

Avaliação experimental de modelos térmicos de um nó sob controle ON/OFF em regime próximo ao setpoint

Marco Antônio Brandão Machado^a, Jhonatan Nolasco Nascimento^{ab}, Sarah Arvelos Altino^a, Alexandre Santos Brandão^a, Marcelo Moreira da Costa^a

^a Universidade Federal de Viçosa – Viçosa – MG, Brasil;

^b Universidade Federal de Uberlândia – Uberlândia – MG, Brasil;

* marco.brandao@ufv.br

RESUMO

Modelos térmicos de um único nó são amplamente utilizados para descrever sistemas aquecidos eletricamente devido à sua simplicidade. Neste trabalho, avalia-se experimentalmente o desempenho desse tipo de modelo na representação da dinâmica térmica de um reator de pirólise aquecido eletricamente em escala piloto. Foram analisados dados experimentais sob diferentes níveis de potência e períodos de ciclo integral, considerando três regimes operacionais: aquecimento inicial, operação próxima ao setpoint sob controle ON/OFF e resfriamento livre. Também foi incorporada ao modelo uma estimativa de tempo morto entre a aplicação de potência e a resposta térmica. Os resultados mostram que o modelo apresenta bom desempenho em regimes monotônicos, como aquecimento e resfriamento livre. Entretanto, observa-se degradação significativa no regime próximo ao setpoint sob excitação intermitente, caracterizado por baixos valores de coeficiente de determinação e aumento do erro de previsão. Esses resultados indicam que, nas condições analisadas, a representação por um único estado térmico não é suficiente para capturar adequadamente a dinâmica do sistema nesse regime. Os achados destacam que a validade de modelos térmicos de um nó depende do regime de operação e da forma de excitação imposta ao sistema. **Palavras-chave:** modelagem térmica; identificação de sistemas; controle discreto; tempo morto.

1 Motivação

A modelagem de sistemas térmicos é um elemento central na área de Process Systems Engineering (PSE), especialmente em reatores aquecidos eletricamente para conversão termoquímica de biomassa, nos quais a temperatura influencia diretamente a cinética das reações e a distribuição de produtos (Basu, 2010; Bridgwater, 2012).

Em sistemas de escala laboratorial e piloto, o controle de temperatura é frequentemente realizado por estratégias *on/off* com histerese e modulação de potência por ciclo integral, devido à sua robustez e ampla aplicação industrial (Arifin e Yulianti, 2025; Lamarche et al., 2013; Nigim et al., 2002). Nessas condições, a potência térmica é aplicada de forma intermitente e dependente do estado do sistema, caracterizando uma operação em malha fechada com excitação limitada.

Modelos térmicos de parâmetro concentrado de um único nó são amplamente utilizados devido à sua simplicidade, assumindo que a temperatura interna é suficiente para representar a dinâmica global do sistema (Guo et al., 2025; Incropera et al., 2007; Zhao e Chen, 2016). No entanto, essa hipótese depende das condições de operação e da forma de excitação imposta ao sistema.

Em regimes monotônicos, como aquecimento e resfriamento livre, a dinâmica térmica tende a ser dominada por um mecanismo principal, permitindo boa representação por modelos de baixa ordem. Em contraste, sob operação próxima ao setpoint com controle discreto, a excitação intermitente, associada ao armazenamento de energia em múltiplas regiões e a atrasos térmicos, pode introduzir dinâmicas não observáveis a partir de uma única medição (Huba et al., 2021; Seborg et al., 2011).

Apesar do uso difundido desses modelos, ainda há escassez de estudos experimentais que avaliem sua validade sob condições reais de operação em malha fechada com excitação discreta (Perera et al., 2021).

Diante disso, este trabalho investiga experimentalmente o desempenho de modelos térmicos de um único nó na representação da dinâmica de um reator de pirólise aquecido eletricamente em escala piloto, avaliando a influência do regime de operação, com ênfase na operação próxima ao setpoint sob controle ON/OFF.

