

Compressore alternativo K-201 — Principi di funzionamento

Documento per lo studente · simulatore di unità e sistema di controllo UCP U1

Indice

Come leggere questo documento	2
1 · La macchina e il servizio	3
1.1 Perché un compressore alternativo	3
1.2 Com'è fatta	3
1.3 Perché due stadi	3
1.4 Efficienza volumetrica: perché la portata cala quando il rapporto sale	3
1.5 Nota per lo studente — che cosa il modello semplifica	3
2 · Modi di funzionamento e selettore U1-HJS-324	4
2.1 Perché un selettore di funzionamento	4
2.2 Le quattro posizioni	4
2.3 Perché portare il selettore fuori da AL/AD fa scattare l'unità	4
2.4 Nota per lo studente — che cosa il modello semplifica	4
3 · Percorso del gas e valvole di configurazione	4
3.1 Perché serie o parallelo	4
3.2 Le valvole che decidono la configurazione	5
3.3 Perché si equalizza prima di aprire	5
3.4 Ingresso, uscita e depressurizzazione	5
3.5 La sequenza di configurazione	6
3.6 A macchina ferma il gas trova comunque una strada	6
3.7 Nota per lo studente — che cosa il modello semplifica	6
4 · Sequenze: avviamento, arresto, post-lubrificazione	6
4.1 Perché una sequenza e non un pulsante di marcia	6
4.2 La sequenza di avviamento	6
4.3 Perché gli override	7
4.4 L'arresto normale	7
4.5 Perché si equalizza all'arresto	8
4.6 Perché la post-lubrificazione	8
4.7 Nota per lo studente — che cosa il modello semplifica	8
5 · Permissivi e operazioni preliminari	8
5.1 Perché i permissivi	8
5.2 L'elenco	8
5.3 Perché ciascuno	9
5.4 Le operazioni preliminari di campo	9
5.5 Nota per lo studente — che cosa il modello semplifica	9
6 · Controllo di capacità	9
6.1 Perché regolare la capacità	9

6.2 Come si toglie capacità a un cilindro	10
6.3 Perché il 2° stadio si regola separatamente in serie	10
6.4 Perché a volte la capacità non sale oltre il 75 %	10
6.5 Perché i gradini al 25 % si alternano	10
6.6 Velocità e limite di potenza	10
6.7 Nota per lo studente — che cosa il modello semplifica	11
7 · Protezioni: allarmi, blocchi, PSD2 e PSD0	11
7.1 Perché due livelli	11
7.2 Le soglie di processo	11
7.3 Le soglie indipendenti dal modo	11
7.4 PSD2 e PSD0: perché due arresti di emergenza	12
7.5 Il registro allarmi (ISA-18.2)	12
7.6 Perché la soglia di static pack	12
7.7 Nota per lo studente — che cosa il modello semplifica	12
8 · Monitoraggio macchina (API 670)	12
8.1 Perché si misurano vibrazione e rod drop	12
8.2 I punti misurati	13
8.3 Valori tipici misurati	13
8.4 Nota per lo studente — che cosa il modello semplifica	13
9 · Ausiliari: olio, acqua temperata, ventilatori	13
9.1 Olio di lubrificazione del telaio	13
Perché	13
Come è fatto	13
Perché due pompe	14
Perché il riscaldatore	14
Perché il ΔP dei filtri è solo una segnalazione	14
9.2 Acqua temperata	14
Perché «temperata» e non fredda	14
Come è fatto	14
9.3 Ventilatori dei refrigeranti del gas	14
Perché a gradini	14
Perché i ritardi sono asimmetrici	15
9.4 Nota per lo studente — che cosa il modello semplifica	15
10 · Appendice: grandezze principali misurate nel simulatore	15

Come leggere questo documento

Il documento accompagna il simulatore del compressore alternativo K-201. Ogni capitolo tratta un sottosistema e segue lo stesso ordine: **perché esiste**, come è fatto, come lo governa la logica di controllo, con quali soglie è protetto. Chiude ogni capitolo una nota su che cosa il modello semplifica.

Tutti i numeri citati sono quelli del simulatore. Quando un valore è indicato come *misurato* viene da una prova sul modello in marcia e può variare di qualche unità con le condizioni di rete.

I **tag strumentali** (U1-PIT-004, U2-PALL-300, U4-SV-300 ...) restano identici in ogni lingua: sono il nome dello strumento in campo, non una descrizione. Il prefisso indica il sistema: **U1** gas di processo e unità, **U2** olio di lubrificazione, **U3** acqua temperata, **U4** elettrovalvole di capacità. **K-201** è il compressore, **KM-201** il suo motore.

Nel pannello ogni finestra con un pulsante **?** apre la sintesi del capitolo che la riguarda.

1 · La macchina e il servizio

1.1 Perché un compressore alternativo

Il gas arriva dalla rete di aspirazione a $34 \div 79$ bar A e va spinto in un collettore di iniezione che lavora fino a oltre 230 bar A. Servono rapporti di compressione alti e portate relativamente modeste, con pressioni di aspirazione e di mandata che cambiano nel tempo: è il campo del compressore **alternativo**. Il volume spostato a ogni giro è fisso, quindi la portata dipende poco dalla pressione di mandata, e la macchina regge rapporti elevati con un buon rendimento. Il prezzo è una macchina che non tollera liquido, vibra, consuma fasce e valvole, e richiede molti ausiliari.

