

Turboalternatore STG-201-TG-01A

Principi di funzionamento — documento per lo studente

Indice

Turboalternatore STG-201-TG-01A — Principi di funzionamento	1
1. Impianto olio lubrificazione (MOP-01A/B, ACC-201, H-201)	1
2. Raffreddamento generatore (GEN-01A, FAN-301A/B, AHX-301A/B, DRY-301)	4
3 · Vapore e turbina	7
4. Eccitazione, sincronizzazione e regolatore di potenza	10

Turboalternatore STG-201-TG-01A — Principi di funzionamento

Documento per chi usa il simulatore in addestramento. Non descrive la pagina web (pulsanti, schede, sinottici): spiega perché il processo si comporta come si comporta e su quali logiche di controllo è costruito il modello, in modo che chi si esercita capisca il fenomeno fisico e la strategia di protezione, non solo la sequenza di comandi da premere.

Il documento cresce per capitoli, uno per ciascun sistema simulato. Si parte dall'impianto olio lubrificazione, perché è il primo sistema che deve essere pronto prima di far girare qualunque altra parte della macchina.

1. Impianto olio lubrificazione (MOP-01A/B, ACC-201, H-201)

1.1 Perché la lubrificazione è critica

I cuscinetti di turbina e generatore sono cuscinetti a film d'olio, non a rotolamento: fra albero e supporto non c'è mai contatto diretto, solo un velo d'olio in pressione che separa le superfici e ne assorbe il carico. Se quel velo manca — anche per pochi secondi, anche a bassa velocità — il metallo tocca il metallo e il danno è immediato e irreversibile.

Da qui due conseguenze che guidano tutta la logica dell'impianto:

- la lubrificazione deve essere accertata **prima** che l'albero cominci a girare, non dopo;
- deve restare garantita anche durante un arresto o un blocco, perché il rotore continua a girare per inerzia (moto di decelerazione libera) ben oltre l'interruzione dell'ammissione di vapore — un intervallo in cui l'alimentazione elettrica alle pompe potrebbe anche non essere più disponibile.

Il primo punto è realizzato con dei permissivi di avviamento; il secondo con una riserva di pressione indipendente dalle pompe, l'accumulatore.

1.2 Percorso del fluido

Serbatoio olio (livello LIT-201, temperatura TIT-201, riscaldatore H-201) → pompe di lubrificazione MOP-01A / MOP-01B → pressione di mandata al collettore (PIT-202) → refrigeranti E-201A/B → filtri duplex F-201A/B



Figura 1: Percorso del fluido: dal serbatoio ai cuscinetti.

(perdita di carico misurata da PDSH-201) → collettore di distribuzione ai cuscinetti (PIT-201, sostenuto anche dall'accumulatore ACC-201) → cuscinetti di turbina e generatore → ritorno al serbatoio.

Ogni valore che compare sul pannello per questi componenti è il risultato di questo percorso calcolato passo per passo, non un numero impostato a mano: se si ferma una pompa, si sporca un filtro o si abbassa la temperatura del serbatoio, l'effetto si propaga lungo la catena esattamente come sopra, con i propri tempi di risposta.

1.3 Pompe titolare/riserva e avviamento automatico

Le due pompe non sono identiche per ruolo: una è titolare, l'altra di riserva. È l'operatore a decidere quale delle due parte come titolare, avviandola manualmente; l'altra resta ferma finché non serve.

L'avviamento automatico della pompa di riserva è un interblocco di sicurezza indipendente dalla scelta dell'operatore: scatta quando la pressione olio scende sotto la soglia di allarme (PSL-203, 1,5 barg) e contemporaneamente il gruppo è già in rete oppure sopra il 50% della velocità nominale. Sotto quella soglia di velocità l'interblocco non interviene: in quella fase la macchina non sta ancora girando in modo significativo, e una pressione bassa è più probabilmente un normale transitorio di avviamento che una condizione pericolosa. Superata quella soglia, invece, una perdita di pressione è un evento da correggere subito, ed è per questo che l'interblocco agisce senza attendere l'intervento dell'operatore, avviando qualunque pompa non sia già in servizio — non necessariamente quella "titolare".

1.4 Pressione di mandata attesa

La mandata (PIT-202, variabile interna o i LPd) insegue un valore di riferimento di 3,4 barg con una sola pompa in servizio, 3,15 barg con entrambe — un valore di taratura del modello, non il risultato di un calcolo idraulico completo curva-pompa/curva-impianto — con un tempo di risposta di 2,5 s.

1.5 Filtri duplex: la perdita di carico non è solo manutenzione

La differenza di pressione ai capi dei filtri duplex (PDSH-201) è sorvegliata da un allarme a 0,9 bar, ma l'intasamento filtri **non è di per sé** una causa di blocco. Il punto pedagogico importante è un altro: la pressione che arriva davvero ai cuscinetti è quella di mandata **meno** questa perdita di carico. Un filtro molto sporco può

quindi far scendere la pressione ai cuscinetti sotto la soglia di blocco (1,0 barg) anche con la pompa titolare perfettamente funzionante — il blocco per bassa pressione olio non è quindi sintomo solo di un guasto pompa, può essere raggiunto anche per sola causa filtri. Un allarme ΔP filtri va perciò trattato come un precursore reale di blocco, non come un avviso di sola manutenzione da rimandare.

Nel modello il guasto simulabile sui filtri influenza insieme, con la stessa causa, sia il ΔP filtri sia la temperatura dell'olio in uscita dai refrigeranti: è una scelta deliberata, per rappresentare che un peggioramento delle condizioni dell'olio (imbrattamento, invecchiamento) tende a manifestarsi su più sintomi insieme, non come due guasti scorrelati.

1.6 Riscaldatore serbatoio H-201: perché la viscosità conta

Olio troppo freddo significa olio troppo viscoso: scorre peggio, arriva ai cuscinetti in ritardo e con meno portata. Per questo l'avviamento richiede una temperatura minima dell'olio dopo i refrigeranti (25 °C) come preconditione — vedi §1.9.

Il riscaldatore è simulato interamente in automatico, con isteresi sulla temperatura del serbatoio: si accende sotto i 30 °C, si spegne sopra i 45 °C. Il pannello non offre un comando manuale del riscaldatore: chi si addestra non deve cercarne uno.

1.7 Accumulatore N2 ACC-201: la riserva per il colpo d'arresto



Figura 2: Avviamento automatico riserva, livelli dell'accumulatore, permissivo di viscosità/temperatura.

