

Desenvolvimento de modelos de aprendizado de máquina para simulação e otimização de controles térmicos em planta automotiva

Guilherme Pereira¹; Mailson Santos¹; Rodrigo Lira¹; Mailson Santos¹; Alexandre Maciel¹; Carmelo Bastos-Filho¹

¹ Universidade de Pernambuco, Recife

{gcp, rcls, mmsf2, amam, carmelofilho}@ecomp.poli.br

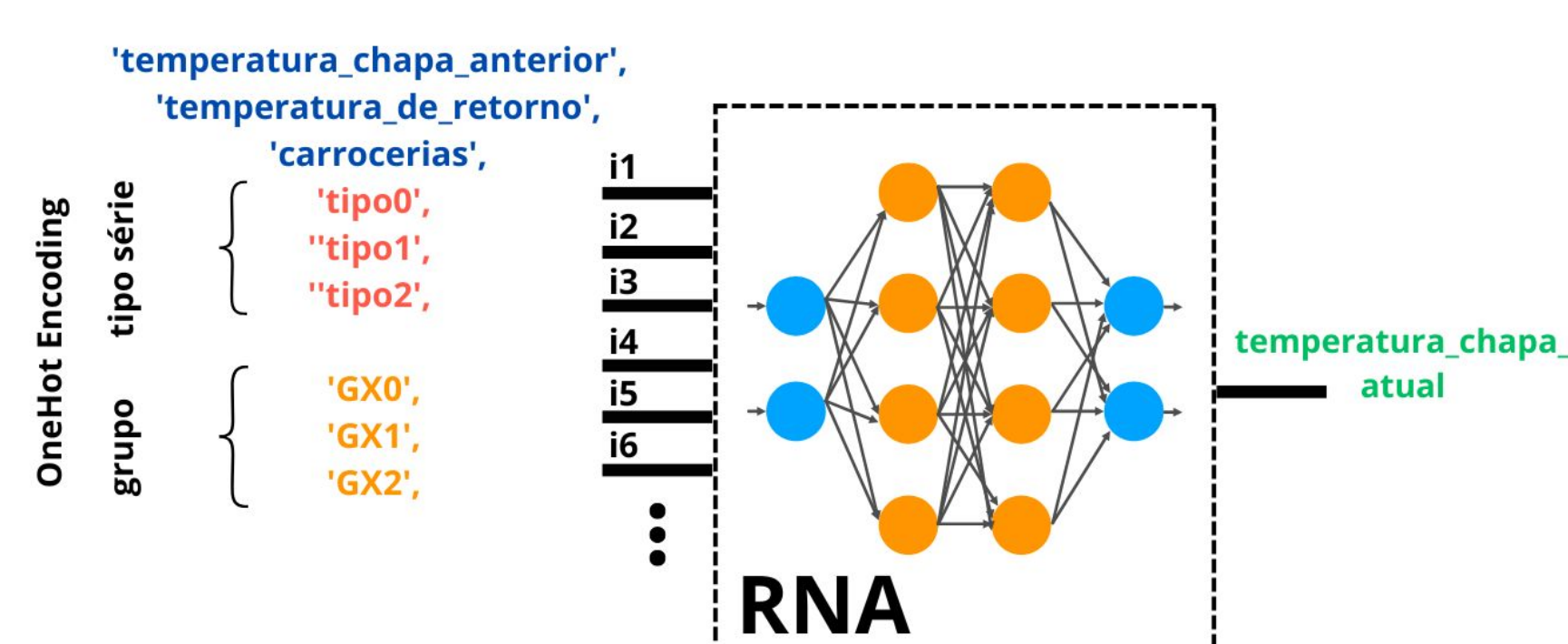
INTRODUÇÃO

O consumo energético é um fator crítico nos custos industriais, particularmente no setor de transformação. Em plantas automotivas, o setor de pintura demanda controle preciso de temperatura através de fornos industriais e sistemas HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*), que constituem parte substancial do consumo energético. A otimização destes sistemas é fundamental para a eficiência energética da operação. Este trabalho visa desenvolver um gêmeo digital por meio de modelos preditivos que simulem o comportamento dos fornos industriais, e sistemas HVAC. Esta representação digital permitirá a otimização dos parâmetros operacionais, visando maior eficiência energética de ambos os sistemas.

