Stazione di pompaggio PS-04 — Principi di funzionamento

Documento per l'allievo · rilancio greggio verso terminale

Indice

Come si legge questo documento 2

1. Il serbatoio di carico T-100 e il bilancio di massa 2
1.1 Perché il livello è la prima cosa da guardare . . . 2
1.2 Il bilancio di massa: quello che entra meno quello che esce . . . 2
1.3 Le tre soglie di livello, e perché stanno dove stanno . . . 2
1.4 Soglie del capitolo . . . 3

2. Le pompe P-101 A/B: curva, servizio e riserva, NPSH 3
2.1 Perché due pompe . . . 3
2.2 Il punto di lavoro: due curve che si incontrano . . . 3
2.3 Corrente assorbita . . . 3
2.4 Il cambio pompa in marcia: tre fasi, non un interruttore . . . 4
2.5 NPSH: perché il livello e la portata decidono insieme . . . 4
2.6 Soglie del capitolo . . . 4

3. La regolazione di pressione PIC-205 5
3.1 Perché regolare la pressione e non la portata . . . 5
3.2 La catena di misura, e perché il ritardo conta . . . 5
3.3 I tre termini, e che cosa fa ciascuno . . . 5
3.4 L'anti-windup, e perché non basta limitare l'uscita . . . 5
3.5 Automatico, manuale, e il trasferimento senza scossoni . . . 5
3.6 Parametri del capitolo . . . 6

4. Il sistema strumentato di sicurezza: votazione 2oo3 e SDV-301 6
4.1 Perché una votazione e non un solo trasmettitore . . . 6
4.2 Il guasto di deriva, e come si legge . . . 6
4.3 Che cosa fa il blocco . . . 6
4.4 First-out: quale causa è arrivata per prima . . . 6
4.5 ESD e reset . . . 7
4.6 Soglie del capitolo . . . 7

5. Allarmi ISA-18.2 e soglie modificabili in linea 7
5.1 Perché una gestione degli allarmi, e non un elenco . . . 7
5.2 I tre stati . . . 7
5.3 Le tre priorità . . . 7
5.4 Le soglie si cambiano in linea, ma con una regola . . . 8
5.5 Soglie del capitolo . . . 8

6. Le protezioni di macchina: vibrazione e temperatura 8
6.1 Perché si misura la vibrazione . . . 8
6.2 Le zone e le soglie . . . 8
6.3 La temperatura del cuscinetto . . . 8
6.4 I guasti inseribili e che cosa osservare . . . 8
6.5 Soglie del capitolo . . . 9

7. La sequenza di avviamento e arresto **9**

8. Che cosa il modello semplifica **9**

Come si legge questo documento

Il simulatore PS-04 riproduce una stazione di rilancio: un serbatoio di carico, due pompe centrifughe in parallelo di cui una in servizio e una in riserva, una valvola di regolazione, una valvola di intercettazione di sicurezza e la linea verso il terminale.

Ogni numero che il pannello mostra esce da un modello risolto dieci volte al secondo. Non ci sono animazioni finte: se si chiude la valvola, la pressione sale davvero; se il serbatoio si svuota, la pompa perde aspirazione davvero. Questo documento spiega **perché** ogni sistema esiste e **come** reagisce, così che quello che si vede a pannello si possa prevedere invece che subire.

I **tag strumentali** (PIT-205, LSLL-102, SDV-301…) non sono tradotti in nessuna lingua: sono identificativi, non parole. Ogni capitolo termina con le soglie in tabella; l'ultimo paragrafo del documento dichiara che cosa il modello semplifica, perché sapere dove il simulatore finisce fa parte dell'addestramento.

---

1. Il serbatoio di carico T-100 e il bilancio di massa

1.1 Perché il livello è la prima cosa da guardare

Una pompa centrifuga non aspira: riceve. È il battente del liquido sopra la bocca di aspirazione che spinge il greggio dentro la girante. Se il livello scende, scende anche la pressione disponibile all'aspirazione, e sotto un certo punto il liquido comincia a vaporizzare proprio all'ingresso della girante — è la cavitazione del capitolo 2. Il livello di T-100 non è quindi un dato di magazzino: è la condizione che rende possibile il pompaggio.