Durante un blocco, soprattutto in caso di perdita di alimentazione elettrica ausiliaria, le pompe possono fermarsi mentre il rotore continua a girare per inerzia ancora a lungo. L'accumulatore è la riserva di pressione che copre esattamente questa finestra: un volume d'olio mantenuto in pressione da un cuscinio di azoto, pronto a sostenere la lubrificazione anche senza pompe attive.

Nel modello la pressione dell'accumulatore insegue tre livelli diversi a seconda dello stato dell'impianto: 180 barg (carica piena) quando almeno una pompa è in servizio in condizioni normali, 90 barg durante un blocco (il livello si abbassa perché l'accumulatore sta effettivamente erogando), 60 barg come livello di base se non è mai stata avviata alcuna pompa. L'avviamento richiede un accumulatore già carico ad almeno 100 barg: non basta che le pompe diano pressione, la riserva per il transitorio di arresto deve essere già pronta *prima* di ammettere vapore.

Esiste anche un allarme indipendente di pressione accumulatore bassa (PSL-202, sotto i 120 barg): è un allarme di sorveglianza, non un blocco. Il suo abbassarsi verso 90 barg durante un blocco è atteso — è la funzione stessa dell'accumulatore — non un guasto; un ulteriore calo sotto quel livello durante il transitorio è invece un segnale da seguire con attenzione.

1.8 Soglie di allarme e di blocco — riepilogo

Tag	Significato	Soglia	Effetto
PSL-203	Pressione olio bassa	1,5 barg	allarme + avvio automatico pompa di riserva
PIT-203/A/B/C · 2003	Pressione olio molto bassa	1,0 barg	blocco turbina
PDSH-201	ΔP filtri olio alto	0,9 bar	allarme (nessun blocco diretto)
PSL-202	Pressione accumulatore bassa	120 barg	allarme

1.9 Permissivi di avviamento legati all'olio

Nell'ordine in cui vengono verificati prima di ammettere vapore, i tre legati all'olio sono:

1. almeno una pompa lubrificazione in marcia;
2. accumulatore carico ad almeno 100 barg;
3. temperatura olio dopo i refrigeranti di almeno 25 °C (precondizione di viscosità, §1.6).

Il permissivo sulla lubrificazione è il primo controllato in assoluto, prima ancora di quello sull'acqua di circolazione al condensatore: nessun altro permissivo ha senso di essere verificato se l'albero non può ancora girare in sicurezza.

1.10 Nota per lo studente — cosa il modello semplifica

- Il blocco per bassa pressione olio è etichettato sul sinottico come "PIT-203/A/B/C · 2003" — tre trasmettitori indipendenti con voto 2 su 3, come un vero sistema di blocco triplicato. Nel modello di simulazione il valore è calcolato da un'unica misura di pressione, non da tre misure indipendenti votate fra loro (a differenza della vibrazione dei cuscinetti, che nel modello usa davvero un voto 2003 su più sensori simulati separatamente). Soglia e comportamento del blocco sono quelli reali; ciò che non è riprodotto è la possibilità di un guasto di un singolo trasmettitore con gli altri due ancora validi.
- Il valore di pressione di mandata (3,4 barg con una pompa, 3,15 con due) è una taratura di modello, non il risultato di un calcolo idraulico pompa/impianto completo.
- Il guasto simulabile sui filtri lega insieme ΔP filtri e temperatura in uscita refrigeranti, come descritto al §1.5: è una scelta di modello, non due guasti indipendenti disponibili.

2. Raffreddamento generatore (GEN-01A, FAN-301A/B, AHX-301A/B, DRY-301)

2.1 Perché il raffreddamento è critico

Gli avvolgimenti dello statore sono isolati con materiali organici che invecchiano con la temperatura: ogni margine sopra il limite di progetto accorcia la vita utile dell'isolamento in modo non lineare, e oltre una certa soglia il danno diventa rapido. A differenza di un cuscinetto, che di solito dà segni (vibrazione, rumore) prima di rompersi del tutto, un cedimento di isolamento statorico spesso non avvisa: da qui una sorveglianza continua della temperatura e un blocco automatico, non solo un allarme.

2.2 Circuito di raffreddamento: aria in circuito chiuso

Il generatore non è raffreddato da aria ambiente diretta, ma da un circuito d'aria **chiuso**: l'aria calda che ha attraversato la cassa statore/rotore viene spinta dai due ventilatori FAN-301A/B attraverso i due scambiatori aria-acqua AHX-301A/B, e rientra raffreddata (aria di ritorno) a chiudere il giro. Essendo un circuito chiuso, il raffreddamento non dipende dall'ambiente esterno una volta in servizio, ma dipende **interamente** dai propri ventilatori e scambiatori: se si fermano tutti, non c'è nessuna via alternativa per smaltire il calore.

2.3 Ventilatori e scambiatori: perché servono entrambe le coppie

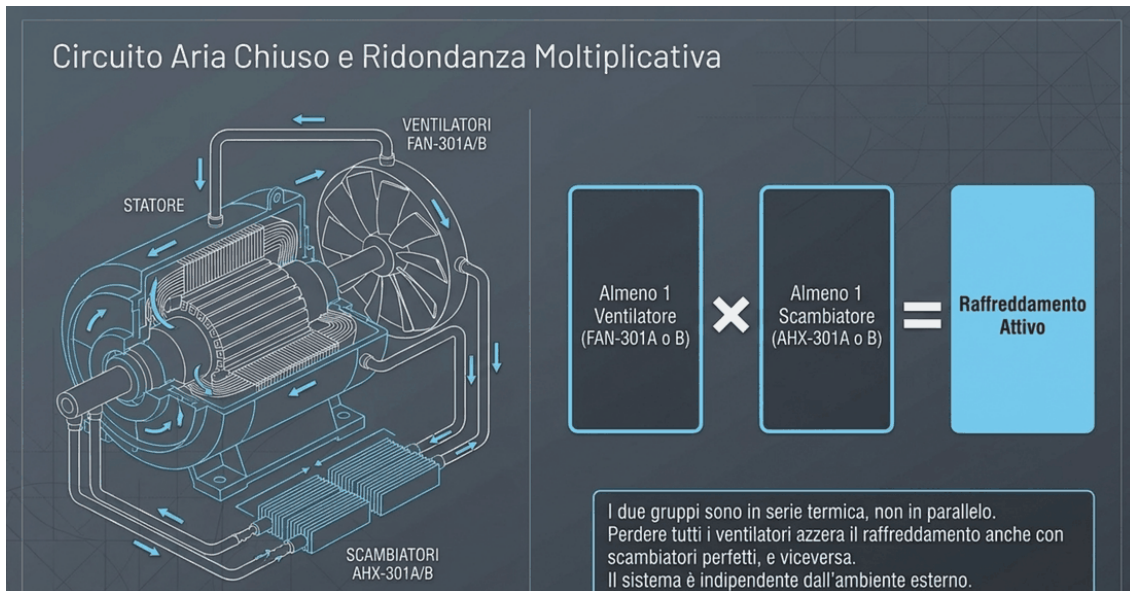


Figura 3: Circuito aria chiuso: ventilatori e scambiatori in serie termica, non in parallelo.

