

CONTROLADOR *FUZZY* APLICADO EM UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO COMERCIAL ¹

Tarcísio Souza de MELO²

Bacharel em Engenharia de Controle e Automação
IFSP/Câmpus São Paulo

André Ricardo Quinteros PANESI³

Mestre em Engenharia Mecânica/Unicamp
Docente do Departamento de Mecânica
IFSP/Câmpus São Paulo

RESUMO

O objetivo deste artigo é demonstrar uma alternativa ao controle de câmaras frigoríficas de pequeno porte, com a construção de um controlador baseado em lógica *fuzzy*. O presente trabalho objetivou efetuar o controle da velocidade de ventilação sobre o evaporador do sistema de refrigeração e uma ativação binária do compressor. O controle da velocidade de ventilação foi possível com a utilização de um motor *brushless*, controlando sua velocidade através de um sinal gerado pelo controle *fuzzy* e convertido em *PWM*. Através de testes efetuados, o controlador projetado demonstrou robustez no controle da temperatura em virtude da adição e controle da ventilação sobre o evaporador, conseqüentemente proporcionando uma melhor distribuição do frio na câmara.

Palavras-chave: Sistema de Refrigeração; Lógica *Fuzzy*; Microcontrolador.

Introdução

A partir da descoberta do ciclo de compressão do vapor, foi possível a elaboração de equipamentos de refrigeração utilizados atualmente. Em 1843 Jacob Perkins descreveu o ciclo de compressão do vapor, em que o resfriamento se produzia pela evaporação e condensação de líquidos voláteis (PANESI, 2015, p. 3). Esse ciclo

¹ Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Controle e Automação. Orientador Prof. Me. André Ricardo Quinteros Panesi.

² Endereço eletrônico: tarcsm@gmail.com

³ Endereço eletrônico: ricardopanesi@yahoo.com.br

ocorre de forma ininterrupta dentro de sistemas de refrigeração, podendo gerar o controle da variação da temperatura no ambiente (VENTURINI; PIRANI, 2005, p. 38).

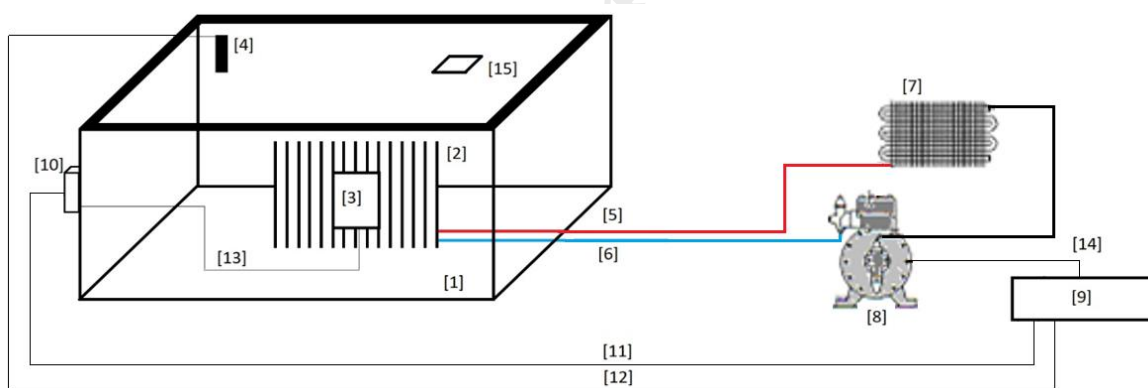
De forma geral sistemas de refrigeração são compostos por quatro elementos (CORREIA, 2016, p. 95). O evaporador, responsável pela transmissão de energia térmica do meio a refrigerar para outro; o compressor, que comprime o fluido refrigerante permitindo sua circulação no sistema; o condensador, que permite a transmissão de energia térmica do sistema para o meio exterior; e a válvula de expansão, onde ocorre a diminuição do fluido refrigerante.

Um dos principais problemas na utilização de sistemas de refrigeração é o consumo energético. A exemplo do setor comercial, 47% da energia consumida é destinada a sistemas de refrigeração (PANESI, 2015, p. 4). Devido aos custos atrelados ao consumo de energia elétrica, faz-se necessário o aprimoramento destes sistemas, através de lógicas de controle que busquem alcançar a resposta desejada e uma eficiência energética.