Per questo il livello compare tre volte sul pannello — nel sinottico, nei valori di processo e nella tabella delle soglie — ed è l'unico parametro che compare sia come permissivo di avviamento sia come causa di blocco.

1.2 Il bilancio di massa: quello che entra meno quello che esce

Il livello non è impostato da nessuna parte: è il risultato di un bilancio.

```
dL/dt = (alimentazione − portata rilanciata) / 3600 / area
```

Con un'area di 2,0 m², una differenza di 100 m³/h fra alimentazione e rilancio muove il livello di circa 0,014 m/s, cioè quasi un metro al minuto. È una velocità che l'allievo deve avere in mente: uno squilibrio che sembra piccolo sul quadro svuota il serbatoio in pochi minuti.

Il pannello scrive il bilancio istantaneo sotto il comando di alimentazione — *in pareggio*, *in riempimento*, *in svuotamento* — e quando il serbatoio si svuota aggiunge il tempo che manca al blocco di bassissimo livello. È l'informazione che permette di decidere se c'è tempo di correggere o se conviene ridurre subito il rilancio.

1.3 Le tre soglie di livello, e perché stanno dove stanno

LAH-102 (alto, 10,5 m) segnala che il serbatoio si sta riempiendo oltre il normale: a 11,9 m il modello intercetta l'alimentazione da campo per evitare il trabocco.

LAL-102 (basso, 4,00 m) è un allarme e insieme un **permissivo**: sotto questa soglia l'avviamento è inibito. Non ferma una pompa già in marcia — sarebbe un blocco, non un permissivo — ma impedisce di avviarne una in condizioni che porterebbero subito alla cavitazione.

LSLL-102 (bassissimo, 3,20 m) ferma le pompe. La sua posizione non è arbitraria: alla portata nominale il punto di cavitazione (dove l'NPSH disponibile eguaglia quello richiesto) cade intorno ai 2,9 m di livello. La soglia di blocco sta **sopra** quel punto, non sotto. Una soglia di livello messa sotto il punto di cavitazione

sarebbe una protezione inutile: la macchina si rovinerebbe per vibrazione prima che il livello arrivi a fermarla — ed è esattamente la situazione che uno degli scenari formativi fa trovare all'allievo.

1.4 Soglie del capitolo

Tag	Descrizione	Valore di partenza	Azione
LAH-102	Livello alto	10,5 m	Segnalazione; a 11,9 m alimentazione intercettata
LAL-102	Livello basso	4,00 m	Allarme + avviamento inibito
LSLL-102	Livello bassissimo	3,20 m	**Blocco pompe**

Tutte e tre sono modificabili in linea dal pannello soglie (capitolo 5).

---

2. Le pompe P-101 A/B: curva, servizio e riserva, NPSH

2.1 Perché due pompe

Il rilancio non può fermarsi per una manutenzione né per un guasto. Le due macchine sono identiche e intercambiabili: una è **in servizio**, l'altra **in riserva**. La selezione a pannello non è un interruttore che commuta istantaneamente, ma l'avvio di una sequenza: il capitolo 2.4 spiega perché.

2.2 Il punto di lavoro: due curve che si incontrano

Una pompa centrifuga non ha una portata propria. Ha una **curva**: più portata passa, meno prevalenza riesce a dare.

`prevalenza pompa:  ΔP = 48 · n² − 1,8·10⁻⁴ · Q²      [bar, m³/h]`

dove n è la velocità relativa comandata dal variatore (0 ÷ 1). Il primo termine dice che la prevalenza cresce con il quadrato della velocità; il secondo che cala con il quadrato della portata.

Dall'altra parte c'è l'impianto, che oppone una resistenza:

`curva del sistema:  Q = 46 · kv · √(Pd − 8,0)`

con `kv` apertura della valvola di regolazione PCV-201 e 8,0 bar pressione della linea verso il terminale. Il **punto di lavoro** è dove le due curve si incontrano, e il simulatore lo cerca a ogni scansione per bisezione sulla pressione di collettore.