Il modello lega l'efficacia del raffreddamento sia alla frazione di ventilatori in servizio sia alla frazione di scambiatori in servizio, **moltiplicate fra loro**: serve almeno un ventilatore **e** almeno uno scambiatore per avere un minimo di raffreddamento, e la piena efficacia richiede entrambe le coppie attive insieme. È una ridondanza diversa da quella delle pompe olio (§1.3), dove una sola pompa titolare basta a tenere la pressione target: qui i due gruppi (ventilazione, scambio termico) sono in serie fra loro, non alternativi — perdere tutti i ventilatori azzerava il raffreddamento anche con gli scambiatori perfettamente efficienti, e viceversa.

2.4 Legame con il carico

Le temperature di riferimento, sia dell'aria in uscita (TE-304) sia dello statore (TE-301/302/303, tre punti di lettura), salgono con la corrente di statore — fino al 130 % della nominale in caso di sovraccarico — perché è la corrente, non la sola potenza attiva, a determinare le perdite Joule negli avvolgimenti. A pieno carico e raffreddamento pieno il modello converge a circa 85 °C per l'aria e 110 °C per lo statore: punti noti da documento, usati per calibrare la relazione fra corrente ed efficacia di raffreddamento. Le due temperature rincorrono il proprio bersaglio con tempi di risposta diversi — 12 s per l'aria, 20 s per lo statore — perché la massa termica degli avvolgimenti di rame e del pacco lamellare è molto maggiore di quella del volume d'aria in circolo: lo statore scalda e raffredda più lentamente dell'aria che lo lambisce.

2.5 Essiccatore DRY-301: perché l'umidità conta

Il circuito d'aria chiuso deve restare secco: l'umidità favorisce la formazione di condensa sugli avvolgimenti e accelera il degrado dell'isolamento, lo stesso bersaglio che il raffreddamento protegge. DRY-301 sorveglia l'umidità del circuito (MSH-301). Nel modello, come per il guasto filtri olio (§1.5), un guasto di scambiatore non

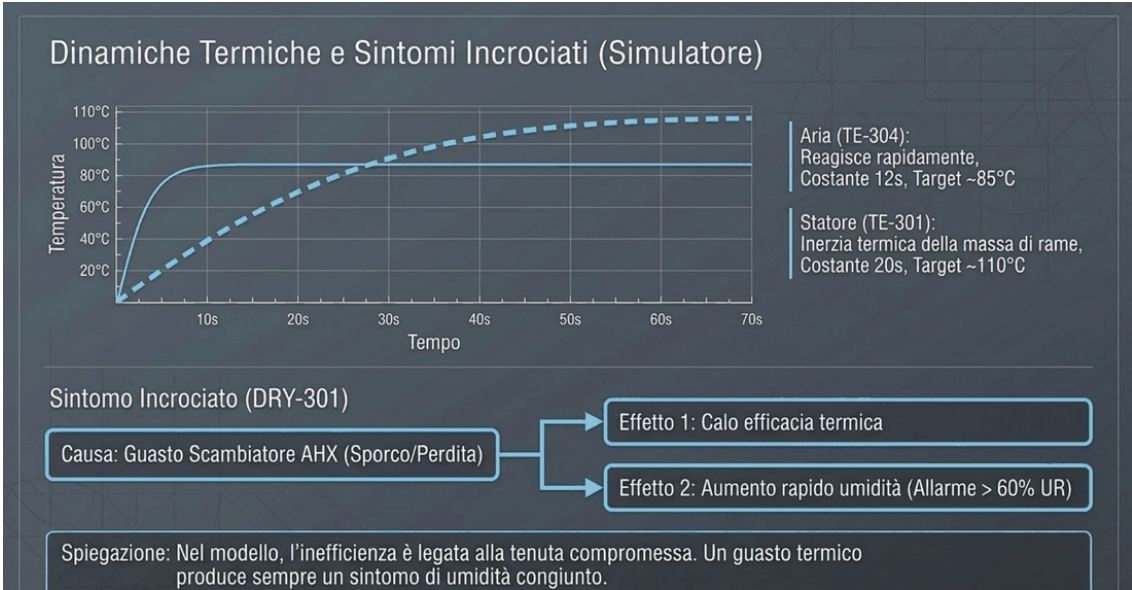


Figura 4: Dinamica termica di aria e statore, e il sintomo incrociato su DRY-301.

si manifesta come un unico sintomo isolato: riduce l'efficacia di raffreddamento e fa salire l'umidità insieme, con la stessa causa — rappresenta che uno scambiatore che perde efficienza spesso lo fa anche per infiltrazione o tenuta compromessa, non solo per sporco secco.

2.6 Soglie di allarme e di blocco — riepilogo

Tag	Significato	Soglia	Effetto
TSH-301	Temperatura statore alta	120 °C	allarme
TSHH-301 · 2oo3	Temperatura statore molto alta	140 °C	blocco turbina
MSH-301	Umidità aria di raffreddamento alta	60 % UR	allarme

Le due soglie di temperatura sono modificabili in linea dal pannello, come tutte le soglie del simulatore.

2.7 Nota per lo studente — cosa il modello semplifica

- TE-301/302/303 sono mostrate come tre punti di lettura distinti (statore fase A/B/C), ma nel modello derivano dalla stessa temperatura di statore calcolata, con uno scostamento fisso di $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ fra loro per dare una lettura plausibile a tre punti: non sono tre calcoli termici indipendenti, la stessa semplificazione già segnalata per la pressione olio 2oo3 (§1.10).
- Gli scambiatori AHX-301A/B sono rappresentati come acceso/spento: il modello non rappresenta una temperatura o portata dell'acqua di servizio lato scambiatore, solo l'effetto della loro disponibilità sull'efficacia complessiva di raffreddamento.
- Il guasto “scambiatore sporco” da solo, anche a piena severità e a pieno carico, non basta a raggiungere il blocco per temperatura statore: riduce l'efficacia ma resta sotto soglia. Serve, in aggiunta, la perdita reale di un ventilatore o di uno scambiatore — coerente con la ridondanza descritta al §2.3, ed è la combinazione con cui questo blocco viene effettivamente provato nei collaudi del simulatore.

