



# ConBRepro

XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



IA nas Engenharias

29 nov. a 01  
de dezembro 2023

## Controle Térmico e Consumo Elétrico dos Controles Fuzzy e ON/Off em uma Célula de Aquecimento Ôhmico

**Davi Gervazio Chaves**

Coordenação de Engenharia Química – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Apucarana

**Gisely Luzia Ströher**

Coordenação de Licenciatura em Química – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Apucarana

**Gylles Ricardo Ströher**

Coordenação de Engenharia Química – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Apucarana

**Resumo:** O tratamento térmico na indústria de alimentos é um dos principais meios para aumentar o tempo de prateleira dos produtos. Um método de aquecimento que vem ganhando cada vez mais destaque, sobre as técnicas tradicionais, é o aquecimento via o efeito Joule, também denominado de aquecimento ôhmico. Embora esta tecnologia emergente seja eficaz, um dos seus desafios reside no controle de temperatura. O presente trabalho apresenta os resultados da aplicação de duas técnicas de controle para uma célula ôhmica em escala de bancada. Foram aplicados o controle tradicional On/Off e o controle baseado na lógica Fuzzy que é classificada como uma técnica de controle inteligente. Os resultados obtidos destacam a eficiência da lógica Fuzzy em relação ao controle ON/Off, provendo rápida estabilização da temperatura e menor consumo elétrico.

**Palavras-chave:** lógica Fuzzy, controle térmico, aquecimento ôhmico.

## Thermal Control and Electrical Consumption of Fuzzy and ON/Off controls in an Ohmic Heating Cell

**Abstract:** Heat treatment in the food industry is one of the main means of increasing the shelf life of products. A heating method that is gaining more and more prominence over traditional techniques is heating via the Joule effect, also called ohmic heating. Although this emerging technology is effective, one of its challenges lies in temperature control. The present work shows the results of applying two control techniques to a bench-scale ohmic cell. Traditional On/Off control and control based on Fuzzy logic, which is classified as an intelligent control technique, were applied. The results obtained highlight the efficiency of Fuzzy logic in relation to ON/Off control, demonstrating rapid temperature stabilization and lower electrical consumption.

**Keywords:** Fuzzy logic, temperature control, ohmic heating.

### 1. Introdução

As indústrias atuais empregam técnicas de preservação de alimentos por meio do tratamento térmico como método primordial para eliminar micro-organismos patogênicos e

inativar enzimas que provocam a deterioração dos produtos alimentícios. O tratamento térmico consiste, essencialmente, em submeter o alimento a uma temperatura específica por um período de tempo determinado, seguido de um resfriamento subsequente. Em busca de aprimorar ainda mais as técnicas de conservação de alimentos, uma tecnologia emergente que ganhou destaque é o tratamento térmico conhecido como aquecimento ôhmico.

O aquecimento ôhmico é uma tecnologia verdadeiramente inovadora que se baseia na condução de corrente elétrica através de um alimento, convertendo a energia elétrica em energia térmica, conforme descrito por Joule em 1840. Essa energia térmica é a responsável pelo aquecimento do alimento. Essa abordagem tem sido objeto de intensa pesquisa em diversos estudos envolvendo diferentes tipos de alimentos, como a polpa de mirtilo (Sarkis et al., 2011), soro de leite (Costa, 2017) e queijo (Rocha, 2019).

No entanto, é importante mencionar que o uso dessa técnica enfrenta algumas dificuldades significativas, principalmente devido ao seu aquecimento rápido. O controle preciso da temperatura torna-se um desafio a ser superado nesse contexto.

O controle mais simples é denominado de duas posições ou On/Off, sendo que a saída do controlador assume somente dois valores: ligado ou desligado, e a resposta do controlador muda automaticamente toda vez que a variável controlada passa o valor setado, porém esse controle apresenta uma grande imprecisão devido a seus valores de saída oscilarem bastante além de haver o desgaste do elemento controlador do sistema (GARCIA, 2017). Uma alternativa viável para substituir o controle de duas posições é a aplicação da lógica fuzzy que é uma forma inovadora de examinar informações imprecisas e através dessa manipulação de dados possibilitar estratégias de tomadas de decisão em problemas mais complexos, por esse motivo também chamado de sistema inteligente por simular o raciocínio humano (SIMÕES, 2007).