Criada por Lofti Zadeh, a lógica *fuzzy* pode ser implementada em tarefas em que a tomada de decisão depende de variáveis individuais que não são definidas em termos exatos, em que um ser humano devidamente treinado pode efetuar e gerenciar o controle de um processo. É muito importante salientar que a utilidade dos controladores *fuzzy*, que não necessitam de modelagem matemática clássica dos sistemas físicos, depende apenas do conhecimento prévio que um especialista possui sobre o processo que deseja controlar (GARCIA; BANDARRA, 2006, p. 3). Outra vantagem da utilização da lógica *fuzzy* é sua capacidade de gerar respostas baseadas em situações que possuem informações vagas, ambíguas, qualitativamente incompletas e/ou imprecisas, situação a qual a lógica booleana não atende de forma adequada (CAVALCANTI, 2012, p. 6).

Os motores do tipo *brushless* são máquinas que possuem por característica a ausência de contatos mecânicos (escovas), utilizando ímãs permanentes que substituem os enrolamentos nas máquinas de indução. Devido a inexistência de contatos mecânicos, este tipo de máquina tem por característica a diminuição de perdas por efeito *Joule*, não necessitando de um sistema de refrigeração e conseqüentemente possui uma menor necessidade de manutenção graças ao baixo desgaste mecânico (PERIN; HOFFMAN; JANUÁRIO, 2016, p. 1).

Desta forma, este trabalho busca efetuar uma pesquisa de caráter exploratório e descritivo, com apresentação de análises qualitativas e quantitativas a respeito de uma alternativa ao controle de sistemas de refrigeração comercial de pequeno porte em malha fechada. O controle será efetuado através da velocidade da ventilação que atua sobre o evaporador do sistema de refrigeração (componente responsável pelas trocas de energia térmica entre o meio a ser controlado e o fluido refrigerante) e a temperatura da câmara. O controle de velocidade de ventilação e temperatura de *setpoint* ocorrerá através de duas variáveis coletadas do sistema, sendo a primeira a temperatura da câmara de resfriamento e a segunda a variação de temperatura durante o resfriamento. É gerado, através da elaboração de um controlador utilizando um microcontrolador (NodeMCU-32S) programado em linguagem C++ com a utilização de lógica *fuzzy*, um sinal que efetuará o controle da velocidade de um motor *brushless* responsável pela ventilação, via Modulação de Largura de Pulso (PWM – *Pulse Width Modulation*) e o controle de uma temperatura de *setpoint*.



Nº	Definição	Nº	Definição
1	Câmara Frigorífica	9	Sistema de Controle – Esp 32s – Lógica <i>Fuzzy</i>
2	Evaporador	10	Drive Ponte H L298N
3	Ventilação sobre o evaporador	11	Sinal PWM (0 ~ 3.3V) para o Drive Ponte H [10]
4	Sensor de Temperatura	12	Sinal de Temperatura Fornecida pelo sensor de temperatura [4]
5	Meio Refrigerante – Alta	13	Sinal PWM (0 ~ 10V) para o Ventilador [3]

	Temperatura		
6	Meio Refrigerante – Baixa Temperatura	14	Sinal Binário de ativação do Compressor
7	Condensador	15	Entrada do Sinal de distúrbio para a câmara de refrigeração
8	Compressor		

Figura 1: Croqui do sistema de refrigeração
Fonte: Autores

Procedimento experimental

Foi fornecido, pelo laboratório de refrigeração e ar condicionado do Departamento de Mecânica do Instituto Federal de São Paulo (IFSP) Campus São Paulo, um sistema de refrigeração completo sendo constituído de: compressor, condensador, evaporador, válvula de expansão e um manômetro, responsável pela medição da pressão do fluido refrigerante no compressor.



Figura 2: Compressor, Condensador e Motor do Sistema de Refrigeração
Fonte: Autores

O ambiente que se deseja efetuar o controle de temperatura é constituído por um reservatório composto por poliuretano expandido com dimensões de 77cm x 57 cm x 40 cm. Este ambiente é responsável por comportar o evaporador do sistema de refrigeração, o sistema de ventilação anexo a ele, o sensor de temperatura e em sua tampa existe uma abertura responsável pelo sinal de distúrbio térmico.

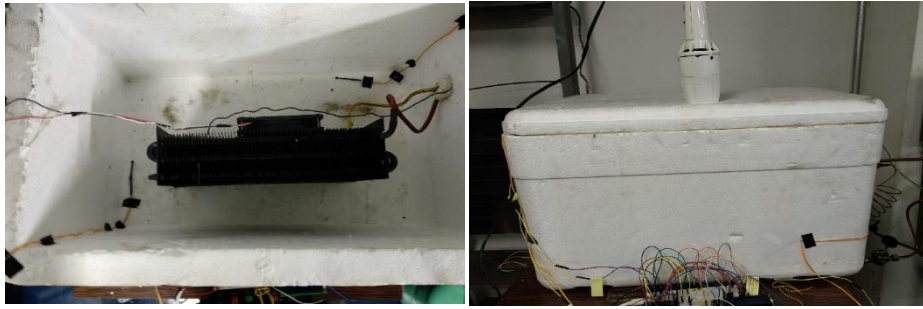


Figura 3: Ambiente de controle de temperatura. Vista superior (esquerda). Vista externa (direita)
Fonte: Autores

