



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Upgrade S/W e H/W dell'impianto COMET-HP

C. Stringola, M. Nobili, E. Giulietti, L. Pagliari, S. Cassani

UPGRADE S/W E H/W DELL'IMPIANTO COMET-HP

C. Stringola, M. Nobili, E. Giulietti, L. Pagliari, S. Cassani

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Studi sull'utilizzo pulito dei combustibili fossili e cattura e sequestro della CO₂

Responsabile del Progetto: Stefano Giammartini, ENEA

Indice

Sommario.....	4
1 Introduzione.....	4
2 Corpo del rapporto - Descrizione delle attività svolte e risultati.....	4
2.1 <i>MODIFICHE SULLA STIMA E REGOLAZIONE DELLE PORTATE</i>	4
2.1.1 Situazione di partenza	4
2.1.2 Modifiche effettuate.....	5
2.1.3 Verifica dei dati di taratura del venturimetro dell'aria primaria	8
1) Velocità di efflusso	8
2) Portata volumetrica e massica nelle condizioni di taratura	9
3) Portata volumetrica e massica per condizioni diverse da quella di taratura	10
2.1.4 Regolazione della portata massica	12
2.1.5 Gestione del trasduttore di pressione del tubo di Venturi	14
2.1.6 Confronto sperimentale con le portate ottenute tramite Tubo ad U.....	15
2.1.7 Gestione dello zero nella modalità "AUTOMATICA"	18
2.1.8 Gestione dell'erronea chiusura delle valvole di intercettazione	18
2.1.9 Inseguimento delle portate nel cambio AUTOMATICO - MANUALE	19
2.2 <i>ALTRE MODIFICHE SW</i>	20
2.2.1 Rilevamento fiamma.....	20
2.2.2 Accensione Impianto	20
2.2.3 Procedura di lavaggio.....	22
2.2.4 Parametri bruciatore	22
2.2.5 Interfaccia Operatore	23
2.2.6 Gestione tastierino numerico "Input Panel"	24
2.3 <i>AGGIORNAMENTI IMPIANTISTICI</i>	25
2.3.1 Regolatori/stabilizzatori di pressione	25
2.3.2 Messa in pressione della camera di combustione	25
3 Conclusioni.....	26
4 Riferimenti bibliografici	26

Sommario

Questo documento descrive quanto fatto per aggiornare sia dal punto di vista hardware che software l'impianto COMET-HP circa la misura delle portate di combustibile e aria comburente (rese indipendenti dalla pressione a monte) e la messa in pressione della camera di combustione. Sono inoltre descritte modifiche operative e di interfaccia del SW di gestione.

1 Introduzione

Questo documento riporta la descrizione sintetica di una serie di aggiornamenti HW e SW relativi all'impianto COMET.

Per quanto riguarda l'HW si tratta di aggiornamenti rispetto ai precedenti Rapporti Tecnici ([1], [2]) per:

- stabilizzare la pressione della portata dell'aria comburente e del metano,
- portare la camera di combustione in pressione a valori compresi tra atmosferica e 7 bar.

Per quanto riguarda il SW si tratta di alcuni aggiornamenti di stima delle portate, gestione di alcune procedure e riorganizzazione dell'interfaccia operatore. In particolare viene descritta la fase di modifica del SW su PLC eseguita, su specifiche ENEA, dallo sviluppatore del sistema di controllo (*Alpha Automation Engineering S.r.l.* - info@alphaeng.it - www.alphaeng.it Via Piola, 19 - 20034 Giussano (MI) - Tel.+39 0362 304273) che ha originariamente sviluppato il sistema di Supervisione e Controllo degli impianti IDEA e COMET-HP (ubicati nell'edificio F-100, in adiacenza della Hall tecnologica dell'edificio F-40 del C.R. ENEA Casaccia) che condividono il leggio di comando in sala controllo, al centro delle due sezioni di prova.

2 Corpo del rapporto - Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 MODIFICHE SULLA STIMA E REGOLAZIONE DELLE PORTATE

2.1.1 Situazione di partenza

Il calcolo delle portate di aria e metano implementato sul PLC di controllo impianto era ottenuto implementando la seguente formula (informazione fedelmente riportata come fornita da *Alpha Automation Engineering S.r.l.*):

Di seguito la modalità di linearizzazione della portata FE201:

F = Portata $\rightarrow 2600$
 P = Pressione $\rightarrow PE201$
 $^{\circ}t$ = temperatura $\rightarrow TE202$

$$Portata \text{ kg/h} = \frac{F}{\sqrt{\frac{20 + 273}{^{\circ}t + 273} \cdot \frac{P}{3}}}$$

$$(n.d.r., = \frac{F_{tar}}{\sqrt{\frac{T_{tar}}{P_{ATT}} \cdot \frac{P_{ATT}}{P_{tar}}}})$$

Tale portata è la "portata massima" in base alla quale viene lineareizzato il segnale analogico FE201 in kg/h ovvero tale segnale viene lineareizzato tra:

Portata minima: 0.0

Portata massima: calcolata dalla formula

Per quanto riguarda invece il segnale FE101, la formula è la stessa con:

F = Portata → 90

P = Pressione → PE101

°t = temperatura → TE101

Stessa cosa per il segnale FE102 con:

F = Portata → 18

P = Pressione → PE101

°t = temperatura → TE101

La relazione per il calcolo della "portata massima" precedentemente indicata riporta invertiti, come vedremo in seguito (equazione 6), sia i rapporti tra le temperature che quelli tra le pressioni, ed inoltre non considera il rapporto tra i salti di pressione ΔP tra i due punti A e B nella condizione attuale e quella di taratura. Inoltre risultava esserci un altro problema, ovvero esisteva nel SW di gestione una ulteriore erronea soglia alla portata massima, che saturava a 2600kg/h per FE201, 90kg/h per FE101 e 18kg/h per FE102 (valori in realtà solo di taratura ma che possono essere variati effettuando una nuova taratura dei trasduttori di pressione collegati al Venturi).

2.1.2 Modifiche effettuate

Verificando, per esempio, solo su FE201 (aria primaria di combustione), utilizzando i fogli di taratura del relativo venturimetro (Figura 1, Figura 2), si ottiene quanto segue.