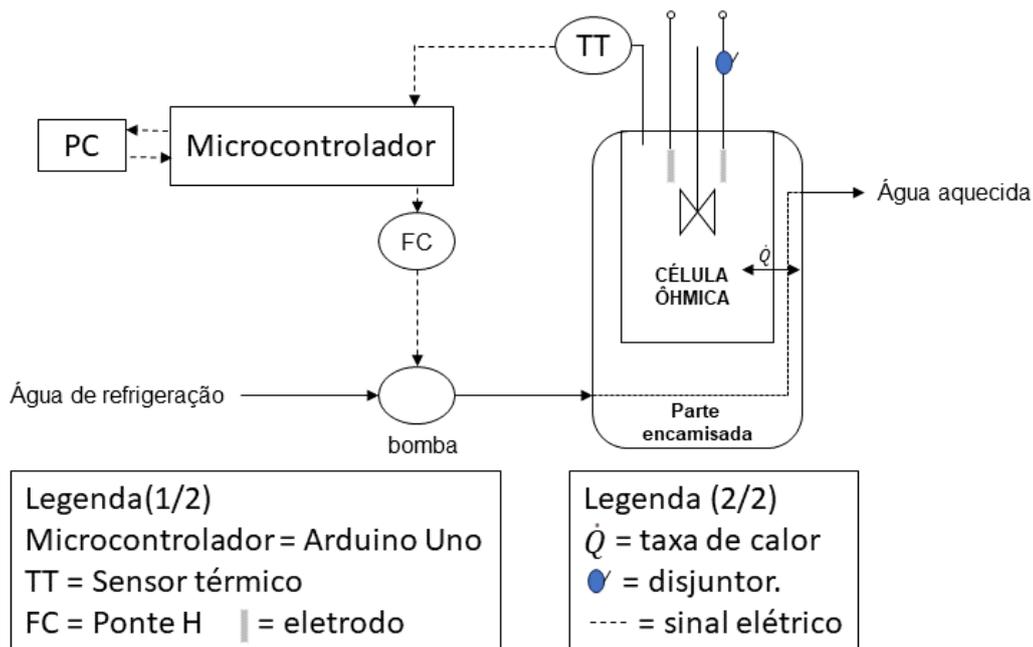
A lógica fuzzy fundamenta-se em função da fuzzificação, inferência e defuzzificação. No processo de fuzzificação, os dados imprecisos obtidos são convertidos em conjuntos fuzzy, na inferência, esses conjuntos de entrada são avaliados por regras pré-estabelecidas, são modificados e encaminhados para os conjuntos de saída, já na defuzzificação, há a conversão do conjunto fuzzy de saída para um valor preciso de resposta (SIMÕES, 2007). Neste contexto, o presente trabalho apresenta os resultados obtidos para o controle de térmico de uma célula ôhmica em escala de bancada com a aplicação da técnica de controle On/Off e o controle inteligente Fuzzy.

## **2. Materiais e Métodos**

A célula ôhmica, mostrada na Fig. 1, é composta por um béquer encamisado com capacidade total de 600 ml e dois eletrodos de platina de dimensões 3x3 cm. Os eletrodos estão em contato com 450 ml de uma solução simulante líquida e um sensor térmico modelo ds18b20 que adquire a temperatura média da solução que é monitorada por um sistema supervisão usando uma placa Arduino uno em conjunto com o programa Matlab.

A célula ôhmica está sob a influência de um agitador magnético (marca LUCADAMA e modelo 01/09). Este sistema sofre resfriamento constante devido à passagem de água, proveniente de um reservatório, que é bombeada por meio de uma bomba 12 volts. A vazão de bombeamento é controlada por meio de uma ponte H (BTS7960). Os eletrodos da célula ôhmica recebem uma tensão elétrica de 21 V/m que é controlada por um disjuntor.

Figura 1 – Representação da célula ôhmica, aquisição de dados e sistema de controle térmico



Fonte: Autoria Própria (2023)

A lógica Fuzzy foi desenvolvida com apenas uma variável de entrada, sendo esta variável o erro, obtido pela diferença entre a temperatura de *setpoint* e a temperatura atual da solução indicada pelo sensor de temperatura. Na entrada, o valor do erro foi limitado em um intervalo de [-3,10] e fragmentado em 5 classes sumarizadas, na Tabela 1.

Tabela 1 – Configuração do valor de entrada

Variável	Erro				
Função de pertinência	negativo	negativo	neutro	positivoM	positivo
Tipo	trapmf	Trimf	trimf	trimf	trapmf
Faixa	-6 -4 0.32 0.32	0.97 3.03 4.54	1.07 1.93 2.51	-0.505 0.47 5.94	3.55 5.62 11.8 14

Fonte: Autoria Própria (2023)

Já os valores de saída da lógica difusa, PWM, ficaram em uma escala de [0,255] como mostra a Tabela 2. Com esses dados estabelecidos, foi desenvolvido um conjunto de regras “se-então” responsáveis pelo valor de saída da lógica fuzzy. Ao todo, o sistema de controle inteligente teve 5 regras de inferência, na qual são apresentadas na tabela 3:

Tabela 2 – Configuração do valor de saída

Variável	PWM				
Função de pertinência	baixo	pequenoM	medio	altoM	alto
Tipo	trapmf	trimf	trimf	trimf	trapmf
Faixa	-2 -2 48.9 51.6	-6 36.02 66.82	12.43 45.93 49.93	23.33 24.63 69.13	252 252 300 400

Fonte: Autoria Própria (2023)