O sensor de temperatura utilizado é o termistor 103 NTC (Negative Temperature Coefficient) 10K Ohms 5mm, possui como característica a diminuição de sua resistência conforme a elevação de sua temperatura em razão exponencial. Seu *range* de detecção é de -55°C a 125°C , sendo, em temperatura ambiente (25°C), observado uma resistência de $10\text{K}\Omega$ (ohms) (CANTHERM, 2018, p. 2).

Com o propósito de se obter a coleta dos valores de temperatura de forma precisa, foi utilizada, na programação, a Equação do Fator Beta (com o valor da constante β (beta) = 3950 informado no datasheet do componente) e um resistor de $10\text{K}\Omega$:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{R}{R_0}\right)$$

onde T é a temperatura medida, T_0 é a temperatura nominal (25°C), β é um dado coletado no datasheet do componente, R é a resistência do termistor no ato da medição e R_0 é o resistor de $10\text{K}\Omega$.

A ventilação acoplada ao evaporador é feita por um motor do tipo Brushless DC (Direct Current) de 12V (Volts) e 0.18A (Ampères), com dimensões de 12cm x 12cm x 20 mm. Com o propósito de se efetuar o controle da velocidade do motor, foi utilizado o módulo ponte H L298N, responsável por efetuar o controle de cargas mediante sinal de controle oriundo de um microcontrolador (STMICROELECTRONICS, 2000, p. 2).



Figura 4: Motor Brushless (Cooler)

Fonte: <https://www.syma.com.br/produto/cooler-12x12-bivolt/>. Acesso em: 20 ago. 2018.



Figura 5: Drive Ponte H L298N

Fonte: <https://www.curtocircuito.com.br/modulo-driver-ponte-h-l298n.html>. Acesso em: 20 ago. 2015.

O microcontrolador utilizado na elaboração do controlador *fuzzy* da planta de refrigeração é o NODEMCU-32s (Esp 32s) programado em linguagem C++. Dentre suas características estão a arquitetura em 32bits, o *clock* de 160 MHz (*Dual Core*), conexão integrada *wi-fi* e *bluetooth*, 512Kb de memória RAM, 16 Mb de memória *Flash*, 36 GPIO, 18 pinos ADC (analógico / digital), 2 DAC (digital / analógico) e interfaces SPI/I2C/UART/I2S/CAN (ESPRESSIF, 2018, p. 9).



Figura 6: Microcontrolador NodeMCU 32s

Fonte: <https://www.saees.com/de/nodemcu-32s-esp32s-nodemcu-32s-esp32-wifi-bluetooth-development-board-dual-core-lua-module-iot>. Acesso em: 13 ju. 2018.

O sinal de distúrbio térmico gerado com o propósito de teste de robustez da lógica de controle implantada, é efetuado por secador Arno de 900W. Através deste foi possível gerar 2 sinais de distúrbio, observados na Figura 7:

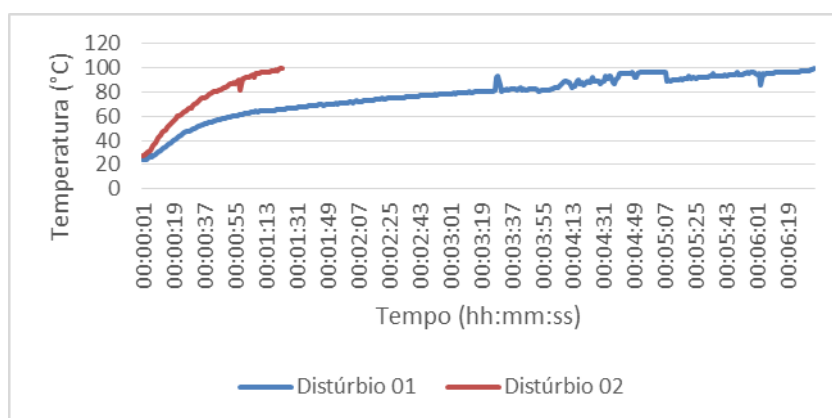


Figura 7: Distúrbio térmico
Fonte: Autores

Controle *Fuzzy*

A lógica *fuzzy*, também chamada por alguns autores de lógica nebulosa, é utilizada cada vez mais em processos que utilizam informações fornecidas por humanos. É uma ferramenta capaz de obter informações vagas, geralmente descritas em uma linguagem natural e transformá-las para um formato numérico de fácil manipulação por computadores da atualidade (CAVALCANTI, 2012, p. 12). Dentre uma das vantagens de seu uso, está a necessidade de poder de processamento reduzido, garantindo que sua aplicação possa ser feita em periféricos como microcontroladores.

