



PROJETO DE ARQUITETURA SISTÊMICA PARA CONTROLE E MONITORAMENTO ELETROMECAÂNICO DE UNIDADES MOTORAS EM CÂMARAS FRIGORÍFICAS: DAHORA ESPETINHOS

Gustavo Bispo, Leonardo Ávila Santos Silva, Pedro Lucas Cardoso
Schizato, Maria Eduarda Chidini de Freitas

Orientador: Prof. Me. Dennis Lozano Toufen
Instituto Federal de São Paulo

Resumo

Este trabalho propõe a modernização do controle térmico de uma câmara frigorífica da empresa Dahora Espetinhos por meio da substituição do controle on/off por um controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID). A abordagem combina modelagem matemática por balanço de energia, função de transferência e simulação computacional das duas estratégias. São comparados estabilidade térmica, acionamentos do compressor e consumo energético relativo, considerando a RDC nº 216/2004. Os resultados indicam que o PID reduz a oscilação térmica e elimina as comutações discretas do compressor, sendo compatível com ganhos de eficiência de 15% a 40% relatados para sistemas com compressores de velocidade variável. Recomenda-se validação experimental em condições reais.

Palavras-chave: Controle PID. Eficiência energética. Automação industrial. Refrigeração. Inversor de frequência. Simulação computacional.

1. Introdução

A indústria alimentícia exige controle rigoroso da temperatura para preservar a qualidade e a segurança dos produtos. No setor de carnes, a RDC nº 216/2004 estabelece requisitos para conservação. O controle on/off, ainda comum em câmaras frigoríficas, produz oscilações térmicas e partidas frequentes do compressor. O controle PID, por sua vez, permite modular a capacidade de refrigeração e manter a temperatura mais próxima do setpoint.

Neste contexto, o trabalho tem como objetivo modelar a câmara frigorífica utilizada pela Dahora Espetinhos e projetar um controlador PID para substituir o sistema on/off, comparando, por simulação, o comportamento térmico, a frequência de acionamento e o consumo energético relativo.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo modelar uma câmara frigorífica utilizada pela empresa Dahora Espetinhos e projetar um controlador PID para substituir o sistema on/off, visando maior eficiência térmica e energética, avançando — em relação a uma etapa anterior deste estudo — para a realização de simulações computacionais que quantifiquem esses ganhos e esclareçam as temperaturas de trabalho e o consumo energético associados a cada estratégia.

2. Materiais e Métodos

O estudo possui caráter teórico-computacional e utiliza conceitos de transferência de calor, termodinâmica e controle de processos. O procedimento compreendeu levantamento bibliográfico, caracterização do sistema, modelagem



matemática, obtenção da função de transferência, implementação computacional e comparação das estratégias de controle.

Inicialmente, realizou-se levantamento bibliográfico sobre refrigeração industrial, controle de temperatura (on/off e PID) e legislação sanitária aplicável. Em seguida, foram definidos os parâmetros do sistema e construído o modelo térmico a partir do balanço de energia.

O modelo foi convertido para o domínio da frequência e utilizado na simulação das duas estratégias. A análise considerou estabilidade térmica, tempo de resposta, acionamentos do compressor e capacidade média solicitada. A validação experimental em uma câmara real permanece como etapa futura.

A quarta etapa, incorporada a este trabalho em atendimento às recomendações da banca avaliadora, consistiu na implementação computacional do modelo e na realização de simulações numéricas comparativas entre as duas estratégias de controle, permitindo quantificar diferenças de estabilidade térmica, tempo de resposta e consumo energético relativo. Por fim, os resultados obtidos foram analisados à luz da literatura técnica e da legislação sanitária vigente (RDC nº 216/2004), subsidiando as conclusões do trabalho e as recomendações para validação experimental futura.

b) Caracterização do sistema

c) Modelagem matemática do sistema térmico

A modelagem foi realizada por balanço de energia em regime dinâmico, assumindo temperatura interna uniforme. A transferência de calor foi representada por um coeficiente global, resultando em um modelo térmico de primeira ordem.