Modelagem e Otimização do Forno

Seguindo a metodologia proposta por Cavalcante et al. (2023), foi desenvolvido um modelo preditivo para a curva do *datapaq*. Essa curva permite medir o perfil térmico de um forno industrial. A arquitetura escolhida para o modelo foi uma rede neural Multilayer Perceptron (MLP), treinada com uma base de dados criada a partir de dados coletados de operação do forno industrial e exemplos de *datapaq* (Figura 1).

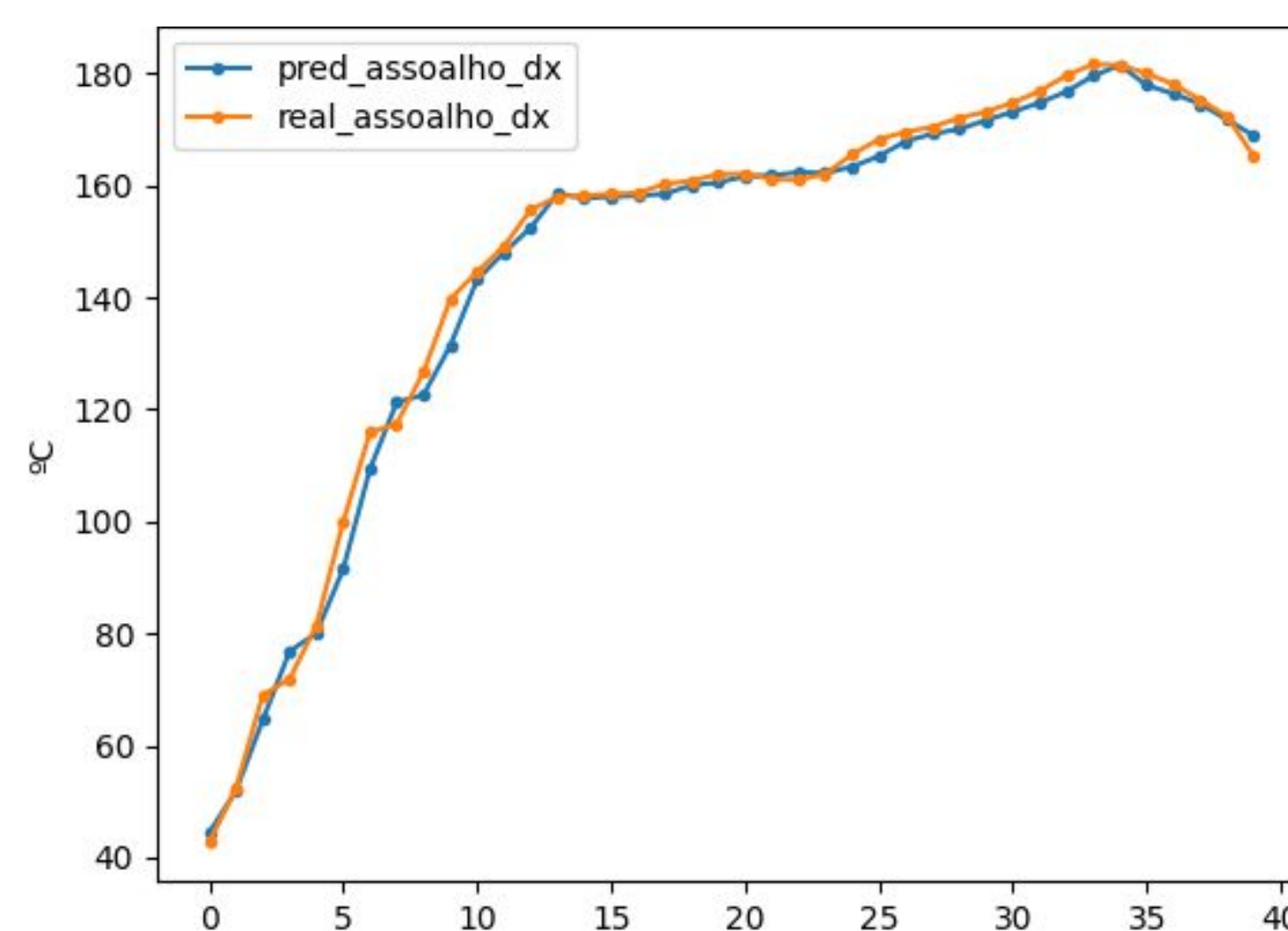
Figura 1 - Representação do modelo.