Um primeiro passo a ser dado no uso da lógica *fuzzy* é a consulta do especialista no sistema pelo projetista do controlador a respeito de quais serão as entradas para o processo de decisão, obtendo uma descrição em português (variáveis linguísticas) para descrever, com isso, o comportamento das entradas e da saída do controlador (CHENCI, 2011, p. 20). Após a obtenção das variáveis linguísticas, bem como seus valores linguísticos, é possível construir um conjunto finito de regras a serem utilizadas.

O passo seguinte a ser efetuado é a elaboração das funções pertinência, baseando-se nas informações de variáveis linguísticas, bem como os valores linguísticos associados a elas. A função pertinência (μ) tem como propósito quantificar, de maneira contínua, a certeza que as variáveis linguísticas possuem em sua ativação, variando em uma escala de 0 a 1 (FABRO; OLIVEIRA, 2018, p. 3).

Através da construção das funções de pertinência das variáveis de entrada, é efetuado pelo controlador o processo de fuzzyficação ou nebulização, através do qual é

possível definir o grau de ativação das regras (MELO NETO, 2018, p.3). Em virtude deste processo, as regras são comparadas e verificadas com base nas variáveis de entrada quanto ao nível de ativação de cada uma, propiciando a operação de defuzzyficação.

A operação de defuzzyficação atua nos conjuntos difusos produzidos através das inferências, gerando um valor de saída denominado μ^{crisp} , com auxílio do cálculo do Centro de Gravidade das imagens produzidas. O valor μ^{crisp} , atua como a saída gerada pelo controlador *fuzzy* no sistema de controle (MELO NETO, 2018, p. 6).

O controlador elaborado visa efetuar o controle da velocidade de ventilação sobre o evaporador e gerar uma resposta binária de acionamento do compressor, uma vez que o tipo de compressor utilizado não admite o controle de sua velocidade. O processo objetiva o controle de temperatura de *setpoint* do reservatório demarcada em -5°C .

A partir do acionamento do compressor, em função de seu tempo de funcionamento, é formada uma placa de gelo no evaporador. Com o auxílio da velocidade de ventilação sobre o evaporador deseja-se efetuar o controle da temperatura. As variáveis coletadas para a utilização da lógica de construção do controle *fuzzy* são duas: a temperatura atual do reservatório e a variação de temperatura em determinado período. O propósito desejado para o controle é efetuar o aumento da velocidade do ventilador conforme a temperatura atual se aproxime da temperatura de *setpoint* predeterminada.

O monitoramento da temperatura do reservatório é crucial para o controle adequado tanto da velocidade de ventilação como da temperatura de *setpoint*. As funções pertinência obtidas e apresentadas na Figura 8 possui um range de -15°C a 15°C , sendo classificadas em Baixo, Setpoint, Pouco Alto e Alto.

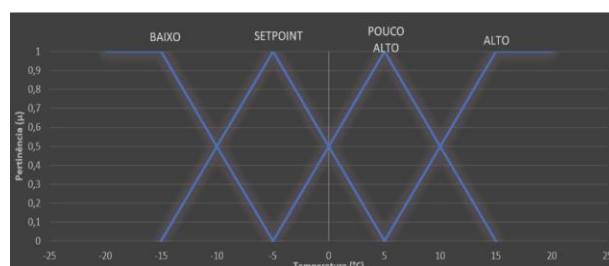


Figura 8: Função Pertinência da temperatura atual do reservatório
Fonte: Autores

De forma análoga foi efetuada a construção da função pertinência do sistema, sendo feita, a cada 4 segundos, uma amostragem da temperatura para determinar a variação de temperatura do reservatório. O valor referente à amostragem de tempo para determinar esta variável foi obtido com base no comportamento dos distúrbios apresentados na Figura 08, e a análise do comportamento do sistema de refrigeração, em três situações, com base na ausência de ventilação sobre o evaporador, como indicado na Figura 9.