2 Metodologia

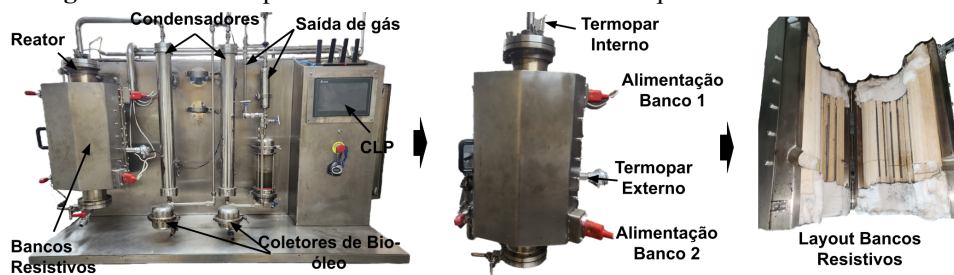
A avaliação do modelo térmico foi realizada a partir de dados experimentais obtidos em um reator de pirólise aquecido eletricamente em escala piloto, operando sob controle *on/off* com histerese e modulação de potência por

ciclo integral.

2.1 Sistema experimental e aquisição de dados

Os dados foram obtidos em um reator de pirólise aquecido eletricamente de forma indireta, constituído por uma câmara reacional cilíndrica envolvida por resistências elétricas. A potência térmica é fornecida por bancos de resistências acionados por relés de estado sólido, com controle implementado em CLP.

Figura 1: Reator de pirólise em escala de bancada com aquecimento elétrico indireto



Fonte: os autores.

A temperatura interna foi medida por um termopar inserido na região central da câmara, sendo adotada como variável representativa da dinâmica térmica do sistema. Uma segunda medição externa foi realizada, porém não foi considerada na modelagem devido ao baixo acoplamento térmico.

Os experimentos foram conduzidos sem alimentação de biomassa, de forma a isolar a dinâmica térmica do sistema. Os dados foram adquiridos com tempo de amostragem de 1 s, incluindo temperatura, potência aplicada e estado de acionamento. Após atingir o regime próximo ao setpoint, o sistema foi mantido sob controle on/off por aproximadamente 1,5 h, seguido de resfriamento até cerca de 40 °C.

2.2 Definição dos regimes operacionais

Para avaliação do desempenho do modelo, os dados foram segmentados em três regimes operacionais: (i) aquecimento monotônico, caracterizado pelo aumento contínuo da temperatura; (ii) operação próxima ao setpoint sob controle *on/off*, com excitação intermitente; e (iii) resfriamento livre, no qual a dinâmica é governada pela dissipação térmica.

Essa segmentação permite avaliar a validade do modelo sob diferentes condições de excitação.

2.3 Modelo e consideração do tempo morto

O comportamento térmico do sistema foi representado por um modelo de parâmetro concentrado de um único nó, incluindo contribuições lineares e não lineares de perda térmica, conforme descrito pela Equação (1):

$$\frac{dT(t)}{dt} = \alpha \cdot u(t - \theta) - a \cdot (T_K(t) - T_{amb,K}) - b \cdot \left[\left(\frac{T_K(t)}{1000} \right)^4 - \left(\frac{T_{amb,K}}{1000} \right)^4 \right] \quad (1)$$

onde $T_K(t)$ é a temperatura interna do reator em Kelvin, $T_{amb,K}$ é a temperatura ambiente em Kelvin, $u(t)$ representa a potência aplicada, e α , a e b são parâmetros ajustados a partir dos dados experimentais. O termo linear representa efeitos de condução e convecção, enquanto o termo não linear descreve a contribuição radiativa.

Para representar o atraso térmico entre a aplicação de potência e a resposta observada, foi considerado um tempo morto θ , estimado a partir do início do aquecimento com base em um limiar de detecção de 0,5 °C.

