelo gli stessi parametri sfruttando quattro diversi metodi per la determinazione della portata dell'aria. In particolare, la portata dell'aria può essere calcolata mediante :

- I. lettura delle mappe SAE del turbogruppo;
- II. tecnica del *Carbon Balance*;
- III. misuratore di portata dell'aria aspirata (indicato come *Air nozzle*);
- IV. aria intrappolata nel cilindro.

La misura più affidabile è quella attraverso l'*Air nozzle*, cioè un tubo di Venturi che viene posto all'aspirazione del motore. Tale sistema è però disponibile solo in laboratorio; quindi, a bordo nave di solito si deve ricorrere ad un'altra tecnica. Il metodo del *Carbon Balance* si basa sull'equilibrio delle concentrazioni di carbonio tra aria aspirata e gas di scarico. In particolare, si associa la differenza di concentrazione di CO_2 , CO e idrocarburi incombusti HC tra aria aspirata e gas di scarico, con la quantità di combustibile iniettato. Conoscendo la formula chimica del combustibile, il rapporto stechiometrico e la dosatura di lavoro, è possibile calcolare la massa

d'aria aspirata. Questo metodo è però applicabile solo a combustibili contenenti carbonio. Il calcolo della massa d'aria intrappolata nel cilindro è sempre possibile ma è il sistema meno preciso, quindi si preferisce utilizzare una delle altre tecniche. Quando sono disponibili le mappe SAE, è possibile calcolare la portata d'aria tramite le mappe di compressore e turbina, incrociando numero di giri e rapporto di compressione o di espansione, a seconda del tipo di macchina.

VI.I Implementazione delle funzioni

Il software utilizza i dati contenuti nel database per verificare le condizioni di calcolabilità delle funzioni principali e delle loro versioni, eseguendo solo quelle che possono essere calcolate. Inoltre, gli input generici della funzione principale vengono sostituiti dinamicamente con quelli richiesti dalla versione calcolata, utilizzando gli elementi del vettore *environment_input*. Per ottimizzare il programma, gli script delle funzioni madri sono stati salvati nella tabella *t_functions* del database, con il nome Fxxx, dove “xxx” rappresenta il numero della funzione principale, seguito dal nome del risultato. Questo è visibile in figura V.II, in particolare si fa riferimento alla seconda colonna.

Durante la fase di avvio del programma, le funzioni vengono caricate nel file "ALL.py" dal database e poi richiamate dal nodo Python di calcolo specificando il loro nome, gli input e gli output. [9] Il file "ALL.py" è uno script di Python in cui vengono riportate in ordine tutte le funzioni che il programma dovrà calcolare durante l'esecuzione.

```

def F1(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):

    #Aria motore con nozzle

    column=fun(fs_i,1)

    if (column == -1):

        return column

    tcompressorin=X[fsall[fs_i][2][column]]  #[°C]

    p0=dot(X[fsall[fs_i][3][column]],100)  #[mbar -> Pa]

    k=X[fsall[fs_i][4][column]]  #[m^2]

    deltapnozzle=dot(X[fsall[fs_i][5][column]],100)  #[mbar -> Pa]

    R=287.04  #[J/kgK]

    rho=(p0 / (dot(R,(tcompressorin + 273.15))))  #[kg/m^3]

    mnozzle=dot(k,(dot(rho,abs(deltapnozzle))) ** 0.5)  #[kg/s]

```

Figura VI.I: esempio di script in linguaggio Python relativo alla funzione F1

Come si può vedere dalla figura VI.I, nella prima riga dello script di ogni funzione, si definiscono nome (F1 nell'esempio riportato), input e output. X rappresenta un vettore contenente tutti gli input delle funzioni e viene definito sulla base dei dati presenti nella tabella *environment_inputs*. In particolare, X è un vettore di 118 elementi, i quali si riferiscono ai dati presenti in tabella *t_environment_inputs*. Non sono sempre necessari tutti gli input, perciò saranno diversi da zero solo quelli nelle posizioni indicate dalla matrice fs . Il secondo input è proprio la matrice fs , la cui sigla sta per *function_sensor*. Questa è una matrice composta da una prima riga e una prima colonna di soli zero, i quali hanno lo scopo di allineare la numerazione tra Python e LabView; quest'ultimo infatti inizia a contare da zero invece che da uno. [6]

Figura VI.II: Matrice f_S relativa alla funzione F_1

All’incrocio tra la seconda riga e la seconda colonna, si ha il numero della funzione, infatti si può notare che compare il numero 1. Ogni colonna alla destra del numero della funzione esprime una dipendenza diretta. Nell’esempio riportato si hanno solo degli zeri, dato che la funzione 1 non è dipendente da nessun altro calcolo. Se si considera invece l’equazione V.I, che ha diverse dipendenze da soddisfare, si otterrà una matrice molto diversa.

Figura VI.III: Matrice f_s relativa alla funzione F30, cioè la formula per il calcolo del coefficiente isoentropico dell'aria

In particolare, come si nota in figura VI.III, la formula del coefficiente isoentropico dell'aria dipende dalle funzioni 1, 2, 16 e 17, come anche si era visto nel capitolo V.III.

Le varie righe sottostanti al numero funzione, sia per quella da calcolare che per le sue dipendenze, indicano invece gli indici degli input necessari. Tali cifre sono le stesse mostrate in figura V.VIII.

Come anticipato, le funzioni non vengono caricate singolarmente nel software WPC, ma al contrario vengono caricate in un unico file Python e il programma cerca ogni volta la funzione che deve calcolare. Questo sistema complica la struttura del programma ma permette di lavorare più velocemente. Ciò fa sì che la matrice fs sia in realtà una matrice di matrici (matrice tridimensionale), disposte nell'ordine progressivo:

sivo sancito dall'indice della funzione. Questa nuova matrice di matrici viene definita $fsall$ e avrà una matrice per ogni singola versione delle funzioni. Sarà quindi una matrice composta da 524 sottomatrici. La composizione della singola sottomatrice e i meccanismi di ricerca degli indici non cambiano da quanto descritto poc'anzi.

Figura VI.IV: Matrice $fsall$ composta dalle singole matrici fs relative alle varie funzioni. In figura si riesce a distinguere l'indice progressivo nelle varie matrici

```
3690 ],
3691 [[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
3692 [0, 93, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 41, 43, 81, 0, 0, 0, 0, 0],
3693 [0, 2, 11, 6, 22, 20, 73, 2, 30, 3, 2, 0, 0, 0, 0, 0],
3694 [0, 3, 16, 26, 23, 21, 75, 3, 110, 11, 11, 11, 0, 0, 0, 0],
3695 [0, 0, 20, 0, 24, 0, 108, 0, 0, 0, 13, 12, 0, 0, 0, 0],
3696 [0, 0, 22, 0, 25, 0, 0, 0, 0, 0, 108, 13, 0, 0, 0, 0, 0],
3697 [0, 0, 23, 0, 26, 0, 0, 0, 0, 0, 34, 108, 0, 0, 0, 0, 0],
3698 [0, 0, 26, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 74, 32, 0, 0, 0, 0, 0],
3699 [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
3700 [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
3701 [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
3702 [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
3703 [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
3704 [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
3705 [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
3706 [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
3707 ],
3708 [[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
3709 [0, 93, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 41, 43, 81, 0, 0, 0, 0, 0],
3710 [0, 4, 11, 6, 22, 20, 73, 4, 30, 5, 4, 0, 0, 0, 0, 0],
3711 [0, 5, 16, 26, 23, 21, 75, 5, 110, 11, 11, 11, 0, 0, 0, 0],
3712 [0, 0, 20, 0, 24, 0, 108, 0, 0, 0, 15, 14, 0, 0, 0, 0, 0],
3713 [0, 0, 22, 0, 25, 0, 0, 0, 0, 0, 108, 15, 0, 0, 0, 0, 0],
3714 [0, 0, 23, 0, 26, 0, 0, 0, 0, 0, 35, 108, 0, 0, 0, 0, 0],
3715 [0, 0, 26, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 75, 34, 0, 0, 0, 0, 0],
3716 [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
3717 [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
3718 [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
3719 [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
3720 [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
3721 [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
3722 [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
3723 [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
3724 ]]
```

Figura VI.V: Porzione della matrice \mathbf{fsall} in cui viene mostrato il caso di due matrici relative a due diverse versioni della funzione F93

VI.I.I Struttura di una generica funzione

In figura VI.VI, è stata riportata la definizione della formula F1 per mostrare come una generica funzione è strutturata e per spiegare il funzionamento delle sottofunzioni.

```

166 def F1(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):
167     #Aria motore con nozzle
168
169     column=fun(fs_i,1) # prende l'indice della colonna da usare per la funzione fs_i
170
171     if (column == -1):
172
173         return column
174
175     tcompressorin=X[fsall[fs_i][2][column]] # [°C]
176
177     p0=dot(X[fsall[fs_i][3][column]],100) # [mbar -> Pa]
178
179     k=X[fsall[fs_i][4][column]] # [m^2]
180
181     deltapnozzle=dot(X[fsall[fs_i][5][column]],100) # [mbar -> Pa]
182
183
184     R=287.04 # [J/kgK]
185
186     rho=(p0 / (dot(R,(tcompressorin + 273.15)))) # [kg/m^3]
187
188     mnozzle=dot(k,(dot(rho,abs(deltapnozzle))) ** 0.5) # [kg/s]

```

Figura VI.VI: Struttura della funzione F1 utilizzata per il calcolo della portata d'aria attraverso l'ugello

Alla prima riga viene definita la funzione e i relativi input, cioè il vettore X e l'indice fs_i . Quest'ultimo rappresenta l'indice della sottomatrice all'interno della matrice $fsall$ e viene definito di default nullo. Nell'esempio in figura VI.VI si può notare infatti che fs_i è nullo poiché la funzione F1 è la prima della lista e di conseguenza anche la relativa matrice fs sarà la prima all'interno di $fsall$. La numerazione di LabView parte da 0 invece che 1, quindi il primo elemento sarà in posizione 0. L'indice fs_i viene poi aggiornato e sovrascritto dalla funzione *main* riportata all'interno del file *ALL.py*.

```

166 def main (X=None,calculable=None):
167     from datetime import datetime
168
169     # Getting the current date and time
170     ds = datetime.now()
171
172     # MECCANISMO:
173     # 1) il setup ha creato questo ALL.py con dentro l'array FunctionList che contiene il nome di tutte le funzioni nella posizione relativa alla
174     # versione che chiamerò.
175     # 2) EvaluateAll.vi ad ogni ciclo controlla nell'elenco delle versioni quali funzioni calcolare e chiama questo ALL.py, passandogli un array (calculable)
176     # che ha gli indici dell'array FunctionList corrispondenti alle versioni da chiamare
177
178     dimCalculable = shape(calculable) # leggo le dimensioni dell'array di indici delle funzioni da chiamare
179     n = dimCalculable[0]
180     i = 0
181     outResult = []
182
183     # cerco la colonna che contiene la versione di funzione che cerco
184     while i < n:
185         print(FunctionList[calculable[i]], ' - ', i)
186         c=FunctionList[calculable[i]](X,calculable[i])
187         print(c)
188         outResult.append(c)
189         i = i + 1
190
191     dt = datetime.now()
192     print("Start date and time is:", ds)
193     print("End date and time is:", dt)
194
195     return outResult

```

Figura VI.VII: Funzione *main* responsabile dell'aggiornamento dell'indice fs_i

In particolare, il VI *EvaluateALL.vi* controlla quali versioni deve calcolare e richiama il file *ALL.py* all'interno del programma. Gli passa poi un array chiamato

calculable che contiene gli indici delle funzioni da calcolare. La funzione *main*, per ogni indice presente in *calculable*, stampa il nome della funzione corrispondente e la esegue dandogli come input il vettore X e l'indice stesso.

Tornando in figura VI.VI viene definita successivamente la colonna attraverso la funzione *fun*. In particolare, *column* indica l'indice della colonna della matrice *fsall* che contiene l'ID della funzione in esame, cioè 1.

La variabile chiamata *tcompressorin* è il primo dato che viene definito per il calcolo della portata d'aria. In ogni funzione si avrà quindi una successione di definizione delle variabili necessarie al calcolo del risultato finale. Queste variabili sono prese dal vettore X degli input, nella posizione definita da ciò che si ha dentro le parentesi. In particolare, per l'esempio della funzione F1, il contenuto delle parentesi tonde significa prendere la sottomatrice di indice *fs_i* (quindi indice nullo) all'interno di *fsall*; di questa sottomatrice selezionata considerare solo la riga di indice 2 (che corrisponde alla terza riga dato che Python inizia a contare da zero); e di quella riga prendere l'elemento corrispondente all'indice di colonna precedentemente definito. Le righe sottostanti sono analoghe o rappresentano puri calcoli matematici; infatti, la funzione *dot* rappresenta il comando di moltiplicazione di Python.

VI.II Configurazione iniziale

Per poter usare il programma è necessario effettuare una configurazione preliminare dell'impianto in uso. Il settaggio avviene all'interno dell'*Environment.vi*, il quale si apre premendo il tasto "Edit Settings" nella schermata principale del progetto LabView (figura V.XIII).

VI.II.I Configurazione Test Bed

Aprendo il *Test Bed set-up*, l'utente può nominare il set-up che sta creando, indicare la presenza dell'*Air nozzle* e specificare quali sensori motore sono presenti. L'*Air nozzle* rappresenta il tubo Venturi montato a monte dell'aspirazione motore per misurare la portata d'aria. Solitamente questa tecnologia è disponibile solo su banchi prova, mentre a bordo nave la portata d'aria viene calcolata in altri modi, come ad esempio sfruttando le mappe del turbogruppo. Se l'*Air nozzle* è disponibile, l'operatore deve specificare il valore del "*K_nozzle_[]*", cioè il coefficiente isoentropico dell'aria, il quale è da calcolare secondo normativa ISO 5167-2:2003 [1]. Il programma dispone di un subVI di calcolo del K, chiamato "*Main_k_calc.vi*"

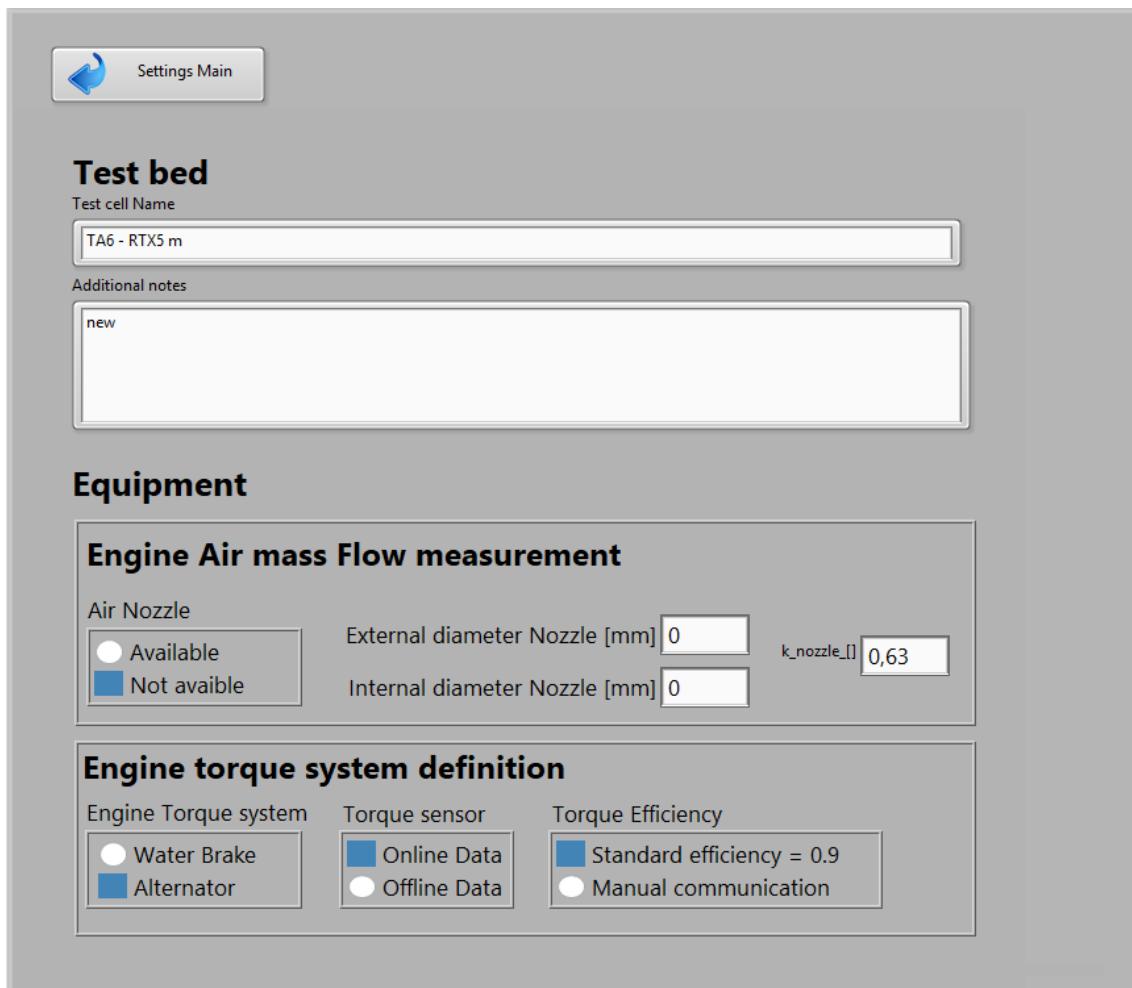


Figura VI.VIII: Pagina di configurazione TEST BED

Nell'ultimo riquadro della schermata si chiede di configurare il sistema di coppia del motore. Come si può vedere in figura VI.VIII, si possono avere due famiglie di strumenti: freno ad acqua o alternatore.

VI.II.II Configuration Engine configuration

La pagina che si apre è quella mostrata in figura V.XVII. Da qui l'utente può selezionare se il motore è a 2 o 4 tempi, in linea o "a V", dual fuel o single fuel. Bisogna definire il numero di cilindri, il rapporto di compressione e altri parametri geometrici caratteristici. All'interno del riquadro "Valve timing" si ha una differenziazione tra 2 o 4 tempi. I motori 2 tempi hanno tipicamente sistemi di attuazione valvola oleodinamici comandati elettronicamente, quindi è possibile variare la fasatura di apertura e chiusura in tempo reale. Per questo, per il 2T, si chiede di selezionare se la comunicazione EVC (Exhaust Valve Closure) è online oppure offline. Per il caso del 4T invece la fasatura è fissa in quanto le valvole sono mosse da meccanismi come alberi a camme o aste e bilancieri. Per questo, si chiede di inserire i gradi prima del punto morto superiore PMS di chiusura valvola.

VI.II.III Configurazione Fuel system

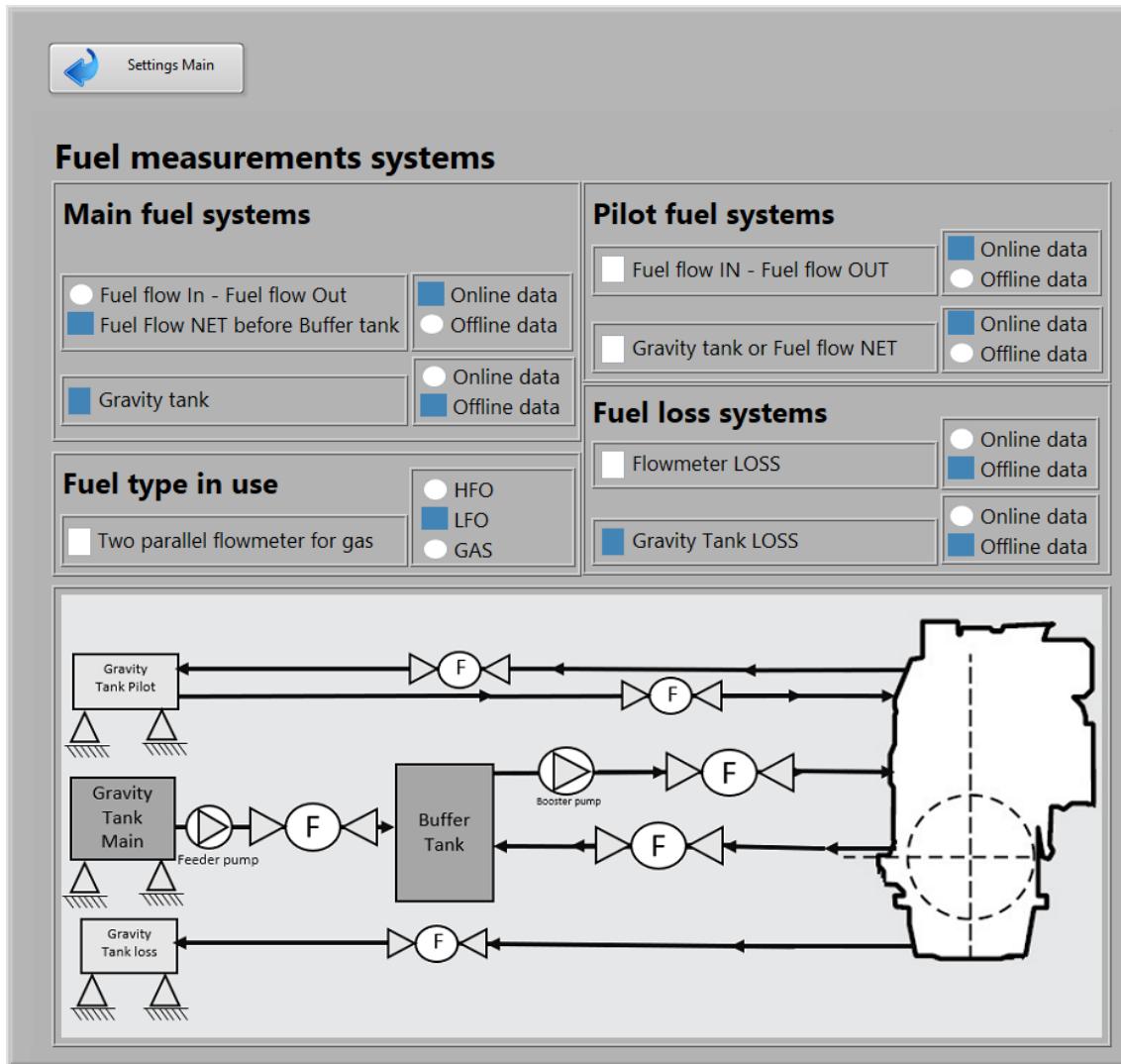


Figura VI.IX: Schermata di configurazione Fuel System

In questa schermata, si chiede all'utente di specificare il combustibile e come vengono misurati tutti quei parametri ad esso relativi. Nel riquadro "Main fuel system" si chiede se il valore di portata combustibile che si leggerà sarà relativo al flusso di ingresso al motore o se invece è il flusso netto che tiene conto, quindi, della quantità ricircolata. Si chiede poi di specificare se le perdite e i ricircoli vengono quantificati attraverso un "Gravity Tank", ossia un serbatoio dotato di celle di carico che misurano la massa del fluido all'interno del serbatoio stesso. Nel riquadro "Pilot fuel systems" si fa riferimento all'iniezione pilota di combustibile, la quale non è detto che sia sempre presente. Se un sensore è staccato, o comunque non è possibile comunicare al programma la misura del consumo tramite i sensori, è possibile spuntare la casella "Offline Data", così da poter procedere al calcolo indicando manualmente il valore delle grandezze necessarie [1].

VI.II.IV Configurazione Fuel type

Qui l'operatore può selezionare e specificare la composizione del combustibile che si sta usando. La schermata appare come mostrato in figura V.XXI.

VI.II.V Configurazione Emission equipment

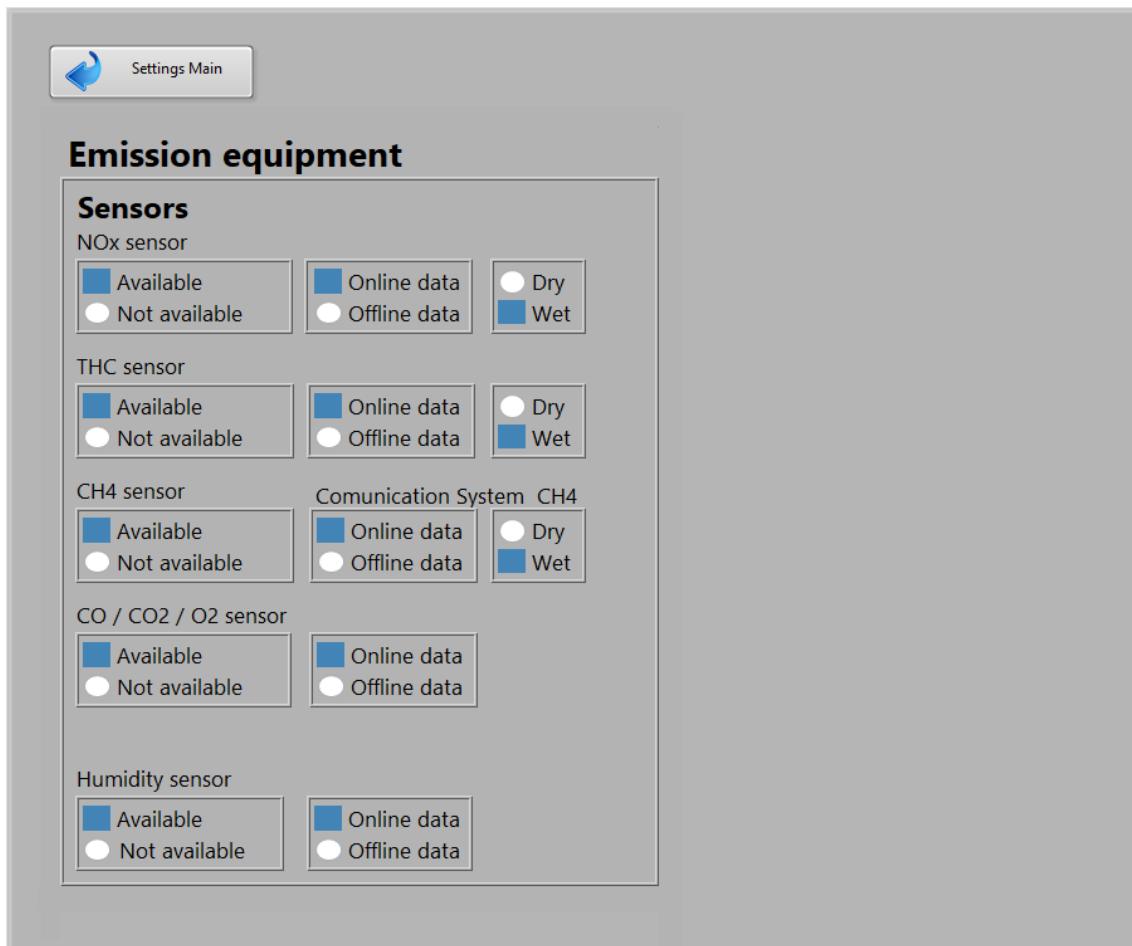


Figura VI.X: Schermata di configurazione Fuel System

In questa schermata l'operatore può selezionare i vari sensori disponibili per la lettura delle emissioni. Ogni specie chimica può essere misurata in condizioni *wet* o *dry*, a seconda che il sensore sia in grado o meno di eliminare l'influenza dell'umidità dalla misura.

VI.II.VI Configurazione Turbocharger

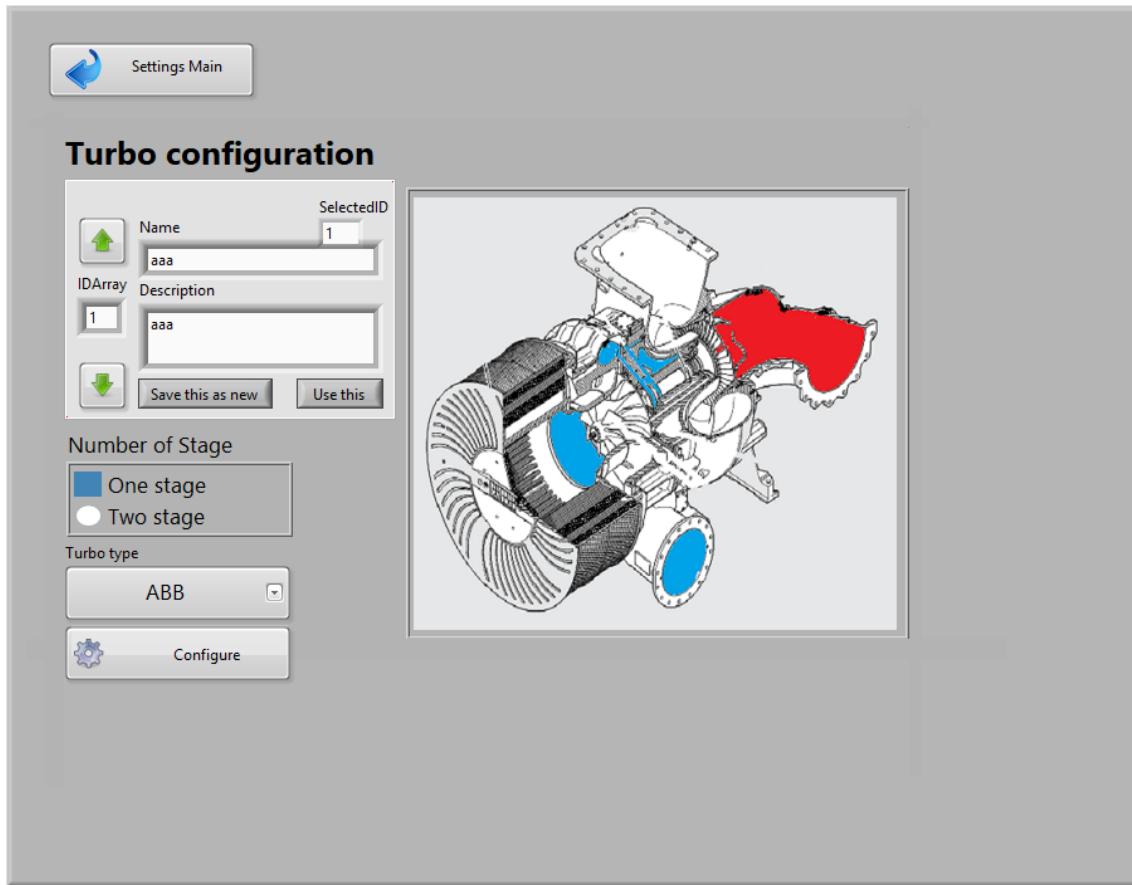


Figura VI.XI: Schermata di configurazione del turbogruppo

L'utente deve specificare se il turbo è monostadio o bistadio e il costruttore. A seconda di ciò che si è selezionato, cambia la pagina di configurazione avanzata del turbogruppo. In ognuna di esse però si richiedono i parametri geometrici fondamentali, come i diametri di uscita compressore e ingresso turbina, la presenza di valvola *Wastegate* e le relative proprietà e infine le mappe in formato SAE di compressore e turbina, con le quali è possibile calcolarsi la portata d'aria elaborata dal motore.

VI.II.VII Configurazione Communication

Questa schermata è già stata descritta nel paragrafo V.IX.

Capitolo VII

Problemi iniziali e modifiche apportate

Il seguente progetto di tesi si sviluppa sui lavori effettuati dai precedenti tesisti, i quali hanno di volta in volta aggiunto o migliorato l'operato del loro predecessore. Si è trovata l'ultima edizione del programma realizzata con la versione LabView 2018 a 64 bit. Si è quindi provveduto ad aggiornarla ad una versione più recente, in particolare si è scelto di passare a LabView 2021 SP1 f6 a 32 bit per allinearsi ad altri progetti utilizzati in azienda. Alcune funzioni di Python hanno però obbligato la scelta alla versione a 64 bit, creando conflitti con le librerie, le quali, per LabView 2021, erano presenti solo in formato 32 bit. Si è dovuto quindi ricompilare le librerie e ciò ha creato alcuni momentanei problemi, come la perdita dei riferimenti all'interno del progetto *Walkan2*, ossia il progetto in cui sono racchiuse tutte le librerie contenenti tutte le funzioni necessarie al corretto funzionamento delle applicazioni LabView.

VII.I Comunicazione configurazione-database

Una volta effettuata la conversione, il programma segnalava errori nel codice e molti collegamenti risultavano spezzati, come ad esempio ciò che è avvenuto nel SubVI denominato *DB_Update_CONFIG_t_confs_current_communication(SubVI).vi*. Questo SubVI ha la funzione di prendere le informazioni inserite dall'utente attraverso il *communication module* ed inserirle nel database per costruire le varie versioni delle funzioni necessarie ai calcoli. In particolare, nella versione LabView 2018 a 64 bit, il programma spaccettava il cluster (formato con i dati inseriti dall'operatore) in ogni singola voce, per poi andare ad inserire queste nelle apposite sezioni del database.

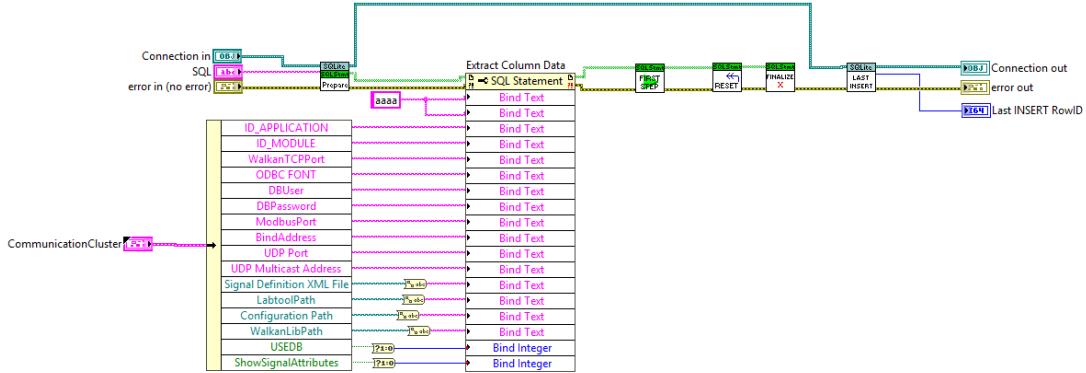


Figura VII.I: Block diagram relativo a DB_Update_CONFIG_t_confs_current_comunication(SubVI).vi 2018 a 64 bit

VII.I.I IP2Octet.vi

Nella versione aggiornata, si è dovuto modificare il *block diagram* in quanto con le nuove librerie è cambiata anche la modalità con cui si richiede all’utente di inserire i dati. Nella versione 2018, molte voci erano già in formato di stringa e quindi si presentavano nello stesso formato richiesto dal database. Ora invece, i dati vengono salvati prevalentemente in formato numerico, quindi è stato necessario convertirli in stringhe prima di inserirli nel database attraverso un piccolo programma di conversione chiamato *IP2Octet*.

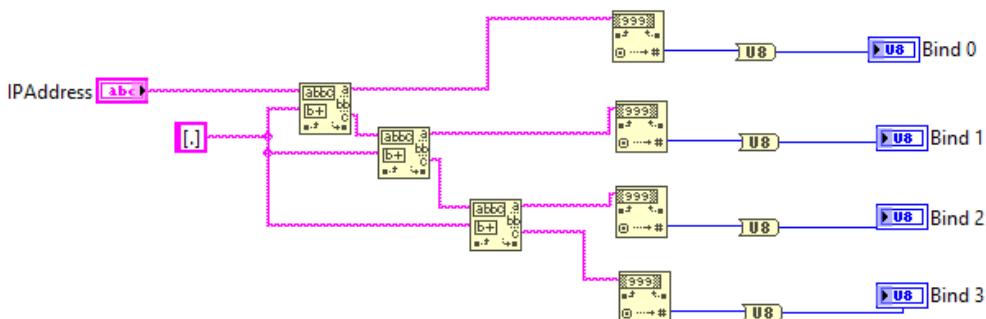


Figura VII.II: VI di conversione di dati in formato stringa in formato numerico

Tale VI prende l’indirizzo IP inserito dall’utente come stringa e lo separa ogni volta che incontra il simbolo ":". In particolare si avranno tre blocchetti di separazione e, a valle di essi, quattro blocchetti di conversione in dati numerici. Si ottengono quindi in uscita quattro numeri chiamati "Bind Address" numerati progressivamente da 0 a 3.

Si riporta in figura VII.III il subVI

DB_Update_CONFIG_t_confs_current_comunication(SubVI).vi aggiornato:

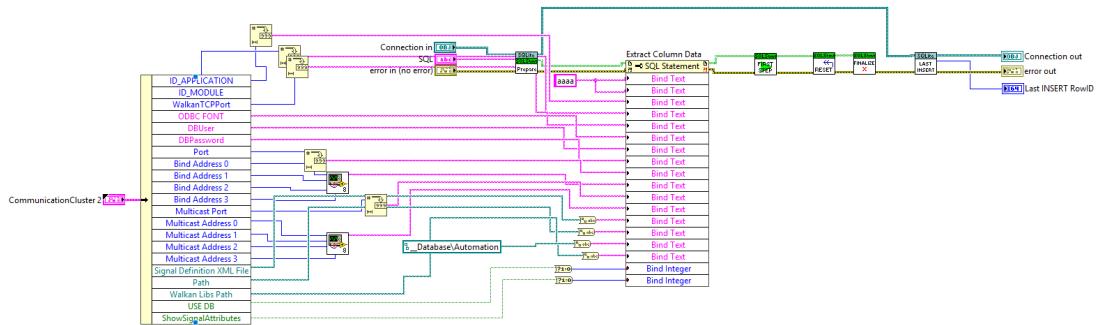


Figura VII.III: Block diagram relativo a DB_Update_CONFIG_t_confs_current_communication(SubVI).vi 2021 a 32 bit. Come si può notare, accanto alcune voci vi sono alcune funzioni di conversione che ricevono un numero in ingresso (cavo blu) e restituiscono in uscita una stringa (cavo fucsia)

Tutte le voci indicate con "Blind Text" in entrambi i part program mostrati, corrispondono alle varie righe della pagina *t_conf_communication* del database. Nei codici si hanno 18 voci una sotto l'altra, di cui le prime 16 sono stringhe mentre le ultime due sono numeri booleani, cioè 0 o 1. Il database presenta una riga in più che viene inserita per prima ed indica il codice identificativo della configurazione salvata. Questo è espresso come un numero intero e viene assegnato in automatico dal programma.

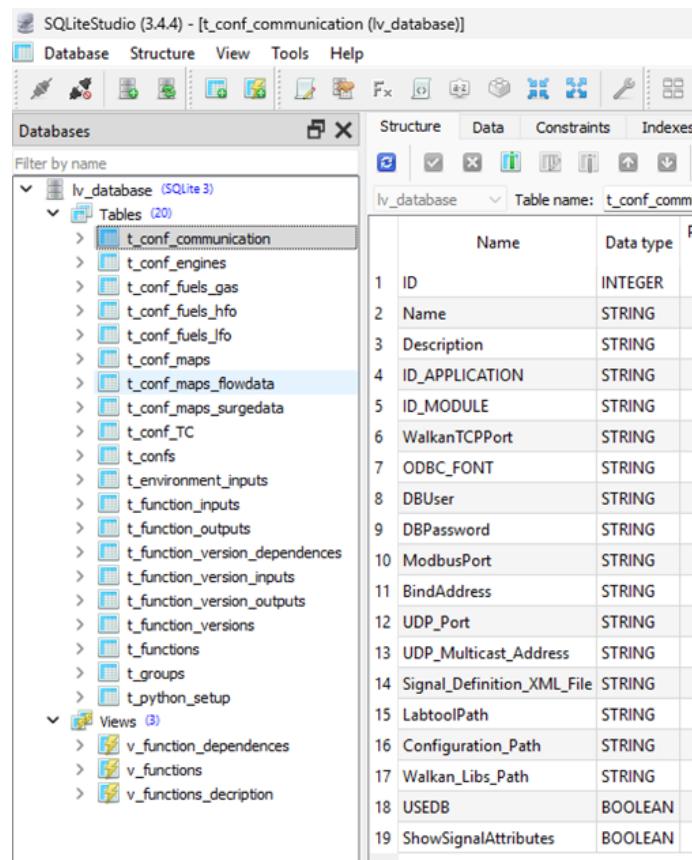


Figura VII.IV: Struttura del database alla quale fanno riferimento i block diagram mostrati poc'anzi

VII.II Comunicazione database-programma

In questo caso si è riscontrato il problema contrario rispetto a quanto visto nella sezione precedente, in quanto si è dovuta ricostruire la comunicazione del database verso il programma. Il SubVI relativo a questa funzione del programma è chiamato *DB_Select_CONFIG_t_configs_current_communication(SubVI).vi*, prende i dati dal database e li unisce in un unico cluster contenente tutte le informazioni scambiate.

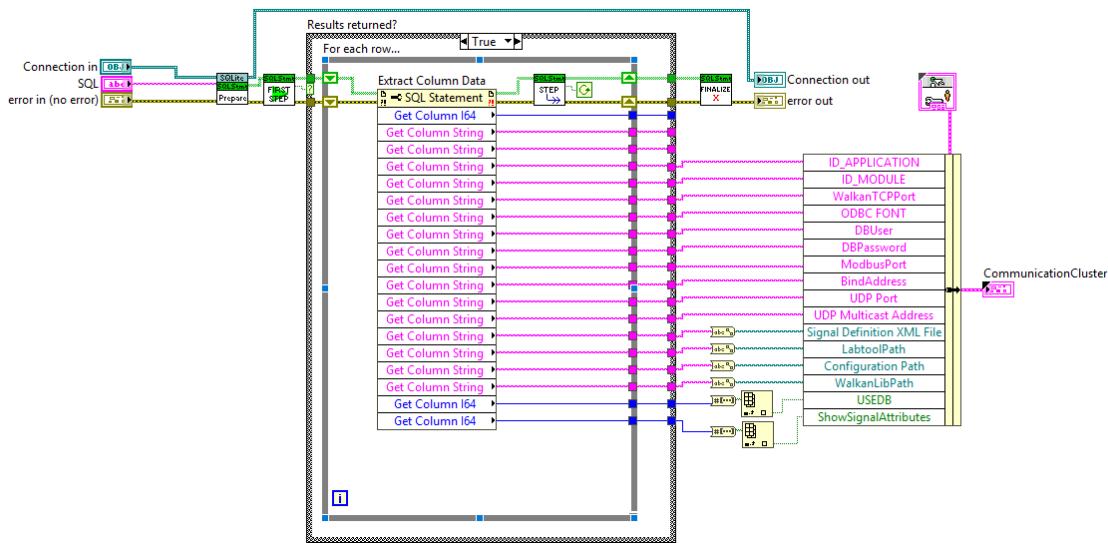


Figura VII.V: Block diagram relativo alla versione 2018

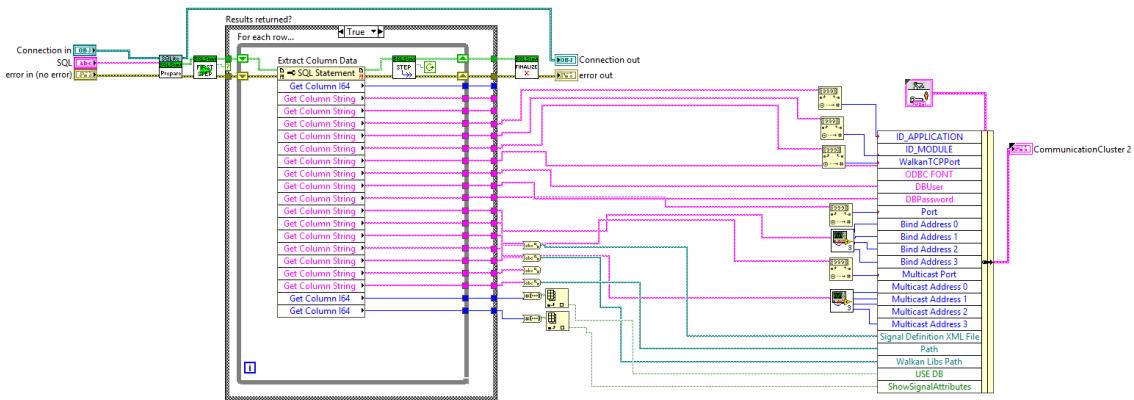


Figura VII.VI: Block diagram relativo alla versione 2021. Anche in questo caso si possono notare varie funzioni di conversioni da stringa a valore numerico

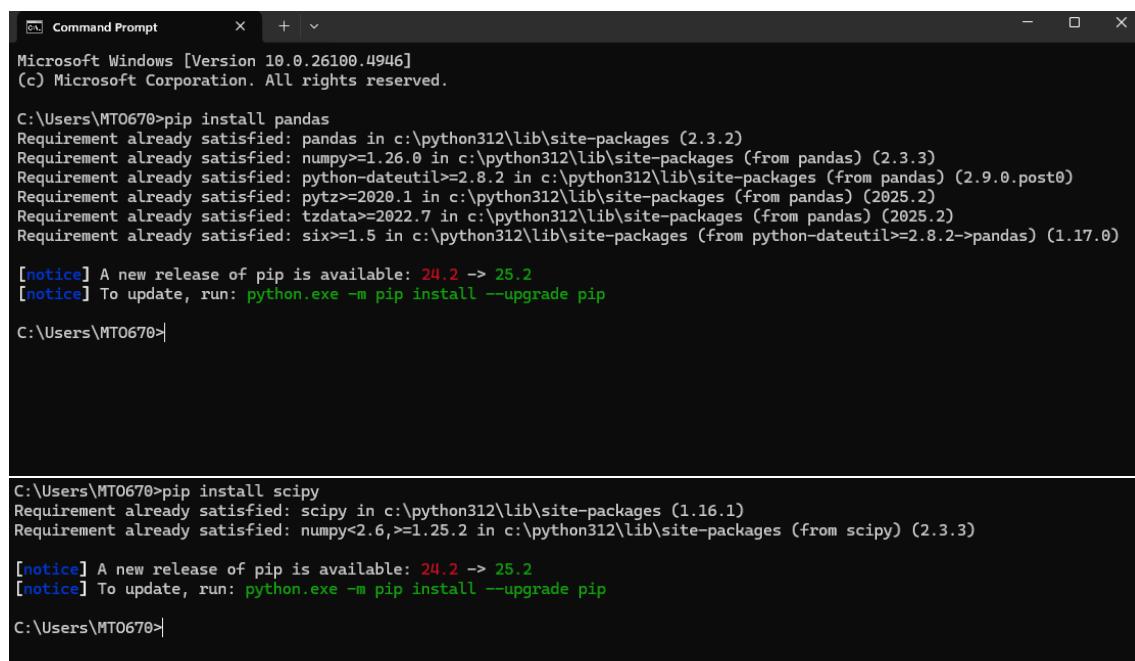
VII.III Configurazione Python

L'ultima versione del programma WPC utilizzava Python 3.9, si è deciso quindi di aggiornarlo alla versione 3.12.7. Per poter funzionare correttamente, Python

deve essere coerente con il programma LabView in cui deve essere implementato, ma per l'applicazione in esame è necessario installare alcuni pacchetti aggiuntivi come *Pandas* e *Scipy*, i quali sono disponibili solo nella versione a 64 bit. Ciò ha obbligato il passaggio a LabView 2021 a 64 bit, comportando una seconda modifica alle librerie, le quali erano a 32 bit.

VII.III.I Installazione Python

Una volta installato sul PC l'eseguibile di Python, si è aperto il *command prompt* e si è scritto il comando di installazione *pip install pandas*. Si è ripetuta la stessa operazione anche per il pacchetto *Scipy*.



```
Command Prompt
Microsoft Windows [Version 10.0.26100.4946]
(c) Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\MT0670>pip install pandas
Requirement already satisfied: pandas in c:\python312\lib\site-packages (2.3.2)
Requirement already satisfied: numpy>=1.26.0 in c:\python312\lib\site-packages (from pandas) (2.3.3)
Requirement already satisfied: python-dateutil>=2.8.2 in c:\python312\lib\site-packages (from pandas) (2.9.0.post0)
Requirement already satisfied: pytz>=2020.1 in c:\python312\lib\site-packages (from pandas) (2025.2)
Requirement already satisfied: tzdata>=2022.7 in c:\python312\lib\site-packages (from pandas) (2025.2)
Requirement already satisfied: six>=1.5 in c:\python312\lib\site-packages (from python-dateutil>=2.8.2->pandas) (1.17.0)

[notice] A new release of pip is available: 24.2 -> 25.2
[notice] To update, run: python.exe -m pip install --upgrade pip
C:\Users\MT0670>

C:\Users\MT0670>pip install scipy
Requirement already satisfied: scipy in c:\python312\lib\site-packages (1.16.1)
Requirement already satisfied: numpy<2.6,>=1.25.2 in c:\python312\lib\site-packages (from scipy) (2.3.3)

[notice] A new release of pip is available: 24.2 -> 25.2
[notice] To update, run: python.exe -m pip install --upgrade pip
C:\Users\MT0670>
```

Figura VII.VII: Command prompt di installazione pacchetto Pandas e pacchetto Scipy

L'ultimo accorgimento necessario riguarda la posizione della cartella "smop", la quale deve essere posizionata all'interno della stessa cartella in cui si trova anche il file "All.py" utilizzato dentro WPC.

	Name	Date modified	Type	Size
⚡	__pycache__	11.9.2025 17:52	File folder	
⚡	smop	11.9.2025 13:03	File folder	
⚡	ALL.py	11.9.2025 18:06	Python File	246 KB
⚡	ALL.py.last	11.9.2025 15:39	LAST File	217 KB
⚡	ALL.py.ultimo	11.9.2025 15:39	ULTIMO File	233 KB
⚡	fs.py	11.9.2025 18:06	Python File	1 097 KB
⚡	fs.py.last	11.9.2025 15:39	LAST File	1 095 KB
⚡	fs.py.ultimo	11.9.2025 15:39	ULTIMO File	1 095 KB

Figura VII.VIII: Percorso cartelle dove posizionare la cartella SMOP

VII.IV Problemi di salvataggio

L'ultima versione del database era stata compilata con anche le unità di misura nelle colonne relative al nome o alla descrizione della formula o del risultato di essa. Questo comportava alcuni problemi qualora ci fossero caratteri speciali come ad esempio "%", il quale viene riconosciuto come simbolo di programmazione e non come semplice carattere di scrittura. La presenza del simbolo "%" provocava quindi il mancato salvataggio e la mancata creazione del logger dei segnali di uscita filtrati dopo il *parsing*. Si è risolto il problema modificando tutti i nomi degli output, sostituendo il carattere "%" con la sigla "pcc". In particolare , si è dovuto agire all'interno della tabella *t_function_versions*, sulla colonna "description", in quanto il programma richiama questa pagina del database all'avvio per creare il cluster con tutti gli output.

		description	calculat
16	2417	1 ECR_EC4T_[]	1
17	2418	1 ECR_EC2T_[]	1
18	2419	1 BSFC_fueloil_[g/kWh]	1
19	2419	2 BSFC_gas_[g/kWh]	1
20	2420	1 BSFC_pilot_[g/kWh]	1
21	2421	1 Fueloil_mixcont_C_[pcc]	0
22	2421	2 Gas_mixcont_C_[pcc]	0
23	2422	1 Fueloil_mixcont_H_[pcc]	0
24	2422	2 Gas_mixcont_H_[pcc]	0
25	2423	1 Fueloil_mixcont_N_[pcc]	0
26	2423	2 Gas_mixcont_N_[pcc]	0
27	2424	1 Fueloil_mixcont_O_[pcc]	0
28	2424	2 Gas_mixcont_O_[pcc]	0
29	2425	1 Fueloil_mixcont_S_[pcc]	0
30	2425	2 Gas_mixcont_S_[pcc]	0
31	2426	1 Specific_humidity_[gH20/kgairdry]	0
32	2427	1 LDraw_fueloil_in	0

Figura VII.IX: Caselle modificate nella colonna con il nome

Per evitare che il problema si possa ripresentare in futuro, si è modificato un VI già presente all'interno delle librerie Walkan, che aveva appunto lo scopo di eliminare eventuali caratteri speciali dai nomi dei segnali. Tale VI si chiama *CleanString.vi* ed è contenuto all'interno della libreria "WalkanLabtoolLabviewMergeLibrary.lvlibp".

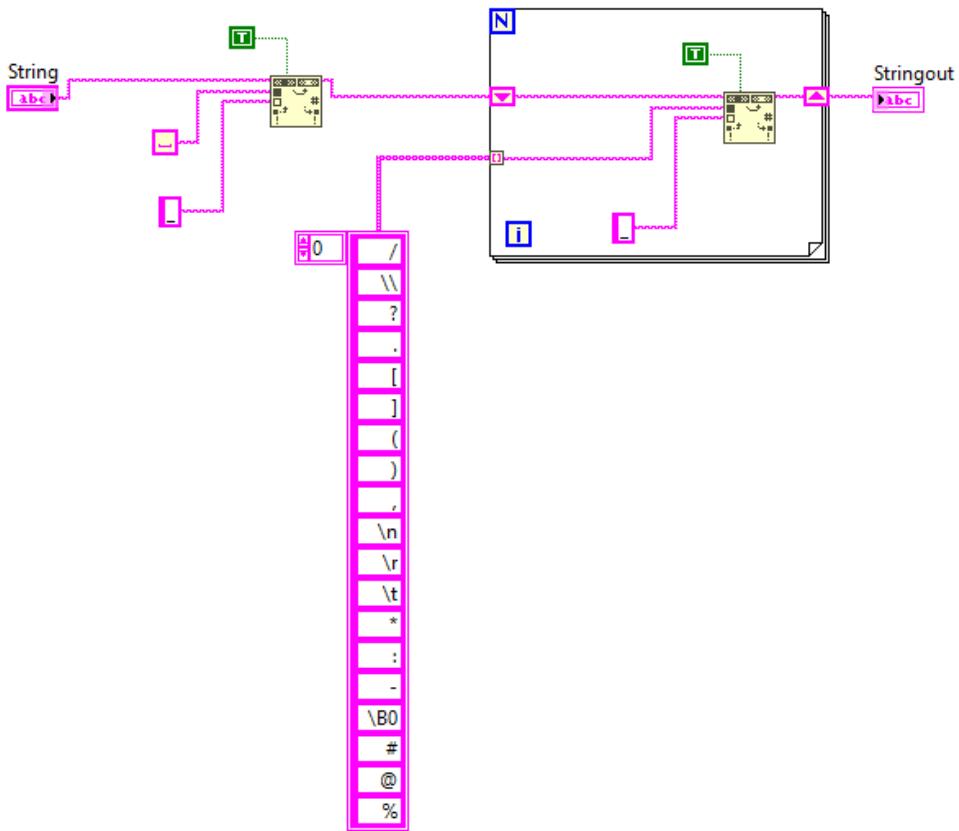


Figura VII.X: VI delle librerie che filtra i caratteri speciali

Il programma prende la stringa, cerca il carattere speciale al suo interno e lo sostituisce con " _ ", il quale non reca alcun disturbo alla creazione del logger.