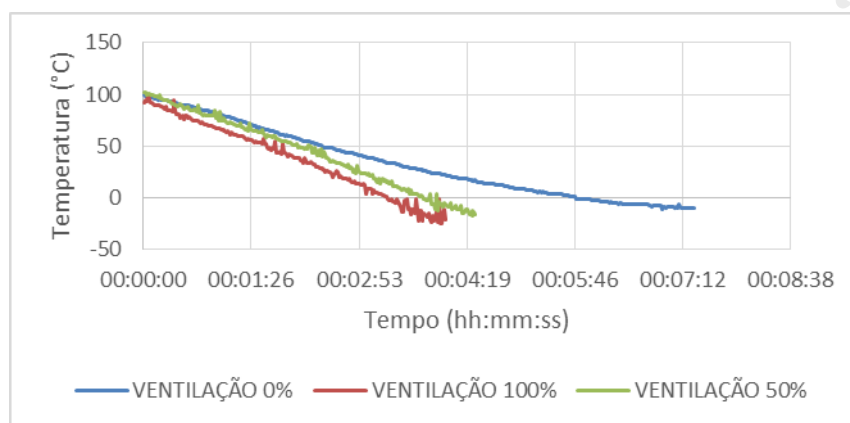


Figura 9: Comportamento do sistema de refrigeração em virtude da ventilação sobre o evaporador
Fonte: Autores

Através das informações observadas foi possível elaborar uma base de regras para a variação de temperatura, com range de -2°C a 4°C de variação de acordo com a Figura 10. As funções pertinência foram classificadas em Negativa, Nula, Alta e Muito Alta.

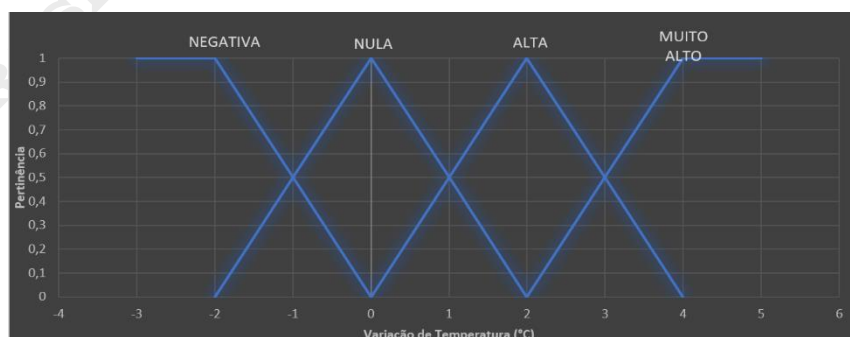


Figura 10: Função Pertinência da variação de temperatura do reservatório
Fonte: Autores

Através das funções pertinência, foi possível elaborar um conjunto de regras que definem o comportamento da velocidade de ventilação sobre o evaporador como demonstrado na Tabela 1.

VELOCIDADE VENTILAÇÃO (%)		TEMPERATURA DO SISTEMA (°C)			
		BAIXO	SETPOINT	POUCO ALTO	ALTO
VARIACÃO DE TEMPERATURA (°C/s)	NEGATIVA	M. GRANDE	M. GRANDE	MÉDIA	PEQUENA
	NULA	M. GRANDE	GRANDE	MÉDIA	PEQUENA
	ALTA	M. GRANDE	GRANDE	MÉDIA	NULA
	M.ALTA	M. GRANDE	GRANDE	PEQUENA	NULA

Tabela 1: Tabela de conjunto de regras para a velocidade de Ventilação
 Fonte: Autores

A velocidade de ventilação sobre o evaporador é definida via PWM, onde o controlador *fuzzy* gera uma saída que varia de 0 a 100, sendo este valor convertido no duty cycle (ciclo de trabalho) do sinal, possibilitando o controle da potência aplicada ao ventilador e, conseqüentemente, gerando o controle da velocidade.

A Figura 11 mostra as funções pertinências de ativação do ventilador, possuindo um range de trabalho de 0 a 100%, sendo classificado como: Nula, Pequena, Média Grande e M. Grande.

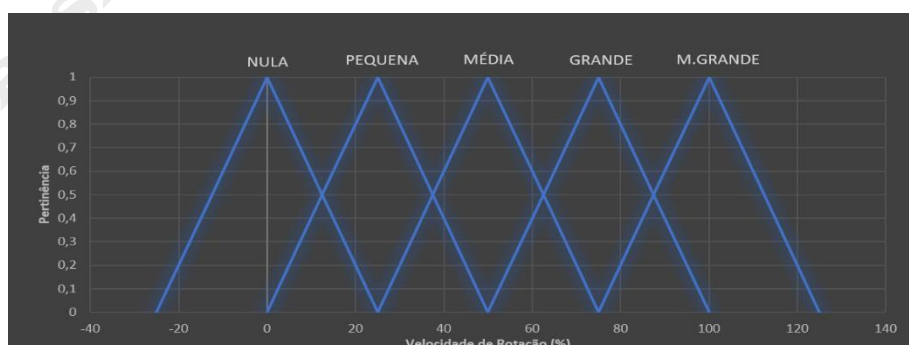


Figura 11: Função Pertinência da Velocidade de Rotação do Ventilador em porcentagem
 Fonte: Autores