3 · Vapore e turbina

3.1 Il percorso del vapore



Figura 5: Catena dei permissivi che sblocca l'ammissione vapore.

Il simulatore rappresenta la turbina come un unico corpo, non tre stadi separati: la potenza meccanica è funzione della portata ammessa, non di una distribuzione di pressione stadio per stadio. Il vapore entra dalla linea di alimentazione, attraversa la valvola di stop principale MSV-101 e la valvola di regolazione CV-201 (governor), si espande in turbina e scarica al condensatore, dove il vuoto sostenuto dall'acqua di circolazione ne consente l'espansione fino alla contropressione più bassa possibile. I tre argomenti che seguono — MSV-101, il regolatore di giri durante il riscaldamento e il vuoto al condensatore — sono le tre condizioni che governano questo percorso prima, durante e dopo l'ammissione di vapore.

3.2 MSV-101: la valvola principale di blocco

MSV-101 e CV-201 hanno ruoli diversi e non intercambiabili. CV-201 è la valvola di **regolazione**: il regolatore di giri (governor) la muove in continuo per inseguire un riferimento di velocità o di potenza, con un tempo di corsa normale di 4 s. MSV-101 è la valvola di **blocco**: resta tutta aperta o tutta chiusa, comandata dall'operatore in fase di preparazione (tempo di corsa normale 8 s) e dalla logica di protezione in caso di scatto (tempo di corsa 0,3 s — la corsa di una vera valvola di sicurezza, non quella di manovra).

La ragione per cui il blocco chiude MSV-101 e non si affida a CV-201 è proprio l'indipendenza dei due percorsi: se un guasto colpisse la valvola di regolazione (per esempio “valvola bloccata”, Sguasti), un blocco che contasse solo sulla chiusura della CV lascerebbe vapore in turbina. Nel modello lo scatto comanda sempre e comunque MSV-101 alla chiusura rapida, indipendentemente da cosa stia facendo in quel momento la CV.

Il permissivo di avviamento richiede che MSV-101 sia già aperta (oltre il 95 % di corsa) **prima** che la CV possa muoversi: è l'operatore a doverla aprire per pressurizzare la linea, non una sequenza automatica. Se non lo ha fatto, il pannello segnala “Valvole fuori posizione: aprire MSV-101 per pressurizzare la linea.” e il pulsante AVVIA resta inibito.

3.3 Il regolatore di giri durante il riscaldamento

Una turbina a vapore ha parti spesse — cassa, valvole, rotore — che si scaldano a velocità diverse: la superficie a contatto diretto col vapore si dilata prima del nucleo del pezzo. Se il vapore viene ammesso troppo in fretta,

Anatomia del Controllo: MSV-101 vs CV-201	
MSV-101 (Valvola di Blocco)	CV-201 (Valvola di Regolazione)
	
Ruolo: On-Off. Protezione assoluta della macchina.	Ruolo: Inseguimento continuo di RPM e Potenza (Governor).
Comando: Operatore (per pressurizzare linea) o Logica di Scatto (per emergenza).	Comando: PID del regolatore di giri/potenza.
Tempo di Corsa: 8 s (manovra motorizzata) / 0,3 s (scatto emergenza a molla).	Tempo di Corsa: 4 s (movimento continuo).
 L'indipendenza salva la macchina. Se il blocco contasse sulla valvola di regolazione (CV) e questa fosse incastrata, il vapore continuerebbe a fluire. Per questo lo scatto chiude sempre e solo la MSV in 0,3s.	

Figura 6: MSV-101 (blocco) e CV-201 (regolazione): ruoli, comando e tempi di corsa a confronto.

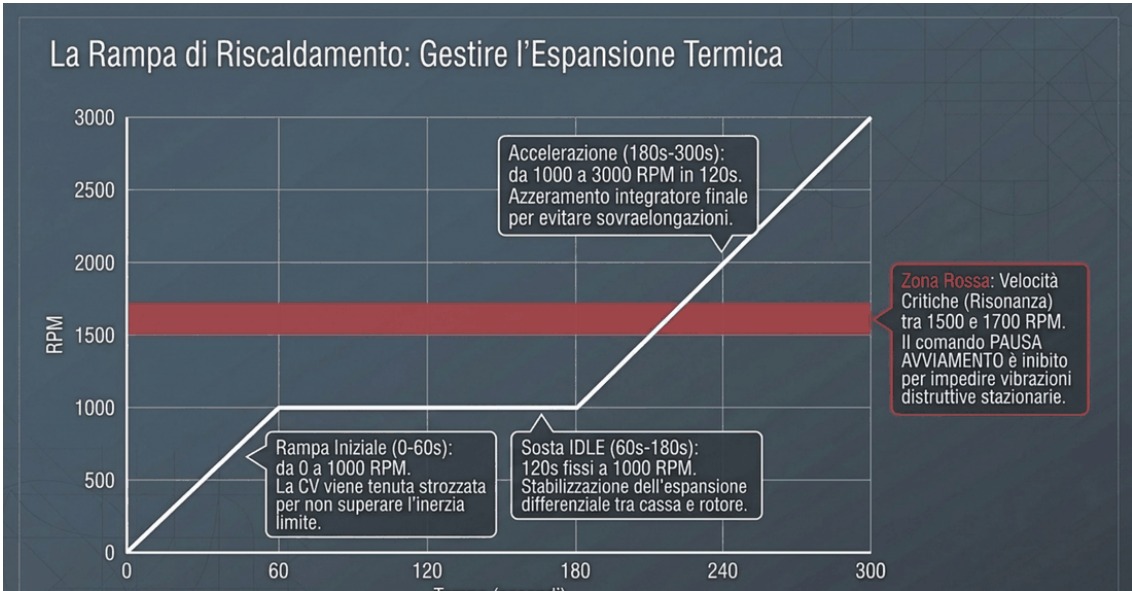


Figura 7: I tre tratti della rampa di riscaldamento e la fascia di velocità critiche.

quella differenza di dilatazione genera sollecitazioni termiche nel metallo e può ridurre i giochi radiali fino allo sfregamento fra parti rotanti e fisse. La rampa di riscaldamento esiste per questo: dare al metallo il tempo di scaldarsi in modo più uniforme prima di salire di velocità e di carico.

L'avviamento non porta perciò la turbina da ferma a 3000 rpm con un'unica rampa: il regolatore segue tre tratti in successione, e il riferimento di velocità stesso sale con una rampa, non a gradino — oltre alla ragione termica, anche per non imporre al PID un errore iniziale enorme.