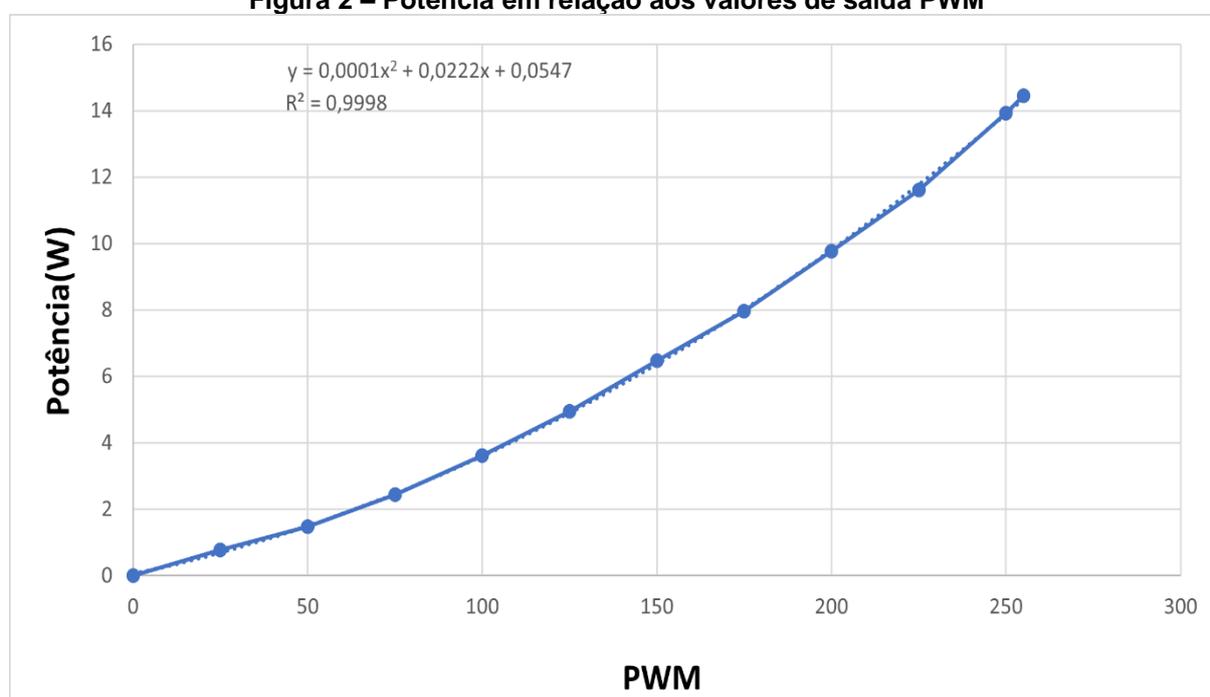
**Tabela 3 – Conjunto de regras condicionais**

Erro	PWM				
	baixo	pequenoM	medio	altoM	alto
negativo	-	-	-	-	+
negativoM	-	-	-	+	-
neutro	-	-	+	-	-
positivoM	-	+	-	-	-
positivo	+	-	-	-	-

Fonte: Aatoria Própria (2023)

A potência de consumo elétrico da bomba d'água de resfriamento foi obtida para vários valores de entrada de PWM na ponte H, os resultados são mostrados na Fig. 2. Um polinômio de ordem dois foi suficiente para descrever o perfil de consumo elétrico em função do PWM aplicado.