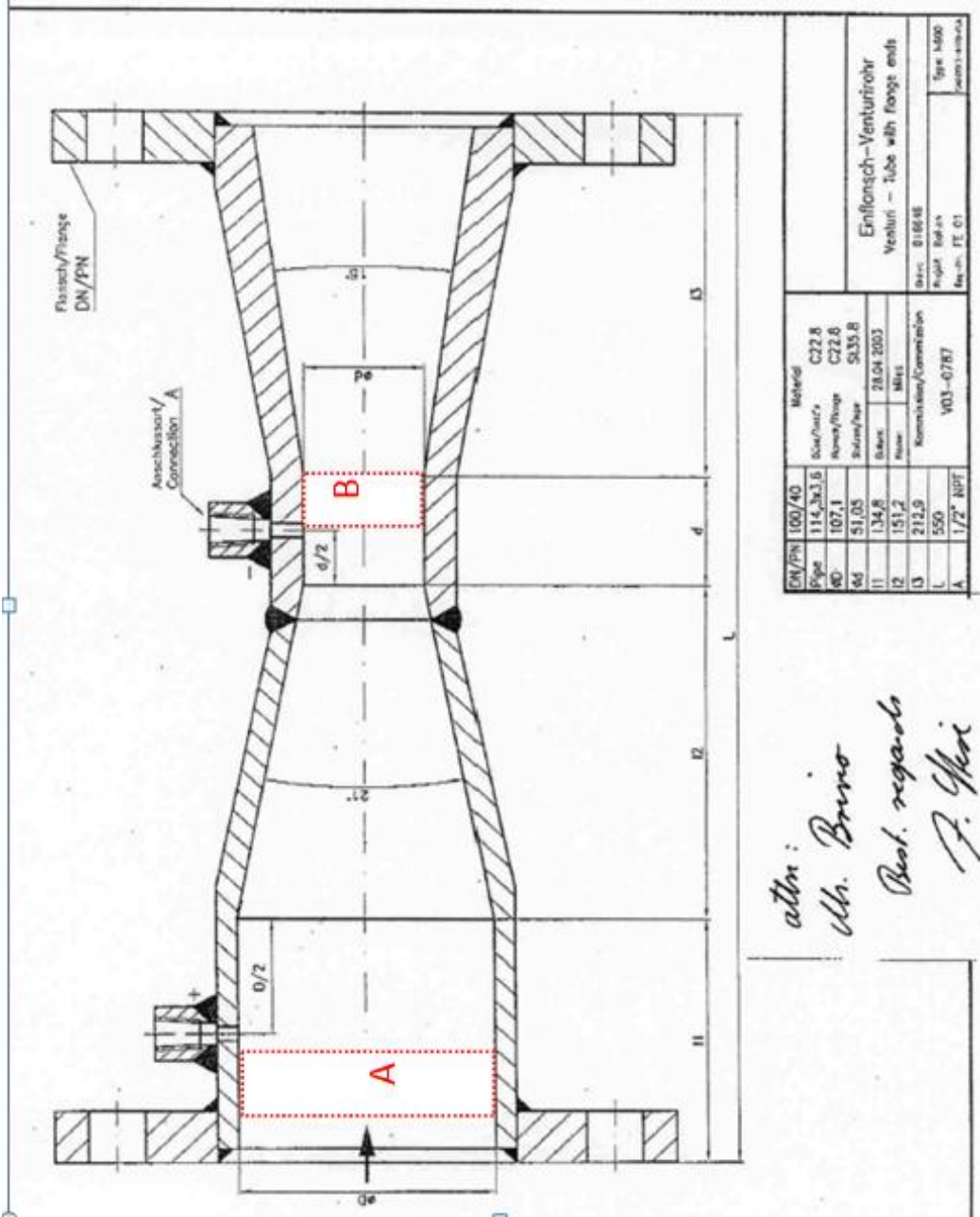


Figura 1: Geometria del venturimetro usato nella linea di alimentazione dell’aria primaria.

Berechnungsblatt/Calculation Sheet (ISO 5167-1/A1)			
Dosch Kommission Bestellung/ Order : Projekt/ Project : Tag No: Medium : Bauart/ Construction : Rohrmaterial/ Pipe material : Wirkdruckgebermaterial/Material of Flow Elem.:	V03-0787 016646 Italien FE 01 AIR Venturiröhr bearb. Einlaufkonus/Venturi Tube mach. Cone St 37 / St 35 St 37 / St 35	Dat.: 24.04.03	
Betriebsdaten/ Operating Data			
Rohrinnendurchmesser/ Intern. pipe diameter (20°C) :	107,10	[mm]	
Aggregatzustand / Medium condition:	gasförmig/gaseous		
Massenstrom / Mass flow rate :	2600,00	[kg/h]	
Normdichte/Nomdensity 1013,25[mbar] 0[°C]	1,2930	[kg/m³]	
Temperatur / Temperature :	20,0	[Celsius]	
Druck/Pressure (Abs.):	3,0000	[bar]	
Differenzdruck / Differential pressure :	171,0224	[mbar]	
Isentropenexponent / Isentropic exponent :	1,400		
Viskosität / Viscosity :	1,85E-05	[Pa s]	
Rohrrauheit / Roughness(pipe) :	0,0500	[mm]	
Kompressibilität / Compressibility (k=Z1/Zn) :	1,0000		
Rohrinnendurchm.(Betr.)/Intern.pipe diameter(Oper.):	107,1000	[mm]	
Ausdehnungskoeff. / Coeff.therm.expansion (Rohr/Pipe):	1,0000		
Ausdehnungskoeff./Coeff.therm.expansion(Blende/Orifice):	1,0000		
Berechnungsdaten/ Calculation Data			
Wirkdruckg.durchm./ flow elem. diam. (20 °C):	51,0483	[mm]	
Wirkdruckg.durchm.(Betriebsb.)/flowelem.diam.(Oper.):	51,0483	[mm]	
(gerechnet mit 2/3 der Durchflußmenge) (calculated with 2/3 of mass-flow)			
Durchmesseravverh. "ß"/Diameter ratio "ß" (ß=d/D) :	0,4766		
Öffnungsverhältnis/ Boreratio m = (d/D)² :	0,2272		
Reynoldszahl/ Reynolds number (100%) :	4,64E+05		
Durchflußzahl/ Flownumber: Alpha :			
Durchflußkoeffizient/Coeff. of discharge : C :	0,9980		
Vorgeschwindigkeitsf./ Veloc. of approach fac.: E :	1,0269		
Expansionszahl/ Expansion factor: Epsilon :	0,9858		
Strömungsgeschwindigkeit(Rohr) / Flow velocity(pipe)	22,47	[m/s]	
Strömungsgeschwindigkeit(Blende)/Flow velocity(orifice)	98,92	[m/s]	
bleibender Druckverlust/ permanent pressure loss :	25,65	[Millibar]	
Unsicherheit / Uncertainty :	1,74	%	
Erforderliche gerade Rohrstrecken (Mindestwerte)/Requested pipe lengths : Klammerwerte gelten für 0,5 % Zusatzunsicherheit/ () -Value +0,5% more uncertainty			
Einlaufseite des Drosselgerätes/ Upstream side of orifice :			
Einfacher 90-Grad Krümmer/Single bend 90°	1,50	(0,05)	[m]
Zwei oder mehr 90-Grad Krümmer in der gleichen Ebene/			
Two or more bends in the same level :	2,14	(0,16)	[m]
Reduzierstück/Reducer	2,36	(0,05)	[m]
Diffusor/Diffusor	1,29	(0,16)	[m]
Schieber/Slide	0,64	(0,16)	[m]

Figura 2: Foglio di taratura del venturimetro di Figura 1.

2.1.3 Verifica dei dati di taratura del venturimetro dell'aria primaria

1) Velocità di efflusso

(solo V_A° , ma lo stesso procedimento si applica per V_B°)

Se indichiamo con la seguente notazione

V_A = velocità del flusso nel punto A (m/s)

V_B = velocità del flusso nel punto B (m/s)

A = sezione del tubo di venturi nel punto A (m^2)

B = sezione del tubo di venturi nel punto B (m^2)

ρ = densità dell'aria (kg/m^3)

si hanno le seguenti equazioni:

a) **Conservazione dell'Energia**

(Equazione di Bernoulli - non compare la quota perché il venturimetro è in posizione orizzontale):

$$P_A + \frac{1}{2} \rho V_A^2 = P_B + \frac{1}{2} \rho V_B^2 \quad (1)$$

1. si assume $\Delta p_{AB} = 0$; si tratta di max 170 mbar, in confronto ad alcuni bar presenti nel punto A
2. $\rho = \rho_{air}$

b) **Conservazione della portata (Equazione di continuità)**

$$F_m = \rho A V_A = \rho B V_B = \text{costante} \rightarrow F_v = A V_A = B V_B \quad (2)$$

dalla quale si ottiene $V_B = (A/B) V_A$

che sostituita nella (1) diventa:

$$P_A + \frac{1}{2} \rho V_A^2 = P_B + \frac{1}{2} \rho (A/B)^2 V_A^2 \quad (3)$$

Il salto di pressione tra i punti A e B del venturimetro sarà quindi

$$P_A - P_B = \Delta P_{AB} = \Delta P = \frac{1}{2} \rho V_A^2 [(A/B)^2 - 1]$$

dalla quale:

$$V_A = \sqrt{\frac{2 \Delta P / \rho}{(A/B)^2 - 1}}.$$

Noto dal foglio di taratura del venturimetro il valore $\Delta P^\circ = 171.0224 \text{ mbar} \equiv 17102.24 \text{ Pa}$, ottenuto ad una pressione $P_0 = 3 \text{ bar}$, temperatura $T_0 = 20^\circ \text{C} = 293.15 \text{ K}$, si ricava:

$$V_A^\circ = \sqrt{\frac{2\Delta P^\circ / \rho^\circ}{(A/B)^2 - 1}} = \sqrt{\frac{2 \times 17102.24 / 3.567}{(0.009 / 0.00205)^2 - 1}} = 22.91 \text{ m/s}$$

(≈ 22.47 m/s di riferimento - c.v.d. "flow velocity pipe", Figura 2)