1. **Riscaldamento (0 → 1000 rpm, 60 s).** Il riferimento di velocità sale linearmente da 0 a 1000 rpm in 60 s. La CV è tenuta stretta in apertura mentre ci si avvicina al punto di sosta, per non superarlo: con un margine largo la macchina lo oltrepassava di oltre 100 rpm prima che il regolatore rispondesse, e vi restava sopra per tutta la sosta successiva (a queste velocità l'attrito frena pochissimo).
2. **Sosta IDLE a 1000 rpm, 120 s.** Raggiunto il punto di sosta, il regolatore lo mantiene per 120 s prima di passare all'accelerazione: è il tempo tipico con cui si lascia stabilizzare la dilatazione termica della cassa prima di proseguire.
3. **Accelerazione (1000 → 3000 rpm, 120 s).** Il riferimento risale linearmente da 1000 a 3000 rpm in 120 s. Al termine, raggiunto il nominale, l'integratore del regolatore viene azzerato esplicitamente: senza questo azzeramento l'ultimo tratto della rampa lascia l'integratore saturato e la macchina si stabilizza a un valore permanentemente sopra il nominale.

In totale, $60 + 120 + 120 = 300$ s (5 minuti) di sequenza automatica dalla partenza al regime, a meno di intervento dell'operatore.

PAUSA AVVIAMENTO permette di fermare e mantenere la rampa al punto raggiunto (in uno qualsiasi dei due tratti di rampa) finché non si preme di nuovo AVVIA: è utile per osservare un punto intermedio o simulare un'attesa reale. Non è consentita fra 1500 e 1700 rpm: è la fascia di attraversamento delle velocità critiche del rotore, dove la macchina vibra per via dell'attraversamento di una risonanza, e l'operatore non deve poter scegliere di fermarsi e restarci.

3.4 Il vuoto al condensatore

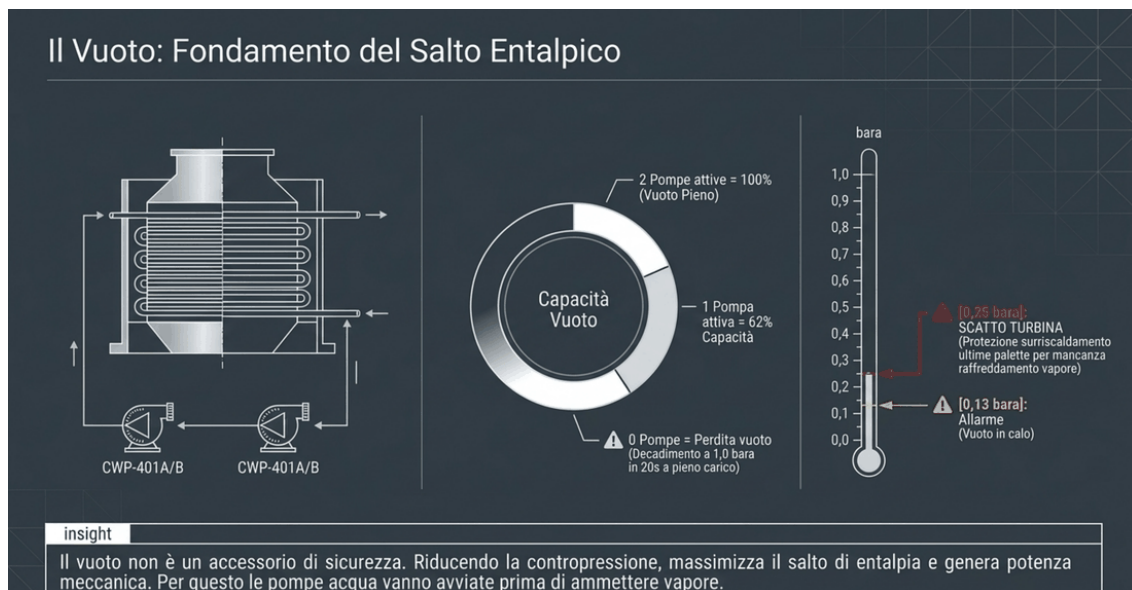


Figura 8: Capacità di vuoto in funzione delle pompe di circolazione attive, soglie di allarme e blocco.

Il vuoto al condensatore non serve soltanto a proteggere la macchina (si veda sotto): è il motivo stesso per cui la turbina scarica sotto vuoto anziché in atmosfera. Il lavoro meccanico estraibile dal vapore dipende dal salto di entalpia fra ammissione e scarico — più bassa è la contropressione allo scarico, più grande è quel

salto, e quindi maggiore la potenza ottenuta dalla stessa portata di vapore amMESSA. Il vuoto non è dunque un accessorio: è parte del ciclo termodinamico per cui la macchina è dimensionata.

Le pompe di circolazione CWP-401A/B alimentano l'acqua di raffreddamento al condensatore: senza almeno una in servizio non c'è condensazione e la contropressione sale rapidamente, motivo per cui il permissivo di avviamento le richiede attive prima ancora delle pompe olio nella sequenza — **prima** di ammettere vapore, non dopo. Le pompe partono ferme e vanno avviate a mano.

La capacità di vuoto dipende dal numero di pompe in servizio: con entrambe attive il condensatore raggiunge il vuoto pieno; con una sola, la capacità scende a circa il 62 %; senza nessuna, il vuoto degrada fino alla pressione atmosferica (1,0 bara), tanto più in fretta quanto maggiore è il carico — a carico pieno la perdita totale richiede circa 20 s, a macchina scarica circa 180 s, perché più potenza significa più calore da smaltire al condensatore. Con almeno una pompa attiva il recupero verso il vuoto pieno è rapido, dell'ordine di 15 s.

Le soglie sono le stesse indipendentemente dal fatto che il gruppo sia isolato o già in parallelo con la rete: oltre alla perdita di rendimento, un vuoto perso è pericoloso per la macchina — surriscaldamento delle ultime palettature per mancanza di raffreddamento del vapore di scarico — a prescindere da dove va la potenza prodotta.