Da qui discendono due fatti che si vedono subito a pannello e che sorprendono chi è abituato a pensare alla pompa come a un generatore di portata:

- **chiudendo PCV-201 la pressione sale e la portata scende**, non il contrario;
- **aumentando la velocità salgono entrambe**, ma non in proporzione.

Se la valvola si chiude del tutto, la pompa va in *deadhead*: nessuna portata, tutta la prevalenza disponibile, pressione a fondo scala. È la manovra con cui si prova la catena di sovrappressione del capitolo 4.

2.3 Corrente assorbita

La corrente del motore segue la velocità con la potenza 2,7 e cresce con la portata:

```
I = 145 · (0,12 + 0,88 · n^2,7) · (0,72 + 0,34 · Q/280)      [A]
```

Serve a riconoscere una condizione anomala prima che arrivi un allarme: una pompa che gira veloce assorbendo poco sta spingendo poca portata, e la ragione va cercata a valle (valvola chiusa) o a monte (aspirazione in sofferenza).

2.4 Il cambio pompa in marcia: tre fasi, non un interruttore

Cambiare la pompa di servizio **a macchina ferma** è immediato: cambia solo quale delle due partirà. **In marcia** no, ed è la manovra più istruttiva del pannello.

Il problema è la valvola di non ritorno sulla mandata di ciascuna pompa. La macchina entrante, finché la sua prevalenza è inferiore alla pressione già presente nel collettore, non riesce ad aprirla: gira a vuoto e non manda niente. Se si fermasse la uscente prima che la entrante abbia preso il carico, il rilancio si interromperebbe e la pressione crollerebbe.

La sequenza implementata evita questo buco in tre fasi:

1. **PRELUBRIFICAZIONE** (3 s) — la macchina entrante si prepara, la uscente continua a sostenere il rilancio da sola.
2. **AVVIAMENTO** — la entrante sale in velocità fino a **eguagliare la pressione di collettore**. Il valore non è fisso ma calcolato: `n = √((Pd − P aspirazione) / 48)`, con un piccolo margine sopra, e comunque non meno del 35 %. Solo a quel punto la sua valvola di non ritorno si apre.
3. **SCAMBIO** — il carico passa alla entrante, il regolatore si riallinea senza scossoni (capitolo 3.5) e la uscente scende in rampa fino a fermarsi.

Il risultato, misurato sul simulatore: durante tutto il cambio la pressione di mandata resta fra 30,8 e 32,9 bar contro un set-point di 32,0, e la portata non ha mai un buco. Una prima versione che faceva salire la entrante a un valore fisso del 35 % produceva invece un'escursione di 4,5 bar e un crollo di portata a 127 m³/h: la valvola di non ritorno restava chiusa perché la prevalenza non bastava ad aprirla.

Se durante il cambio arriva un blocco, o si comanda l'arresto, la sequenza viene abortita.

2.5 NPSH: perché il livello e la portata decidono insieme

NPSH richiesto è quanto battente la pompa pretende per non cavitare, e **cresce con il quadrato della portata**:

```
NPSHr = 2,0 + 5,5 · (Q/300)²        [m]
```

NPSH disponibile è quanto l'impianto offre, e dipende dal livello del serbatoio:

```
NPSHa = livello + 1,6 − 0,9         [m]
```

Quando NPSHa scende sotto NPSHr il liquido vaporizza all'ingresso della girante: le bolle collassano poco dopo, e il pannello lo mostra come un salto di vibrazione proporzionale al deficit. Non è un allarme che scatta: è un fenomeno che si vede crescere.

La conseguenza operativa è meno ovvia di quanto sembri: **la cavitazione si può combattere riducendo la portata**, non solo alzando il livello. Se il livello non si può alzare — perché l'alimentazione da campo è quello che è — l'unica strada è chiedere meno portata, e questo è quello che uno degli scenari formativi pretende che l'allievo capisca.