2) Portata volumetrica e massica nelle condizioni di taratura

Dati geometrici del tubo di Venturi usato per l'aria (Figura 2):

a) Sezione maggiore A

$$R = \frac{D}{2} = \frac{0.1071 \text{ m}}{2} = 0.05355 \text{ m} \quad A = \pi * R^2 \cong 0.009 \text{ m}^2$$

b) Sezione minore B

$$r = \frac{d}{2} = \frac{0.0510483 \text{ m}}{2} = 0.02552 \text{ m} \quad B = \pi * r^2 \cong 0.00205 \text{ m}^2$$

Condizioni di taratura (di seguito indicate con "°" oppure "_{TAR}") – (vedi *Calculation Sheet*, **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

posizione del Venturi	= orizzontale,
T° (=T _{TAR})	= 20 °C $\equiv$ 293.15 K
P° (=P _{TAR})	= 3 bar $\equiv$ 300000 Pa,
F° _M (=F _{TAR})	= 2600 kg/h,
V° _A	= 22.47 m/s (velocità del flusso nella sezione maggiore A)
V° _B	= 98.92 m/s (velocità del flusso nella sezione minore B)
$\Delta P^\circ_{AB} = \Delta P^\circ (= \Delta P_{TAR})$	= 171.0224 mbar $\equiv$ 17102.24 Pa $\approx$ 17.1 kPa

La densità dell'aria a *condizioni normali* (normal condition: T_{nc} = 0 °C $\equiv$ 273.15 K, P_{nc} = 1atm $\equiv$ 1.01325 bar) è:

$$\rho_{air\ nc} = \rho_{nc} = 1.293 \text{ kg/m}^3$$

La densità dell'aria alle *condizioni di riferimento*, ρ°_{air} , si ricava dalla legge di stato dei gas:

$$P/\rho = RT, \text{ da cui } \frac{P_{nc}/\rho_{nc}}{P^\circ/\rho^\circ} = \frac{RT_{nc}}{RT^\circ} \text{ segue che:}$$

$$\rho^\circ_{air} = \rho^\circ = \rho_{nc} \frac{T_{nc}}{T^\circ} \frac{P^\circ}{P_{nc}} = 3.567 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{nel rapporto tra pressioni scompare la necessità di conversione al S.I.})$$

per cui possiamo calcolare la portata volumetrica (sempre nelle condizioni di riferimento):

$$F^\circ_V = A V^\circ_A = 0.20223 \text{ m}^3/\text{s} \equiv 728 \text{ m}^3/\text{h} \text{ da cui}$$

$$F_M = F_V \cdot \rho = 2597 \text{ kg/h } (\approx 2600 \text{ kg/h di riferimento - c.v.d.})$$

3) Portata volumetrica e massica per condizioni diverse da quella di taratura

Partendo dalla (1) e dalla (2):

$$F_V = AV_A = A \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P/\rho}{(A/B)^2 - 1}} \quad \text{risulta comodo esprimere } F_V \text{ anche in altre forme, tra cui:}$$

$$F_V^2 = K \cdot \Delta P / \rho \quad (4)$$

dove K è una costante ovvia, relativa alla geometria del Venturi.

Per la condizione di taratura risulta anche:

$$F_V^{\circ 2} = K \cdot \Delta P^{\circ} / \rho^{\circ}$$

facendo quindi il rapporto membro a membro si ottiene:

$$F_V^2 / F_V^{\circ 2} = (\Delta P / \Delta P^{\circ}) \cdot (\rho^{\circ} / \rho)$$

ricordando che per l'Equazione di Stato dei Gas Perfetti

$$P / \rho = RT, \text{ si ricava } \rho = P / (RT) \quad (5)$$

e si ottiene quindi:

$$F_V^2 / F_V^{\circ 2} = (\Delta P / \Delta P^{\circ}) \cdot (P^{\circ} / P) \cdot (T / T^{\circ})$$

$$F_V = F_V^{\circ} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P / \Delta P^{\circ}}{\frac{T^{\circ} P}{T P^{\circ}}}}$$

Nota: nel caso di fluido incompressibile, i rapporti tra le densità si semplificano, e scompaiono i rapporti tra le T e le P, quindi il calcolo della portata volumetrica si riduce alla conoscenza delle condizioni di riferimento (F_V° , ΔP° di taratura) ed alla misura del ΔP .

La precedente viene data anche in queste altre forme:

$$F_V = \frac{F_V^{\circ}}{\sqrt{\frac{T^{\circ} P}{T P^{\circ}}}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{\Delta P^{\circ}}} = \frac{F_V^{\circ}}{\sqrt{\frac{\Delta P^{\circ} / \Delta P}{\frac{T P^{\circ}}{T^{\circ} P}}}}$$

Per il passaggio alla portata massica partendo dalla (4) si ricava:

$$\rho^2 F_v^2 = F_M^2 = \frac{\rho^2 \cdot K \cdot \Delta P}{\rho} = \rho \cdot K \cdot \Delta P$$

che considerando i valori di taratura risulta:

$$F_M^2 = \frac{\rho^{2^0} \cdot K \cdot \Delta P^0}{\rho^0} = \rho^0 \cdot K \cdot \Delta P^0$$

facendo il rapporto membro a membro tra le due relazioni precedente si ottiene:

$$F_M^2 / F_M^{2^0} = (\Delta P / \Delta P^0) \cdot (\rho / \rho^0)$$

Nota: è simile al rapporto tra le portate volumetriche, ma il rapporto tra le densità è invertito.

sostituendo a ρ la (5) e si ottiene:

$$F_M^2 / F_M^{2^0} = (\Delta P / \Delta P^0) \cdot (P / P^0) \cdot (T^0 / T)$$

dalla quale si ottiene la portata massica attuale:

$$F_M = F_M^0 \cdot \sqrt{\frac{P}{P^0} \cdot \frac{T^0}{T} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta P^0}} = \frac{F_M^0}{\sqrt{\frac{T \cdot P^0}{T^0 \cdot P}}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{\Delta P^0}} \quad (6)$$

Nota: è simile alla formula della portata volumetrica, ma i rapporti tra le pressioni e le temperature sono invertiti.

La (6) è formula corretta per il calcolo delle portate attualmente implementata sul PLC di controllo. Di seguito vengono fornite le tabelle per il calcolo delle singole portate. I valori di ΔP sono stati trasformati tutti in kPa, e sono disponibili nella pagina "TARATURE", per le portate di "aria primaria", "gas primario" e "gas pilota" ovvero per quelle portate misurate attraverso un venturimetro accoppiato ad un misuratore di DP, alla lettura a monte della temperatura T e pressione P del gas in questione.

Tabella 1: Tabelle per il calcolo delle tre portate FE201, FE101 ed FE102.

FE201 (aria primaria)	
F_{TAR}	2600 kg/h
T_{TAR}	293.15 K
P_{TAR}	3 bar/a
ΔP_{TAR}	17.10 kPa
ΔP_{max_trasd}	17.10 kPa
F^{ATT}	FE201 (calcolata)
T^{ATT}	TE202 (letta) + 273.15
P^{ATT}	PT201 "
ΔP^{ATT}	FT201 "

FE101 (gas primario)	
F_{TAR}	90 kg/h
T_{TAR}	293.15 K

P_{TAR}	3 bar/a
ΔP_{TAR}	12.91 kPa
ΔP_{max_trasd}	12.91 kPa
F^{ATT}	FE101 (calcolata)
T^{ATT}	TE101 (letta) + 273.15
P^{ATT}	PT101 "
ΔP^{ATT}	FT101 "

FE102 (gas pilota)

F_{TAR}	18 kg/h
T_{TAR}	293.15 K
P_{TAR}	3 bar/a
ΔP_{TAR}	9.04 kPa
ΔP_{max_trasd}	9.04 kPa
F^{ATT}	FE102 (calcolata)
T^{ATT}	TE101 (letta) + 273.15
P^{ATT}	PT101 "
ΔP^{ATT}	FT102 "

Per trovare il valore massimo della portata massica basta sostituire a ΔP il valore massimo ΔP_{max} di taratura del trasduttore di pressione collegato tra A e B:

$$F_{max} = \frac{F_{TAR}}{\sqrt{\frac{T^{ATT}}{T_{TAR}} \cdot \frac{P_{TAR}}{P^{ATT}}}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{max_trasd}}{\Delta P_{TAR}}}$$

2.1.4 Regolazione della portata massica

Va fatta una distinzione tra regolazione del SET-POINT nelle due modalità MANUALE ed AUTOMATICA. Quando si richiede la regolazione MANUALE, si imposta una percentuale (%) che si riferisce alla % di apertura della corsa della valvola (corsa espressa in mm e visibile sulla valvola di regolazione stessa, Figura 3). La relazione che lega la % corsa alla portata non è lineare.