2.4 Identificação e métricas de avaliação

A identificação dos parâmetros foi realizada em ambiente MATLAB por meio da simulação numérica da equação diferencial e ajuste aos dados experimentais. Os parâmetros do modelo foram estimados por um procedimento de otimização baseado em busca em grade com refino local. A seleção dos parâmetros foi conduzida pela minimização de uma função objetivo definida a partir do erro entre a temperatura simulada e experimental, incorporando restrições associadas à consistência física da resposta térmica, como limites admissíveis dos parâmetros e comportamento dinâmico esperado.

Os ajustes foram realizados separadamente para cada regime operacional e de forma global, utilizando, neste último caso, todos os dados experimentais simultaneamente, permitindo avaliar a consistência paramétrica

do modelo frente à variação das condições de operação. A qualidade do ajuste foi avaliada por meio do erro quadrático médio (RMSE) e do coeficiente de determinação (R^2), calculados para cada regime e para o ajuste global. Adicionalmente, foram comparados os resultados com e sem a inclusão do tempo morto, permitindo avaliar sua influência na representação da dinâmica térmica.

3 Resultados e Discussão

3.1 Desempenho do modelo nos diferentes regimes

A Tabela 1 apresenta o desempenho do modelo de um nó nos diferentes regimes operacionais, em termos de RMSE e coeficiente de determinação (R^2). No regime de aquecimento, o modelo representa adequadamente a dinâmica do sistema, com valores elevados de R^2 e redução significativa do erro com a inclusão do tempo morto. Esse comportamento indica que, sob excitação monotônica, a dinâmica térmica é predominantemente governada pela entrada de energia, podendo ser descrita por um modelo de baixa ordem.

No regime de resfriamento livre, o modelo apresenta desempenho ainda mais consistente, com valores de R^2 próximos de 1 e baixa variabilidade dos parâmetros. A inclusão do tempo morto não produz melhorias relevantes, indicando que a dinâmica é dominada por mecanismos de dissipação térmica bem representados por uma abordagem lumped. Em contraste, no regime próximo ao setpoint, observa-se uma degradação significativa do desempenho do modelo. Os valores de R^2 tornam-se baixos ou negativos na ausência de tempo morto e permanecem limitados mesmo após sua inclusão, com valores elevados de RMSE.

Cabe destacar que os parâmetros foram estimados considerando restrições associadas à consistência física da resposta térmica. Ainda assim, o modelo não foi capaz de representar adequadamente a dinâmica nesse regime, conforme evidenciado pelos baixos valores de R^2 e elevados erros de predição. Ressalta-se que o sistema opera em malha fechada sob controle ON/OFF, o que implica excitação limitada e dependente do estado, podendo impactar a identificação dos parâmetros. Entretanto, a degradação consistente do desempenho observada nesse regime sugere que a limitação não decorre apenas de ajustes inadequados, indicando também influência da estrutura do modelo na incapacidade de capturar os fenômenos dominantes sob excitação intermitente nas condições analisadas.

3.2 Inconsistência dos parâmetros identificados

A Tabela 1 apresenta a faixa de variação dos parâmetros identificados para o modelo de um nó nos diferentes regimes operacionais, permitindo avaliar sua consistência sob distintas condições de excitação.

Tabela 1: Desempenho do modelo de um nó nos diferentes regimes operacionais

Regime	RMSE (sem θ)	R^2 (sem θ)	RMSE (com θ)	R^2 (com θ)
Aquecimento	7 – 21	0.50 – 0.97	3 – 14	0.90 – 0.99
Regime (550 °C)	10 – 31	-1.54 a -0.80	5 – 25	-0.25 a 0.34
Resfriamento livre	4.4 – 6.8	0.994 – 0.997	4.4 – 6.8	0.994 – 0.997

Observa-se que, nos regimes de aquecimento e resfriamento livre, os parâmetros apresentam comportamento consistente, mantendo ordem de grandeza compatível entre experimentos. Em contraste, no regime próximo ao setpoint, a dispersão observada sugere perda de significado físico dos parâmetros identificados, indicando que não existe um conjunto único capaz de representar adequadamente o sistema nessas condições.