Tag	Significato	Soglia	Effetto
PSL-401	Vuoto in calo	0,13 bara	allarme
PSLL-401	Vuoto perso	0,25 bara	blocco turbina (chiusura MSV-101)
LSLL-401	Livello pozzo caldo basso	15 %	blocco turbina
LSL-401	Livello pozzo caldo in calo	35 %	allarme

3.5 Nota per lo studente — cosa il modello semplifica

- La turbina è un corpo unico: non è rappresentata la distribuzione di pressione fra gli stadi, solo l'effetto complessivo di ammissione e contropressione sulla potenza resa.
- Il tempo di corsa di MSV-101 allo scatto (0,3 s) rappresenta una valvola di sicurezza a molla; il tempo di manovra normale (8 s) rappresenta l'azionamento motorizzato usato in preparazione e in arresto controllato: non sono la stessa valvola vista due volte, ma due modi di funzionamento della stessa valvola.
- Le pompe di circolazione CWP-401A/B sono rappresentate come acceso/spento, come i ventilatori del raffreddamento generatore (§2.3): il modello non rappresenta una portata d'acqua di servizio, solo l'effetto della loro disponibilità sulla capacità di vuoto.

4. Eccitazione, sincronizzazione e regolatore di potenza

Gli argomenti di questo capitolo non hanno un sinottico dedicato: sono funzioni elettriche e di controllo che si osservano sul pannello generatore/sincronizzatore, non un circuito di processo con una propria vista. Per questo motivo, a differenza dei capitoli 1-3, non è collegato al pulsante “?” di nessuna vista del simulatore — resta consultabile solo qui.

4.1 L'eccitatrice

Un generatore sincro produce tensione ai propri morsetti solo se nel rotore circola corrente continua: quella corrente crea il campo magnetico che, ruotando con l'albero, induce la tensione alternata negli avvolgimenti di statore. Senza campo non c'è tensione, quindi non c'è modo di trasferire potenza alla rete, per quanto la turbina la stia già fornendo meccanicamente. L'eccitatrice (AVR-301, regolatore automatico di tensione) è ciò che genera e regola quella corrente di campo, alimentando l'avvolgimento con una tensione e una corrente proporzionali alla tensione di macchina desiderata. Il campo può essere inserito solo a macchina già portata

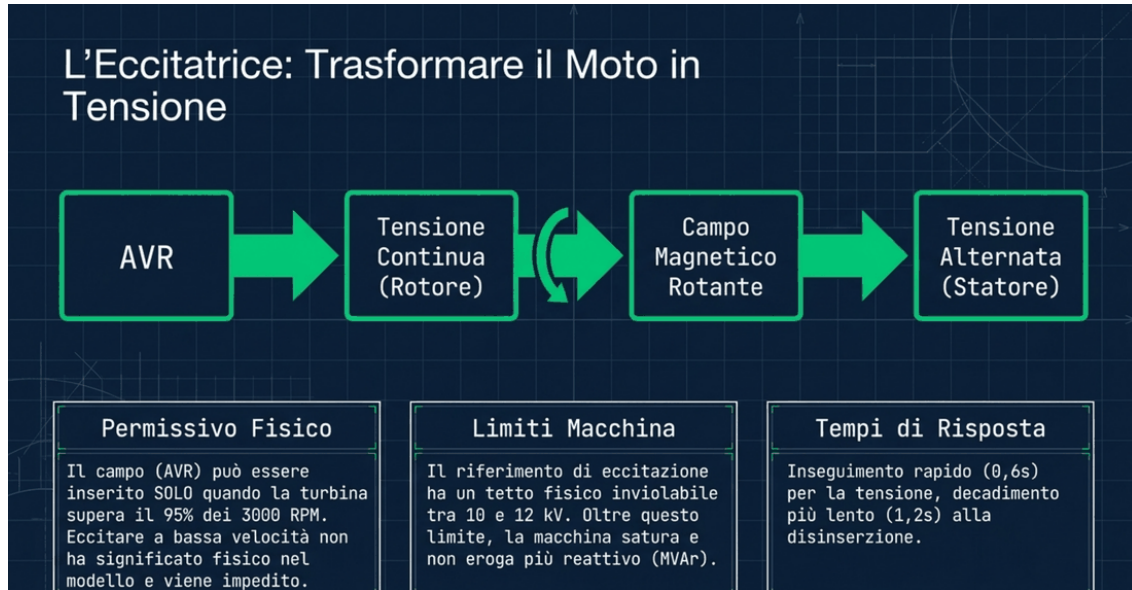


Figura 9: Permissivo di inserzione campo, limite di tensione di eccitazione, tempi di risposta.

quasi al nominale (oltre il 95 % di 3000 rpm) e con la sequenza di avviamento già in regime: eccitare un rotore che gira ancora a velocità ridotta non ha significato fisico nel modello, che quindi lo impedisce.

Una volta eccitata, la tensione di macchina insegue il riferimento dell'AVR con una costante di tempo di 0,6 s; se l'eccitazione si perde (comando dell'operatore, oppure il guasto "AVR-301" a severità sufficiente), la tensione decade a zero con una costante più lenta, di 1,2 s. Il campo non può essere disinserito mentre il gruppo è in parallelo con la rete: va prima aperto il disgiuntore 52G.

Il regolatore di potenza reattiva (MVAR) non agisce direttamente sul numero mostrato a pannello: agisce sul riferimento dell'eccitatrice, che è l'unica leva reale per scambiare reattivo quando la tensione ai morsetti è imposta dalla rete. Il riferimento di eccitazione è limitato fra 10 e 12 kV — il tetto fisico dell'eccitatrice — quindi oltre un certo assorbimento o cessione di reattivo la richiesta non è più soddisfacibile e la tensione di macchina resta ferma al limite.

4.2 Il sincronismo

Prima di chiudere il disgiuntore generatore 52G, tre condizioni devono essere soddisfatte contemporaneamente:

Grandezza	Tolleranza
Δf (scarto di frequenza)	< 0,1 Hz
$\Delta \phi$ (scarto di fase)	< 10°
ΔV (scarto di tensione)	< 5 %

Le tre tolleranze esistono perché chiudere un disgiuntore fra due tensioni non allineate equivale a mettere bruscamente in comune due sorgenti che non coincidono: la differenza istantanea si scarica come una corrente di inserzione elevata, con una coppia impulsiva sull'albero, sull'accoppiamento e sugli avvolgimenti — tanto più grande quanto più sono lontane frequenza, fase e ampiezza. Restare dentro le tolleranze della tabella limita quel transitorio a un valore che la macchina tollera senza danno.