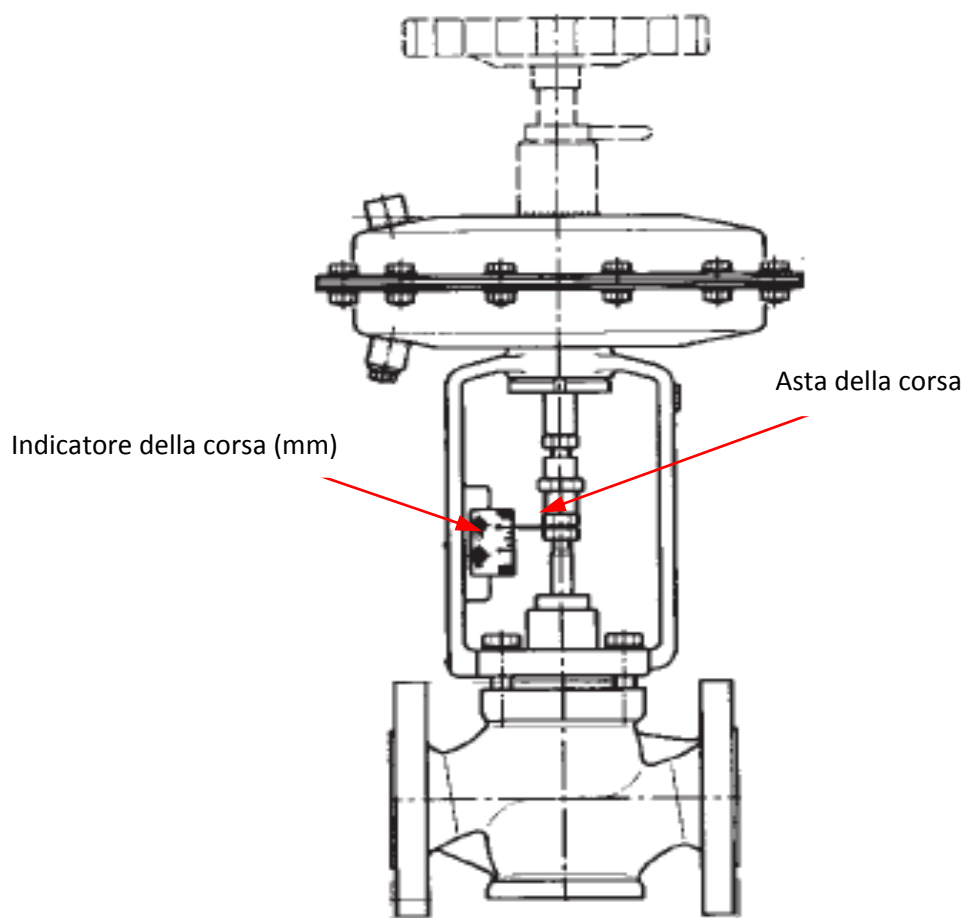


Figura 3: Valvola di regolazione.

Quando si richiede la regolazione AUTOMATICA, si imposta invece un valore che si riferisce alla portata desiderata espressa in kg/h, il SW di regolazione agisce fino a quando la portata di SET-POINT non viene raggiunta. Nel dettaglio, per la gestione delle valvole di regolazione (FCV201, FCV102 ed FCV102) per adeguamento ad un desiderato SET-POINT di portata massica, si è proceduto come di seguito descritto.

Sono noti (perché misurati o disponibili dalla documentazione) e quindi implementati nel SW di gestione:

- portata massica $F_M \equiv F_{TAR}$ (kg/h)
- portata massica attuale $F_M \equiv F^{ATT}$ (kg/h)
- portata massica di SET-POINT F^* (kg/h)
- pressione di taratura $P^\circ \equiv P_{TAR}$ (bar/a)
- pressione attuale $P \equiv P^{ATT}$ (bar/a)
- temperatura $T^\circ \equiv T_{TAR}$ (K)
- temperatura attuale $T^\circ \equiv T^{ATT}$ (K)
- pressione differenziale di taratura $\Delta P^\circ \equiv \Delta P_{TAR}$ (kPa)
- pressione differenziale attuale $\Delta P \equiv \Delta P^{ATT}$ (kPa)

- è nota ed implementata come parametro di input la **differenza di pressione massima** ΔP_{max_trasd} che può leggere il trasduttore di pressione collegato al Venturimetro (ossia il valore a cui corrispondere al valore in corrente di 20mA – essendo il segnale del trasduttore espresso nel range 4-20mA),

- è stato implementato il calcolo del valore della **portata massima** (F_{max}), conoscendo il ΔP_{max_trasd} :

$$F_{max} = \frac{F_{TAR}}{\sqrt{\frac{T^{ATT}}{T_{TAR}} \cdot \frac{P_{TAR}}{P^{ATT}}}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{max_trasd}}{\Delta P_{TAR}}}$$

A questo punto è possibile impostare il SET-POINT (F^*) della portata desiderata (in kg/h); a livello del SW implementato su PLC questo valore viene trasformato come % di F_{max} ; quando il valore F^{ATT} raggiunge F^* , cessa la regolazione della valvola.

2.1.5 Gestione del trasduttore di pressione del tubo di Venturi

Per quanto riguarda il trasduttore di pressione collegato al Tubo di Venturi si possono fare le seguenti affermazioni:

- 1) Dalla seguente relazione si ricava la differenza di pressione di set-point desiderata:

$$\frac{F^*}{F_{max}} = \frac{\sqrt{\Delta P^*}}{\sqrt{\Delta P_{max}}} \rightarrow \Delta P^* = \left(\frac{F^*}{F_{max}} \right)^2 \cdot \Delta P_{max}$$

- 2) Calcolo il valore ATTUALE della differenza di pressione (ΔP^{ATT}) dalla *legge di taratura* del trasduttore di pressione (che in uscita fornisce il valore di corrente I in mA):

$$I = m_{trasd_press} \cdot \Delta P^{ATT} + 4 \quad \rightarrow \quad \Delta P^{ATT} = \frac{I - 4}{m_{trasd_press}}$$

dove m_{trasd_press} è il valore del coefficiente angolare della retta di taratura, dato da:

$$m_{trasd_press} = \frac{\Delta I}{\Delta P_{\max_strumento}} = \frac{(20 - 4)}{\Delta P_{\max}} = \frac{16}{\Delta P_{\max}}$$

- Se impostiamo (sullo strumento e sulla pagina dei parametri di regolazione) un valore di fondo scala $\Delta P_{\max}=17.1$ kPa (quando è 20 mA) $\rightarrow m_{trasd_press}=0.936$
 $\rightarrow \Delta P^{ATT} = \frac{I - 4}{0.936}$
- Se impostiamo (sullo strumento e sulla pagina dei parametri di regolazione) un valore di fondo scala $\Delta P_{\max_strum}=130$ kPa (quando è 20 mA) $\rightarrow m_{trasd_press}=0.1231$
 $\rightarrow \Delta P^{ATT} = \frac{I - 4}{0.1231}$

3) Calcolo il valore ATTUALE (*Process Value*) della portata dalla seguente relazione:

$$F^{ATT} = \frac{F_{TAR}}{\sqrt{\frac{T^{ATT}}{T_{TAR}} \cdot \frac{P_{TAR}}{P^{ATT}}}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P^{ATT}}{\Delta P_{TAR}}}$$

2.1.6 Confronto sperimentale con le portate ottenute tramite Tubo ad U

È stata effettuata una sperimentazione mantenendo costante la pressione a monte al valore di 3 bar sul ramo dell'aria primaria FT201. Intercettando i due punti sul venturimetro per la misura del ΔP tra convergente e divergente, si è inserito un tubo ad U riempito di acqua e misurando quindi in mmH₂O la differenza in altezza delle colonne di acqua si è ricavato il ΔP_U .