1.2 Com'è fatta

Voce	Valore
Stadi	2 · quattro cilindri a doppio effetto
1° stadio	cilindri 2 e 4 · $0,078 \text{ m}^3$ generati per giro
2° stadio	cilindri 1 e 3 · $0,042 \text{ m}^3$ generati per giro
Spazio nocivo	11 % del volume generato
Motore	KM-201 · 3700 kW su VSDS (azionamento a velocità variabile)
Velocità	$310 \div 420$ rpm
Potenza assorbita massima	3,36 MW (limite della logica)
Aspirazione 1° stadio	$34 \div 79$ bar A · 15°C
Mandata 2° stadio	$91 \div 234$ bar A · $30 \div 150^\circ\text{C}$

Ogni stadio ha polmoni di aspirazione e di mandata (smorzano le pulsazioni del flusso) e un refrigerante ad aria dopo la mandata. I cilindri sono raffreddati ad acqua temperata; il telaio e i cuscinetti sono lubrificati a olio; i cilindri hanno un lubrificatore dedicato.

1.3 Perché due stadi

Comprimere un gas lo scalda. La temperatura di mandata cresce con il rapporto di compressione: con un solo stadio, da 55 a 150 bar, il gas uscirebbe troppo caldo per l'olio dei cilindri e per le valvole. Dividendo la compressione in due stadi con un refrigerante in mezzo, ciascuno lavora con un rapporto minore, la temperatura resta entro i limiti e il lavoro complessivo cala, perché il gas raffreddato occupa meno volume.

1.4 Efficienza volumetrica: perché la portata cala quando il rapporto sale

A fine mandata resta nel cilindro il gas dello spazio nocivo, alla pressione di mandata. Nella corsa di ritorno questo gas si riespande e occupa parte del volume prima che le valvole di aspirazione si aprano. Più alto il rapporto di compressione, più volume va perso nella riespansione. Il simulatore calcola l'efficienza volumetrica di ogni stadio a ogni scansione:

$$\eta_v = 1 - 0,11 \cdot (r^{1/1,30} - 1) - 0,03$$

con r rapporto di compressione dello stadio e 1,30 esponente della politropica. Da η_v , velocità e gradino di capacità esce la portata aspirata; dalla portata e dal rapporto escono potenza e temperatura di mandata. È per questo che, a parità di velocità, la macchina aspira meno quando la mandata sale.

1.5 Nota per lo studente — che cosa il modello semplifica

- Il gas è un gas ideale corretto con un fattore di comprimibilità costante ($Z = 0,87$).
- Ogni tratto di linea è un volume concentrato: aspirazione, mandata 1°, aspirazione 2°, mandata finale. Non ci sono pulsazioni né onde di pressione.

- I due cilindri di uno stadio sono calcolati insieme; il ciclo del singolo pistone serve solo all'animazione del sinottico.

2 · Modi di funzionamento e selettore U1-HJS-324

2.1 Perché un selettore di funzionamento

La stessa unità deve poter essere provata in campo, messa fuori servizio per manutenzione e governata in automatico dal quadro locale o dalla sala controllo. Se queste possibilità convivessero senza un selettore, un operatore in campo potrebbe manovrare una valvola mentre la logica la sta comandando. Il selettore stabilisce **chi comanda**, una sola sorgente alla volta.

2.2 Le quattro posizioni

Posizione	Chi comanda	Che cosa si può fare
HS	nessuno	unità fuori servizio: comandi di sequenza inibiti
MAN	l'operatore	prova manuale di valvole e ausiliari; avviamento del compressore inibito
AL	la logica, da quadro locale	sequenze automatiche; capacità inseguita su U1-FIT-109A
AD	la logica, da sala controllo	sequenze automatiche; capacità inseguita su U1-FY-109A

In AL e AD i comandi manuali delle valvole di processo sono inibiti: la logica le comanda e non ammette interferenze. Le valvole **manuali** (MV-103, MV-303, HV-104, HV-304, HV-312) restano manovrabili dal sinottico in qualunque posizione, perché in campo sono volantini, non attuatori.

2.3 Perché portare il selettore fuori da AL/AD fa scattare l'unità

Con il compressore in marcia o in avviamento, un selettore che esce da AL o AD toglie la sorgente che governa capacità e velocità. La logica non lascia girare una macchina senza controllo: interviene il blocco **SELPOS** (U1-HJS-324) e l'unità va in PSD2.

2.4 Nota per lo studente — che cosa il modello semplifica

Il selettore del simulatore è un comando a video. In campo è un selettore a chiave: la logica è la stessa, cambia solo chi può girarlo.

3 · Percorso del gas e valvole di configurazione

3.1 Perché serie o parallelo

La pressione del collettore di iniezione, letta da **U1-PIT-308**, cambia nel tempo.

- Con iniezione **alta** serve tutto il rapporto dei due stadi: il 1° stadio manda nel 2°, che manda al collettore. È il modo **DOUBLE · serie**.
- Con iniezione **bassa** un solo stadio basta a raggiungerla: conviene far lavorare i due stadi affiancati, ciascuno dalla rete al collettore, e raddoppiare quasi la portata. È il modo **SINGLE · parallelo**.