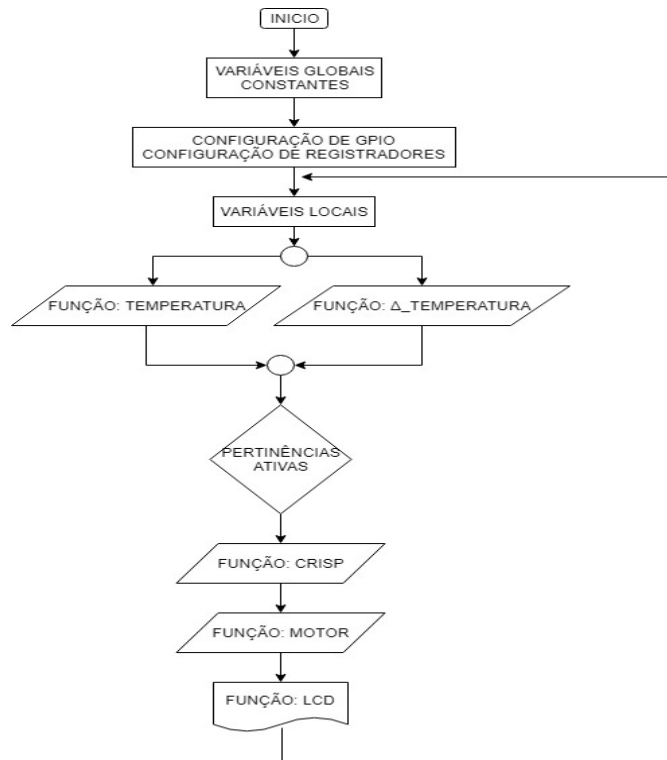


Figura 12: Diagrama de blocos do código desenvolvido em linguagem C++
Fonte: Autores

Resultados

Foram efetuados testes em duas situações distintas no sistema de refrigeração com o controle *fuzzy* elaborado. O primeiro teste efetuado baseou-se em aquecer o reservatório a uma temperatura como indicado na Figura 13. Foi verificado o tempo que levaria até obter-se a temperatura de *setpoint* e a estabilização do sistema.

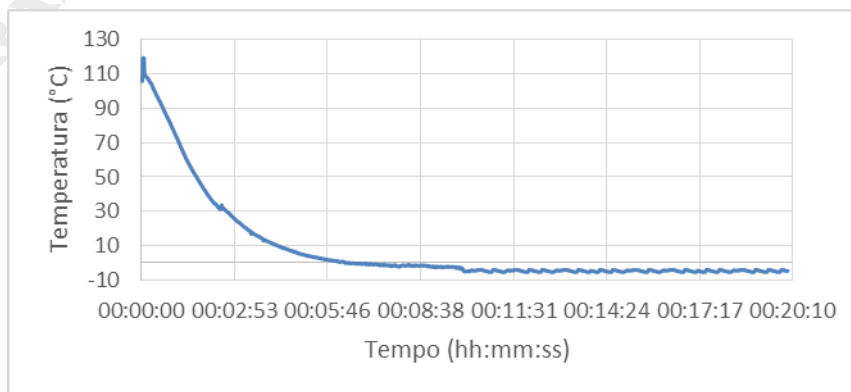


Figura 13: Gráfico de distúrbios aplicados na planta.
Fonte: Autores

Levando-se em consideração a situação atípica que a foi exposto o reservatório, que simula uma câmara frigorífica de pequeno porte, foi necessário um período de aproximadamente 10 minutos até que ele atingisse a temperatura de *setpoint*. Após esse período de acomodação, foi possível observar um erro máximo na temperatura de *setpoint* de $0,8^{\circ}\text{C}$, de tal forma que a temperatura alcançasse $-4,2^{\circ}\text{C}$ após a estabilização do sistema de refrigeração e um segundo erro mínimo de $-0,45$, gerando uma temperatura de $-5,45^{\circ}\text{C}$ durante o período. A Figura 14 indica o comportamento da velocidade de ventilação, que segundo as análises, obedeceram às regras projetadas.