**Figura 2 – Potência em relação aos valores de saída PWM**

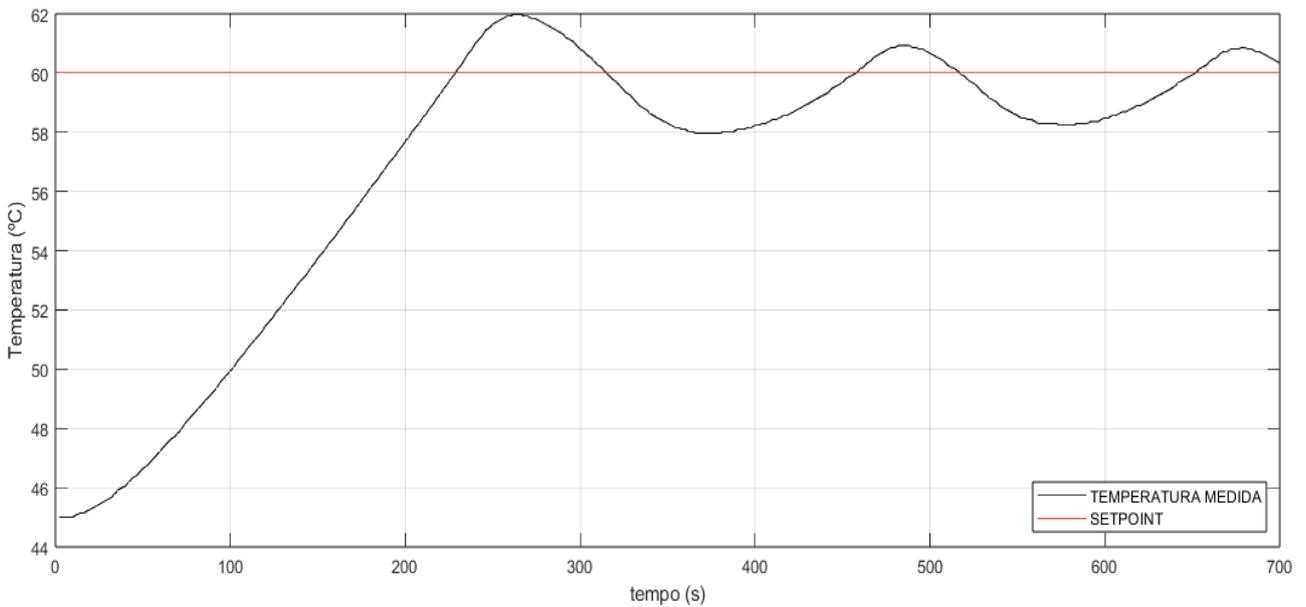


Fonte: Aatoria Própria (2023)

### 3. Resultados

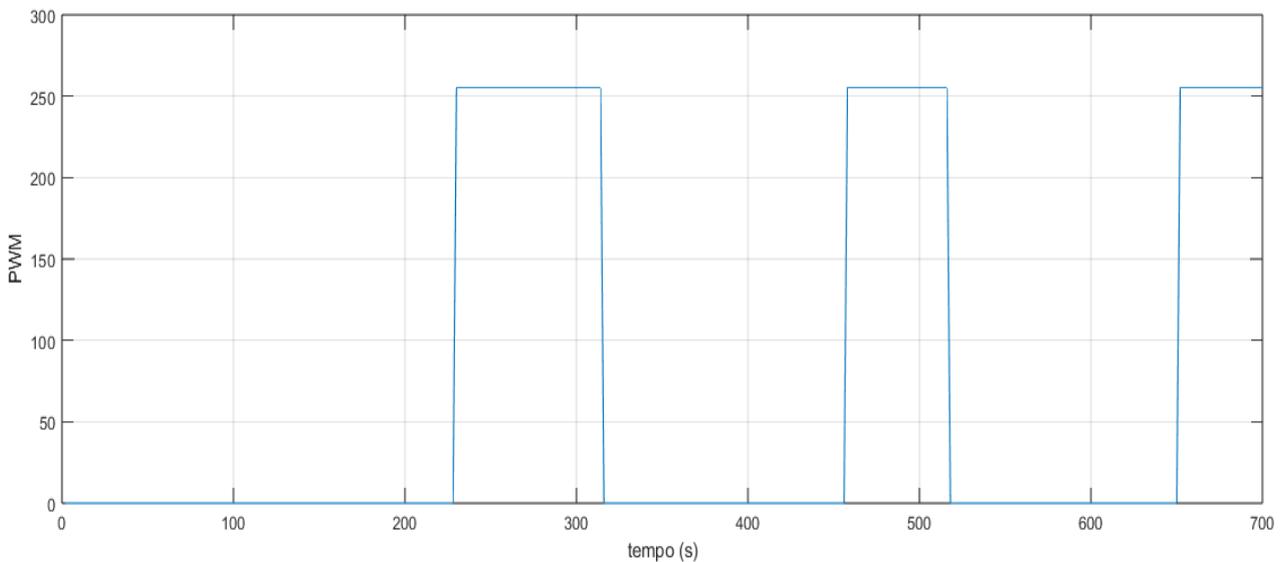
Inicialmente avaliou-se o controle On/Off para a temperatura de *setpoint* de 60°C. Neste, o sistema de refrigeração é acionado com potência máxima quando a temperatura ultrapassa o valor de *setpoint* e desligado quando a temperatura está abaixo do valor de *setpoint*. Os resultados são apresentados na Fig. 3, a qual ilustra a configuração de um sistema de segunda ordem (OGATA,2010). O sobre-sinal (*overshoot*) foi de 62°C e após esse pico, a temperatura da solução ficou em clico com um *off-set* de ± 2°C. Na Fig. 4 é mostrado a ação de controle do controlador On/Off.