2.6 Soglie del capitolo

Tag	Descrizione	Valore di partenza	Azione
IAH-220	Corrente motore alta	155 A	Solo segnalazione
YA-101	NPSH insufficiente, cavitazione	NPSHa < NPSHr	Allarme di priorità alta
YA-104	Tenuta meccanica, trafilamento	guasto inserito	Allarme di priorità alta

3. La regolazione di pressione PIC-205

3.1 Perché regolare la pressione e non la portata

La linea verso il terminale accetta quello che le si manda, ma pretende una pressione minima per arrivare a destinazione e non ne tollera una eccessiva. Il rilancio si regola quindi sulla **pressione di mandata**, lasciando che la portata sia la conseguenza.

L'organo regolante non è la valvola: è il **variatore di velocità della pompa**. PCV-201 resta un comando manuale dell'operatore, e dal punto di vista del regolatore è un **disturbo**: se l'allievo la chiude, il regolatore deve rallentare la pompa per non superare il set-point. Questa è la differenza che distingue un anello di regolazione da un comando diretto, e il pannello permette di provarla in entrambi i modi.

3.2 La catena di misura, e perché il ritardo conta

Fra quello che succede in mandata e quello che il regolatore legge ci sono tre ritardi:

Elemento	Costante
Inerzia del collettore di mandata	1,2 s
Ritardo di trasporto fino al trasmettitore	0,6 s
Smorzamento del trasmettitore	1,0 s

Sono i ritardi a rendere possibile l'instabilità: senza di essi si potrebbe alzare il guadagno quanto si vuole senza che succeda niente, e tarare il regolatore non insegnerebbe nulla. Con questi valori, il guadagno al massimo produce un'oscillazione di 10,4 bar picco-picco, che l'azione derivativa a 0,09 s riporta a 3,0 bar.

3.3 I tre termini, e che cosa fa ciascuno

`uscita = Kp·errore + Ki·∫errore·dt − Kd·(derivata della misura)`

- **Kp · proporzionale** (0,012 di partenza) — risponde subito, in proporzione all'errore. Da solo lascia sempre un errore permanente: per tenere la valvola aperta serve un errore che produca quell'apertura.
- **Ki · integrale** (0,030 s^{-1}) — accumula l'errore nel tempo e lo azzera. È il termine che porta davvero la pressione sul set-point. Troppo veloce, fa sovraelongare e pendolare.
- **Kd · derivata** (0 di partenza) — anticipa, opponendosi alla velocità di variazione.

La derivata agisce **sulla misura, non sull'errore**. È una scelta precisa: derivando l'errore, ogni volta che l'operatore muove il set-point la derivata vedrebbe un gradino e darebbe un calcio all'uscita — il cosiddetto *derivative kick*. Derivando la sola misura, uno spostamento di set-point non produce alcun calcio, e la derivata continua a fare il suo mestiere sui disturbi. Il pannello lo dichiara nella nota sotto i cursori.

3.4 L'anti-windup, e perché non basta limitare l'uscita

Quando l'uscita del regolatore è saturata — velocità già al massimo, o al minimo — l'errore continua a esistere e l'integrale continua ad accumulare, anche se non serve a niente. Al rientro dalla saturazione, quell'accumulo va smaltito: la macchina resta fuori set-point per tutto il tempo necessario a scaricarlo.

Il rimedio implementato è la **back-calculation**: quando l'uscita satura, l'integrale viene ricalcolato a ritroso dal valore effettivamente applicato, invece di essere lasciato correre. La differenza si misura: una versione precedente del simulatore integrava anche con Ki a zero, rendendo i guadagni di fatto irrilevanti — un difetto trovato collaudando, non leggendo il codice.

3.5 Automatico, manuale, e il trasferimento senza scossoni

In **manuale** l'operatore comanda direttamente la velocità e il regolatore sta a guardare. Nel passaggio **manuale → automatico** l'integrale viene precaricato al valore di velocità corrente: il regolatore riparte da dove si trova la macchina invece che da zero, e non c'è nessuno scalino. Lo stesso riallineamento avviene al termine di un cambio pompa in marcia.