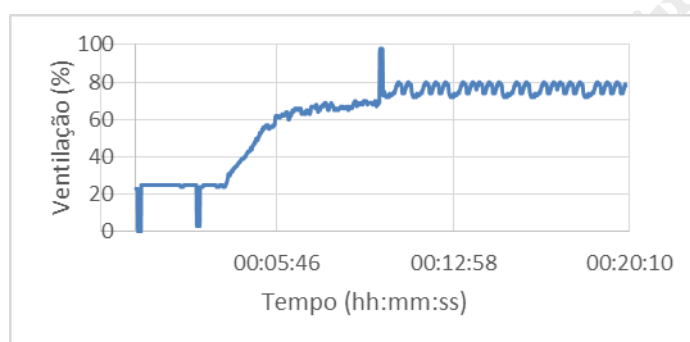


Figura 14. Gráfico de atuação do controle *fuzzy* sobre a velocidade de ventilação sem distúrbios
Fonte: Autores

O segundo tipo de teste objetivou testar a robustez do sistema, foram aplicados 3 distúrbios. O primeiro e segundo distúrbios os comportamentos apresentaram-se conforme a Figura 8. O primeiro distúrbio (Distúrbio 01) ocorreu durante um período de aproximadamente 14 segundos, o segundo distúrbio (Distúrbio 02) ocorreu durante um período de aproximadamente 11 segundos. O terceiro distúrbio (Distúrbio 03) executado foi a abertura da tampa do reservatório por um período de aproximadamente 5 segundos iniciado em 00:07:23.

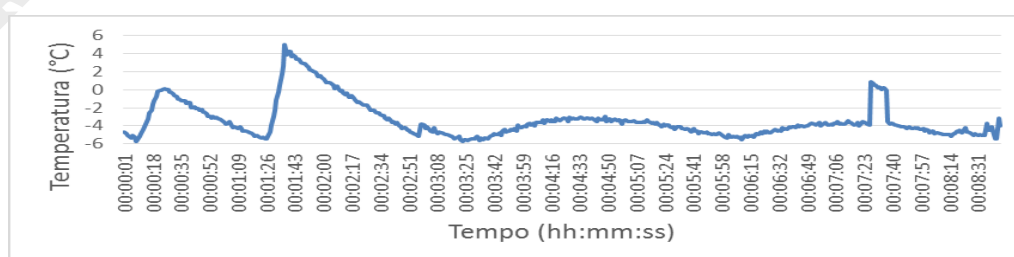


Figura 15: Gráfico de distúrbios aplicados na planta
Fonte: Autores

É possível observar que nos três casos de distúrbios aplicados ao sistema de refrigeração ocorre uma imediata resposta do controle *fuzzy*. Ao verificar as informações presentes na Figura 16, o controle *fuzzy*, ao detectar o aumento da temperatura atual do reservatório, bem como a variação positiva de temperatura durante o período de distúrbio, executa ações com o objetivo de retornar a temperatura atual do reservatório para a temperatura de *setpoint*.

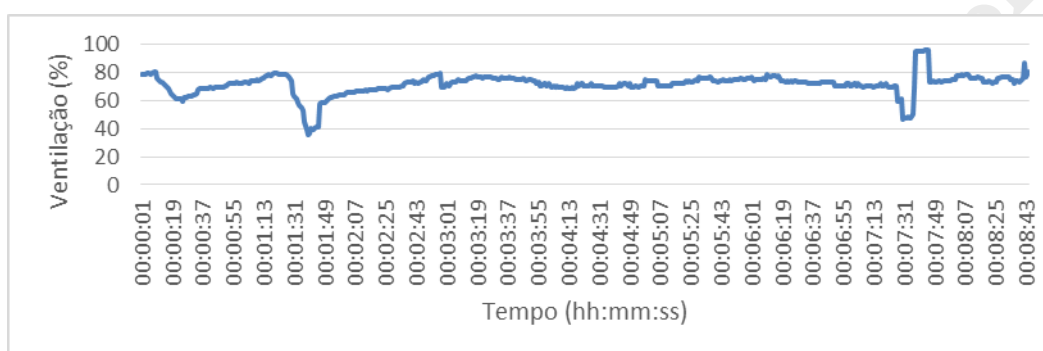


Figura 16: Gráfico de atuação do controle *fuzzy* sobre a velocidade de ventilação com distúrbios
Fonte: Autores

Apesar de os dois distúrbios iniciais gerarem um grande aumento da temperatura atual do sistema, deve-se levar em consideração a amplitude do distúrbio aplicado ao reservatório por conta de suas dimensões o que, em uma escala real de aplicação, ou seja uma câmara frigorífica de pequeno porte, não estaria sujeita a distúrbios desta magnitude proporcionalmente.

Conclusão

O controle *fuzzy* elaborado em malha fechada mostrou-se uma ferramenta eficaz na no controle de sistemas de refrigeração no caso averiguado, câmaras frigoríficas de pequeno porte. A lógica implantada na programação do controlador *fuzzy* mostrou-se eficiente no controle da velocidade de ventilação, segundo as regras adotadas, e na manutenção da temperatura de *setpoint*.