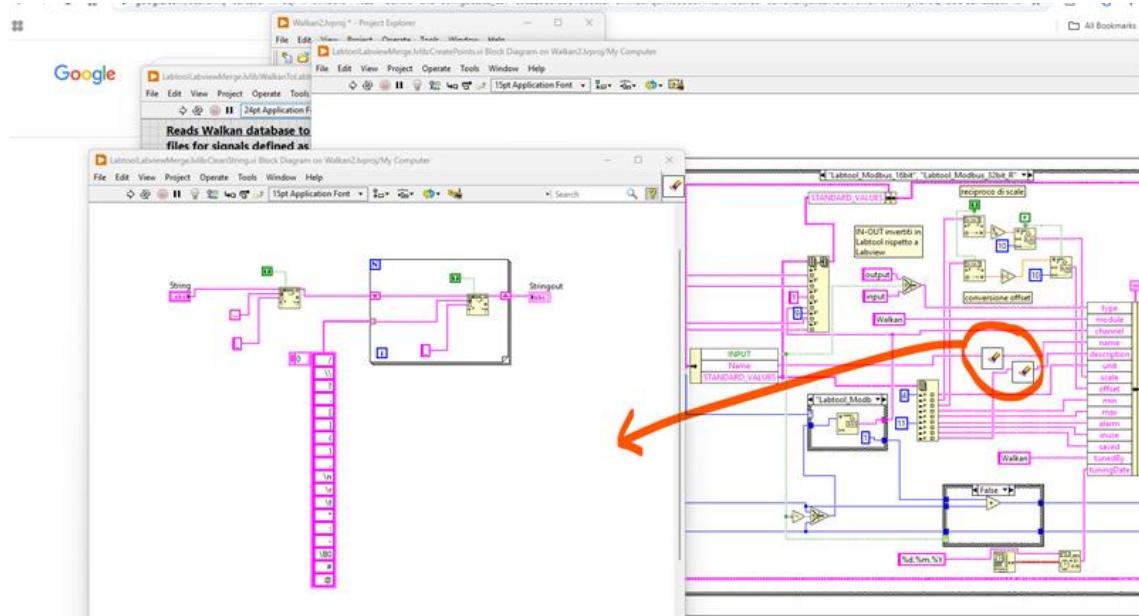


Figura VII.XI: Posizione del subVI all'interno delle librerie

VII.V Problemi di lettura DataGrid

DataGrid è un pacchetto aggiuntivo di LabView necessario al funzionamento delle librerie. Tale pacchetto in realtà era già installato correttamente sul PC, ma il software non riusciva a leggerlo, creando problemi all'interno delle librerie e rendendole non eseguibili.

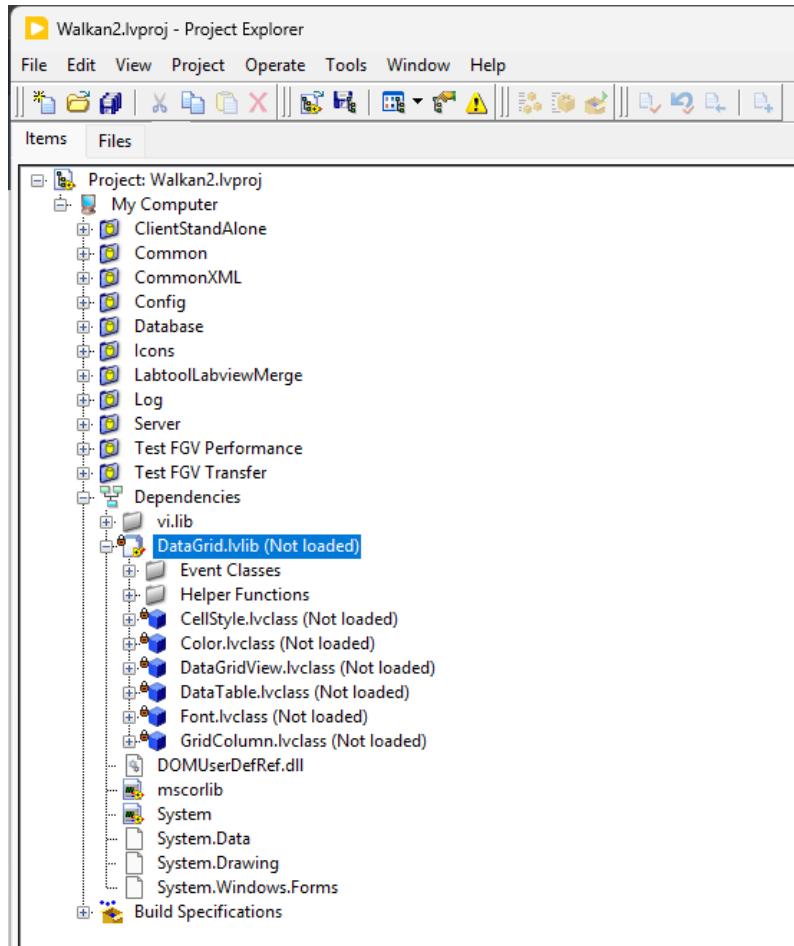


Figura VII.XII: Schermata di avvio del software LabView Walkan2 in cui è mostrato il problema riscontrato con il pacchetto aggiuntivo DataGrid

In figura VII.XII, è mostrata la situazione in cui si trovava il progetto Walkan2, ossia il progetto LabView contenente le librerie. Questo è un software esterno al WPC, ma necessario al suo funzionamento poiché contiene tutti i moduli di comunicazione tra LabView e i vari dispositivi dell'impianto. Si è dovuto caricare manualmente DataGrid, cliccando con il tasto destro sulla voce evidenziata, e cliccare poi su "Load" del menu apertosi. Si è ripetuta la stessa operazione anche per le voci successive caratterizzate dall'icona blu a forma di cubo. Il processo è andato a buon fine, in quanto ogni icona ora compare senza lucchetto ed è scomparsa la scritta "(Not loaded)" accanto ad ogni voce.

Il passo successivo è stato quello di aprire il *LabtoolLabviewParser.vi*, ossia quel software responsabile della gestione dei segnali di ingresso ad ogni applicazione e che

permette anche il "parsing", cioè l'associazione delle grandezze definite come input nell'applicazione con i segnali letti via UDP o via Modbus tramite Labtool.

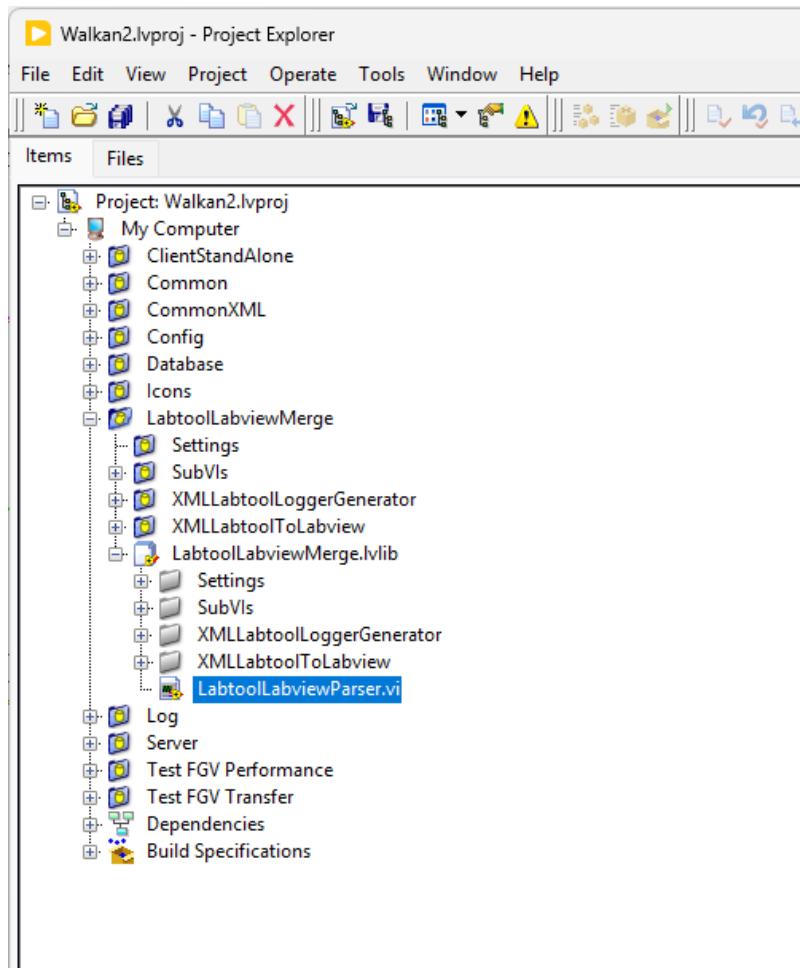


Figura VII.XIII: Percorso file all'interno del progetto Walkan2 per trovare LabtoolLabviewParser.vi

All'interno del *Block Panel* del LabtoolLabviewParser.vi sono presenti alcuni eventi, i quali, durante la ricompilazione a 64 bit, hanno provocato alcuni errori. Per risolvere la situazione, è stato sufficiente cancellare i vecchi eventi e inserirne di nuovi nelle stesse posizioni e con gli stessi collegamenti alle varie funzioni.

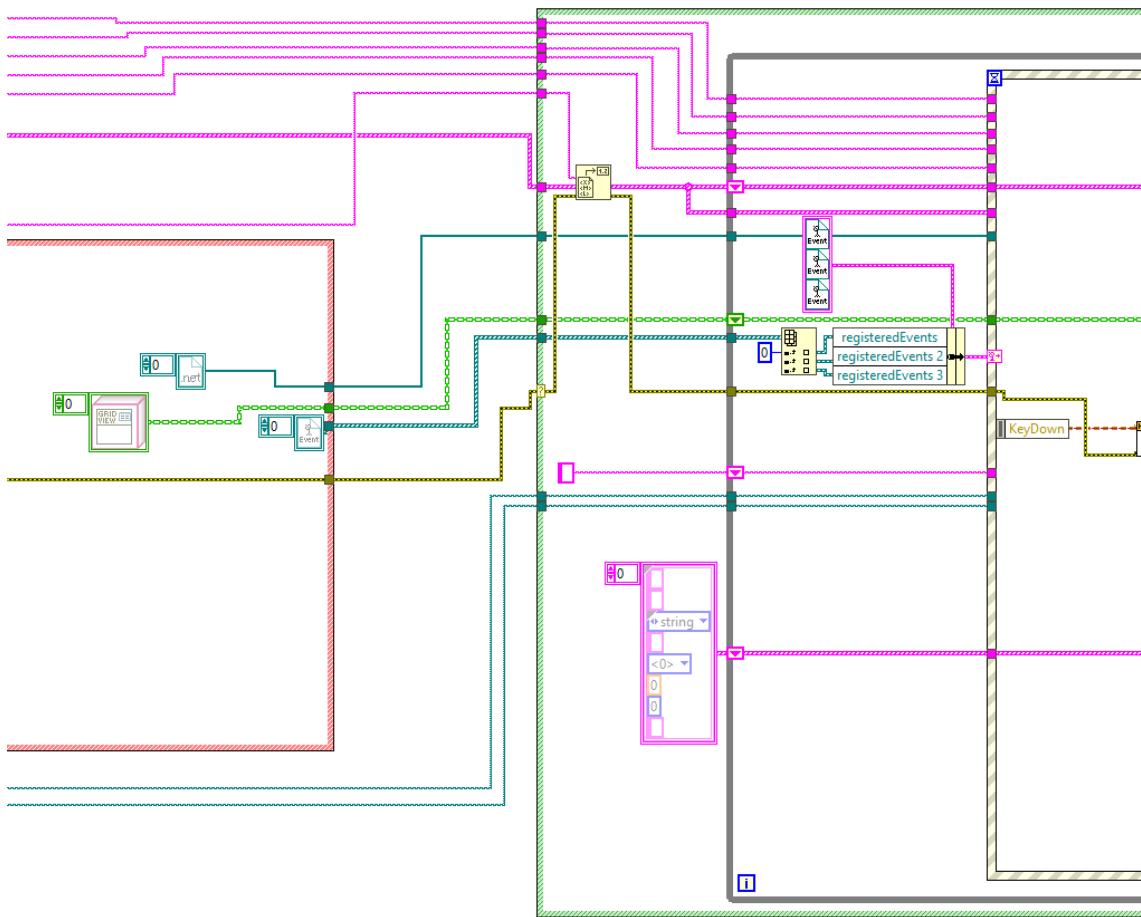


Figura VII.XIV: Block panel del LabtoolLabviewParser.vi in cui sono mostrati gli eventi che hanno dato problemi durante la compilazione a 64 bit delle librerie

Questo VI presentava anche dei collegamenti interrotti all'interno del case. Infatti, avendo sostituito gli eventi, i relativi collegamenti ai vari scenari del case erano andati persi. In particolare, si è dovuto ripristinare il riferimento negli scenari dal 10 al 17, cliccando con il tasto destro sulla barra in alto del case dove è mostrato il nome dello scenario.

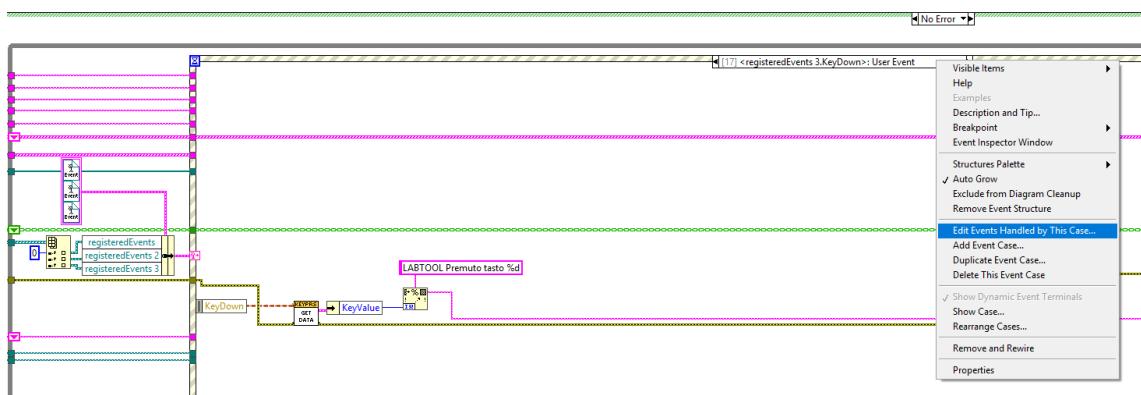


Figura VII.XV: Block Panel in cui è mostrato il case con i vari scenari da ripristinare

Si aprirà una nuova schermata in cui si deve abbinare lo scenario del case selezionato con il giusto evento. In figuraVII.XVI si può notare che nel riquadro centrale c'è un elenco con delle voci che si ripetono. Ogni ripetizione indica un evento diverso (Events, Events 2, Events 3).

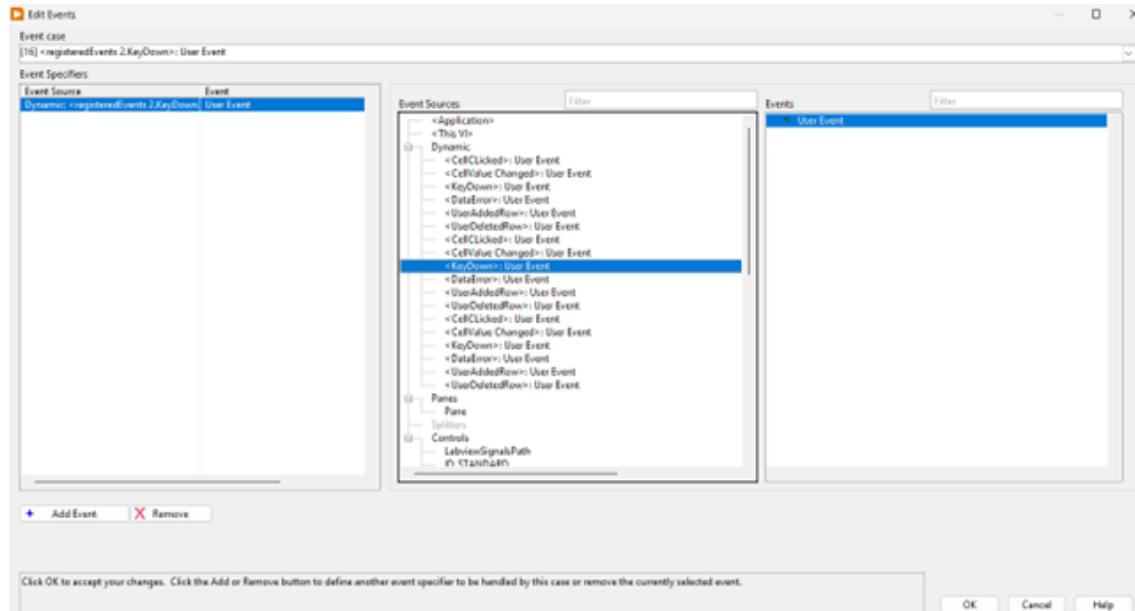


Figura VII.XVI: Schermata

Una volta completata l'associazione di ogni scenario, si deve ottenere una situazione analoga a quanto mostrato in figura VII.XVII

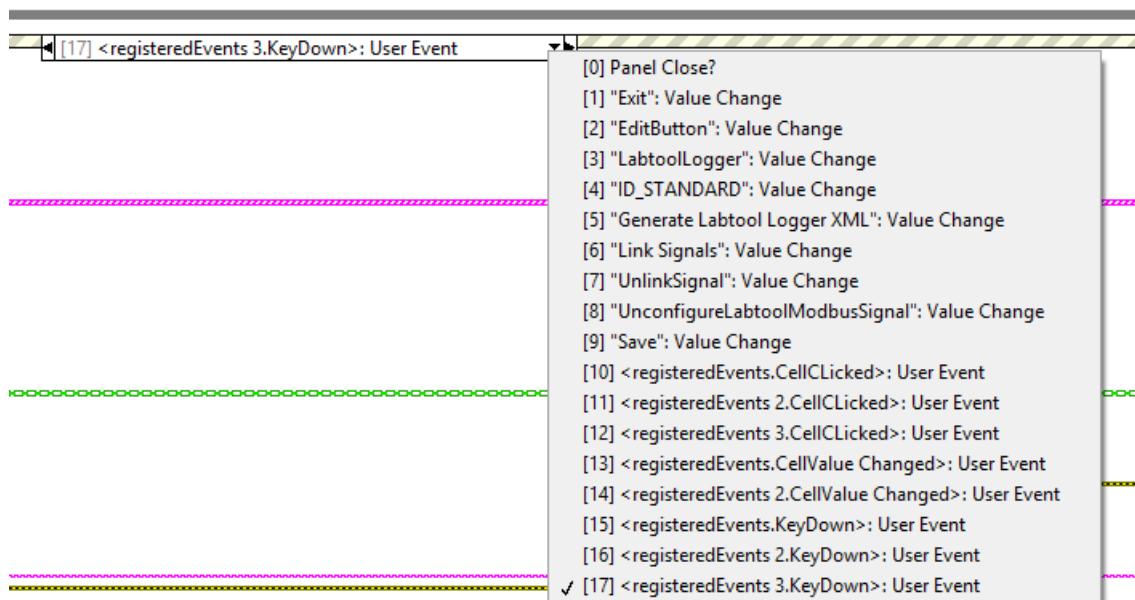


Figura VII.XVII: Configurazione corretta degli scenari del case presente all'interno del LabtoolLabviewParser.vi

VII.VI Problemi di lettura UDP

Un ulteriore problema riscontrato durante la fase di preparazione del software è stata la mancata possibilità di leggere i dati via UDP. Il programma, nella versione a 64 bit, non riusciva a mettersi in contatto con la rete UDP che trasportava tutti i dati relativi al motore, mentre la versione a 32 bit non mostrava alcun problema di comunicazione. Si è risolto modificando i firewall di Windows, i quali bloccavano la nuova rete OT configurata appositamente per leggere i dati provenienti dal banco prova. I firewall di Windows sono delle funzionalità di sicurezza che proteggono il PC quando è collegato alla rete internet. La procedura è spiegata nel capitolo VIII.II.

VII.VII Formule in Python

Come anticipato nei capitoli precedenti, il software WPC è un calcolatore che si basa su 161 formule scritte in linguaggio Python. Tali formule sono state definite ed introdotte dagli scorsi tesisti, ma è stato necessario effettuare un Beta Test, tramite PyCharm, per controllare che dessero risultati coerenti con i dati letti sull'impianto motore.

Per prima cosa si è dovuto estrarre il vettore X dal programma durante l'esecuzione, in modo tale da poter effettuare la prova con valori plausibili del vettore X invece di utilizzare vettori generati casualmente. Il vettore X estratto dal programma viene salvato all'interno della cartella "Functions" del progetto LabView.

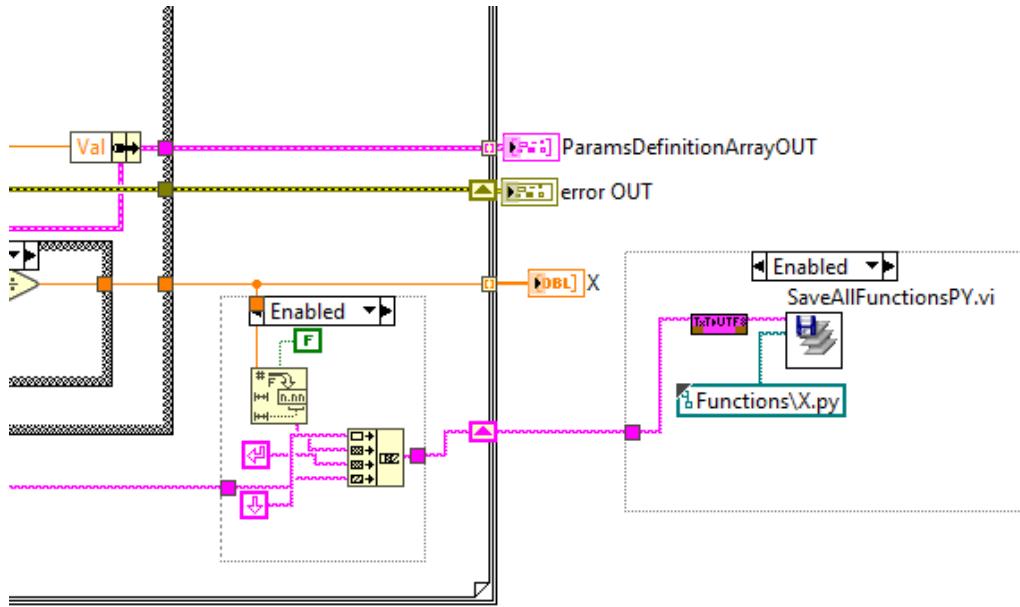


Figura VII.XVIII: Porzione del SubVI **UpdateParamsValue.vi** in cui si mostra la parte di codice aggiunta per stampare un file .py contenente il vettore X

Una volta estratto, il vettore X deve essere manipolato per poter essere letto da PyCharm. In particolare, si è dovuto aggiungere alla prima riga "X=[" e "]" alla fine dell'ultima riga contenente un valore. Ogni riga necessita anche di un separatore, quindi si è sostituito il comando "\r\n" di ritorno ad inizio riga e andare a capo, con ",\r\n", cioè lo stesso comando ma preceduto dalla virgola.

Il vettore X viene richiamato dalla funzione *main.py* assieme al file **ALL.py**, contenente tutte le formule del software WPC, e la matrice *fsall*. Il file *main.py* appena citato, è una funzione creata ad hoc per fare queste prove e che simula il comportamento della funzione *main* realmente usata nel programma WPC. Come si evince dalla figura VII.XIX, la funzione creata richiama i file strettamente necessari e calcola solo le funzioni di indici riportati nel vettore *mycalc*. In particolare, è riportato l'esempio che gli indici 0, 1, 2 e 3, i quali corrispondono alle prime quattro funzioni contenute in *ALL.py*.

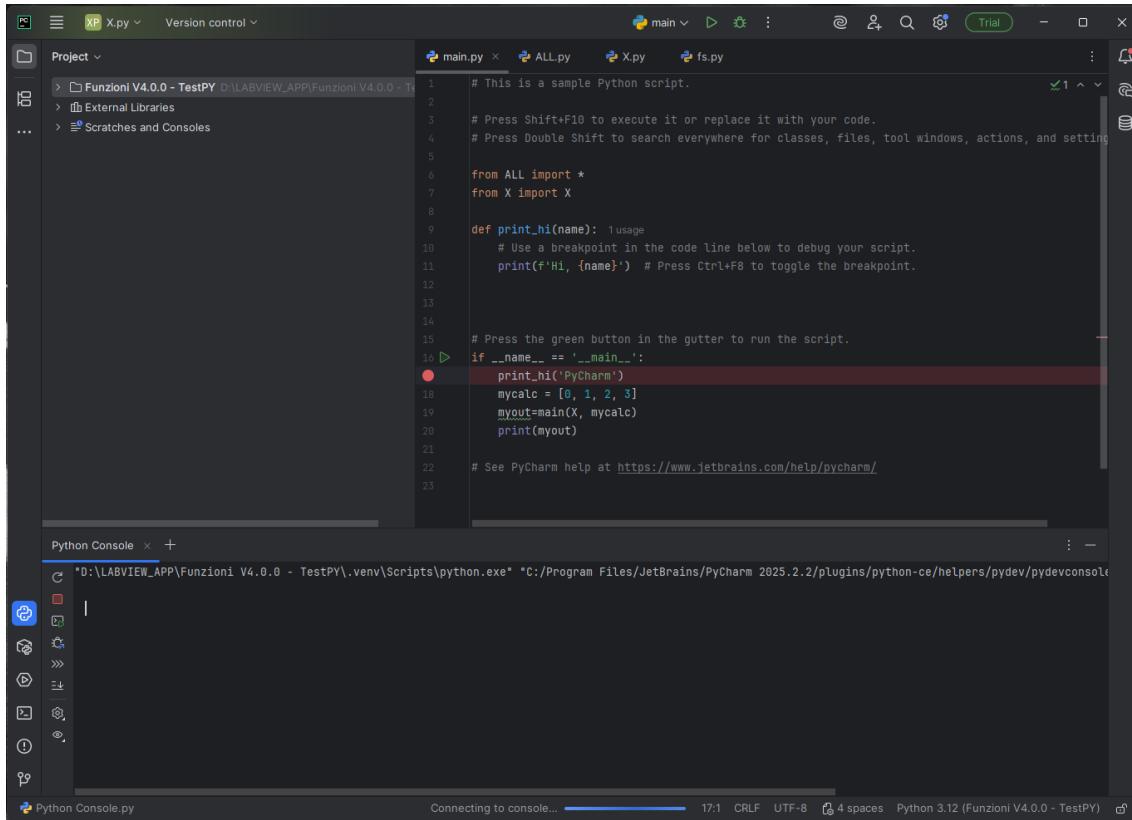


Figura VII.XIX: Schermata di Pycharm con aperti i file *main.py*, *ALL.py*, *X.py* e *fs.py*

Si è quindi configurato il programma come indicato nel capitolo VIII.III e si è lanciato il file *main* mostrato in figura VII.XIX. Si è notato inizialmente che i risultati ottenuti non erano in linea con le aspettative; alcuni addirittura erano palesemente errati, come ad esempio rendimenti molto superiori all’unità o portate nulle di aria durante il funzionamento del motore. Controllando i dati di input, si è scoperto che il vettore *X* estratto da WPC, era un vettore di 200 elementi invece di 118, come invece dovrebbe essere per definizione. Questa discrepanza era dovuta al fatto che *X* venisse creato tramite un ciclo *For* iterato sul numero di elementi del cluster di ingresso riportato nella schermata principale del programma LabView WPC (figura V.XII), il quale ha appunto 200 elementi. Le posizioni in eccesso (da 119 a 200) erano state quindi riempite di tutti zeri, ma essendo le ultime, non rappresentavano un problema per i calcoli, poiché in teoria non utilizzate.

Si è riscontrata anche una differenza tra gli indici degli elementi di *X* e la matrice *fsall*; in particolare, si è aggiunto manualmente uno zero in posizione 1 al vettore *X* poiché altrimenti nei calcoli sarebbero stati presi i valori sbagliati del vettore.

```

1  X =[
2  0,
3  29.756516,
4  29.900715,
5  -222222.000000,
6  -222222.000000,
7  31.751881,
8  43.122593,
9  83.923828,
10 76.421570,
11 -222222.000000,
12 75.811737,
13 1013.824829,
14 1013.824829,
15 -222222.000000,
16 -222222.000000,
17 0.001776,

```

Figura VII.XX: Porzione del vettore X con in evidenza lo zero iniziale inserito manualmente

Risolti i problemi legati agli indici, si è potuto procedere con il Beta Test delle funzioni su PyCharm. Come descritto nei capitoli precedenti, il software seleziona le variabili e le formule da utilizzare in base alle scelte fatte in fase di configurazione; di conseguenza, alcuni dati di input non sono utilizzabili e vengono contraddistinti da un codice di errore definito durante gli scorsi lavori di tesi. In questo modo l'operatore è in grado di capire subito la natura di eventuali errori o risultati particolari. Gli errori codificati sono 5:

- I. **65535**: risultato della funzione indeterminabile, ad esempio una divisione per zero [1]
- II. **-2222222**: variabile inutilizzata a causa dell'assenza di un sensore [1]
- III. **-900009**: errore sul nodo Python dovuto ad errori di sintassi, errata dichiarazione di variabili o errori negli script .py [1]
- IV. **NaN**: formula da non calcolare e scartata dalla matrice di ammissibilità [1]
- V. **-111111**: formula da calcolare ma scartata dalla matrice delle scelte [1]

Le formule introdotte dagli scorsi tesisti risultano completamente cieche ai codici di errori, quindi eseguono sempre i calcoli indipendentemente dai valori dei dati di ingresso. Per risolvere tale criticità, che era la principale responsabile di risultati poco plausibili, si è dovuto aggiungere una condizione di calcolo ad ogni funzione.

```

  main.py      ALL.py  X.py  fs.py
28 def fun(fs_i=0,idfunction=None):  161 usages
29     return column
30
31
32 def F1(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):  4 usages
33
34     #Aria motore con nozzle
35
36     column=fun(fs_i_, idfunction: 1)
37
38     if (column == -1):
39
40         return column
41
42     tcompressorin=X[fsall[fs_i][2][column]]  #[°C]
43
44     p0=dot(X[fsall[fs_i][3][column]], b: 100)  #[mbar -> Pa]
45
46     k=X[fsall[fs_i][4][column]]  #[m^2]
47
48     deltapnozzle=dot(X[fsall[fs_i][5][column]], b: 100)  #[mbar -> Pa]
49
50
51     R=287.04  #[J/kgK]
52
53     rho=(p0 / (dot(R,(tcompressorin + 273.15))))  #[kg/m^3]
54
55     if tcompressorin== -2222222 or deltapnozzle== -222222200 or p0== -222222200 or k== -2222222:
56         mnozzle=-3333333
57     else:
58         mnozzle=dot(k,(dot(rho,abs(deltapnozzle))) ** 0.5)  #[kg/s]
59
60     # la condizione dell'IF serve per bypassare la funzione nel caso in cui almeno uno degli input sia una variabile inutilizzata
61     # #Prima la funzione veniva calcolata ugualmente, dando risultati sbagliati.
62
63     return mnozzle

```

Figura VII.XXI: Formula F1 in ambiente PyCharm con la nuova condizione di calcolabilità

In figura VII.XXI è mostrato l'esempio della formula F1 per il calcolo della portata d'aria tramite ugello, la quale restituirà come risultato il valore "-3333333" qualora uno degli input sia una variabile inutilizzata contraddistinta dal codice di errore descritto precedentemente. Si può notare che la condizione inserita non è uguale per ogni input, infatti P_0 e $deltapnozzle$ devono essere pari a "-222222200" per poter rappresentare l'errore. Questo è spiegabile dalla formula stessa, in quanto questi parametri vengono moltiplicati per 100 nella conversione delle unità di misura durante la definizione. Si è ripetuta questa condizione per ogni formula, prestando attenzione ad ogni caso e modificando i valori dove necessario. Per esempio, la formula F2 deve tenere conto della dipendenza dalla formula F1, e quindi un dato di input può assumere il valore "-333333".

```

87
88     def F2(X=None,fs_i=0,*args,**kwargs):
89
90         column=fun(fs_i, idfunction: 2)
91
92         if (column == -1):
93
94             return column
95
96         compressorleak1S=X[fsall[fs_i][2][column]]  #[%]
97
98         compressorleak2S=X[fsall[fs_i][3][column]]  #[%]
99
100        oneS_twoS=X[fsall[fs_i][4][column]]  #[I/O]
101
102        m=F1(X,fs_i)  #[kg/s]
103
104
105        #Di norma ho compressorleak = 0.985
106
107        if (oneS_twoS == 0):
108
109            compressorleak=compressorleak1S
110
111        else:
112
113            compressorleak=compressorleak2S
114
115        if compressorleak== -2222222 or m== -3333333:
116            maireng=-3333333
117        else:
118            maireng = dot(m, (1 - (compressorleak / 100)))  # [kg/s]
119
120
121        return maireng

```

Figura VII.XXII: Formula F2 in ambiente PyCharm con la nuova condizione di calcolabilità

Talvolta è possibile che alcune funzioni ricevano in ingresso una forma indeterminabile, e quindi si avranno codici d'errore che falsano il risultato. Si è quindi aggiunta anche la condizione che restituisce come risultato "66666" qualora almeno un input sia pari a 65535.

Una volta compiute tutte le modifiche, le nuove formule definite in PyCharm devono essere salvate sul database per poter essere utilizzate successivamente dal programma LabView WPC. Ciò è possibile aprendo il database e andando alla schermata *t_function* (figura V.II). Cliccare poi sulla casella "formula" di ogni riga e, dopo aver premuto il tasto destro, selezionare la voce "Edit Value in editor". Si aprirà una finestra con il codice python della funzione e sarà sufficiente sostituirlo con il nuovo codice corretto.

Un'ulteriore modifica che si è dovuta apportare alle formule è stata la sostituzione della funzione *dot* con il simbolo di moltiplicazione "*". Tale funzione esegue il prodotto matriciale degli elementi che ha come input, restituendo in uscita il risultato in formato matriciale. Tutte le formule inserite nel programma restituiscono solamen-

te scalari, quindi non si ha bisogno di tale comando. Inoltre, i risultati in formato matriciale possono creare problemi nelle dipendenze delle varie formule, generando codici di errore e bloccando i calcoli.

Le formule corrette sono state poi collaudate, controllando che non si verificassero nuove problematiche ad esse legate. Per farlo, si è semplicemente fatto girare il programma sul computer connesso alla rete UDP della cella motore. Molte funzioni causavano errori come quello riportato in figura VII.XXIII, cioè si riscontravano denominatori nulli o errori di sintassi che bloccavano il computo.

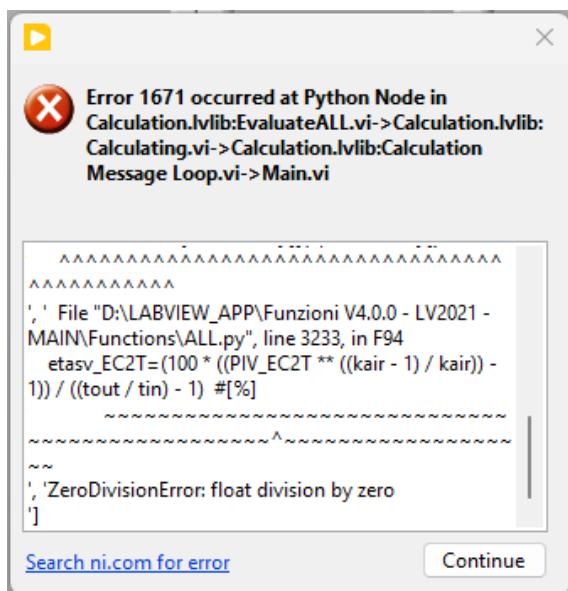


Figura VII.XXIII: Codice di errore sul nodo Python

Per ogni errore riscontrato, si è tornati su PyCharm per correggerli, si è copiata la formula modificata sul database e infine si è riavviato il software WPC per assicurarsi che ogni problema fosse risolto.

VII.VII.I Lista codici di errori

La nuova lista dei codici di errore che è possibile riscontrare durante il funzionamento è la seguente:

- I. **65535**: risultato della funzione indeterminabile, ad esempio una divisione per zero [1]
 - II. **-2222222**: variabile inutilizzata a causa dell'assenza di un sensore [1]
 - III. **-900009**: errore sul nodo Python dovuto ad errori di sintassi, errata dichiarazione di variabili o errori negli script .py [1]
 - IV. **NaN**: formula da non calcolare e scartata dalla matrice di ammissibilità [1]

V. **-111111**: formula da calcolare ma scartata dalla matrice delle scelte [1]

VI. **-333333**: formula che ha come input una o più variabili inutilizzate

VII. **66666**: Formula che riceve come input un codice d'errore di una funzione indeterminabile

VII.VIII Problemi di caricamento configurazione

Durante alcune prove effettuate, si è notato che all'avvio del software WPC venivano caricati alcune variabili relative al turbogruppo bistadio, nonostante fosse stato configurato un impianto con turbogruppo monostadio. Ciò causava codici di errore ed obbligava l'utente a riaprire la pagina di configurazione.

Il programma WPC, quando viene lanciato, va a leggere i file XML in cui sono riportate tutte le configurazioni effettuate in precedenza dall'utente; in alternativa, chiede di crearne di nuovi. Si è notato che invece di seguire questa procedura, il software caricava le scelte effettuate nell'ultimo salvataggio del progetto, creando quindi una sorta di valori di "default" all'avvio successivo.

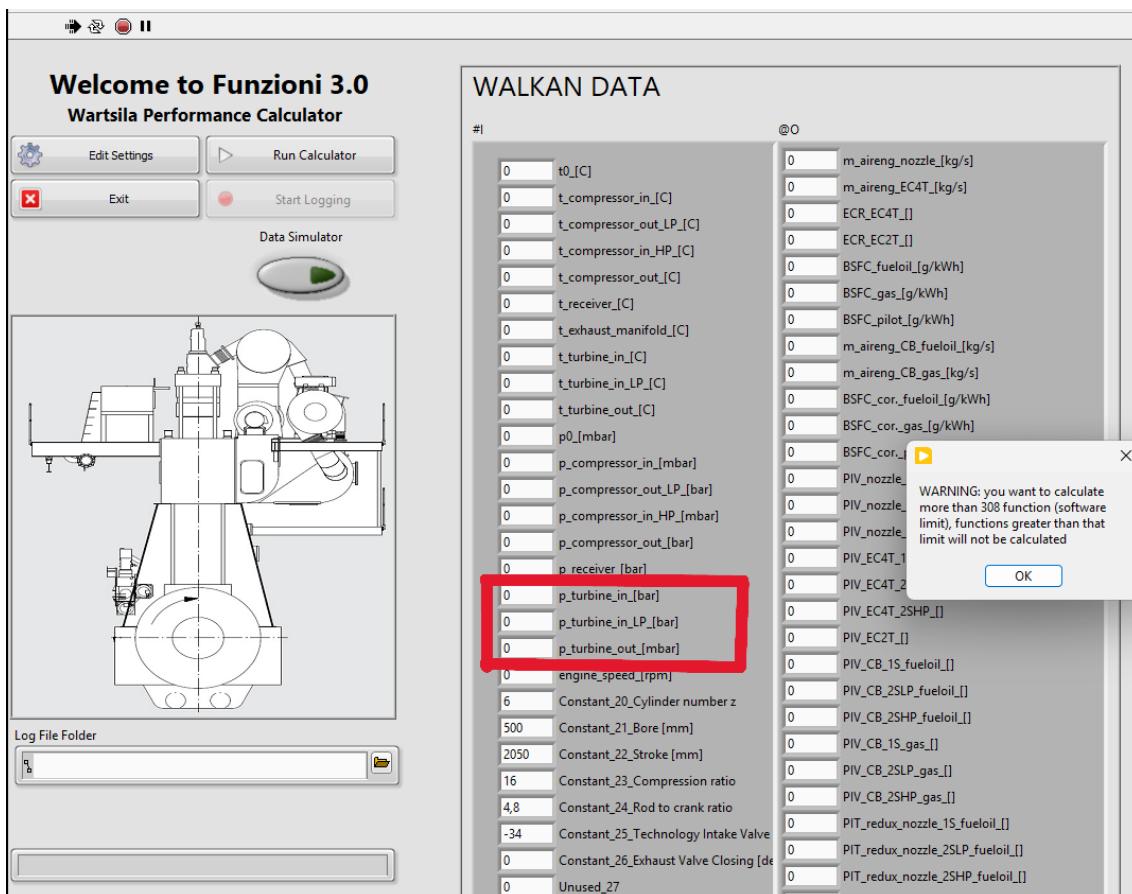


Figura VII.XXIV: Schermata iniziale del programma in cui sono evidenziate le voci relative al turbogruppo bistadio

In figura VII.XXIV è mostrata la schermata del software WPC al primo avvio dopo il lancio del programma. Sono evidenziate le caselle del cluster delle variabili di input che mostrano i dati relativi al bistadio che vengono letti dal salvataggio del progetto. Il caricamento dei dati si interrompeva con la comparsa di un messaggio di avvertimento, il quale ha lo scopo di avvertire l'utente che LabView può calcolare al massimo 308 funzioni. È un tipo di comunicazione che non comporta alcun problema o allarme per l'utente; il software continua a funzionare una volta chiuso il messaggio.

Chiudendo tale comunicazione, dopo pochi istanti, compariva un ulteriore messaggio, ma a differenza del precedente, questo era dovuto ad un errore.

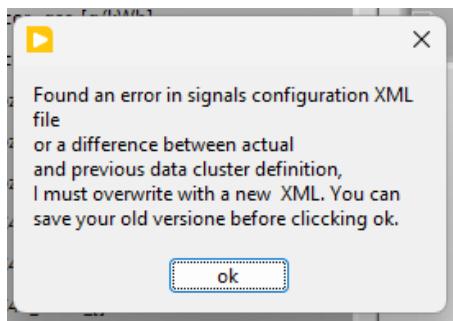


Figura VII.XXV: Messaggio di errore che indica una discrepanza tra le variabili di input presenti nel cluster e i dati di input presenti nei file XML di configurazione

Come si può vedere in figura VII.XXV, il messaggio di errore indica all'utente che il programma ha rilevato una discrepanza tra i dati contenuti nei file XML di configurazione e i dati presenti nel cluster. In particolare, nel momento in cui è stato catturato il messaggio, i file XML contenevano la configurazione di un motore con turbogruppo monostadio, mentre il software aveva caricato all'avvio le variabili relative ad un impianto bistadio. Tale discrepanza obbligava il programma LabView a sovrascrivere il file XML, inserendo anche le variabili relative al caso bistadio ed impostandole di default con standard Modbus a 32 bit per la lettura (standard imposto come default per i nuovi segnali).

Per risolvere tale problema, l'utente era costretto ad aprire il menu configurazione (tasto *Edit Settings* in figura VII.XXIV). Così facendo si obbligava il programma a ricaricare il file XML corretto e quindi ad eliminare le variabili relative all'impianto bistadio.

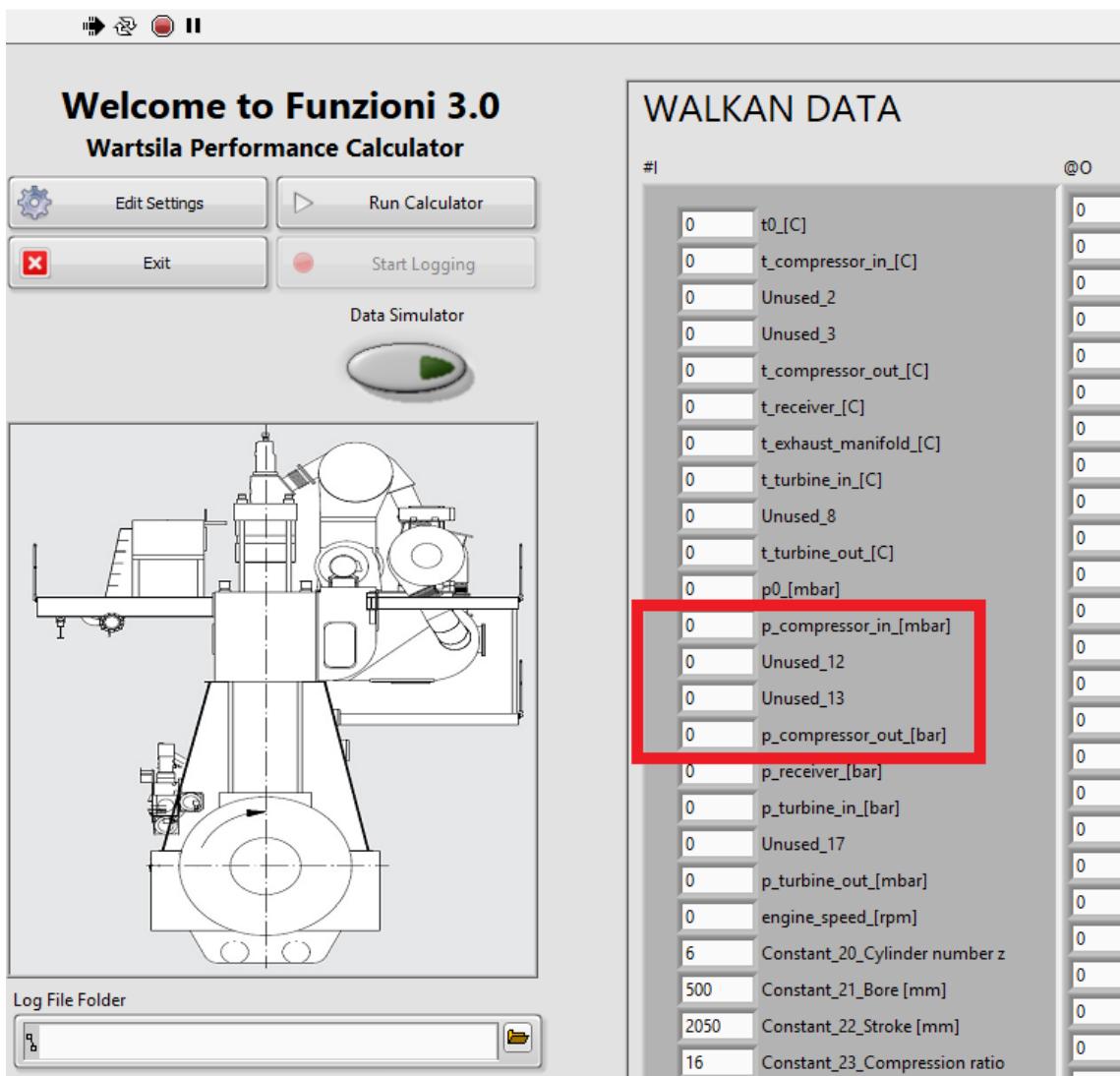


Figura VII.XXVI: Schermata principale del programma WPC in cui le caselle contenenti in figura VII.XXIV le variabili del bistadio, sono state commutate in variabili inutilizzate a seguito della riapertura del menu di configurazione

Per risolvere tale problema si è dovuto modificare l'*Environment.vi*, ossia il VI responsabile del caricamento della configurazione motore. In particolare, si è dovuto mettere in attesa il caricamento delle informazioni dai cluster di set-up affinché prima venissero letti tutti i cluster di configurazione salvati nel database.

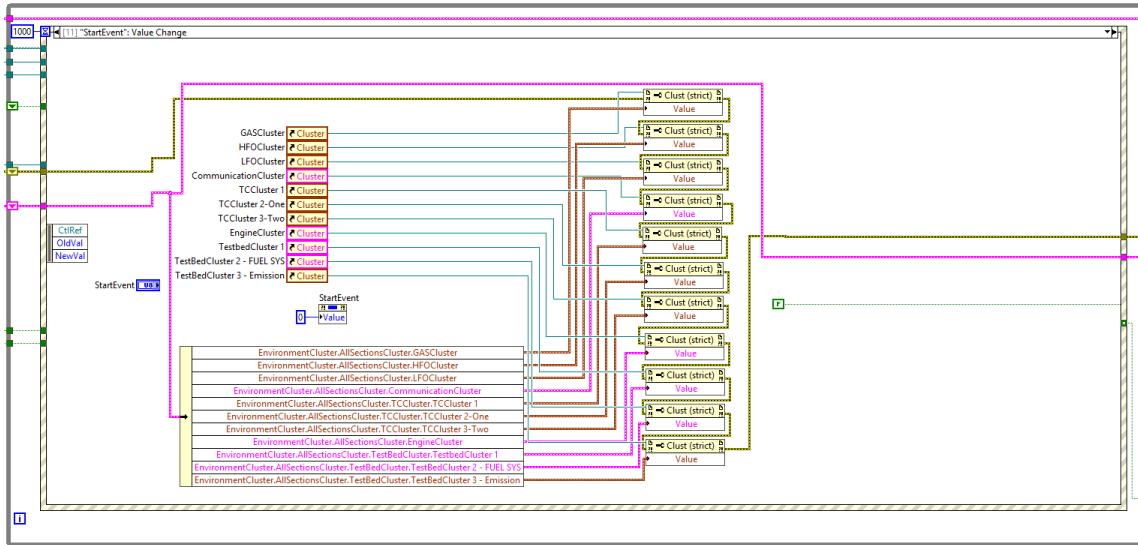


Figura VII.XXVII: Scenario 11 del caso all'interno dell'*Environment.vi* prima della modifica apportata

In figura VII.XXVII è mostrato come appariva il *case* dell'*Environment.vi* in origine. Quando il tasto "startEvent" commutava di valore, il programma andava a leggere i dati presenti nelle varie tabelle di configurazione del database (mostrati nei capitoli VI.II e V), aggiornando i cluster di ingresso e uscita di conseguenza. In contemporanea accadeva anche che venisse creato il cluster di ingresso di 200 elementi contenente tutti i dati salvati nelle pagine di configurazione che erano rimasti salvati dall'ultima chiusura del programma.