**Figura 3 – Histórico da temperatura da solução para o controle de duas posições e *setpoint* de 60°C**



**Fonte: Aatoria Própria (2023)**

**Figura 4 – Valor PWM para o controle liga desliga**

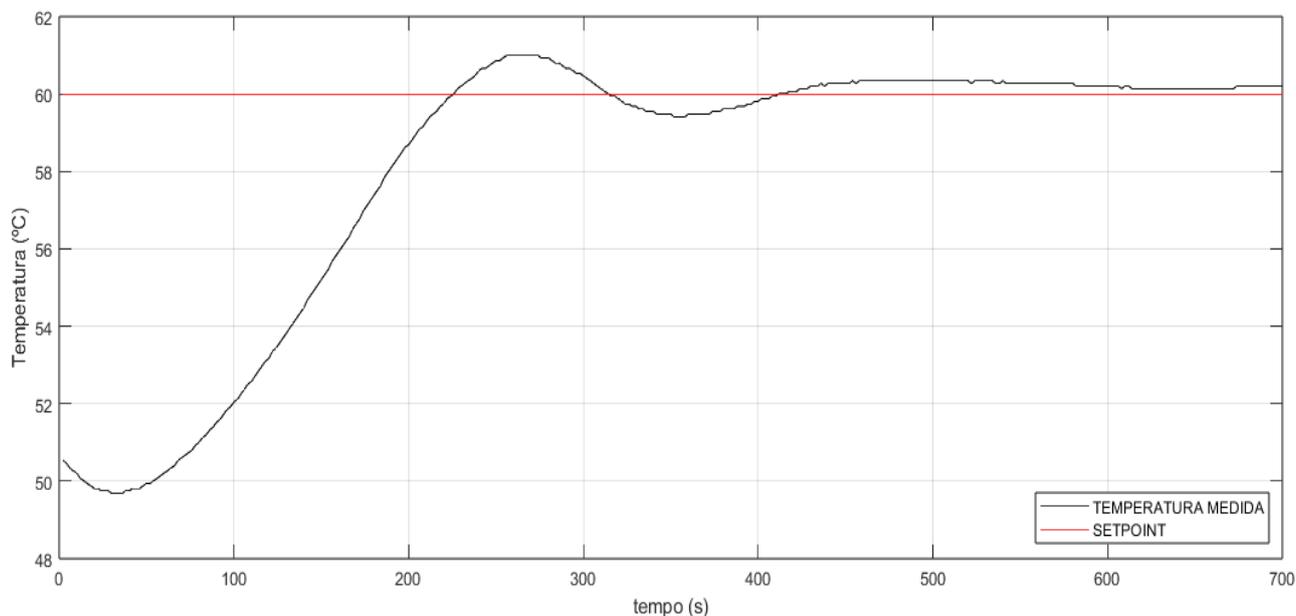


**Fonte: Aatoria Própria (2023)**

Por meio do histórico de acionamento do sistema de resfriamento mostrado na Fig. 4 e do polinômio ajustado indicado na Fig. 2 foi obtido o consumo elétrico do sistema de resfriamento, obtendo-se um consumo de 0,67 Wh. Como argumenta Garcia (2017), por meio do controle On/Off, observa-se que a resposta de saída tende a repetir ciclicamente como mostrado na Fig. 4 em que há momentos de consumo e outros que não há.

A Fig. 5 apresenta os resultados obtidos com o controle Fuzzy, observa-se neste caso que o *overshoot* foi de 61°C, uma redução de 1°C em comparação com o obtido no controle ON/OFF e um *off-set* de 0,2°C.

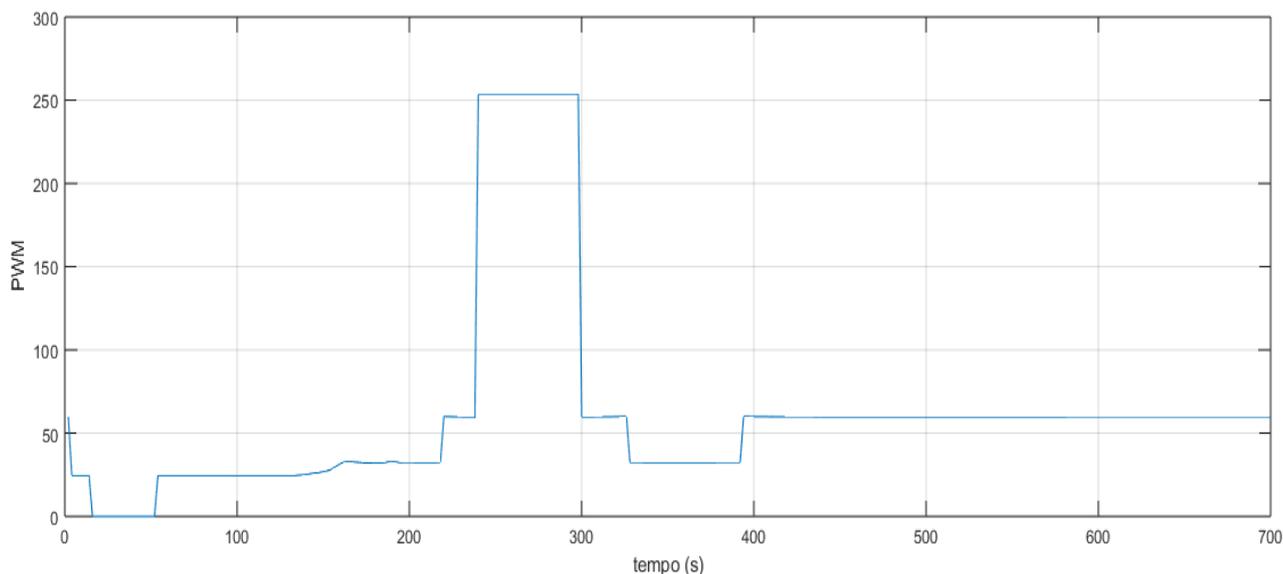
**Figura 5 –Histórico da temperatura da solução com o controle Fuzzy para *setpoint* de 60°C**