In modo **manuale** l'operatore agisce sui due riferimenti — velocità (speed changer) e tensione (AVR) — osservando il sincronoscopio, e chiude il 52G lui stesso quando le tre condizioni sono verificate. In modo

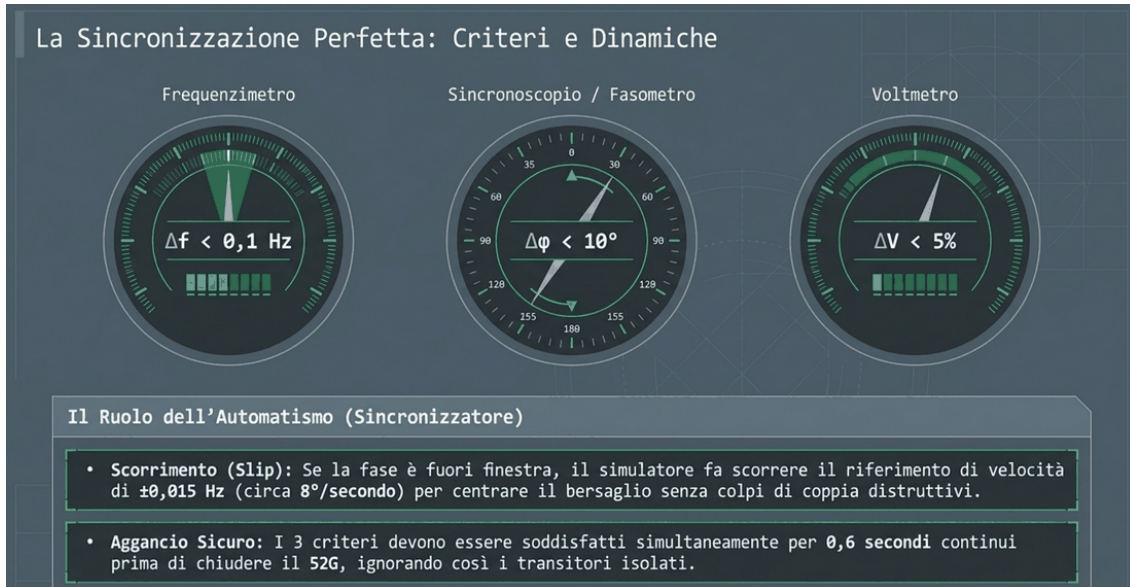


Figura 10: Le tre condizioni di sincronismo e il ruolo del sincronizzatore automatico.

automatico, col sincronizzatore abilitato, il modello fa lo stesso lavoro da solo: corregge il riferimento di tensione verso il nominale quando ΔV supera lo 0,2 %, e quando lo scarto di frequenza è già piccolo ma la fase è ancora fuori finestra fa scorrere lentamente il riferimento di velocità ($\pm 0,015 \text{ Hz}$, circa $8^\circ/\text{s}$) per far avanzare la fase attraverso la finestra di accettazione — uno scorrimento controllato, non un inseguimento istantaneo. Le tre condizioni devono restare verificate insieme per un breve tempo di conferma (0,6 s), non per un solo istante, prima che il 52G si chiuda da sé: serve a non agganciarsi a un transitorio isolato.

All'istante della chiusura lo sfasamento residuo reale (entro la finestra di $\pm 10^\circ$, ma non necessariamente zero) diventa l'angolo di carico iniziale: è il colpo di coppia, piccolo ma reale, di una chiusura non perfettamente in fase — non un aggancio idealizzato a bilancio già pareggiato. Subito dopo la chiusura il gruppo prende automaticamente un carico minimo (2 MW): lasciato a riferimento zero, assorbirebbe dalla rete le proprie perdite invece di cederle, motoreggiando (si veda la protezione di potenza inversa più sotto).

Dopo la chiusura del 52G il concetto di “sfasamento” fra le due tensioni non esiste più — i due nodi sono elettricamente lo stesso nodo — e la grandezza che conta è l'**angolo di carico δ** : lo sfasamento fra la f.e.m. interna della macchina e la tensione di rete, che si sposta con lo scarto di velocità reale (equazione del moto elettromeccanica) finché la potenza elettrica trasmessa non eguaglia quella meccanica in ingresso. È piccolo a carico basso e cresce con il carico; se l'eccitazione collassa (perdita di campo) il massimo trasmissibile crolla con essa e l'angolo può superare il punto oltre il quale non esiste più equilibrio — la macchina perde il passo (si veda §4.3).

4.3 Il regolatore di potenza

Dopo la sincronizzazione, il regolatore di giri cambia funzione: da regolatore di velocità (che non ha più senso imporre — è la rete a tenere la frequenza) diventa regolatore di **potenza**.

- In modo **manuale**, il riferimento di potenza (MW) è tradotto direttamente in comando di apertura della valvola di regolazione, senza correzione sulla potenza realmente ottenuta: è un comando in anello aperto, coerente con l'uso reale del modo manuale come intervento diretto dell'operatore.
- In modo **automatico**, un regolatore PI insegue lo scarto fra potenza di riferimento e potenza realmente misurata, con azione integrale e correzione proporzionale.

In entrambi i modi l'apertura della valvola di regolazione resta limitata a un massimo ridotto (15 %) per un breve periodo subito dopo la chiusura del 52G, in fase di sincronizzazione: evita che il regolatore spinga di colpo un

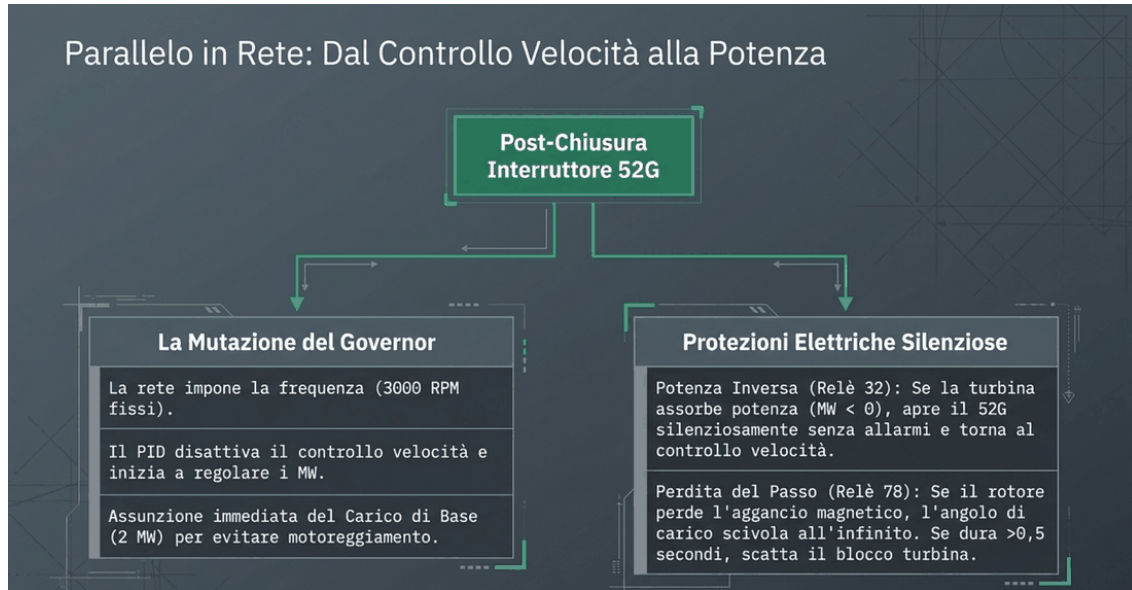


Figura 11: Il cambio di funzione del regolatore alla chiusura del 52G e le due protezioni elettriche.

carico elevato su un gruppo appena parallelato.