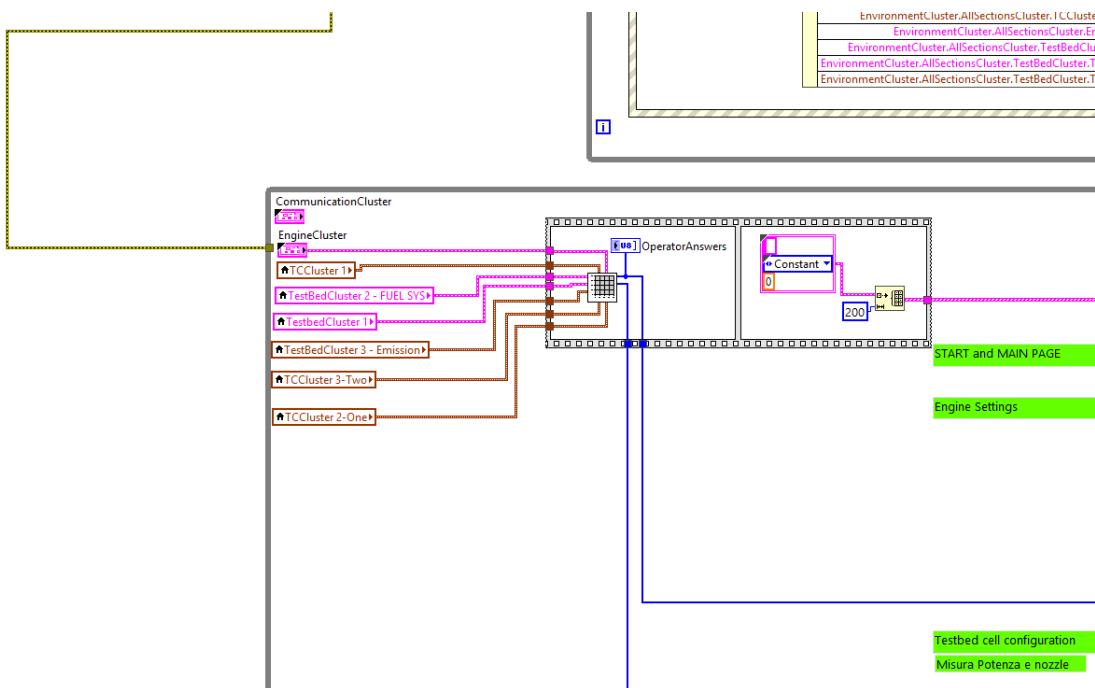


Figura VII.XXVIII: Porzione dell'*Environment.vi* prima delle modifiche

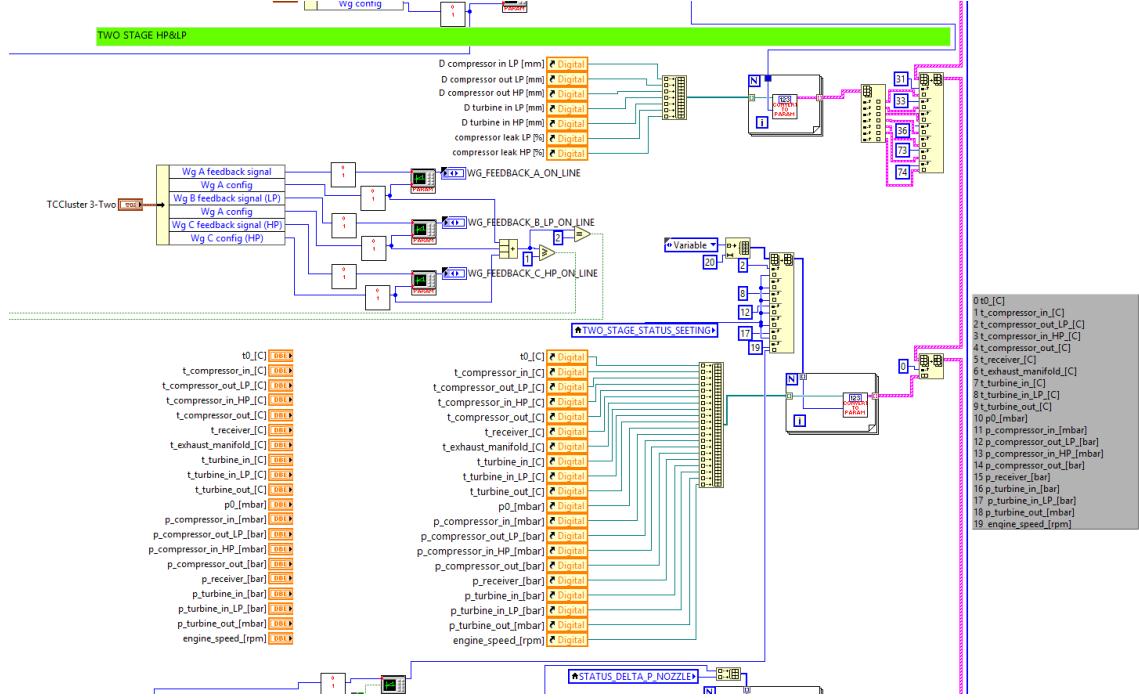


Figura VII.XXIX: Porzione dell'*Environment.vi* relativo al caricamento delle informazioni rimaste salvate nei menu di configurazione del turbogruppo bistadio

LabView esegue le istruzioni a seconda del dataflow lungo i collegamenti nel codice; quindi, capitava che il caricamento dei dati dai cluster relativi all'ultimo salvataggio del programma avvenisse prima dell'importazione dei dati dal database. Ciò causava la discrepanza tra gli script di configurazione e il funzionamento del software.

Si è corretto inserendo una condizione all'interno del case mostrato in figura VII.XXVII; in particolare, si è fatto in modo che il tasto "StartEvent" si riazzerasse solo in seguito all'importazione di tutti i cluster dal database.

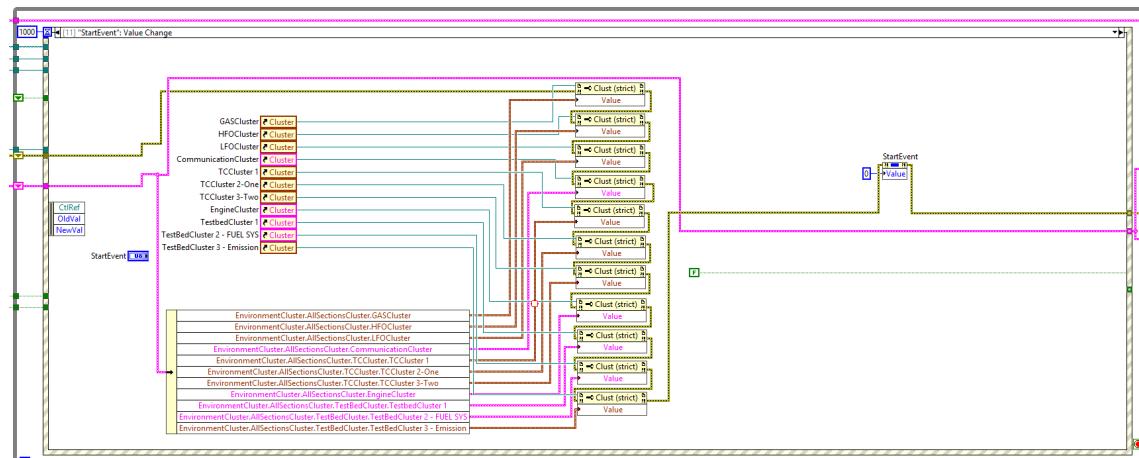


Figura VII.XXX: Scenario 11 del case all'interno dell'*Environment.vi* con modifica apportata per azzerare il pulsante solo una volta completata l'importazione dei dati dal database

Per assicurarsi la giusta sequenza di esecuzione si è voluto creare un SubVI conte-

nente tutto il codice responsabile della definizione del tipo di parametro. I vari parametri di ingresso possono apparire secondo tre modalità: *Variable*, *Unused variable* o *Constant*. Il nuovo SubVI creato è stato chiamato "GenerateParamsArray.vi" ed è stato inserito in coda al case riportato in figura VII.XXX.

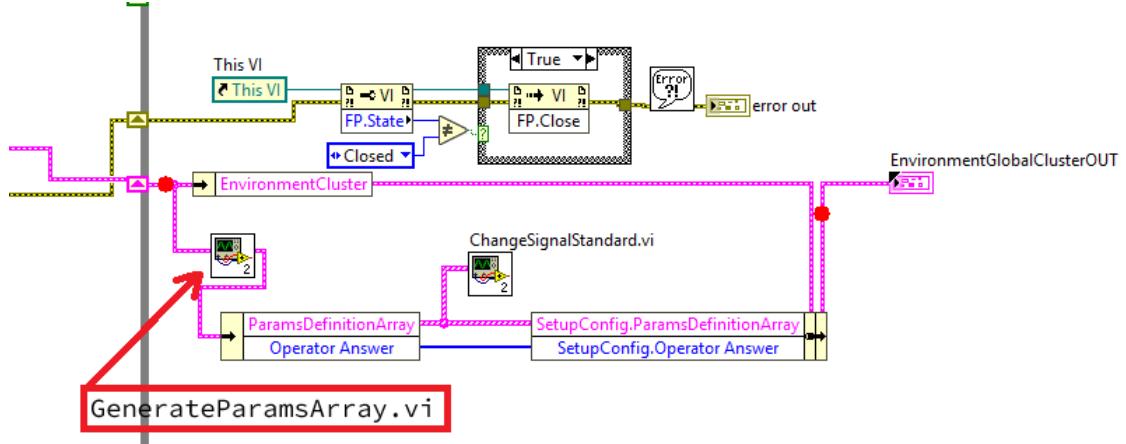


Figura VII.XXXI: Posizionamento del SubVI *GenerateParamsArray.vi* all'interno dell'*Environment.vi*

Affinché fosse possibile la creazione del SubVI, si è dovuto modificare l'evento "RefreshEvent" del case, definendo i vari cluster di configurazione direttamente nel case, senza ricorrere a *references* collegate ad altre parti del codice. In particolare, le *references* presenti in figura VII.XXXIII erano riferite alla definizione situata nella parte sottostante, ossia quella sostituita con il nuovo VI.

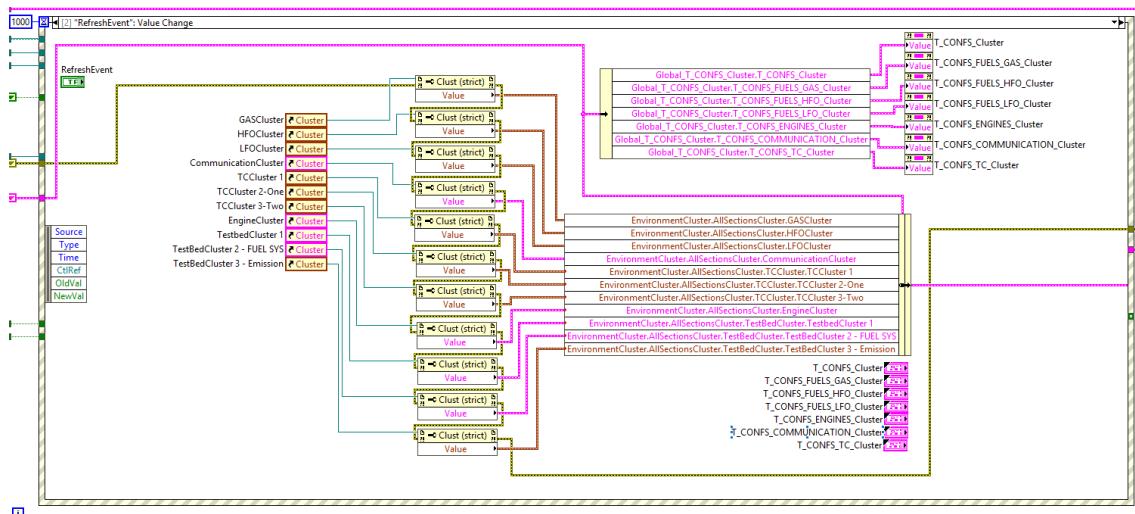


Figura VII.XXXII: Scenario "RefreshEvent" dell'*Environment.vi* prima dell'aggiornamento

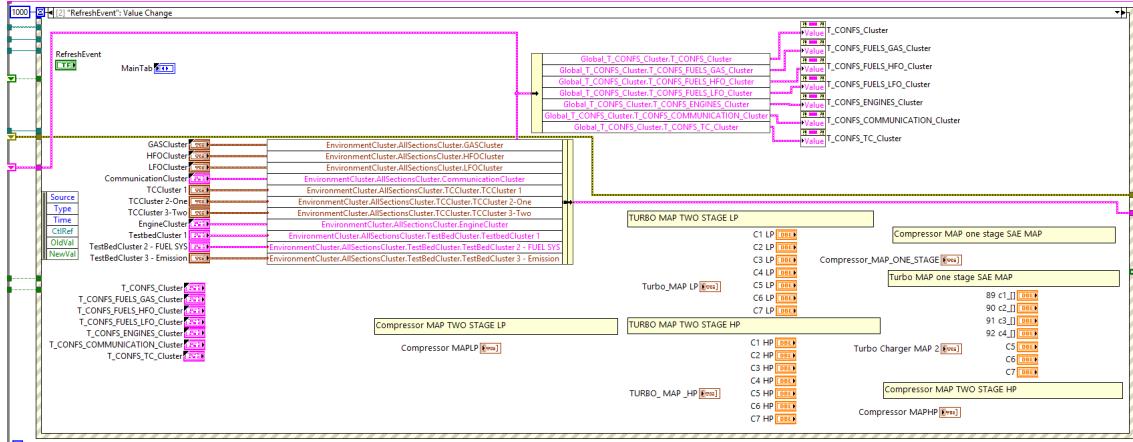


Figura VII.XXXIII: Nuovo scenario "RefreshEvent dell'Environemnt.vi"

Il codice "GenerateParamsArry.vi" è quindi responsabile della creazione di un vettore contenente tutti gli input per il calcolatore. Ogni posizione del vettore viene inizializzata con il valore "Variable" e successivamente sostituita in vari cicli *While* dall'effettivo stato a seconda della configurazione fatta dall'utente.

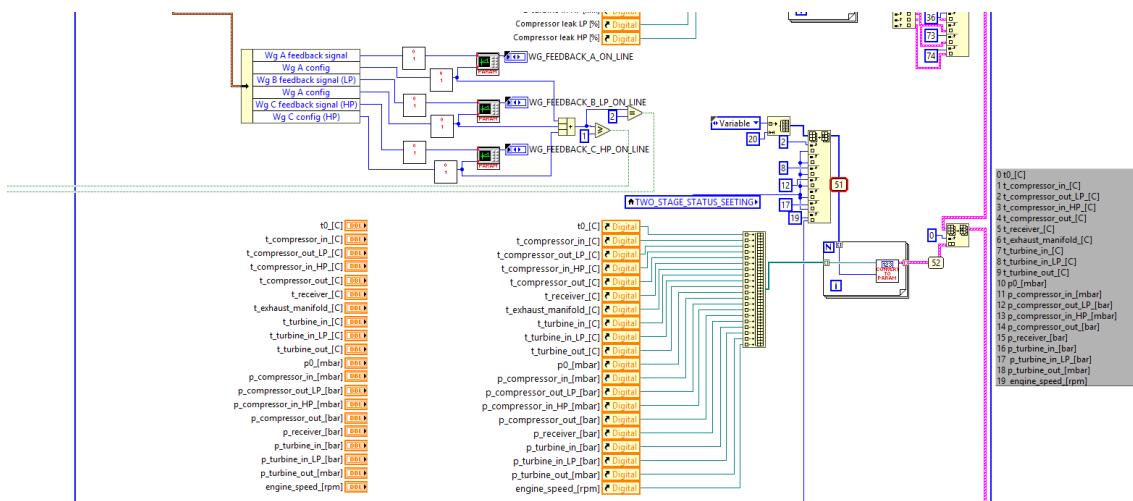


Figura VII.XXXIV: Porzione del GenerateParamsArry.vi responsabile della definizione dei primi 20 parametri del cluster contenente i dati di ingresso al calcolatore

Si è notato successivamente che il subVI *GenerateParamsArray.vi* effettuava operazioni ridondanti e si è deciso, quindi, di semplificarlo. In particolare, si è visto che il programma assegnava un nome a tutti i parametri, il quale poi veniva sovrascritto con il nome presente sul database. Inoltre, si è notato che i parametri variabili, cioè quelli il cui valore varia ogni istante in base a quanto letto via UDP, venivano inizializzati con l'ultimo valore memorizzato dal VI. Quest'operazione risultava superflua così si è deciso di eliminare la parte di codice responsabile.

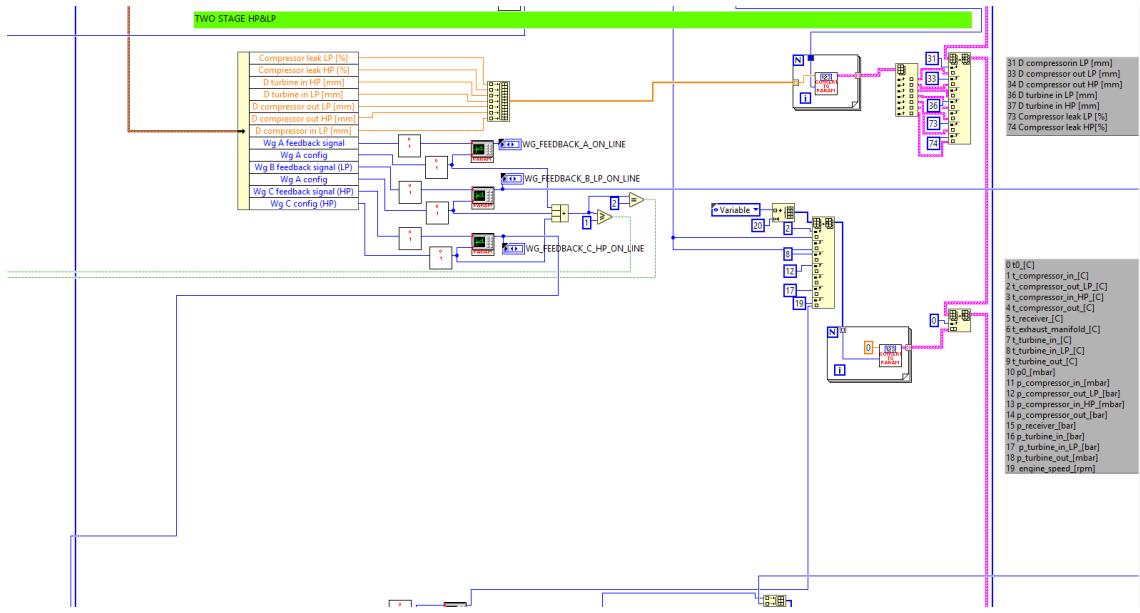


Figura VII.XXXV: Porzione del GenerateParamsArry.vi responsabile della definizione dei primi 20 parametri del cluster contenente i dati di ingresso al calcolatore

VII.IX Salvataggio mappe SAE nel database

È stato necessario inserire nel database le mappe SAE di turbina e compressore che equipaggiano il motore 7L46F. Si è aperta la pagina *t_conf_map* del database, si è aggiunta una nuova riga premendo il tasto verde caratterizzato da un "+" bianco al centro e si sono compilate le varie caselle con i dati delle turbomacchine. Bisogna rispettare l'indice progressivo dei vari elementi, poiché è l'informazione che usa il programma LabView per richiamare i vari dati nei calcoli.

SQLiteStudio (3.4.4) - [t_conf_maps (lv_database)]

Databases Database Structure View Tools Help

Filter by name

lv_database (SQLite 3)

Tables (20)

- t_conf_communication
- t_conf_engines
- t_conf_fuels_gas
- t_conf_fuels_hfo
- t_conf_fuels_lfo
- t_conf_maps**
- t_conf_maps_flowdata
- t_conf_maps_surgedata
- t_conf_TC
- t_confs
- t_environment_inputs
- t_function_inputs
- t_function_outputs
- t_function_version_depen...
- t_function_version_inputs
- t_function_version_outputs
- t_function_versions
- t_functions
- t_groups
- t_python_setup

Views (3)

- v_function_dependencies
- v_functions
- v_functions_description

Structure Data Constraints Indexes Triggers DDL

Grid view Form view Filter data Total rows loaded: 5

ID	PRODUCT	MODEL	TYPE	UNIT_SPE	TURBINE_
1	ABB	A175-L	CV07 CT50 CD03 CA40	RPM	0
2	ABB	A165-L	CV09 CT60 CD07 CA30 HZTL640313 AN40 XH01 CH03 nose cone	RPM	0
3	ABB	A265-L	CV21 CT40 CD14 CA40	RPM	0
4	ABB	TPL76-C32	TV11 TT40 TF10 TN01 TA09	RPM	1
5	ABB	TPL 76	CV32 CT45 CD05 CA30	RPM	0

Figura VII.XXXVI: Tabella *t_conf_map* in cui sono riportati tutti i dispositivi salvati

I punti della mappa SAE devono essere inseriti nella tabella *t_conf_flowdata*. Nella prima colonna si deve inserire il codice univoco progressivo che identifica la macchina inserita precedentemente in *t_conf_map*. La seconda colonna riporta un indice progressivo di riga; mentre le successive contengono i dati caratteristici della mappa.

SQLiteStudio (3.4.4) - [t_conf_maps (lv_database)]

Databases Database Structure View Tools Help

Filter by name

lv_database (SQLite 3)

Tables (20)

- t_conf_communication
- t_conf_engines
- t_conf_fuels_gas
- t_conf_fuels_hfo
- t_conf_fuels_lfo
- t_conf_maps**
- t_conf_maps_flowdata**
- t_conf_maps_surgedata
- t_conf_TC
- t_confs
- t_environment_inputs
- t_function_inputs
- t_function_outputs
- t_function_version_depen...
- t_function_version_inputs
- t_function_version_outputs
- t_function_versions
- t_functions
- t_groups
- t_python_setup

Views (3)

- v_function_dependencies
- v_functions
- v_functions_description

Structure Data Constraints Indexes Triggers DDL

Grid view Form view Filter data Total rows loaded: 26

ID_MAP	ID_ROW	RPM	FLOW_RATE	PIV	ETA
749	3	249	20400,00000000	15,48897000	5,19255000 0,81177000
750	3	250	20400,00000000	15,37424000	5,20068000 0,81143000
751	5	251	8304.8	2.86735	1.44249 0.76144
752	5	252	8304.8	2.92462	1.44211 0.76651
753	5	253	8304.8	3.04388	1.44105 0.77593
754	5	254	8304.8	3.19301	1.43913 0.78517
755	5	255	8304.8	3.60807	1.43133 0.80278
756	5	256	8304.8	4.01232	1.41952 0.80708
757	5	257	8304.8	4.39546	1.404 0.797
758	5	258	8304.8	4.97562	1.36065 0.74109
759	5	259	8304.8	5.18499	1.32858 0.68812
760	5	260	8304.8	5.33676	1.29872 0.63552
761	5	261	9550.5	3.41356	1.61321 0.77676
762	5	262	9550.5	3.60315	1.61082 0.78647
763	5	263	9550.5	3.81363	1.60737 0.79564
764	5	264	9550.5	4.06185	1.60236 0.80457
765	5	265	9550.5	4.74435	1.58291 0.81337
766	5	266	9550.5	5.40695	1.55037 0.79691
767	5	267	9550.5	5.91598	1.49535 0.74238
768	5	268	9550.5	6.12604	1.45141 0.6897
769	5	269	9550.5	6.28003	1.41033 0.63727

Figura VII.XXXVII: Tabella *t_conf_flowdata* in cui sono riportati i punti delle mappe SAE

La procedura di inserimento dei dati è analoga a quanto detto per la tabella *t_conf_map*. Una volta premuto il tasto verde "+", bisogna compilare ogni casella copiando i dati dal file SAE della turbomacchina in esame.

Bisogna infine ripetere l'operazione appena descritta per inserire i dati relativi alla linea di purge del compressore, i quali andranno scritti all'interno della tabella *t_conf_surgedata*.

VII.X Lettura mappe SAE del compressore

Il programma WPC è in grado mostrare all'operatore il punto di funzionamento del compressore sulla mappa SAE. Questo serve anche per il calcolo della portata dell'aria qualora non fosse disponibile il filtro dell'aria in aspirazione.

Le mappe caricate sul database presentano un numero limitato di punti, quindi si è dovuto sviluppare un VI che ricostruisse le curve iso-velocità interpolando i punti noti. Come si evince dalla figura VII.XXXVIII, le curve iso-velocità sono riportate di colore bianco, mentre la curva relativa alla velocità istantanea di rotazione della macchina durante il funzionamento è riportata con il colore rosso. Quest'ultima è difficile che possa coincidere con una di quelle note, per cui si è dovuto sviluppare un VI che interpolasse i risultati intermedi.

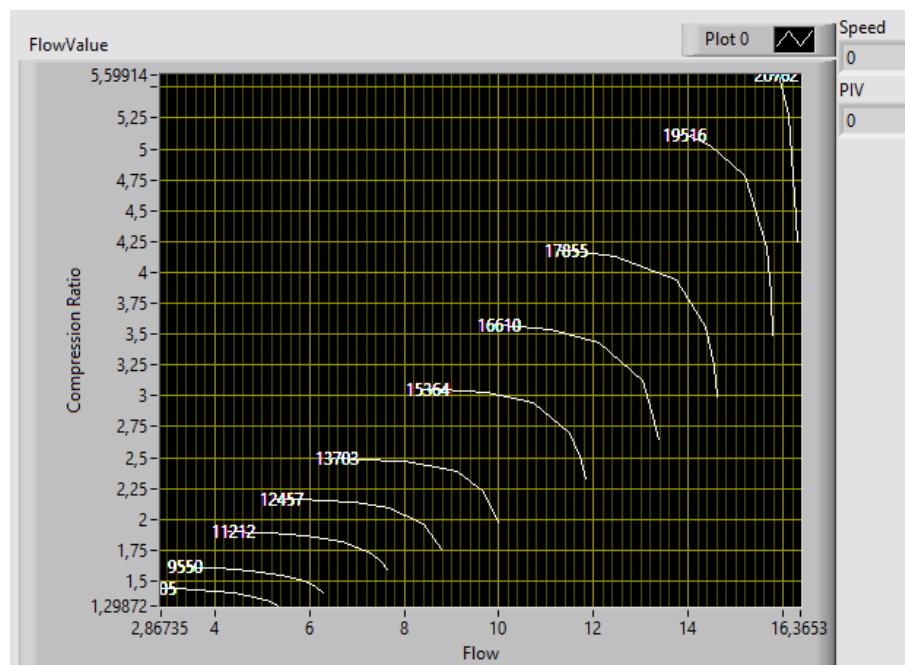


Figura VII.XXXVIII: Esempio di mappa SAE del compressore mostrata durante il funzionamento del programma WPC

Tale VI è stato chiamato *FindFlow.vi* e ha come scopo il calcolo della portata d'aria ottenuta dall'intersezione della curva iso-velocità istantanea e il rapporto di compressione. In figura VII.XXXIX, si può notare che prende come input due vettori

di dati (chiamati *SerieX* e *SerieY*) e un numero *CurrValue*. La *SerieY* rappresenta il rapporto di compressione istantaneo, mentre la *SerieX* è il vettore contenente i valori noti da mappa SAE della portata d'aria che attraversa la macchina.

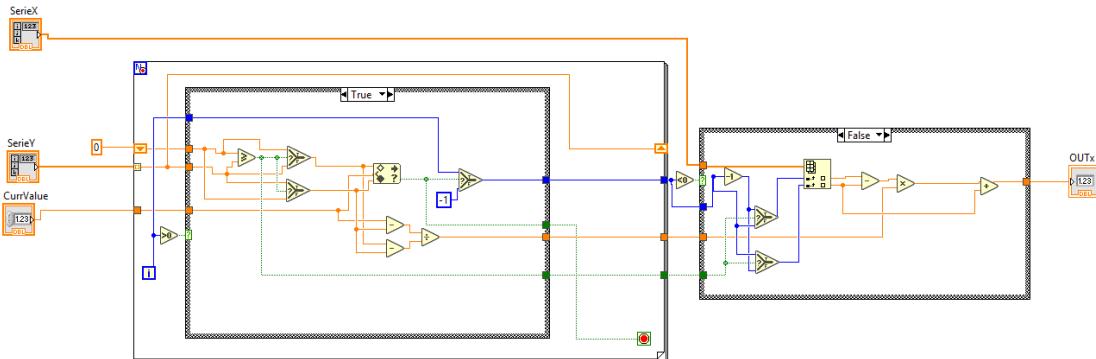


Figura VII.XXXIX: FindFlow.vi

Il programma entra nel loop e, a partire dalla seconda iterazione, confronta il valore numerico di *CurrValue* con quello nella *i*-esima posizione della *SerieY* e quello nella $(i-1)$ -esima. All'interno del *Case*, si chiede se il valore è contenuto in tale intervallo di valori consecutivi della *SerieY*, e nel caso, si esce dal ciclo *While* per entrare nel secondo *Case*. Si calcola lo scostamento del rapporto di compressione dall'estremo inferiore del delta trovato. Tale scostamento viene riutilizzato per trovare il corrispettivo valore della *SerieX*, cioè la portata. Questo metodo di interpolazione presuppone che tra due punti consecutivi di una curva iso-velocità, ci sia una relazione lineare. L'errore di approssimazione che si compie è trascurabile.

VII.XI Funzione F208 per il calcolo della potenza erogata dal motore

La potenza che inizialmente il software utilizzava per eseguire tutti i calcoli non era la potenza realmente erogata dal motore, bensì la potenza letta attraverso il freno idraulico o l'alternatore. Ciò significa che non si tenevano in considerazione gli attriti e le dissipazioni della macchina collegata all'albero motore. Si è deciso quindi di inserire una nuova formula chiamata *F208_Peng_real.VI*, la quale calcola la reale potenza erogata dal motore conoscendo o ipotizzando (90%) un generico rendimento della trasmissione (*A*). Questa modifica ha richiesto il successivo aggiornamento di tutte le altre funzioni utilizzate; in particolare, si è dovuto sostituire il comando di lettura del dato dal vettore X degli input con il richiamo della funzione F208.

Per poter inserire una nuova funzione all'interno del database, è necessario seguire una procedura ben precisa:

- I. Inserimento nella pagina *t_functions* del database di una nuova riga, definizione dell'ID della nuova formula, del nome e del corpo della funzione.
 - II. Inserire nella tabella *t_function_inputs* gli input necessari alla nuova funzione e ripetere definendo gli output previsti nella tabella *t_functions_outputs*.
 - III. Inserire nella tabella *t_function_versions* le condizioni di calcolabilità. In particolare, la potenza reale è sempre da calcolare indipendentemente dalla configurazione motore.
 - IV. Definire eventuali dipendenze in tabella *t_function_dependences*.
 - V. Per ogni versione possibile della nuova formula, definire l'indice dell'input necessario al calcolo. Ripetere la stessa cosa anche per gli output in tabella *t_function_version_outputs*.
 - VI. Si è dovuto poi aggiungere manualmente una dipendenza in tutte quelle funzioni che ricevono come input la potenza motore.

lv_database (SQLite 3)
Tables (20)

	id_function	id_version	id_function_dep	id_version_dep
866		2511	2	2419
867		2511	2	2420
868		2512	1	2426
869		2513	1	2512
870		2514	1	2427
871		2514	1	2429
872		2514	1	2513
873		2514	2	2427
874		2514	2	2429
875		2514	2	2513
876		2514	1	2566
877		2514	2	2566
878		2515	1	2427
879		2515	1	2429
880		2515	2	2427
881		2515	2	2429
882		2515	1	2566

Figura VII.XL: Tabella t_function_version_dependencies contenente la nuova dipendenza della funzione 2514 rispetto al calcolo della potenza 2566

Capitolo VIII

Istruzioni

VIII.I Configurazione rete OT

Per poter far comunicare programma e database con il motore è stato necessario configurare una rete OT, ossia un insieme di sistemi hardware, software e di rete che permette il controllo e la gestione dei processi e dei dispositivi che compongono un settore dell'azienda. Per configurare tale rete si è dovuto dotare il PC di un adattatore USB-Ethernet, ossia un componente che permette di trasformare un segnale che viaggia su cavo Ethernet in uno che viaggia su cavo USB. Si è dovuto modificare l'indirizzo IP e il gateway di tale dispositivo per farlo comunicare con la rete giusta. La configurazione è possibile aprendo la pagina *View network connections* del pannello di controllo del PC . Da questa schermata selezionare la rete OT aziendale, e tramite tasto destro, andare sulle proprietà di questa rete.

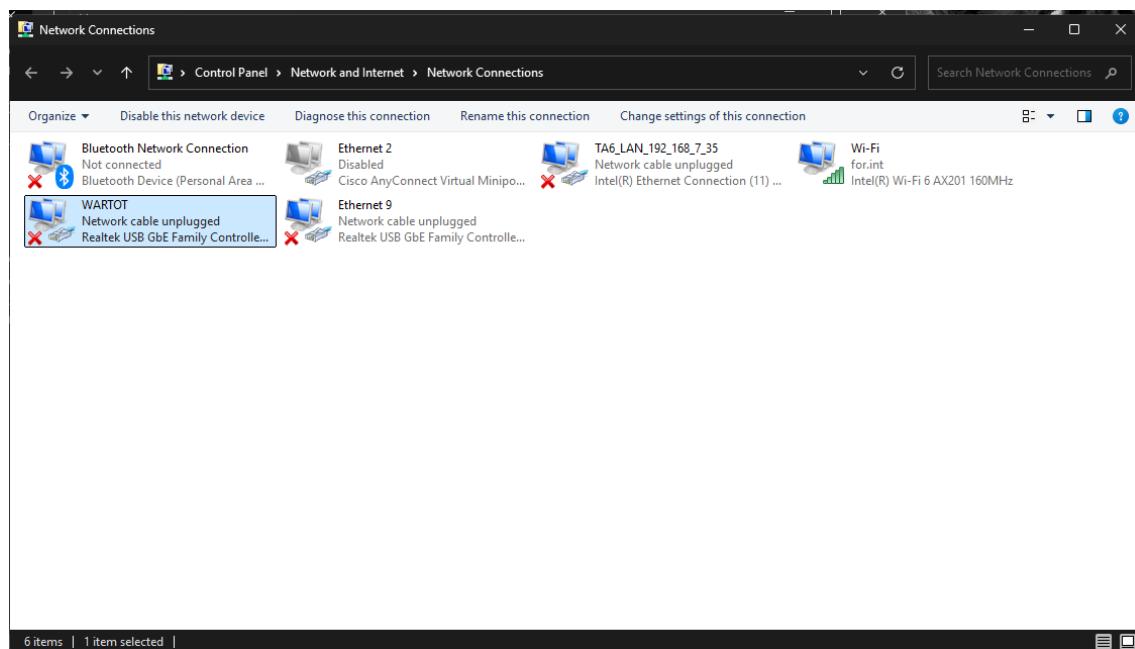


Figura VIII.I: Schermata *Network connections* in cui sono riportate tutte le reti connesse al PC

Una volta aperta la schermata relativa alle proprietà di rete, cercare la voce *Internet Protocol Version 4 (TCP/IPv4)* e selezionarla per configurarla. In particolare, bisognerà inserire l'indirizzo IP, la Subnet mask e il gateway della rete OT. Bisogna inserire l'indirizzo IP della porta con cui si tenta l'accesso alla rete, altrimenti il sistema segnalerà l'errore e non permetterà la configurazione e, di conseguenza, l'accesso alla rete. Una volta settati tali parametri si è pronti a dialogare con la rete. È importante ricordare che la configurazione è valida solo per la porta USB in cui è stato collegato l'adattatore Ethernet-USB durante la procedura; ciò significa che tale dispositivo dovrà essere collegato sempre alla medesima porta durante la comunicazione con il motore. Per controllare se il PC risulta correttamente collegato alla rete, è possibile sfruttare la funzione *ping* del *Command Prompt (CMD)* di Windows. Una volta aperta la pagina basterà scrivere *ping XX.XXX.XX.XXX*, dove ogni X rappresenta una cifra dell'indirizzo IP della rete OT.

VIII.II Configurazione Firewall di Windows

Per configurare correttamente i firewall di Windows bisogna accedere alle impostazioni del PC, alla sezione "Network & Internet". Andare poi in "Advanced Network settings" alla voce "Windows firewall". Si aprirà una finestra come quella riportata in figura VIII.II.

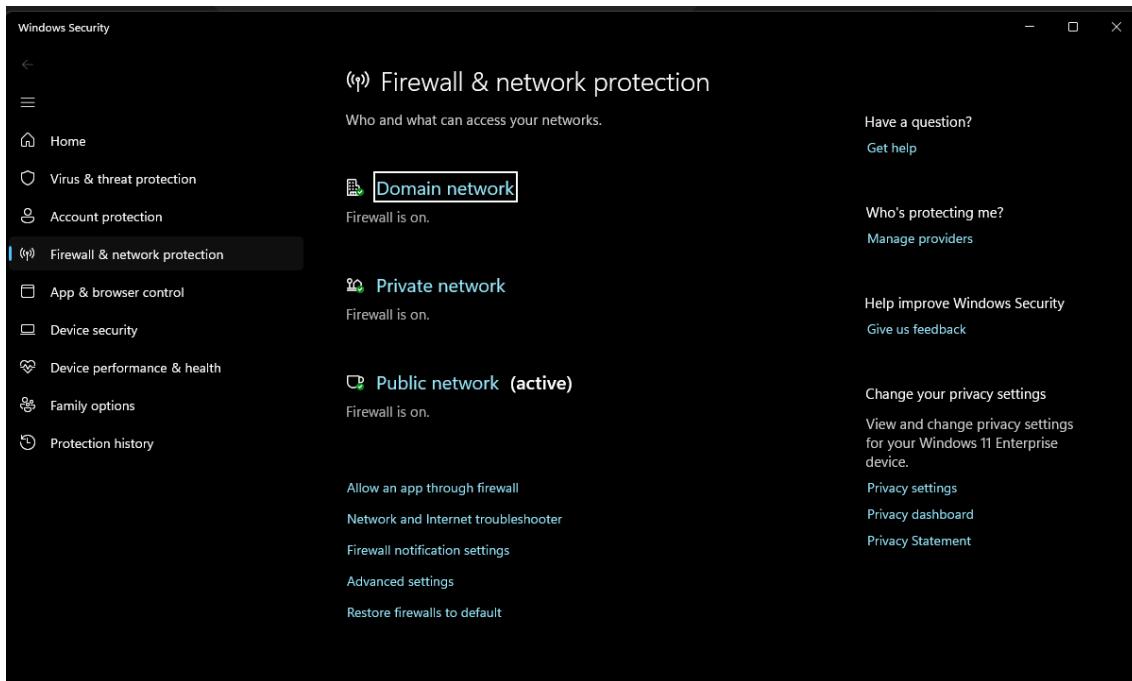


Figura VIII.II: Finestra di configurazione firewall di Windows

Cliccando poi sulla voce "Advanced Settings", verranno richieste all'utente le credenziali del profilo amministratore per poter accedere alla schermata successiva.

Cliccare poi sulla voce *Inbound rules*, ossia la pagina di gestione di tutte le regole che definiscono la comunicazione verso il PC.

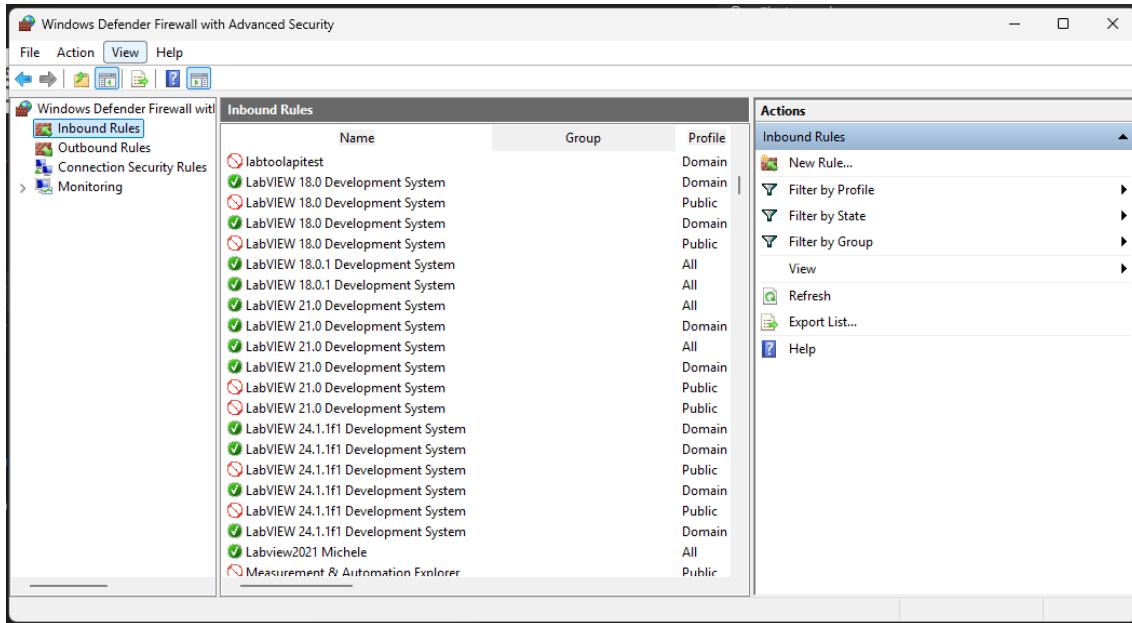


Figura VIII.III: Elenco di tutti i possibili accessi alla rete controllati dai firewall di Windows

Come si può notare dalla figura VIII.III, ogni versione di LabView installata sul PC presenta una configurazione di accesso ad internet. Per evitare problemi ed operare in completa libertà, si suggerisce di creare una nuova regola, cliccando sul pulsante "New rule..." in alto a destra. Verrà chiesto all'utente se si vuol creare una regola per un programma, per una porta di comunicazione, per un percorso predefinito o un percorso personalizzato. Nel caso in esame, serve una connessione libera per un programma, quindi selezionare la prima scelta proposta nell'elenco. Specificare poi se si vuole garantire l'accesso a tutti i programmi oppure ad uno specifico, in tal caso bisogna definire il percorso delle cartelle per trovare il file eseguibile, cioè il programma in formato .exe . Si consiglia di rendere la regola specifica per un solo progetto, quindi è consigliato di specificare il percorso per trovare l'eseguibile del software. Bisogna specificare poi se si vuole stabilire una connessione sempre, solo quando questa è sicura o se invece bloccarla. Per lo scopo di questo progetto è necessario che la comunicazione sia sempre garantita. Per lo stesso motivo spuntare anche tutte le caselle che compariranno nella schermata successiva, quando viene chiesto su che tipo di rete deve essere applicata la regola che si sta creando. Basterà infine nominare la nuova regola e salvare il lavoro svolto. Si consiglia anche di modificare le autorizzazioni dei firewall di Windows accedendo dal *Control Panel* del PC. In particolare, cercare la sezione "System and Security", entrarvi e aprire la sezione intitolata "Windows Defender Firewall".

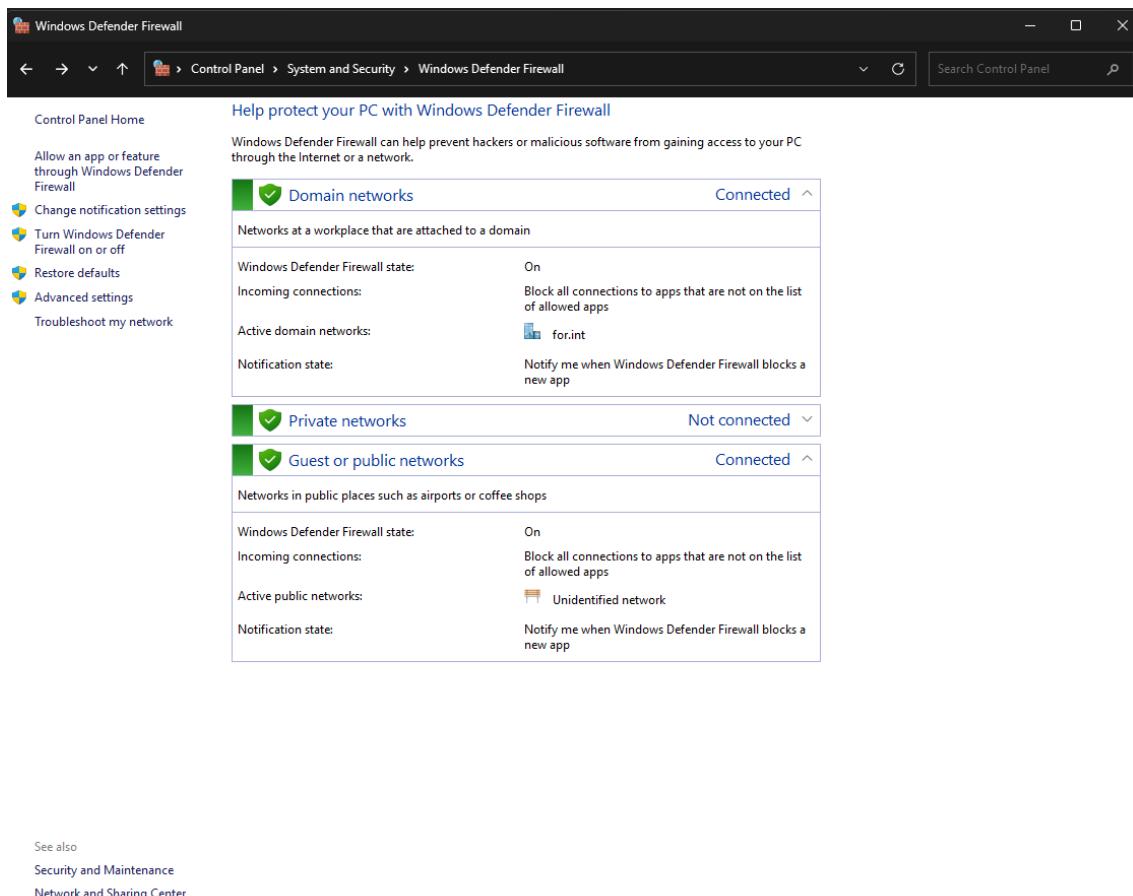


Figura VIII.IV: Schermata del Control Panel per modificare le autorizzazioni dei firewall

In figura VIII.IV, si può notare nell'angolo in alto a sinistra la voce *Allow an app or feature through Windows Defender Firewall*; cliccare sopra e si aprirà un elenco di applicazioni a cui concedere o togliere le autorizzazioni. Cercare in questa lista la regola creata e le applicazioni Labview e assicurarsi che abbiano tutte piena libertà di accesso alla rete; in caso contrario accedere con le credenziali da amministratore e spuntare tutte le caselle.

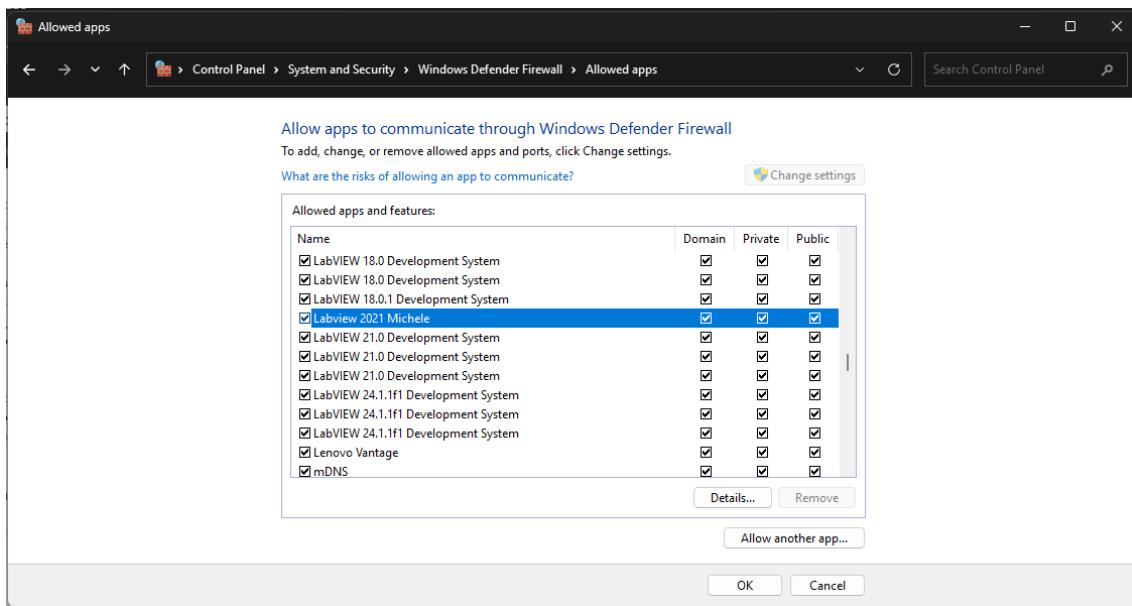


Figura VIII.V: Elenco delle autorizzazioni per l'accesso alla rete

VIII.III Installazione e configurazione Pycharm

Per poter testare le funzioni utilizzate nel software WPC e il loro sistema di richiamo, si è dovuto installare e configurare *PyCharm*, ossia un programma che consente la lettura e la modifica di file ".py". È stata installata la versione PyCharm 2025.2.2 a 64 bit. Per poter testare le funzioni si è dovuto poi installare i pacchetti *Pandas* e *Scipy*, come fatto durante l'installazione di Python. Per farlo, bisogna cliccare sull'icona del menu in alto a sinistra e cliccare su "File".

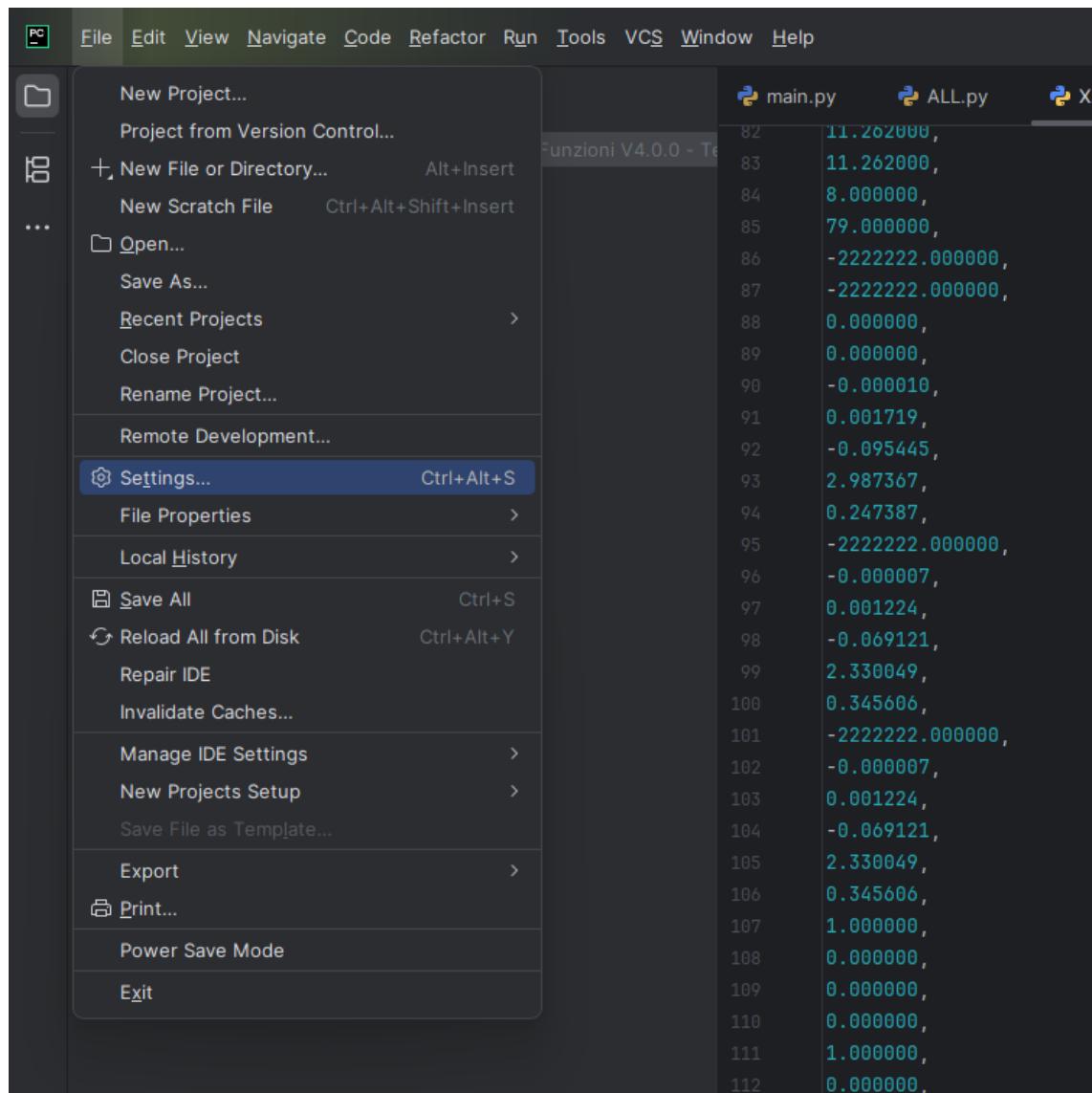


Figura VIII.VI: Menu PyCharm in cui è mostrato la voce Settings

Come suggerisce la figura VIII.VI, aprire la voce "Settings" e selezionare dall'elenco di sinistra la sezione *Interpreter*. Si aprirà una finestra analoga a quella mostrata in figura VIII.VII.