Scegliere il modo sbagliato ha conseguenze precise: in serie con iniezione bassa i due stadi si dividono un rapporto piccolo e la portata è sprecata; in parallelo con iniezione alta un solo stadio dovrebbe fare un rapporto che lo porterebbe oltre le temperature ammesse.

Modo	AmMESSO con U1-PIT-308
DOUBLE · serie	> 134 bar g
SINGLE · parallelo	< 139 bar g

Fra 134 e 139 bar g sono ammessi entrambi: la fascia di sovrapposizione evita che la scelta cambi avanti e indietro per piccole oscillazioni della pressione. Una selezione non coerente con PIT-308 fa comparire l'allarme **MODE** (U1-HS-325) e, a unità ferma, toglie un permissivo di avviamento.

3.2 Le valvole che decidono la configurazione

Valvola	Sigla	Collega	Serie	Parallelo
U1-MV-210	VSP1	mandata 1° → collettore	chiusa	aperta
U1-MV-220	VSP2	mandata 1° → aspirazione 2°	aperta	chiusa
U1-MV-230	VSP3	aspirazione 1° → aspirazione 2°	chiusa	aperta

Ogni valvola di configurazione ha una piccola valvola di **equalizzazione** in parallelo (MV-211, MV-221, MV-231).

3.3 Perché si equalizza prima di aprire

Una valvola di linea grande che si apre con molti bar di differenza fra monte e valle subisce un colpo: il gas passa a velocità altissima attraverso una luce minima, erode le tenute e manda un'onda di pressione nella linea. Per questo la logica apre prima la valvola piccola di equalizzazione, aspetta che la differenza di pressione scenda sotto **2 bar** (letta dai PDIT-214/224/234), e solo allora apre la valvola grande. Lo stesso principio vale per le valvole d'ingresso e d'uscita (3.4).

3.4 Ingresso, uscita e depressurizzazione

Valvola	Sigla	Funzione	Comando
U1-MV-103	VAM	intercetto manuale di aspirazione	manuale
U1-MV-102 / MV-101	VPA / VA	pressurizzazione e intercetto di aspirazione	logica
U1-MV-302 / MV-301	VPR / VR	pressurizzazione e intercetto di mandata	logica
U1-MV-303	VPM	intercetto manuale di mandata	manuale
U1-BDV-311	—	depressurizzazione verso il blowdown	logica (PSD0)
U1-HV-304	—	intercetto manuale a valle di BDV-311	manuale
U1-HV-104 / HV-312	—	sfiati manuali di aspirazione e di mandata	manuale
U1-XV-325	—	sfiato della linea static pack	logica

Le valvole manuali sono in campo e **non** sono governate dalla logica: la loro posizione è un permissivo (VAM e VPM aperte, HV-104 e HV-312 chiuse, HV-304 aperta). Un errore tipico è lasciare HV-304 chiusa dopo una manutenzione: la depressurizzazione di emergenza apre BDV-311 ma il gas non ha dove andare (capitolo 7).

3.5 La sequenza di configurazione

Con il selettore in AL o AD, il pulsante **Start configurazione valvole** porta l'unità nel modo scelto e congela la selezione finché l'unità non torna ferma.

Passo	Serie (DOUBLE)	Parallelo (SINGLE)
1	apre MV-221	apre MV-211 e MV-231
2	con $\Delta P < 2$ bar apre MV-220	con $\Delta P < 2$ bar apre MV-210 e MV-230
3	chiude MV-210 e MV-230	chiude MV-220
4	chiude le equalizzazioni	chiude le equalizzazioni

A configurazione completata l'unità passa in **PRONTO**.

3.6 A macchina ferma il gas trova comunque una strada

Le valvole automatiche dei cilindri non sono comandate: si aprono quando la pressione dietro di loro supera quella davanti. A macchina ferma, se l'aspirazione è più alta della mandata, le valvole di mandata dei cilindri si aprono da sole e il gas attraversa lo stadio. È per questa via che il blowdown, collegato alla sola mandata, svuota anche il lato aspirazione.

3.7 Nota per lo studente — che cosa il modello semplifica

Le valvole di linea hanno un tempo di corsa fisso (6 s le grandi, 4 s le equalizzazioni, 3 s BDV-311 e le manuali, 2 s XV-325) e una portata proporzionale alla radice della differenza di pressione: nessuna curva caratteristica.

4 · Sequenze: avviamento, arresto, post-lubrificazione

4.1 Perché una sequenza e non un pulsante di marcia

Un compressore alternativo pressurizzato non si avvia come una pompa. Prima di dare coppia servono gas alla pressione giusta nei cilindri, olio in pressione sui cuscinetti, acqua ai cilindri, ventilatori pronti, e una macchina **scarica**: tutte le estremità dei cilindri devono essere a vuoto, altrimenti il motore dovrebbe spingere a pieno carico da fermo. La sequenza mette in fila questi passi, controlla che ciascuno sia riuscito e blocca l'unità se uno non riesce nel tempo previsto.

4.2 La sequenza di avviamento

Il pannello mostra 14 passi. I tempi sono in secondi di processo.