Considerando l'Equazione di Stato dei gas, la densità nella sezione A_1 è:

$$\rho = \frac{T_{TAR}}{T} \frac{P}{P_{TAR}} \rho_{TAR}$$

e quindi la portata massica (in kg/h) calcolata in un tubo di Venturi, con flusso compressibile e fluido reale sarà:

$$F = \varepsilon C A_2 \sqrt{2 \Delta P_U \rho}$$

Nella Tabella 2 sono riportati i valori delle portate ottenute sperimentalmente mediante il Tubo ad U. Come risulta evidente dalla Figura 4 e Figura 5 i valori calcolati nei due diversi modi risultano praticamente identici, evidenziando la correttezza delle formule implementate nel SW di controllo e gestione dell'impianto COMET-HP.

Tabella 2: Tabella con le portate ottenute sperimentalmente tramite Tubo ad U e mantenendo una pressione a monte costante pari a 3 bar.

ϵ expansion factor 0.9858
 C orifice flow coefficient (=E*Cd) 1.0248
 A2 (area sezione inferiore) 0.0020 [m²]

NORMAL CONDITION

Sezione 1 (INGRESSO), condizione 0

P0 1013.25 [mbar] 101325 [Pa]
 T0 0.00 [°C] 273.15 [K]
 ρ_0 densità aria (P0, T0) 1.293 [kg/m³]

CONDIZIONI DI RIFERIMENTO di taratura

Sezione 1 (INGRESSO), condizione 1

P1 3.00 [bar] 300000 [Pa]
 T1 20.00 [°C] 293.15 [K]
 ρ_1 densità aria (P1, T1) 3.57 [kg/m³] (gas perfetti)

SPERIMENTALE con TUBO ad U		(da pannello)	(da pannello)	mbar=kPa*10			
Percentuale corsa otturatore [%]	T [°C] TE202	T [K]	P [bar/a] PT201	Densità sez. 1 [kg/m ³]	DP tubo U [mmH ₂ O]	DP tubo U [kPa] (FT201)	Portata [kg/h] calcolata
25	15	288.15	3	3.63	10	0.98	613.36
30	15	288.15	3	3.63	13	1.27	699.34
40	16	289.15	3	3.62	30	2.94	1060.53
50	16	289.15	3	3.62	70	6.86	1619.99
60	16	289.15	3	3.62	160	15.68	2449.19
70	16	289.15	3	3.62	370	36.25	3724.46

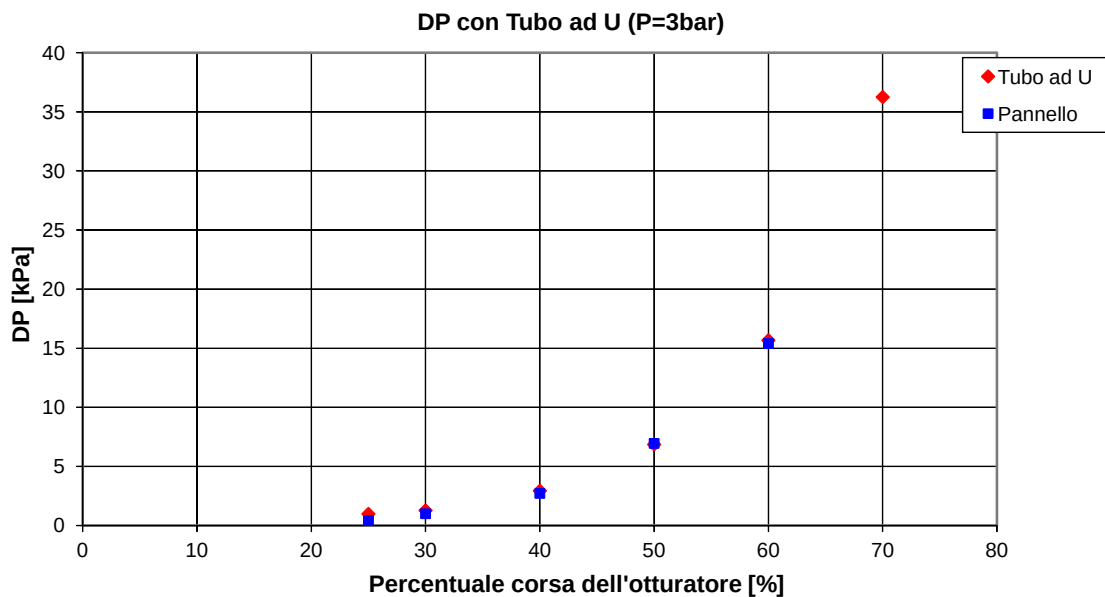


Figura 4: Confronto degli andamenti del DP ottenuti con il Tubo ad U e il trasduttore di pressione (da pannello).

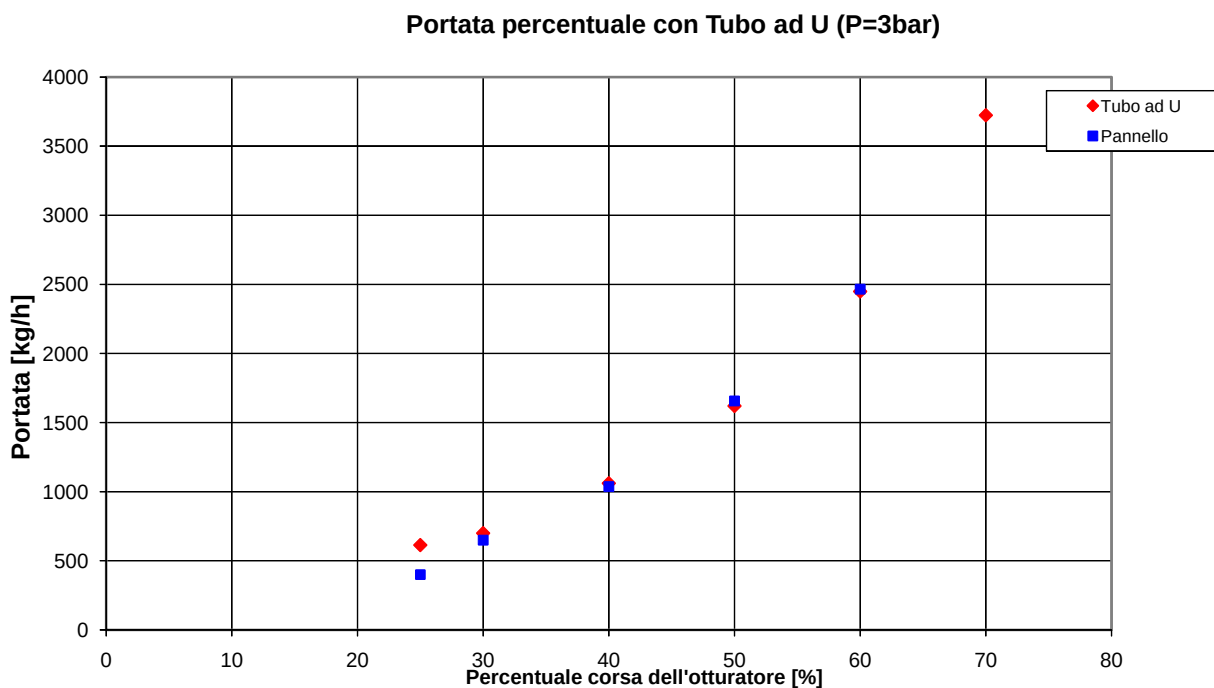


Figura 5: Confronto degli andamenti della portata massica ottenuta con il Tubo ad U e il trasduttore di pressione (da pannello).

2.1.7 Gestione dello zero nella modalità "AUTOMATICA"

Una importante modifica si è resa necessaria quando si richiede (con regolazione AUTOMATICA) un SET-POINT di 0 kg/h.

Problema riscontrato:

Il SW di regolazione agisce fino a quando la portata di SET-POINT non viene raggiunta, ma essendo il SET-POINT impostato a 0 kg/h succedeva che il valore misurato 0 kg/h veniva raggiunto chiudendo la valvola fino ad una %corsa $\neq 0$, quindi continuava a passare gas (aria o metano a seconda della linea di regolazione) ad un valore non rilevabile dalla sensoristica, ma di disturbo alla regolazione che non permette una corretta gestione della portata di aria necessaria nella condizione di accensione impianto. Va ricordato che nel caso dell'aria di combustione esistono due linee, una per portate basse (max 200kg/h – FE202 – ARIA SECONDARIA), essenzialmente impiegata nella fase di accensione dell'impianto (che non abbiamo preso in considerazione in questo aggiornamento in quanto gestita in modo differente da tutte le altre regolazioni aria e metano) e l'altra per portate superiori di esercizio (FE201 – ARIA PRIMARIA).