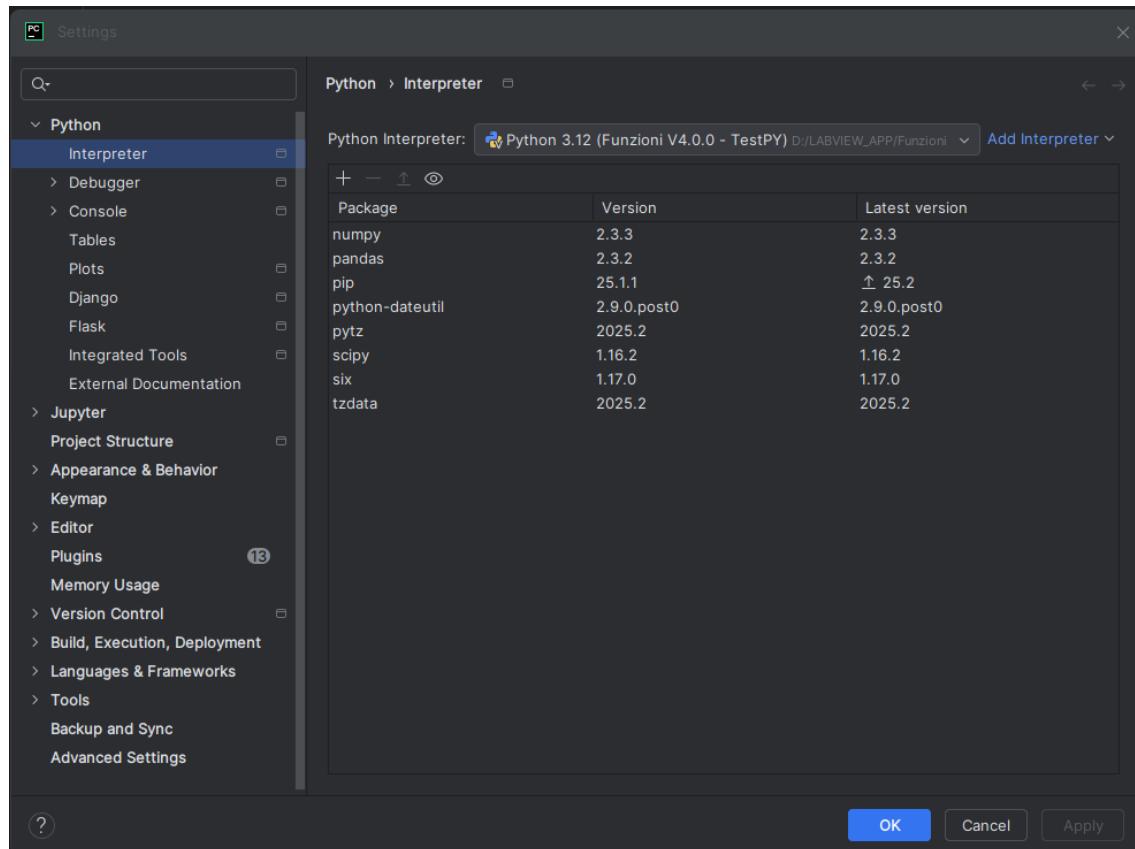


Figura VIII.VII: Schermata *Settings* di PyCharm

Selezionare il simbolo "+" sopra alla tabella centrale in cui sono mostrati i pacchetti aggiuntivi installati. Si aprirà un'ulteriore finestra e cercare nella apposita barra in alto a sinistra, il nome dei pacchetti da installare, quindi *Pandas* e *Scipy*. Una volta trovati, selezionarli e cliccare sul pulsante "Install Package"

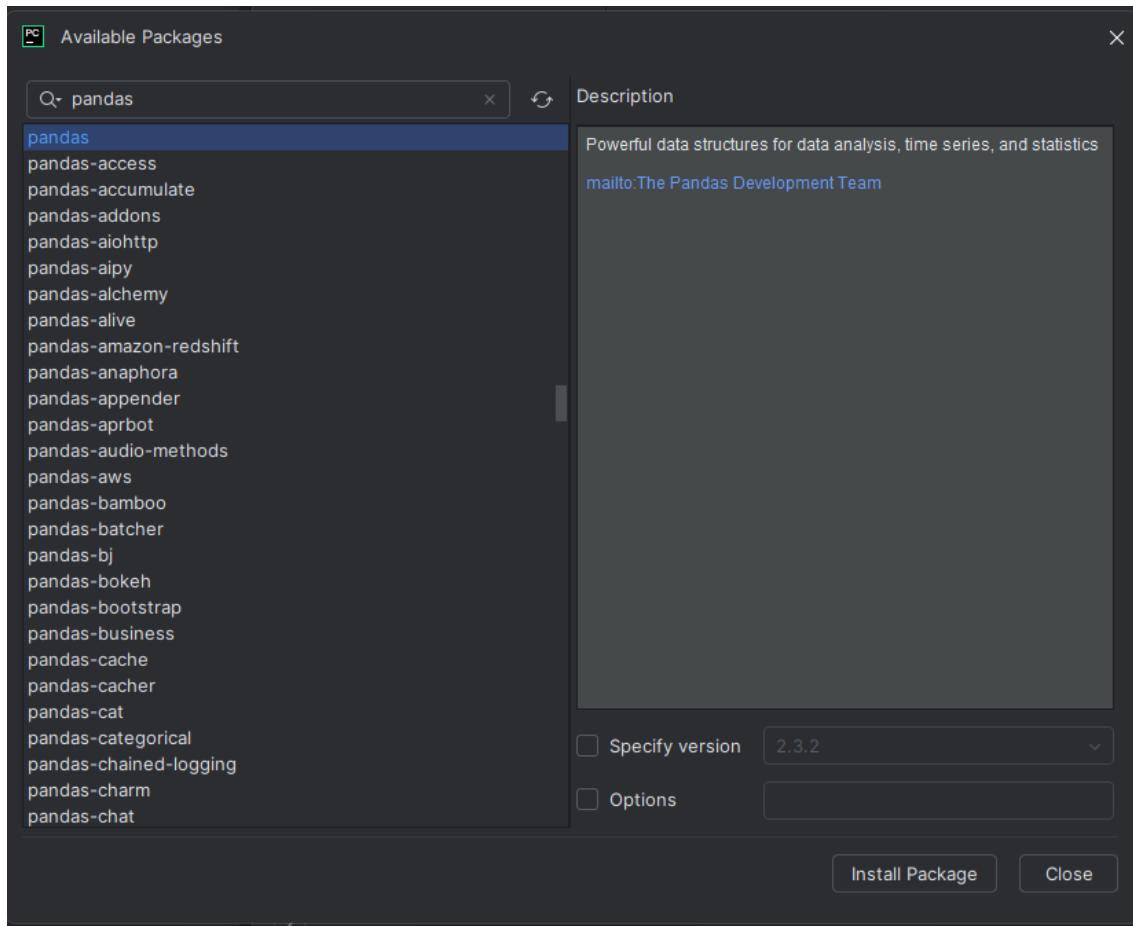


Figura VIII.VIII: Schermata di installazione nuovi pacchetti aggiuntivi di PyCharm

Altri pacchetti mostrati in figura VIII.VII, come ad esempio *pip* o *numpy*, vengono installati automaticamente su PyCharm quando si lancia il programma poiché sono richiamati direttamente nel codice delle funzioni.

È stato necessario anche configurare il file di prova PyCharm una volta aperta la funzione *main*. Per configurazione si intende indicare a PyCharm dove trovare la funzione da testare e la *working directory*, ossia il percorso delle cartelle dove salvare le modifiche e tutti i file di contorno. Bisogna cliccare sul tasto evidenziato in rosso in figura VIII.IX e inserire i dati richiesti nella schermata che si aprirà.

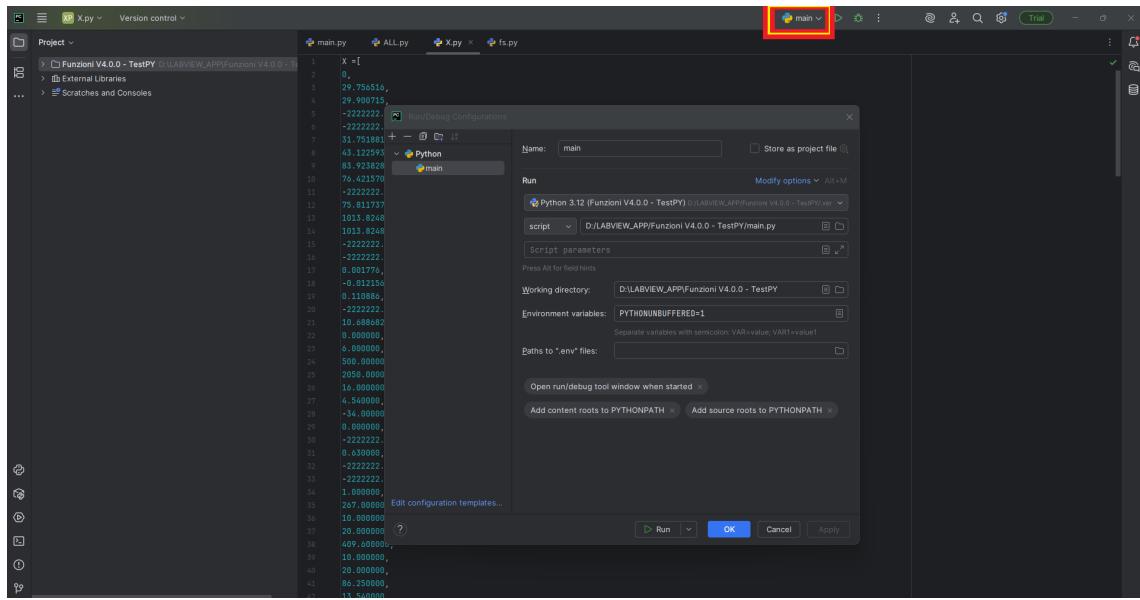


Figura VIII.IX: Schermata di configurazione dei file con le funzioni da testare tramite PyCharm

VIII.IV Parsing segnali

Con il termine *parsing* si intende l'associazione delle variabili presenti nel software (temperature, pressioni,...) con i segnali di ingresso provenienti dal motore. È un processo necessario ogni volta che si crea una nuova configurazione dell'impianto, poiché altrimenti il programma WPC non sa come gestire i dati che gli arrivano dal motore. Il parsing lo si effettua premendo il bottone "Parse Signals" presente nella schermata di configurazione della comunicazione (figura V.XIV). Si aprirà una schermata relativa alle librerie; in particolare, sarà relativa al VI LabtoolLabview-Parser.vi, lo stesso VI spiegato al capitolo VII.V.

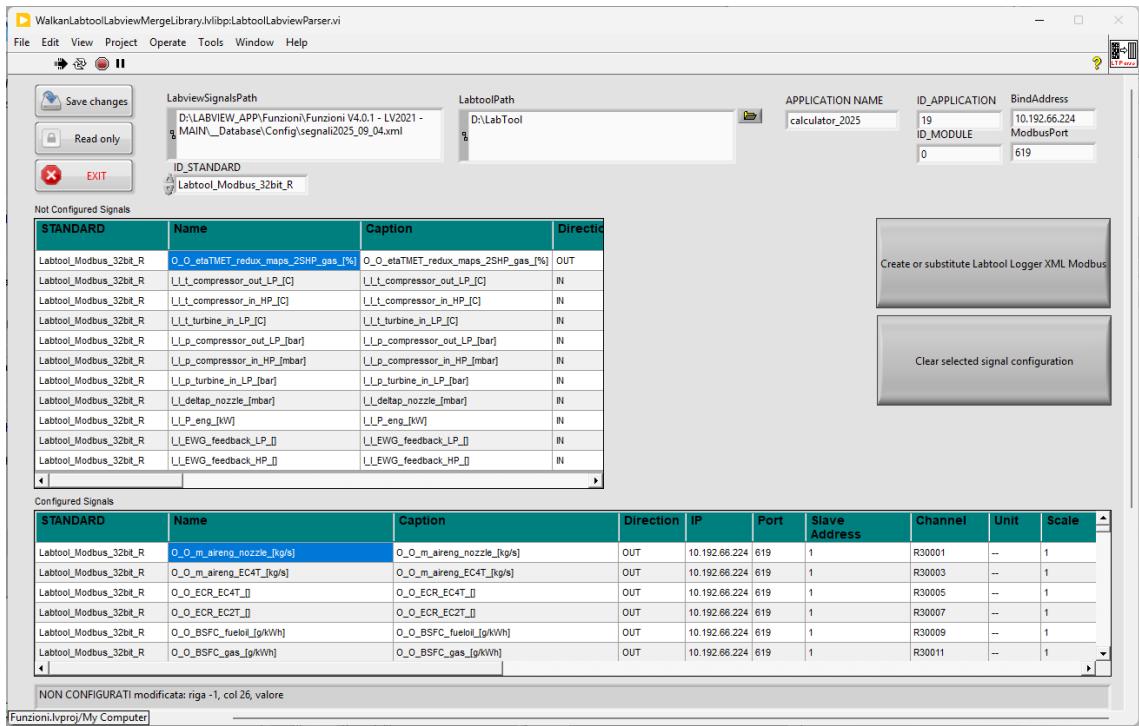


Figura VIII.X: Schermata del LabtoolLabviewParser.vi delle librerie dal quale effettuare il parsing dei segnali di input

Come si evince dalla figura VIII.X, la schermata è caratterizzata da due tabelle: una centrale e una in basso composta da più colonne. In quella centrale sono contenute tutte le variabili del software non ancora "parsate", cioè non ancora associate ai rispettivi segnali e sensori del motore. Il programma assegna di default ogni variabile all'*ID_STANDARD* "Labtool_Modbus_32bit_R", sia che siano variabili di ingresso che di uscita. Per prima cosa bisogna quindi distribuire ogni segnale al giusto *ID_STANDARD*, il quale indica in che modo quel dato viene scambiato tra software WPC e Labtool. Le variabili di ingresso sono caratterizzate dalla sigla "*I_I_*" all'inizio del nome, mentre gli output avranno "*O_O_*". I dati di ingresso vengono letti dal software tramite comunicazione UDP, quindi bisogna cambiare il loro *ID_STANDARD* in "Labtool_UDP" cliccando sulla casella di ogni dato da modificare.

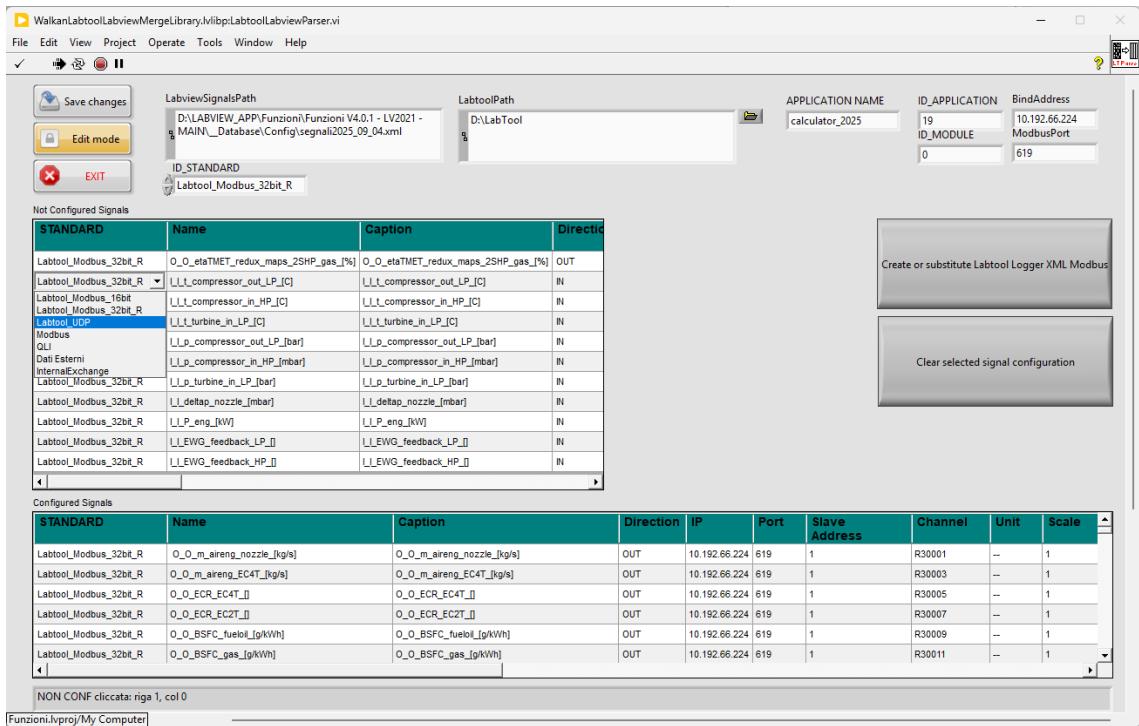


Figura VIII.XI: Cambio del formato di comunicazione tra segnali di ingresso al software e Labtool

Una volta modificati tutti gli input, premere il tasto di salvataggio per mantenere le modifiche effettuate. Tali segnali scompariranno dalla tabella centrale e vengono posizionati sotto "Labtool_UDP". Per ritrovarli, cliccare sulle frecce della casella "ID_STANDARD" fino a non vedere la scritta "Labtool_UDP". Una volta definita la natura della comunicazione per leggere i dati, bisogna dire al programma quale *loggers* utilizzare per trovare i segnali da associare alle variabili. Per farlo, bisogna cliccare sulla casella "LabtoolLogger" e cercare la cartella contenente i logger di lettura di quelle variabili. Si otterrà una situazione analoga a quella riportata in figura VIII.XII.

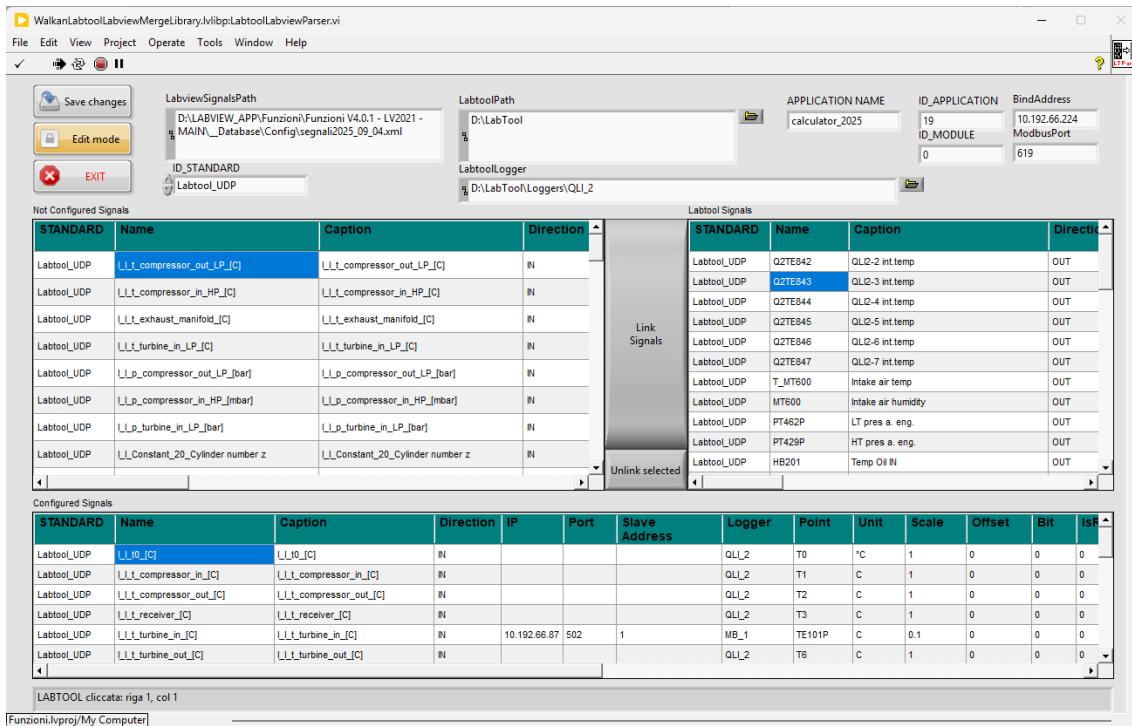


Figura VIII.XII: Schermata di associazione delle variabili di ingresso con i segnali provenienti dal motore con comunicazione UDP

Una volta trovato il giusto logger, si procede all'effettiva associazione. Si seleziona la variabile dalla tabella di sinistra e si seleziona il corrispettivo segnale dalla tabella di destra (figura VIII.XII). Cliccare poi sul tasto centrale "Link Signals". Variabile e segnale scompariranno dalle relative tabelle e passeranno alla tabella sottostante. Questa tabella contiene tutti i dati relativi all'associazione e viene compilata in base ai dati che il software trova nei logger definiti dall'operatore. Una volta completata la procedura per tutti i dati, salvare le modifiche effettuate, passare alla modalità di sola lettura ed uscire premendo il tasto "EXIT".

Tutti i segnali di output lasciati con ID_STANDARD "Labtool_Modbus_32bit_R", possono essere salvati come un nuovo logger di Labtool, premendo sul tasto visibile in figura VIII.X "Create or substitute Labtool Logger XML Modbus", mantenendo lo stesso formato di comunicazione, in quanto corrisponde allo standard necessario alla comunicazione da LabView verso Labtool.

VIII.V Configurazione Wireshark

Durante alcune prove, si è riscontrato qualche problema di lettura dati o la mancanza di segnale UDP. Per controllare lo stato della rete o per capire se fosse un problema del programma LabView, si è utilizzato il software "Wireshark", ossia un'applicazione che consente di visualizzare i dati trasmessi sulle reti a cui è collegato il PC in utilizzo.

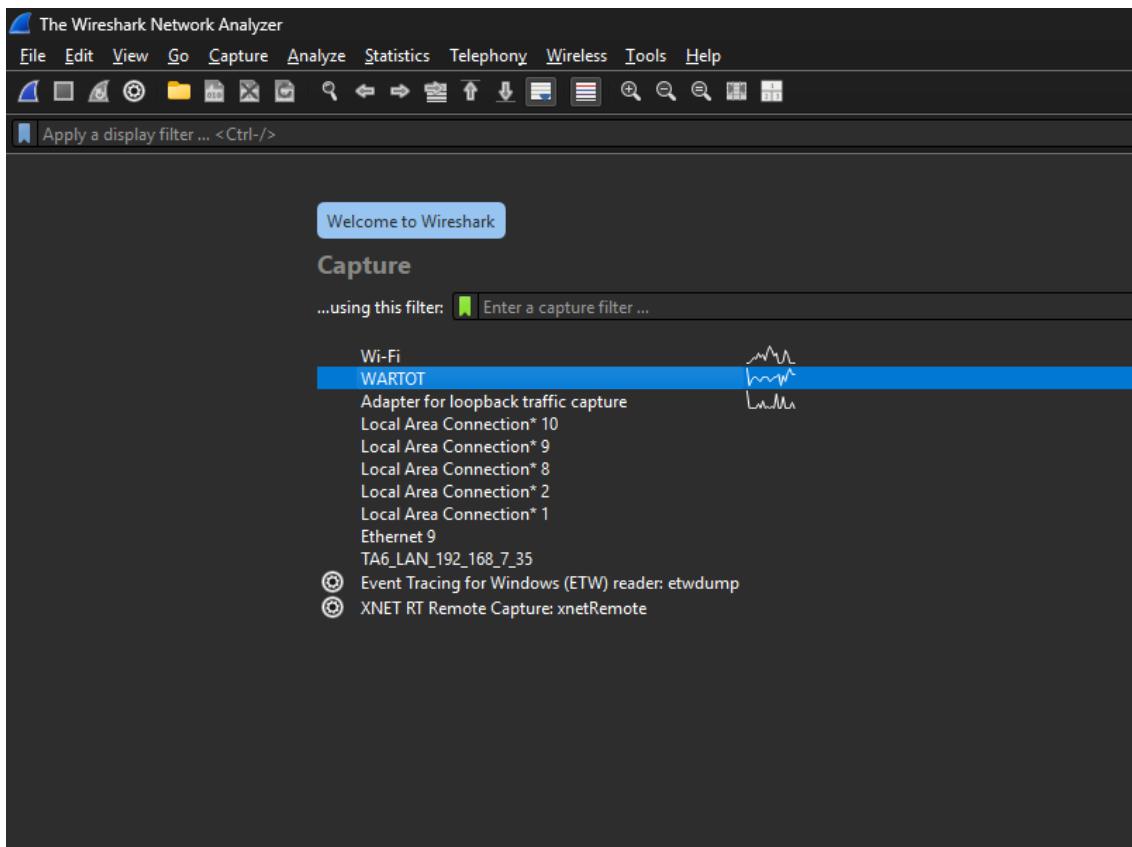


Figura VIII.XIII: Schermata iniziale del software Wireshark

In figura VIII.XIII è mostrata la schermata iniziale di Wireshark. Si può notare che sono riportate tutte le possibili connessioni del computer. In particolare, le prime tre in figura sono le uniche reti in cui si ha un flusso di dati e lo si capisce poiché accanto al nome della rete si ha un piccolo diagramma rappresentante il flusso di dati.

La rete che trasporta i dati in formato UDP è la rete interna Wärtsilä chiamata "WARTOT". Cliccando due volte sul nome, si aprirà una nuova pagina contenente tutti i segnali che vengono scambiati sulla linea in tempo reale.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
159969	503.891098	10.192.66.111	224.0.0.150	UDP	1362	59414 → 31111 Len=1320
159970	503.892126	10.192.66.228	224.0.0.150	UDP	1362	61389 → 31228 Len=1320
159971	503.893098	10.192.66.228	224.0.0.150	UDP	1362	61389 → 31228 Len=1320
159972	503.894152	10.192.66.228	224.0.0.150	UDP	1362	61389 → 31228 Len=1320
159973	503.896496	10.192.66.229	224.0.0.150	UDP	1362	58569 → 31229 Len=1320
159974	503.897331	10.192.66.90	224.0.0.150	UDP	1362	62654 → 31090 Len=1320
159975	503.897593	10.192.66.90	224.0.0.150	UDP	1362	62654 → 31090 Len=1320
159976	503.903088	10.192.66.229	224.0.0.150	UDP	1362	58569 → 31229 Len=1320
159977	503.911375	HonHaiIPrecis_04:e2:...	Broadcast	ARP	60	Who has 10.192.66.52? Tell 10.192.66.105
159978	503.912419	10.192.66.90	224.0.0.150	UDP	1362	62657 → 31090 Len=1320
159979	503.912706	10.192.66.90	224.0.0.150	UDP	1362	62657 → 31090 Len=1320
159980	503.913663	10.192.66.90	224.0.0.150	UDP	1362	62657 → 31090 Len=1320
159981	503.916006	10.192.66.228	224.0.0.150	UDP	1362	61389 → 31228 Len=1320
159982	503.917293	10.192.66.228	224.0.0.150	UDP	1362	61389 → 31228 Len=1320
159983	503.918325	10.192.66.228	224.0.0.150	UDP	1362	61389 → 31228 Len=1320
159984	503.919971	10.192.66.90	224.0.0.150	UDP	1362	62654 → 31090 Len=1320
159985	503.926753	10.192.66.229	224.0.0.150	UDP	1362	58569 → 31229 Len=1320
159986	503.937146	10.192.66.229	224.0.0.150	UDP	1362	58569 → 31229 Len=1320
159987	503.938965	10.192.66.90	224.0.0.150	UDP	1362	62657 → 31090 Len=1320
159988	503.939247	10.192.66.229	224.0.0.150	UDP	1362	58569 → 31229 Len=1320
159989	503.939247	10.192.66.90	224.0.0.150	UDP	1362	62657 → 31090 Len=1320
159990	503.939816	10.192.66.90	224.0.0.150	UDP	1362	62657 → 31090 Len=1320
159991	503.940168	10.192.66.90	224.0.0.150	UDP	1362	62657 → 31090 Len=1320
159992	503.941165	10.192.66.111	224.0.0.150	UDP	1362	59414 → 31111 Len=1320
159993	503.942436	10.192.66.228	224.0.0.150	UDP	1362	61389 → 31228 Len=1320
159994	503.943579	10.192.66.228	224.0.0.150	UDP	1362	61389 → 31228 Len=1320
159995	503.944768	10.192.66.228	224.0.0.150	UDP	1362	61389 → 31228 Len=1320
159996	503.945530	10.192.66.228	224.0.0.150	UDP	1362	61389 → 31228 Len=1320
159997	503.959095	10.192.66.90	224.0.0.150	UDP	1362	62657 → 31090 Len=1320
159998	503.962261	10.192.66.228	224.0.0.150	UDP	1362	61389 → 31228 Len=1320
159999	503.962261	10.192.66.229	224.0.0.150	UDP	1362	58569 → 31229 Len=1320
160000	503.964832	Cisco_f5:37:17	Nearest-Customer-BR...	STP	60	RST, Root = 4096/140/c8:82:34:7a:41:00 Cost = 3
160001	503.965746	10.192.66.90	224.0.0.150	UDP	1362	62654 → 31090 Len=1320
160002	503.966114	10.192.66.90	224.0.0.150	UDP	1362	62654 → 31090 Len=1320
160003	503.979745	10.192.66.117	224.0.0.150	UDP	1362	56099 → 31117 Len=1320
160004	503.980219	10.192.66.117	224.0.0.150	UDP	1362	56099 → 31117 Len=1320
160005	503.980396	10.192.66.117	224.0.0.150	UDP	1362	56103 → 31117 Len=1320
160006	503.981041	10.192.66.117	224.0.0.150	UDP	1362	56099 → 31117 Len=1320
160007	503.981846	10.192.66.117	224.0.0.150	UDP	1362	56099 → 31117 Len=1320

Figura VIII.XIV: Schermata del software Wireshark relativa alla rete WARTOT

In figura VIII.XIV è riportata una porzione del flusso di dati che scorre velocemente in maniera continuativa. Per analizzare i dati, è possibile fermare lo scorrimento cliccando sul secondo pulsante (quadrato rosso) presente nella barra in alto dei comandi. Ogni riga rappresenta un messaggio diverso scambiato sulla rete WARTOT: viene specificato l'indirizzo IP da cui proviene, l'indirizzo IP della destinazione, il protocollo con cui viene scambiato e altre informazioni secondarie. La maggior parte dei messaggi in figura VIII.XIV riporta lo stesso indirizzo IP di destinazione; questo perché si sta analizzando la rete interna adibita appositamente per lo scambio dei dati tramite protocollo UDP. L'indirizzo riportato è quindi l'indirizzo sul quale Labtool effettua lo streaming multicast dei dati.

0020	00 96 f4 c1 79 72 05 30	22 76 06 00 00 00 18 00	....yr 0 "v.....
0030	00 00 52 45 53 5f 50 4c	43 00 00 00 00 00 00 00	..RES_PL C.....
0040	00 00 00 00 00 00 00 00	00 00 00 00 00 00 00 00	.....
0050	00 00 52 35 30 5f 33 5f	4d 53 5f 43 4f 50 00 00	..R50_3_ MS_COP..
0060	00 00 00 00 00 00 00 00	00 00 00 00 00 00 00 00	.....
0070	00 00 00 00 80 3f 00 00	80 3f 37 89 29 3d 39 3e	.....?... ?7..)=9>
0080	da 41 52 35 30 5f 31 33	5f 4f 4e 00 00 00 00 00	.AR50_13 _ON.....
0090	00 00 00 00 00 00 00 00	00 00 00 00 00 00 00 00	.....
00a0	00 00 00 00 00 00 00 00	00 00 37 89 29 3d 39 3e	..... 7..)=9>
00b0	da 41 52 35 30 5f 33 5f	41 53 5f 43 43 50 00 00	.AR50_3_ AS_CCP..
00c0	00 00 00 00 00 00 00 00	00 00 00 00 00 00 00 00	.....
00d0	00 00 00 00 00 00 00 00	00 00 37 89 29 3d 39 3e	..... 7..)=9>
00e0	da 41 52 35 30 5f 32 5f	41 4c 00 00 00 00 00 00	.AR50_2_ AL.....
00f0	00 00 00 00 00 00 00 00	00 00 00 00 00 00 00 00	.....
0100	00 00 00 00 00 00 00 00	00 00 37 89 29 3d 39 3e	..... 7..)=9>
0110	da 41 52 35 30 5f 32 5f	4d 53 5f 43 4f 50 00 00	.AR50_2_ MS_COP..
0120	00 00 00 00 00 00 00 00	00 00 00 00 00 00 00 00	.....
0130	00 00 00 00 80 3f 00 00	80 3f 37 89 29 3d 39 3e	.....?... ?7..)=9>
0140	da 41 52 35 30 5f 32 5f	41 53 5f 43 43 50 00 00	.AR50_2_ AS_CCP..
0150	00 00 00 00 00 00 00 00	00 00 00 00 00 00 00 00	.....
0160	00 00 00 00 00 00 00 00	00 00 37 89 29 3d 39 3e	..... 7..)=9>
0170	da 41 52 35 30 5f 31 5f	4d 53 5f 43 4f 50 00 00	.AR50_1_ MS_COP..
0180	00 00 00 00 00 00 00 00	00 00 00 00 00 00 00 00	.....

Figura VIII.XV: Schermata del software Wireshark in cui sono riportati i dati scambiati all'interno di un messaggio della rete WARTOT

Selezionando uno dei messaggi, è possibile leggere il contenuto, il quale apparirà come mostrato in figura VIII.XV. Tale stringa è decifrabile e si può capire se si stanno scambiando effettivamente dei dati o se invece il messaggio è privo di informazioni utili per il programma LabView.

Capitolo IX

Conclusioni

La presente tesi ha descritto lo sviluppo di un software LabView, in collaborazione con Wärtsilä Italia, per la stima dei consumi, delle prestazioni e delle emissioni in tempo reale di motori a combustione interna per applicazioni navali. Questo lavoro si inserisce all'interno di un più ampio progetto che ha l'obiettivo di semplificare e automatizzare il lavoro a bordo nave degli operatori, rispettando le esigenze specifiche dell'industria marittima.

Il software sviluppato è stato testato su due motori differenti presenti nei laboratori Wärtsilä, dimostrando la flessibilità richiesta in fase di ideazione. Le fasi successive di sviluppo riguarderanno principalmente le prove su altre configurazioni motore, l'implementazione di nuove funzionalità e l'ottimizzazione di quelle già presenti.

Il programma trovato inizialmente era un programma funzionante, ma necessitava di essere aggiornato e sistemato in alcune aree; in particolare:

- I. aggiornamento alla versione LabView 2021 a 64 bit;
- II. aggiornamento alla versione Python 3.12.7;
- III. aggiornamento delle librerie contenenti alcune funzioni necessarie e comuni ad altri programmi utilizzati in Wärtsilä;
- IV. risoluzione dei problemi nati con i vari aggiornamenti effettuati;
- V. risoluzione dei problemi di comunicazione tra PC e rete;
- VI. risoluzione dei problemi di caricamento dei dati di configurazione motore dal database;
- VII. correzione di alcune funzioni necessarie ai calcoli;
- VIII. introduzione di nuove condizioni di calcolabilità nelle funzioni per aumentare la flessibilità del programma;

IX. implementazione delle nuove mappe SAE del compressore e della turbina nelle relative sezioni del database;

X. prove del software e controllo dei calcoli.

Tuttavia, ci sono ancora alcune sfide da affrontare per migliorare ulteriormente il software di performance. Per esempio, sarà necessario avere la possibilità di visualizzare alcune simulazioni motore effettuate tramite GTPower, che consentano all'utente una rapida valutazione del funzionamento del motore. In particolare, in base alla discrepanza tra i risultati delle simulazioni e i risultati misurati a bordo nave, l'operatore potrà compiere alcune modifiche per avvicinare le prestazioni reali a quelle teoriche. Le nuove norme internazionali antinquinamento impongono limiti sempre più severi riguardo le emissioni di anidride carbonica, per cui si stanno sviluppando combustibili alternativi come idrogeno, metanolo e ammoniaca. Ciò comporterà la necessità di un quinto metodo di calcolo dell'aria aspirata dal motore basato sull'*Oxygen Balance*, cioè il bilancio tra ingresso e uscita della concentrazione di ossigeno registrata.

In un secondo momento, sarà possibile pensare di sfruttare un'intelligenza artificiale per suggerire all'utente eventuali modifiche per migliorare le prestazioni o l'efficienza del motore. Con sistemi così avanzati, sarà possibile anche individuare in tempi rapidi eventuali malfunzionamenti o anomalie e le relative cause.

In sintesi, la realizzazione di questo software può rappresentare un significativo progresso nell'automazione del processo di valutazione delle prestazioni dei motori a combustione, fornendo ai tecnici uno strumento di analisi e monitoraggio in tempo reale che permette di risparmiare tre risorse preziose per l'azienda: il capitale umano, il tempo di lavoro e il denaro.

Bibliografia

- [1] Carrabba, Marcello. *Sviluppo di una procedura software per la stima dei consumi, delle prestazioni e delle emissioni in real-time di motori a combustione interna per applicazioni navali.*
- [2] Wärtsilä Corporation *Wärtsilä-46F-engines-brochure.pdf* 2024.
- [3] WinGD *rt-flex50df_20240718_1653.pdf* 2024.
- [4] Torelli, Michele *Manuale operativo della strumentazione di bordo.* Wärtsilä Italia S.p.a.
- [5] Horiba Ltd *User manual for portable gas analyzer PG250* luglio 1998.
- [6] Aprea, Francesco Saverio. *Sviluppo di una procedura software per la valutazione in real-time delle prestazioni di un motore per applicazioni navali.* Università degli Studi di Napoli Federico II, Scuola Politecnica e delle Scienze di Base. anno accademico 2022-2023.
- [7] Radivo, Andrea. *Tecnologie innovative per motori a due tempi dual fuel di grandi dimensioni.* Università degli Studi di Udine e Wärtsilä Italia S.p.a.
- [8] Postacchini Daniele *Tutorial-Modbus.pdf* <https://danielepostacchini.it/homepage/tutorial/>
- [9] OVERDIGIT srl innovative automation. *Protocollo Modbus su RS485.*
- [10] Postacchini Daniele *Modello-ISO-OSI.pdf* <https://danielepostacchini.it/homepage/tutorial/> Università degli Studi di Napoli, anno accademico 2022-2023.
- [11] Cartesegna, Linda. *Sviluppo di un software per la valutazione in real time delle prestazioni e delle emissioni di motori navali.* Università degli studi di Genova, Scuola Politecnica. Luglio 2021.

Appendice A

Appendice A: Elenco riassuntivo delle funzioni utilizzate

F1 $\dot{m}_{\text{air,nozzle}}$

ID function = 2404

Descrizione = Portata d'aria massica misurata con air nozzle

$t_{\text{compressor_in}} = \text{temperatura in ingresso al compressore } [{}^{\circ}\text{C}]$

$p_0 = \text{pressione iniziale (mbar)} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$

$k = \text{coefficiente geometrico del nozzle} \quad [\text{m}^2]$

$\Delta p_{\text{nozzle}} = \text{perdita di pressione (mbar)} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$

$R = 287.04 \quad [\text{J/kgK}]$

Densità dell'aria:

$$\rho = \frac{p_0}{R \cdot (T_{\text{compressor_in}} + 273.15)} \quad [\text{kg/m}^3]$$

Portata massica attraverso il nozzle:

$$\dot{m}_{\text{nozzle}} = k \cdot \sqrt{\rho \cdot |\Delta p_{\text{nozzle}}|} \quad [\text{kg/s}]$$

F2 $\dot{m}_{\text{air,engine}}$

ID function = 2405

Descrizione = Portata d'aria massica effettiva al motore, corretta per perdite di tenuta del compressore

Perdite di tenuta lato 1S: $\text{leak}_{1S} \quad [\%]$

Perdite di tenuta lato 2S: $\text{leak}_{2S} \quad [\%]$

Selettore lato: $\text{flag}_{1S/2S} \in \{0, 1\}$

$\dot{m}_{\text{air,nozzle}} = \text{portata massica calcolata con F1} \quad [\text{kg/s}]$

Perdita selezionata:

$$\text{leak} = \begin{cases} \text{leak}_{1S} & \text{se } \text{flag}_{1S/2S} = 0 \\ \text{leak}_{2S} & \text{se } \text{flag}_{1S/2S} = 1 \end{cases}$$

Portata d'aria effettiva al motore:

$$\dot{m}_{\text{air,engine}} = \dot{m}_{\text{air,nozzle}} \cdot \left(1 - \frac{\text{leak}}{100}\right) \quad [\text{kg/s}]$$

F3 P_{TIVC}

ID function = 2406

Descrizione = Pressione interno cilindro al punto morto superiore PMS o TIVC

Dati iniziali:

$$p_0 = \text{pressione iniziale (mbar)} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{receiver}} = \text{pressione collettore (bar)} \cdot 100000 \quad [\text{Pa}]$$

$$P = p_0 + p_{\text{receiver}} \quad [\text{Pa}]$$

$$n = \text{regime motore} \quad [\text{rpm}]$$

$$Bore = \text{alesaggio} \cdot 10^{-3} \quad [\text{m}]$$

$$S = \text{corsa} \cdot 10^{-3} \quad [\text{m}]$$

$$T_{IVC} = \text{temperatura all'inizio della compressione} \quad [\text{°C}]$$

Coefficiente A:A

Velocità media del pistone:

$$\text{MPS} = S \cdot \frac{n}{30} \quad [\text{m/s}]$$

Coefficiente B:

$$B = 2.7 \times 10^{-5} \cdot T_{IVC}^2 - 0.0028 \cdot T_{IVC} + 0.9732$$

Pressione corretta all'inizio della compressione:

$$p_{\text{TIVC}} = \begin{cases} \frac{P \cdot A}{B} & \text{se } Bore > 0.46 \\ \frac{P \cdot A \cdot \left(\frac{Bore}{0.46}\right)^{0.06}}{B} & \text{altrimenti} \end{cases}$$

F4 T_{IVC,estimated}

ID function = 2407

Descrizione = Stima della temperatura all'inizio della compressione (TIVC) a partire dalla temperatura nel collettore

$$T_3 = \text{temperatura nel collettore} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$T_{\text{IVC}} = \text{temperatura all'inizio della compressione (input)} \quad [\text{°C}]$$

Temperatura stimata TIVC:

$$T_{\text{IVC,estimated}} = \frac{T_3}{-0.001 \cdot T_{\text{IVC}}} + 0.9286 - 273.15 \quad [\text{°C}]$$

F5 V_{TIVC}

$$ID \text{ function} = 2408$$

Descrizione = Volume totale nel cilindro al punto morto superiore (TIVC), calcolato considerando la geometria e la posizione del pistone

$$\text{Alesaggio: } B = \text{Bore} \cdot 10^{-3} \quad [\text{m}]$$

$$\text{Corsa: } S = \text{Stroke} \cdot 10^{-3} \quad [\text{m}]$$

$$CR = \text{rapporto di compressione geometrico}$$

$$RTC = \text{rod-to-crank ratio} \quad \left(RTC = \frac{2 \cdot \text{Rod Length}}{S} \right)$$

$$T_{\text{IVC}} = \text{angolo all'inizio della compressione} \quad [\text{°}]$$

Angolo in radianti:

$$\alpha = \pi - \frac{T_{\text{IVC}} \cdot \pi}{180}$$

Corsa effettiva del pistone:

$$S_{\text{TIVC}} = \frac{S}{2} \cdot (1 + RTC) - \frac{S}{2} \cdot \cos(\alpha) - \frac{S}{2} \cdot \sqrt{RTC^2 - \sin^2(\alpha)}$$

Cilindrata effettiva:

$$V_{\text{eff}} = \frac{\pi \cdot B^2 \cdot S_{\text{TIVC}}}{4}$$

Volume morto geometrico:

$$V_d = \frac{\pi \cdot B^2 \cdot S}{4(CR-1)}$$

Volume totale al TIVC:

$$V_{\text{TIVC}} = V_d + V_{\text{eff}} \quad [\text{m}^3]$$

F6 $\dot{m}_{\text{air,trapped}}$

ID function = 2409

Descrizione = Portata d'aria massica intrappolata nel cilindro al TIVC per motore 4T

n = regime motore [rpm]

z = numero di cilindri

p_{TIVC} = pressione all'inizio della compressione (da F3) [Pa]

T_{TIVC} = temperatura all'inizio della compressione (da F4) + 273.15 [K]

V_{TIVC} = volume totale al TIVC (da F5) [m³]

$R = 287.04 \quad [\text{J/kgK}]$

Densità dell'aria al TIVC:

$$\rho_{\text{TIVC}} = \frac{p_{\text{TIVC}}}{R \cdot T_{\text{TIVC}}}$$

Portata massica intrappolata:

$$\dot{m}_{\text{air,trapped}} = 0.5 \cdot V_{\text{TIVC}} \cdot \rho_{\text{TIVC}} \cdot \left(\frac{n}{60} \right) \cdot z \quad [\text{kg/s}]$$

F7 $\dot{m}_{\text{air,corrected}}$

ID function = 2410

Descrizione = Portata d'aria massica corretta per perdite di tenuta del compressore, calcolata a partire dalla massa intrappolata nel cilindro

Perdite di tenuta lato 1S: leak_{1S} [%]

Perdite di tenuta lato 2S: leak_{2S} [%]

Selettore lato: $\text{flag}_{1S/2S} \in \{0, 1\}$

$\dot{m}_{\text{air,trapped}}$ = portata massica intrappolata nel cilindro (da F6) [kg/s]

Perdita selezionata:

$$\text{leak} = \begin{cases} \text{leak}_{1S} & \text{se } \text{flag}_{1S/2S} = 0 \\ \text{leak}_{2S} & \text{se } \text{flag}_{1S/2S} = 1 \end{cases}$$

Portata d'aria corretta:

$$\text{air,corrected} = \frac{\dot{m}_{\text{air,trapped}}}{1 - \frac{\text{leak}}{100}} \quad [\text{kg/s}]$$

F8 P_{EVC}

ID function = 2411

Descrizione = Pressione nel cilindro al momento della chiusura della valvola di scarico (EVC), calcolata in funzione della velocità media del pistone

p_0 = pressione iniziale (mbar) · 100 [Pa]

$p_{\text{turbine_in}}$ = pressione in ingresso alla turbina (bar) · 100000 [Pa]

n = regime motore [rpm]

S = corsa del pistone · 10^{-3} [m]

Velocità media del pistone:

$$\text{MPS} = S \cdot n \overline{30} \quad [\text{m/s}]$$

Pressione al momento della chiusura della valvola di scarico:

$$P_{\text{EVC}} = (p_0 + p_{\text{turbine_in}}) \cdot (1 + 0.005 \cdot e^{0.34 \cdot MPS}) \quad [\text{Pa}]$$

F9 k_{air}

ID function = 2412

Descrizione = Calcolo del coefficiente isoentropico dell'aria in funzione delle temperature in ingresso e uscita dal compressore

$T_{\text{in}} = \text{temperatura ingresso compressore} + 273.15 \quad [\text{K}]$

$T_{\text{out}} = \text{temperatura uscita compressore} + 273.15 \quad [\text{K}]$

Coefficiente isoentropico dell'aria:

$$k_{\text{air}} = -1.2 \times 10^{-7} \cdot (T_{\text{in}}^2 + T_{\text{out}}^2) + \frac{2.78 \times 10^{-5} \cdot (T_{\text{in}} + T_{\text{out}})}{2} + 1.40324$$

$F10 \ V_{\text{EVC}}$

ID function = 2413

Descrizione = Volume totale nel cilindro al momento della chiusura della valvola di scarico (EVC), calcolato in base alla geometria e cinematica del pistone

$B = \text{alesaggio} \cdot 10^{-3} \quad [\text{m}]$

$S = \text{corsa} \cdot 10^{-3} \quad [\text{m}]$

$CR = \text{rapporto di compressione geometrico}$

$RTC = \text{rod-to-crank ratio}$

$EVC = \text{angolo di chiusura valvola di scarico} \quad [{}^\circ]$

Angolo in radianti:

$$\alpha = \pi - \frac{EVC \cdot \pi}{180}$$

Corsa effettiva del pistone:

$$S_{\text{EVC}} = \begin{cases} \frac{S}{2} \cdot (1 + RTC) - \frac{S}{2} \cdot \cos(\alpha) - \frac{S}{2} \cdot \sqrt{RTC^2} & \text{se } \sin(\alpha) < 10^{-10} \\ \frac{S}{2} \cdot (1 + RTC) - \frac{S}{2} \cdot \cos(\alpha) - \frac{S}{2} \cdot \sqrt{RTC^2 - \sin^2(\alpha)} & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Cilindrata effettiva:

$$V_{\text{eff}} = \frac{\pi \cdot B^2 \cdot S_{\text{EVC}}}{4}$$

Volume morto geometrico:

$$V_d = \frac{\pi \cdot B^2 \cdot S}{4(CR-1)}$$

Volume totale al momento dell'EVC:

$$V_{\text{EVC}} = V_d + V_{\text{eff}} \quad [\text{m}^3]$$

F11 T_{EVC}

ID function = 2414

Descrizione = Stima della temperatura nel cilindro al momento della chiusura della valvola di scarico (EVC), corretta per effetto termico reale

p_0 = pressione iniziale (mbar) · 100 [Pa]

p_{receiver} = pressione nel collettore (bar) · 100000 [Pa]

T_{receiver} = temperatura nel collettore [°C]

p_{EVC} = pressione al momento dell'EVC (da F8) [Pa]

k_{air} = coefficiente isoentropico dell'aria (da F9)

Temperatura stimata al momento dell'EVC:

$$T_{\text{EVC}} = (T_{\text{receiver}} + 7 + 273.15) \cdot \left(\frac{p_{\text{EVC}}}{p_0 + p_{\text{receiver}}} \right)^{\frac{k_{\text{air}} - 1}{k_{\text{air}}}} - 273.15 \quad [\text{°C}]$$

F12 $\dot{m}_{\text{air,engine,EVC}}$

ID function = 2415

Descrizione = Portata d'aria massica nel cilindro al momento della chiusura della valvola di scarico (EVC), calcolata in base a pressione, volume e temperatura

n = regime motore [rpm]

z = numero di cilindri

p_{EVC} = pressione al momento dell'EVC (da F8) [Pa]

V_{EVC} = volume totale al momento dell'EVC (da F10) [m³]

T_{EVC} = temperatura al momento dell'EVC (da F11) [°C]

Densità dell'aria al momento dell'EVC:

$$\rho_{\text{EVC}} = \frac{p_{\text{EVC}}}{287.04 \cdot (T_{\text{EVC}} + 273.15)} \quad [\text{kg/m}^3]$$

Portata massica nel cilindro al momento dell'EVC:

$$\dot{m}_{\text{air,engine,EVC}} = V_{\text{EVC}} \cdot \rho_{\text{EVC}} \cdot \left(\frac{n}{60} \right) \cdot z \quad [\text{kg/s}]$$

F13 $\dot{m}_{\text{air,nozzle,EVC}}$

ID function = 2416

Descrizione = Portata d'aria massica corretta per perdite di tenuta del compressore, calcolata a partire dalla massa nel cilindro al momento dell'EVC

Perdita di tenuta del compressore: $\text{leak}_{\text{compressor}} \quad [\%]$

$\dot{m}_{\text{air,engine,EVC}}$ = portata massica nel cilindro al momento dell'EVC (da F12) $[\text{kg/s}]$

Portata d'aria corretta:

$$\dot{m}_{\text{air,nozzle,EVC}} = \frac{\dot{m}_{\text{air,engine,EVC}}}{1 - \frac{\text{leak}_{\text{compressor}}}{100}} \quad [\text{kg/s}]$$

F14 $CR_{\text{eff,4T}}$

ID function = 2417

Descrizione = Rapporto di compressione effettivo per motore 4T, calcolato in base alla geometria e all'angolo di chiusura valvola di aspirazione

CR = rapporto di compressione geometrico

RTC = rod-to-crank ratio

T_{IVC} = angolo di chiusura valvola di aspirazione $[\circ]$

Angolo in radianti:

$$\alpha = \pi - \frac{T_{\text{IVC}} \cdot \pi}{180}$$

Rapporto di compressione effettivo:

$$CR_{\text{eff,4T}} = 0.5 \cdot \left((1 + RTC) - \cos(\alpha) - \sqrt{RTC^2 - \sin^2(\alpha)} \right) \cdot (CR - 1) + 1$$

F15 CR_{eff,EVC}

ID function = 2418

Descrizione = Rapporto di compressione effettivo calcolato al momento della chiusura della valvola di scarico (EVC), con correzione geometrica

CR = rapporto di compressione geometrico

RTC = rod-to-crank ratio

EVC = angolo reale di chiusura valvola di scarico [°]

S = corsa del pistone · 10⁻³ [m]

B = alesaggio · 10⁻³ [m]

$$\pi_4 = \frac{\pi}{4}$$

Angolo in radianti:

$$\alpha = \frac{(360 - EVC) \cdot \pi}{180}$$

Corsa effettiva del pistone:

$$S_{EVC} = \begin{cases} \frac{S}{2} \cdot (1 + RTC) - \frac{S}{2} \cdot \cos(\alpha) - \frac{S}{2} \cdot \sqrt{RTC^2} & \text{se } \sin(\alpha) < 10^{-10} \\ \frac{S}{2} \cdot (1 + RTC) - \frac{S}{2} \cdot \cos(\alpha) - \frac{S}{2} \cdot \sqrt{RTC^2 - \sin^2(\alpha)} & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Rapporto di compressione effettivo:

$$CR_{\text{eff},EVC} = \frac{\pi_4 \cdot B^2 \cdot S_{EVC} + \pi_4 \cdot B^2 \cdot \frac{S}{CR-1}}{\pi_4 \cdot B^2 \cdot \frac{S}{CR-1}}$$

Condizione di correzione:

se $CR_{\text{eff},EVC} < 5 \Rightarrow CR_{\text{eff},EVC} = CR$

F16 BSFC

ID function = 2419

Descrizione = Consumo specifico di combustibile (BSFC), calcolato tenendo conto del tipo di combustibile e delle perdite di misura

Caso 1: combustibile gas

- Se Fuel_Gas = 2 e Double_flow_gas = 1 allora:

$$m_{\text{net}} = m_{\text{gas}} + m_{\text{gas},2}$$

- Altrimenti:

$$m_{\text{net}} = m_{\text{gas}}$$

Caso 2: combustibile liquido (LFO o HFO)

- Se m_loss_GravityTank = -2222222 e m_loss_net = -2222222 allora:

$$m_{\text{loss}} = 0$$

- Altrimenti:

$$m_{\text{loss}} = \begin{cases} m_{\text{loss,GravityTank}} & \text{se } m_{\text{loss,GravityTank}} \neq -2222222 \\ m_{\text{loss,net}} & \text{altrimenti} \end{cases}$$

- Priorità Gravity Tank:

$$m = \begin{cases} m_{\text{oil,GravityTank}} & \text{se } m_{\text{oil,GravityTank}} \neq -2222222 \\ m_{\text{oil,IN}} - m_{\text{oil,OUT}} & \text{se } m_{\text{fuel,net}} = -2222222 \\ m_{\text{fuel,net}} & \text{altrimenti} \end{cases}$$

$$m_{\text{net}} = m - m_{\text{loss}}$$

Calcolo finale del BSFC

$$BSFC = \begin{cases} 0 & \text{se } P_{\text{eng}} = 0 \\ \frac{1000 \cdot m_{\text{net}}}{P_{\text{eng}}} & \text{altrimenti} \end{cases} \quad [\text{g/kWh}]$$

F17 BSFC_{pilot}

ID function = 2420

Descrizione = Consumo specifico di combustibile pilota (BSFC_{pilot}), calcolato in base alla potenza erogata e alla misura del flusso olio pilota

P_{eng} = potenza erogata dal motore (da F208) [kW]

Se $P_{\text{eng}} = 0 \Rightarrow BSFC_{\text{pilot}} = 0$

Verifica assenza sensori:

Se $m_{\text{pilot,GravityTank}} = -2222222$ e $m_{\text{pilot,IN}} = -2222222$ e $m_{\text{pilot,OUT}} = -2222222 \Rightarrow BSFC_{\text{pilot}} = 0$

Priorità Gravity Tank:

Se $m_{\text{pilot,GravityTank}} \neq -2222222 \Rightarrow m_{\text{net}} = m_{\text{pilot,GravityTank}}$

Altrimenti $m_{\text{net}} = m_{\text{pilot,IN}} - m_{\text{pilot,OUT}}$

Consumo specifico pilota:

$$BSFC_{\text{pilot}} = \frac{1000 \cdot m_{\text{net}}}{P_{\text{eng}}} \quad [\text{g/kWh}]$$

F18 C_{mix}

ID function = 2421

Descrizione = Concentrazione media di carbonio allo scarico, calcolata in base al tipo di combustibile e ai consumi specifici

C_{main} = concentrazione di carbonio del combustibile principale [%]

C_{pilot} = concentrazione di carbonio del combustibile pilota [%]

Fuel_{Gas} = selettore tipo combustibile $\in \{0, 1, 2\}$

$BSFC$ = consumo specifico di combustibile principale (da F16) [g/kWh]

$BSFC_{\text{pilot}}$ = consumo specifico di combustibile pilota (da F17) [g/kWh]

Condizione motore spento:

Se $BSFC = 0$ e $BSFC_{\text{pilot}} = 0 \Rightarrow C_{\text{mix}} = 0$

Selezione concentrazione principale:

$$C_{\text{cont}} = \begin{cases} C_{\text{pilot}} & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 1 \\ C_{\text{main}} & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Concentrazione media di carbonio allo scarico:

$$C_{\text{mix}} = \frac{C_{\text{cont}} \cdot BSFC + C_{\text{pilot}} \cdot BSFC_{\text{pilot}}}{BSFC + BSFC_{\text{pilot}}} \quad [\%]$$

F19 H_{mix}

ID function = 2422

Descrizione = Concentrazione media di idrogeno allo scarico, calcolata in base al tipo di combustibile e ai consumi specifici

H_{main} = concentrazione di idrogeno del combustibile principale [%]

H_{pilot} = concentrazione di idrogeno del combustibile pilota [%]

Fuel_{Gas} = selettore tipo combustibile $\in \{0, 1, 2\}$

$BSFC$ = consumo specifico di combustibile principale (da F16) [g/kWh]

$BSFC_{\text{pilot}}$ = consumo specifico di combustibile pilota (da F17) [g/kWh]

Condizione motore spento:

Se $BSFC = 0$ e $BSFC_{\text{pilot}} = 0 \Rightarrow H_{\text{mix}} = 0$

Selezione concentrazione principale:

$$H_{\text{cont}} = \begin{cases} H_{\text{pilot}} & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 1 \\ H_{\text{main}} & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Concentrazione media di idrogeno allo scarico:

$$H_{\text{mix}} = \frac{H_{\text{cont}} \cdot BSFC + H_{\text{pilot}} \cdot BSFC_{\text{pilot}}}{BSFC + BSFC_{\text{pilot}}} \quad [\%]$$

F20 N_{mix}

ID function = 2423

Descrizione = Concentrazione media di azoto allo scarico, calcolata in base al tipo

di combustibile e ai consumi specifici

N_{main} = concentrazione di azoto del combustibile principale [%]

N_{pilot} = concentrazione di azoto del combustibile pilota [%]

Fuel_{Gas} = selettore tipo combustibile $\in \{0, 1, 2\}$

$BSFC$ = consumo specifico di combustibile principale (da F16) [g/kWh]

$BSFC_{\text{pilot}}$ = consumo specifico di combustibile pilota (da F17) [g/kWh]

Condizione motore spento:

Se $BSFC = 0$ e $BSFC_{\text{pilot}} = 0 \Rightarrow N_{\text{mix}} = 0$

Selezione concentrazione principale:

$$N_{\text{cont}} = \begin{cases} N_{\text{pilot}} & \text{se } \text{Fuel}_{\text{Gas}} = 1 \\ N_{\text{main}} & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Concentrazione media di azoto allo scarico:

$$N_{\text{mix}} = \frac{N_{\text{cont}} \cdot BSFC + N_{\text{pilot}} \cdot BSFC_{\text{pilot}}}{BSFC + BSFC_{\text{pilot}}} [\%]$$

F21 O_{mix}

ID function = 2424

Descrizione = Concentrazione media di ossigeno allo scarico, calcolata in base al tipo di combustibile e ai consumi specifici

O_{main} = concentrazione di ossigeno del combustibile principale [%]

O_{pilot} = concentrazione di ossigeno del combustibile pilota [%]

Fuel_{Gas} = selettore tipo combustibile $\in \{0, 1, 2\}$

$BSFC$ = consumo specifico di combustibile principale (da F16) [g/kWh]

$BSFC_{\text{pilot}}$ = consumo specifico di combustibile pilota (da F17) [g/kWh]

Condizione motore spento:

Se $BSFC = 0$ e $BSFC_{\text{pilot}} = 0 \Rightarrow O_{\text{mix}} = 0$

Selezione concentrazione principale:

$$O_{\text{cont}} = \begin{cases} O_{\text{pilot}} & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 1 \\ O_{\text{main}} & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Concentrazione media di ossigeno allo scarico:

$$O_{\text{mix}} = \frac{O_{\text{cont}} \cdot BSFC + O_{\text{pilot}} \cdot BSFC_{\text{pilot}}}{BSFC + BSFC_{\text{pilot}}} \quad [\%]$$

F22 S_{mix}

ID function = 2425

Descrizione = Concentrazione media di zolfo allo scarico, calcolata in base al tipo di combustibile e ai consumi specifici

S_{main} = concentrazione di zolfo del combustibile principale [%]

S_{pilot} = concentrazione di zolfo del combustibile pilota [%]

Fuel_{Gas} = selettore tipo combustibile $\in \{0, 1, 2\}$

$BSFC$ = consumo specifico di combustibile principale (da F16) [g/kWh]

$BSFC_{\text{pilot}}$ = consumo specifico di combustibile pilota (da F17) [g/kWh]

Condizione motore spento:

Se $BSFC = 0$ e $BSFC_{\text{pilot}} = 0 \Rightarrow S_{\text{mix}} = 0$

Selezione concentrazione principale:

$$S_{\text{cont}} = \begin{cases} S_{\text{pilot}} & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 1 \\ S_{\text{main}} & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Concentrazione media di zolfo allo scarico:

$$S_{\text{mix}} = \frac{S_{\text{cont}} \cdot BSFC + S_{\text{pilot}} \cdot BSFC_{\text{pilot}}}{BSFC + BSFC_{\text{pilot}}} \quad [\%]$$

F24 H_s

ID function = 2426

Descrizione = Umidità specifica dell'aria di aspirazione, calcolata in funzione della

pressione, temperatura e umidità relativa

p_0 = pressione atmosferica [mbar]

T_{rh} = temperatura dell'umidità relativa [°C]

H_r = umidità relativa [gH₂O/kg_{aria secca}]

Pressione di saturazione del vapore (Goff-Grach 1946, modificata IMO 1975):

$$p_d = \frac{101.32}{760} \cdot \begin{pmatrix} 4.856884 + 0.2660089T_{\text{rh}} + 0.01688919T_{\text{rh}}^2 \\ - 7.477123 \cdot 10^{-5}T_{\text{rh}}^3 + 8.10525 \cdot 10^{-6}T_{\text{rh}}^4 \\ - 3.115221 \cdot 10^{-8}T_{\text{rh}}^5 \end{pmatrix} \quad [\text{bar}]$$

Umidità specifica dell'aria di aspirazione:

$$H_s = \frac{H_r \cdot p_d \cdot 180}{28.96 \cdot (0.1 \cdot p_0 - 0.01 \cdot H_r \cdot p_d)} \quad [\text{gH}_2\text{O}/\text{kg}_{\text{aria secca}}]$$

F25 k_{DtW}

ID function = 2427

Descrizione = Coefficiente di conversione da concentrazione secca a umida (Dry-to-Wet), valido per tutti gli inquinanti tranne gli NOx

CO_2 = concentrazione secca di anidride carbonica [%]

CO = concentrazione secca di monossido di carbonio [ppm → %]

P_{eng} = potenza del motore (da F208) [kW]

C_{mix} = concentrazione media di carbonio (da F18) [%]

H_{mix} = concentrazione media di idrogeno (da F19) [%]

H_a = umidità specifica dell'aria aspirata (da F24) [gH₂O/kg_{aria secca}]

Condizione motore spento:

Se $P_{\text{eng}} = 0 \Rightarrow k_{\text{DtW}} = 0$

Condizione AMA disattivato:

Se $CO_2 = 0$ e $CO = 0 \Rightarrow k_{\text{DtW}} = -0.00001$

Altrimenti:

$$A = H_{\text{mix}} \overline{C_{\text{mix}} \cdot (CO_2 + CO)}$$

$$k_{\text{DtW}} = \left[1 + 0.005 \cdot 11.9164 \cdot A - \frac{0.01 \cdot 0.5 \cdot 11.9164 \cdot A \cdot CO}{3 \cdot CO_2 + CO} + \frac{1.608 \cdot H_a}{1000 + 1.608 \cdot H_a} + 0.00794 \right]^{-1}$$

F26 f_c

ID function = 2428

Descrizione = Fattore di emissione del carbonio, calcolato in base alle concentrazioni di CO, CO e THC, con correzione Dry-to-Wet

CO_2 = concentrazione di anidride carbonica secca [%]

CO = concentrazione di monossido di carbonio [ppm]

THC_{dry} = idrocarburi totali misurati a secco [ppm]

THC_{wet} = idrocarburi totali misurati a umido [ppm]

$THC_{\text{dry/wet}}$ = selettore tipo misura THC $\in \{0, 1\}$

k_{DtW} = coefficiente Dry-to-Wet (da F25)

$CO_{2,\text{air}}$ = 0.04 [%]

Condizione motore spento:

$$\text{Se } k_{\text{DtW}} = 0 \Rightarrow f_c = 0$$

Condizione AMA disattivato:

$$\text{Se } k_{\text{DtW}} = -0.00001 \Rightarrow f_c = -0.00001$$

Altrimenti:

Se $THC_{\text{dry/wet}} = 1$ (Dry)

$$f_c = 0.5441 \cdot (CO_2 - CO_{2,\text{air}}) + \frac{CO}{18522} + \frac{THC_{\text{dry}} \cdot k_{\text{DtW}}}{17355}$$

Se $THC_{\text{dry/wet}} = 0$ (Wet)

$$f_c = 0.5441 \cdot (CO_2 - CO_{2,\text{air}}) + \frac{CO}{18522} + \frac{THC_{\text{wet}}}{17355}$$

F27 $\dot{m}_{\text{exh,CB}}$

ID function = 2429

Descrizione = Portata massica dei gas di scarico calcolata secondo il metodo del carbonio bilanciato (Carbon Balance), con correzioni per composizione del combustibile e umidità

Se $f_c = 0 \Rightarrow \dot{m}_{\text{exh,CB}} = 0$ (motore spento)

Se $f_c = -0.00001 \Rightarrow \dot{m}_{\text{exh,CB}} = -0.00001$ (AMA disattivato)

Portata di combustibile:

$$m_{\text{net}} = \begin{cases} m_{\text{gas}} + m_{\text{gas},2} & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \text{ e Double_flow}_{\text{gas}} = 1 \\ m_{\text{gas}} & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \text{ e Double_flow}_{\text{gas}} = 0 \\ m_{\text{oil,GravityTank}} - m_{\text{loss}} & \text{se disponibile} \\ m_{\text{oil,IN}} - m_{\text{oil,OUT}} - m_{\text{loss}} & \text{se } m_{\text{fuel,net}} = -2222222 \\ m_{\text{fuel,net}} - m_{\text{loss}} & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Costante correttiva per composti non misurati:

$$\text{ffd} = -0.055593 \cdot C_H + 0.008002 \cdot C_N + 0.0070046 \cdot C_O$$

Portata dei gas di scarico (Carbon Balance):

$$\dot{m}_{\text{exh,CB}} = m_{\text{net}} \cdot \left[\left(\frac{1.4 \cdot C_C^2}{\left(\frac{1.4 \cdot C_C}{f_c} + 0.08936 \cdot C_H - 1 \right) \cdot \frac{1}{1.293} + ffd} \cdot \frac{1}{f_c^2} + 0.08936 \cdot C_H - 1 \right) \cdot \left(1 + \frac{H_a}{1000} \right) + 1 \right]$$

F28 $\dot{m}_{\text{air,CB}}$

ID function = 2430

Descrizione = Portata d'aria in ingresso al motore, calcolata per bilancio di massa a partire dalla portata dei gas di scarico e dal consumo di combustibile

P_{eng} = potenza del motore (da F208) [kW]

$BSFC$ = consumo specifico di combustibile principale (da F16) [g/kWh]

$BSFC_{\text{pilot}}$ = consumo specifico di combustibile pilota (da F17) [g/kWh]

$\dot{m}_{\text{exh,CB}}$ = portata dei gas di scarico (da F27) [kg/h]

Condizione motore spento:

Se $P_{\text{eng}} = 0 \Rightarrow \dot{m}_{\text{air,CB}} = 0$

Condizione AMA disattivato:

Se $\dot{m}_{\text{exh,CB}} = -0.00001 \Rightarrow \dot{m}_{\text{air,CB}} = -0.00001$

Altrimenti:

$$\dot{m}_{\text{air,CB}} = \frac{\dot{m}_{\text{exh,CB}} - (BSFC + BSFC_{\text{pilot}}) \cdot P_{\text{eng}}}{3600} \quad [\text{kg/s}]$$

F29 \dot{m}_{CB}

ID function = 2431

Descrizione = Portata massica dell'aria corretta per perdite, calcolata secondo il metodo del bilancio del carbonio

leak_{1S} = perdita lato 1S [%]

leak_{2S} = perdita lato 2S [%]

$\text{flag}_{1S/2S}$ = selettore lato perdita $\in \{0, 1\}$

$\dot{m}_{\text{air,CB}}$ = portata d'aria calcolata da bilancio del carbonio (da F28) [kg/s]

Condizione motore spento:

Se $\dot{m}_{\text{air,CB}} = 0 \Rightarrow \dot{m}_{\text{CB}} = 0$

Condizione AMA disattivato:

Se $\dot{m}_{\text{air,CB}} = -0.00001 \Rightarrow \dot{m}_{\text{CB}} = -0.00001$

Selezione perdita:

$$\text{leak} = \begin{cases} \text{leak}_{1S} & \text{se } \text{flag}_{1S/2S} = 0 \\ \text{leak}_{2S} & \text{se } \text{flag}_{1S/2S} = 1 \end{cases}$$

Portata massica corretta:

$$m_{\text{CB}} = \frac{\dot{m}_{\text{air,CB}}}{1 - \frac{\text{leak}}{100}} \quad [\text{kg/s}]$$

F30 $\dot{m}_{\text{exh,nozzle}}$

ID function = 2432

Descrizione = Portata massica dei gas di scarico calcolata come somma della portata d'aria in ingresso e della portata di combustibile bruciato

P_{eng} = potenza del motore (da F208) [kW]

$BSFC$ = consumo specifico di combustibile principale (da F16) [kg/kWh]

$BSFC_{\text{pilot}}$ = consumo specifico di combustibile pilota (da F17) [kg/kWh]

$\dot{m}_{\text{air,engine}}$ = portata d'aria in ingresso al motore (da F2) · 3600 [kg/h]

Portata dei gas di scarico:

$$\dot{m}_{\text{exh,nozzle}} = \dot{m}_{\text{air,engine}} + (BSFC + BSFC_{\text{pilot}}) \cdot P_{\text{eng}} \quad [\text{kg/h}]$$

F31 $\dot{m}_{\text{exh,EC4T}}$

ID function = 2433

Descrizione = Portata massica dei gas di scarico per motore 4T, calcolata come somma tra aria intrappolata e combustibile bruciato

P_{eng} = potenza del motore (da F208) [kW]

$\dot{m}_{\text{air,trapped}}$ = portata d'aria intrappolata nel cilindro (da F6) · 3600 [kg/h]

$BSFC$ = consumo specifico di combustibile principale (da F16) [kg/kWh]

$BSFC_{\text{pilot}}$ = consumo specifico di combustibile pilota (da F17) [kg/kWh]

Portata dei gas di scarico:

$$\dot{m}_{\text{exh,EC4T}} = \dot{m}_{\text{air,trapped}} + (BSFC + BSFC_{\text{pilot}}) \cdot P_{\text{eng}} \quad [\text{kg/h}]$$

F32 $\dot{m}_{\text{exh,EC2T}}$

ID function = 2434

Descrizione = Portata massica dei gas di scarico per motore 2T, calcolata come somma tra aria intrappolata e combustibile bruciato

P_{eng} = potenza del motore (da F208) [kW]

$\dot{m}_{\text{air,trapped}}$ = portata d'aria intrappolata nel cilindro (da F12) · 3600 [kg/h]

$BSFC$ = consumo specifico di combustibile principale (da F16) ÷ 1000 [kg/kWh]

$BSFC_{\text{pilot}}$ = consumo specifico di combustibile pilota (da F17) ÷ 1000 [kg/kWh]

Portata dei gas di scarico:

$$\dot{m}_{\text{exh,EC2T}} = \dot{m}_{\text{air,trapped}} + (BSFC + BSFC_{\text{pilot}}) \cdot P_{\text{eng}} \quad [\text{kg/h}]$$

F33 $BSAC_{\text{nozzle}}$

ID function = 2435

Descrizione = Consumo specifico d'aria per ugello, calcolato in base alla portata d'aria, numero di turbine e potenza del motore

P_{eng} = potenza del motore (da F208) [kW]

n_{TC} = numero di turbine di sovralimentazione [-]

\dot{m}_{nozzle} = portata d'aria all'ugello (da F1) · 3600 [kg/h]

Consumo specifico d'aria all'ugello:

$$\text{BSAC}_{\text{nozzle}} = \frac{1000 \cdot \dot{m}_{\text{nozzle}} \cdot n_{\text{TC}}}{P_{\text{eng}}} \quad [\text{g/kWh}]$$

F34 BSAC_{EC4T}

ID function = 2436

Descrizione = Consumo specifico d'aria per motore 4T, calcolato in base alla portata d'aria intrappolata, numero di turbine e potenza del motore

P_{eng} = potenza del motore (da F208) [kW]

n_{TC} = numero di turbine di sovralimentazione [-]

\dot{m}_{EC4T} = portata d'aria intrappolata nel motore 4T (da F7) · 3600 [kg/h]

Consumo specifico d'aria per motore 4T:

$$\text{BSAC}_{\text{EC4T}} = \frac{1000 \cdot \dot{m}_{\text{EC4T}} \cdot n_{\text{TC}}}{P_{\text{eng}}} \quad [\text{g/kWh}]$$

F35 BSAC_{EC2T}

ID function = 2437

Descrizione = Consumo specifico d'aria per motore 2T, calcolato in base alla portata d'aria intrappolata, numero di turbine e potenza del motore

P_{eng} = potenza del motore (da F208) [kW]

n_{TC} = numero di turbine di sovralimentazione [-]

\dot{m}_{EC2T} = portata d'aria intrappolata nel motore 2T (da F13) · 3600 [kg/h]

Consumo specifico d'aria per motore 2T:

$$\text{BSAC}_{\text{EC2T}} = \frac{1000 \cdot \dot{m}_{\text{EC2T}} \cdot n_{\text{TC}}}{P_{\text{eng}}} \quad [\text{g/kWh}]$$

F36 BSAC_{CB}

ID function = 2438

Descrizione = Consumo specifico d'aria calcolato secondo il metodo del bilancio del carbonio, con correzione per numero di turbine e potenza del motore

P_{eng} = potenza del motore (da F208) [kW]

n_{TC} = numero di turbine di sovralimentazione [-]

\dot{m}_{CB} = portata d'aria corretta per perdite (da F29) · 3600 [kg/h]

Condizione motore spento:

$$\text{Se } P_{\text{eng}} = 0 \Rightarrow BSAC_{\text{CB}} = 0$$

Condizione AMA disattivato:

$$\text{Se } \dot{m}_{\text{CB}} = -0.00001 \cdot 3600 \Rightarrow BSAC_{\text{CB}} = -0.00001$$

Altrimenti:

$$BSAC_{\text{CB}} = \frac{1000 \cdot \dot{m}_{\text{CB}} \cdot n_{\text{TC}}}{P_{\text{eng}}} \quad [\text{g/kWh}]$$

F37 BSEC_{fuel}

ID function = 2439

Descrizione = Consumo specifico di energia del combustibile, calcolato in base al potere calorifico e al consumo specifico di massa

$LHV_{HFO/GAS}$ = potere calorifico inferiore del combustibile principale (HFO o GAS) $\div 1000$ [kJ/kg]

LHV_{LFO} = potere calorifico inferiore del combustibile LFO $\div 1000$ [kJ/kg]

$Fuel_{Gas}$ = selettore tipo combustibile $\in \{0, 1, 2\}$

$BSFC$ = consumo specifico di combustibile (da F16) $\cdot 1000$ [kg/kWh]

Selezione potere calorifico:

$$LHV = \begin{cases} LHV_{LFO} & \text{se } Fuel_{Gas} = 1 \\ LHV_{HFO/GAS} & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Consumo specifico di energia del combustibile:

$$BSEC_{fuel} = BSFC \cdot LHV \quad [\text{kJ/kWh}]$$

F38 BSEC_{pilot}

ID function = 2440

Descrizione = Consumo specifico di energia del combustibile pilota, calcolato in base al potere calorifico e al consumo specifico di massa

LHV = potere calorifico inferiore del combustibile pilota $\div 1000$ [kJ/kg]

$BSFC_{pilot}$ = consumo specifico di combustibile pilota (da F17) $\cdot 1000$ [kg/kWh]

Consumo specifico di energia del combustibile pilota:

$$BSEC_{pilot} = BSFC_{pilot} \cdot LHV \quad [\text{kJ/kWh}]$$

F39 BSFC_{corr}

ID function = 2441

Descrizione = Correzione del consumo specifico di combustibile in base al potere calorifico reale rispetto a uno standard di riferimento

LHV = potere calorifico inferiore reale del combustibile [MJ/kg]

$Fuel_{Gas}$ = selettore tipo combustibile $\in \{0, 1, 2\}$

$BSFC$ = consumo specifico di combustibile (da F16) [g/kWh]

Costante di riferimento:

$$c = \begin{cases} 42.7 & \text{se } Fuel_{Gas} = 2 \quad (\text{HFO/LFO}) \\ 50 & \text{altrimenti (Gas)} \end{cases}$$

Consumo specifico corretto:

$$BSFC_{corr} = \frac{BSFC \cdot LHV}{c} \quad [\text{g/kWh}]$$

F40 BSFC_{corr,pilot}

ID function = 2442

Descrizione = Correzione del consumo specifico di combustibile pilota in base al potere calorifico reale rispetto allo standard LFO

LHV = potere calorifico inferiore reale del combustibile pilota [MJ/kg]

$BSFC_{pilot}$ = consumo specifico di combustibile pilota (da F17) [g/kWh]

$c = 42.7$ (potere calorifico standard dell'LFO) [MJ/kg]

Consumo specifico corretto del combustibile pilota:

$$BSFC_{corr,pilot} = \frac{BSFC_{pilot} \cdot LHV}{c} \quad [\text{g/kWh}]$$

F41 P_{1,dyn}

ID function = 2443

Descrizione = Pressione dinamica all'ingresso del compressore, calcolata con ugello ISA-1932 per flussi ad alta velocità e non viscosi

Δp_{nozzle} = perdita di pressione misurata all'ugello [mbar]

nozzle = selettore presenza ugello ISA-1932 $\in \{0, 1\}$

Condizione senza ugello:

Se nozzle = 0 $\Rightarrow p_{1,\text{dyn}} = 0$ [Pa]

Condizione con ugello ISA-1932:

Se nozzle = 1 $\Rightarrow p_{1,\text{dyn}} = (0.0625 \cdot \Delta p_{\text{nozzle}} + 0.018) \cdot 100$ [Pa]

F42 $P_{2,\text{dyn,nozzle}}$

ID function = 2444

Descrizione = Pressione dinamica a valle del compressore, calcolata con geometria nozzle e correzione per perdite

$t_{\text{compressor,out}}$ = temperatura uscita compressore + 273.15 [K]

p_0 = pressione a monte del compressore $\cdot 100$ [Pa]

$p_{\text{compressor,out}}$ = pressione uscita compressore $\cdot 100000$ [Pa]

$D_{\text{compressor,out}}$ = diametro uscita compressore $\cdot 10^{-3}$ [m]

leak_{compressor} = perdita stimata del compressore [%]

$R = 287.04$ [J/kg·K]

m = portata d'aria a monte del compressore (da F1) [kg/s]

$$n_{\text{stages}} = \begin{cases} 1 & \text{se oneS_twoS} = 0 \\ 2 & \text{se oneS_twoS} = 1 \end{cases}$$

Densità dell'aria aspirata:

$$\rho = \frac{p_0 + p_{\text{compressor,out}}}{R \cdot t_{\text{compressor,out}}} \quad [\text{kg/m}^3]$$

Portata corretta a monte del compressore:

$$m_{\text{corr}} = m \cdot \left(1 - \frac{\text{leak}_{\text{compressor}}}{100} \right) \quad [\text{kg/s}]$$

Velocità media dell'aria in uscita dal compressore:

$$x = \frac{4 \cdot m_{\text{corr}}}{\pi \cdot n_{\text{stages}} \cdot D_{\text{compressor,out}}^2} \quad [\text{m/s}]$$

Pressione dinamica a valle del compressore:

$$P_{2,\text{dyn,nozzle}} = \frac{0.5 \cdot x^2}{\rho} \quad [\text{Pa}]$$

F43 P_{2,dyn,EC4T}

ID function = 2445

Descrizione = Pressione dinamica a valle del compressore per motore 4T, calcolata con correzione per perdite e numero di stadi

$t_{\text{compressor,out}}$ = temperatura uscita compressore + 273.15 [K]

p_0 = pressione a monte del compressore · 100 [Pa]

$p_{\text{compressor,out}}$ = pressione uscita compressore · 100000 [Pa]

$D_{\text{compressor,out}}$ = diametro uscita compressore · 10^{-3} [m]

$\text{leak}_{\text{compressor}}$ = perdita stimata del compressore [%]

$R = 287.04$ [J/kg·K]

m = portata d'aria a monte del compressore (da F7) [kg/s]

$$n_{\text{stages}} = \begin{cases} 1 & \text{se oneS_twoS} = 0 \\ 2 & \text{se oneS_twoS} = 1 \end{cases}$$

Densità dell'aria aspirata:

$$\rho = \frac{p_0 + p_{\text{compressor,out}}}{R \cdot t_{\text{compressor,out}}} \quad [\text{kg/m}^3]$$

Portata corretta:

$$m_{\text{corr}} = m \cdot \left(1 - \frac{\text{leak}_{\text{compressor}}}{100} \right)$$

Velocità media uscita compressore:

$$x = 4 \cdot m_{\text{corr}} \frac{1}{n_{\text{stages}} \cdot \pi \cdot D_{\text{compressor,out}}^2}$$

Pressione dinamica a valle del compressore (motore 4T):

$$p_{2,\text{dyn},\text{EC4T}} = \frac{0.5 \cdot x^2}{\rho} \quad [\text{Pa}]$$

F44 p_{2,dyn,EC2T}

ID function = 2446

Descrizione = Pressione dinamica a valle del compressore per motore 2T, calcolata con correzione per perdite e numero di stadi

$t_{\text{compressor,out}}$ = temperatura uscita compressore + 273.15 [K]

p_0 = pressione a monte del compressore · 100 [Pa]

$p_{\text{compressor,out}}$ = pressione uscita compressore · 100000 [Pa]

$D_{\text{compressor,out}}$ = diametro uscita compressore ÷ 1000 [m]

$\text{leak}_{\text{compressor}}$ = perdita stimata del compressore ÷ 100 [-]

$R = 287.04 \quad [\text{J/kg} \cdot \text{K}]$

m = portata d'aria a monte del compressore (da F12) [kg/s]

$$n_{\text{stages}} = \begin{cases} 1 & \text{se oneS_twoS} = 0 \\ 2 & \text{se oneS_twoS} = 1 \end{cases}$$

Densità dell'aria aspirata:

$$\rho = \frac{p_0 + p_{\text{compressor,out}}}{R \cdot t_{\text{compressor,out}}} \quad [\text{kg/m}^3]$$

Portata corretta:

$$m_{\text{corr}} = m \cdot (1 - \text{leak}_{\text{compressor}})$$

Velocità media uscita compressore:

$$x = 4 \cdot m_{\text{corr}} \frac{1}{n_{\text{stages}} \cdot \pi \cdot D_{\text{compressor,out}}^2}$$

Pressione dinamica a valle del compressore (motore 2T):

$$p_{2,\text{dyn},\text{EC2T}} = \frac{0.5 \cdot x^2}{\rho} \quad [\text{Pa}]$$

F45 $p_{2,\text{dyn,CB}}$

ID function = 2447

Descrizione = Pressione dinamica a valle del compressore calcolata secondo il metodo del bilancio del carbonio, con correzione per perdite e numero di stadi

$$t_{\text{compressor,out}} = \text{temperatura uscita compressore} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$p_0 = \text{pressione a monte del compressore} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{compressor,out}} = \text{pressione uscita compressore} \cdot 100000 \quad [\text{Pa}]$$

$$D_{\text{compressor,out}} = \text{diametro uscita compressore} \div 1000 \quad [\text{m}]$$

$$\text{leak}_{\text{compressor}} = \text{perdita stimata del compressore} \div 100 \quad [-]$$

$$R = 287.04 \quad [\text{J/kg}\cdot\text{K}]$$

$$m = \text{portata d'aria a monte del compressore (da F29)} \quad [\text{kg/s}]$$

Condizioni speciali:

$$\text{Se } m = -0.00001 \Rightarrow p_{2,\text{dyn,CB}} = -0.00001 \quad (\text{AMA disattivato})$$

$$\text{Se } m = 0 \Rightarrow p_{2,\text{dyn,CB}} = 0 \quad (\text{motore spento})$$

Numero di stadi:

$$n_{\text{stages}} = \begin{cases} 1 & \text{se oneS_twoS} = 0 \\ 2 & \text{se oneS_twoS} = 1 \end{cases}$$

Densità dell'aria aspirata:

$$\rho = \frac{p_0 + p_{\text{compressor,out}}}{R \cdot t_{\text{compressor,out}}} \quad [\text{kg/m}^3]$$

Portata corretta:

$$m_{\text{corr}} = m \cdot (1 - \text{leak}_{\text{compressor}})$$

Velocità media uscita compressore:

$$x = 4 \cdot m_{\text{corr}} \cdot \frac{1}{n_{\text{stages}} \cdot \pi \cdot D_{\text{compressor,out}}^2}$$

Pressione dinamica a valle del compressore (Carbon Balance):

$$p_{2,\text{dyn,CB}} = \frac{0.5 \cdot x^2}{\rho} \quad [\text{Pa}]$$

F56 $k_{\text{exh,nozzle}}$

ID function = 2448

Descrizione = Coefficiente correttivo per la portata dei gas di scarico all'ugello, calcolato in funzione del rapporto aria-combustibile e delle temperature turbina

$$t_{\text{in}} = t_{\text{turbine,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$t_{\text{out}} = t_{\text{turbine,out}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$AFR_{\text{HFO/GAS}}$ = rapporto aria-combustibile per HFO o GAS

AFR_{LFO} = rapporto aria-combustibile per LFO

Fuel_{Gas} = selettore tipo combustibile $\in \{0, 1, 2\}$

$BSFC$ = consumo specifico di combustibile principale (da F16) [kg/kWh]

$BSFC_{\text{pilot}}$ = consumo specifico di combustibile pilota (da F17) [kg/kWh]

$BSAC_{\text{nozzle}}$ = consumo specifico d'aria all'ugello (da F33) [kg/kWh]

Selezione AFR:

$$AFR = \begin{cases} AFR_{\text{LFO}} & \text{se } \text{Fuel}_{\text{Gas}} = 1 \\ AFR_{\text{HFO/GAS}} & \text{altrimenti} \end{cases}$$

$$x = \frac{AFR + 1}{\left(\frac{BSAC_{\text{nozzle}}}{BSFC + BSFC_{\text{pilot}}} \right) + 1}$$

$$\begin{aligned} k_{\text{exh,nozzle}} = 0.5 \cdot & \left[(9.5908 \cdot 10^{-9} \cdot x^2 + 1.4866 \cdot 10^{-8} \cdot x + 2.761905 \cdot 10^{-8}) \cdot (t_{\text{in}}^2 + t_{\text{out}}^2) \right. \\ & - (1.12875 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 3.3955 \cdot 10^{-5} \cdot x + 1.39762 \cdot 10^{-4}) \cdot (t_{\text{in}} + t_{\text{out}}) \left. \right] \\ & + 7.125 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 - 2.9075 \cdot 10^{-2} \cdot x + 1.4488 \end{aligned}$$

F57 $k_{\text{exh,EC4T}}$

ID function = 2449

Descrizione = Coefficiente correttivo per la portata dei gas di scarico nel ciclo 4T, calcolato in funzione del rapporto aria-combustibile e delle temperature turbina

$$t_{\text{in}} = t_{\text{turbine,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$t_{\text{out}} = t_{\text{turbine,out}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$AFR_{\text{HFO/GAS}}$ = rapporto aria-combustibile per HFO o GAS

AFR_{LFO} = rapporto aria-combustibile per LFO

Fuel_{Gas} = selettore tipo combustibile $\in \{0, 1, 2\}$

$BSFC$ = consumo specifico di combustibile principale (da F16) [kg/kWh]

$BSFC_{\text{pilot}}$ = consumo specifico di combustibile pilota (da F17) [kg/kWh]

$BSAC_{\text{EC4T}}$ = consumo specifico d'aria per motore 4T (da F34) [kg/kWh]

Selezione AFR:

$$AFR = \begin{cases} AFR_{\text{LFO}} & \text{se } \text{Fuel}_{\text{Gas}} = 1 \\ AFR_{\text{HFO/GAS}} & \text{altrimenti} \end{cases}$$

$$x = \frac{AFR + 1}{\left(\frac{BSAC_{\text{EC4T}}}{BSFC + BSFC_{\text{pilot}}} \right) + 1}$$

$$\begin{aligned} k_{\text{exh,EC4T}} = 0.5 \cdot & \left[(9.5908 \cdot 10^{-9} \cdot x^2 + 1.4866 \cdot 10^{-8} \cdot x + 2.761905 \cdot 10^{-8}) \cdot (t_{\text{in}}^2 + t_{\text{out}}^2) \right. \\ & - (1.12875 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 3.3955 \cdot 10^{-5} \cdot x + 1.39762 \cdot 10^{-4}) \cdot (t_{\text{in}} + t_{\text{out}}) \left. \right] \\ & + 7.125 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 - 2.9075 \cdot 10^{-2} \cdot x + 1.4488 \end{aligned}$$

F58 $k_{\text{exh,EC2T}}$

ID function = 2450

Descrizione = Coefficiente correttivo per la portata dei gas di scarico nel ciclo 2T, calcolato in funzione del rapporto aria-combustibile e delle temperature turbina

$$t_{\text{in}} = t_{\text{turbine,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$t_{\text{out}} = t_{\text{turbine,out}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$AFR_{\text{HFO/GAS}}$ = rapporto aria-combustibile per HFO o GAS

AFR_{LFO} = rapporto aria-combustibile per LFO

Fuel_{Gas} = selettore tipo combustibile $\in \{0, 1, 2\}$

$BSFC$ = consumo specifico di combustibile principale (da F16) [kg/kWh]

$BSFC_{\text{pilot}}$ = consumo specifico di combustibile pilota (da F17) [kg/kWh]

$BSAC_{\text{EC2T}}$ = consumo specifico d'aria per motore 2T (da F35) [kg/kWh]

Selezione AFR:

$$AFR = \begin{cases} AFR_{\text{LFO}} & \text{se } \text{Fuel}_{\text{Gas}} = 1 \\ AFR_{\text{HFO/GAS}} & \text{altrimenti} \end{cases}$$

$$x = \frac{AFR + 1}{\left(\frac{BSAC_{\text{EC2T}}}{BSFC + BSFC_{\text{pilot}}} \right) + 1}$$

$$\begin{aligned} k_{\text{exh,EC2T}} = 0.5 \cdot & \left[(9.5908 \cdot 10^{-9} \cdot x^2 + 1.4866 \cdot 10^{-8} \cdot x + 2.761905 \cdot 10^{-8}) \cdot (t_{\text{in}}^2 + t_{\text{out}}^2) \right. \\ & - (1.12875 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 3.3955 \cdot 10^{-5} \cdot x + 1.39762 \cdot 10^{-4}) \cdot (t_{\text{in}} + t_{\text{out}}) \left. \right] \\ & + 7.125 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 - 2.9075 \cdot 10^{-2} \cdot x + 1.4488 \end{aligned}$$

F59 $k_{\text{exh,CB}}$

ID function = 2451

Descrizione = Coefficiente correttivo per la portata dei gas di scarico calcolata secondo il metodo del bilancio del carbonio

$$t_{\text{in}} = t_{\text{turbine,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$t_{\text{out}} = t_{\text{turbine,out}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$AFR = \begin{cases} AFR_{\text{LFO}} & \text{se } \text{Fuel}_{\text{Gas}} = 1 \\ AFR_{\text{HFO/GAS}} & \text{altrimenti} \end{cases}$$

$$x = \frac{AFR + 1}{\left(\frac{BSAC_{\text{CB}}}{BSFC + BSFC_{\text{pilot}}} \right) + 1}$$

Se $BSFC = 0$ e $BSFC_{\text{pilot}} = 0 \Rightarrow k_{\text{exh,CB}} = 0$

Se $BSAC_{CB} = -0.00001 \Rightarrow k_{\text{exh,CB}} = -0.00001$

$$k_{\text{exh,CB}} = 0.5 \cdot \left[\left(9.5908 \cdot 10^{-9} \cdot x^2 + 1.4866 \cdot 10^{-8} \cdot x + 2.761905 \cdot 10^{-8} \right) \cdot \left(t_{\text{in}}^2 + t_{\text{out}}^2 \right) \right. \\ \left. - \left(1.12875 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 3.3955 \cdot 10^{-5} \cdot x + 1.39762 \cdot 10^{-4} \right) \cdot \left(t_{\text{in}} + t_{\text{out}} \right) \right] \\ + 7.125 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 - 2.9075 \cdot 10^{-2} \cdot x + 1.4488$$

F62 A_{EWG}

ID function = 2452

Descrizione = Area effettiva della valvola waste-gate (EWG), calcolata in funzione del feedback di apertura e dei coefficienti polinomiali forniti dal costruttore

Se $EWG_{FB} = 0 \Rightarrow A_{\text{EWG}} = -0.001$ (valvola chiusa)

$$x = \frac{EWG_{FB}}{100} \cdot 90 \quad [\circ] \\ d_{\text{EWG}} = c_1 x^4 + c_2 x^3 + c_3 x^2 + c_4 x + c_5 \quad [\text{mm}] \\ A_{\text{EWG}} = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{d_{\text{EWG}}}{1000} \right)^2 \quad [\text{m}^2]$$

F63 ρ₅

ID function = 2453

Descrizione = Densità dei gas aspirati dalla turbina, calcolata in funzione delle pressioni e della temperatura di ingresso turbina

$t_{\text{turbine,in}}$ = temperatura ingresso turbina + 273.15 [K]

p_0 = pressione ambiente $\cdot 10^2$ [Pa]

$p_{\text{turbine,in}}$ = pressione ingresso turbina $\cdot 10^5$ [Pa]

$R = 293.93$ [J/kg·K] (costante specifica per i gas di scarico)

Densità gas aspirati dalla turbina:

$$\rho_5 = \frac{p_{\text{turbine,in}} + p_0}{R \cdot t_{\text{turbine,in}}} \quad [\text{kg/m}^3]$$

F64 p_{crit,nozzle}

ID function = 2454

Descrizione = Pressione critica per il calcolo della portata attraverso la waste-gate (mEWG), determinata in funzione del coefficiente politropico e delle pressioni a monte

$$p_0 = \text{pressione ambiente} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{turbine,in}} = \text{pressione ingresso turbina} \cdot 100000 \quad [\text{Pa}]$$

$$k_{\text{exh,nozzle}} = \text{coefficiente politropico dei gas di scarico (da F56)}$$

Pressione critica all'ugello:

$$p_{\text{crit,nozzle}} = \left(\frac{2}{k_{\text{exh,nozzle}} + 1} \right)^{\frac{k_{\text{exh,nozzle}}}{k_{\text{exh,nozzle}} - 1}} \cdot (p_{\text{turbine,in}} + p_0) \quad [\text{Pa}]$$

F65 P_{crit,EC4T}

ID function = 2455

Descrizione = Pressione critica per il calcolo della portata attraverso la waste-gate (mEWG) nel ciclo 4T, determinata in funzione del coefficiente politropico e delle pressioni a monte

$$p_0 = \text{pressione ambiente} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{turbine,in}} = \text{pressione ingresso turbina} \cdot 100000 \quad [\text{Pa}]$$

$$k_{\text{exh,EC4T}} = \text{coefficiente politropico dei gas di scarico (da F57)}$$

Pressione critica nel ciclo 4T:

$$p_{\text{crit,EC4T}} = \left(\frac{2}{k_{\text{exh,EC4T}} + 1} \right)^{\frac{k_{\text{exh,EC4T}}}{k_{\text{exh,EC4T}} - 1}} \cdot (p_{\text{turbine,in}} + p_0) \quad [\text{Pa}]$$

F66 p_{crit,EC2T}

ID function = 2456

Descrizione = Pressione critica per il calcolo della portata attraverso la waste-gate (mEWG) nel ciclo 2T, determinata in funzione del coefficiente politropico e delle pressioni a monte

p_0 = pressione ambiente · 100 [Pa]

$p_{\text{turbine,in}}$ = pressione ingresso turbina · 100000 [Pa]

$k_{\text{exh,EC2T}}$ = coefficiente politropico dei gas di scarico (da F58)

Pressione critica nel ciclo 2T:

$$p_{\text{crit,EC2T}} = \left(\frac{2}{k_{\text{exh,EC2T}} + 1} \right)^{\frac{k_{\text{exh,EC2T}}}{k_{\text{exh,EC2T}} - 1}} \cdot (p_{\text{turbine,in}} + p_0) \quad [\text{Pa}]$$

F67 $p_{\text{crit,CB}}$

ID function = 2457

Descrizione = Pressione critica per il calcolo della portata attraverso la waste-gate (mEWG) secondo il metodo del bilancio del carbonio, con gestione delle condizioni speciali di spegnimento motore o AMA disattivato

p_0 = pressione ambiente · 100 [Pa]

$p_{\text{turbine,in}}$ = pressione ingresso turbina · 100000 [Pa]

$k_{\text{exh,CB}}$ = coefficiente politropico dei gas di scarico (da F59)

Condizioni speciali:

- Se $k_{\text{exh,CB}} = 0$, allora $p_{\text{crit,CB}} = 0$ (motore spento)
- Se $k_{\text{exh,CB}} = -0.00001$, allora $p_{\text{crit,CB}} = -0.00001$ (AMA disattivato)

Altrimenti:

$$p_{\text{crit,CB}} = \left(\frac{2}{k_{\text{exh,CB}} + 1} \right)^{\frac{k_{\text{exh,CB}}}{k_{\text{exh,CB}} - 1}} \cdot (p_{\text{turbine,in}} + p_0) \quad [\text{Pa}]$$

F68 m_{EWG}

ID function = 2458

Descrizione = Portata massica attraverso la waste-gate, calcolata in funzione delle pressioni, densità, area effettiva e coefficiente politropico dei gas di scarico

$$p_0 = \text{pressione ambiente} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{turbine,in}} = \text{pressione ingresso turbina} \cdot 100000 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{turbine,out}} = \text{pressione uscita turbina} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_5 = p_{\text{turbine,in}} + p_0$$

$$p_6 = p_{\text{turbine,out}} + p_0$$

$$\rho_5 = \text{densità gas ingresso turbina (da F63)} \quad [\text{kg/m}^3]$$

$$A_{\text{EWG}} = \text{area effettiva della waste-gate (da F62)} \quad [\text{m}^2]$$

$$k_{\text{exh,nozzle}} = \text{coefficiente politropico (da F56)}$$

$$p_{\text{crit,nozzle}} = \text{pressione critica (da F64)}$$

$$R = 293.93 \quad [\text{J/kg}\cdot\text{K}]$$

$$T = t_{\text{turbine,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

Condizione di flusso:

- Se $p_{\text{crit,nozzle}} < p_5$ (flusso subsonico):

$$x = \left(\frac{p_6}{p_5} \right)^{\frac{1}{k_{\text{exh,nozzle}}}}$$

$$v_6 = \sqrt{\frac{2k_{\text{exh,nozzle}}}{k_{\text{exh,nozzle}} - 1} \cdot p_5 \cdot \rho_5 \cdot \left(1 - \left(\frac{p_6}{p_5} \right)^{\frac{k_{\text{exh,nozzle}} - 1}{k_{\text{exh,nozzle}}}} \right)}$$

$$m_{\text{EWG}} = A_{\text{EWG}} \cdot x \cdot v_6 \cdot 3600 \quad [\text{kg/h}]$$

- Altrimenti (flusso sonico):

$$x = \left(\frac{2}{k_{\text{exh,nozzle}} + 1} \right)^{\frac{1}{k_{\text{exh,nozzle}} - 1}}$$

$$v_6 = \sqrt{\frac{2k_{\text{exh,nozzle}}}{k_{\text{exh,nozzle}} + 1} \cdot p_5 \cdot \rho_5}$$

$$m_{\text{EWG}} = A_{\text{EWG}} \cdot x \cdot v_6 \cdot 3600 \quad [\text{kg/h}]$$

F69 $m_{\text{EWG,EC4T}}$

ID function = 2459

Descrizione = Portata massica attraverso la waste-gate nel ciclo 4T, calcolata in funzione delle pressioni, densità, area effettiva e coefficiente politropico dei gas di scarico

$$\begin{aligned}
p_0 &= \text{pressione ambiente} \cdot 100 \quad [\text{Pa}] \\
p_{\text{turbine,in}} &= \text{pressione ingresso turbina} \cdot 100000 \quad [\text{Pa}] \\
p_{\text{turbine,out}} &= \text{pressione uscita turbina} \cdot 100 \quad [\text{Pa}] \\
p_5 &= p_{\text{turbine,in}} + p_0 \\
p_6 &= p_{\text{turbine,out}} + p_0 \\
\rho_5 &= \text{densità gas ingresso turbina (da F63)} \quad [\text{kg/m}^3] \\
A_{\text{EWG}} &= \text{area effettiva della waste-gate (da F62)} \quad [\text{m}^2] \\
k_{\text{exh,EC4T}} &= \text{coefficiente politropico (da F57)} \\
p_{\text{crit,EC4T}} &= \text{pressione critica (da F65)} \\
R &= 293.93 \quad [\text{J/kg}\cdot\text{K}] \\
T &= t_{\text{turbine,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]
\end{aligned}$$

Condizione di flusso:

- Se $p_{\text{crit,EC4T}} < p_5$ (flusso subsonico):

$$\begin{aligned}
x &= \left(\frac{p_6}{p_5} \right)^{\frac{1}{k_{\text{exh,EC4T}}}} \\
v_6 &= \sqrt{\frac{2k_{\text{exh,EC4T}}}{k_{\text{exh,EC4T}} - 1} \cdot p_5 \cdot \rho_5 \cdot \left(1 - \left(\frac{p_6}{p_5} \right)^{\frac{k_{\text{exh,EC4T}} - 1}{k_{\text{exh,EC4T}}}} \right)} \\
m_{\text{EWG,EC4T}} &= A_{\text{EWG}} \cdot x \cdot v_6 \cdot 3600 \quad [\text{kg/h}]
\end{aligned}$$

- Altrimenti (flusso sonico):

$$\begin{aligned}
x &= \left(\frac{2}{k_{\text{exh,EC4T}} + 1} \right)^{\frac{1}{k_{\text{exh,EC4T}} - 1}} \\
v_6 &= \sqrt{\frac{2k_{\text{exh,EC4T}}}{k_{\text{exh,EC4T}} + 1} \cdot p_5 \cdot \rho_5} \\
m_{\text{EWG,EC4T}} &= A_{\text{EWG}} \cdot x \cdot v_6 \cdot 3600 \quad [\text{kg/h}]
\end{aligned}$$

F70 m_{EWG,EC2T}

ID function = 2460

Descrizione = Portata massica attraverso la waste-gate nel ciclo 2T, calcolata in funzione delle pressioni, densità, area effettiva e coefficiente politropico dei gas di scarico

$$\begin{aligned}
p_0 &= \text{pressione ambiente} \cdot 100 \quad [\text{Pa}] \\
p_{\text{turbine,in}} &= \text{pressione ingresso turbina} \cdot 100000 \quad [\text{Pa}] \\
p_{\text{turbine,out}} &= \text{pressione uscita turbina} \cdot 100 \quad [\text{Pa}] \\
p_5 &= p_{\text{turbine,in}} + p_0 \\
p_6 &= p_{\text{turbine,out}} + p_0 \\
\rho_5 &= \text{densità gas ingresso turbina (da F63)} \quad [\text{kg/m}^3] \\
A_{\text{EWG}} &= \text{area effettiva della waste-gate (da F62)} \quad [\text{m}^2] \\
k_{\text{exh,EC2T}} &= \text{coefficiente politropico (da F58)} \\
p_{\text{crit,EC2T}} &= \text{pressione critica (da F66)} \\
R &= 293.93 \quad [\text{J/kg}\cdot\text{K}] \\
T &= t_{\text{turbine,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]
\end{aligned}$$

Condizione di flusso:

- Se $p_{\text{crit,EC2T}} < p_5$ (flusso subsonico):

$$\begin{aligned}
x &= \left(\frac{p_6}{p_5} \right)^{\frac{1}{k_{\text{exh,EC2T}}}} \\
v_6 &= \sqrt{ \frac{2k_{\text{exh,EC2T}}}{k_{\text{exh,EC2T}} - 1} \cdot p_5 \cdot \rho_5 \cdot \left(1 - \left(\frac{p_6}{p_5} \right)^{\frac{k_{\text{exh,EC2T}} - 1}{k_{\text{exh,EC2T}}}} \right) } \\
m_{\text{EWG,EC2T}} &= A_{\text{EWG}} \cdot x \cdot v_6 \cdot 3600 \quad [\text{kg/h}]
\end{aligned}$$

- Altrimenti (flusso sonico):

$$\begin{aligned}
x &= \left(\frac{2}{k_{\text{exh,EC2T}} + 1} \right)^{\frac{1}{k_{\text{exh,EC2T}} - 1}} \\
v_6 &= \sqrt{ \frac{2k_{\text{exh,EC2T}}}{k_{\text{exh,EC2T}} + 1} \cdot p_5 \cdot \rho_5 } \\
m_{\text{EWG,EC2T}} &= A_{\text{EWG}} \cdot x \cdot v_6 \cdot 3600 \quad [\text{kg/h}]
\end{aligned}$$

$F71 \ m_{\text{EWG,CB}}$

ID function = 2461

Descrizione = Portata massica attraverso la waste-gate secondo il metodo del bilancio del carbonio, con gestione delle condizioni speciali di spegnimento motore, AMA disattivato e valvola chiusa

$$\begin{aligned}
p_0 &= \text{pressione ambiente} \cdot 100 \quad [\text{Pa}] \\
p_{\text{turbine,in}} &= \text{pressione ingresso turbina} \cdot 100000 \quad [\text{Pa}] \\
p_{\text{turbine,out}} &= \text{pressione uscita turbina} \cdot 100 \quad [\text{Pa}] \\
p_5 &= p_{\text{turbine,in}} + p_0 \\
p_6 &= p_{\text{turbine,out}} + p_0 \\
\rho_5 &= \text{densità gas ingresso turbina (da F63)} \quad [\text{kg/m}^3] \\
A_{\text{EWG}} &= \text{area effettiva della waste-gate (da F62)} \quad [\text{m}^2] \\
k_{\text{exh,CB}} &= \text{coefficiente politropico (da F59)} \\
p_{\text{crit,CB}} &= \text{pressione critica (da F67)} \\
R &= 293.93 \quad [\text{J/kg}\cdot\text{K}] \\
T &= t_{\text{turbine,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]
\end{aligned}$$

Condizioni speciali:

- Se $k_{\text{exh,CB}} = 0$, allora $m_{\text{EWG,CB}} = 0$ (motore spento)
- Se $k_{\text{exh,CB}} = -0.00001$, allora $m_{\text{EWG,CB}} = -0.00001$ (AMA disattivato)
- Se $A_{\text{EWG}} = 0$, allora $m_{\text{EWG,CB}} = 0$ (valvola chiusa)

Condizione di flusso:

- Se $p_{\text{crit,CB}} < p_5$ (flusso subsonico):

$$\begin{aligned}
x &= \left(\frac{p_6}{p_5} \right)^{\frac{1}{k_{\text{exh,CB}}}} \\
v_6 &= \sqrt{\frac{2k_{\text{exh,CB}}}{k_{\text{exh,CB}} - 1} \cdot p_5 \cdot \rho_5 \cdot \left(1 - \left(\frac{p_6}{p_5} \right)^{\frac{k_{\text{exh,CB}} - 1}{k_{\text{exh,CB}}}} \right)} \\
m_{\text{EWG,CB}} &= A_{\text{EWG}} \cdot x \cdot v_6 \cdot 3600 \quad [\text{kg/h}]
\end{aligned}$$