N.	Passo	Condizione o tempo
1	Configurazione valvole di processo	capitolo 3
2	Permissivi soddisfatti, U1-XL-396 «Unit ready to start»	capitolo 5
3	VFD ausiliari, chiusura XV-325, apertura PCV	20 s
4	Pressurizzazione aspirazione: VPA, poi VA	PDIT-107 < 2 bar

N.	Passo	Condizione o tempo
5	Equalizzazione interstadio sulle tre VPSP	PDSL-214/224/234 · 10 s
6	Pressurizzazione mandata: VPR, poi VR	PDIT-307 < 2 bar
7	Capacità a 0 %, pompa olio ausiliaria e acqua temperata in marcia	—
8	Rimozione override pressione olio	60 s
9	Avviamento motore principale da VSDS	15 s per superare 30 rpm · minimo 310 rpm
10	Arresto pompa olio ausiliaria	30 s
11	Rimozione override lubrificatore cilindri	60 s
12	Capacità al gradino minimo (50 %)	5 s
13	Controllo di capacità e velocità attivo, AL o AD	10 s
14	Rimozione override 2° stadio, U1-XL-377 «Unit in line»	PSL-014 o 60 s

Dal passo 3 al passo 6 corre il temporizzatore della sequenza valvole: se non si completa in **420 s** interviene il blocco **VSEQ** (U1-XL-397). Se il motore non supera 30 rpm entro 15 s interviene **MOTF** (U1-ZMP-361); se il VSDS non è pronto entro 60 s, **VFDNR** (U1-XS-363).

4.3 Perché gli override

Durante l'avviamento alcune misure sono **per forza** fuori soglia: la pressione dell'olio è nulla finché la pompa non parte, la pressione di aspirazione del 2° stadio in serie è bassa finché il 1° stadio non la carica. Se le protezioni fossero attive dall'inizio, l'unità non potrebbe mai partire. Gli **override** le escludono per un tempo preciso e la sequenza le rimette in servizio una alla volta, appena la grandezza ha avuto il tempo di entrare nel campo normale.

Override	Protezioni escluse	Rimosso al passo
Olio	PAL-301, PALL-300	8 (60 s dopo l'avvio pompa ausiliaria)
Lubrificatore	PAL-314A/B	11
1° stadio	PAL/PAH/PSLL/PSHH di aspirazione 1°	6
2° stadio	PAL-014, PSLL-017/019	14 in serie · 6 in parallelo
Static pack	PAHH-037/38	3

Un override attivo è segnalato nel registro allarmi con l'etichetta **Override**.

4.4 L'arresto normale

Il pulsante **Unit stop** porta l'unità in ARRESTO:

1. il motore si ferma, il controllo di capacità si disattiva, la pompa olio ausiliaria parte e resta in marcia per la post-lubrificazione;
2. fermo il motore, si fermano i ventilatori del gas; 20 s dopo quelli dell'acqua temperata; si chiudono VR, VPR e VPA;
3. con VA ancora aperta, la logica apre in cascata MV-211, MV-221, MV-231, ognuna quando la differenza sulla precedente è scesa sotto 2 bar, poi le richiude: l'unità resta **pressurizzata ed equalizzata** alla pressione di aspirazione;

4. se la pressione di aspirazione del 2° stadio è sotto 79 bar g si apre XV-325;
5. dopo 10 s l'unità torna FERMA.

Se al punto 3 VA non risulta aperta interviene il blocco **SUCTV** (U1-ZSH-101): senza VA aperta l'equalizzazione porterebbe tutta l'unità alla pressione di mandata.

4.5 Perché si equalizza all'arresto

Una macchina ferma con 150 bar in mandata e 55 in aspirazione tiene le valvole dei cilindri e le tenute sotto una differenza di pressione inutile, e al riavvio chiederebbe una nuova pressurizzazione da capo. Equalizzata alla pressione di aspirazione, è pronta a ripartire e non sollecita le tenute. Durante l'equalizzazione la pressione di interstadio sale verso quella di mandata: le protezioni di massima sono escluse finché dura la sequenza di arresto, perché l'unità è già ferma e il blocco non avrebbe nulla da fermare.

4.6 Perché la post-lubrificazione

Fermato il motore, cuscinetti e perni restano caldi. Senza olio in circolazione il film si assottiglia, il metallo cede calore all'olio fermo e lo degrada. La pompa ausiliaria resta in marcia **300 s** dopo l'arresto confermato del motore, poi si ferma da sola.

4.7 Nota per lo studente — che cosa il modello semplifica

- I tempi della sequenza sono quelli della logica; i transitori meccanici del motore sono una rampa di 55 rpm/s in salita e 90 rpm/s in discesa.
- La scala dei tempi del pannello ($\times 1$, $\times 10$, $\times 60$) accelera l'orologio, non cambia la logica: i tempi in tabella restano secondi di processo.

5 · Permissivi e operazioni preliminari

5.1 Perché i permissivi

Un permissivo è una condizione che deve essere vera **prima** di avviare. Non protegge la macchina in marcia — di quello si occupano i blocchi — ma impedisce di avviarla in una situazione che la danneggerebbe subito o che la farebbe scattare dopo pochi secondi. Quando tutti sono soddisfatti si accende **U1-XL-396 «Unit ready to start»**.

