PINNeAPPle

RELATÓRIO DE ESTUDO · EXEMPLO PÚBLICO

Gêmeo digital HX-201 permutador com incrustação

Um contrato de acurácia assinado antes da operação — e o que aconteceu quando a incrustação apareceu.

0,216 °C

de RMSE contra a sonda reservada

95,5%

de cobertura da banda, calibrada fora do treino

2,6 h

de antecedência no alarme, com o erro da previsão



Documento TW-201 · versão 1.0 · 2026
Histórico sintético de demonstração: não é registro de comissionamento de planta
Referência: sonda TT-105, reservada e fora do filtro
PINNeAPPle · LAIS & YAN LTDA · pinneapple-labs.github.io

Um permutador casco-e-tubo perde eficiência com incrustação. A operação não quer previsão: quer saber **quanto tempo tem** até a carga a jusante não fechar.

O risco de um gêmeo não é errar a previsão — é ser ouvido sem merecer. Por isso o estudo começa por um contrato escrito antes de qualquer dado: as métricas, as faixas e os limites que o modelo precisa cumprir para existir.

O que foi contratado

- Modelo `exchanger-ntu 1.0`, com piso de acurácia declarado de 1 °C.
- Gates de aceitação: RMSE ≤ 2,5% do span, viés ≤ 1%, cobertura ≥ 90%, antecedência de alarme ≥ 1 h.
- Uma sonda redundante (TT-105) que nunca entra no filtro: ela é o juiz.
- Faixa de validade declarada em contrato: T de 80 a 110 °C e $\dot{m}$ de 0,5 a 2,0 kg/s.

> **A ordem importa.** O contrato é assinado antes do primeiro passo do filtro. Métrica escolhida depois de ver o resultado não é métrica: é desculpa.

Grandezas previstas e limites de processo

GRANDEZA	FAIXA	LIMITE DE PROCESSO
T_ho (saída quente)	35–75 °C	alarme acima de 60,0 °C
T_co (saída fria)	45–75 °C	alarme abaixo de 57,8 °C
R_f (incrustação)	0–0,0025 m²K/W	sem limite de engenharia declarado

Sensores

PAPEL	SENSORES	USO
Entradas (ponto de operação)	TT-101, TT-102, FT-101, FT-102	movem o modelo
Assimilados	TT-103, TT-104	entram no filtro, ruído 0,15 °C
Reservado	TT-105	só compara; nunca entra no filtro

Gates de aceitação

GATE	CRITÉRIO	POR QUÊ
RMSE	≤ 2,5% do span de 40 °C	≈ 1 °C, o mesmo piso de acurácia do modelo
Viés	≤ 1%	erro sistemático não pode se esconder na média
Cobertura da banda	≥ 90%	a banda tem de conter o que acontece
Antecedência do alarme	≥ 3.600 s	aviso inútil não é aviso

Faixa de validade: T de 80 a 110 °C e $\dot{m}$ de 0,5 a 2,0 kg/s. Fora dela o gêmeo não promete nada — e o relatório diz isso em vez de extrapolar em silêncio.

852 passos, 255.300 s (70,9 h) na janela de validação. As métricas são calculadas só na parte que não foi usada para calibrar a banda.

0,216 °C
RMSE contra a sonda reservada

0,168 °C
erro absoluto médio

0,432 °C
p95 do erro absoluto

−0,010 °C
viés

GATE	CRITÉRIO	OBTIDO	SITUAÇÃO
RMSE	≤ 2,5% do span	0,54% do span	passa
Viés	≤ 1%	−0,026% do span	passa
Cobertura	≥ 90%	95,5%	passa
Antecedência do alarme	≥ 3.600 s	9.300 s	passa

A incrustação estimada ao fim da janela foi de **0,001652 m²K/W**, contra 0,001637 do valor verdadeiro do cenário — 0,9% de diferença. É a variável que a operação não mede e que o gêmeo passa a estimar.

> **O juiz é externo.** A sonda TT-105 ficou fora do filtro durante todo o comissionamento. A métrica que aparece aqui é a distância entre o modelo e uma medição que ele nunca viu.

A banda de incerteza não é um intervalo de previsão: é uma banda de estado, e foi calibrada uma única vez numa janela separada (os primeiros 127.500 s), depois avaliada no resto. A escala aplicada foi ×1,336; sem ela, a banda bruta do ensemble cobriria 86,4% — abaixo do gate de 90%.

Isso está declarado no relatório, não escondido: uma banda que só funciona depois de ajustada é uma banda ajustada, e quem lê precisa saber disso para decidir o que fazer com ela.

O alarme

INDICADOR	VALOR	LEITURA
Antecedência do alarme	9.300 s (2,6 h)	tempo entre o aviso e o cruzamento do limite
Erro da previsão do cruzamento	3.900 s (1,1 h)	distância entre o instante previsto e o medido
Origem da antecedência	extrapolação linear do estado latente	cresce com qualquer mudança de regime

> **Regra da casa.** Antecedência sem erro declarado é chute com relógio. O número que a operação usa é o par: 2,6 h de aviso, com 1,1 h de erro na hora do cruzamento.

O que não está provado

ITEM	O QUE O RELATÓRIO DIZ
A banda é de estado	não é intervalo de previsão para mudança de regime
Comissionado só na faixa declarada	fora de T 80–110 °C ou $\dot{m}$ 0,5–2,0 kg/s, nenhuma promessa
Primeiros 12 quadros	assimilados, mas excluídos das métricas
Sem antecedência para R_f	nenhum limite de engenharia foi declarado para a incrustação
Histórico sintético	demonstração; não é registro de comissionamento de planta
Sem reajuste	é o gêmeo como foi entregue, não um modelo retreinado depois

> **Por que publicar os limites de um gêmeo.** Porque o valor dele é justamente ser auditable: um modelo que declara onde não vale pode ser usado; um que não declara não pode.

95,5%	0,216 °C	2,6 h	0,001652
cobertura da banda	RMSE contra a sonda	de antecedência no alarme	m²K/W de incrustação estimada

O que a operação faz com isso

Antecedência é tempo para planejar limpeza, negociar uma janela de parada ou ajustar carga. O gêmeo não decide nada: ele avisa, e diz com que erro está avisando.

O que este estudo não decide

O momento econômico da parada, o fornecedor da limpeza e o custo da perda de carga. Ele entrega a estimativa de incrustação e a janela de aviso; o resto é decisão de operação.

Proveniência

O QUE	ONDE
Contrato de acurácia	`PINNeAPPle/apps/twin_ops/spec_hx201.yaml`
Evidência do comissionamento	`twin_evidence_hx201.json` · spec 6b86712f52ed2644
Pré-condições	11 verificações de preflight, 11 aprovadas
Artigo público	`pinneapple-labs.github.io/artigos/gemeo-hx201/`

> **Este é um relatório de exemplo,** com histórico sintético de demonstração. Um gêmeo para a sua planta segue a mesma estrutura: contrato antes, sonda reservada como juiz e a mesma página de limites.