- Altrimenti (flusso sonico):

$$\begin{aligned}
x &= \left(\frac{2}{k_{\text{exh,CB}} + 1} \right)^{\frac{1}{k_{\text{exh,CB}} - 1}} \\
v_6 &= \sqrt{\frac{2k_{\text{exh,CB}}}{k_{\text{exh,CB}} + 1} \cdot p_5 \cdot \rho_5} \\
m_{\text{EWG,CB}} &= A_{\text{EWG}} \cdot x \cdot v_6 \cdot 3600 \quad [\text{kg/h}]
\end{aligned}$$

F72 $\dot{m}_{\text{exh,nozzle,redux}}$

ID function = 2462

Descrizione = Portata massica dei gas di scarico ridotta all'ugello, calcolata in funzione dell'attivazione della waste-gate e della portata deviata

EWG = stato waste-gate (0 = chiusa, 1 = aperta)

$\dot{m}_{\text{exh,nozzle}}$ = portata totale dei gas di scarico all'ugello (da F30) [kg/h]

\dot{m}_{EWG} = portata deviata attraverso la waste-gate (da F68) [kg/h]

Condizione:

- Se EWG = 0, allora $\dot{m}_{\text{exh,nozzle,redux}} = \dot{m}_{\text{exh,nozzle}}$ (valvola chiusa)
- Se EWG = 1, allora $\dot{m}_{\text{exh,nozzle,redux}} = \dot{m}_{\text{exh,nozzle}} - \dot{m}_{\text{EWG}}$ (valvola aperta)

F73 $\dot{m}_{\text{exh,EC4T,redux}}$

ID function = 2463

Descrizione = Portata massica dei gas di scarico nel ciclo 4T ridotta all'ugello, calcolata in funzione dell'attivazione della waste-gate e della portata deviata

EWG = stato waste-gate (0 = chiusa, 1 = aperta)

$\dot{m}_{\text{exh,EC4T}}$ = portata totale dei gas di scarico nel ciclo 4T (da F31) [kg/h]

\dot{m}_{EWG} = portata deviata attraverso la waste-gate (da F69) [kg/h]

Condizione:

- Se EWG = 0, allora $\dot{m}_{\text{exh,EC4T,redux}} = \dot{m}_{\text{exh,EC4T}}$ (valvola chiusa)
- Se EWG = 1, allora $\dot{m}_{\text{exh,EC4T,redux}} = \dot{m}_{\text{exh,EC4T}} - \dot{m}_{\text{EWG}}$ (valvola aperta)

F74 $\dot{m}_{\text{exh,EC2T,redux}}$

ID function = 2464

Descrizione = Portata massica dei gas di scarico nel ciclo 2T ridotta all'ugello, calcolata in funzione dell'attivazione della waste-gate e della portata deviata

EWG = stato waste-gate (0 = chiusa, 1 = aperta)

$\dot{m}_{\text{exh,EC2T}}$ = portata totale dei gas di scarico nel ciclo 2T (da F32) [kg/h]

\dot{m}_{EWG} = portata deviata attraverso la waste-gate (da F70) [kg/h]

Condizione:

- Se $\text{EWG} = 0$, allora $\dot{m}_{\text{exh,EC2T,redux}} = \dot{m}_{\text{exh,EC2T}}$ (valvola chiusa)
- Se $\text{EWG} = 1$, allora $\dot{m}_{\text{exh,EC2T,redux}} = \dot{m}_{\text{exh,EC2T}} - \dot{m}_{\text{EWG}}$ (valvola aperta)

F75 $\dot{m}_{\text{exh,CB,redux}}$

ID function = 2465

Descrizione = Portata massica dei gas di scarico secondo il bilancio del carbonio, ridotta in funzione dell'attivazione della waste-gate e della portata deviata, con gestione delle condizioni speciali

EWG = stato waste-gate (0 = chiusa, 1 = aperta)

$\dot{m}_{\text{exh,CB}}$ = portata totale dei gas di scarico (da F27) [kg/h]

\dot{m}_{EWG} = portata deviata attraverso la waste-gate (da F71) [kg/h]

Condizioni speciali:

- Se $\dot{m}_{\text{EWG}} = 0$, allora $\dot{m}_{\text{exh,CB,redux}} = 0$ (motore spento o EWG chiusa/non presente)
- Se $\dot{m}_{\text{EWG}} = -0.00001$, allora $\dot{m}_{\text{exh,CB,redux}} = -0.00001$ (AMA disattivato)

Altrimenti:

- Se $\text{EWG} = 0$, allora $\dot{m}_{\text{exh,CB,redux}} = \dot{m}_{\text{exh,CB}}$ (valvola chiusa)
- Se $\text{EWG} = 1$, allora $\dot{m}_{\text{exh,CB,redux}} = \dot{m}_{\text{exh,CB}} - \dot{m}_{\text{EWG}}$ (valvola aperta)

F76 $p_{\text{dyn5,nozzle}}$

ID function = 2466

Descrizione = Pressione dinamica all'ingresso della turbina, calcolata in funzione della portata ridotta, del diametro e del numero di stadi

$$t_{\text{turbine,in}} = \text{temperatura ingresso turbina} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$p_0 = \text{pressione ambiente} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{turbine,in}} = \text{pressione ingresso turbina} \cdot 100000 \quad [\text{Pa}]$$

$$\text{stadi} = \begin{cases} 1 & \text{se oneS_twoS} = 0 \\ 2 & \text{se oneS_twoS} = 1 \end{cases}$$

$$D_{\text{turbine,in}} = \text{diametro ingresso turbina} \cdot 10^{-3} \quad [\text{m}]$$

$$\dot{m}_{\text{exh,nozzle,redux}} = \text{portata ridotta (da F72)}/3600 \quad [\text{kg/s}]$$

$$p_5 = p_{\text{turbine,in}} + p_0$$

$$R_{\text{exh}} = 293.93 \quad [\text{J/kg}\cdot\text{K}]$$

Calcolo della densità:

$$\rho = \frac{p_5}{R_{\text{exh}} \cdot t_{\text{turbine,in}}} \quad [\text{kg/m}^3]$$

Velocità media del flusso:

$$x = \frac{4 \cdot \dot{m}_{\text{exh,nozzle,redux}}}{\text{stadi} \cdot \pi \cdot D_{\text{turbine,in}}^2}$$

Pressione dinamica all'ingresso turbina:

$$p_{\text{dyn5,nozzle}} = \frac{0.5 \cdot x^2}{\rho} \quad [\text{Pa}]$$

F77 p_{dyn5,EC4T}

ID function = 2467

Descrizione = Pressione dinamica all'ingresso della turbina nel ciclo 4T, calcolata in funzione della portata ridotta, del diametro e del numero di stadi

$$t_{\text{turbine,in}} = \text{temperatura ingresso turbina} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$p_0 = \text{pressione ambiente} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{turbine,in}} = \text{pressione ingresso turbina} \cdot 100000 \quad [\text{Pa}]$$

$$\text{stadi} = \begin{cases} 1 & \text{se oneS_twoS} = 0 \\ 2 & \text{se oneS_twoS} = 1 \end{cases}$$

$$D_{\text{turbine,in}} = \text{diametro ingresso turbina} \cdot 10^{-3} \quad [\text{m}]$$

$$\dot{m}_{\text{exh,EC4T,redux}} = \text{portata ridotta (da F73)}/3600 \quad [\text{kg/s}]$$

$$p_5 = p_{\text{turbine,in}} + p_0$$

$$R_{\text{exh}} = 293.93 \quad [\text{J/kg}\cdot\text{K}]$$

Calcolo della densità:

$$\rho = \frac{p_5}{R_{\text{exh}} \cdot t_{\text{turbine,in}}} \quad [\text{kg/m}^3]$$

Velocità media del flusso:

$$x = \frac{4 \cdot \dot{m}_{\text{exh,EC4T,redux}}}{\text{stadi} \cdot \pi \cdot D_{\text{turbine,in}}^2}$$

Pressione dinamica all'ingresso turbina:

$$p_{\text{dyn5,EC2T}} = \frac{0.5 \cdot x^2}{\rho} \quad [\text{Pa}]$$

F78 p_{dyn5,EC2T}

ID function = 2468

Descrizione = Pressione dinamica all'ingresso della turbina nel ciclo 2T, calcolata in funzione della portata ridotta, del diametro e del numero di stadi

$$t_{\text{turbine,in}} = \text{temperatura ingresso turbina} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$p_0 = \text{pressione ambiente} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{turbine,in}} = \text{pressione ingresso turbina} \cdot 100000 \quad [\text{Pa}]$$

$$\text{stadi} = \begin{cases} 1 & \text{se oneS_twoS} = 0 \\ 2 & \text{se oneS_twoS} = 1 \end{cases}$$

$$D_{\text{turbine,in}} = \text{diametro ingresso turbina} \cdot 10^{-3} \quad [\text{m}]$$

$$\dot{m}_{\text{exh,EC2T,redux}} = \text{portata ridotta (da F74)}/3600 \quad [\text{kg/s}]$$

$$p_5 = p_{\text{turbine,in}} + p_0$$

$$R_{\text{exh}} = 293.93 \quad [\text{J/kg}\cdot\text{K}]$$

Calcolo della densità:

$$\rho = \frac{p_5}{R_{\text{exh}} \cdot t_{\text{turbine,in}}} \quad [\text{kg/m}^3]$$

Velocità media del flusso:

$$x = \frac{4 \cdot \dot{m}_{\text{exh,EC2T,redux}}}{\text{stadi} \cdot \pi \cdot D_{\text{turbine,in}}^2}$$

Pressione dinamica all'ingresso turbina:

$$p_{\text{dyn5,EC2T}} = \frac{0.5 \cdot x^2}{\rho} \quad [\text{Pa}]$$

F79 p_{dyn5,CB}

ID function = 2469

Descrizione = Pressione dinamica all'ingresso della turbina secondo il bilancio del carbonio, calcolata in funzione della portata ridotta, del diametro e del numero di stadi, con gestione delle condizioni speciali

$$t_{\text{turbine,in}} = \text{temperatura ingresso turbina} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$p_0 = \text{pressione ambiente} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{turbine,in}} = \text{pressione ingresso turbina} \cdot 100000 \quad [\text{Pa}]$$

$$\text{stadi} = \begin{cases} 1 & \text{se oneS_twoS} = 0 \\ 2 & \text{se oneS_twoS} = 1 \end{cases}$$

$$D_{\text{turbine,in}} = \text{diametro ingresso turbina} \cdot 10^{-3} \quad [\text{m}]$$

$$\dot{m}_{\text{exh,CB,redux}} = \text{portata ridotta (da F75)}/3600 \quad [\text{kg/s}]$$

$$p_5 = p_{\text{turbine,in}} + p_0$$

$$R_{\text{exh}} = 293.93 \quad [\text{J/kg}\cdot\text{K}]$$

Condizioni speciali:

- Se $\dot{m}_{\text{exh,CB,redux}} = -0.00001$, allora $p_{\text{dyn5,CB}} = -0.00001$ (AMA disattivato)
- Se $\dot{m}_{\text{exh,CB,redux}} = 0$, allora $p_{\text{dyn5,CB}} = 0$ (motore spento o EWG chiusa/non presente)

Altrimenti:

$$\rho = \frac{p_5}{R_{\text{exh}} \cdot t_{\text{turbine,in}}} \quad [\text{kg/m}^3]$$

$$x = \frac{4 \cdot \dot{m}_{\text{exh,CB,redux}}}{\text{stadi} \cdot \pi \cdot D_{\text{turbine,in}}^2}$$

$$p_{\text{dyn5,CB}} = \frac{0.5 \cdot x^2}{\rho} \quad [\text{Pa}]$$

F80 PIV_{nozzle}

ID function = 2470

Descrizione = Rapporto di compressione total-to-total, calcolato in funzione delle pressioni statiche e dinamiche, della portata massica e della configurazione del compressore

$t_{\text{compressor,in}} = \text{temperatura ingresso compressore} + 273.15$ [K]

$p_0 = \text{pressione ambiente} \cdot 100$ [Pa]

$p_{\text{compressor,in}} = \text{pressione ingresso compressore} \cdot 100$ [Pa]

$p_{\text{compressor,out}} = \text{pressione uscita compressore} \cdot 100000$ [Pa]

$$\text{stadi} = \begin{cases} 1 & \text{se oneS_twoS} = 0 \\ 2 & \text{se oneS_twoS} = 1 \end{cases}$$

$D_{\text{compressor,in}} = \text{diametro ingresso compressore}/1000$ [m]

$\dot{m}_{\text{air}} = \text{portata massica aria (da F2)}$ [kg/s]

$p_{1,\text{dyn}} = \text{pressione dinamica ingresso (da F41)}$ [Pa]

$p_{2,\text{dyn}} = \text{pressione dinamica uscita (da F42)}$ [Pa]

$R = 287.04$ [J/kg·K]

Pressione efficace in ingresso:

$$p_{1,\text{eff}} = p_0 - |p_{\text{compressor,in}}|$$

Condizione:

- Se $p_{\text{compressor,in}} \leq 100$ (motore spento, sensore assente, stadio singolo o LP doppio stadio):

$$\text{PIV}_{\text{nozzle}} = \frac{p_{\text{compressor,out}} + p_{2,\text{dyn}} + p_0}{p_{1,\text{eff}} + p_{1,\text{dyn}}}$$

- Altrimenti (HP doppio stadio con sensore attivo):

$$p_{\text{dyn}} = \frac{0.5 \cdot R \cdot t_{\text{compressor,in}}}{p_{1,\text{eff}}} \cdot \left(\frac{4 \cdot \dot{m}_{\text{air}}}{\text{stadi} \cdot \pi \cdot D_{\text{compressor,in}}^2} \right)^2$$

$$\text{PIV}_{\text{nozzle}} = \frac{p_{\text{compressor,out}} + p_{2,\text{dyn}} + p_0}{p_{1,\text{eff}} + p_{\text{dyn}}}$$

F81 PIV_{EC4T}

ID function = 2471

Descrizione = Rapporto di compressione total-to-total nel ciclo EC4T, calcolato in funzione delle pressioni statiche e dinamiche, della portata massica e della configurazione del compressore

$t_{\text{compressor,in}} = \text{temperatura ingresso compressore} + 273.15 \quad [\text{K}]$

$p_0 = \text{pressione ambiente} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$

$p_{\text{compressor,in}} = \text{pressione ingresso compressore} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$

$p_{\text{compressor,out}} = \text{pressione uscita compressore} \cdot 100000 \quad [\text{Pa}]$

$$\text{stadi} = \begin{cases} 1 & \text{se oneS_twoS} = 0 \\ 2 & \text{se oneS_twoS} = 1 \end{cases}$$

$D_{\text{compressor,in}} = \text{diametro ingresso compressore}/1000 \quad [\text{m}]$

$\dot{m}_{\text{EC4T}} = \text{portata massica aria EC4T (da F7)} \quad [\text{kg/s}]$

$p_{1,\text{dyn}} = \text{pressione dinamica ingresso (da F41)} \quad [\text{Pa}]$

$p_{2,\text{dyn,EC4T}} = \text{pressione dinamica uscita (da F43)} \quad [\text{Pa}]$

$R = 287.04 \quad [\text{J/kg}\cdot\text{K}]$

Pressione efficace in ingresso:

$$p_{1,\text{eff}} = p_0 - |p_{\text{compressor,in}}|$$

Condizione semplificata:

- Se $p_{\text{compressor,in}} \leq 100$ (motore spento, sensore assente, stadio singolo o LP doppio stadio):

$$\text{PIV}_{\text{EC4T}} = \frac{p_{\text{compressor,out}} + p_{2,\text{dyn,EC4T}} + p_0}{p_{1,\text{eff}} + p_{1,\text{dyn}}}$$

Condizione completa:

- Altrimenti (HP doppio stadio con sensore attivo):

$$p_{\text{dyn}} = \frac{0.5 \cdot R \cdot t_{\text{compressor,in}}}{p_{1,\text{eff}}} \cdot \left(\frac{4 \cdot \dot{m}_{\text{EC4T}}}{\text{stadi} \cdot \pi \cdot D_{\text{compressor,in}}^2} \right)^2$$

$$\text{PIV}_{\text{EC4T}} = \frac{p_{\text{compressor,out}} + p_{2,\text{dyn,EC4T}} + p_0}{p_{1,\text{eff}} + p_{\text{dyn}}}$$

F82 PIV_{EC2T}

ID function = 2472

Descrizione = Rapporto di compressione total-to-total nel ciclo EC2T, calcola-

to in funzione delle pressioni statiche e dinamiche, della portata massica e della configurazione del compressore

$$t_{\text{compressor,in}} = \text{temperatura ingresso compressore} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$p_0 = \text{pressione ambiente} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{compressor,in}} = \text{pressione ingresso compressore} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{compressor,out}} = \text{pressione uscita compressore} \cdot 100000 \quad [\text{Pa}]$$

$$\text{stadi} = \begin{cases} 1 & \text{se oneS_twoS} = 0 \\ 2 & \text{se oneS_twoS} = 1 \end{cases}$$

$$D_{\text{compressor,in}} = \text{diametro ingresso compressore}/1000 \quad [\text{m}]$$

$$\dot{m}_{\text{EC2T}} = \text{portata massica aria EC2T (da F13)} \quad [\text{kg/s}]$$

$$p_{1,\text{dyn}} = \text{pressione dinamica ingresso (da F41)} \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{2,\text{dyn,EC2T}} = \text{pressione dinamica uscita (da F44)} \quad [\text{Pa}]$$

$$R = 287.04 \quad [\text{J/kg}\cdot\text{K}]$$

Pressione efficace in ingresso:

$$p_{1,\text{eff}} = p_0 - |p_{\text{compressor,in}}|$$

Condizione semplificata:

- Se $p_{\text{compressor,in}} \leq 100$ (motore spento, sensore assente, stadio singolo o LP doppio stadio):

$$\text{PIV}_{\text{EC2T}} = \frac{p_{\text{compressor,out}} + p_{2,\text{dyn,EC2T}} + p_0}{p_{1,\text{eff}} + p_{1,\text{dyn}}}$$

Condizione completa:

- Altrimenti (HP doppio stadio con sensore attivo):

$$p_{\text{dyn}} = \frac{0.5 \cdot R \cdot t_{\text{compressor,in}}}{p_{1,\text{eff}}} \cdot \left(\frac{4 \cdot \dot{m}_{\text{EC2T}}}{\text{stadi} \cdot \pi \cdot D_{\text{compressor,in}}^2} \right)^2$$

$$\text{PIV}_{\text{EC2T}} = \frac{p_{\text{compressor,out}} + p_{2,\text{dyn,EC2T}} + p_0}{p_{1,\text{eff}} + p_{\text{dyn}}}$$

F83 PIV_{CB}

ID function = 2473

Descrizione = Rapporto di espansione total-to-total secondo il bilancio del carbonio, calcolato in funzione delle pressioni statiche e dinamiche, della portata massica e della configurazione del compressore

$$t_{\text{compressor,in}} = \text{temperatura ingresso compressore} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$p_0 = \text{pressione ambiente} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{compressor,in}} = \text{pressione ingresso compressore} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{compressor,out}} = \text{pressione uscita compressore} \cdot 100000 \quad [\text{Pa}]$$

$$\text{stadi} = \begin{cases} 1 & \text{se oneS_twoS} = 0 \\ 2 & \text{se oneS_twoS} = 1 \end{cases}$$

$$D_{\text{compressor,in}} = \text{diametro ingresso compressore}/1000 \quad [\text{m}]$$

$$\dot{m}_{\text{CB}} = \text{portata massica aria CB (da F29)} \quad [\text{kg/s}]$$

$$p_{1,\text{dyn}} = \text{pressione dinamica ingresso (da F41)} \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{2,\text{dyn,CB}} = \text{pressione dinamica uscita (da F45)} \quad [\text{Pa}]$$

$$R = 287.04 \quad [\text{J/kg}\cdot\text{K}]$$

Pressione efficace in ingresso:

$$p_{1,\text{eff}} = p_0 - |p_{\text{compressor,in}}|$$

Condizioni speciali:

- Se $p_{2,\text{dyn,CB}} = 0$, allora $\text{PIV}_{\text{CB}} = 0$ (motore spento)
- Se $\dot{m}_{\text{CB}} = -0.00001$, allora $\text{PIV}_{\text{CB}} = -0.00001$ (AMA disattivato)

Condizione semplificata:

- Se $p_{\text{compressor,in}} \leq 100$ (sensore assente, stadio singolo o LP doppio stadio):

$$\text{PIV}_{\text{CB}} = \frac{p_{\text{compressor,out}} + p_{2,\text{dyn,CB}} + p_0}{p_{1,\text{eff}} + p_{1,\text{dyn}}}$$

Condizione completa:

- Altrimenti (HP doppio stadio con sensore attivo):

$$p_{\text{dyn}} = \frac{0.5 \cdot R \cdot t_{\text{compressor,in}}}{p_{1,\text{eff}}} \cdot \left(\frac{4 \cdot \dot{m}_{\text{CB}}}{\text{stadi} \cdot \pi \cdot D_{\text{compressor,in}}^2} \right)^2$$

$$\text{PIV}_{\text{CB}} = \frac{p_{\text{compressor,out}} + p_{2,\text{dyn,CB}} + p_0}{p_{1,\text{eff}} + p_{\text{dyn}}}$$

F88 PIT_{nozzle}

ID function = 2474

Descrizione = Rapporto di espansione total-to-total all'ugello, calcolato in funzione della pressione dinamica e delle pressioni statiche in ingresso e uscita turbina

$$p_0 = \text{pressione ambiente} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{turbine,in}} = \text{pressione ingresso turbina} \cdot 100000 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{turbine,out}} = \text{pressione uscita turbina} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{dyn5,nozzle}} = \text{pressione dinamica ingresso turbina (da F76)} \quad [\text{Pa}]$$

Rapporto di espansione total-to-total:

$$\text{PIT}_{\text{nozzle}} = \frac{p_{\text{turbine,in}} + p_{\text{dyn5,nozzle}} + p_0}{p_0 + p_{\text{turbine,out}}}$$

F89 PIT_{EC4T}

ID function = 2475

Descrizione = Rapporto di espansione total-to-total nel ciclo EC4T, calcolato in funzione della pressione dinamica e delle pressioni statiche in ingresso e uscita turbina

$$p_0 = \text{pressione ambiente} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{turbine,in}} = \text{pressione ingresso turbina} \cdot 100000 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{turbine,out}} = \text{pressione uscita turbina} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{dyn5,EC4T}} = \text{pressione dinamica ingresso turbina (da F77)} \quad [\text{Pa}]$$

Rapporto di espansione total-to-total:

$$\text{PIT}_{\text{EC4T}} = \frac{p_{\text{turbine,in}} + p_{\text{dyn5,EC4T}} + p_0}{p_0 + p_{\text{turbine,out}}}$$

F90 **PIT_{EC2T}**

ID function = 2476

Descrizione = Rapporto di espansione total-to-total nel ciclo EC2T, calcolato in funzione della pressione dinamica e delle pressioni statiche in ingresso e uscita turbina

$$p_0 = \text{pressione ambiente} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{turbine,in}} = \text{pressione ingresso turbina} \cdot 100000 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{turbine,out}} = \text{pressione uscita turbina} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{dyn5,EC2T}} = \text{pressione dinamica ingresso turbina (da F78)} \quad [\text{Pa}]$$

Rapporto di espansione total-to-total:

$$\text{PIT}_{\text{EC2T}} = \frac{p_{\text{turbine,in}} + p_{\text{dyn5,EC2T}} + p_0}{p_0 + p_{\text{turbine,out}}}$$

F91 **PIT_{CB}**

ID function = 2477

Descrizione = Rapporto di espansione total-to-total secondo il bilancio del carbonio, calcolato in funzione della pressione dinamica e delle pressioni statiche in ingresso e uscita turbina, con gestione delle condizioni speciali

$$p_0 = \text{pressione ambiente} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{turbine,in}} = \text{pressione ingresso turbina} \cdot 100000 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{turbine,out}} = \text{pressione uscita turbina} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{dyn5,CB}} = \text{pressione dinamica ingresso turbina (da F79)} \quad [\text{Pa}]$$

Condizioni speciali:

- Se $p_{\text{dyn5,CB}} = 0$, allora $\text{PIT}_{\text{CB}} = 0$ (motore spento o EWG chiusa/non presente)
- Se $p_{\text{dyn5,CB}} = -0.00001$, allora $\text{PIT}_{\text{CB}} = -0.00001$ (AMA disattivato)

Altrimenti:

$$\text{PIT}_{\text{CB}} = \frac{p_{\text{turbine,in}} + p_{\text{dyn5,CB}} + p_0}{p_0 + p_{\text{turbine,out}}}$$

F92 $\eta_{sv,nozzle}$

ID function = 2478

Descrizione = Rendimento isentropico del compressore, calcolato in funzione del rapporto di compressione e della variazione di temperatura tra ingresso e uscita

$$t_{in} = \text{temperatura ingresso compressore} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$t_{out} = \text{temperatura uscita compressore} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$k_{air} = \text{coefficiente politropico dell'aria (da F9)}$$

$$\text{PIV}_{nozzle} = \text{rapporto di compressione (da F80)}$$

Rendimento isentropico del compressore:

$$\eta_{sv,nozzle} = \frac{100 \cdot \left(\text{PIV}_{nozzle}^{\frac{k_{air}-1}{k_{air}}} - 1 \right)}{\left(\frac{t_{out}}{t_{in}} - 1 \right)} \quad [\%]$$

F93 $\eta_{sv,EC4T}$

ID function = 2479

Descrizione = Rendimento isentropico del compressore nel ciclo EC4T, calcolato in funzione del rapporto di compressione e della variazione di temperatura tra ingresso e uscita

$$t_{in} = \text{temperatura ingresso compressore} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$t_{out} = \text{temperatura uscita compressore} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$k_{air} = \text{coefficiente politropico dell'aria (da F9)}$$

$$\text{PIV}_{EC4T} = \text{rapporto di compressione (da F81)}$$

Rendimento isentropico del compressore:

$$\eta_{sv,EC4T} = \frac{100 \cdot \left(\text{PIV}_{EC4T}^{\frac{k_{air}-1}{k_{air}}} - 1 \right)}{\left(\frac{t_{out}}{t_{in}} - 1 \right)} \quad [\%]$$

F94 $\eta_{sv,EC2T}$

ID function = 2480

Descrizione = Rendimento isentropico del compressore nel ciclo EC2T, calcolato in

funzione del rapporto di compressione e della variazione di temperatura tra ingresso e uscita

$$t_{\text{in}} = \text{temperatura ingresso compressore} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$t_{\text{out}} = \text{temperatura uscita compressore} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$k_{\text{air}} = \text{coefficiente politropico dell'aria (da F9)}$$

$$\text{PIV}_{\text{EC2T}} = \text{rapporto di compressione (da F82)}$$

Rendimento isentropico del compressore:

$$\eta_{\text{sv,EC2T}} = \frac{100 \cdot \left(\text{PIV}_{\text{EC2T}}^{\frac{k_{\text{air}}-1}{k_{\text{air}}} - 1} \right)}{\left(\frac{t_{\text{out}}}{t_{\text{in}}} - 1 \right)} \quad [\%]$$

F95 $\eta_{\text{sv,CB}}$

ID function = 2481

Descrizione = Rendimento isentropico del compressore secondo il bilancio del carbonio, calcolato in funzione del rapporto di compressione e della variazione di temperatura tra ingresso e uscita, con gestione delle condizioni speciali

$$t_{\text{in}} = \text{temperatura ingresso compressore} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$t_{\text{out}} = \text{temperatura uscita compressore} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$k_{\text{air}} = \text{coefficiente politropico dell'aria (da F9)}$$

$$\text{PIV}_{\text{CB}} = \text{rapporto di compressione (da F83)}$$

Condizioni speciali:

- Se $\text{PIV}_{\text{CB}} = 0$, allora $\eta_{\text{sv,CB}} = 0$ (motore spento)
- Se $\text{PIV}_{\text{CB}} = -0.00001$, allora $\eta_{\text{sv,CB}} = -0.00001$ (AMA disattivato)

Altrimenti:

$$\eta_{\text{sv,CB}} = \frac{100 \cdot \left(\text{PIV}_{\text{CB}}^{\frac{k_{\text{air}}-1}{k_{\text{air}}} - 1} \right)}{\left(\frac{t_{\text{out}}}{t_{\text{in}}} - 1 \right)} \quad [\%]$$

F108 $\eta_{\text{TC,ABB}}$

ID function = 2482

Descrizione = Rendimento del turbogruppo con nozzle secondo la formulazione ABB, calcolato in funzione dei rapporti PIV e PIT, delle temperature e dei consumi specifici

$$t_{\text{compressor,in}} = \text{temperatura ingresso compressore} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$t_{\text{turbine,in}} = \text{temperatura ingresso turbina} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$k_{\text{air}} = \text{coefficiente politropico aria (da F9)}$$

$$k_{\text{exh}} = \text{coefficiente politropico gas di scarico (da F56)}$$

$$\text{BSFC} = \text{consumo specifico carburante (da F16)} \quad [\text{kg/kWh}]$$

$$\text{BSFC}_{\text{pilot}} = \text{consumo specifico pilota (da F17)} \quad [\text{kg/kWh}]$$

$$\text{BSAC}_{\text{nozzle}} = \text{consumo aria compressa (da F33)} \quad [\text{kg/kWh}]$$

$$\text{PIV}_{\text{nozzle}} = \text{rapporto di compressione (da F80)}$$

$$\text{PIT}_{\text{nozzle}} = \text{rapporto di espansione (da F88)}$$

$$K_{\text{air}} = \frac{k_{\text{air}} - 1}{k_{\text{air}}}$$

$$K_{\text{exh}} = \frac{k_{\text{exh}} - 1}{k_{\text{exh}}}$$

Rendimento turbogruppo ABB:

$$\eta_{\text{TC,ABB}} = \frac{100 \cdot \left(\text{BSAC}_{\text{nozzle}} \cdot \frac{1}{K_{\text{air}}} \cdot (\text{PIV}_{\text{nozzle}}^{K_{\text{air}}} - 1) \cdot t_{\text{compressor,in}} \right)}{\left((\text{BSAC}_{\text{nozzle}} + \text{BSFC} + \text{BSFC}_{\text{pilot}}) \cdot \frac{1}{K_{\text{exh}}} \cdot \left(1 - \text{PIT}_{\text{nozzle}}^{-K_{\text{exh}}} \right) \cdot t_{\text{turbine,in}} \right)}$$

F109 $\eta_{\text{TC,ABB,EC4T}}$

ID function = 2483

Descrizione = Rendimento del turbogruppo nel ciclo EC4T secondo la formulazione ABB, calcolato in funzione dei rapporti PIV e PIT, delle temperature e dei consumi specifici

$t_{\text{compressor,in}} = \text{temperatura ingresso compressore} + 273.15$ [K]

$t_{\text{turbine,in}} = \text{temperatura ingresso turbina} + 273.15$ [K]

k_{air} = coefficiente politropico aria (da F9)

$k_{\text{exh,EC4T}}$ = coefficiente politropico gas di scarico EC4T (da F57)

BSFC = consumo specifico carburante (da F16) [kg/kWh]

$\text{BSFC}_{\text{pilot}}$ = consumo specifico pilota (da F17) [kg/kWh]

$\text{BSAC}_{\text{EC4T}}$ = consumo aria compressa EC4T (da F34) [kg/kWh]

PIV_{EC4T} = rapporto di compressione (da F81)

PIT_{EC4T} = rapporto di espansione (da F89)

$$K_{\text{air}} = \frac{k_{\text{air}} - 1}{k_{\text{air}}}$$

$$K_{\text{exh}} = \frac{k_{\text{exh,EC4T}} - 1}{k_{\text{exh,EC4T}}}$$

Rendimento turbogruppo ABB (EC4T):

$$\eta_{\text{TC,ABB,EC4T}} = \frac{100 \cdot \left(\text{BSAC}_{\text{EC4T}} \cdot \frac{1}{K_{\text{air}}} \cdot \left(\text{PIV}_{\text{EC4T}}^{K_{\text{air}}} - 1 \right) \cdot t_{\text{compressor,in}} \right)}{\left((\text{BSAC}_{\text{EC4T}} + \text{BSFC} + \text{BSFC}_{\text{pilot}}) \cdot \frac{1}{K_{\text{exh}}} \cdot \left(1 - \text{PIT}_{\text{EC4T}}^{-K_{\text{exh}}} \right) \cdot t_{\text{turbine,in}} \right)}$$

F110 $\eta_{\text{TC,ABB,EC2T}}$

ID function = 2484

Descrizione = Rendimento del turbogruppo nel ciclo EC2T secondo la formulazione ABB, calcolato in funzione dei rapporti PIV e PIT, delle temperature e dei consumi specifici

$t_{\text{compressor,in}} = \text{temperatura ingresso compressore} + 273.15$ [K]

$t_{\text{turbine,in}} = \text{temperatura ingresso turbina} + 273.15$ [K]

k_{air} = coefficiente politropico aria (da F9)

$k_{\text{exh,EC2T}}$ = coefficiente politropico gas di scarico EC2T (da F58)

BSFC = consumo specifico carburante (da F16) [kg/kWh]

$\text{BSFC}_{\text{pilot}}$ = consumo specifico pilota (da F17) [kg/kWh]

$\text{BSAC}_{\text{EC2T}}$ = consumo aria compressa EC2T (da F35) [kg/kWh]

PIV_{EC2T} = rapporto di compressione (da F82)

PIT_{EC2T} = rapporto di espansione (da F90)

$$K_{\text{air}} = \frac{k_{\text{air}} - 1}{k_{\text{air}}}$$

$$K_{\text{exh}} = \frac{k_{\text{exh,EC2T}} - 1}{k_{\text{exh,EC2T}}}$$

Rendimento turbogruppo ABB (EC2T):

$$\eta_{\text{TC,ABB,EC2T}} = \frac{100 \cdot \left(\text{BSAC}_{\text{EC2T}} \cdot \frac{1}{K_{\text{air}}} \cdot \left(\text{PIV}_{\text{EC2T}}^{K_{\text{air}}} - 1 \right) \cdot t_{\text{compressor,in}} \right)}{\left((\text{BSAC}_{\text{EC2T}} + \text{BSFC} + \text{BSFC}_{\text{pilot}}) \cdot \frac{1}{K_{\text{exh}}} \cdot \left(1 - \text{PIT}_{\text{EC2T}}^{-K_{\text{exh}}} \right) \cdot t_{\text{turbine,in}} \right)}$$

F111 $\eta_{\text{TC,ABB,CB}}$

ID function = 2485

Descrizione = Rendimento del turbogruppo secondo il bilancio del carbonio (CB) con formulazione ABB, calcolato in funzione dei rapporti PIV e PIT, delle temperature e dei consumi specifici

$t_{\text{compressor,in}} = \text{temperatura ingresso compressore} + 273.15 \quad [\text{K}]$

$t_{\text{turbine,in}} = \text{temperatura ingresso turbina} + 273.15 \quad [\text{K}]$

$k_{\text{air}} = \text{coefficiente politropico aria (da F9)}$

$k_{\text{exh,CB}} = \text{coefficiente politropico gas di scarico CB (da F59)}$

$\text{BSFC} = \text{consumo specifico carburante (da F16)} \quad [\text{kg/kWh}]$

$\text{BSFC}_{\text{pilot}} = \text{consumo specifico pilota (da F17)} \quad [\text{kg/kWh}]$

$\text{BSAC}_{\text{CB}} = \text{consumo aria compressa CB (da F36)} \quad [\text{kg/kWh}]$

$\text{PIV}_{\text{CB}} = \text{rapporto di compressione (da F83)}$

$\text{PIT}_{\text{CB}} = \text{rapporto di espansione (da F91)}$

$$K_{\text{air}} = \frac{k_{\text{air}} - 1}{k_{\text{air}}}$$

$$K_{\text{exh}} = \frac{k_{\text{exh,CB}} - 1}{k_{\text{exh,CB}}}$$

Condizioni speciali:

- Se $\text{BSFC} = 0$ e $\text{BSFC}_{\text{pilot}} = 0$, allora $\eta_{\text{TC,ABB,CB}} = 0$ (motore spento)
- Se $\text{BSAC}_{\text{CB}} = -0.00001$, allora $\eta_{\text{TC,ABB,CB}} = -0.00001$ (AMA disattivato)

Altrimenti:

$$\eta_{\text{TC,ABB,CB}} = \frac{100 \cdot \left(\text{BSAC}_{\text{CB}} \cdot \frac{1}{K_{\text{air}}} \cdot (\text{PIV}_{\text{CB}}^{K_{\text{air}}} - 1) \cdot t_{\text{compressor,in}} \right)}{\left((\text{BSAC}_{\text{CB}} + \text{BSFC} + \text{BSFC}_{\text{pilot}}) \cdot \frac{1}{K_{\text{exh}}} \cdot \left(1 - \text{PIT}_{\text{CB}}^{-K_{\text{exh}}} \right) \cdot t_{\text{turbine,in}} \right)}$$

F112 $\eta_{\text{TC,CIMAC}}$

ID function = 2486

Descrizione = Rendimento del turbogruppo con nozzle secondo la formulazione CIMAC, calcolato in funzione dei rapporti PIV e PIT, delle temperature, delle portate e della componente cinetica di ristagno

$$t_{\text{compressor,in}} = T_{\text{compressor,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$t_{\text{turbine,in}} = T_{\text{turbine,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$p_0 = \text{pressione ambiente} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{turbine,in}} = \text{pressione ingresso turbina} \cdot 100000 \quad [\text{Pa}]$$

$$\text{stadi} = \begin{cases} 1 & \text{se oneS_twoS} = 0 \\ 2 & \text{se oneS_twoS} = 1 \end{cases}$$

$$D_{\text{turbine,in}} = \text{diametro ingresso turbina}/1000 \quad [\text{m}]$$

$$\dot{m}_{\text{air}} = \text{portata aria (da F2)} \quad [\text{kg/s}]$$

$$\dot{m}_{\text{exh,nozzle,redux}} = \text{portata gas di scarico ridotta (da F72)}/3600 \quad [\text{kg/s}]$$

$$k_{\text{air}} = \text{coefficiente politropico aria (da F9)}$$

$$k_{\text{exh}} = \text{coefficiente politropico gas di scarico (da F56)}$$

$$R_{\text{air}} = 287.04 \quad [\text{J/kg}\cdot\text{K}]$$

$$R_{\text{exh}} = 293.93 \quad [\text{J/kg}\cdot\text{K}]$$

$$K_{\text{air}} = \frac{k_{\text{air}} - 1}{k_{\text{air}}}$$

$$K_{\text{exh}} = \frac{k_{\text{exh}} - 1}{k_{\text{exh}}}$$

$$\rho = \frac{p_0 + p_{\text{turbine,in}}}{R_{\text{exh}} \cdot t_{\text{turbine,in}}}$$

$$v = \frac{4 \cdot \dot{m}_{\text{exh,nozzle,redux}}}{\text{stadi} \cdot \rho \cdot \pi \cdot D_{\text{turbine,in}}^2}$$

$$t_5^{\text{correction}} = \frac{1}{1000} \cdot \frac{K_{\text{exh}} \cdot v^2}{2}$$

Rendimento turbogruppo CIMAC:

$$\eta_{\text{TC,CIMAC}} = \frac{100 \cdot R_{\text{air}} \cdot \dot{m}_{\text{air}} \cdot \frac{1}{K_{\text{air}}} \cdot t_{\text{compressor,in}} \cdot (\text{PIV}_{\text{nozzle}}^{K_{\text{air}}} - 1)}{R_{\text{exh}} \cdot \dot{m}_{\text{exh,nozzle,redux}} \cdot \frac{1}{K_{\text{exh}}} \cdot (t_{\text{turbine,in}} + t_5^{\text{correction}}) \cdot (1 - \text{PIT}_{\text{nozzle}}^{-K_{\text{exh}}})}$$

F113 $\eta_{\text{TC,CIMAC,EC4T}}$

ID function = 2487

Descrizione = Rendimento del turbogruppo nel ciclo EC4T secondo la formulazione CIMAC, calcolato in funzione dei rapporti PIV e PIT, delle temperature, delle portate e della componente cinetica di ristagno

$$t_{\text{compressor,in}} = T_{\text{compressor,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$t_{\text{turbine,in}} = T_{\text{turbine,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$p_0 = \text{pressione ambiente} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{turbine,in}} = \text{pressione ingresso turbina} \cdot 100000 \quad [\text{Pa}]$$

$$\text{stadi} = \begin{cases} 1 & \text{se oneS_twoS} = 0 \\ 2 & \text{se oneS_twoS} = 1 \end{cases}$$

$$D_{\text{turbine,in}} = \text{diametro ingresso turbina}/1000 \quad [\text{m}]$$

$$\dot{m}_{\text{EC4T}} = \text{portata aria EC4T (da F7)} \quad [\text{kg/s}]$$

$$\dot{m}_{\text{exh,redux}} = \text{portata gas di scarico ridotta (da F73)}/3600 \quad [\text{kg/s}]$$

$$k_{\text{air}} = \text{coefficiente politropico aria (da F9)}$$

$$k_{\text{exh}} = \text{coefficiente politropico gas di scarico EC4T (da F57)}$$

$$R_{\text{air}} = 287.04 \quad [\text{J/kg}\cdot\text{K}]$$

$$R_{\text{exh}} = 293.93 \quad [\text{J/kg}\cdot\text{K}]$$

$$K_{\text{air}} = \frac{k_{\text{air}} - 1}{k_{\text{air}}}$$

$$K_{\text{exh}} = \frac{k_{\text{exh}} - 1}{k_{\text{exh}}}$$

$$\rho = \frac{p_0 + p_{\text{turbine,in}}}{R_{\text{exh}} \cdot t_{\text{turbine,in}}}$$

$$v = \frac{4 \cdot \dot{m}_{\text{exh,redux}}}{\text{stadi} \cdot \rho \cdot \pi \cdot D_{\text{turbine,in}}^2}$$

$$t_5^{\text{correction}} = \frac{1}{1000} \cdot \frac{K_{\text{exh}} \cdot v^2}{2}$$

Rendimento turbogruppo CIMAC (EC4T):

$$\eta_{\text{TC,CIMAC,EC4T}} = \frac{100 \cdot R_{\text{air}} \cdot \dot{m}_{\text{EC4T}} \cdot \frac{1}{K_{\text{air}}} \cdot t_{\text{compressor,in}} \cdot (\text{PIV}_{\text{EC4T}}^{K_{\text{air}}} - 1)}{R_{\text{exh}} \cdot \dot{m}_{\text{exh,redux}} \cdot \frac{1}{K_{\text{exh}}} \cdot (t_{\text{turbine,in}} + t_5^{\text{correction}}) \cdot \left(1 - \text{PIT}_{\text{EC4T}}^{-K_{\text{exh}}}\right)}$$

F114 $\eta_{\text{TC,CIMAC,EC2T}}$

ID function = 2488

Descrizione = Rendimento del turbogruppo nel ciclo EC2T secondo la formulazione CIMAC, calcolato in funzione dei rapporti PIV e PIT, delle temperature, delle portate e della componente cinetica di ristagno

$$t_{\text{compressor,in}} = T_{\text{compressor,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$t_{\text{turbine,in}} = T_{\text{turbine,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$p_0 = \text{pressione ambiente} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{turbine,in}} = \text{pressione ingresso turbina} \cdot 100000 \quad [\text{Pa}]$$

$$\text{stadi} = \begin{cases} 1 & \text{se oneS_twoS} = 0 \\ 2 & \text{se oneS_twoS} = 1 \end{cases}$$

$$D_{\text{turbine,in}} = \text{diametro ingresso turbina}/1000 \quad [\text{m}]$$

$$\dot{m}_{\text{EC2T}} = \text{portata aria EC2T (da F13)} \quad [\text{kg/s}]$$

$$\dot{m}_{\text{exh,redux,EC2T}} = \text{portata gas di scarico ridotta EC2T (da F74)}/3600 \quad [\text{kg/s}]$$

$$k_{\text{air}} = \text{coefficiente politropico aria (da F9)}$$

$$k_{\text{exh}} = \text{coefficiente politropico gas di scarico EC2T (da F58)}$$

$$R_{\text{air}} = 287.04 \quad [\text{J/kg}\cdot\text{K}]$$

$$R_{\text{exh}} = 293.93 \quad [\text{J/kg}\cdot\text{K}]$$

$$K_{\text{air}} = \frac{k_{\text{air}} - 1}{k_{\text{air}}}$$

$$K_{\text{exh}} = \frac{k_{\text{exh}} - 1}{k_{\text{exh}}}$$

$$\rho = \frac{p_0 + p_{\text{turbine,in}}}{R_{\text{exh}} \cdot t_{\text{turbine,in}}}$$

$$v = \frac{4 \cdot \dot{m}_{\text{exh,redux,EC2T}}}{\text{stadi} \cdot \rho \cdot \pi \cdot D_{\text{turbine,in}}^2}$$

$$t_5^{\text{correction}} = \frac{1}{1000} \cdot \frac{K_{\text{exh}} \cdot v^2}{2}$$

Rendimento turbogruppo CIMAC (EC2T):

$$\eta_{\text{TC,CIMAC,EC2T}} = \frac{100 \cdot R_{\text{air}} \cdot \dot{m}_{\text{EC2T}} \cdot \frac{1}{K_{\text{air}}} \cdot t_{\text{compressor,in}} \cdot (\text{PIV}_{\text{EC2T}}^{K_{\text{air}}} - 1)}{R_{\text{exh}} \cdot \dot{m}_{\text{exh,redux,EC2T}} \cdot \frac{1}{K_{\text{exh}}} \cdot (t_{\text{turbine,in}} + t_5^{\text{correction}}) \cdot (1 - \text{PIT}_{\text{EC2T}}^{-K_{\text{exh}}})}$$

F115 $\eta_{\text{TC,CIMAC,CB}}$

ID function = 2489

Descrizione = Rendimento del turbogruppo secondo il bilancio del carbonio (CB) con formulazione CIMAC, calcolato in funzione dei rapporti PIV e PIT, delle temperature, delle portate e della componente cinetica di ristagno

$$t_{\text{compressor,in}} = T_{\text{compressor,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$t_{\text{turbine,in}} = T_{\text{turbine,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$p_0 = \text{pressione ambiente} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{turbine,in}} = \text{pressione ingresso turbina} \cdot 100000 \quad [\text{Pa}]$$

$$\text{stadi} = \begin{cases} 1 & \text{se oneS_twoS} = 0 \\ 2 & \text{se oneS_twoS} = 1 \end{cases}$$

$$D_{\text{turbine,in}} = \text{diametro ingresso turbina}/1000 \quad [\text{m}]$$

$$\dot{m}_{\text{CB}} = \text{portata aria CB (da F29)} \quad [\text{kg/s}]$$

$$\dot{m}_{\text{exh,redux,CB}} = \text{portata gas di scarico ridotta CB (da F75)}/3600 \quad [\text{kg/s}]$$

$$k_{\text{air}} = \text{coefficiente politropico aria (da F9)}$$

$$k_{\text{exh}} = \text{coefficiente politropico gas di scarico CB (da F59)}$$

$$R_{\text{air}} = 287.04 \quad [\text{J/kg}\cdot\text{K}]$$

$$R_{\text{exh}} = 293.93 \quad [\text{J/kg}\cdot\text{K}]$$

$$K_{\text{air}} = \frac{k_{\text{air}} - 1}{k_{\text{air}}}$$

$$K_{\text{exh}} = \frac{k_{\text{exh}} - 1}{k_{\text{exh}}}$$

$$\rho = \frac{p_0 + p_{\text{turbine,in}}}{R_{\text{exh}} \cdot t_{\text{turbine,in}}}$$

$$v = \frac{4 \cdot \dot{m}_{\text{exh,redux,CB}}}{\text{stadi} \cdot \rho \cdot \pi \cdot D_{\text{turbine,in}}^2}$$

$$t_5^{\text{correction}} = \frac{1}{1000} \cdot \frac{K_{\text{exh}} \cdot v^2}{2}$$

Condizioni speciali:

- Se $\dot{m}_{\text{CB}} = 0$, allora $\eta_{\text{TC,CIMAC,CB}} = 0$ (motore spento)
- Se $\dot{m}_{\text{CB}} = -0.00001$, allora $\eta_{\text{TC,CIMAC,CB}} = -0.00001$ (AMA disattivato)

Altrimenti:

$$\eta_{\text{TC,CIMAC,CB}} = \frac{100 \cdot R_{\text{air}} \cdot \dot{m}_{\text{CB}} \cdot \frac{1}{K_{\text{air}}} \cdot t_{\text{compressor,in}} \cdot (\text{PIV}_{\text{CB}}^{K_{\text{air}}} - 1)}{R_{\text{exh}} \cdot \dot{m}_{\text{exh,redux,CB}} \cdot \frac{1}{K_{\text{exh}}} \cdot (t_{\text{turbine,in}} + t_5^{\text{correction}}) \cdot \left(1 - \text{PIT}_{\text{CB}}^{-K_{\text{exh}}}\right)}$$

F116 $\eta_{\text{TC,MET}}$

ID function = 2490

Descrizione = Rendimento del turbogruppo con nozzle secondo la formulazione MET (Mitsubishi Experimental Theory), calcolato in funzione dei rapporti PIV e PIT e delle temperature, con coefficienti empirici

$$t_{\text{compressor,in}} = T_{\text{compressor,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$t_{\text{turbine,in}} = T_{\text{turbine,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

PIV_{nozzle} = rapporto di compressione (da F80)

PIT_{nozzle} = rapporto di espansione (da F88)

rah = 0.2857 (rapporto dei calori specifici dell'aria)

reh = 0.2593 (rapporto dei calori specifici dei gas di scarico)

coefficiente MET = 0.91 (coefficiente sperimentale Mitsubishi)

Rendimento turbogruppo MET:

$$\eta_{\text{TC,MET}} = \frac{100 \cdot 0.91 \cdot t_{\text{compressor,in}} \cdot (\text{PIV}_{\text{nozzle}}^{\text{rah}} - 1)}{t_{\text{turbine,in}} \cdot (1 - \text{PIT}_{\text{nozzle}}^{-\text{reh}})}$$

F117 $\eta_{\text{TC,MET,EC4T}}$

ID function = 2491

Descrizione = Rendimento del turbogruppo nel ciclo EC4T secondo la formulazione MET (Mitsubishi Experimental Theory), calcolato in funzione dei rapporti PIV e PIT e delle temperature, con coefficienti empirici

$$t_{\text{compressor,in}} = T_{\text{compressor,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$t_{\text{turbine,in}} = T_{\text{turbine,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

PIV_{EC4T} = rapporto di compressione (da F81)

PIT_{EC4T} = rapporto di espansione (da F89)

rah = 0.2857 (rapporto dei calori specifici dell'aria)

reh = 0.2593 (rapporto dei calori specifici dei gas di scarico)

coefficiente MET = 0.91 (coefficiente sperimentale Mitsubishi)

Rendimento turbogruppo MET (EC4T):

$$\eta_{\text{TC,MET,EC4T}} = \frac{100 \cdot 0.91 \cdot t_{\text{compressor,in}} \cdot (\text{PIV}_{\text{EC4T}}^{\text{rah}} - 1)}{t_{\text{turbine,in}} \cdot (1 - \text{PIT}_{\text{EC4T}}^{-\text{reh}})}$$

F118 $\eta_{\text{TC,MET,EC2T}}$

ID function = 2492

Descrizione = Rendimento del turbogruppo nel ciclo EC2T secondo la formulazione MET (Mitsubishi Experimental Theory), calcolato in funzione dei rapporti PIV e PIT e delle temperature, con coefficienti empirici

$$t_{\text{compressor,in}} = T_{\text{compressor,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$t_{\text{turbine,in}} = T_{\text{turbine,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

PIV_{EC2T} = rapporto di compressione (da F82)

PIT_{EC2T} = rapporto di espansione (da F90)

$\text{rah} = 0.2857$ (rapporto dei calori specifici dell'aria)

$\text{reh} = 0.2593$ (rapporto dei calori specifici dei gas di scarico)

coefficiente MET = 0.91 (coefficiente sperimentale Mitsubishi)

Rendimento turbogruppo MET (EC2T):

$$\eta_{\text{TC,MET,EC2T}} = \frac{100 \cdot 0.91 \cdot T_{\text{compressor,in}} \cdot (\text{PIV}_{\text{EC2T}}^{\text{rah}} - 1)}{T_{\text{turbine,in}} \cdot (1 - \text{PIT}_{\text{EC2T}}^{-\text{reh}})}$$

F119 $\eta_{\text{TC,MET,CB}}$

ID function = 2493

Descrizione = Rendimento del turbogruppo secondo il bilancio del carbonio (CB) con formulazione MET, calcolato in funzione dei rapporti PIV e PIT e delle temperature, con coefficienti empirici

$$t_{\text{compressor,in}} = T_{\text{compressor,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$t_{\text{turbine,in}} = T_{\text{turbine,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

PIV_{CB} = rapporto di compressione (da F83)

PIT_{CB} = rapporto di espansione (da F91)

$\text{rah} = 0.2857$ (rapporto dei calori specifici dell'aria)

$\text{reh} = 0.2593$ (rapporto dei calori specifici dei gas di scarico)

coefficiente MET = 0.91 (coefficiente sperimentale Mitsubishi)

Rendimento turbogruppo MET (CB):

$$\eta_{TC,MET,CB} = \begin{cases} \frac{100 \cdot 0.91 \cdot T_{compressor,in} \cdot (PIV_{CB}^{rah} - 1)}{T_{turbine,in}} & \text{se } PIT_{CB} = 0 \\ \frac{100 \cdot 0.91 \cdot T_{compressor,in} \cdot (PIV_{CB}^{rah} - 1)}{T_{turbine,in} \cdot (1 - PIT_{CB}^{-reh})} & \text{altrimenti} \end{cases}$$

F132 $\eta_{T,ABB,nozzle}$

ID function = 2494

Descrizione = Rendimento della sola turbina nel ciclo con nozzle secondo il metodo ABB, calcolato come rapporto tra il rendimento del turbogruppo e quello del compressore