Soluzione adottata:

Si è intervenuti impostando la seguente logica (in AND):

- se la regolazione della portata è impostata su "AUTOMATICA",
 - se il SET-POINT è 0 kg/h,
 - se il valore misurato è 0 kg/h
- } allora chiudi la valvola, ossia la % della corsa viene forzata a 0

In questo modo viene raggiunto il SET-POINT desiderato con i tempi del PID di regolazione in quanto solo all'ultimo momento viene fatta una forzatura alla chiusura che viene raggiunta in modo repentino solo nell'ultima fase di regolazione.

2.1.8 Gestione dell'erronea chiusura delle valvole di intercettazione

Un altro problema affrontato e risolto è stato quello generato dalla erronea chiusura delle valvole ON/OFF di intercettazione nelle linee gas.

Problema riscontrato:

- se nelle linee gas non c'è flusso perché è chiusa erroneamente una valvola a monte o a valle (ad esempio la SV102 per il gas pilota o PV101 per il gas primario), l'impostazione di un qualsiasi SET-POINT > 0 (in regolazione AUTOMATICA della portata in kg/h) tende a far aprire la valvola (al limite fino al 100%), ma non passa flusso, cioè viene misurata una portata di 0 kg/h;
- l'eventuale successivo passaggio in modalità MANUALE mantiene (per la procedura implementata di inseguimento del SET-POINT e della %corsa di apertura nei passaggi AUTOMATICO $\leftrightarrow$ MANUALE – vedi paragrafo successivo) però la valvola aperta alla %corsa di apertura raggiunta in quel momento (diciamo X%);
- se si ripassa alla regolazione AUTOMATICA, impostando un SET-POINT = 0 kg/h, la valvola di regolazione "vede" che il flusso è già a 0 kg/h, e quindi non esegue alcuna azione di chiusura e rimane aperta a X%;
- a pannello l'OPERATORE vede una portata misurata ed un SET-POINT = 0 kg/h, e crede che la valvola sia chiusa (ossia che sia 0%corsa della valvola), ma non è così.

Soluzione adottata:

Per esigenze di sicurezza (nelle linee METANO) la soluzione proposta ed adottata risponde alle seguenti regole:

- FCV102 "gas pilota" (nella modalità AUTOMATICA) **deve forzare a 0%** la corsa della valvola e **NON tenere conto del SET-POINT** di portata (kg/h) impostato finché sono chiuse (SV102 AND SV103);
- FCV101 "gas primario" (nella modalità AUTOMATICA) **deve forzare a 0%** la corsa della valvola e **NON tenere conto del SET-POINT** di portata (kg/h) impostato finché sono chiuse (PV101 AND PV102).

2.1.9 Inseguimento delle portate nel cambio AUTOMATICO - MANUALE

Il passaggio dalla modalità AUTOMATICA a quella MANUALE veniva effettuato senza tener conto della situazione di portata attuale. Ad esempio passando dalla modalità AUTOMATICA a quella MANUALE, se si volevano evitare brusche variazioni di portata era compito dell'operatore impostare il SET-POINT di % ("..... RIFERIMENTO PORTATA IN MANUALE") al valore corrente di % di apertura che, tra l'altro, non era presente come indicazione sulla pagina di regolazione precedente a queste modifiche (vedi Figura 6 e par. 2.2.5 Interfaccia Operatore), rendendo quindi praticamente impossibile questo passaggio di modalità in modo indolore.

FCV201 - REGOLAZIONE PORTATA ARIA COMBURENTE			
FCI201 RIFERIMENTO PORTATA IN MANUALE	:	0	%
FCI201 RIFERIMENTO PORTATA IN AUTOMATICO	:	0	Kg/h
PROPORZIONALE	:	0,00	%
INTEGRALE	:	0	Sec
DERIVATIVO	:	0	Sec
PSI201 ALLARME PORTATA BASSA	:	0	Kg/h
PSI201 ALLARME PORTATA ALTA	:	0	Kg/h
FFRC 101/201 RAPPORTO MINIMO PORTATA ARIA/METANO	:	0	
FE201 PORTATA ATTUALE	:	0	Kg/h
TE202 TEMPERATURA	:	0	°C
PT201 PRESSIONE	:	0,00	Bar/a
FT201 PRESSIONE DIFFERENZIALE	:	0,00	mbar
MODALITA'	:	AUTOMATICO	

Figura 6: Pagine di regolazione della portata dell'aria comburente.

È stata quindi implementata una gestione del cambio di modalità che imposta automaticamente il corretto valore di % corsa o kg/h a seconda che si passi da AUTOMATICO a MANUALE o viceversa. Come descritto successivamente, sono state anche riformattate le pagine di regolazione modificando anche alcune voci, con l'intento di renderle più chiare, ed aggiungendone delle altre, sia di impostazione che di lettura.

2.2 ALTRE MODIFICHE SW

Oltre ad alcuni aggiustamenti sul sinottico dell'impianto (sistemazione di alcuni testi e linee di flusso), sono state effettuate una serie di modifiche di seguito descritte.

2.2.1 Rilevamento fiamma

Si è richiesto che il "RILEVAMENTO FIAMMA CON FOTODIODO" sia sempre attivo, quindi il relativo tasto è stato trasformato in "RILEVAMENTO FIAMMA CON TERMOCOPPIA" (Figura 7), con le seguenti proprietà:

- nasce ON,
- si può settare OFF prima dell'accensione,
- in fase di accensione non può essere modificato lo stato,
- se messo ad OFF e l'impianto si arresta, viene rimesso automaticamente ad ON.

In questo modo esiste sempre la sicurezza del rilevamento fiamma con il fotodiodo, la cui gestione è stata inserita direttamente nel codice ed è sempre attiva. Come ulteriore misura di sicurezza è stato lasciato il rilevamento fiamma con termocoppia, eventualmente disattivabile dall'operatore.

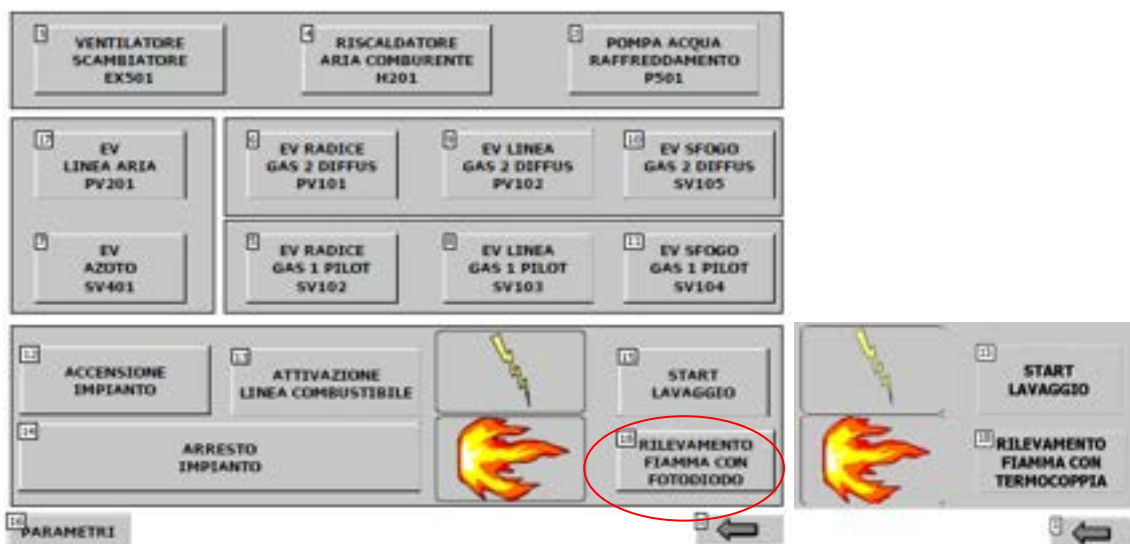


Figura 7: Pannello UTENZE e trasformazione del pulsante di rilevamento fiamma.