3.3 Análise da consistência paramétrica

A Tabela 2 apresenta a faixa de variação dos parâmetros identificados para o modelo de um nó nos diferentes regimes operacionais, permitindo avaliar sua consistência sob distintas condições de excitação.

Tabela 2: Faixa dos parâmetros identificados para o modelo de um nó nos diferentes regimes

Regime	α	a	b
Aquecimento	0.0050 – 0.0101	3.2×10^{-14} – 1.0×10^{-4}	2.3×10^{-14} – 1.3×10^{-13}
Regime (550 °C)	0.0066 – 0.0075	9.67×10^{-5} – 9.99×10^{-5}	8.62×10^{-14} – 1.00×10^{-13}
Resfriamento livre	0.0050 (fixo)	7.90×10^{-5} – 8.24×10^{-5}	9.00×10^{-14} – 1.04×10^{-13}

Observa-se que, nos regimes de aquecimento e resfriamento livre, os parâmetros apresentam comportamento consistente, mantendo ordem de grandeza compatível entre experimentos e resultando em bom desempenho do modelo. No regime próximo ao setpoint, diferentemente do esperado, os parâmetros identificados também

apresentam baixa variabilidade entre os ensaios, assumindo valores próximos entre si e consistentes com aqueles obtidos nos demais regimes.

Entretanto, mesmo com essa consistência paramétrica, o modelo apresenta baixo desempenho preditivo no regime próximo ao setpoint, evidenciado pelos baixos valores do coeficiente de determinação. Esse resultado indica que a limitação observada não está associada à variabilidade dos parâmetros, mas à capacidade da estrutura do modelo em representar adequadamente a dinâmica do sistema nessas condições.

3.4 Limitações do modelo de um nó sob excitação discreta

Os resultados apresentados nas seções anteriores evidenciam que o modelo térmico de um único nó apresenta desempenho adequado apenas em regimes caracterizados por dinâmica dominante única, como no aquecimento monotônico e no resfriamento livre. Nessas condições, a dinâmica térmica pode ser representada de forma agregada por um único estado, resultando em boa capacidade de ajuste e consistência dos parâmetros identificados.

No regime próximo ao setpoint, entretanto, o sistema opera sob excitação intermitente imposta pelo controle *on/off* com histerese, o que resulta em uma entrada térmica discreta e dependente do estado. Essa condição introduz correlação entre entrada e saída e reduz a efetividade da excitação para fins de identificação. Ainda assim, os resultados indicam que a degradação do desempenho do modelo não pode ser atribuída exclusivamente a limitações do procedimento de identificação.

Para avaliar a capacidade de generalização da estrutura do modelo, foi realizado um ajuste global utilizando dados de todos os experimentos no regime próximo ao setpoint. O modelo de um único nó, mesmo ajustado globalmente, apresentou desempenho limitado, com parâmetros estimados de $\alpha = 7.5 \times 10^{-3}$, $a = 9.72 \times 10^{-5}$ e $b = 8.52 \times 10^{-14}$, e erro médio associado de $RMSE = 0.75$ em termos normalizados. A Figura 2 ilustra a comparação entre a resposta do modelo global e os dados experimentais, evidenciando a incapacidade do modelo em representar adequadamente as oscilações e a dinâmica observada nesse regime.

Adicionalmente, foi avaliada uma estrutura de modelo alternativa, baseada na introdução de uma variável de estado adicional associada à dinâmica interna de armazenamento de energia. Essa abordagem apresentou melhora significativa na capacidade de representação do sistema no regime próximo ao setpoint, reduzindo discrepâncias observadas com o modelo de um único nó. Esse resultado reforça a hipótese de que a dinâmica observada não é plenamente capturada por um modelo de estado único nas condições analisadas.