A transferência de calor foi modelada por meio do coeficiente global:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{int}} + \frac{e}{k} + \frac{1}{h_{ext}}$$

Resultando na equação do sistema:

$$\tau \frac{dT_{int}(t)}{dt} + T_{int}(t) = T_{ext} - K u(t)$$

d) Obtenção da função de transferência

Aplicando a Transformada de Laplace, obteve-se a função de transferência do processo:

$$G(s) = \frac{-K}{\tau s + 1}$$
$$G(s) = \frac{-K}{\tau s + 1} e^{-\theta s}$$

e) Estratégias de controle analisadas

Foram comparadas duas abordagens: controle on/off, com sinal discreto, e controle PID, com sinal contínuo e modulação da capacidade de refrigeração.



Controle on/off:

$$u(t) = \begin{cases} 1, & e(t) > h \\ 0, & e(t) < -h \end{cases}$$

$$u(t) = K_c \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

A principal diferença está no sinal de controle: discreto (0 ou 1) no on/off e contínuo (0 a 1), tipicamente por inversor de frequência, no PID. O on/off apresenta menor complexidade e custo inicial, mas maior oscilação, partidas frequentes e desgaste. O PID exige maior investimento e complexidade, porém oferece maior estabilidade e potencial de eficiência.

Aspecto	Controle on/off	Controle PID
Princípio de atuação	Liga/desliga o compressor conforme banda de histerese em torno do setpoint	Modula continuamente a capacidade de refrigeração conforme o erro em relação ao setpoint
Sinal de saída $u(t)$	Discreto (0 ou 1)	Contínuo (entre 0 e 1), tipicamente via inversor de frequência
Complexidade de implementação	Baixa; termostato/pressostato simples	Média a alta; requer controlador PID e inversor de frequência
Custo inicial aproximado	Baixo (controlador simples: R\$ 100–1.200)	Mais elevado, somando-se o inversor de frequência (R\$ 800–2.500)
Oscilação térmica em regime permanente	Alta; depende da banda de histerese e da inércia térmica do sistema	Baixa a praticamente nula, quando bem sintonizado
Frequência de acionamento do compressor	Alta (múltiplas partidas e paradas por hora)	Reduzida a nula; operação contínua modulada
Consumo energético	Maior, por picos de corrente de partida e operação fora do ponto ótimo	Potencialmente menor (15% a 40%, conforme literatura), por eliminar partidas frequentes
Desgaste mecânico do compressor	Maior, associado às partidas e paradas frequentes	Menor, pela operação contínua e partida suave
Precisão em relação ao setpoint	Baixa; oscila dentro da banda de histerese, podendo extrapolá-la por inércia térmica	Alta; mantém-se próxima ao setpoint
Aplicação típica	Sistemas de baixo custo e cargas térmicas estáveis	Sistemas que exigem maior estabilidade térmica e eficiência energética

Fonte: elaborado pelos autores (2026), com base em Åström e Hägglund (2006), Stoecker e Jabardo (2002) e Embraco (2023).

f) Parâmetros adotados para a simulação e faixa de temperatura de trabalho

Quadro 2 – Parâmetros adotados para a simulação computacional

Parâmetro	Símbolo	Valor adotado	Justificativa
Constante de tempo térmica	τ	25 min	Ordem de grandeza típica de câmaras frigoríficas de médio porte (STOECKER; JABARDO, 2002)
Tempo morto	θ	2 min	Atraso associado ao sensor de temperatura e à inércia do ar interno
Ganho do processo	K	40 °C	Garante temperatura de regime de -10 °C sob acionamento contínuo pleno, assegurando margem de resfriamento sobre o setpoint
Temperatura externa (sala de máquinas)	Text	30 °C	Condição ambiente conservadora para instalações no Brasil
Temperatura de referência (setpoint)	Tset	2 °C	Dentro do limite legal da RDC nº 216/2004 (<5 °C) e da faixa técnica recomendada para carnes resfriadas, 0 °C a 3 °C (GFRIO, 2026)
Banda de histerese (on/off)	h	±1 °C	Diferencial típico de termostatos/pressostatos comerciais
Condição inicial	T(0)	10 °C	Representa a câmara aquecida após abertura de porta ou carregamento de produtos

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

A RDC nº 216/2004 estabelece que alimentos refrigerados devem ser mantidos abaixo de 5 °C. Para carnes resfriadas, adotou-se a faixa técnica de 0 °C a 3 °C e, como referência, o setpoint de 2 °C, conforme a literatura técnica considerada.

g) Simulação computacional comparativa

Foi implementada em Python uma simulação numérica do modelo FOPDT, com integração de Euler explícito e passo de 0,05 min. As duas estratégias partiram de 10 °C, com temperatura externa de 30 °C.