A lógica do aumento da velocidade do ventilador associado a formação de camadas de gelo no evaporador representou uma estratégia eficaz na manutenção, em regime estabilizado, da temperatura de *setpoint*. Apesar da operação eficiente do

controlador *fuzzy* dentro do range de atuação das variáveis de controle, ele não fornece uma resposta satisfatória em suas regiões de saturação. Esta ineficiência pode ser contornada com uma maior abrangência do seu range de atuação, bem como a adição, ou substituição, de umas das variáveis por um controle da umidade presente no reservatório, promovendo um aumento da eficácia do controlador, o que poderia significar um trabalho futuro.

Em linhas gerais é possível observar uma melhora na situação de controle deste sistema de refrigeração, no aspecto de controle da temperatura e no consumo energético. Auxiliado pelo controlador, o controle de temperatura e o consumo energético não exigem atuação constante do sistema de refrigeração, em especial do motor do compressor.

Referências

CANTHERM. **Datasheet ntc thermistor mf52 series**. 2012. Disponível em: https://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet_termistor_mf52_1.pdf. Acesso em: 20 ago. 2018.

CAVALCANTI, J. H. F. et al. **Lógica fuzzy aplicada às engenharias**. Disponível em: http://www.logicafuzzy.com.br/wp-content/uploads/2013/04/logica_fuzzy_aplicada_as_engenharias.pdf. Acesso em: 05 nov. 2018.

CHENCI, G. P.; RIGNEL, D. G. S.; LUCAS, C. A. Uma introdução à lógica fuzzy. Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e de Gestão Tecnológica, Franca, v.1, n.1, p. 17-28, 2011. Disponível em: <http://periodicos.unifacef.com.br/index.php/resiget/article/view/153>. Acesso em: 07 ago. 2018.

CORREIA, J. M. L. C. **Avaliação energética dos sistemas de refrigeração na indústria vinícola caso de uma aplicação na adega da ervideira**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2016. Disponível em: <https://run.unl.pt/handle/10362/47630>. Acesso em: 15 out. 2018.

ESPRESSIF SYSTEMS. **Datasheet. Versão 2.6 esp 32 series**. 2018. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 13 jul. 2018.

FABRO, J.A.; OLIVEIRA, A.S. **Robótica móvel – ppgca aula 04 lógica fuzzy**. 2018. Disponível em: http://www.dainf.ct.utfpr.edu.br/~fabro/IF67D/Robotica_Movel_Aula_4_Logica_Fuzzy_V1.pdf. Acesso em: 19 out. 2018.

GARCIA, F. E. M.; BANDARRA, F. E. P. Desempenho energético de um sistema de refrigeração aplicando o controle adaptativo fuzzy. *In: POSMEC SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA*, 16, 2006, Uberlândia. **Anais POSMEC**. Uberlândia: UFU, 2006.

MELO NETO, A. IME Lógica Fuzzy. 2018. Disponível em: <https://www.ime.usp.br/~adao/LOGICAFUZZY2017F.pdf>. Acesso em: 20 out. 2018.

PANESI, R. Termodinâmica para sistemas de refrigeração e ar condicionado. São Paulo: Artliber, 2015.

PERIN, A. C. C.; HOFFMANN, K.; JANUÁRIO, M. Interface didática para design de motores brushless de ímãs permanentes a partir das dimensões de um estator conhecido. *In: XXVIII CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO INATEL*, 28, 2016, Santa Rita do Sapucaí. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/303876754_Interface_didatica_para_design_de_motores_brushless_de_imas_permanentes_a_partir_das_dimensoes_de_um_estator_conhecido. Acesso em: 10 set. 2018.

STMICROELECTRONICS. Datasheet Dual Full-Bridge Driver. Disponível em: https://img.filipefloriano.com/files/download/Datasheet_L298_Ponte_H.pdf Acesso em: 02 set. 2018.

VENTURINI, O. J.; PIRANI, M. J. Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e Comercial. 1. ed. Rio de Janeiro: Eletrobrás / PROCEL, 2005.

FUZZY CONTROLLER APPLIED TO A COMMERCIAL REFRIGERATION SYSTEM

ABSTRACT

The objective of this article is to demonstrate an alternative to the control of small cold storage, building a controller based on Fuzzy logic. This project aimed to control the speed of ventilation on the evaporator of the refrigeration system and a binary activation of the compressor. The speed control of ventilation was possible through using a brushless motor and is generated by the fuzzy control and then converted to PWM. Based on the performed tests, the designed controller demonstrated robustness in temperature control by adding and controlling the ventilation on the evaporator, consequently providing a better distribution of the cold in the chamber.

Keywords: *Cooling System; Fuzzy Logic; Microcontroller.*

Envio: março/2019
Aceito para publicação: março/2019