2.2.2 Accensione Impianto

Sono stati controllati e corretti tutti gli interblocchi dell'apertura della linea metano pilota FCV102 che impedivano l' "ACCENSIONE IMPIANTO" nella modalità "AUTOMATICA", cioè rispondente ad una determinata sequenza (Figura 8).

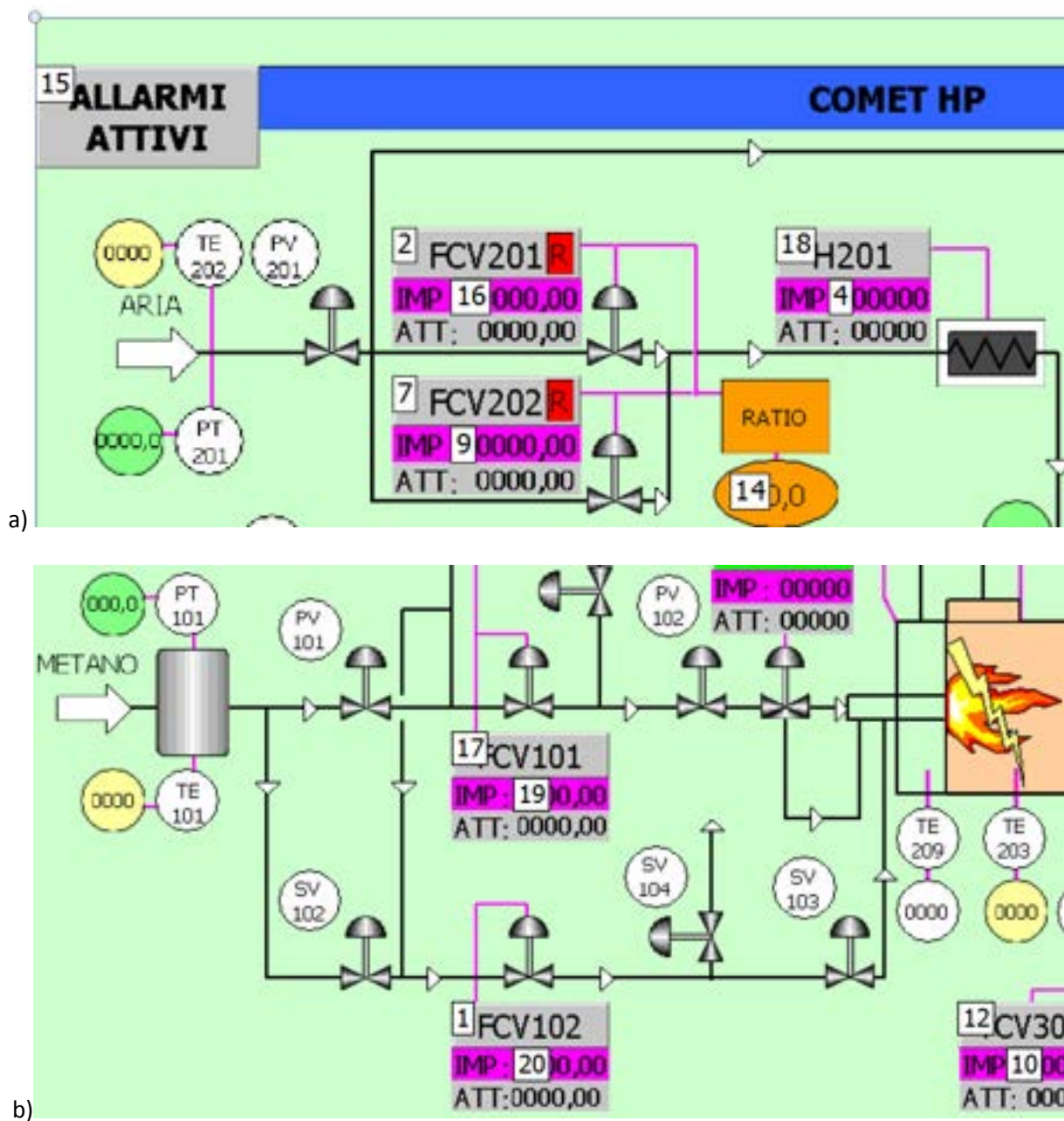


Figura 8: Particolari del sinottico COMET con la linea dell'aria primaria e pilota (a), e con la linea metano primario e pilota (b).

Problema riscontrato:

Nella situazione precedente alle modifiche, l' "ACCENSIONE IMPIANTO" (con FCV102 gestita in AUTOMATICO) non funzionava. Si avviava la scarica elettrica, l'aria **secondaria** FCV202 si allineava al SET-POINT impostato (portata in kg/h), cosa che doveva fare anche la linea "gas pilota" (FCV102), ma ciò NON avveniva. C'era una forzatura a tenerla chiusa. Il SET-POINT del gas pilota FCV102 si sbloccava solo quando veniva attivata la "LINEA COMBUSTIBILE" da "PANNELLO UTENZE". Il SET-POINT di FCV102 veniva probabilmente bloccato o dalla PV101 o dalla PV102, che si aprono attivando la "LINEA COMBUSTIBILE". L' "ACCENSIONE IMPIANTO" non era quindi ancora possibile effettuarla in AUTOMATICO. Abbiamo ribadito allo sviluppatore la necessità di controllare i due regolatori di portata gas (FCV101 e FCV102 – che sembrano erroneamente collegati) lasciando l'inibizione dei rispettivi SET-POINT (valvola allo 0%) fino

all'apertura delle rispettive valvole on/off e cioè la **PV101** per il "gas primario" FCV101 e l'**SV102** per il "gas pilota" FCV102.

Soluzione adottata:

La logica da seguire è stata quindi riscritta secondo nostra proposta. L' "ACCENSIONE IMPIANTO" (dal "PANNELLO UTENZE") deve effettuare le seguenti operazioni in sequenza:

1. far partire lo **scintillatore**,
2. aprire **SV102** e **SV103**,
3. adeguare la linea gas pilota **FCV102** al **valore di SP** (in kg/h) impostato

A questo punto è stato possibile eseguire "ACCENSIONE IMPIANTO" in automatico.

2.2.3 Procedura di lavaggio

Il lavaggio delle "linee gas" apre al 50% le valvole di regolazione, ma a fine lavaggio queste rimanevano al 50%, richiedendo l'intervento dell'operatore per portarle in chiusura. È stato richiesto che a fine lavaggio le valvole vengano rimesse (forzate) a 0%.

2.2.4 Parametri bruciatore

Per quanto riguarda la "**TEMPERATURA MASSIMA DI ACCENSIONE**" in "**TS201 – PARAMETRI BRUCIATORE**", è stata richiesta l'abilitazione controllando più termocoppie (**TE203, TE207A, TE207B** e **TE205**), ossia nessuna delle temperature rilevate da queste termocoppie deve superare il valore impostato per permettere l'accensione dell'impianto, al fine di evitare indesiderate deflagrazioni.

TS201 - PARAMETRI BRUCIATORE			
TE207B DIFFERENZA DI TEMPERATURA PER RILEVARE PRESENZA FIAMMA	:	3 000000	°C
RITARDO CONTROLLO PRESENZA FIAMMA	:	2 000,000	Sec
TE207B DIFFERENZA DI TEMPERATURA PER RILEVARE ASSENZA FIAMMA	:	4 000000	°C
TEMPO RINFRESCO TEMPERATURA PICCO	:	9 000,000	Sec
TEMPO ATTIVAZIONE SCINTILLATORE	:	8 000,000	Sec
TE208 TEMPERATURA MASSIMA GUARNIZIONI	:	5 000000	°C
TE209 TEMPERATURA MASSIMA CAMERA ARIA	:	5 000000	°C
TE204 TEMPERATURA MASSIMA PARETE	:	7 000000	°C
TEMPERATURA MASSIMA ACCENSIONE (TE203, TE207A, TE207B, TE205)	:	10 000000	°C
TE207A TEMPERATURA ATTUALE GAS COMBUSTO	:	00000	°C
TE207B TEMPERATURA ATTUALE GAS COMBUSTO	:	00000	°C
TE207AB TEMPERATURA PICCO GAS COMBUSTO	:	00000	°C
SOGLIA TEMPERATURA FIAMMA PRESENTE	:	00000	°C
SOGLIA TEMPERATURA FIAMMA ASSENTE	:	00000	°C




Figura 9: Pagina di regolazione dei "PARAMETRI BRUCIATORE".