$\eta_{sv,nozzle}$ = rendimento isentropico del compressore (da F92) [%]

$\eta_{TC,ABB}$ = rendimento del turbogruppo ABB (da F108) [%]

Rendimento turbina ABB (nozzle):

$$\eta_{T,ABB,nozzle} = \frac{100 \cdot \eta_{TC,ABB}}{\eta_{sv,nozzle}} \quad [\%]$$

F133 $\eta_{T,ABB,EC4T}$

ID function = 2495

Descrizione = Rendimento della sola turbina nel ciclo EC4T secondo il metodo ABB, calcolato come rapporto tra il rendimento del turbogruppo e quello del compressore

$\eta_{sv,EC4T}$ = rendimento isentropico del compressore EC4T (da F93) [%]

$\eta_{TC,ABB}$ = rendimento del turbogruppo ABB EC4T (da F109) [%]

Rendimento turbina ABB (EC4T):

$$\eta_{T,ABB,EC4T} = \frac{100 \cdot \eta_{TC,ABB}}{\eta_{sv,EC4T}} \quad [\%]$$

F134 $\eta_{T,ABB,EC2T}$

ID function = 2496

Descrizione = Rendimento della sola turbina nel ciclo EC2T secondo il metodo ABB,

calcolato come rapporto tra il rendimento del turbogruppo e quello del compressore

$\eta_{sv,EC2T}$ = rendimento isentropico del compressore EC2T (da F94) [%]

$\eta_{TC,ABB}$ = rendimento del turbogruppo ABB EC2T (da F110) [%]

Rendimento turbina ABB (EC2T):

$$\eta_{T,ABB,EC2T} = \frac{100 \cdot \eta_{TC,ABB}}{\eta_{sv,EC2T}} \quad [\%]$$

F135 $\eta_{T,ABB,CB}$

ID function = 2497

Descrizione = Rendimento della sola turbina nel ciclo CB secondo il metodo ABB, calcolato come rapporto tra il rendimento del turbogruppo e quello del compressore, con gestione delle condizioni speciali

$\eta_{sv,CB}$ = rendimento isentropico del compressore CB (da F95) [%]

$\eta_{TC,ABB}$ = rendimento del turbogruppo ABB CB (da F111) [%]

Condizioni speciali:

- Se $\eta_{sv,CB} = 0$, allora $\eta_{T,ABB,CB} = 0$ (motore spento)
- Se $\eta_{sv,CB} = -0.00001$, allora $\eta_{T,ABB,CB} = -0.00001$ (AMA disattivato)

Altrimenti:

$$\eta_{T,ABB,CB} = \frac{100 \cdot \eta_{TC,ABB}}{\eta_{sv,CB}} \quad [\%]$$

F136 $\eta_{T,CIMAC,nozzle}$

ID function = 2498

Descrizione = Rendimento della sola turbina nel ciclo con nozzle secondo il metodo CIMAC, calcolato come rapporto tra il rendimento del turbogruppo e quello del compressore

$\eta_{sv,nozzle}$ = rendimento isentropico del compressore (da F92) [%]

$\eta_{TC,CIMAC}$ = rendimento del turbogruppo CIMAC (da F112) [%]

Rendimento turbina CIMAC (nozzle):

$$\eta_{T,CIMAC,nozzle} = \frac{100 \cdot \eta_{TC,CIMAC}}{\eta_{sv,nozzle}} \quad [\%]$$

F137 $\eta_{T,CIMAC,EC4T}$

ID function = 2499

Descrizione = Rendimento della sola turbina nel ciclo EC4T secondo il metodo CIMAC, calcolato come rapporto tra il rendimento del turbogruppo e quello del compressore

$\eta_{sv,EC4T}$ = rendimento isentropico del compressore EC4T (da F93) [%]

$\eta_{TC,CIMAC}$ = rendimento del turbogruppo CIMAC EC4T (da F113) [%]

Rendimento turbina CIMAC (EC4T):

$$\eta_{T,CIMAC,EC4T} = \frac{100 \cdot \eta_{TC,CIMAC}}{\eta_{sv,EC4T}} \quad [\%]$$

F138 $\eta_{T,CIMAC,EC2T}$

ID function = 2500

Descrizione = Rendimento della sola turbina nel ciclo EC2T secondo il metodo CIMAC, calcolato come rapporto tra il rendimento del turbogruppo e quello del compressore

$\eta_{sv,EC2T}$ = rendimento isentropico del compressore EC2T (da F94) [%]

$\eta_{TC,CIMAC}$ = rendimento del turbogruppo CIMAC EC2T (da F114) [%]

Rendimento turbina CIMAC (EC2T):

$$\eta_{T,CIMAC,EC2T} = \frac{100 \cdot \eta_{TC,CIMAC}}{\eta_{sv,EC2T}} \quad [\%]$$

F139 $\eta_{T,CIMAC,CB}$

ID function = 2501

Descrizione = Rendimento della sola turbina nel ciclo CB secondo il metodo CI-

MAC, calcolato come rapporto tra il rendimento del turbogruppo e quello del compressore, con gestione delle condizioni speciali

$\eta_{sv,CB}$ = rendimento isentropico del compressore CB (da F95) [%]

$\eta_{TC,CIMAC}$ = rendimento del turbogruppo CIMAC CB (da F115) [%]

Condizioni speciali:

- Se $\eta_{sv,CB} = 0$, allora $\eta_{T,CIMAC,CB} = 0$ (motore spento)
- Se $\eta_{sv,CB} = -0.00001$, allora $\eta_{T,CIMAC,CB} = -0.00001$ (AMA disattivato)

Altrimenti:

$$\eta_{T,CIMAC,CB} = \frac{100 \cdot \eta_{TC,CIMAC}}{\eta_{sv,CB}} \quad [\%]$$

F140 $\eta_{T,MET,nozzle}$

ID function = 2502

Descrizione = Rendimento della sola turbina nel ciclo con nozzle secondo il metodo MET, calcolato come rapporto tra il rendimento del turbogruppo e quello del compressore

$\eta_{sv,nozzle}$ = rendimento isentropico del compressore (da F92) [%]

$\eta_{TC,MET}$ = rendimento del turbogruppo MET (da F116) [%]

Rendimento turbina MET (nozzle):

$$\eta_{T,MET,nozzle} = \frac{100 \cdot \eta_{TC,MET}}{\eta_{sv,nozzle}} \quad [\%]$$

F141 $\eta_{T,MET,EC4T}$

ID function = 2503

Descrizione = Rendimento della sola turbina nel ciclo EC4T secondo il metodo MET, calcolato come rapporto tra il rendimento del turbogruppo e quello del compressore

$\eta_{sv,EC4T}$ = rendimento isentropico del compressore EC4T (da F93) [%]

$\eta_{TC,MET}$ = rendimento del turbogruppo MET EC4T (da F117) [%]

Rendimento turbina MET (EC4T):

$$\eta_{T,MET,EC4T} = \frac{100 \cdot \eta_{TC,MET}}{\eta_{sv,EC4T}} \quad [\%]$$

F142 $\eta_{T,MET,EC2T}$

ID function = 2504

Descrizione = Rendimento della sola turbina nel ciclo EC2T secondo il metodo MET, calcolato come rapporto tra il rendimento del turbogruppo e quello del compressore

$\eta_{sv,EC2T}$ = rendimento isentropico del compressore EC2T (da F94) [%]

$\eta_{TC,MET}$ = rendimento del turbogruppo MET EC2T (da F118) [%]

Rendimento turbina MET (EC2T):

$$\eta_{T,MET,EC2T} = \frac{100 \cdot \eta_{TC,MET}}{\eta_{sv,EC2T}} \quad [\%]$$

F143 $\eta_{T,MET,CB}$

ID function = 2505

Descrizione = Rendimento della sola turbina nel ciclo CB secondo il metodo MET, calcolato come rapporto tra il rendimento del turbogruppo e quello del compressore, con gestione del caso motore spento

$\eta_{sv,CB}$ = rendimento isentropico del compressore CB (da F95) [%]

$\eta_{TC,MET}$ = rendimento del turbogruppo MET CB (da F119) [%]

Condizione speciale:

- Se $\eta_{sv,CB} = 0$, allora $\eta_{T,MET,CB} = 0$ (motore spento)

Altrimenti:

$$\eta_{T,MET,CB} = \frac{100 \cdot \eta_{TC,MET}}{\eta_{sv,CB}} \quad [\%]$$

F144 n₂₉₈

ID function = 2506

Descrizione = Giri corretti del turbogruppo, normalizzati rispetto alla temperatura di riferimento $T_{ref} = 298.15$ K, per compensare le variazioni indotte dalla temperatura sul funzionamento del turbogruppo

$$t_{\text{compressor,in}} = T_{\text{compressor,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$n_t = \frac{N_{\text{turbo}}}{60} \quad [\text{rps}]$$

$$T_{\text{ref}} = 298.15 \quad [\text{K}]$$

Condizione speciale:

- Se $n_t = 0$, allora $n_{298} = 0$ (motore spento)

Altrimenti:

$$n_{298} = n_t \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{ref}}}{t_{\text{compressor,in}}}} \quad [\text{rps}]$$

Nota: La correzione dei giri rispetto alla temperatura consente di confrontare il funzionamento del turbogruppo con le mappe di riferimento, compensando le variazioni termiche.

F145 V₂₉₈

ID function = 2507

Descrizione = Portata volumetrica corretta dell'aria in ingresso al compressore nel ciclo con nozzle, normalizzata rispetto alla temperatura di riferimento $T_{ref} = 298.15$ K

$$t_{\text{compressor,in}} = T_{\text{compressor,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$p_0 = P_{\text{amb}} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{compressor,in}} = P_{\text{ingresso}} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$\dot{m}_{\text{air,eng}} = \text{portata massica corretta (da F2)} \quad [\text{kg/s}]$$

$$R = 287.04 \quad [\text{J/kgK}]$$

$$T_{\text{ref}} = 298.15 \quad [\text{K}]$$

$$n_{\text{stadi}} = \begin{cases} 1 & \text{se oneS_twoS} = 0 \\ 2 & \text{se oneS_twoS} = 1 \end{cases}$$

Portata volumetrica corretta:

$$V_{298} = \frac{\dot{m}_{\text{air,eng}}}{n_{\text{stadi}}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{p_0 + p_{\text{compressor,in}}}{R \cdot t_{\text{compressor,in}}} \right)} \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{ref}}}{t_{\text{compressor,in}}}} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Nota: La correzione rispetto a T_{ref} consente di confrontare la portata con le mappe di riferimento, compensando le variazioni termiche.

F146 $V_{298,\text{EC4T}}$

ID function = 2508

Descrizione = Portata volumetrica corretta dell'aria in ingresso al compressore nel ciclo EC4T, normalizzata rispetto alla temperatura di riferimento $T_{\text{ref}} = 298.15 \text{ K}$

$$t_{\text{compressor,in}} = T_{\text{compressor,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$p_0 = P_{\text{amb}} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{compressor,in}} = P_{\text{ingresso}} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$\dot{m}_{\text{air,trapped}} = \text{portata massica corretta (da F6)} \quad [\text{kg/s}]$$

$$R = 287.04 \quad [\text{J/kgK}]$$

$$T_{\text{ref}} = 298.15 \quad [\text{K}]$$

$$n_{\text{stadi}} = \begin{cases} 1 & \text{se oneS_twoS} = 0 \\ 2 & \text{se oneS_twoS} = 1 \end{cases}$$

Portata volumetrica corretta (EC4T):

$$V_{298,\text{EC4T}} = \frac{\dot{m}_{\text{air,trapped}}}{n_{\text{stadi}}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{p_0 + p_{\text{compressor,in}}}{R \cdot t_{\text{compressor,in}}} \right)} \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{ref}}}{t_{\text{compressor,in}}}} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Nota: La correzione rispetto a T_{ref} consente di confrontare la portata con le mappe di riferimento, compensando le variazioni termiche.

F147 $V_{298,\text{EC2T}}$

ID function = 2509

Descrizione = Portata volumetrica corretta dell'aria in ingresso al compressore nel ciclo EC2T, normalizzata rispetto alla temperatura di riferimento $T_{\text{ref}} = 298.15 \text{ K}$

$$t_{\text{compressor,in}} = T_{\text{compressor,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$p_0 = P_{\text{amb}} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{compressor,in}} = P_{\text{ingresso}} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$\dot{m}_{\text{air,trapped}} = \text{portata massica corretta (da F12)} \quad [\text{kg/s}]$$

$$R = 287.04 \quad [\text{J/kgK}]$$

$$T_{\text{ref}} = 298.15 \quad [\text{K}]$$

$$n_{\text{stadi}} = \begin{cases} 1 & \text{se oneS_twoS} = 0 \\ 2 & \text{se oneS_twoS} = 1 \end{cases}$$

Portata volumetrica corretta (EC2T):

$$V_{298,\text{EC2T}} = \frac{\dot{m}_{\text{air,trapped}}}{n_{\text{stadi}}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{p_0 + p_{\text{compressor,in}}}{R \cdot t_{\text{compressor,in}}} \right)} \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{ref}}}{t_{\text{compressor,in}}}} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Nota: La correzione rispetto a T_{ref} consente di confrontare la portata con le mappe di riferimento, compensando le variazioni termiche.

F148 $V_{298,\text{CB}}$

ID function = 2510

Descrizione = Portata volumetrica corretta dell'aria in ingresso al compressore nel ciclo CB, normalizzata rispetto alla temperatura di riferimento $T_{\text{ref}} = 298.15 \text{ K}$, con gestione delle condizioni speciali

$$t_{\text{compressor,in}} = T_{\text{compressor,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$p_0 = P_{\text{amb}} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{compressor,in}} = P_{\text{ingresso}} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$\dot{m}_{\text{air,CB}} = \text{portata massica corretta (da F28)} \quad [\text{kg/s}]$$

$$R = 287.04 \quad [\text{J/kgK}]$$

$$T_{\text{ref}} = 298.15 \quad [\text{K}]$$

$$n_{\text{stadi}} = \begin{cases} 1 & \text{se oneS_twoS} = 0 \\ 2 & \text{se oneS_twoS} = 1 \end{cases}$$

Condizioni speciali:

- Se $\dot{m}_{\text{air,CB}} = 0$, allora $V_{298,\text{CB}} = 0$ (motore spento)
- Se $\dot{m}_{\text{air,CB}} = -0.00001$, allora $V_{298,\text{CB}} = -0.00001$ (AMA disattivato)

Altrimenti:

$$V_{298,\text{CB}} = \frac{\dot{m}_{\text{air,CB}}}{n_{\text{stadi}}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{p_0 + p_{\text{compressor,in}}}{R \cdot t_{\text{compressor,in}}} \right)} \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{ref}}}{t_{\text{compressor,in}}}} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Nota: La correzione rispetto a T_{ref} consente di confrontare la portata con le mappe di riferimento, compensando le variazioni termiche.

F149 BSFC_{tot}

ID function = 2511

Descrizione = Consumo specifico totale di combustibile (BSFC), somma del consumo del combustibile principale e del combustibile di pilotaggio, espresso in [g/kWh]

BSFC = consumo specifico del combustibile principale (da F16) [g/kWh]

BSFC_{pilot} = consumo specifico del combustibile di pilotaggio (da F17) [g/kWh]

Condizione speciale:

- Se BSFC = 0 e BSFC_{pilot} = 0, allora BSFC_{tot} = 0 (motore spento)

Altrimenti:

$$\text{BSFC}_{\text{tot}} = \text{BSFC} + \text{BSFC}_{\text{pilot}} \quad [\text{g/kWh}]$$

F150 k_{hum,NOx}

ID function = 2512

Descrizione = Fattore di correzione per la stima delle emissioni di NO, in funzione della temperatura e dell'umidità dell'aria ambiente. Formula derivata dal NOx Technical Code, Capitolo 5.

$$t_{\text{compressor,in}} = T_{\text{compressor,in}} \quad [{}^{\circ}\text{C}]$$

$$t_3 = T_{\text{receiver}} \quad [{}^{\circ}\text{C}]$$

$$t_{3,\text{nom}} = T_{\text{receiver nominale}} \quad [{}^{\circ}\text{C}]$$

$$H_a = \text{umidità assoluta dell'aria} \quad [\text{gH}_2\text{O/kg aria secca}]$$

Fattore di correzione NO:

$$k_{\text{hum,NOx}} = \frac{1}{1 - 0.012 \cdot (H_a - 10.71) - 0.00275 \cdot (t_{\text{compressor,in}} - 24.85) + 0.00285 \cdot (t_3 - t_{3,\text{nom}})}$$

Nota: La formula è valida nell'intervallo $H_a \in [0, 25]$ gHO/kg aria secca. In assenza di alternative, viene utilizzata anche fuori da tale intervallo.

F151 NOx_{corr}

ID function = 2513

Descrizione = Valore corretto delle emissioni di NO in ppm, calcolato in base alla misura dry o wet e al fattore di correzione ambientale $k_{\text{hum,NOx}}$ (da F150)

$$\text{NOx}_{\text{dry}} = \text{emissioni NO misurate a secco} \quad [\text{ppm}]$$

$$\text{NOx}_{\text{wet}} = \text{emissioni NO misurate a umido} \quad [\text{ppm}]$$

$$\text{NOx}_{\text{dry/wet}} = \begin{cases} 1 & \text{se misura dry} \\ 0 & \text{se misura wet} \end{cases}$$

$$k_{\text{hum,NOx}} = \text{fattore di correzione ambientale (da F150)} \quad [-]$$

Valore corretto delle emissioni NO:

$$\text{NOx}_{\text{corr}} = \begin{cases} k_{\text{hum,NOx}} \cdot \text{NOx}_{\text{dry}} & \text{se misura dry} \\ k_{\text{hum,NOx}} \cdot \text{NOx}_{\text{wet}} & \text{se misura wet} \end{cases} \quad [\text{ppm}]$$

F152 NOx_{CB}

ID function = 2514

Descrizione = Calcolo delle emissioni di NO secondo il metodo del bilancio del carbonio, espresso in [g/kWh], come da NOx Technical Code, Capitolo 5.

P_{eng} = potenza del motore (da F208) [kW]

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{oil (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{gas} \end{cases}$$

$$\text{NOx}_{\text{dry/wet}} = \begin{cases} 1 & \text{misura dry} \\ 0 & \text{misura wet} \end{cases}$$

k_{DtW} = fattore di conversione da dry a wet (da F25)

$\dot{m}_{\text{exh,CB}}$ = portata gas di scarico (da F27) $\cdot 10^3$ [g/h]

NOx_{corr} = valore corretto NO (da F151) $\cdot 10^{-6}$ [-]

Condizioni speciali:

- Se $P_{\text{eng}} = 0$, allora $\text{NOx}_{\text{CB}} = 0$ (motore spento)
- Se $\dot{m}_{\text{exh,CB}} = -0.00001 \cdot 10^3$, allora $\text{NOx}_{\text{CB}} = -0.00001$ (AMA disattivato)

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 1.586 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \quad (\text{gas}) \\ 1.621 & \text{se oil (HFO/LFO)} \end{cases}$$

Calcolo delle emissioni NO:

$$\text{NOx}_{\text{CB}} = \begin{cases} \frac{c \cdot \text{NOx}_{\text{corr}} \cdot \dot{m}_{\text{exh,CB}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se misura dry} \\ \frac{c \cdot \text{NOx}_{\text{corr}} \cdot \dot{m}_{\text{exh,CB}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se misura wet} \end{cases} \quad [\text{g/kWh}]$$

Nota: Il coefficiente c rappresenta il rapporto tra la densità del combustibile e quella dei gas di scarico, ed è tabulato nel NOx Technical Code. In letteratura è indicato con la lettera u .

F153 CO₂^{CB}

ID function = 2515

Descrizione = Calcolo delle emissioni di CO secondo il metodo del bilancio del carbonio, espresso in [g/kWh], come da NOx Technical Code, Capitolo 5.

CO₂ = concentrazione di CO misurata · 10⁻² [-]

P_{eng} = potenza del motore (da F208) [kW]

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{oil (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{gas} \end{cases}$$

k_{DtW} = fattore di conversione da dry a wet (da F25)

$\dot{m}_{\text{exh,CB}}$ = portata gas di scarico (da F27) · 10³ [g/h]

Condizioni speciali:

- Se $P_{\text{eng}} = 0$, allora CO₂^{CB} = 0 (motore spento)
- Se $\dot{m}_{\text{exh,CB}} = -0.00001 \cdot 10^3$, allora CO₂^{CB} = -0.00001 (AMA disattivato)

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 1.517 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \quad (\text{gas}) \\ 1.551 & \text{se oil (HFO/LFO)} \end{cases}$$

Calcolo delle emissioni CO:

$$\text{CO}_2^{\text{CB}} = \frac{c \cdot \text{CO}_2 \cdot \dot{m}_{\text{exh,CB}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} \quad [\text{g/kWh}]$$

Nota: Il coefficiente c rappresenta il rapporto tra la densità del combustibile e quella dei gas di scarico, ed è tabulato nel NOx Technical Code. In letteratura è indicato con la lettera u .

F154 CO_{CB}

ID function = 2516

Descrizione = Calcolo delle emissioni di monossido di carbonio (CO) secondo il metodo del bilancio del carbonio, espresso in [g/kWh], come da NOx Technical Code, Capitolo 5.

$$\text{CO} = \text{concentrazione di CO misurata} \cdot 10^{-4} \quad [-]$$

$$P_{\text{eng}} = \text{potenza del motore (da F208)} \quad [\text{kW}]$$

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{oil (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{gas} \end{cases}$$

$$k_{\text{DtW}} = \text{fattore di conversione da dry a wet (da F25)}$$

$$\dot{m}_{\text{exh,CB}} = \text{portata gas di scarico (da F27)} \cdot 10^3 \quad [\text{g/h}]$$

Condizioni speciali:

- Se $P_{\text{eng}} = 0$, allora $\text{CO}_{\text{CB}} = 0$ (motore spento)
- Se $\dot{m}_{\text{exh,CB}} = -0.00001 \cdot 10^3$, allora $\text{CO}_{\text{CB}} = -0.00001$ (AMA disattivato)

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 0.00966 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \quad (\text{gas}) \\ 0.00987 & \text{se oil (HFO/LFO)} \end{cases}$$

Calcolo delle emissioni CO:

$$\text{CO}_{\text{CB}} = \frac{c \cdot \text{CO} \cdot \dot{m}_{\text{exh,CB}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} \quad [\text{g/kWh}]$$

Nota: Il coefficiente c rappresenta il rapporto tra la densità del combustibile e quella dei gas di scarico, ed è tabulato nel NOx Technical Code. In letteratura è indicato con la lettera u .

F155 THC_{CB}

ID function = 2517

Descrizione = Calcolo delle emissioni di idrocarburi totali (THC) secondo il metodo del bilancio del carbonio, espresso in [g/kWh], come da NOx Technical Code, Capitolo 5.

$\text{THC}_{\text{dry}} = \text{concentrazione THC a secco} \cdot 10^{-6}$ [-]

$\text{THC}_{\text{wet}} = \text{concentrazione THC a umido} \cdot 10^{-6}$ [-]

P_{eng} = potenza del motore (da F208) [kW]

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{oil (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{gas} \end{cases}$$

$$\text{THC}_{\text{dry/wet}} = \begin{cases} 1 & \text{misura dry} \\ 0 & \text{misura wet} \end{cases}$$

k_{DtW} = fattore di conversione da dry a wet (da F25)

$\dot{m}_{\text{exh,CB}}$ = portata gas di scarico (da F27) $\cdot 10^3$ [g/h]

Condizioni speciali:

- Se $P_{\text{eng}} = 0$, allora $\text{THC}_{\text{CB}} = 0$ (motore spento)
- Se $\dot{m}_{\text{exh,CB}} = -0.00001 \cdot 10^3$, allora $\text{THC}_{\text{CB}} = -0.00001$ (AMA disattivato)

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 0.482 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \text{ (gas)} \\ 0.528 & \text{se oil (HFO/LFO)} \end{cases}$$

Calcolo delle emissioni THC:

$$\text{THC}_{\text{CB}} = \begin{cases} \frac{c \cdot \text{THC}_{\text{dry}} \cdot \dot{m}_{\text{exh,CB}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se misura dry} \\ \frac{c \cdot \text{THC}_{\text{wet}} \cdot \dot{m}_{\text{exh,CB}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se misura wet} \end{cases} \text{ [g/kWh]}$$

Nota: Il coefficiente c rappresenta il rapporto tra la densità del combustibile e quella dei gas di scarico, ed è tabulato nel NOx Technical Code. In letteratura è indicato con la lettera u .

$F156 \text{ O}_2^{\text{CB}}$

ID function = 2518

Descrizione = Calcolo delle emissioni di ossigeno residuo (O) secondo il metodo del

bilancio del carbonio, espresso in [g/kWh], come da NOx Technical Code, Capitolo 5.

$$O_2 = \text{concentrazione di O misurata} \cdot 10^{-2} \quad [-]$$

$$P_{\text{eng}} = \text{potenza del motore (da F208)} \quad [\text{kW}]$$

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{oil (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{gas} \end{cases}$$

$$k_{\text{DtW}} = \text{fattore di conversione da dry a wet (da F25)}$$

$$\dot{m}_{\text{exh,CB}} = \text{portata gas di scarico (da F27)} \cdot 10^3 \quad [\text{g/h}]$$

Condizioni speciali:

- Se $P_{\text{eng}} = 0$, allora $O_2^{\text{CB}} = 0$ (motore spento)
- Se $\dot{m}_{\text{exh,CB}} = -0.00001 \cdot 10^3$, allora $O_2^{\text{CB}} = -0.00001$ (AMA disattivato)

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 11.03 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \quad (\text{gas}) \\ 11.28 & \text{se oil (HFO/LFO)} \end{cases}$$

Calcolo delle emissioni O:

$$O_2^{\text{CB}} = \frac{c \cdot O_2 \cdot \dot{m}_{\text{exh,CB}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} \quad [\text{g/kWh}]$$

Nota: Il coefficiente c rappresenta il rapporto tra la densità del componente gassoso e quella dei gas di scarico, ed è tabulato nel NOx Technical Code. In letteratura è indicato con la lettera u .

F157 NOxnozzle

ID function = 2519

Descrizione = Calcolo delle emissioni di NO nel ciclo con nozzle secondo il metodo del bilancio del carbonio, espresso in [g/kWh], come da NOx Technical Code, Capitolo 5.

P_{eng} = potenza del motore (da F208) [kW]

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{oil (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{gas} \end{cases}$$

$$\text{NOx}_{\text{dry/wet}} = \begin{cases} 1 & \text{misura dry} \\ 0 & \text{misura wet} \end{cases}$$

k_{DtW} = fattore di conversione da dry a wet (da F25)

$\dot{m}_{\text{exh,nozzle}}$ = portata gas di scarico (da F30) $\cdot 10^3$ [g/h]

NOx_{corr} = valore corretto NO (da F151) $\cdot 10^{-6}$ [-]

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 1.586 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \text{ (gas)} \\ 1.621 & \text{se oil (HFO/LFO)} \end{cases}$$

Calcolo delle emissioni NO (nozzle):

$$\text{NOx}_{\text{nozzle}} = \begin{cases} \frac{c \cdot \text{NOx}_{\text{corr}} \cdot \dot{m}_{\text{exh,nozzle}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se misura dry} \\ \frac{c \cdot \text{NOx}_{\text{corr}} \cdot \dot{m}_{\text{exh,nozzle}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se misura wet} \end{cases} \quad [\text{g/kWh}]$$

Nota: Il coefficiente c rappresenta il rapporto tra la densità del combustibile e quella dei gas di scarico, ed è tabulato nel NOx Technical Code. In letteratura è indicato con la lettera u .

$F158 \text{ CO}_2^{\text{nozzle}}$

ID function = 2520

Descrizione = Calcolo delle emissioni di CO nel ciclo con nozzle secondo il metodo del bilancio del carbonio, espresso in [g/kWh], come da NOx Technical Code, Capitolo 5.

CO_2 = concentrazione di CO misurata $\cdot 10^{-2}$ [-]

P_{eng} = potenza del motore (da F208) [kW]

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{oil (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{gas} \end{cases}$$

k_{DtW} = fattore di conversione da dry a wet (da F25)

$\dot{m}_{\text{exh,nozzle}}$ = portata gas di scarico (da F30) $\cdot 10^3$ [g/h]

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 1.517 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \quad (\text{gas}) \\ 1.551 & \text{se oil (HFO/LFO)} \end{cases}$$

Calcolo delle emissioni CO (nozzle):

$$\text{CO}_2^{\text{nozzle}} = \frac{c \cdot \text{CO}_2 \cdot \dot{m}_{\text{exh,nozzle}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} \quad [\text{g/kWh}]$$

Nota: Il coefficiente c rappresenta il rapporto tra la densità del combustibile e quella dei gas di scarico, ed è tabulato nel NOx Technical Code. In letteratura è indicato con la lettera u .

F159 CO^{nozzle}

ID function = 2521

Descrizione = Calcolo delle emissioni di monossido di carbonio (CO) nel ciclo con nozzle secondo il metodo del bilancio del carbonio, espresso in [g/kWh], come da NOx Technical Code, Capitolo 5.

CO = concentrazione di CO misurata $\cdot 10^{-4}$ [-]

P_{eng} = potenza del motore (da F208) [kW]

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{oil (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{gas} \end{cases}$$

k_{DtW} = fattore di conversione da dry a wet (da F25)

$\dot{m}_{\text{exh,nozzle}}$ = portata gas di scarico (da F30) $\cdot 10^3$ [g/h]

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 0.00966 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \quad (\text{gas}) \\ 0.00987 & \text{se oil (HFO/LFO)} \end{cases}$$

Calcolo delle emissioni CO (nozzle):

$$\text{CO}^{\text{nozzle}} = \frac{c \cdot \text{CO} \cdot \dot{m}_{\text{exh,nozzle}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} \quad [\text{g/kWh}]$$

Nota: Il coefficiente c rappresenta il rapporto tra la densità del combustibile e quella dei gas di scarico, ed è tabulato nel NOx Technical Code. In letteratura è indicato con la lettera u .

$F160 \text{ THC}^{\text{nozzle}}$

ID function = 2522

Descrizione = Calcolo delle emissioni di idrocarburi totali (THC) nel ciclo con nozzle secondo il metodo del bilancio del carbonio, espresso in [g/kWh], come da NOx Technical Code, Capitolo 5.

$$\text{THC}_{\text{dry}} = \text{concentrazione THC a secco} \cdot 10^{-6} \quad [-]$$

$$\text{THC}_{\text{wet}} = \text{concentrazione THC a umido} \cdot 10^{-6} \quad [-]$$

$$P_{\text{eng}} = \text{potenza del motore (da F208)} \quad [\text{kW}]$$

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{oil (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{gas} \end{cases}$$

$$\text{THC}_{\text{dry/wet}} = \begin{cases} 1 & \text{misura dry} \\ 0 & \text{misura wet} \end{cases}$$

$$k_{\text{DtW}} = \text{fattore di conversione da dry a wet (da F25)}$$

$$\dot{m}_{\text{exh,nozzle}} = \text{portata gas di scarico (da F30)} \cdot 10^3 \quad [\text{g/h}]$$

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 0.482 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \quad (\text{gas}) \\ 0.528 & \text{se oil (HFO/LFO)} \end{cases}$$

Calcolo delle emissioni THC (nozzle):

$$\text{THC}^{\text{nozzle}} = \begin{cases} \frac{c \cdot \text{THC}_{\text{dry}} \cdot \dot{m}_{\text{exh,nozzle}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se misura dry} \\ & [\text{g/kWh}] \\ \frac{c \cdot \text{THC}_{\text{wet}} \cdot \dot{m}_{\text{exh,nozzle}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se misura wet} \end{cases}$$

Nota: Il coefficiente c rappresenta il rapporto tra la densità del combustibile e quella dei gas di scarico, ed è tabulato nel NOx Technical Code. In letteratura è indicato con la lettera u .

F161 O₂^{nozzle}

ID function = 2523

Descrizione = Calcolo delle emissioni di ossigeno residuo (O) nel ciclo con nozzle secondo il metodo del bilancio del carbonio, espresso in [g/kWh], come da NOx Technical Code, Capitolo 5.

$$O_2 = \text{concentrazione di O misurata} \cdot 10^{-2} \quad [-]$$

$$P_{\text{eng}} = \text{potenza del motore (da F208)} \quad [\text{kW}]$$

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{oil (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{gas} \end{cases}$$

$$k_{\text{DtW}} = \text{fattore di conversione da dry a wet (da F25)}$$

$$\dot{m}_{\text{exh,nozzle}} = \text{portata gas di scarico (da F30)} \cdot 10^3 \quad [\text{g/h}]$$

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 11.03 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \quad (\text{gas}) \\ 11.28 & \text{se oil (HFO/LFO)} \end{cases}$$

Calcolo delle emissioni O (nozzle):

$$O_2^{\text{nozzle}} = \frac{c \cdot O_2 \cdot \dot{m}_{\text{exh,nozzle}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} \quad [\text{g/kWh}]$$

Nota: Il coefficiente c rappresenta il rapporto tra la densità del combustibile e quella dei gas di scarico, ed è tabulato nel NOx Technical Code. In letteratura è indicato con la lettera u .

F162 NO_xEC4T

ID function = 2524

Descrizione = Calcolo delle emissioni di NO nel ciclo EC4T secondo il metodo del bilancio del carbonio, espresso in [g/kWh], come da NOx Technical Code, Capitolo 5.

P_{eng} = potenza del motore (da F208) [kW]

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{oil (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{gas} \end{cases}$$

$$\text{NOx}_{\text{dry/wet}} = \begin{cases} 1 & \text{misura dry} \\ 0 & \text{misura wet} \end{cases}$$

k_{DtW} = fattore di conversione da dry a wet (da F25)

$\dot{m}_{\text{exh,EC4T}}$ = portata gas di scarico (da F31) · 10³ [g/h]

NOx_{corr} = valore corretto NO (da F151) · 10⁻⁶ [-]

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 1.586 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \quad (\text{gas}) \\ 1.621 & \text{se oil (HFO/LFO)} \end{cases}$$

Calcolo delle emissioni NO (EC4T):

$$\text{NOx}_{\text{EC4T}} = \begin{cases} \frac{c \cdot \text{NOx}_{\text{corr}} \cdot \dot{m}_{\text{exh,EC4T}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se misura dry} \\ \frac{c \cdot \text{NOx}_{\text{corr}} \cdot \dot{m}_{\text{exh,EC4T}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se misura wet} \end{cases} \quad [\text{g/kWh}]$$

Nota: Il coefficiente c rappresenta il rapporto tra la densità del combustibile e quella dei gas di scarico, ed è tabulato nel NOx Technical Code. In letteratura è indicato con la lettera u.

F163 CO₂^{EC4T}

ID function = 2525

Descrizione = Calcolo delle emissioni di CO nel ciclo EC4T secondo il metodo del

bilancio del carbonio, espresso in [g/kWh], come da NOx Technical Code, Capitolo 5.

$$\text{CO}_2 = \text{concentrazione di CO misurata} \cdot 10^{-2} \quad [-]$$

$$P_{\text{eng}} = \text{potenza del motore (da F208)} \quad [\text{kW}]$$

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{oil (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{gas} \end{cases}$$

$$k_{\text{DtW}} = \text{fattore di conversione da dry a wet (da F25)}$$

$$\dot{m}_{\text{exh,EC4T}} = \text{portata gas di scarico (da F31)} \cdot 10^3 \quad [\text{g/h}]$$

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 1.517 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \quad (\text{gas}) \\ 1.551 & \text{se oil (HFO/LFO)} \end{cases}$$

Calcolo delle emissioni CO (EC4T):

$$\text{CO}_2^{\text{EC4T}} = \frac{c \cdot \text{CO}_2 \cdot \dot{m}_{\text{exh,EC4T}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} \quad [\text{g/kWh}]$$

Nota: Il coefficiente c rappresenta il rapporto tra la densità del combustibile e quella dei gas di scarico, ed è tabulato nel NOx Technical Code. In letteratura è indicato con la lettera u .

F164 CO^{EC4T}

ID function = 2526

Descrizione = Calcolo delle emissioni di monossido di carbonio (CO) nel ciclo EC4T secondo il metodo del bilancio del carbonio, espresso in [g/kWh], come da NOx Technical Code, Capitolo 5.

$$\text{CO} = \text{concentrazione di CO misurata} \cdot 10^{-4} \quad [-]$$

$$P_{\text{eng}} = \text{potenza del motore (da F208)} \quad [\text{kW}]$$

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{oil (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{gas} \end{cases}$$

$$k_{\text{DtW}} = \text{fattore di conversione da dry a wet (da F25)}$$

$$\dot{m}_{\text{exh,EC4T}} = \text{portata gas di scarico (da F31)} \cdot 10^3 \quad [\text{g/h}]$$

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 0.00966 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \quad (\text{gas}) \\ 0.00987 & \text{se oil (HFO/LFO)} \end{cases}$$

Calcolo delle emissioni CO (EC4T):

$$\text{CO}^{\text{EC4T}} = \frac{c \cdot \text{CO} \cdot \dot{m}_{\text{exh,EC4T}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} \quad [\text{g/kWh}]$$

Nota: Il coefficiente c rappresenta il rapporto tra la densità del combustibile e quella dei gas di scarico, ed è tabulato nel NOx Technical Code. In letteratura è indicato con la lettera u .

$F165 \text{ THC}^{\text{EC4T}}$

ID function = 2527

Descrizione = Calcolo delle emissioni di idrocarburi totali (THC) nel ciclo EC4T secondo il metodo del bilancio del carbonio, espresso in [g/kWh], come da NOx Technical Code, Capitolo 5.

$\text{THC}_{\text{dry}} = \text{concentrazione THC a secco} \cdot 10^{-6} \quad [-]$

$\text{THC}_{\text{wet}} = \text{concentrazione THC a umido} \cdot 10^{-6} \quad [-]$

$P_{\text{eng}} = \text{potenza del motore (da F208)} \quad [\text{kW}]$

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{oil (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{gas} \end{cases}$$

$$\text{THC}_{\text{dry/wet}} = \begin{cases} 1 & \text{misura dry} \\ 0 & \text{misura wet} \end{cases}$$

$k_{\text{DtW}} = \text{fattore di conversione da dry a wet (da F25)}$

$\dot{m}_{\text{exh,EC4T}} = \text{portata gas di scarico (da F31)} \cdot 10^3 \quad [\text{g/h}]$

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 0.482 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \quad (\text{gas}) \\ 0.528 & \text{se oil (HFO/LFO)} \end{cases}$$

Calcolo delle emissioni THC (EC4T):

$$\text{THC}^{\text{EC4T}} = \begin{cases} \frac{c \cdot \text{THC}_{\text{dry}} \cdot \dot{m}_{\text{exh,EC4T}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se misura dry} \\ & [\text{g/kWh}] \\ \frac{c \cdot \text{THC}_{\text{wet}} \cdot \dot{m}_{\text{exh,EC4T}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se misura wet} \end{cases}$$

Nota: Il coefficiente c rappresenta il rapporto tra la densità del combustibile e quella dei gas di scarico, ed è tabulato nel NOx Technical Code. In letteratura è indicato con la lettera u .

F166 O₂^{EC4T}

ID function = 2528

Descrizione = Calcolo delle emissioni di ossigeno residuo (O) nel ciclo EC4T secondo il metodo del bilancio del carbonio, espresso in [g/kWh], come da NOx Technical Code, Capitolo 5.

$$O_2 = \text{concentrazione di O misurata} \cdot 10^{-2} \quad [-]$$

$$P_{\text{eng}} = \text{potenza del motore (da F208)} \quad [\text{kW}]$$

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{oil (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{gas} \end{cases}$$

$$k_{\text{DtW}} = \text{fattore di conversione da dry a wet (da F25)}$$

$$\dot{m}_{\text{exh,EC4T}} = \text{portata gas di scarico (da F31)} \cdot 10^3 \quad [\text{g/h}]$$

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 11.03 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \quad (\text{gas}) \\ 11.28 & \text{se oil (HFO/LFO)} \end{cases}$$

Calcolo delle emissioni O (EC4T):

$$O_2^{\text{EC4T}} = \frac{c \cdot O_2 \cdot \dot{m}_{\text{exh,EC4T}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} \quad [\text{g/kWh}]$$

Nota: Il coefficiente c rappresenta il rapporto tra la densità del combustibile e quella dei gas di scarico, ed è tabulato nel NOx Technical Code. In letteratura è indicato con la lettera u .

F167 NO_xEC2T

ID function = 2529

Descrizione = Calcolo delle emissioni di NO nel ciclo EC2T secondo il metodo del bilancio del carbonio, espresso in [g/kWh], come da NOx Technical Code, Capitolo 5.

P_{eng} = potenza del motore (da F208) [kW]

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{oil (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{gas} \end{cases}$$

$$\text{NOx}_{\text{dry/wet}} = \begin{cases} 1 & \text{misura dry} \\ 0 & \text{misura wet} \end{cases}$$

k_{DtW} = fattore di conversione da dry a wet (da F25)

$\dot{m}_{\text{exh,EC2T}}$ = portata gas di scarico (da F32) · 10³ [g/h]

NOx_{corr} = valore corretto NO (da F151) · 10⁻⁶ [-]

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 1.586 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \quad (\text{gas}) \\ 1.621 & \text{se oil (HFO/LFO)} \end{cases}$$

Calcolo delle emissioni NO (EC2T):

$$\text{NOx}_{\text{EC2T}} = \begin{cases} \frac{c \cdot \text{NOx}_{\text{corr}} \cdot \dot{m}_{\text{exh,EC2T}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se misura dry} \\ \frac{c \cdot \text{NOx}_{\text{corr}} \cdot \dot{m}_{\text{exh,EC2T}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se misura wet} \end{cases} \quad [\text{g/kWh}]$$

Nota: Il coefficiente c rappresenta il rapporto tra la densità del combustibile e quella dei gas di scarico, ed è tabulato nel NOx Technical Code. In letteratura è indicato con la lettera u.

F168 CO₂^{EC2T}

ID function = 2530

Descrizione = Calcolo delle emissioni di CO nel ciclo EC2T secondo il metodo del

bilancio del carbonio, espresso in [g/kWh], come da NOx Technical Code, Capitolo 5.

$$\text{CO}_2 = \text{concentrazione di CO misurata} \cdot 10^{-2} \quad [-]$$

$$P_{\text{eng}} = \text{potenza del motore (da F208)} \quad [\text{kW}]$$

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{oil (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{gas} \end{cases}$$

$$k_{\text{DtW}} = \text{fattore di conversione da dry a wet (da F25)}$$

$$\dot{m}_{\text{exh,EC2T}} = \text{portata gas di scarico (da F32)} \cdot 10^3 \quad [\text{g/h}]$$

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 1.517 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \quad (\text{gas}) \\ 1.551 & \text{se oil (HFO/LFO)} \end{cases}$$

Calcolo delle emissioni CO (EC2T):

$$\text{CO}_2^{\text{EC2T}} = \frac{c \cdot \text{CO}_2 \cdot \dot{m}_{\text{exh,EC2T}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} \quad [\text{g/kWh}]$$

Nota: Il coefficiente c rappresenta il rapporto tra la densità del combustibile e quella dei gas di scarico, ed è tabulato nel NOx Technical Code. In letteratura è indicato con la lettera u .

F169 CO^{EC2T}

ID function = 2531

Descrizione = Calcolo delle emissioni di monossido di carbonio (CO) nel ciclo EC2T secondo il metodo del bilancio del carbonio, espresso in [g/kWh], come da NOx Technical Code, Capitolo 5.

$$\text{CO} = \text{concentrazione di CO misurata} \cdot 10^{-4} \quad [-]$$

$$P_{\text{eng}} = \text{potenza del motore (da F208)} \quad [\text{kW}]$$

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{oil (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{gas} \end{cases}$$

$$k_{\text{DtW}} = \text{fattore di conversione da dry a wet (da F25)}$$

$$\dot{m}_{\text{exh,EC2T}} = \text{portata gas di scarico (da F32)} \cdot 10^3 \quad [\text{g/h}]$$

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 0.00966 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \quad (\text{gas}) \\ 0.00987 & \text{se oil (HFO/LFO)} \end{cases}$$

Calcolo delle emissioni CO (EC2T):

$$\text{CO}^{\text{EC2T}} = \frac{c \cdot \text{CO} \cdot \dot{m}_{\text{exh,EC2T}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} \quad [\text{g/kWh}]$$

Nota: Il coefficiente c rappresenta il rapporto tra la densità del combustibile e quella dei gas di scarico, ed è tabulato nel NOx Technical Code. In letteratura è indicato con la lettera u .

$F170 \text{ THC}^{\text{EC2T}}$

ID function = 2532

Descrizione = Calcolo delle emissioni di idrocarburi totali (THC) nel ciclo EC2T secondo il metodo del bilancio del carbonio, espresso in [g/kWh], come da NOx Technical Code, Capitolo 5.

$\text{THC}_{\text{dry}} = \text{concentrazione THC a secco} \cdot 10^{-6} \quad [-]$

$\text{THC}_{\text{wet}} = \text{concentrazione THC a umido} \cdot 10^{-6} \quad [-]$

$P_{\text{eng}} = \text{potenza del motore (da F208)} \quad [\text{kW}]$

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{oil (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{gas} \end{cases}$$

$$\text{THC}_{\text{dry/wet}} = \begin{cases} 1 & \text{misura dry} \\ 0 & \text{misura wet} \end{cases}$$

$k_{\text{DtW}} = \text{fattore di conversione da dry a wet (da F25)}$

$\dot{m}_{\text{exh,EC2T}} = \text{portata gas di scarico (da F32)} \cdot 10^3 \quad [\text{g/h}]$

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 0.482 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \quad (\text{gas}) \\ 0.528 & \text{se oil (HFO/LFO)} \end{cases}$$

Calcolo delle emissioni THC (EC2T):

$$\text{THC}^{\text{EC2T}} = \begin{cases} \frac{c \cdot \text{THC}_{\text{dry}} \cdot \dot{m}_{\text{exh,EC2T}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se misura dry} \\ & [\text{g/kWh}] \\ \frac{c \cdot \text{THC}_{\text{wet}} \cdot \dot{m}_{\text{exh,EC2T}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se misura wet} \end{cases}$$

Nota: Il coefficiente c rappresenta il rapporto tra la densità del combustibile e quella dei gas di scarico, ed è tabulato nel NOx Technical Code. In letteratura è indicato con la lettera u .

F171 O₂^{EC2T}

ID function = 2533

Descrizione = Calcolo delle emissioni di ossigeno residuo (O) nel ciclo EC2T secondo il metodo del bilancio del carbonio, espresso in [g/kWh], come da NOx Technical Code, Capitolo 5.

$$O_2 = \text{concentrazione di O misurata} \cdot 10^{-2} \quad [-]$$

$$P_{\text{eng}} = \text{potenza del motore (da F208)} \quad [\text{kW}]$$

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{oil (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{gas} \end{cases}$$

$$k_{\text{DtW}} = \text{fattore di conversione da dry a wet (da F25)}$$

$$\dot{m}_{\text{exh,EC2T}} = \text{portata gas di scarico (da F32)} \cdot 10^3 \quad [\text{g/h}]$$

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 11.03 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \quad (\text{gas}) \\ 11.28 & \text{se oil (HFO/LFO)} \end{cases}$$

Calcolo delle emissioni O (EC2T):

$$O_2^{\text{EC2T}} = \frac{c \cdot O_2 \cdot \dot{m}_{\text{exh,EC2T}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} \quad [\text{g/kWh}]$$

Nota: Il coefficiente c rappresenta il rapporto tra la densità del combustibile e quella dei gas di scarico, ed è tabulato nel NOx Technical Code. In letteratura è indicato con la lettera u .

F172 SOx

ID function = 2534

Descrizione = Calcolo delle emissioni di ossidi di zolfo (SO), espresso in [g/kWh], basato sul contenuto di zolfo nel combustibile e sul consumo specifico totale. Metodo diretto conforme al NOx Technical Code.

mix_cont_S = contenuto di zolfo nel combustibile (da F22) [%]

$$\text{BSFC}_{\text{tot}} = \frac{\text{consumo specifico totale (da F149)}}{1000} \quad [\text{kg}/\text{kWh}]$$

Condizione speciale:

- Se $\text{BSFC}_{\text{tot}} = 0$, allora $\text{SOx} = 0$ (motore spento)

Calcolo delle emissioni SO:

$$\text{SOx} = \text{mix_cont}_S \cdot \text{BSFC}_{\text{tot}} \quad [\text{g}/\text{kWh}]$$

Nota: Questo metodo diretto non tiene conto del contributo dell'ossigeno nella molecola di SO, e quindi può risultare meno preciso rispetto a metodi strumentali. Tuttavia, è utile in assenza di misurazioni dirette.

F177 $\dot{m}_{\text{exh, map_compr}}$

ID function = 2535

Descrizione = Calcolo della portata totale dei gas di scarico nel ciclo MAP Compression, espresso in [kg/h].

P_{eng} = potenza del motore (da F208) [kW]

$\dot{m}_{\text{map_compr}}$ = massa d'aria aspirata (da F178) $\cdot 3600$ [kg/h]

$$\text{BSFC} = \frac{\text{consumo specifico di combustibile (da F16)}}{1000} \quad [\text{kg}/\text{kWh}]$$

$$\text{BSFC}_{\text{pilot}} = \frac{\text{consumo specifico pilota (da F17)}}{1000} \quad [\text{kg}/\text{kWh}]$$

Condizione speciale:

- Se $P_{\text{eng}} = 0$, allora $\dot{m}_{\text{exh, map_compr}} = 0$ (motore spento)

Calcolo della portata gas di scarico:

$$\dot{m}_{\text{exh, map_compr}} = \dot{m}_{\text{map_compr}} + ((\text{BSFC} + \text{BSFC}_{\text{pilot}}) \cdot P_{\text{eng}}) \quad [\text{kg/h}]$$

Nota: La portata dei gas di scarico è ottenuta sommando la massa d'aria aspirata e la massa di combustibile bruciato, considerando sia il combustibile principale che quello pilota.

F178 \dot{m}_{maps}

ID function = 2536

Descrizione = Calcolo della portata massica dell'aria aspirata nel ciclo MAP Compression, espresso in [kg/s], tramite interpolazione delle mappe del compressore.

$$p_0 = \text{pressione atmosferica} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{in}} = \text{pressione ingresso compressore} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{out}} = \text{pressione uscita compressore} \cdot 10^5 \quad [\text{Pa}]$$

$$t_{\text{in}} = T_{\text{compressor,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$t_{\text{out}} = T_{\text{compressor,out}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$D_{\text{out}} = \text{diametro uscita compressore}/1000 \quad [\text{m}]$$

$$\text{leak} = \begin{cases} \text{leak}_{1S}/100 & \text{se configurazione 1S} \\ \text{leak}_{2S}/100 & \text{se configurazione 2S} \end{cases}$$

$$n_{298} = \text{giri turbogruppo (da F144)} \cdot 60 \quad [\text{rpm}]$$

$$p_{1\text{dyn}} = \text{pressione dinamica ingresso (da F41)} \quad [\text{Pa}]$$

$$T_{\text{std}} = 298.15 \quad [\text{K}]$$

Condizione speciale:

- Se $P_{\text{eng}} = 0$, allora $\dot{m}_{\text{maps}} = 0$ (motore spento)

Iterazione 1:

$$\begin{aligned}
p_{\text{stat,in}} &= p_0 + p_{\text{in}} \\
\text{PIV} &= \frac{p_0 + p_{\text{out}}}{p_{\text{stat,in}} + p_{1\text{dyn}}} \\
V_{298}^{(1)} &= \text{leggimappa}(\text{PIV}, n_{298}) \quad [\text{m}^3/\text{s}] \\
\rho_1 &= \frac{p_{\text{stat,in}}}{R \cdot t_{\text{in}}} \\
m_1 &= V_{298}^{(1)} \cdot \rho_1 \\
\dot{m}_{\text{corr}} &= m_1 \cdot (1 - \text{leak}) \\
x_1 &= \frac{4 \cdot \dot{m}_{\text{corr}}}{\text{config} \cdot \pi \cdot D_{\text{out}}^2} \\
p_{2\text{dyn}} &= \frac{0.5 \cdot x_1^2}{\rho_1} \\
\text{PIV}^{(1)} &= \frac{p_0 + p_{\text{out}} + p_{2\text{dyn}}}{p_{\text{stat,in}} + p_{1\text{dyn}}}
\end{aligned}$$

Iterazione 2:

$$\begin{aligned}
V_{298}^{(2)} &= \text{leggimappa}(\text{PIV}^{(1)}, n_{298}) \\
\dot{m}_{\text{maps}} &= \text{config} \cdot (1 - \text{leak}) \cdot V_{298}^{(2)} \cdot \rho_1 \cdot \sqrt{\frac{t_{\text{in}}}{T_{\text{std}}}} \quad [\text{kg/s}]
\end{aligned}$$

Nota: Il calcolo è iterativo e si basa su interpolazioni delle mappe del compressore. La configurazione (1S o 2S) influisce sulla geometria e sulle perdite. La funzione è fondamentale per il bilancio di massa nel ciclo MAP Compression.