Fonte: próprio autor.

A MLP conseguiu realizar a predição completa da curva do *datapaq*, gerando os resultados, como o ilustrado na Figura 2. A validação do modelo através da estratégia *LeaveOneOut* demonstrou um desempenho consistente, alcançando um erro médio de **1,94 ± 0,41** ao longo de todas as predições realizadas.

Figura 2 - Resultado do modelo prevendo a série *assoalho_dx* do *datapaq*.



Fonte: próprio autor.

O modelo servirá como base para a implementação de um sistema de otimização, que buscará identificar os parâmetros operacionais ideais do forno. Este processo de otimização visa maximizar a eficiência energética do sistema, mantendo simultaneamente os padrões de qualidade necessários para o processo de cura da tinta automotiva.

Modelagem e Otimização do HVAC

A modelagem deste sistema visa desenvolver um modelo preditivo que, com base nas séries temporais das variáveis mais influentes, possa prever com precisão a temperatura insuflada. Essa previsão é essencial para garantir eficiência energética e conforto térmico nos ambientes atendidos.

Como a temperatura de insuflamento reage rapidamente às variações de entrada, utilizamos dados com medições a cada minuto, aplicando 4 lags e um horizonte de previsão de um passo à frente. Essa abordagem permite previsões eficientes e precisas, otimizando o desempenho do sistema de HVAC.

A arquitetura do modelos é composta por MLPs que são treinadas para generalizar o comportamento do HVAC com os resultados de teste como o mostrada na Tabela 1.