3.6 Parametri del capitolo

Parametro	Partenza	Campo	Effetto
Kp guadagno proporzionale	0,012	0 ÷ 0,060	Prontezza e ampiezza della risposta
Ki azione integrale	0,030 s^{-1}	0 ÷ 0,120	Velocità di annullamento dell'errore
Kd azione derivativa	0,000 s	0 ÷ 0,200	Smorzamento delle oscillazioni
Set-point pressione	32,0 bar	14 ÷ 44	Bersaglio del regolatore

Il pulsante *Taratura di fabbrica* riporta i tre guadagni ai valori di partenza.

---

4. Il sistema strumentato di sicurezza: votazione 2oo3 e SDV-301

4.1 Perché una votazione e non un solo trasmettitore

Una protezione ha due modi di sbagliare: **non intervenire** quando serve, e **intervenire** quando non serve. Un solo trasmettitore le espone entrambe: se si guasta in basso, la protezione non scatta; se deriva in alto, ferma l'impianto senza motivo.

La votazione **2 su 3** risolve entrambe con tre trasmettitori indipendenti, PT-205 A/B/C: il blocco interviene quando **almeno due** superano la soglia. Un canale guasto, da solo, non ferma nulla e non impedisce nulla. È l'architettura che la IEC 61511 e la ISA 84 prescrivono per le funzioni strumentate di sicurezza di questo livello.

Il pannello mostra i tre valori separati con la propria barra e il proprio indice di soglia: non è un abbellimento, è il modo in cui si riconosce **quale** canale sta derivando.

4.2 Il guasto di deriva, e come si legge

Il guasto *Deriva PT-205B* fa salire lentamente la lettura del solo canale B. Quello che si vede: la barra di B si stacca dalle altre due, e quando lo scostamento supera i 3 bar compare l'allarme **YD-205** di canale sospetto. L'impianto continua a funzionare: è esattamente il comportamento voluto, e chi non avesse le tre letture separate non avrebbe modo di capire che cosa sta succedendo.

4.3 Che cosa fa il blocco

Quando la votazione scatta — o quando interviene una qualunque delle altre cause — il sequenziatore passa al passo **BLOCCO**: le pompe si fermano con una rampa rapida e il pannello segnala lo stato. Nel caso specifico di sovrappressione o di arresto di emergenza si chiude anche **SDV-301**, la valvola di intercettazione verso il terminale: si isola la linea, non solo si toglie la spinta.

4.4 First-out: quale causa è arrivata per prima

Quando un impianto si ferma, le cause si accavallano in pochi secondi: la pompa si arresta, quindi la pressione crolla, quindi arrivano altri allarmi. Sapere **quale è stata la prima** è la differenza fra capire il guasto e fare ipotesi.

Il registro allarmi marca la prima causa critica con l'etichetta **First-out**. La marcatura resta finché non si esegue il reset.

4.5 ESD e reset

L'**arresto di emergenza** (HS-001) è un comando diretto dell'operatore: ferma le pompe e chiude SDV-301 senza alcuna condizione. Il **reset blocchi** ripristina la logica, ma solo se la causa è rientrata: non è un pulsante che cancella il problema, è quello che riarma la protezione dopo che il problema è stato risolto.

4.6 Soglie del capitolo

Tag	Descrizione	Valore di partenza	Votazione	Azione
PAH-205	Pressione mandata alta	41,0 bar	—	Segnalazione
PSHH-205	Pressione mandata altissima	46,0 bar	2 su 3	**Blocco + SDV-301 chiusa**
HS-001	Arresto di emergenza	comando	—	**Blocco + SDV-301 chiusa**
YD-205	Scostamento fra trasmettitori	3 bar	—	Segnalazione di canale sospetto

---

5. Allarmi ISA-18.2 e soglie modificabili in linea

5.1 Perché una gestione degli allarmi, e non un elenco

Un impianto che segnala tutto non segnala niente. La norma ISA-18.2 nasce da questo problema: distinguere gli allarmi per **priorità**, tenerne traccia dello **stato**, e far sì che l'operatore veda per primo quello che conta.

