



ANÁLISE DE CONTROLE DE SISTEMAS DE RESFRIAMENTO DE CIRCUITOS DE POTÊNCIA UTILIZANDO LÓGICA FUZZY

Carlos Roberto da Silveira Junior¹, Rodrigo Nunes Guimarães¹, Déborah Gonçalves Pereira¹, Cleiber Nichida¹

¹ Instituto Federal de Goiás - Câmpus Goiânia

Resumo - A necessidade de se controlar a temperatura no interior do transformador de potência é um problema muito abordado por especialistas, visto que o sobreaquecimento do transformador diminui o rendimento e a vida útil do isolamento. Visando auxiliar o processo de ventilação forçada de um transformador em uma subestação, este trabalho propõe a utilização da Lógica Fuzzy em um sistema de controle de resfriamento de circuitos de potência, que ainda possui controle simples do tipo ligado/desligado. Para sua implementação, foi utilizado uma plataforma de prototipagem eletrônica de software livre (Arduino), sensores e outros componentes eletrônicos de controle e resfriamento. Além disso, foi feito um comparativo entre o tempo de resposta do sistema utilizando a Lógica Clássica e a Lógica Fuzzy, tendo mostrado melhor desempenho do controle com o sistema Fuzzy.

Palavras-Chave - Controle de resfriamento, Lógica Fuzzy, superaquecimento, transformador.

POWER CIRCUIT COOLING SYSTEM CONTROL ANALYSIS USING FUZZY LOGIC

Abstract - The need to control the temperature inside the power transformer is a problem often addressed by specialists, since transformer overheating reduces the efficiency and service life of the insulation. Aiming to assist the forced ventilation process of a transformer in a substation, this work proposes the use of Fuzzy Logic in a power circuit cooling control system, which still has simple ON/OFF control. For its implementation, a free software electronic prototyping platform (Arduino), sensors and other electronic control and cooling components was used. In addition, a comparison was made between the response time of the system using Classical Logic (Boolean) and Fuzzy Logic, showing better performance control with the Fuzzy system.

Keywords - Cooling control, Fuzzy Logic, overheating, transformer.

I. INTRODUÇÃO

Em sistemas e circuitos elétricos a temperatura está diretamente ligada a diversos fatores de perdas. Um dos componentes que sofre tal efeito é o transformador. Quanto maior for o aquecimento, maiores serão as perdas resultando em um menor rendimento, limitando assim a potência possível de ser solicitada a este equipamento. Portanto, a capacidade de carga do transformador está intrinsecamente ligada aos níveis de temperatura.

O funcionamento do transformador em temperaturas elevadas acelera o envelhecimento do isolamento de suas bobinas, que quando comparado ao funcionamento em condições normais, sofre uma diminuição de sua vida útil [1]. Devido à alta demanda de potência, os sistemas de ventilação forçada são bastante utilizados em transformadores nas subestações de média e alta tensão para possibilitar que o transformador trabalhe com 20% de sobrecarga, evitando danos por superaquecimento e perdas associadas a este, resfriando e dissipando o calor do transformador, garantindo dessa forma que a demanda seja atendida sem que o equipamento seja danificado [2].

Em subestações de alta potência, as concessionárias de energia têm conhecimento dos horários de maior demanda (curva de carga) e de outros parâmetros como potência instantânea, sendo que a partir desses dados são estabelecidos períodos de acionamento da ventilação forçada dos seus transformadores. O acionamento da ventilação, muitas vezes é feito quando a temperatura do transformador alcança determinados limiares de valores. Entretanto, o tempo para o resfriamento do transformador pode exceder condições de segurança do equipamento, necessitando de outras abordagens de controle para acionamento do ventilador.

O acionamento utilizado atua como a Lógica Clássica que utiliza a representação binária, como por exemplo, verdadeiro/falso ou ligado/desligado. Por outro lado, um sistema Fuzzy interpreta a falta de exatidão e as incertezas descritas utilizando uma variável linguística que assume valores a partir de conjuntos Fuzzy, permitindo o

desenvolvimento de soluções que abstraem o comportamento complexo de um sistema [3].