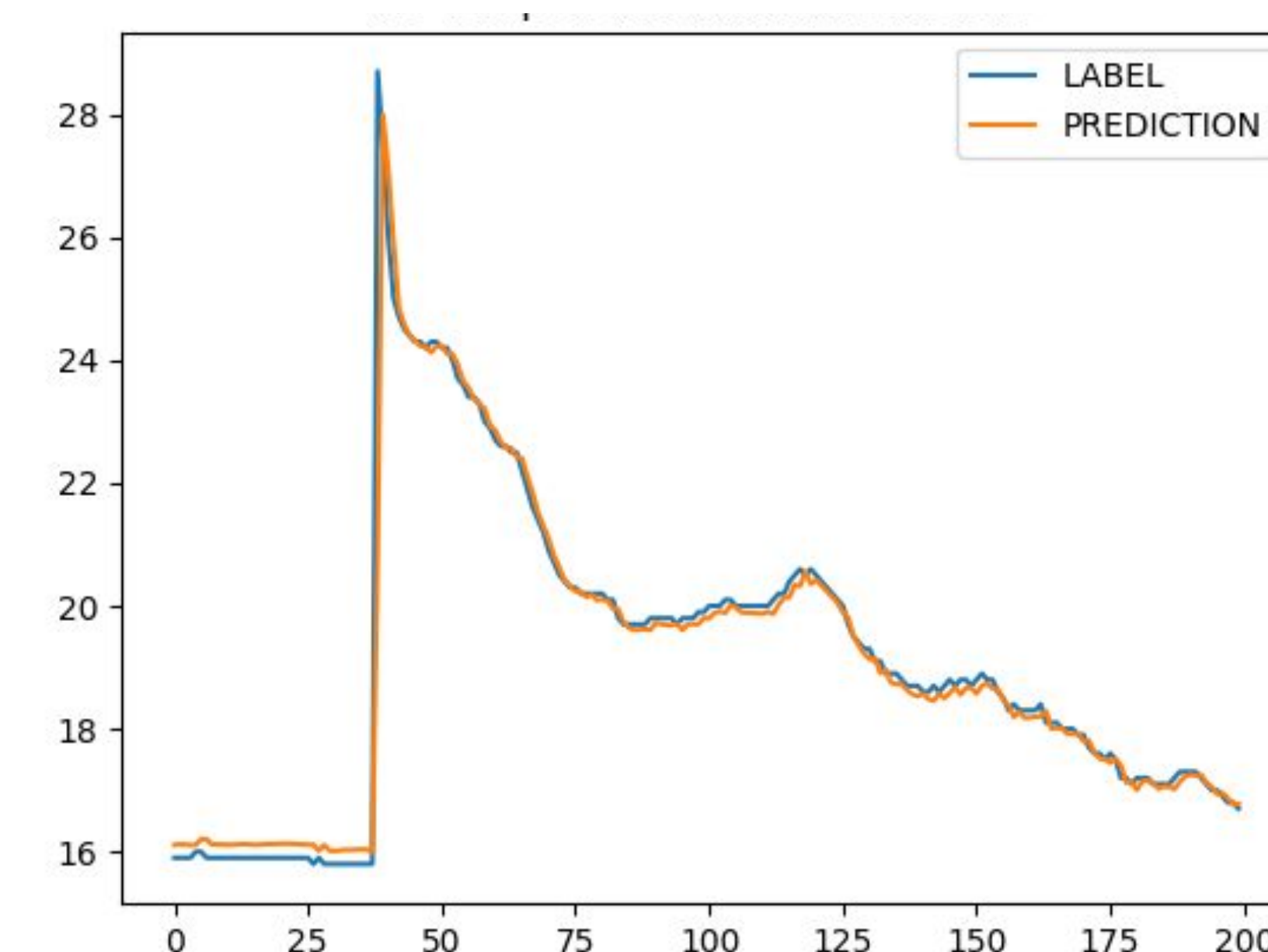
Tabela 1 - Comparação dos modelos.

Estatística	MAE	MSE	RMSE
MAX:	0,2876835952	0,5032106038	0,7093733882
MIN:	0,1064255477	0,06727759935	0,2593792578
MEAN:	0,1740904866	0,2666447578	0,496218008
STD:	0,05579387277	0,1344064931	0,1428721327

Fonte: próprio autor.

Ao analisar a série temporal da temperatura de insuflamento, observamos que o modelo consegue acompanhar os dados com um baixo erro, indicando uma alta precisão nas previsões (um exemplo na Figuras 3). Esse desempenho consistente evidencia a eficácia do modelo em replicar o comportamento real do sistema, o que é fundamental para aplicações que exigem confiabilidade e precisão nas estimativas.

Figura 3 - Previsão da temperatura de insuflamento.



Fonte: próprio autor.

Conclusões

Em suma, o desenvolvimento de um gêmeo digital para sistemas térmicos industriais representa uma contribuição significativa para a otimização energética em plantas automotivas. A abordagem proposta, combinando modelos preditivos e técnicas de otimização, possui potencial para reduzir custos operacionais e melhorar a eficiência dos processos, principalmente nos setores de pintura que utilizam fornos industriais e sistemas HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*).

REFERÊNCIAS

CAVALCANTE, E. S.; VASCONCELOS, L. G. S.; BRITO, K. D.; BRITO, R. P. **Neural network predictive control applied to automotive paint drying and curing processes**. Progress in Organic Coatings. 2023. V. 183.