5.2 I tre stati

Stato	Significato
ATT	Attivo: la condizione è presente e l'allarme non è stato tacitato
TAC	Tacitato: l'operatore lo ha preso in carico, la condizione è ancora presente
RIT	Rientrato: la condizione è cessata, ma l'allarme non è ancora stato tacitato

La distinzione fra TAC e RIT è quella che si dimentica più spesso. Un allarme **rientrato** resta in elenco proprio perché l'operatore possa accorgersi che qualcosa è successo mentre guardava altrove: sparisce solo con la tacitazione. Per lo stesso motivo il banner in testa al pannello segue la priorità peggiore fra gli allarmi **attivi**, non fra tutti: un allarme rientrato non deve tenere la console rossa, altrimenti si smette di guardarla.

5.3 Le tre priorità

Critica (rosso) sono i blocchi e l'emergenza; **Alta** (giallo) le condizioni che richiedono un intervento ma non fermano l'impianto — cavitazione, vibrazione alta, temperatura alta, corrente alta, tenuta; **Bassa** (azzurro) le segnalazioni di stato — livelli, scostamento fra trasmettitori.

5.4 Le soglie si cambiano in linea, ma con una regola

Tutte le soglie del pannello sono modificabili durante la marcia. Non è una comodità: è il modo in cui si prova una catena di protezione in campo, abbassando la soglia fino a farla intervenire.

La regola che il pannello fa rispettare da sé è la **gerarchia allarme → blocco**: la soglia di blocco resta sempre oltre quella di allarme. Se l'allievo sposta una delle due oltre l'altra, la seconda si sposta di conseguenza e la nota sotto la tabella lo dichiara. Il motivo è che un blocco che scatta prima del proprio allarme toglie all'operatore l'unica finestra di tempo che ha per intervenire.

Un secondo criterio non è automatico e resta responsabilità di chi tara: **una soglia fuori dal campo raggiungibile dalla macchina non è una protezione**. Una soglia di pressione impostata sopra la prevalenza massima della pompa (circa 50 bar a bocca chiusa) non può intervenire mai, e uno degli scenari formativi è costruito esattamente su questo.

5.5 Soglie del capitolo

Tutte quelle già viste, più la corrente motore. Il pannello evidenzia in giallo la riga in allarme e in rosso quella in blocco, così la tabella è anche una diagnosi.

---

6. Le protezioni di macchina: vibrazione e temperatura

6.1 Perché si misura la vibrazione

La vibrazione è il sintomo che precede quasi ogni guasto meccanico di una pompa: squilibrio, disallineamento, degrado dei cuscinetti, cavitazione. È anche l'unico che si manifesta **prima** del danno, mentre la temperatura del cuscinetto arriva quando il danno è già in corso.

Nel simulatore la vibrazione della macchina in servizio vale, in condizioni sane:

$$v = 0{,}85 + 4{,}4 \cdot n^2 \qquad [\text{mm/s}]$$

cioè cresce con il quadrato della velocità. A questa si sommano i contributi anomali: la cavitazione in proporzione al deficit di NPSH (fino a +6,5 mm/s), un degrado di tenuta (+3,2 mm/s), un cuscinetto in avaria (+5,4 mm/s).

6.2 Le zone e le soglie

Le soglie richiamano i criteri della ISO 10816 per macchine di questa taglia: **VAH-208 a 7,10 mm/s** è l'ingresso in zona C — funzionamento ammesso solo per periodi limitati — e **VAHH-208 a 11,0 mm/s** è il blocco.

6.3 La temperatura del cuscinetto

$$T = 34 + 44 \cdot n^2 + 2{,}6 \cdot (\text{vibrazione oltre 5 mm/s}) \qquad [^\circ\text{C}]$$

più 42 °C se è presente il guasto di cuscinetto. La temperatura è **lenta**: la sua costante di tempo è di circa 38 secondi, contro il mezzo secondo della vibrazione. Chi aspetta la temperatura per accorgersi di un cuscinetto in avaria se ne accorge molto dopo di chi guarda la vibrazione — ed è la ragione per cui esistono entrambe le misure.