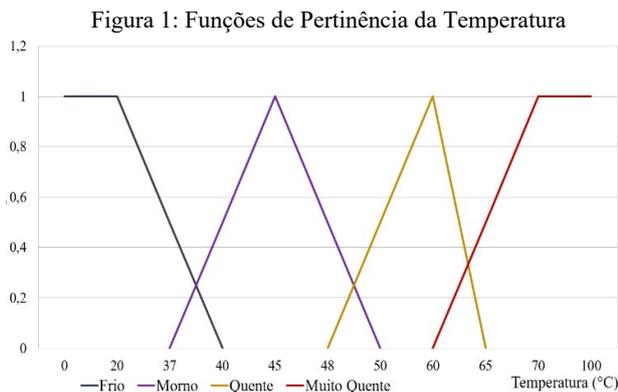
Apesar da ampla utilização da Lógica Booleana nos sistemas de controle de temperatura, onde um determinado valor na variável temperatura faz com que o valor lógico para se ativar o resfriamento do sistema se torne “1”, essa lógica se torna ineficiente quando se leva em conta o consumo energético, pois o sistema trabalhará no ponto de máximo consumo quando ativo [4]. Outra vantagem do controle do sistema de refrigeração utilizando a Lógica Fuzzy, é a possibilidade se obter um maior controle da temperatura mantendo a mesma mais próxima da desejada em relação à utilização do sistema sem o controle [5].

Neste trabalho propõe-se o desenvolvimento de um sistema de controle de resfriamento de um transformador buscando por otimizar e aumentar a eficiência deste processo através do controle utilizando Lógica Fuzzy. Traçou-se ainda um comparativo de seu resultado com o de um sistema utilizando Lógica Clássica para o controle eficiente de sistemas de resfriamento de circuitos de alta potência. Foram feitos ainda ensaios de manutenção que têm o objetivo de simular o tempo exigido para resfriar o transformador para que um operador possa executar a manutenção do mesmo, e o ensaio de demanda que simula o funcionamento em um sistema real.

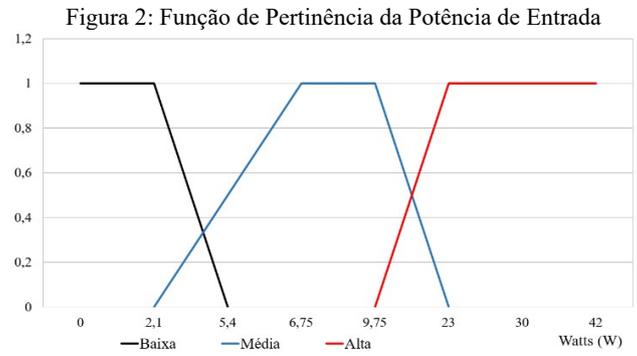
II. METODOLOGIA

Desenvolvida por Zadeh em 1965 [3], a Lógica Fuzzy consegue tratar de forma matemática as informações de imprecisas ou ambíguas, a partir da utilização de variáveis linguísticas traduzindo assim o discernimento humano sobre o processo. A variável analógica de controle no projeto é a temperatura, que foi classificada em 4 níveis: frio, morno, quente e muito quente.

Graficamente, estes comportamentos são descritos por funções de pertinência, que relacionam cada variável linguística com um valor numérico de entrada entre 0 e 1, constituindo a primeira etapa para o controle Fuzzy, chamada Fuzzificação. Na Figura 1, são apresentadas as Funções de Pertinência da temperatura para um transformador (40 W). As funções de pertinência foram definidas experimentalmente e para em consideração para esses níveis fatores como segurança do sistema, segurança dos usuários e temperatura de operação normal ótima (morno).