5.2 L'elenco

Gruppo	Condizioni
Azionamento	VSDS pronto agli ausiliari (U1-XS-366) e in remoto (U1-XS-391); spurgo motore eseguito (U1-XL-301)
Acqua temperata	portata non bassa (U3-FAL-309); temperatura non bassa (U3-TAL-312)
Separazione liquido	polmoni 1° e 2° stadio non a livello alto (U1-LAH-300A/B, U1-LAH-302A/B)
Macchina	vira e bloccaggio albero disinseriti (U1-ZSH-306/307); VFD ventilatori pronti
Consenso	consenso esterno all'avviamento (U1-YI-001)
Valvole manuali	MV-103 e MV-303 aperte; HV-104 e HV-312 chiuse; HV-304 aperta
Valvole automatiche	MV-102, MV-302, MV-301 chiuse; equalizzazioni chiuse; BDV-311 chiusa

Gruppo	Condizioni
Logica	configurazione completata; PIT-308 coerente con il modo; nessun blocco attivo (U1-XL-388)

5.3 Perché ciascuno

- **Spurgo del motore:** il motore è in area classificata; prima di dare tensione si lava l'involucro con aria per espellere eventuale gas accumulato.
- **Livello nei polmoni:** il liquido è incompressibile. Una goccia di condensa aspirata in un cilindro, a fine corsa, non ha dove andare e rompe valvole, stelo o testata.
- **Vira disinserita:** il viratore fa ruotare lentamente l'albero in manutenzione. Se il motore partisse con il viratore ingranato lo distruggerebbe.
- **Acqua temperata:** i cilindri sono raffreddati ad acqua. Senza portata o con acqua troppo fredda la canna si deforma in modo non uniforme e l'olio di lubrificazione dei cilindri non lavora alla viscosità giusta.
- **Valvole in posizione:** l'avviamento parte da uno schema preciso. Una VR già aperta metterebbe la mandata in collettore prima che l'unità sia pressurizzata.
- **Nessun blocco attivo:** dopo uno scatto l'operatore deve capire la causa e ripristinare con **Trip reset** (U1-HS-348R) prima di riavviare.

5.4 Le operazioni preliminari di campo

Quattro condizioni non le può creare la logica: sono azioni di un operatore in campo, e il pannello le raccoglie nella finestra **Operazioni preliminari**.

Azione	Effetto
Spurgo motore U1-XL-301	soddisfa il permissivo di spurgo
Vira albero ZSH-306	inserita blocca l'avviamento; va disinserita
Consenso esterno U1-YI-001	consenso di chi riceve il gas
Pompa acqua temperata U3-ME-1A o U3-ME-1B	va avviata a mano (LCS U3-HSM-302) prima del compressore

Il pulsante della vira è ambra quando la vira è **inserita**: è l'unico comando della finestra il cui stato attivo **impedisce** l'avviamento.

5.5 Nota per lo studente — che cosa il modello semplifica

- Il livello nei polmoni cresce con la portata aspirata e i drenaggi automatici lo riportano giù (apertura sopra il 35 %, chiusura sotto il 14 %). In marcia normale il livello alto non si raggiunge.
- VSDS pronto e VFD ventilatori pronti diventano falsi solo con i guasti corrispondenti.

6 · Controllo di capacità

6.1 Perché regolare la capacità

La portata richiesta cambia: la sala controllo chiede di più o di meno, la rete di aspirazione sale o scende. Un compressore alternativo a velocità fissa aspirerebbe sempre lo stesso volume. Per seguire la richiesta la logica usa due leve:

- la **velocità** del motore, fra 310 e 420 rpm, regolazione fine e continua;
- i **gradini di capacità**, a scatti, che escludono una parte del volume dei cilindri.

6.2 Come si toglie capacità a un cilindro

Ogni estremità di un cilindro a doppio effetto (A, B, D, E, G, H, K, J) ha un **unloader**: un dispositivo che tiene aperte le valvole di aspirazione per tutta la corsa. Il gas entra e riesce dalla stessa parte senza essere compresso: quell'estremità non lavora. Ogni unloader è comandato da un'elettrovalvola **U4-SV-300 ÷ 307**.

Simbolo	Significato
X	estremità scaricata (tasca aperta)
—	estremità caricata
E	elettrovalvola eccitata
D	elettrovalvola diseccitata

In parallelo i due stadi si scaricano insieme: 100, 87,5, 75, 62,5, 50 %. In serie la tabella ha 13 gradini, perché il 1° e il 2° stadio si possono scaricare in modo diverso (per esempio «50 % 1° · 100 % 2°»).

6.3 Perché il 2° stadio si regola separatamente in serie

In serie la pressione di **interstadio** (U1-PIT-014/021) non la decide nessuno direttamente: si stabilisce dove la portata spinta dal 1° stadio pareggia quella aspirata dal 2°. Se il 1° spinge più di quanto il 2° aspiri, l'interstadio sale; se il 2° aspira più di quanto arrivi, scende. La logica sceglie il gradino del 2° stadio che porta l'interstadio al valore che divide il lavoro in parti uguali:

$$P_i^* \approx \sqrt{(P_{asp} \cdot P_{mand})}$$

tenuto dentro la finestra fra **PAL-014** e **PAH-021**, con 8 bar di margine per lato. Un **trim** lento corregge il gradino quando l'interstadio si allontana dal centro della finestra: PAH-021 chiede di ridurre il 1° o aumentare il 2°, PAL-014 il contrario.