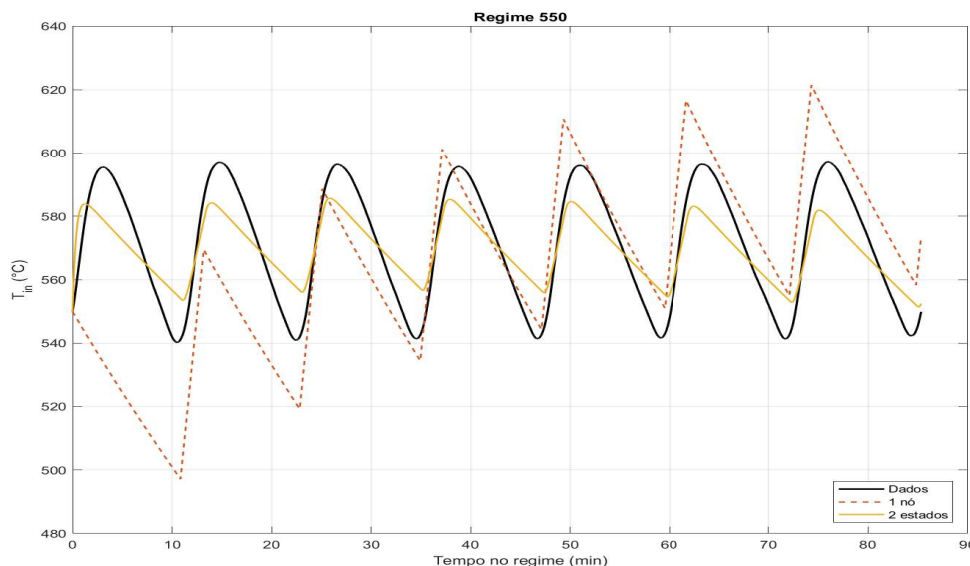
Do ponto de vista físico, o sistema apresenta múltiplas regiões com diferentes capacidades térmicas, incluindo resistências elétricas, parede do reator e volume interno. Essas regiões introduzem múltiplas capacitâncias e mecanismos de transporte de energia com diferentes escalas de tempo, resultando em atrasos distribuídos e defasagens internas entre a potência aplicada e a temperatura medida.

Sob excitação contínua, essas dinâmicas tendem a se manifestar de forma agregada, permitindo sua aproximação por modelos de baixa ordem. Entretanto, sob excitação intermitente, o sistema alterna entre regimes de acumulação e dissipação de energia, evidenciando dinâmicas internas não observáveis a partir de uma única medição.

Dessa forma, os resultados indicam que a limitação do modelo de um único nó não decorre apenas de dificuldades de ajuste ou da forma de excitação, mas também da capacidade da estrutura adotada em representar adequadamente a dinâmica observada nas condições analisadas.

Esse comportamento se reflete diretamente na degradação do desempenho preditivo e na incapacidade de generalização do modelo entre diferentes condições operacionais. Em particular, os valores reduzidos ou negativos do coeficiente de determinação indicam que o modelo não é capaz de representar sequer o comportamento médio dos dados experimentais no regime próximo ao setpoint. A limitação observada levanta a necessidade de estruturas de modelagem capazes de representar explicitamente as dinâmicas internas do sistema.

Figura 2: Comparação qualitativa entre o modelo de um nó e uma abordagem com inclusão de dinâmica adicional no regime próximo ao setpoint.



Conforme ilustrado na Figura 2, a inclusão de dinâmica adicional permite recuperar qualitativamente a capacidade de representação do sistema no regime próximo ao setpoint, reduzindo significativamente as discrepâncias observadas com o modelo de um único nó.

Portanto, os resultados demonstram que a limitação do modelo de um único nó não está associada apenas à forma de excitação ou à identificabilidade dos parâmetros, mas também à limitação da estrutura do modelo em representar adequadamente a dinâmica do sistema sob excitação intermitente nas condições analisadas. Esses resultados indicam a necessidade de modelos com maior ordem estrutural para aplicações de predição e controle.