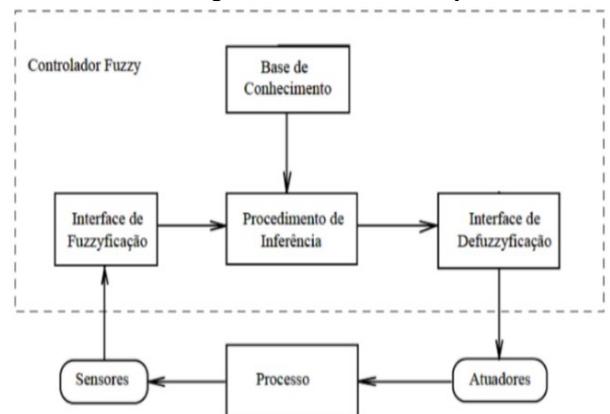
A Figura 2 mostra a Fuzzificação das potências demandadas pelo sistema com 3 níveis: Potência Baixa, Potência Média e Potência Alta. Foram levados em consideração para a classificação desses níveis, fatores como: segurança do sistema, segurança dos usuários e curvas de carga em vãos alimentadores de subestações de distribuição.



Os controladores Fuzzy possuem basicamente 3 etapas: Fuzzificação, Inferência Fuzzy e Defuzzificação, conforme mostrado na Figura 3. Após a Fuzzificação, ocorre a Inferência Fuzzy, que consiste em aplicar a base de dados de entrada em um conjunto de regras, desenvolvidas por um especialista visando um propósito específico. Convertem-se os resultados da segunda etapa novamente em valores numéricos reais na etapa de Defuzzificação [6].

Para possibilitar a implementação do controle Fuzzy no Arduino, foi empregada a biblioteca eFLL (*Embedded Fuzzy Logic Library*) [7] que permite implementar Fuzzy em Sistemas Embarcados. Alguns dos objetos utilizados nessa biblioteca foram o FuzzyInput, onde podem ser manipuladas ilimitadas entradas, o FuzzySet, para modelar as funções de pertinência das variáveis, o FuzzyRule onde são montadas as regras, dentre outros. As regras Fuzzy são escritas da forma: SE <premissa> ENTÃO <consequência> [8,9].

Figura 3: Controlador Fuzzy

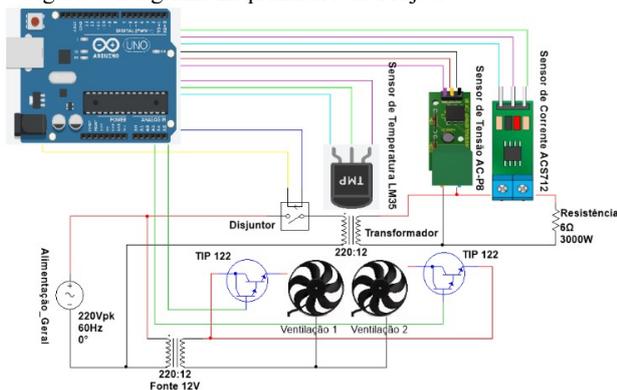


Este projeto consiste no controle de resfriamento da temperatura de um transformador (220:12 V, 40W). No protótipo da Figura 4 o transformador em questão foi ligado a um circuito de consumo de potência (a partir de

uma resistência variável). Junto ao circuito do transformador, foi utilizado a plataforma eletrônica de software livre Arduino UNO, onde foram conectados os sensores que coletam os dados das variáveis de entrada (temperatura e potência). Foram utilizados os sensores LM35 para a leitura de temperatura, e para a potência foram usados os seguintes sensores: o ACS712 para a leitura de corrente e o AC-P8 para a leitura de tensão. A saída deste sistema Fuzzy aciona então o sistema de ventilação, que varia de intensidade de acordo com o grau de pertinência da resposta. Por questão de segurança para o usuário, foi adicionado a regra que atua o disjuntor caso a corrente esteja muito elevada, protegendo na ocorrência de um curto-circuito.