6.4 Perché a volte la capacità non sale oltre il 75 %

Se neppure il 2° stadio al massimo riesce a tenere l'interstadio nella finestra, la logica **limita il 1° stadio** di un gradino e lo tiene lì, anche se la richiesta è più alta. Non scende però fino a portare l'interstadio sotto il minimo di 2° stadio: sarebbe un blocco, non una limitazione. Misurato nel simulatore in serie, rete a 55 bar A e iniezione a 150 bar A: con richiesta 100 % l'unità si porta a 75 % e 420 rpm, interstadio 99 bar g.

6.5 Perché i gradini al 25 % si alternano

Ai gradini più bassi del 1° stadio in serie la tabella offre due combinazioni equivalenti di estremità scaricate, (1) e (2). Un'estremità scaricata a lungo si scalda: il gas entra ed esce senza essere compresso ma sempre dalla stessa parte, e le valvole non vengono raffreddate dal flusso. La logica alterna le due combinazioni ogni **300 s** ed esclude per **60 s** gli allarmi e i blocchi di temperatura di mandata (TAH/TSHH-024, TAH/TSHH-034, TAH-301A/B) nel momento del cambio: il transitorio termico è atteso e non deve fermare l'unità.

6.6 Velocità e limite di potenza

Grandezza	Valore
Richiesta in AL	U1-FIT-109A, portata aspirata (Sm³/h)
Richiesta in AD	U1-FY-109A, percentuale dalla sala controllo
Salita di gradino	richiesta oltre il 102 % del gradino in uso
Discesa di gradino	richiesta sotto il 70 % del gradino in uso
Velocità	segue la richiesta divisa per il gradino, entro 310 ÷ 420 rpm

Grandezza	Valore
Limite di potenza	3,36 MW: sopra, la logica riduce la velocità

La differenza fra salita (102 %) e discesa (70 %) è un'isteresi: senza, un gradino salirebbe e scenderebbe a ogni piccola oscillazione della richiesta. Fra i due gradini lavora la velocità.

Misurato in parallelo con iniezione a 120 bar A e richiesta 100 %: la potenza arriva al limite, la logica tiene la velocità a 360 rpm invece di 420 e il pannello mostra la nota di limitazione.

6.7 Nota per lo studente — che cosa il modello semplifica

- La capacità di un gradino è la frazione di volume caricata, senza le perdite di rigurgito dell'unloader.
- Il trim è un integratore semplice; la ripartizione a rapporti uguali è calcolata, non ottimizzata.

7 · Protezioni: allarmi, blocchi, PSD2 e PSD0

7.1 Perché due livelli

Ogni grandezza critica ha due soglie. L'**allarme** avvisa l'operatore che la grandezza esce dal campo normale e gli lascia il tempo di intervenire. Il **blocco** interviene da solo quando è troppo tardi per aspettare: ferma l'unità. La soglia di blocco è sempre oltre quella di allarme; il pannello impedisce di invertirle e riallinea da solo i valori.

7.2 Le soglie di processo

Le soglie di pressione e temperatura dipendono dal modo: la colonna attiva è quella del modo selezionato. Pressioni in bar g, temperature in °C.

Grandezza	Tag	Allarme S / D	Blocco S / D
Aspirazione 1° bassa	PAL-004 / PSLL-003	31 / 31	30,3 / 30,3
Aspirazione 1° alta	PAH-005 / PSHH-003	78,5 / 78,5	79 / 79
Aspirazione 2° bassa	PAL-014 / PSLL-017	31 / 67,5	30,3 / 66
Mandata 1° alta	PAH-021 / PSHH-022	147 / 126	150 / 130
Mandata 2° alta	PAH-031 / PSHH-032	147 / 233	150 / 240
Temperatura mandata 1°	TAH-023 / TSHH-024	160 / 125	165 / 135
Temperatura mandata 2°	TAH-033 / TSHH-034	160 / 160	165 / 165

S = SINGLE · parallelo, D = DOUBLE · serie. In serie la mandata del 1° stadio è l'interstadio: le sue soglie sono più strette perché delimitano la finestra di ripartizione (capitolo 6).

7.3 Le soglie indipendenti dal modo

Grandezza	Tag	Allarme	Blocco	Azione
Vibrazione	VAH / VSHH	8,0 mm/s	12,0 mm/s	PSD2
Rod drop	ZAH / ZAHH	0,30 mm	0,40 mm	PSD2
Pressione olio	PAL-301 / PALL-300	1,8 bar g	1,5 bar g	avvio pompa ausiliaria, poi PSD2
Temperatura olio	TAH-305 / TSHH	65 °C	80 °C	PSD2
ΔP filtri olio	PDSH-309	1,00 bar	—	solo segnalazione
Static pack	PAHH-037/38	—	79 bar g	PSD2