Foram simulados: (i) controle on/off, com histerese de ±1 °C; e (ii) controle PID sintonizado pelas regras SIMC de Skogestad (2003). Para $\tau_c = \theta$, obtiveram-se $K_c \approx 0,156$, $T_i = 16$ min e $T_d = 1$ min.

$$K_c = \frac{\tau}{K(\theta + \tau_c)}, \quad T_i = \min\{\tau, 4(\tau_c + \theta)\}, \quad T_d = \frac{\theta}{2}$$

O horizonte foi de 300 minutos (5 horas). Foram registrados temperatura interna, sinal de controle, número de comutações e fração média de capacidade de refrigeração, utilizada como indicador de consumo energético relativo.

h) Procedimento de análise

A análise comparou estabilidade térmica, amplitude de oscilação, tempo de acomodação, frequência de acionamento e capacidade média solicitada, mantendo as

mesmas condições de planta e carga térmica. Como não houve validação experimental, os resultados representam o potencial da proposta.

A simulação permitiu comparar quantitativamente as respostas da câmara sob on/off e PID, partindo de 10 °C e buscando o setpoint de 2 °C. A Figura 1 apresenta a evolução da temperatura e do sinal de controle.

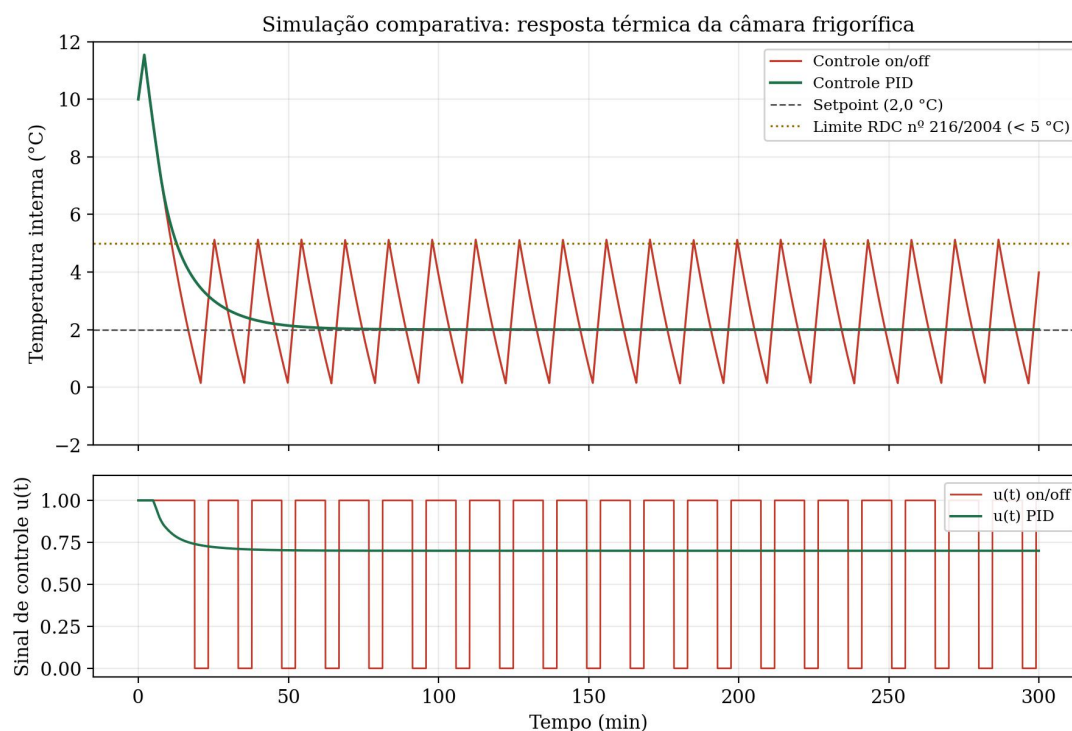


Figura 1 – Simulação comparativa da resposta térmica da câmara frigorífica: temperatura interna $T(t)$ e sinal de controle $u(t)$ para as estratégias on/off e PID

Fonte: elaborado pelos autores (2026), a partir do modelo FOPDT descrito na Seção 2.

O controle on/off apresentou oscilação permanente de aproximadamente 5,0 °C, entre 0,1 °C e 5,1 °C, com período médio de 14 minutos e 41 comutações em 5 horas, cerca de 8,2 por hora. Os picos tangenciam o limite de 5 °C da RDC nº 216/2004, deixando pouca margem para cargas térmicas adicionais.