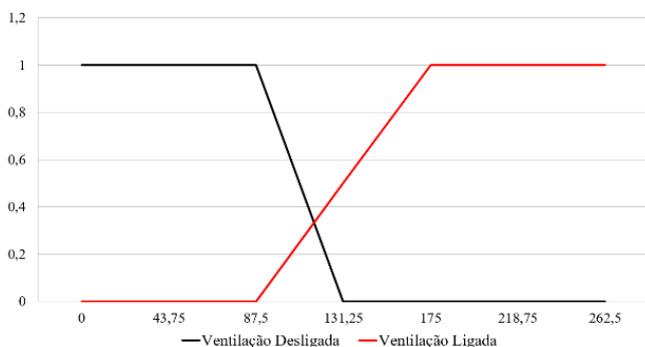
O sistema de resfriamento utilizado foi a ventilação a partir de 2 Coolers, conectados a tiristores de potência (TIPs), que serão controlados pela saída PWM (*Pulse Width Modulation*) do código do sistema Fuzzy registrado no Arduino. A resposta obtida indica quando e qual deve ser a intensidade da ventilação dos Coolers, cuja atuação obedece à curva de pertinência da saída Fuzzy conforme visto na Figura 5.

Figura 4: Diagrama Esquemático do Projeto



Com intuito de comparação, foram feitos testes no protótipo a partir de programação com Lógica Clássica, no qual a polarização dos TIPs variou entre máximo ou mínimo (Ligado ou Desligado) da atuação da ventilação.

Figura 5: Função de Pertinência da Saída Fuzzy



III. RESULTADOS

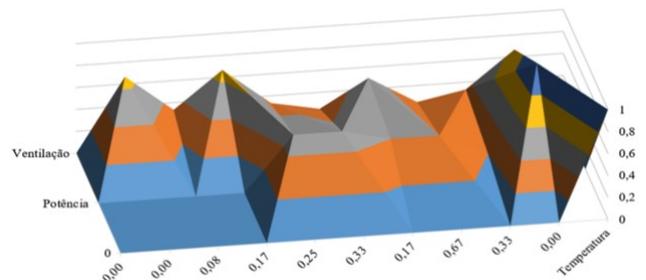
No processo de ajustes das funções de pertinência encontraram-se dificuldades envolvendo as propriedades

físicas dos materiais utilizados, pois transformadores são equipamentos construídos com materiais ferromagnéticos, que possuem calor específico elevado, e demoram tanto para aquecer, quanto para resfriar, o que demandou muitos ensaios de longa duração para se obter funções de pertinência que se comportassem de forma satisfatória.

Um outro desafio na implementação das funções de pertinência foi a variação da temperatura ambiente de acordo com o passar do dia, o que influenciou no comportamento do sistema e na duração dos ensaios para ajustes das curvas de pertinência.

A Figura 6 mostra um dos gráficos de superfície obtido para as saídas. A partir das variáveis de entrada (temperatura e potência) e suas respectivas funções de pertinência, foi possível gerar este gráfico de Superfície de Controle Fuzzy para uma das saídas, a Atuação da Ventilação 1. Por não ser o foco desse trabalho, não apresentaremos os outros gráficos de superfície possíveis de se obter a partir das três saídas do sistema.

Figura 6: Gráfico de Superfície do Sistema



O gráfico é composto pelas variáveis de entrada, nos eixos planares X e Y, bem como pelos seus respectivos graus de pertinência de saída, no eixo Z. O gráfico de superfície pode ser utilizado para facilitar a elaboração das regras, possibilitando prever o comportamento e a eficácia do sistema.

Foram feitos ensaios comparativos entre a Lógica Clássica e Fuzzy. Tais ensaios se basearam na variação da curva de carga do transformador, onde foi considerado Potência Alta o transformador operando em carga nominal, e o ensaio de Demanda simulou a curva de carga de um sistema real.

Analisando o gráfico da Figura 7 que mostra Potência Alta com Controle Clássico, e da Figura 8 mostrando o Controle Fuzzy, pode-se comparar diversas variáveis notando-se que, tanto a Atuação da Ventilação 1, quanto a Atuação da Ventilação 2 aconteceram de forma mais linear no Controle Fuzzy do que no discreto, mantendo o transformador com a temperatura em níveis mais baixos por mais tempo. Isso acontece justamente porque a Lógica Clássica é digital, apresentando respostas binárias. Já no Fuzzy, seu comportamento próximo de um ajuste analógico.