Il guasto “governor instabile” sovrappone un’oscillazione al **comando** di apertura della valvola, non al riferimento che il regolatore insegue: rappresenta un regolatore che pendola per conto proprio, non una macchina che rincorre male un riferimento corretto — si vede come un continuo va-e-vieni della valvola di regolazione, indipendente dal carico realmente richiesto.

Protezione di potenza inversa. Se il gruppo resta in parallelo ed eccitato ma la potenza ai morsetti diventa negativa oltre una soglia minima (tipicamente perché la valvola di stop viene chiusa senza prima scaricare il carico e aprire il disgiuntore), dopo un breve ritardo il 52G si apre da solo e il gruppo torna in controllo di velocità. Non è un blocco: nessun allarme di protezione, nessun RESET necessario — è l’equivalente di un relè 32 reale, automatico e silenzioso.

Perdita del passo (protezione 78). È il caso limite in cui il sincronismo, una volta raggiunto, si perde di nuovo: se la potenza meccanica da trasmettere supera quella massima trasmissibile attraverso la reattanza sincrona alla f.e.m. disponibile — tipicamente per perdita di eccitazione, che fa crollare quella f.e.m. — non esiste più un angolo di carico di equilibrio e δ scivola in continuo invece di oscillare attorno a un punto fisso. Se questa condizione dura oltre mezzo secondo con il gruppo ancora in parallelo, scatta il blocco.

4.4 Nota per lo studente — cosa il modello semplifica

- La f.e.m. interna della macchina è approssimata con la tensione di eccitazione stessa (che ha una propria costante di tempo di risposta), non calcolata da un circuito equivalente completo di reattanze di dispersione e resistenza statorica.
- Il regolatore di reattivo agisce con un unico guadagno equivalente verso l’eccitazione; non rappresenta la caratteristica di capability del generatore (i limiti di statore, di rotore e di stabilità che in macchina reale delimitano l’area operativa in un diagramma P-Q), solo un limite di erogazione riassuntivo su MVar e sul tetto di tensione dell’eccitatrice.
- La ricerca automatica di fase riusa lo stesso gesto — un piccolo scostamento del riferimento di velocità — che un conduttore reale userebbe per far scorrere lentamente la fase fino all’aggancio: non è un algoritmo di calcolo dell’istante di chiusura ottimale, ma la stessa logica empirica della sala macchine.

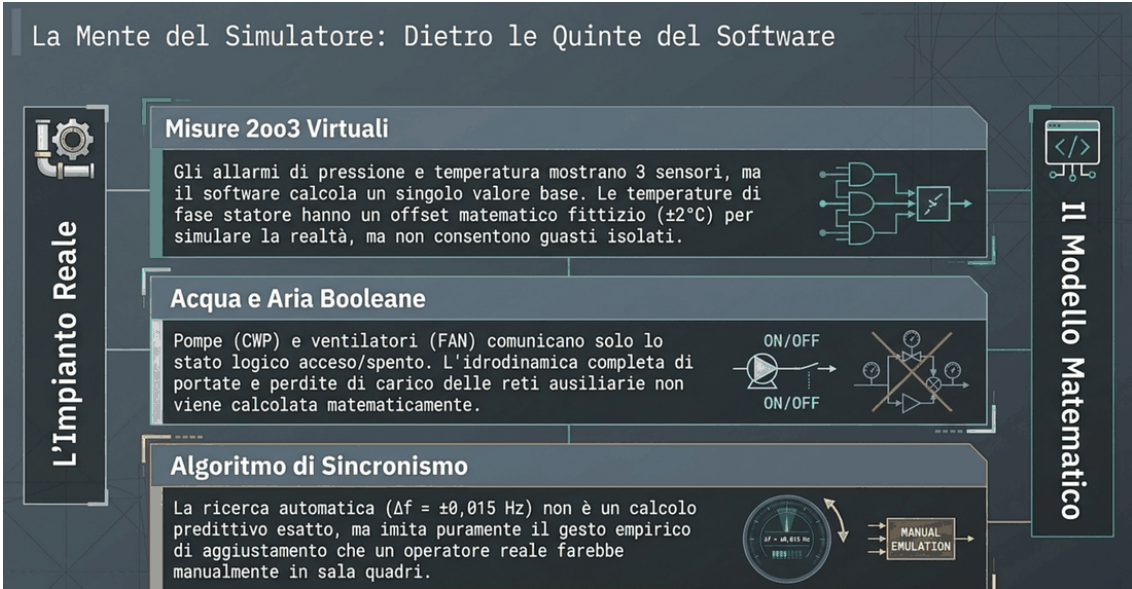


Figura 12: Che cosa il modello semplifica: misure virtuali, logiche booleane, ricerca di fase.

Matrice Master di Blocco (Condizioni di Scatto)

[ORO - Olio]	Pressione < 1,0 barg (PIT-203 2oo3) – Danno irreversibile ai cuscinetti.
[AZZURRO - Raffreddamento]	Temperatura Statore > 140 °C (TSHH-301 2oo3) – Cedimento isolamento statore.
[BIANCO - Vapore/Vuoto]	Pressione Condensatore > 0,25 bara (PSLL-401) – Surriscaldamento per perdita vuoto.
[BIANCO - Acqua Alimento]	Livello Pozzo Caldo < 15 % (LSLL-401) – Cavitazione pompe di estrazione.
[VERDE - Elettrico]	Scivolamento di Fase > 0,5 s (Relè 78) – Instabilità elettromeccanica distruttiva.

Takeaway finale: Nessuno di questi valori è negoziabile o bypassabile nel modello. Raggiungerli significa chiusura immediata e inesorabile della valvola MSV-101 in 0,3 secondi.

Figura 13: Riepilogo delle condizioni di blocco per famiglia (olio, raffreddamento, vapore/vuoto, elettrico).