2.2.5 Interfaccia Operatore

Sono state riformattate le pagine dei regolatori FCV201, FCV101, FCV102, che erano formattate come segue (Figura 10):

FCV201 - REGOLAZIONE PORTATA ARIA COMBURENTE			
FCI201 RIFERIMENTO PORTATA IN MANUALE	:	0	%h
FCI201 RIFERIMENTO PORTATA IN AUTOMATICO	:	0	Kg/h
PROPORZIONALE	:	0,00	%h
INTEGRALE	:	0	Sec
DERIVATIVO	:	0	Sec
FSL201 ALLARME PORTATA BASSA	:	0	Kg/h
FSH201 ALLARME PORTATA ALTA	:	0	Kg/h
FFRC 101/201 RAPPORTO MINIMO PORTATA ARIA/METANO	:	0	
FE201 PORTATA ATTUALE	:	0	Kg/h
TE202 TEMPERATURA	:	0	°C
PT201 PRESSIONE	:	0,00	Bar/a
FT201 PRESSIONE DIFFERENZIALE	:	0,00	mbar
MODALITA'	:	AUTOMATICO	

Figura 10: "PAGINA DI REGOLAZIONE PORTATA" prima delle modifiche.

e sono state formattate come segue (Figura 11):

FCV201 - REGOLAZIONE PORTATA ARIA COMBURENTE			
MODALITA'	:	OFF	
FCI201 RIFERIMENTO APERTURA VALVOLA IN MANUALE	:	5 000000	% corsa
FCI201 RIFERIMENTO PORTATA IN AUTOMATICO	:	2 000000	kg/h
ALLARME PORTATA FSL BASSA	:	3 000000	Kg/h
FSH ALTA	:	4 000000	Kg/h
FCV201 RIFERIMENTO APERTURA VALVOLA	:	000	% corsa
FE201 PORTATA ATTUALE	:	000000	kg/h
TE202 TEMPERATURA	:	00000	°C
PT201 PRESSIONE	:	0000,00	bar/a
FT201 PRESSIONE DIFFERENZIALE	:	0000,00	kPa
FT201 CORRENTE TRASDUTTORE DI PRESSIONE DIFFERENZIALE	:	00,00	mA

TARATURE

Figura 11: "PAGINA DI REGOLAZIONE PORTATA" dopo le modifiche.

E' importante notare che:

- tutte le impostazioni sono su sfondo viola e poste nella parte superiore del pannello (compresa quindi anche la "MODALITA'" di regolazione – che è stata posta nella prima riga),
- "... RIFERIMENTO PORTATA IN MANUALE"[%] è diventato "... RIFERIMENTO APERTURA VALVOLA IN MANUALE" [% corsa],
- le impostazioni del PID sono state spostate su un nuovo pannello (Figura 12) a cui si accede tramite il pulsante "TARATURE" in cui sono stati aggiunti i parametri di taratura per il calcolo delle portata, aumentando il grado di libertà del sistema nel caso di sostituzione con misuratori diversi.

FCV201 - REGOLAZIONE PORTATA ARIA COMBURENTE		
P. :	2 0000,00 %	I. :
		3 000000 Sec
		D. :
		4 000000 Sec
FCV201 - TARATURE PORTATA ARIA COMBURENTE		
TEMPERATURA	5 0000,00	K
PORTATA	6 0000,00	kg/h
PRESSIONE	7 0000,00	bar/a
PRESSIONE DIFFERENZIALE	8 0000,00	kPa

Figura 12: Pagina PID e parametri di taratura del venturimetro.

- tutte le letture sono su sfondo grigio e sono state uniformate le unità di misura in tutte le pagine di regolazione,
- sono state aggiunte nuove letture ("..... RIFERIMENTO APERTURA VALVOLA" [%corsa], "..... CORRENTE TRASDUTTORE DI PRESSIONE DIFFERENZIALE" [mA]),

Ulteriori informazioni sull'interfaccia operatore, sui parametri di regolazione PID etc., verranno descritti e riportati in un aggiornamento del "*Manuale Operativo impianto COMET*".

2.2.6 Gestione tastierino numerico "Input Panel"

La dimensione del tastierino numerico si può impostare dal sistema operativo "*Windows CE*" come segue:

- si va sulla pagina iniziale dell'applicazione di gestione IDEA E COMET (Figura 13):



Figura 13: Pagina iniziale dell'applicazione di IDEA e COMET.

- si seleziona SERVICE
- in seguito TERMINA RUNTIME (Figura 14)



Figura 14: Pagina "SERVICE" del SIMATIC MULTIPANEL.

- poi si seleziona MYCOMPUTER → CONTROL PANEL → INPUT PANEL

2.3 AGGIORNAMENTI IMPIANTISTICI

2.3.1 Regolatori/stabilizzatori di pressione

Il gas metano di alimentazione all'impianto è fornito dalla rete di Centro ENEA Casaccia ad una pressione di circa 7 bar, mentre l'aria comburente viene prodotta da un gruppo compressori costituito da tre macchine capaci di produrre circa 700 Nm³/h di aria alla pressione di circa 7 bar.

Al fine di regolare e stabilizzare le portate del gas metano e dell'aria si è reso necessario installare sulle relative linee due riduttori di pressione in grado di regolare da 1 a 7 bar le pressioni di cui sopra.

2.3.2 Messa in pressione della camera di combustione

La strozzatura (o laminazione) dei fumi per realizzare le diverse condizioni operative di interesse per la sperimentazione viene effettuata mediante un orifizio (flangia, [3]) che realizza un efflusso critico, ossia una condizione di choking (che si realizza se il rapporto tra le pressioni supera il valore di 0.52828) e quindi di onda d'urto nella gola a causa dell'elevato ΔP . La soluzione è stata preferita al posto di una valvola di regolazione per ragioni di costo e per l'affidabilità del componente. Per contro, questa soluzione impone alcune limitazioni sulle condizioni sperimentali. In particolare, data la dimensione dell'orifizio, si stabilisce un legame tra portata, temperatura e pressione nella sezione di prova.

Al fine di rendere più flessibile l'esercizio dell'impianto si è previsto di ([3], [4]):

1. realizzare una sezione di laminazione componibile in modo da consentire di inserire diversi orifizi con diversi diametri (35, 47, 72 mm) in corrispondenza dei tre livelli di pressione:
 - 1 MPa = 10 bar
 - 0.5 MPa = 5 bar
 - 0.2 MPa = 2 bar
2. consentire il funzionamento a pressione atmosferica (0.1 MPa) rimuovendo completamente la sezione di strozzatura (o laminazione). In questo caso la regolazione viene realizzata mediante una valvola a farfalla.

Per la sostituzione di un orifizio occorre scollegare i due raccordi dell'acqua di attemperamento, smontare la flangia raffreddata [4], vedi disegno di insieme, togliere il disco di materiale isolante, sfilare l'orifizio, montarne uno di diametro più piccolo per eseguire prove a pressione maggiore, o più grande per pressioni inferiori e poi rimontare il disco isolante, la flangia raffreddata e collegare l'acqua di attemperamento.

3 Conclusioni

Dopo le importanti modifiche effettuate circa la misura delle portate di combustibile e di aria comburente si è reso il valore di tale portate indipendente dalla pressione a monte, e si è poi predisposta la camera di combustione dell'impianto COMET per poter operare in pressione.

4 Riferimenti bibliografici

- [1] Bruschi R., Cassani S., Giulietti E., Nobili M., Pagliari, L., Stringola C., "Raccolta, digitalizzazione, revisione dei documenti di riferimento degli impianti IDEA e COMET-HP", Rapporto Tecnico, Classificazione UTTEI-COMSO, COMSO/2010/020/ER, 11/11/2010.
- [2] Nobili M., Stringola C., Giulietti E., "Predisposizione del database delle variabili dell'impianto COMET per l'accesso da Client OPC", Rapporto Tecnico, Classificazione UTTEI-COMSO, COMSO/2011/001/EL, 21/02/2011.
- [3] SACME S.p.a., "Impianto COMET HP - Specifica funzionale di impianto", sigla documento 9029-ST01.1, pag. 19, 14/07/2003.
- [4] SACME S.p.a., "Impianto COMET - Specifica di esercizio", sigla documento IT9029.00.00, pag. 5, 05/06/2008.