7.4 PSD2 e PSD0: perché due arresti di emergenza

	PSD2 · arresto pressurizzato	PSD0 · arresto con blowdown
Chi lo avvia	ogni blocco, oppure il pulsante	solo il pulsante
Motore	fermo	fermo
Valvole di intercetto	VR, VPR, VPA chiuse · VA resta aperta	VA, VR, VPA, VPR e XV-325 chiuse
Equalizzazione	no	no
BDV-311	chiusa	aperta, dopo la chiusura delle quattro valvole
Ausiliari	post-lubrificazione 300 s	fermati a motore fermo
Stato finale	unità pressurizzata, in PSD2	unità depressurizzata, in PSD0

Il **PSD2** isola l'unità e la lascia piena di gas: è la risposta a un guasto di macchina, dopo il quale si vuole ripartire presto. Il **PSD0** isola e **svuota**: è la risposta a una perdita di gas o a un incendio, quando tenere gas in pressione è il pericolo. BDV-311 si apre solo dopo la chiusura delle valvole di intercetto: aprirla prima vorrebbe dire mandare in torcia la rete e il collettore, non solo l'unità.

Dopo **1800 s** di PSD0, se la pressione di aspirazione è ancora sopra 5 bar g, compare l'allarme **BDFAIL**: la depressurizzazione non sta funzionando. Causa tipica: HV-304 chiusa a valle di BDV-311.

7.5 Il registro allarmi (ISA-18.2)

Stato	Significato
ATT	attivo, non tacitato
TAC	attivo, tacitato
RIT	rientrato, in attesa di tacitazione

Le priorità sono tre: **Critica** (blocchi), **Alta**, **Bassa**. La colonna **First-out** indica il primo blocco intervenuto: dopo uno scatto molte grandezze vanno fuori soglia a cascata, e solo la prima dice perché l'unità si è fermata.

7.6 Perché la soglia di static pack

La linea static pack raccoglie il gas che trafila dalle tenute degli steli. È progettata per pressioni basse: se la pressione di aspirazione del 2° stadio vi arrivasse a unità ferma, la linea sarebbe in pericolo. Per questo XV-325 si apre a fine arresto solo se l'aspirazione di 2° stadio è sotto 79 bar g, e con XV-325 aperta il blocco PAHH-037/38 resta escluso.

7.7 Nota per lo studente — che cosa il modello semplifica

- Le votazioni (1002, 2003) sono nominate nei tag ma calcolate su un solo valore per grandezza, tranne la vibrazione (capitolo 8).
- PSD0 non ha una curva di depressurizzazione certificata: la portata di BDV-311 è quella di un orificio.

8 · Monitoraggio macchina (API 670)

8.1 Perché si misurano vibrazione e rod drop

Un alternativo ha masse che vanno avanti e indietro: vibra per natura. Quello che conta è **quanto** vibra rispetto al solito. Un aumento indica un allentamento, un cuscinetto consumato, una valvola rotta. Il **rod drop** è l'abbassamento dello stelo misurato da un sensore di prossimità: cresce quando si consumano le fasce di guida del pistone, e se arriva a far toccare pistone e canna rovina il cilindro.

8.2 I punti misurati

Punto	Vibrazione	Rod drop	Temperatura
K-201 · cuscinetto 1 e 2	sì	—	sì
Cilindri 1÷4 · stelo	sì	sì	sì

Grandezza	Allarme	Blocco
Vibrazione	VAH 8,0 mm/s (ISO 20816-3)	VSHH 12,0 mm/s
Rod drop	ZAH 0,30 mm	ZAHH 0,40 mm
Temperatura cuscinetti o cilindri	TAH-301A/B 85 °C	—

8.3 Valori tipici misurati

Condizione	Vibrazione max	Rod drop max	Temperatura max
Serie, 75 %, 420 rpm	6,8 mm/s	0,16 mm	78 °C
Serie, 50 %, 310 rpm	4,4 mm/s	0,14 mm	69 °C
Parallelo, 100 %, al limite di potenza	6,0 mm/s	0,17 mm	84 °C

La vibrazione cresce con il quadrato della velocità e con il carico; il rod drop cresce lentamente con il carico (costante di tempo 60 s): un rod drop che sale è un fenomeno di usura, non un transitorio.

8.4 Nota per lo studente — che cosa il modello semplifica

- La vibrazione è un valore globale per punto, non uno spettro.
- Il blocco VSHH scatta al superamento su un solo punto qualsiasi; la votazione 1002 del tag non distingue coppie di sensori.
- I guasti «Vibrazione cilindro 2» e «Rod drop cilindro 4» agiscono ciascuno su un solo punto: servono a riconoscere il punto guasto dalla tabella.

9 · Ausiliari: olio, acqua temperata, ventilatori

9.1 Olio di lubrificazione del telaio

Perché

Cuscinetti di banco, bielle e testa a croce lavorano su un film d'olio. Se la pressione cala, il film si rompe e il metallo tocca il metallo: in pochi secondi il cuscinetto fonde. L'olio porta anche via il calore generato dall'attrito.