F179 BSAC_{map_compr}

ID function = 2537

Descrizione = Calcolo del Brake Specific Air Consumption (BSAC) nel ciclo MAP Compression, espresso in [g/kWh].

$$\begin{aligned}
P_{\text{eng}} &= \text{potenza del motore (da F208)} \quad [\text{kW}] \\
\text{configurazione} &= \begin{cases} 1 & \text{se oneS_twoS} = 0 \quad (1 \text{ stadio}) \\ 2 & \text{se oneS_twoS} = 1 \quad (2 \text{ stadi}) \end{cases} \\
\dot{m}_{\text{map_compr}} &= \text{portata aria aspirata (da F178)} \cdot 3600 \quad [\text{kg/h}]
\end{aligned}$$

Condizione speciale:

- Se $P_{\text{eng}} = 0$, allora $\text{BSAC}_{\text{map_compr}} = 0$ (motore spento)

Calcolo del BSAC:

$$\text{BSAC}_{\text{map_compr}} = \frac{1000 \cdot \dot{m}_{\text{map_compr}} \cdot \text{configurazione}}{P_{\text{eng}}} \quad [\text{g/kWh}]$$

Nota: Il BSAC rappresenta il consumo specifico d'aria per unità di energia prodotta. È utile per valutare l'efficienza del sistema di aspirazione e compressione, specialmente nei motori sovralimentati.

F180 $p_{2\text{dyn}}^{\text{map_compr}}$

ID function = 2538

Descrizione = Calcolo della pressione dinamica in uscita dal compressore nel ciclo MAP Compression, espresso in [Pa].

$$t_{\text{out}} = T_{\text{compressor,out}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$p_0 = \text{pressione atmosferica} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{out}} = \text{pressione uscita compressore} \cdot 10^5 \quad [\text{Pa}]$$

$$D_{\text{out}} = \text{diametro uscita compressore}/1000 \quad [\text{m}]$$

$$\text{leak} = \text{perdita compressore}/100 \quad [-]$$

$$R = 287.04 \quad [\text{J/kgK}]$$

$$\dot{m} = \text{portata d'aria (da F178)} \quad [\text{kg/s}]$$

Condizione speciale:

- Se $\dot{m} = 0$, allora $p_{2\text{dyn}}^{\text{map_compr}} = 0$ (motore spento)

Calcolo della pressione dinamica:

$$\text{configurazione} = \begin{cases} 1 & \text{se oneS_twoS} = 0 \\ 2 & \text{se oneS_twoS} = 1 \end{cases}$$

$$\rho = \frac{p_0 + p_{\text{out}}}{R \cdot t_{\text{out}}} \quad [\text{kg/m}^3]$$

$$\dot{m}_{\text{corr}} = \dot{m} \cdot (1 - \text{leak})$$

$$x = \frac{4 \cdot \dot{m}_{\text{corr}}}{\text{configurazione} \cdot \pi \cdot D_{\text{out}}^2}$$

$$p_{2\text{dyn}}^{\text{map_compr}} = \frac{0.5 \cdot x^2}{\rho} \quad [\text{Pa}]$$

Nota: La pressione dinamica in uscita è un parametro fondamentale per valutare le perdite fluidodinamiche e l'efficienza del sistema di compressione. Il calcolo tiene conto della configurazione del compressore (1 o 2 stadi) e delle perdite interne.

F181 $k_{\text{exh}}^{\text{map-compr}}$

ID function = 2539

Descrizione = Calcolo del coefficiente correttivo dei gas di scarico nel ciclo MAP Compression, espresso in forma adimensionale [−].

$$t_{\text{in}} = T_{\text{turbina,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$t_{\text{out}} = T_{\text{turbina,out}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$\text{AFR}_{\text{HFO/GAS}}$ = rapporto aria/carburante per HFO o GAS

AFR_{LFO} = rapporto aria/carburante per LFO

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 1 & \text{LFO} \\ 0/2 & \text{HFO o GAS} \end{cases}$$

BSFC = consumo specifico di combustibile (da F16) [kg/kWh]

$\text{BSFC}_{\text{pilot}}$ = consumo pilota (da F17) [kg/kWh]

$\text{BSAC}_{\text{map_compr}}$ = consumo specifico d'aria (da F179) [kg/kWh]

Condizione speciale:

- Se $\text{BSAC}_{\text{map_compr}} = 0$, allora $k_{\text{exh}}^{\text{map-compr}} = 0$ (motore spento)

Calcolo del coefficiente correttivo:

$$\text{AFR} = \begin{cases} \text{AFR}_{\text{LFO}} & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 1 \\ \text{AFR}_{\text{HFO/GAS}} & \text{altrimenti} \end{cases}$$

$$x = \frac{\text{AFR} + 1}{\left(\frac{\text{BSAC}_{\text{map_compr}}}{\text{BSFC} + \text{BSFC}_{\text{pilot}}} \right) + 1}$$

Formula finale:

$$\begin{aligned} k_{\text{exh}}^{\text{map-compr}} = & 0.5 \cdot \left[\left(9.5908 \cdot 10^{-9} \cdot x^2 + 1.4866 \cdot 10^{-8} \cdot x + 2.761905 \cdot 10^{-8} \right) \cdot (t_{\text{in}}^2 + t_{\text{out}}^2) \right. \\ & - \left(1.12875 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 3.3955 \cdot 10^{-5} \cdot x + 1.39762 \cdot 10^{-4} \right) \cdot (t_{\text{in}} + t_{\text{out}}) \left. \right] \\ & + 7.125 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 - 2.9075 \cdot 10^{-2} \cdot x + 1.4488 \end{aligned}$$

Nota: Il coefficiente k_{exh} è una funzione empirica che tiene conto delle condizioni termodinamiche e del bilancio aria/carburante. È utilizzato per correggere la stima della massa dei gas di scarico nel ciclo MAP Compression.

$F182 \ p_{\text{crit}}^{\text{map-compr}}$

ID function = 2540

Descrizione = Calcolo della pressione critica per il flusso dei gas di scarico nel ciclo MAP Compression, espresso in [Pa].

$$p_0 = \text{pressione atmosferica} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{turbina,in}} = \text{pressione in ingresso alla turbina} \cdot 10^5 \quad [\text{Pa}]$$

$$k_{\text{exh}}^{\text{map-compr}} = \text{coefficiente correttivo dei gas di scarico (da F181)} \quad [-]$$

Condizione speciale:

- Se $k_{\text{exh}}^{\text{map-compr}} = 0$, allora $p_{\text{crit}}^{\text{map-compr}} = 0$ (motore spento)

Calcolo della pressione critica:

$$p_{\text{crit}}^{\text{map-compr}} = \left(\frac{2}{k_{\text{exh}}^{\text{map-compr}} + 1} \right)^{\frac{k_{\text{exh}}^{\text{map-compr}}}{k_{\text{exh}}^{\text{map-compr}} - 1}} \cdot (p_{\text{turbina,in}} + p_0) \quad [\text{Pa}]$$

Nota: La pressione critica rappresenta il limite oltre il quale il flusso dei gas di scarico attraverso l'ugello o la valvola EWG diventa choked (flusso critico). È funzione del rapporto isentropico k e delle pressioni a monte.

$F183 \dot{m}_{\text{EWG}}$

ID function = 2541

Descrizione = Calcolo della portata dei gas di scarico attraverso la valvola EWG nel ciclo MAP Compression, espresso in [kg/h].

p_0 = pressione atmosferica · 100 [Pa]

$p_{\text{turbina,in}}$ = pressione ingresso turbina · 10^5 [Pa]

$p_{\text{turbina,out}}$ = pressione uscita turbina · 100 [Pa]

$k_{\text{exh}}^{\text{map-compr}}$ = coefficiente correttivo gas di scarico (da F181)

A_{EWG} = area effettiva della valvola EWG (da F62) [m²]

ρ_5 = densità ingresso turbina (da F63) [kg/m³]

$p_{\text{crit}}^{\text{map-compr}}$ = pressione critica (da F182) [Pa]

Condizioni speciali:

- Se $p_{\text{crit}}^{\text{map-compr}} = 0$, allora $\dot{m}_{\text{EWG}} = 0$ (motore spento)
- Se $A_{\text{EWG}} = -0.001$, allora $\dot{m}_{\text{EWG}} = 0$ (valvola chiusa)

Definizioni ausiliarie:

$$p_5 = p_{\text{turbina,in}} + p_0$$

$$p_6 = p_{\text{turbina,out}} + p_0$$

$$\frac{p_6}{p_5} = \text{rapporto di pressione tra uscita e ingresso turbina}$$

Calcolo della portata in base al regime di flusso:

Flusso **subsonico** ($p_{\text{crit}}^{\text{map-compr}} < p_5$):

$$x = \left(\frac{p_6}{p_5} \right)^{\frac{1}{k_{\text{exh}}}} \quad (\text{rapporto densità})$$
$$v_6 = \sqrt{\frac{2 \cdot k_{\text{exh}}}{k_{\text{exh}} - 1} \cdot p_5 \cdot \rho_5 \cdot \left(1 - \left(\frac{p_6}{p_5} \right)^{\frac{k_{\text{exh}} - 1}{k_{\text{exh}}}} \right)}$$

$$\dot{m}_{\text{EWG}} = A_{\text{EWG}} \cdot x \cdot v_6 \cdot 3600 \quad [\text{kg/h}]$$

Flusso **sonico** ($p_{\text{crit}}^{\text{map-compr}} \geq p_5$):

$$x = \left(\frac{2}{k_{\text{exh}} + 1} \right)^{\frac{1}{k_{\text{exh}} - 1}}$$
$$v_6 = \sqrt{\frac{2 \cdot k_{\text{exh}}}{k_{\text{exh}} + 1} \cdot p_5 \cdot \rho_5}$$

$$\dot{m}_{\text{EWG}} = A_{\text{EWG}} \cdot x \cdot v_6 \cdot 3600 \quad [\text{kg/h}]$$

Nota: La valvola EWG agisce come strozzamento del flusso. Quando la pressione a monte supera la pressione critica, il flusso diventa sonico (choked), con velocità massima e portata limitata dalla geometria.

F184 $\dot{m}_{\text{exh,redux}}^{\text{map_compr}}$

ID function = 2542

Descrizione = Calcolo della portata ridotta dei gas di scarico nel ciclo MAP Compression, espresso in [kg/h], tenendo conto della valvola EWG.

$$\text{EWG} = \begin{cases} 0 & \text{nessuna valvola EWG installata} \\ 1 & \text{valvola EWG presente} \end{cases}$$

$\dot{m}_{\text{exh}}^{\text{map_compr}}$ = portata totale gas di scarico (da F177) [kg/h]

\dot{m}_{EWG} = portata attraverso la valvola EWG (da F183) [kg/h]

Condizioni speciali:

- Se $\dot{m}_{\text{EWG}} = 0$, allora $\dot{m}_{\text{exh,redux}}^{\text{map_compr}} = \dot{m}_{\text{exh}}^{\text{map_compr}}$ (valvola chiusa)
- Se $\text{EWG} = 0$, allora $\dot{m}_{\text{exh,redux}}^{\text{map_compr}} = \dot{m}_{\text{exh}}^{\text{map_compr}}$ (nessuna valvola installata)

Calcolo della portata ridotta:

$$\dot{m}_{\text{exh,redux}}^{\text{map_compr}} = \begin{cases} \dot{m}_{\text{exh}}^{\text{map_compr}} & \text{se } \dot{m}_{\text{EWG}} = 0 \text{ o } \text{EWG} = 0 \\ \dot{m}_{\text{exh}}^{\text{map_compr}} - \dot{m}_{\text{EWG}} & \text{altrimenti} \end{cases} \quad [\text{kg/h}]$$

Nota: La portata ridotta rappresenta la quantità di gas di scarico che attraversa la turbina, escludendo la frazione deviata tramite la valvola EWG. È fondamentale per il calcolo dell'energia disponibile per la sovralimentazione.

F185 $p_{\text{dyn5}}^{\text{map_compr}}$

ID function = 2543

Descrizione = Calcolo della pressione dinamica in ingresso alla turbina nel ciclo MAP Compression, espresso in [Pa].

$$\begin{aligned}
t_{\text{turbina,in}} &= T_{\text{turbina,in}} + 273.15 \quad [\text{K}] \\
p_0 &= \text{pressione atmosferica} \cdot 100 \quad [\text{Pa}] \\
p_{\text{turbina,in}} &= \text{pressione ingresso turbina} \cdot 10^5 \quad [\text{Pa}] \\
D_{\text{turbina,in}} &= \text{diametro ingresso turbina} \cdot 10^{-3} \quad [\text{m}] \\
\dot{m}_{\text{exh,redux}}^{\text{map-compr}} &= \text{portata gas di scarico ridotta (da F184)/3600} \quad [\text{kg/s}] \\
R_{\text{exh}} &= 293.93 \quad [\text{J/kgK}]
\end{aligned}$$

Condizione speciale:

- Se $\dot{m}_{\text{exh,redux}}^{\text{map-compr}} = 0$, allora $p_{\text{dyn5}}^{\text{map-compr}} = 0$ (motore spento)

Calcolo della pressione dinamica:

$$\text{configurazione} = \begin{cases} 1 & \text{se oneS_twoS} = 0 \\ 2 & \text{se oneS_twoS} = 1 \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
p_5 &= p_{\text{turbina,in}} + p_0 \\
\rho &= \frac{p_5}{R_{\text{exh}} \cdot t_{\text{turbina,in}}} \quad [\text{kg/m}^3] \\
x &= \frac{4 \cdot \dot{m}_{\text{exh,redux}}^{\text{map-compr}}}{\text{configurazione} \cdot \pi \cdot D_{\text{turbina,in}}^2} \\
p_{\text{dyn5}}^{\text{map-compr}} &= \frac{0.5 \cdot x^2}{\rho} \quad [\text{Pa}]
\end{aligned}$$

Nota: La pressione dinamica in ingresso alla turbina è fondamentale per il calcolo dell'energia disponibile per la sovralimentazione. Dipende dalla densità dei gas, dalla geometria e dalla portata effettiva dopo la valvola EWG.

F186 PIV_map_compr

ID function = 2544

Descrizione = Calcolo del rapporto di compressione total-to-total (Pressure Ratio) nel ciclo MAP Compression, espresso in forma adimensionale [−].

$t_{in} = T_{compressor,in} + 273.15$ [K]
 $p_0 = \text{pressione atmosferica} \cdot 100$ [Pa]
 $p_{in} = \text{pressione ingresso compressore} \cdot 100$ [Pa]
 $p_{out} = \text{pressione uscita compressore} \cdot 10^5$ [Pa]
 $D_{in} = \text{diametro ingresso compressore}/1000$ [m]
 $\dot{m}_{map_compr} = \text{portata massica (da F178)}$ [kg/s]
 $p_{1dyn} = \text{pressione dinamica ingresso (da F41)}$ [Pa]
 $p_{2dyn} = \text{pressione dinamica uscita (da F180)}$ [Pa]
 $R = 287.04$ [J/kgK]

Calcolo del rapporto di compressione:

Caso semplificato (sensore non disponibile o singolo stadio):

$$p_{1eff} = p_0 - |p_{in}|PIV_{map_compr} = \frac{p_{out} + p_{2dyn} + p_0}{p_{1eff} + p_{1dyn}}$$

Caso completo (doppio stadio con sensore disponibile):

$$\begin{aligned} \text{configurazione} &= \begin{cases} 1 & \text{se oneS_twoS} = 0 \\ 2 & \text{se oneS_twoS} = 1 \end{cases} \\ p_{dyn} &= \frac{0.5 \cdot R \cdot t_{in}}{p_{1eff}} \cdot \left(\frac{4 \cdot \dot{m}_{map_compr}}{\text{configurazione} \cdot \pi \cdot D_{in}^2} \right)^2 \\ PIV_{map_compr} &= \frac{p_{out} + p_{2dyn} + p_0}{p_{1eff} + p_{dyn}} \end{aligned}$$

Note tecniche:

- Il calcolo tiene conto della configurazione del compressore (1 o 2 stadi). - La pressione dinamica in ingresso viene stimata con una formula semplificata (da 'F41') se il sensore non è disponibile.
- Il calcolo completo è utilizzato solo per il PIV HP in configurazione a doppio stadio, dove l'effetto della pressione dinamica non è trascurabile.

F187 PIT_{map_compr}

ID function = 2545

Descrizione = Calcolo del rapporto di espansione total-to-total nel ciclo MAP Compression, espresso in forma adimensionale [-].

p_0 = pressione atmosferica · 100 [Pa]

$p_{\text{turbina,in}}$ = pressione ingresso turbina · 10^5 [Pa]

$p_{\text{turbina,out}}$ = pressione uscita turbina · 100 [Pa]

$p_{\text{dyn5}}^{\text{map-compr}}$ = pressione dinamica ingresso turbina (da F185) [Pa]

Calcolo del rapporto di espansione:

$$\text{PIT}_{\text{map_compr}} = \frac{p_{\text{turbina,in}} + p_{\text{dyn5}}^{\text{map-compr}} + p_0}{p_0 + p_{\text{turbina,out}}} \quad [-]$$

Nota: Il rapporto PIT rappresenta il grado di espansione dei gas di scarico attraverso la turbina, includendo gli effetti dinamici. È un parametro fondamentale per valutare l'efficienza del recupero energetico nel sistema di sovralimentazione.

$F188 \eta_{\text{sv}}^{\text{map-compr}}$

ID function = 2546

Descrizione = Calcolo del rendimento isentropico del compressore nel ciclo MAP Compression, espresso in [%].

$t_{\text{in}} = T_{\text{compressor,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$

$t_{\text{out}} = T_{\text{compressor,out}} + 273.15 \quad [\text{K}]$

k_{air} = coefficiente politropico dell'aria (da F9) [-]

$\text{PIV}_{\text{map_compr}}$ = rapporto di compressione (da F186) [-]

—
Calcolo del rendimento:

Condizione speciale:

Se $\text{PIV}_{\text{map_compr}} = 0 \Rightarrow \eta_{\text{sv}}^{\text{map-compr}} = 0$ (motore spento)

Formula generale:

$$\eta_{\text{sv}}^{\text{map-compr}} = \frac{100 \cdot \left(\text{PIV}_{\text{map_compr}}^{\frac{k_{\text{air}}-1}{k_{\text{air}}}} - 1 \right)}{\left(\frac{t_{\text{out}}}{t_{\text{in}}} - 1 \right)} \quad [\%]$$

—
Note tecniche:

- Il rendimento isentropico rappresenta l'efficienza termodinamica del compressore rispetto a un processo ideale.
- Il calcolo si basa sul confronto tra l'aumento teorico di temperatura (isentropico) e quello reale misurato.
- È un indicatore chiave per valutare le perdite energetiche e l'efficienza del sistema di sovralimentazione.

F189 $\eta_{\text{TC}}^{\text{ABB}}$

ID function = 2547

Descrizione = Calcolo del rendimento del turbogruppo nel ciclo MAP Compression secondo la formulazione ABB, espresso in [%].

$$t_{\text{comp,in}} = T_{\text{comp,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$t_{\text{turb,in}} = T_{\text{turb,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$K_{\text{air}} = \frac{k_{\text{air}} - 1}{k_{\text{air}}}$$

$$K_{\text{exh}} = \frac{k_{\text{exh}} - 1}{k_{\text{exh}}}$$

Condizione speciale:

$$\text{Se } \text{PIV}_{\text{map_compr}} = 0 \Rightarrow \eta_{\text{TC}}^{\text{ABB}} = 0$$

Formula generale:

$$\eta_{\text{TC}}^{\text{ABB}} = \frac{100 \cdot \text{BSAC}_{\text{map_compr}} \cdot \frac{1}{K_{\text{air}}} \cdot \left(\text{PIV}_{\text{map_compr}}^{K_{\text{air}}} - 1 \right) \cdot t_{\text{comp,in}}}{\left(\text{BSAC}_{\text{map_compr}} + \text{BSFC} + \text{BSFC}_{\text{pilot}} \right) \cdot \frac{1}{K_{\text{exh}}} \cdot \left(1 - \text{PIT}_{\text{map_compr}}^{-K_{\text{exh}}} \right) \cdot t_{\text{turb,in}}}$$

—

Note tecniche:

- La formulazione ABB assume costanti dei gas uguali tra compressore e turbina.
- Il contributo dinamico della temperatura in ingresso alla turbina è trascurato.
- Il rendimento così calcolato è confrontabile con prove sperimentali su sovralimentatori ABB.
- Per configurazioni con più turbine, il valore di BSAC andrebbe moltiplicato per il numero di stadi.

F190 $\eta_{\text{TC}}^{\text{CIMAC}}$

ID function = 2548

Descrizione = Calcolo del rendimento del turbogruppo nel ciclo MAP Compression secondo la formulazione CIMAC, espresso in [%].

$$t_{\text{comp,in}} = T_{\text{compressor,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$t_{\text{turb,in}} = T_{\text{turbine,in}} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$p_0 = \text{pressione atmosferica} \cdot 100 \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{\text{turb,in}} = \text{pressione ingresso turbina} \cdot 10^5 \quad [\text{Pa}]$$

$$D_{\text{turb,in}} = \text{diametro ingresso turbina}/1000 \quad [\text{m}]$$

$$k_{\text{air}} = \text{coefficiente politropico dell'aria (da F9)}$$

$$k_{\text{exh}} = \text{coefficiente politropico gas di scarico (da F181)}$$

$$\dot{m}_{\text{air}} = \text{portata aria (da F178)} \quad [\text{kg/s}]$$

$$\dot{m}_{\text{exh}} = \text{portata gas di scarico ridotta (da F184)}/3600 \quad [\text{kg/s}]$$

$$\text{PIV} = \text{rapporto di compressione (da F186)}$$

$$\text{PIT} = \text{rapporto di espansione (da F187)}$$

$$R_{\text{air}} = 287.04 \quad [\text{J/kgK}]$$

$$R_{\text{exh}} = 293.93 \quad [\text{J/kgK}]$$

Calcolo del rendimento CIMAC:

Condizione speciale:

$$\text{Se PIV} = 0 \Rightarrow \eta_{\text{TC}}^{\text{CIMAC}} = 0$$

Formula generale:

$$\begin{aligned} K_{\text{air}} &= \frac{k_{\text{air}} - 1}{k_{\text{air}}} \\ K_{\text{exh}} &= \frac{k_{\text{exh}} - 1}{k_{\text{exh}}} \\ \rho &= \frac{p_0 + p_{\text{turb,in}}}{R_{\text{exh}} \cdot t_{\text{turb,in}}} \\ v &= \frac{4 \cdot \dot{m}_{\text{exh}}}{\text{config} \cdot \rho \cdot \pi \cdot D_{\text{turb,in}}^2} \\ t_{5,\text{corr}} &= \frac{0.5 \cdot v^2 \cdot K_{\text{exh}}}{1000} \end{aligned}$$

$$\eta_{\text{TC}}^{\text{CIMAC}} = \frac{100 \cdot R_{\text{air}} \cdot \dot{m}_{\text{air}} \cdot \frac{1}{K_{\text{air}}} \cdot t_{\text{comp,in}} \cdot (\text{PIV}^{K_{\text{air}}} - 1)}{R_{\text{exh}} \cdot \dot{m}_{\text{exh}} \cdot \frac{1}{K_{\text{exh}}} \cdot (t_{\text{turb,in}} + t_{5,\text{corr}}) \cdot (1 - \text{PIT}^{-K_{\text{exh}}})}$$

Note tecniche:

- La correzione $t_{5,corr}$ rappresenta la componente cinetica della temperatura di ristagno.
- La formulazione CIMAC è più rigorosa rispetto a quella ABB, includendo effetti dinamici e proprietà distinte tra aria e gas di scarico.
- Il rendimento così calcolato è utile per confronti normativi e simulazioni avanzate.

$F191 \ \eta_{TC}^{MET}$

ID function = 2549

Descrizione = Calcolo del rendimento del turbogruppo nel ciclo MAP Compression secondo la formulazione MET (Mitsubishi Engine Technology), espresso in [%].

$$t_{comp,in} = T_{compressor,in} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

$$t_{turb,in} = T_{turbine,in} + 273.15 \quad [\text{K}]$$

PIV = rapporto di compressione (da F186)

PIT = rapporto di espansione (da F187)

$\rho_{air} = 0.2857$ (rapporto dei calori specifici dell'aria)

$\rho_{exh} = 0.2593$ (rapporto dei calori specifici dei gas di scarico)

$\alpha = 0.91$ (coefficiente sperimentale Mitsubishi)

Calcolo del rendimento MET:

Condizione speciale:

$$\text{Se PIV} = 0 \Rightarrow \eta_{TC}^{MET} = 0$$

Formula generale:

$$\eta_{TC}^{MET} = \frac{100 \cdot \alpha \cdot t_{comp,in} \cdot (PIV^{\rho_{air}} - 1)}{t_{turb,in} \cdot (1 - PIT^{-\rho_{exh}})} \quad [\%]$$

Note tecniche:

- Il coefficiente $\alpha = 0.91$ è derivato da test sperimentali su turbogruppi Mitsubishi.
- La formulazione MET è più semplificata rispetto a CIMAC o ABB, ma consente una stima rapida del rendimento.
- I rapporti ρ_{air} e ρ_{exh} rappresentano il rapporto tra i calori specifici a pressione costante e volume costante (C_p/C_v) per aria e gas di scarico.

F192 $\eta_T^{\text{ABB, map_compr}}$

ID function = 2550

Descrizione = Calcolo del rendimento della sola turbina nel ciclo MAP Compression secondo la formulazione ABB, espresso in [%].

$\eta_{sv}^{\text{map_compr}}$ = rendimento del compressore (da F188) [%]

η_{TC}^{ABB} = rendimento del turbogruppo (da F189) [%]

—

Calcolo del rendimento turbina ABB:

Condizione speciale:

Se $\eta_{sv}^{\text{map_compr}} = 0 \Rightarrow \eta_T^{\text{ABB, map_compr}} = 0$

Formula generale:

$$\eta_T^{\text{ABB, map_compr}} = \frac{100 \cdot \eta_{TC}^{\text{ABB}}}{\eta_{sv}^{\text{map_compr}}} \quad [\%]$$

—
Note tecniche:

- Il rendimento della turbina è calcolato come rapporto tra il rendimento globale del turbogruppo e quello del compressore.
- La formulazione ABB consente di isolare l'efficienza della turbina in modo empirico, utile per confronti sperimentali.
- Il valore è significativo solo se entrambi i rendimenti sono disponibili e il motore è attivo.

F193 $\eta_T^{\text{CIMAC, map_compr}}$

ID function = 2551

Descrizione = Calcolo del rendimento della sola turbina nel ciclo MAP Compression secondo la formulazione CIMAC, espresso in [%].

$\eta_{sv}^{\text{map_compr}}$ = rendimento del compressore (da F188) [%]

η_{TC}^{CIMAC} = rendimento del turbogruppo (da F190) [%]

—

Calcolo del rendimento turbina CIMAC:

Condizione speciale:

Se $\eta_{sv}^{\text{map_compr}} = 0 \Rightarrow \eta_T^{\text{CIMAC, map_compr}} = 0$

Formula generale:

$$\eta_T^{\text{CIMAC, map_compr}} = \frac{100 \cdot \eta_{\text{TC}}^{\text{CIMAC}}}{\eta_{\text{sv}}^{\text{map_compr}}} \quad [\%]$$

Note tecniche:

- Il rendimento della turbina è calcolato come rapporto tra il rendimento globale del turbogruppo (CIMAC) e quello del compressore.
- Questo approccio consente di isolare l'efficienza della turbina in modo analitico, utile per confronti normativi e simulazioni.
- Il valore è significativo solo se entrambi i rendimenti sono disponibili e il motore è attivo.

F194 $\eta_T^{\text{MET, map_compr}}$

ID function = 2552

Descrizione = Calcolo del rendimento della sola turbina nel ciclo MAP Compression secondo la formulazione MET, espresso in [%].

$\eta_{\text{sv}}^{\text{map_compr}}$ = rendimento del compressore (da F188) [%]

$\eta_{\text{TC}}^{\text{MET}}$ = rendimento del turbogruppo (da F191) [%]

Calcolo del rendimento turbina MET:

Condizione speciale:

Se $\eta_{\text{sv}}^{\text{map_compr}} = 0 \Rightarrow \eta_T^{\text{MET, map_compr}} = 0$

Formula generale:

$$\eta_T^{\text{MET, map_compr}} = \frac{100 \cdot \eta_{\text{TC}}^{\text{MET}}}{\eta_{\text{sv}}^{\text{map_compr}}} \quad [\%]$$

Note tecniche:

- Il rendimento della turbina è calcolato come rapporto tra il rendimento globale del turbogruppo (MET) e quello del compressore.
- Questo approccio consente di isolare l'efficienza della turbina in modo empirico, utile per confronti con dati sperimentali Mitsubishi.
- Il valore è significativo solo se entrambi i rendimenti sono disponibili e il motore è attivo.

F196 NO_x^{map_compr}

ID function = 2554

Descrizione = Calcolo delle emissioni di NO nel ciclo MAP Compression, espresse in [g/kWh].

P_{eng} = potenza del motore (da F208) [kW]

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{Olio (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{Gas} \end{cases}$$

$$\text{NOx}_{\text{dry/wet}} = \begin{cases} 1 & \text{Dry} \\ 0 & \text{Wet} \end{cases}$$

k_{DtW} = fattore di conversione da dry a wet (da F25)

\dot{m}_{exh} = portata gas di scarico (da F177) · 10³ [g/h]

NOx_{corr} = concentrazione corretta di NOx (da F151) · 10⁻⁶ [-]

Calcolo delle emissioni NO:

Condizione speciale:

Se $P_{\text{eng}} = 0 \Rightarrow \text{NO}_x^{\text{map-compr}} = 0$

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 1.586 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \quad (\text{Gas}) \\ 1.621 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 0/1 \quad (\text{Olio}) \end{cases}$$

Formula generale:

$$\text{NO}_x^{\text{map-compr}} = \begin{cases} \frac{c \cdot \text{NOx}_{\text{corr}} \cdot \dot{m}_{\text{exh}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se } \text{NOx}_{\text{dry/wet}} = 1 \\ \frac{c \cdot \text{NOx}_{\text{corr}} \cdot \dot{m}_{\text{exh}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se } \text{NOx}_{\text{dry/wet}} = 0 \end{cases} \quad [\text{g/kWh}]$$

Note tecniche:

- Il **component specific factor** c è un coefficiente adimensionale che rappresenta il rapporto tra la densità del componente gassoso e quella dei gas di scarico.
- Il valore di c è tabulato secondo il **NOx Technical Code**, capitolo 5.
- Il calcolo tiene conto della condizione “dry” o “wet” e della conversione tramite

k_{DtW} .

- In letteratura, il coefficiente c è spesso indicato con la lettera u .

F197 CO₂^{map_compr}

ID function = 2555

Descrizione = Calcolo delle emissioni di CO nel ciclo MAP Compression, espresse in [g/kWh].

P_{eng} = potenza del motore (da F208) [kW]

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{Olio (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{Gas} \end{cases}$$

k_{DtW} = fattore di conversione da dry a wet (da F25)

\dot{m}_{exh} = portata gas di scarico (da F177) · 10³ [g/h]

CO₂ = concentrazione di CO · 10⁻² [-]

—

Calcolo delle emissioni CO:

Condizione speciale:

Se $P_{eng} = 0 \Rightarrow \text{CO}_2^{\text{map-compr}} = 0$

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 1.517 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \quad (\text{Gas}) \\ 1.551 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 0/1 \quad (\text{Olio}) \end{cases}$$

Formula generale:

$$\text{CO}_2^{\text{map-compr}} = \frac{c \cdot \text{CO}_2 \cdot \dot{m}_{\text{exh}} \cdot k_{DtW}}{P_{eng}} \quad [\text{g/kWh}]$$

—

Note tecniche:

- Il **component specific factor** c è un coefficiente adimensionale che rappresenta il rapporto tra la densità del componente gassoso e quella dei gas di scarico.
- I valori di c sono tabulati secondo il **NOx Technical Code**, capitolo 5.
- Il calcolo tiene conto della conversione dry-to-wet tramite k_{DtW} .
- In letteratura, il coefficiente c è spesso indicato con la lettera u .

F198 CO^{map_compr}

ID function = 2560

Descrizione = Calcolo delle emissioni di monossido di carbonio (CO) nel ciclo MAP Compression, espresse in [g/kWh].

P_{eng} = potenza del motore (da F208) [kW]

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{Olio (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{Gas} \end{cases}$$

k_{DtW} = fattore di conversione da dry a wet (da F25)

\dot{m}_{exh} = portata gas di scarico (da F177) $\cdot 10^3$ [g/h]

CO = concentrazione di CO/ 10^4 [-]

—
Calcolo delle emissioni CO:

Condizione speciale:

Se $P_{\text{eng}} = 0 \Rightarrow \text{CO}^{\text{map-compr}} = 0$

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 0.00966 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \quad (\text{Gas}) \\ 0.00987 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 0/1 \quad (\text{Olio}) \end{cases}$$

Formula generale:

$$\text{CO}^{\text{map-compr}} = \frac{c \cdot \text{CO} \cdot \dot{m}_{\text{exh}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} \quad [\text{g/kWh}]$$

—
Note tecniche:

- Il **component specific factor** c è un coefficiente adimensionale che rappresenta il rapporto tra la densità del componente gassoso e quella dei gas di scarico.
- I valori di c sono tabulati secondo il **NOx Technical Code**, capitolo 5.
- Il calcolo tiene conto della conversione dry-to-wet tramite k_{DtW} .
- In letteratura, il coefficiente c è spesso indicato con la lettera u .

F199 THC^{map_compr}

ID function = 2557

Descrizione = Calcolo delle emissioni di idrocarburi totali (THC) nel ciclo MAP Compression, espresse in [g/kWh].

P_{eng} = potenza del motore [kW]

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{Olio (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{Gas} \end{cases}$$

$$\text{THC}_{\text{dry/wet}} = \begin{cases} 1 & \text{Dry} \\ 0 & \text{Wet} \end{cases}$$

k_{DtW} = fattore di conversione da dry a wet (da F25)

\dot{m}_{exh} = portata gas di scarico (da F177) $\cdot 10^3$ [g/h]

THC_{dry} = concentrazione THC dry $\cdot 10^{-6}$

THC_{wet} = concentrazione THC wet $\cdot 10^{-6}$

Calcolo delle emissioni THC:

Condizione speciale:

Se $P_{\text{eng}} = 0 \Rightarrow \text{THC}^{\text{map-compr}} = 0$

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 0.482 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \quad (\text{Gas}) \\ 0.528 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 0/1 \quad (\text{Olio}) \end{cases}$$

Formula generale:

$$\text{THC}^{\text{map-compr}} = \begin{cases} \frac{c \cdot \text{THC}_{\text{dry}} \cdot \dot{m}_{\text{exh}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se } \text{THC}_{\text{dry/wet}} = 1 \\ \frac{c \cdot \text{THC}_{\text{wet}} \cdot \dot{m}_{\text{exh}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se } \text{THC}_{\text{dry/wet}} = 0 \end{cases} \quad [\text{g/kWh}]$$

Note tecniche:

- Il **component specific factor** c è un coefficiente adimensionale che rappresenta il rapporto tra la densità del componente gassoso e quella dei gas di scarico.
- I valori di c sono tabulati secondo il **NOx Technical Code**, capitolo 5.
- Il calcolo tiene conto della conversione dry-to-wet tramite k_{DtW} .
- In letteratura, il coefficiente c è spesso indicato con la lettera u .

F200 O₂^{map_compr}

ID function = 2558

Descrizione = Calcolo delle emissioni di ossigeno residuo (O) nel ciclo MAP Compression, espresse in [g/kWh].

P_{eng} = potenza del motore (da F208) [kW]

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{Olio (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{Gas} \end{cases}$$

O_2 = concentrazione di ossigeno $\cdot 10^{-2}$ [-]

k_{DtW} = fattore di conversione da dry a wet (da F25)

\dot{m}_{exh} = portata gas di scarico (da F177) $\cdot 10^3$ [g/h]

Calcolo delle emissioni O:

Condizione speciale:

Se $P_{\text{eng}} = 0 \Rightarrow O_2^{\text{map_compr}} = 0$

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 11.03 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \quad (\text{Gas}) \\ 11.28 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 0/1 \quad (\text{Olio}) \end{cases}$$

Formula generale:

$$O_2^{\text{map_compr}} = \frac{c \cdot O_2 \cdot \dot{m}_{\text{exh}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} \quad [\text{g/kWh}]$$

Note tecniche:

- Il **component specific factor** c è un coefficiente adimensionale che rappresenta il rapporto tra la densità del componente gassoso e quella dei gas di scarico.
- I valori di c sono tabulati secondo il **NOx Technical Code**, capitolo 5.
- Il calcolo tiene conto della conversione dry-to-wet tramite k_{DtW} .
- In letteratura, il coefficiente c è spesso indicato con la lettera u .

F201 $\dot{m}_{\text{fuel,main}}^{\text{map_compr}}$

ID function = 2559

Descrizione = Calcolo del consumo specifico di combustibile principale nel ciclo MAP Compression, espresso in [g/h], con gestione automatica del sistema dual fuel e dei sensori assenti.

Parametri di ingresso:

P_{eng} = potenza del motore (da F208) [kW]

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{Olio (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{Gas} \end{cases}$$

$$\text{Double_flow_gas} = \begin{cases} 0 & \text{singolo misuratore gas} \\ 1 & \text{doppio misuratore gas} \end{cases}$$

Calcolo del flusso combustibile:

Condizione speciale:

Se $P_{\text{eng}} = 0 \Rightarrow \dot{m}_{\text{fuel,main}}^{\text{map_compr}} = 0$

Caso combustibile **gas**:

$$\dot{m}_{\text{net}} = \begin{cases} \dot{m}_{\text{gas}} + \dot{m}_{\text{gas},2} & \text{se Double_flow_gas} = 1 \\ \dot{m}_{\text{gas}} & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Caso combustibile **olio**:

- Se i sensori sono assenti ('2222222'), si applicano priorità e fallback:

$$\dot{m}_{\text{loss}} = \begin{cases} 0 & \text{se entrambi i sensori assenti} \\ \dot{m}_{\text{loss,GravityTank}} & \text{se disponibile} \\ \dot{m}_{\text{loss,net}} & \text{altrimenti} \end{cases}$$

$$\dot{m}_{\text{fuel}} = \begin{cases} \dot{m}_{\text{oil,GravityTank}} & \text{se disponibile} \\ \dot{m}_{\text{oil,IN}} - \dot{m}_{\text{oil,OUT}} & \text{se } \dot{m}_{\text{net}} \text{ assente} \\ \dot{m}_{\text{net}} & \text{altrimenti} \end{cases}$$

$$\dot{m}_{\text{net}} = \dot{m}_{\text{fuel}} - \dot{m}_{\text{loss}}$$

Conversione finale:

$$\dot{m}_{\text{fuel,main}}^{\text{map_compr}} = 1000 \cdot \dot{m}_{\text{net}} \quad [\text{g/h}]$$

Note tecniche:

- La funzione gestisce automaticamente la priorità tra sensori e serbatoi, con fallback in caso di assenza dati.
- Il valore ‘-2222222’ è utilizzato come flag per variabili non disponibili (standard LabVIEW).
- Il calcolo è compatibile con configurazioni mono-fuel e dual-fuel, con uno o due misuratori gas.

F202 $\dot{m}_{\text{fuel,pilot}}^{\text{map_compr}}$

ID function = 2560

Descrizione = Calcolo del consumo specifico di combustibile pilota nel ciclo MAP Compression, espresso in [g/h], con gestione automatica dei sensori assenti.

Parametri di ingresso:

P_{eng} = potenza del motore (da F208) [kW]

m_{IN} = portata in ingresso al sistema pilota [kg/h]

m_{OUT} = portata in uscita dal sistema pilota [kg/h]

$m_{\text{GravityTank}}$ = portata dal serbatoio Gravity Tank [kg/h]

Calcolo del flusso combustibile pilota:

Condizione speciale:

Se $P_{\text{eng}} = 0 \Rightarrow \dot{m}_{\text{fuel,pilot}}^{\text{map_compr}} = 0$

Gestione sensori assenti:

- Se tutti i sensori sono assenti (‘-2222222’), il consumo è nullo.
- Se il serbatoio Gravity Tank è disponibile, ha priorità.
- Altrimenti, si calcola come differenza tra ingresso e uscita.

$$\dot{m}_{\text{net}} = \begin{cases} 0 & \text{se tutti i sensori} = -2222222 \\ m_{\text{GravityTank}} & \text{se disponibile} \\ m_{\text{IN}} - m_{\text{OUT}} & \text{altrimenti} \end{cases}$$

—
Conversione finale:

$$\dot{m}_{\text{fuel,pilot}}^{\text{map_compr}} = 1000 \cdot \dot{m}_{\text{net}} \quad [\text{g/h}]$$

—
Note tecniche:

- Il valore ‘-2222222’ è utilizzato come flag per variabili non disponibili (standard LabVIEW).
- Il serbatoio Gravity Tank ha priorità rispetto ai misuratori di flusso.
- Il calcolo è compatibile con configurazioni mono-fuel e dual-fuel, ma il combustibile pilota è sempre LFO.

$F203 \text{ CH}_4^{\text{CB, map_compr}}$

ID function = 2561

Descrizione = Calcolo delle emissioni di metano (CH) nel ciclo MAP Compression secondo il metodo Carbon Balance, espresse in [g/kWh].

—
Parametri di ingresso:

P_{eng} = potenza del motore (da F208) [kW]

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{Olio (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{Gas} \end{cases}$$

CH_4^{dry} = concentrazione CH dry $\cdot 10^{-6}$

CH_4^{wet} = concentrazione CH wet $\cdot 10^{-6}$

$$\text{CH}_4^{\text{dry/wet}} = \begin{cases} 1 & \text{Dry} \\ 0 & \text{Wet} \end{cases}$$

k_{DtW} = fattore di conversione da dry a wet (da F25)

$\dot{m}_{\text{exh}}^{\text{CB}}$ = massa gas di scarico (da F27) $\cdot 10^3$ [g/h]

—
Calcolo delle emissioni CH:

Condizioni speciali:

$$\text{Se } P_{\text{eng}} = 0 \Rightarrow \text{CH}_4^{\text{CB, map - compr}} = 0$$

$$\text{Se } \dot{m}_{\text{exh}}^{\text{CB}} = -0.00001 \cdot 10^3 \Rightarrow \text{CH}_4^{\text{CB, map - compr}} = -0.00001 \quad (\text{motore acceso con AMA disattivo})$$

—

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 0.504 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \quad (\text{Gas}) \\ 0.516 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 0/1 \quad (\text{Olio}) \end{cases}$$

—

Formula generale:

$$\text{CH}_4^{\text{CB, map - compr}} = \begin{cases} \frac{c \cdot \text{CH}_4^{\text{dry}} \cdot \dot{m}_{\text{exh}}^{\text{CB}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se } \text{CH}_4^{\text{dry/wet}} = 1 \\ \frac{c \cdot \text{CH}_4^{\text{wet}} \cdot \dot{m}_{\text{exh}}^{\text{CB}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se } \text{CH}_4^{\text{dry/wet}} = 0 \end{cases} \quad [\text{g/kWh}]$$

—

Note tecniche:

- Il **component specific factor** c è calcolato considerando la densità del metano (0.657 kg/m^3) e quella dei gas di scarico (1.303 per GAS, 1.274 per HFO/LFO).
- A differenza degli altri inquinanti, il valore di c per CH non è tabulato nel NOx Technical Code ma calcolato manualmente.
- Il metodo Carbon Balance utilizza la massa totale dei gas di scarico per stimare le emissioni.

F204 CH₄^{nozzle,map_compr}

ID function = 2562

Descrizione = Calcolo delle emissioni di metano (CH) nel ciclo MAP Compression utilizzando la massa dei gas di scarico stimata dal nozzle, espresse in [g/kWh].

—
Parametri di ingresso:

P_{eng} = potenza del motore (da F208) [kW]

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{Olio (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{Gas} \end{cases}$$

CH_4^{dry} = concentrazione CH dry $\cdot 10^{-6}$

CH_4^{wet} = concentrazione CH wet $\cdot 10^{-6}$

$$\text{CH}_4^{\text{dry/wet}} = \begin{cases} 1 & \text{Dry} \\ 0 & \text{Wet} \end{cases}$$

k_{DtW} = fattore di conversione da dry a wet (da F25)

$\dot{m}_{\text{exh}}^{\text{nozzle}}$ = massa gas di scarico (da F30) $\cdot 10^3$ [g/h]

Calcolo delle emissioni CH:

Condizione speciale:

Se $P_{\text{eng}} = 0 \Rightarrow \text{CH}_4^{\text{nozzle, map-compr}} = 0$

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 0.504 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \quad (\text{Gas}) \\ 0.516 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 0/1 \quad (\text{Olio}) \end{cases}$$

Formula generale:

$$\text{CH}_4^{\text{nozzle, map-compr}} = \begin{cases} \frac{c \cdot \text{CH}_4^{\text{dry}} \cdot \dot{m}_{\text{exh}}^{\text{nozzle}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se } \text{CH}_4^{\text{dry/wet}} = 1 \\ \frac{c \cdot \text{CH}_4^{\text{wet}} \cdot \dot{m}_{\text{exh}}^{\text{nozzle}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se } \text{CH}_4^{\text{dry/wet}} = 0 \end{cases} \quad [\text{g/kWh}]$$

Note tecniche:

- Il **component specific factor** c è calcolato considerando la densità del metano (0.657 kg/m^3) e quella dei gas di scarico (1.303 per GAS, 1.274 per HFO/LFO).
- Il metodo nozzle utilizza la massa dei gas di scarico calcolata tramite geometria e pressione differenziale.
- In letteratura, il coefficiente c è spesso indicato con la lettera u .

F205 CH₄^{EC4T,map_compr}

ID function = 2563

Descrizione = Calcolo delle emissioni di metano (CH) nel ciclo MAP Compression utilizzando la massa dei gas di scarico stimata dal sistema EC4T, espresse in [g/kWh].

Parametri di ingresso:

P_{eng} = potenza del motore [kW]

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{Olio (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{Gas} \end{cases}$$

CH₄^{dry} = concentrazione CH dry · 10⁻⁶

CH₄^{wet} = concentrazione CH wet · 10⁻⁶

$$\text{CH}_4^{\text{dry/wet}} = \begin{cases} 1 & \text{Dry} \\ 0 & \text{Wet} \end{cases}$$

k_{DtW} = fattore di conversione da dry a wet (da F25)

$\dot{m}_{\text{exh}}^{\text{EC4T}}$ = massa gas di scarico (da F31) · 10³ [g/h]

Calcolo delle emissioni CH:

Condizione speciale:

Se P_{eng} = 0 ⇒ CH₄^{EC4T,map_compr} = 0

Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 0.504 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \quad (\text{Gas}) \\ 0.516 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 0/1 \quad (\text{Olio}) \end{cases}$$

Formula generale:

$$\text{CH}_4^{\text{EC4T,map_compr}} = \begin{cases} \frac{c \cdot \text{CH}_4^{\text{dry}} \cdot \dot{m}_{\text{exh}}^{\text{EC4T}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se } \text{CH}_4^{\text{dry/wet}} = 1 \\ \frac{c \cdot \text{CH}_4^{\text{wet}} \cdot \dot{m}_{\text{exh}}^{\text{EC4T}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se } \text{CH}_4^{\text{dry/wet}} = 0 \end{cases} \quad [\text{g/kWh}]$$

—
Note tecniche:

- Il **component specific factor** c è calcolato considerando la densità del metano (0.657 kg/m^3) e quella dei gas di scarico (1.303 per GAS, 1.274 per HFO/LFO).
- Il metodo EC4T utilizza una stima avanzata della massa dei gas di scarico basata su sensori multipli e modelli fluidodinamici.
- In letteratura, il coefficiente c è spesso indicato con la lettera u .

$F206 \text{ CH}_4^{\text{map_compr}}$

ID function = 2564

Descrizione = Calcolo delle emissioni di metano (CH) nel ciclo MAP Compression, espresse in [g/kWh].

—
Parametri di ingresso:

$$P_{\text{eng}} = \text{potenza del motore (da F208)} \quad [\text{kW}]$$

$$\text{Fuel}_{\text{Gas}} = \begin{cases} 0/1 & \text{Olio (HFO/LFO)} \\ 2 & \text{Gas} \end{cases}$$

$$\text{CH}_4^{\text{dry}} = \text{concentrazione CH dry} \cdot 10^{-6}$$

$$\text{CH}_4^{\text{wet}} = \text{concentrazione CH wet} \cdot 10^{-6}$$

$$\text{CH}_4^{\text{dry/wet}} = \begin{cases} 1 & \text{Dry} \\ 0 & \text{Wet} \end{cases}$$

$$k_{\text{DtW}} = \text{fattore di conversione da dry a wet (da F25)}$$

$$\dot{m}_{\text{exh}} = \text{massa gas di scarico (da F177)} \cdot 10^3 \quad [\text{g/h}]$$

—
Calcolo delle emissioni CH:

Condizione speciale:

$$\text{Se } P_{\text{eng}} = 0 \Rightarrow \text{CH}_4^{\text{map_compr}} = 0$$

—
Fattore specifico del componente:

$$c = \begin{cases} 0.504 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 2 \quad (\text{Gas}) \\ 0.516 & \text{se Fuel}_{\text{Gas}} = 0/1 \quad (\text{Olio}) \end{cases}$$

Formula generale:

$$\text{CH}_4^{\text{map_compr}} = \begin{cases} \frac{c \cdot \text{CH}_4^{\text{dry}} \cdot \dot{m}_{\text{exh}} \cdot k_{\text{DtW}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se } \text{CH}_4^{\text{dry/wet}} = 1 \\ \frac{c \cdot \text{CH}_4^{\text{wet}} \cdot \dot{m}_{\text{exh}}}{P_{\text{eng}}} & \text{se } \text{CH}_4^{\text{dry/wet}} = 0 \end{cases} \quad [\text{g/kWh}]$$

Note tecniche:

- Il **component specific factor** c è calcolato considerando la densità del metano (0.657 kg/m^3) e quella dei gas di scarico (1.303 per GAS, 1.274 per HFO/LFO).
- Il calcolo tiene conto della conversione dry-to-wet tramite k_{DtW} .
- In letteratura, il coefficiente c è spesso indicato con la lettera u .

F207 $\dot{m}_{\text{exh,corr}}^{\text{map_compr}}$

ID function = 2565

Descrizione = Calcolo iterativo della portata corretta dei gas di scarico in uscita dalla turbina nel ciclo MAP Compression, espresso in [kg/s].

Parametri di ingresso:

P_{eng} = potenza del motore (da F208) [kW]

p_0 = pressione atmosferica · 100 [Pa]

$p_{\text{turb,in}}$ = pressione ingresso turbina · 10^5 [Pa]

$p_{\text{turb,out}}$ = pressione uscita turbina · 100 [Pa]

$t_{\text{turb,in}}$ = temperatura ingresso turbina + 273.15 [K]

$D_{\text{turb,in}}$ = diametro ingresso turbina/1000 [m]

n_{298} = velocità turbina [rpm]

\dot{m}_{air} = portata aria (da F178) [kg/s]

Calcolo delle perdite:

$$\text{leak} = \begin{cases} \text{leak}_{1S} & \text{se turbina a 1 stadio} \\ (1 - \text{leak}_{2S,LP}) \cdot \text{leak}_{2S,HP} + \text{leak}_{2S,LP} & \text{se turbina a 2 stadi} \end{cases}$$

Algoritmo iterativo:

Inizializzazione:

$$\begin{aligned} p_{\text{stat,in}} &= p_0 + p_{\text{turb,in}} \\ \rho_1 &= \frac{p_{\text{stat,in}}}{R \cdot t_{\text{turb,in}}} \\ \text{tolleranza} &= 0.0002 \quad (\text{errore relativo}) \\ \text{max iterazioni} &= 10 \end{aligned}$$

Iterazione:

Per ogni iterazione:

$$\begin{aligned} PIT &= \frac{p_{\text{stat,in}} + p_{5,\text{dyn}}}{p_{\text{turb,out}} + p_0} \\ v &= \text{leggimappaturbo}(PIT, n_{298}) \\ \dot{m}_{\text{corr}} &= \frac{v \cdot (p_{\text{stat,in}}/1000)}{\sqrt{t_{\text{turb,in}}}} \\ x &= \frac{4 \cdot \dot{m}_{\text{corr}}}{\pi \cdot D_{\text{turb,in}}^2 \cdot \rho_1} \\ \dot{m}_{\text{corr}} &= \dot{m}_{\text{corr}} + \dot{m}_{\text{air}} \cdot \text{leak} \\ p_{5,\text{dyn}} &= 0.5 \cdot x^2 \cdot \rho_1 \\ \text{errore} &= \frac{\dot{m}_{\text{corr}} - \dot{m}_{\text{corr,old}}}{\dot{m}_{\text{corr}}} \end{aligned}$$

Output finale:

$$\dot{m}_{\text{exh,corr}}^{\text{map_compr}} = \dot{m}_{\text{corr}} \quad [\text{kg/s}]$$

Note tecniche:

- Il calcolo è basato su mappe turbina e richiede interpolazione tramite la funzione ‘leggimappaturbo(PIT, n298)’.
- La pressione dinamica $p_{5,\text{dyn}}$ viene aggiornata ad ogni iterazione per correggere il rapporto di espansione.
- Il metodo tiene conto delle perdite interne e della configurazione mono o bi-stadio della turbina.

F208 $P_{\text{eng,real}}$

ID function= 2566

Descrizione= Potenza motore reale calcolata a partire dalla potenza misurata e dal

rendimento della trasmissione e dell'alternatore

- P_{eng} : potenza motore (da F208) [kW]
- η : rendimento del motore [%]

Se $P_{\text{eng}} = -2222222 \Rightarrow P_{\text{eng,real}} = -2222222$

$$\text{Se } \eta = 0 \text{ oppure } \eta = -2222222 \Rightarrow P_{\text{eng,real}} = \frac{P_{\text{eng}}}{0.9}$$

$$P_{\text{eng,real}} = \frac{P_{\text{eng}}}{\eta} \quad [\text{kW}] \quad (\text{caso generale})$$