O PID conduziu a temperatura ao setpoint de 2 °C sem sobressinal significativo e sem oscilação perceptível em regime permanente, atingindo a faixa de $\pm 0,5$ °C em aproximadamente 34 minutos. O compressor operou continuamente, sem comutações discretas, com fração média de capacidade de aproximadamente 71%, próxima aos 70% do on/off.

Indicador	Controle on/off	Controle PID
Amplitude de oscilação em regime permanente	$\approx 5,0$ °C (0,1 a 5,1 °C)	≈ 0 °C (estabilizado em 2,0 °C)
Tempo até a faixa de $\pm 0,5$ °C do setpoint	Não se estabiliza; oscila continuamente	≈ 34 min
Número de comutações do compressor	41 ($\approx 8,2/h$)	0

Indicador	Controle on/off	Controle PID
Fração média de capacidade solicitada, $u(t)$	$\approx 70\%$	$\approx 71\%$
Margem em relação ao limite legal ($5\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Picos tangenciam o limite	Margem $> 2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ em relação ao limite

Fonte: elaborado pelos autores (2026), a partir dos resultados da simulação computacional.

No modelo simplificado, a capacidade média solicitada é semelhante nas duas estratégias, pois ambas precisam compensar a mesma carga térmica. A diferença está na forma de atuação: ciclos de plena carga e parada no on/off, contra operação contínua e modulada no PID.

A literatura técnica associa a modulação contínua à redução de picos de corrente de partida, perdas fora do ponto de projeto e desgaste mecânico. Para compressores de velocidade variável, são relatadas economias de energia de 15% a 40%, dependendo da aplicação e do perfil de carga (EMBRACO, 2023).

Assim, a eliminação das comutações e a maior estabilidade térmica observadas na simulação são consistentes com os mecanismos associados à eficiência energética e à redução do desgaste.

Os resultados devem ser interpretados como indicativos, pois se baseiam em modelo matemático simplificado e simulação numérica. A confirmação do desempenho e da economia de energia exige validação experimental em uma câmara real.

4. Considerações Finais

O trabalho apresentou uma proposta de aplicação de controle PID na câmara frigorífica da Dahora Espetinhos. A simulação mostrou redução da oscilação térmica de aproximadamente $5,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ para valores próximos de zero, eliminação das 41 comutações observadas em 5 horas e manutenção da temperatura com maior margem em relação ao limite de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Embora a fração média de capacidade tenha sido semelhante no modelo, a operação contínua do PID é compatível com mecanismos de economia energética e menor desgaste apontados pela literatura, especialmente em sistemas com compressores de velocidade variável.

Conclui-se que a substituição do on/off por PID é tecnicamente viável em nível teórico e computacional. Recomenda-se implementar o sistema em uma câmara real, com aquisição de temperatura e consumo elétrico, para validar o modelo e os benefícios estimados.

5. Referências

ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. *Advanced PID control*. Research Triangle Park: ISA, 2006.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). *Resolução RDC nº 216, de 15 de setembro de 2004*. Dispõe sobre Regulamento Técnico de Boas Práticas para Serviços de Alimentação. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 set. 2004.

EMBRACO (Nidec Global Appliance). *Compressores de velocidade variável são o caminho para a economia de energia na refrigeração*. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.embraco.com/blog/compressores-de-velocidade-variavel-sao-o-caminho-para-economia-de-energia-na-refrigeracao/>. Acesso em: 28 ago. 2026.



GFRIO. *Temperatura ideal da câmara fria por tipo de alimento — tabela completa*. [S. l.], 2026. Disponível em: <https://www.gfrio.com.br/blog-temperatura-ideal-camara-fria.php>. Acesso em: 28 ago. 2026.

INCROPERA, F. P. et al. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2010.

SILVA, J. C.; NASCIMENTO, J. R. *Controle de temperatura em câmaras frigoríficas*. Revista Brasileira de Engenharia, 2018.

SKOGESTAD, S. *Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning*. Journal of Process Control, v. 13, n. 4, p. 291–309, 2003.

STOECKER, W. F.; JABARDO, J. M. S. *Refrigeração industrial*. 2. ed. São Paulo: Blücher, 2002.

ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. *Optimum settings for automatic controllers*. Transactions of the ASME, v. 64, p. 759–768, 1942.