Come è fatto

Elemento	Funzione
U2-P-1	pompa principale trascinata dall'albero: 3,5 bar a 310 rpm, cresce con la velocità
U2-P-2	pompa ausiliaria elettrica: 4,2 bar
U2-FT-1A/B	filtri; ΔP letta da U2-PDIT-310
U2-CO-1	refrigerante; U2-TCV-304 regola l'olio a 49 °C
U2-H-1	riscaldatore: acceso sotto 40 °C, spento sopra 50 °C

Elemento	Funzione
Lubrificatore cilindri	pressione 2,6 bar con macchina in marcia; PAL-314A/B a 1,4 bar

Perché due pompe

La pompa principale è trascinata dall'albero, quindi a macchina ferma non dà pressione. All'avviamento e all'arresto serve l'ausiliaria elettrica. In marcia l'ausiliaria è anche la riserva: se la pressione scende sotto **PAL-301 (1,8 bar g)** parte da sola. Se nemmeno così la pressione tiene e scende sotto **PALL-300 (1,5 bar g)**, blocco.

Perché il riscaldatore

Olio freddo è troppo viscoso: la pompa fatica, la pressione è alta ma la portata ai cuscinetti bassa. A macchina ferma il riscaldatore tiene il serbatoio fra 40 e 46 °C.

Perché il ΔP dei filtri è solo una segnalazione

Filtri intasati non fermano subito la macchina, ma riducono la pressione a valle. PDSH-309 avvisa in tempo per commutare o sostituire le cartucce; se nessuno interviene, la pressione cala fino ai due livelli sopra.

9.2 Acqua temperata

Perché «temperata» e non fredda

L'acqua raffredda canne e premistoppa. Deve togliere calore, ma non troppo: una canna troppo fredda fa condensare i componenti pesanti del gas sulle pareti, e il liquido lava via il film d'olio. Per questo il circuito ha un riscaldatore e un allarme di temperatura **bassa**, oltre alla regolazione.

Come è fatto

Elemento	Funzione
U3-ME-1A / U3-ME-1B	pompa principale e di riserva, avviamento manuale portata; U3-FAL-309 sotto il 60 % temperatura; U3-TAL-312 sotto 25 °C; TIC-312 regola a 49 °C
U3-FI-309	
U3-TIT-312	
U3-H-1	riscaldatore: acceso sotto 30 °C, spento sopra 35 °C, solo con portata
U3-ME-7	ventilatore a velocità variabile, sempre in marcia con l'unità
U3-ME-6	ventilatore a velocità fissa: parte con TIC-312 oltre il 99 %, si ferma sotto il 45 %

Portata e temperatura sono **permissivi** di avviamento: la pompa va avviata prima del compressore (capitolo 5).

9.3 Ventilatori dei refrigeranti del gas

Perché a gradini

Quattro ventilatori raffreddano il gas dopo ogni stadio: due a velocità variabile (U1-ME-12A principale, U1-ME-13A riserva) e due a velocità fissa (U1-ME-10A, U1-ME-11A). Il regolatore **TY-043** prende il valore più alto fra

le due temperature dopo i refrigeranti (TIC-041 e TIC-043) e lo porta a **50 °C**. Prima varia la velocità dei VFD; quando l'uscita resta al massimo per un tempo, aggiunge un ventilatore; quando scende, ne toglie uno.

Ventilatore	Parte con uscita TY-043	Si ferma con uscita TY-043
U1-ME-12A · VFD	sempre in marcia con l'unità	all'arresto
U1-ME-13A · VFD	> 99 % per 20 s	< 42 % per 90 s
U1-ME-10A · fisso	> 99 % per 25 s, con 13A in marcia	< 58 % per 90 s
U1-ME-11A · fisso	> 99 % per 25 s, con 10A in marcia	< 66 % per 90 s

Perché i ritardi sono asimmetrici

Avviare un ventilatore abbassa di colpo la temperatura, e l'uscita del regolatore scende. Con ritardi uguali il ventilatore appena partito si fermerebbe subito, la temperatura risalirebbe e ripartirebbe: una pendolazione che consuma motori e contattori. Si avvia presto ($20 \div 25$ s) e si ferma tardi (90 s), con soglie di arresto diverse per ogni gradino.

Se U1-ME-12A si ferma per vibrazione (U1-VSH-354), il gradino successivo parte senza attendere la riserva.

9.4 Nota per lo studente — che cosa il modello semplifica

- Olio: pressione e temperatura sono valori unici del collettore; il livello del serbatoio non varia.
- Acqua temperata: un solo nodo termico; il calore asportato cresce con la potenza assorbita.
- Ventilatori: l'efficienza del refrigerante cresce con il numero e la velocità dei ventilatori secondo una legge esponenziale, senza la curva del singolo ventilatore.

10 · Appendice: grandezze principali misurate nel simulatore

Rete di aspirazione 55 bar A, richiesta in AD, a regime dopo 25 minuti di processo.

Modo · richiesta	Asp. 1°	Interstadio	Mandata	T mand. 1° / 2°	Velocità	Potenza	Gradino
Serie · 100 %	53,5	99,2	149,1	58 / 73 °C	420 rpm	2,50 MW	75 %
Serie · 60 %	53,7	95,7	149,2	56 / 76 °C	336 rpm	2,24 MW	75 % 1° · 100 % 2°
Serie · 30 %	53,9	107,1	149,0	64 / 72 °C	310 rpm	1,28 MW	50 %
Parallelo · 100 %	52,8	—	119,6	74 / 106 °C	360 rpm	3,37 MW	100 %
Parallelo · 50 %	53,6	—	119,3	73 / 105 °C	420 rpm	2,02 MW	50 %

Pressioni in bar g. In parallelo la mandata 1° coincide con la mandata finale.