Anexo Técnico: Matriz Paramétrica de comportamiento Hidrónico y Termodinámico del Salto Térmico (ΔT)

Análisis de saturación térmica en unidades terminales y ley exponencial del consumo de bombeo a cargas parciales.

1. Matriz de Comportamiento Hidrónico y Salto Térmico (ΔT)

La siguiente tabla ilustra la degradación progresiva del salto térmico (ΔT) y el incremento exponencial de la potencia eléctrica de bombeo consumida cuando una batería de fancoil opera con sobrecaudal frente a su punto nominal de diseño:

Régimen de Caudal (Q / Q_nom)	Caudal Másico (ṁ)	Salto Térmico (ΔT)	Potencia Térmica (Q̇)	Pérdida de Carga (ΔP)	Potencia de Bombeo (P)	Estado Operativo
50% (Carga Parcial)	0.5 x Q_nom	6.0 °C (Óptimo)	50% Q_nom	25% ΔP_nom	12.5% P_nom	**Máximo Ahorro Energético**
100% (Diseño Nominal)	1.0 x Q_nom	6.0 °C (Nominal)	100% Q_nom	100% ΔP_nom	100% P_nom	**Punto de Diseño**
130% (Sobrecaudal Moderado)	1.3 x Q_nom	4.6 °C (Degradado)	102% Q_nom	169% ΔP_nom	220% P_nom	**Zona Ineficiente**
150% (Sobrecaudal Elevado)	1.5 x Q_nom	4.0 °C (Bajo ΔT)	103% Q_nom	225% ΔP_nom	338% P_nom	**Gasto Crítico de Energía**
200% (Saturación Hidráulica)	2.0 x Q_nom	3.0 °C (Bajo ΔT Severo)	104% Q_nom	400% ΔP_nom	800% P_nom	**Desperdicio Hidráulico Total**

2. Fundamentación Física y Leyes Hidrónicas

2.1. Transferencia Térmica y Saturación de la Batería

La potencia térmica intercambiada en una batería viene dada por la ecuación fundamental:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Donde Q̇ representa la potencia térmica entregada, ṁ el caudal másico, C_p el calor específico del fluido y ΔT el salto térmico entre la impulsión y el retorno. Al superar el 100% del caudal de diseño nominal, el agua circula a excesiva velocidad por el interior de los tubos de cobre. El

fluido no permanece el tiempo suficiente para completar la transferencia térmica, provocando que la potencia Q̇ apenas aumente un 4% al duplicar el caudal (200%), mientras el salto térmico ΔT se colapsa de 6.0 °C a 3.0 °C.

2.2. Leyes de Afinidad Hidráulica en Unidades de Bombeo

El sobrecaudal provocado por el bajo ΔT impacta de manera crítica en las bombas secundarias de circulación debido a las relaciones cuadráticas y cúbicas que rigen la mecánica de fluidos:

- **Pérdida de Carga ($\Delta P \propto Q^2$):** La fricción hidráulica en la red de tuberías varía de forma cuadrática con el caudal. Trabajar a un 150% de caudal incrementa la pérdida de carga al 225%, mientras que un caudal del 200% eleva la pérdida de carga al 400% (ΔP_nom).
- **Potencia Eléctrica de Bombeo ($P \propto Q^3$):** La energía consumida por el circulador hidráulico evoluciona según una función cúbica respecto al caudal. Operar a un 150% de caudal eleva la factura de bombeo al 338%, y duplicar el caudal (200%) dispara el consumo eléctrico hasta un 800% (8 veces la potencia de diseño nominal).

3.Impacto en el Ahorro Energético

El control activo del salto térmico mediante actuadores mecatrónicos inteligentes (como el Pettinaroli BluDRIVE VT194DT5) permite restringir de forma precisa los sobrecaudales inútiles a cargas parciales. Esto estabiliza el ΔT en el valor de diseño (6.0 °C) y logra reducir la potencia eléctrica de bombeo hasta un 12.5% del valor nominal al 50% de carga.

Diagrama Mecatrónico del Bucle de Control en Cascada

Esquema Funcional de Regulación Dinámica de ΔT en Actuadores Inteligentes

El bucle de control en cascada mecatrónico implementado en los actuadores inteligentes (como el modelo BluDRIVE VT194DT5 de Pettinaroli) combina la demanda térmica ambiental solicitada por el BMS/termostato con un monitoreo secundario en tiempo real del salto térmico real (ΔT = T_retorno - T_impulsión).

A continuación se detalla la estructura funcional editable del algoritmo:

Esquema Secuencial del Algoritmo en Cascada

Etapa del Algoritmo	Entrada / Proceso Mecatrónico	Acción de Control Resultante
1. Entrada Primaria (Demanda Ambiental)	Señal de consigna ambiental (0–10 V CA/CC) emitida por el termostato de zona o el sistema BMS central.	Determina la apertura inicial requerida en el vástago de la válvula según la carga térmica solicitada.
2. Monitoreo Térmico (Sensado Secundario)	Sondas digitales de inmersión NTS1001 leen continuamente la temperatura de impulsión (T_imp) y retorno (T_ret) en la batería.	Calcula instantáneamente el salto térmico real: ΔT_real = T_ret - T_imp
3. Comparación y Lógica (Microprocesador)	El microprocesador interno compara el ΔT_real frente al valor de consigna de proyecto (ej. 5.0 °C).	• Si ΔT es adecuado: Mantiene la señal primaria. • Si ΔT cae (Bajo ΔT): Activa el algoritmo de corrección.
4. Acción Prevalente (Ajuste de Caudal)	El actuador electromecánico estrangula gradualmente la posición del vástago de la válvula PICV (ej. EvoPICV).	Aumenta el tiempo de permanencia del agua en la batería, restableciendo el ΔT nominal (5.0 °C) y transmitiendo la telemetría vía Modbus RTU.

Principios de Funcionamiento del Bucle Dual

- **Independencia Hidráulica y Mecatrónica:** La combinación de la válvula PICV (que absorbe las fluctuaciones de presión del sistema) con el actuador inteligente garantiza que el caudal ajustado responda exclusivamente a la transferencia térmica requerida.
- **Prioridad de Confort Térmico (Override):** El firmware del actuador incorpora una función de seguridad de confort. Si la temperatura ambiente se desvía en exceso de la consigna del usuario, la demanda ambiental prevalece temporalmente sobre la restricción por ΔT.
- **Telemetría Integrada BMS:** Todos los parámetros calculados (T_imp, T_ret, ΔT_real, posición de vástago en % y estimación de potencia en BTU) son accesibles en tiempo real mediante Modbus RTU / BACnet MS/TP.