**Fonte: Aatoria Própria (2023)**

A Figura 6 apresenta o histórico da ação de controle. Em conjunto com o polinômio mostrado na Figura 2, foi obtido um consumo elétrico de 0,42 Wh, que equivale a uma redução de 37,3% em relação ao consumo elétrico do método On/Off.

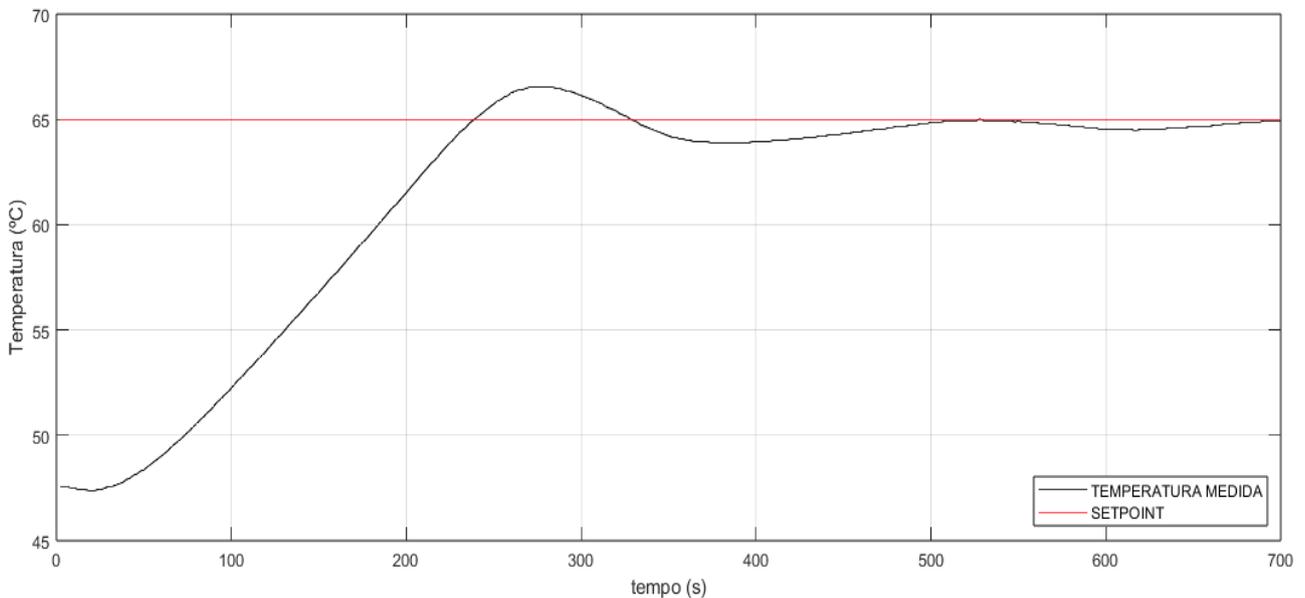
**Figura 6 – Ação de controle com controle Fuzzy para *setpoint* de 60°C**



**Fonte: Aatoria Própria (2023)**

Após a comparação desses dois controles, realizou-se experimentos para valores de *setpoint* de 65°C (Figuras 7 e 8) e 70°C (Figuras 9 e 10) somente utilizando a lógica difusa, para observar o desempenho do controle térmico e o consumo de energia nesses dois casos.