TAH-215 a 85 °C segnala, **TAHH-215 a 95 °C** blocca.

6.4 I guasti inseribili e che cosa osservare

Guasto	Che cosa fa	Che cosa si vede per primo
Cavitazione	Abbatte l'NPSH disponibile di 7,5 m	NPSH disponibile sotto il richiesto, vibrazione in salita
Tenuta meccanica	+3,2 mm/s di vibrazione	Allarme YA-104, vibrazione verso la zona C
Cuscinetto	+5,4 mm/s e +42 °C	Vibrazione, poi temperatura molto più tardi
Deriva PT-205B	Un canale su tre sale	Barra di B staccata, allarme YD-205
Perdita alimentazione	Alimentazione del serbatoio a zero	Bilancio in svuotamento, poi LAL e LSLL

6.5 Soglie del capitolo

Tag	Descrizione	Valore di partenza	Azione
VAH-208	Vibrazione alta, zona C	7,10 mm/s	Segnalazione
VAHH-208	Vibrazione altissima	11,0 mm/s	**Blocco macchina**
TAH-215	Temperatura cuscinetto alta	85 °C	Segnalazione
TAHH-215	Temperatura cuscinetto altissima	95 °C	**Blocco macchina**

---

7. La sequenza di avviamento e arresto

Il sequenziatore ha sette passi, mostrati in testata:

Passo	Che cosa succede
ARRESTO	Macchina ferma, pronta
PERMISSIVI	Verifica: livello sopra LAL-102, nessun blocco attivo
PRELUBRIFICA	3 s di preparazione
AVVIAMENTO	Rampa di velocità fino al 35 %
MARCIA	Il regolatore prende il comando (in automatico) o l'operatore (in manuale)
RAMPA ARRESTO	Discesa controllata fino a fermo
BLOCCO	Arresto rapido per intervento di una protezione

Se i permissivi non sono soddisfatti la sequenza torna ad ARRESTO e il pannello scrive il motivo del rifiuto sotto il comando di alimentazione: è lì che va cercata la spiegazione, non nel registro allarmi.

La scala dei tempi è ×3: un secondo di orologio vale tre secondi di processo. I tempi mostrati sui pannelli sono tempi di processo; il cronometro della sessione d'esame, invece, va in tempo reale.

---

8. Che cosa il modello semplifica

Sapere dove il simulatore finisce fa parte dell'addestramento. Le semplificazioni dichiarate:

- **Le due pompe sono identiche.** Nessuna differenza di usura, taratura o rendimento fra P-101 A e P-101 B.

- **La votazione 2 su 3 lavora su tre letture derivate dalla stessa pressione** con rumore indipendente e, in caso di guasto, una deriva applicata al solo canale B. Non sono tre catene di misura fisicamente indipendenti con i propri errori di taratura.
- **La linea verso il terminale è una pressione costante** (8,0 bar). Non ci sono transitori di linea, colpi d'ariete né variazioni di contropressione dal terminale.
- **La cavitazione è rappresentata nei suoi effetti** — perdita di NPSH, vibrazione, deterioramento del punto di lavoro — ma non come fenomeno bifase con erosione progressiva della girante.
- **La temperatura del greggio è costante.** Nessun effetto di viscosità sulla curva della pompa né sulle perdite di carico.
- **Il serbatoio non ha stratificazione né sedimenti**: un solo livello, un solo fluido.
- **Il guasto di tenuta non produce perdita di portata**: alza la vibrazione e genera il proprio allarme, ma il trafilamento non compare nel bilancio di massa.

Nessuna di queste semplificazioni tocca quello che il pannello serve ad addestrare: leggere il bilancio di un serbatoio, tarare un anello di regolazione, riconoscere una cavitazione, capire una votazione 2 su 3 e ricostruire la gerarchia fra allarmi e blocchi.