3.5 Avaliação do ajuste global

A capacidade do modelo de um único nó em representar diferentes condições operacionais por meio de um único conjunto de parâmetros foi avaliada por meio de ajustes globais, utilizando todos os dados experimentais simultaneamente. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Desempenho do ajuste global por regime

Regime	RMSE médio (°C)	R^2 médio	Faixa de R^2
Aquecimento	11.90	0.907	[0.597 ; 0.986]
Regime	31.38	-4.53	[-10.586 ; -1.049]
Resfriamento	2.56	0.999	[0.998 ; 0.999]

A Tabela 3 mostra que o modelo mantém desempenho consistente nos regimes de aquecimento e resfriamento, com valores médios elevados de coeficiente de determinação (R^2), indicando boa capacidade de generalização nessas condições. No regime de aquecimento, observa-se R^2 médio elevado, enquanto no resfriamento o desempenho permanece praticamente ideal, com valores próximos de 1. Em contraste, no regime próximo ao setpoint, o modelo apresenta desempenho significativamente inferior, com R^2 médio negativo e ampla variação entre experimentos, caracterizando falha de generalização.

A comparação entre os ajustes locais e globais evidencia que a limitação do modelo não está associada apenas à escolha dos parâmetros ou ao processo de identificação, mas também à capacidade da estrutura adotada em representar adequadamente as diferentes dinâmicas presentes no sistema sob excitação intermitente. Dessa forma, os resultados do ajuste global indicam que a representação por um único estado térmico não é suficiente

para descrever a dinâmica do sistema nas condições analisadas.

4 Conclusão

Os resultados mostram que o modelo apresenta bom desempenho nos regimes de aquecimento e resfriamento livre, mas desempenho limitado no regime próximo ao setpoint sob excitação intermitente. Nessas condições, a representação por um único estado térmico não se mostrou suficiente para descrever adequadamente a dinâmica observada.

Conclui-se que a validade de modelos térmicos de um nó depende do regime de operação, sendo limitada sob controle ON/OFF próximo ao setpoint. Os resultados indicam a necessidade de modelos com maior ordem estrutural para aplicações nessas condições.

Agradecimentos: O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, da Sociedade de Investigações Florestais (SIF) e da Fundação Arthur Bernardes (FUNARBE), no âmbito do projeto nº 212148. Este estudo contou com financiamento da Unidade EMBRAPPI Fibras Florestais, da Agropalma S.A. e da Fábrica Carioca de Catalisadores (FCC).

Referências

- Arifin & Yulianti, L. (2025). Design and Implementation of a Process Control System Using Bang-Bang Control for a Stirred Batch Reactor. *Journal of Physics: Conference Series*, 2942, 012015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2942/1/012015>
- Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. Academic Press.
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94.
- Guo, T., Kaneko, K., Le Bris, C., & Patera, A. T. (2025). Mathematical Modeling and Error Estimation for the Thermal Dunking Problem: A Hierarchical Approach. *arXiv preprint*.
- Huba, M., Bistak, P., Vrancic, D., & Zakova, K. (2021). Dead-Time Compensation for First-Order Dead-Time Processes: A Review. *Mathematics*, 9(13), 1519. <https://doi.org/10.3390/math9131519>
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (6ª ed.). Wiley.
- Lamarque, P., et al. (2013). Indirect heating reactor analysis and thermal control. *Applied Thermal Engineering*.
- Nigim, K., et al. (2002). Integral cycle control of electrical heating systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*.
- Perera, S. M. H. D., Wickramasinghe, C., Samarasinghe, B. K. T., & Narayana, M. (2021). Modeling of thermochemical conversion of waste biomass: A comprehensive review. *Biofuel Research Journal*, 32, 1481–1528. <https://doi.org/10.18331/BRJ2021.8.4.3>
- Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A., & Doyle, F. J. (2011). *Process Dynamics and Control* (3ª ed.). Wiley.
- Zhao, S.-Y., & Chen, Q. (2016). A thermal circuit method for analysis and optimization of heat exchangers with consideration of fluid property variation. *Applied Thermal Engineering*, 99, 397–407. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.090>