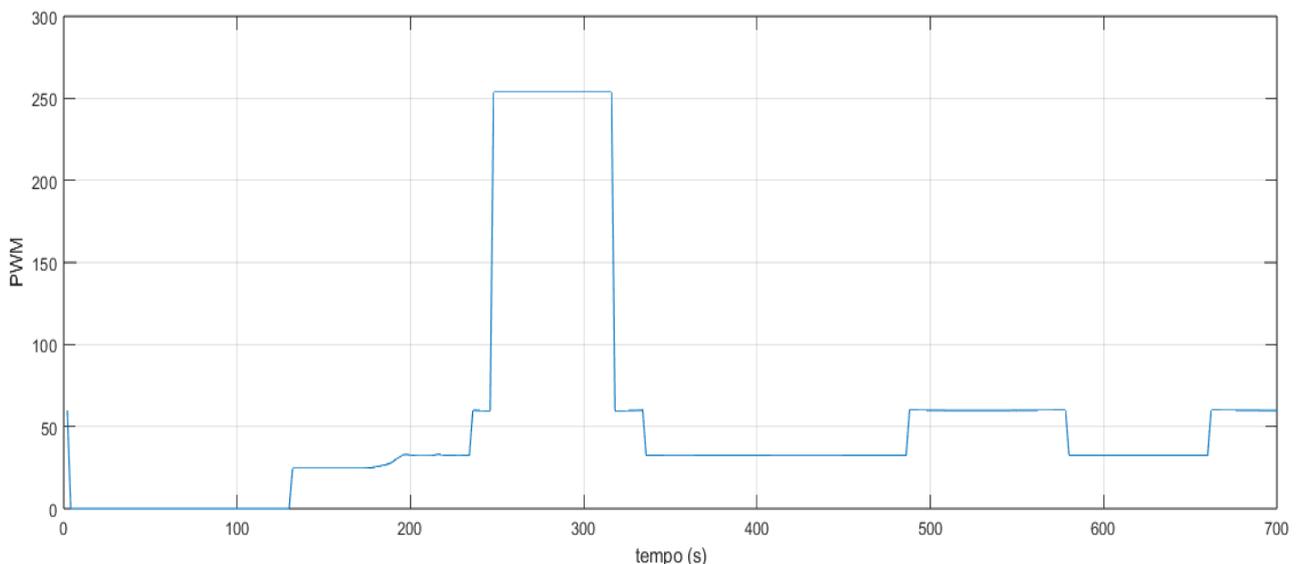
**Figura 7 – Histórico da temperatura da solução com controle Fuzzy e setpoint de 65°C**



**Fonte: Aatoria Própria (2023)**

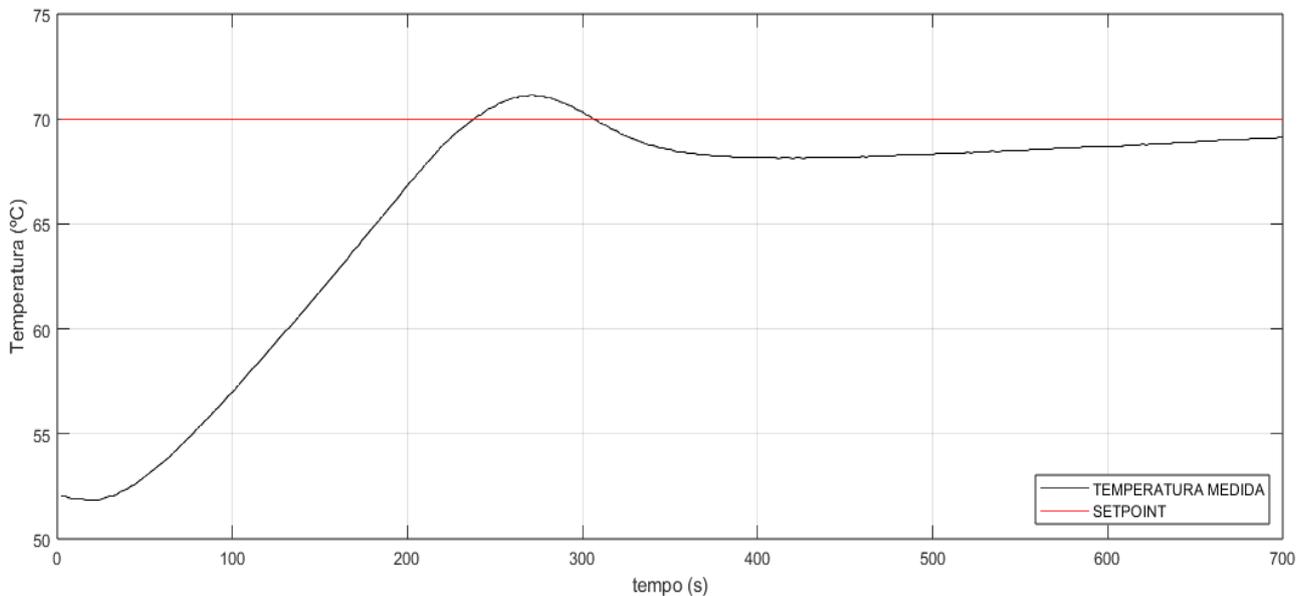
A Fig. 7 mostra que o *overshoot* foi de 1,5°C com um *off-set* de praticamente 0°C. Novamente, a partir do histórico da ação de controle, o consumo elétrico do sistema de resfriamento foi obtido, resultando em 0,39 Wh. Comparando os valores desse experimento com o realizado anteriormente, verificou-se uma leve diferença entre o gasto energético e um controle bem eficiente para ambos os casos.

**Figura 8 – Ação de controle com controle Fuzzy para setpoint de 65°C**



**Fonte: Aatoria Própria (2023)**

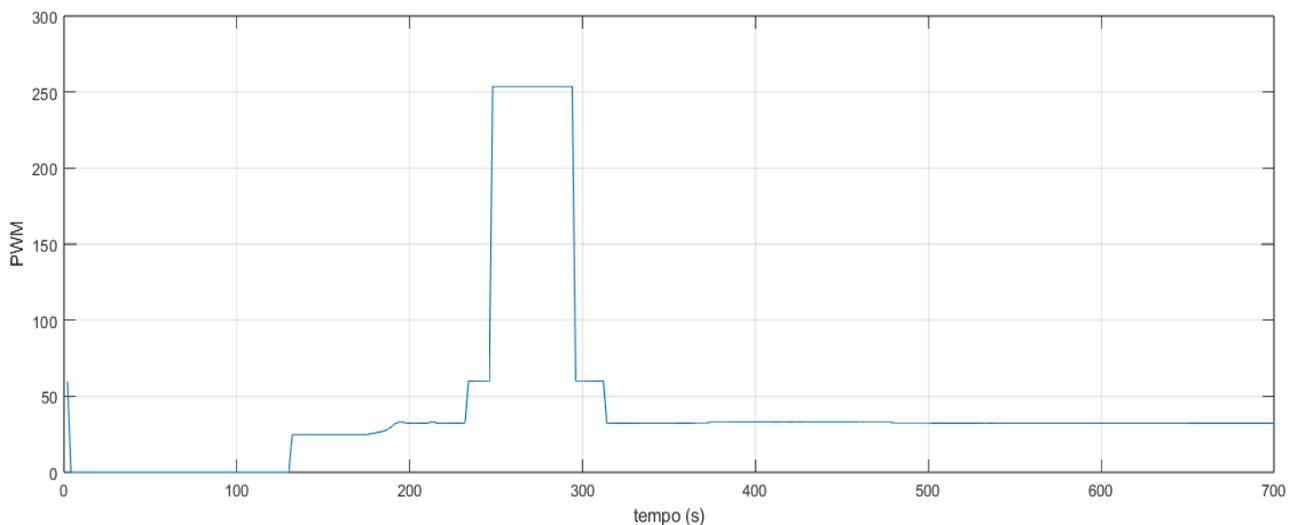
**Figura 9 – Histórico da temperatura da solução com o controle Fuzzy para *setpoint* de 70°C**



Fonte: Autoria Própria (2023)

No último caso, o *overshoot* foi de 1.1°C. A figura 10 apresenta a ação de controle ao longo do experimento. Mais uma vez, o consumo elétrico do sistema de resfriamento foi calculado, em que este resultou em 0,30 Wh.

**Figura 10 – Ação de controle com controle Fuzzy para *setpoint* de 70°C**



Fonte: Autoria Própria (2023)

#### 4. Conclusões

O presente trabalho avaliou brevemente dois métodos de controle térmico para uma célula ôhmica em escala de bancada, o controle tradicional On/Off e o controle Fuzzy. O controle de temperatura foi realizado por meio do controle da vazão de água de refrigeração que escoava através de um béquero encamisado. Os resultados obtidos, permitem concluir que, nas condições exploradas, o controle fuzzy teve melhor desempenho tanto no controle de temperatura quanto no consumo elétrico do sistema de refrigeração em relação ao controle On/Off.

## Referências

- COSTA, N. et al. **Aquecimento ôhmico em soro de leite:** características físicas, reológicas e microestrutura. Disponível em: <<https://proceedings.science/slaca/slaca-2017/trabalhos/aquecimento-ohmico-em-soro-de-leite-caracteristicas-fisicas-reologicas-e-microes?lang=pt-br>> Acesso em: 29 set. 2023.
- GARCIA, Claudio. **Controle de processos industriais:** Estratégias Convencionais. São Paulo: Ed. Blucher, 2017.
- JOULE, J. P. **National High Magnetic Field Laboratory.** Disponível em: <<https://nationalmaglab.org/education/magnet-academy/history-of-electricity-magnetism/pioneers/james-joule>>. Acesso em: 18 de set. de 2023.
- MARRO, A. A. et al. **Lógica fuzzy:** conceitos e aplicações. Disponível em: <[http://aquilesburlamaqui.wdfiles.com/local--files/logica-aplicada-a-computacao/texto\\_fuzzy.pdf](http://aquilesburlamaqui.wdfiles.com/local--files/logica-aplicada-a-computacao/texto_fuzzy.pdf)> Acesso em: 29 set. 2023.
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno.** 5. ed. Londres: Ed. Pearson, 2010.
- ROCHA, R. S. et al. **Processamento de Queijo Minas Frescal por aquecimento ôhmico.** Disponível em: <<https://proceedings.science/slaca/slaca-2019/trabalhos/processamento-de-queijo-minas-frescal-por-aquecimento-ohmico?lang=pt-br>> Acesso em: 20 set. 2023.
- SARKIS, J. R. **Construção de um sistema de aquecimento ôhmico e sua aplicação no tratamento térmico de polpa de mirtilo.** Porto Alegre, 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- SIMÕES, Marcelo G. **Controle e modelagem fuzzy.** 2. ed. São Paulo: Ed. Blucher, 2007.