Também é importante notar a atuação do disjuntor geral, que se mostra aos 10 minutos no gráfico que representa o Controle Clássico, enquanto que no Controle Fuzzy, a atuação é observada em 14 minutos de operação. Tal diferença se deve ao fato da ventilação ter suas velocidades

controladas e aumentadas gradualmente de acordo com o aumento da temperatura e variação da potência fornecida. Observa-se assim um melhor desempenho quando utilizado a lógica Fuzzy. O ensaio Fuzzy, foi realizado com temperatura ambiente 2 °C maior do que durante o ensaio de Controle Clássico, mostrando que mesmo com essa diferença, o experimento em Fuzzy obteve desempenho superior, demorando mais tempo para o aquecimento do transformador e atuação da proteção geral do disjuntor.

Figura 7: Controle Clássico do Resfriamento para Potência Alta.

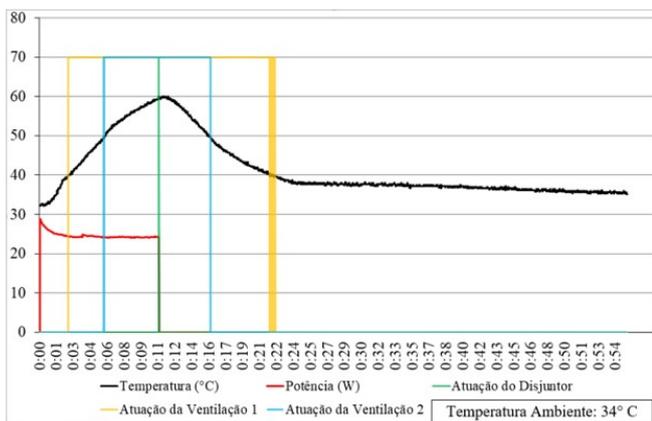
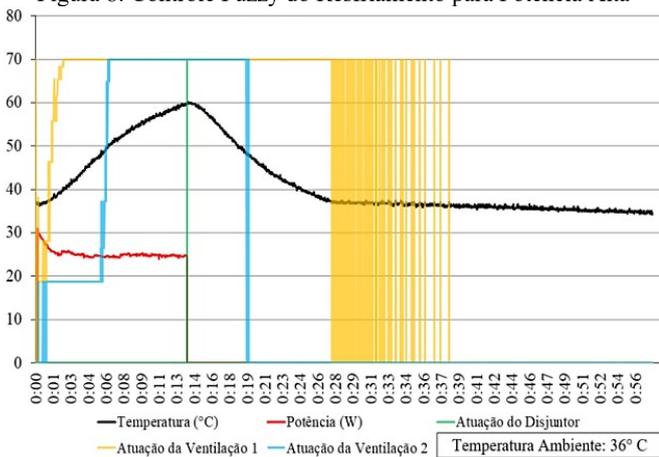


Figura 8: Controle Fuzzy do Resfriamento para Potência Alta



Graficamente observa-se que os dois sistemas estabilizam suas potências com a ventilação, mostrando que ambas, lógica Clássica e Fuzzy, podem ter a mesma eficácia, mas em termos de eficiência, nota-se que a lógica Fuzzy novamente teve desempenho superior, pois forneceu energia para o sistema durante mais tempo dado um caso de demanda de carga acima do normal.

Realizou-se o ensaio de manutenção para simular uma situação em que o transformador foi desligado devido a atuação das proteções intrínsecas do transformador para um caso de sobreaquecimento. Para tal, o operador necessita que haja o resfriamento do transformador para realizar as operações de manutenção [9]. Uma vez que o tempo de resfriamento do transformador ao ser desligado é de grande importância para se determinar a eficiência da operação [10]. Assim, mesmo com a atuação do disjuntor, as ventilações continuam atuando no seu máximo, para que seja possível

essa manutenção o mais rápido possível. Uma vez realizada a manutenção, o operador rearma o disjuntor, fazendo com que o sistema volte ao seu funcionamento normal.

Comparando com o Ensaio de Manutenção para o tempo de resfriamento utilizando lógica Fuzzy mostrado na Figura 10, não se observam tantas diferenças, uma vez que em ambas as lógicas, o resfriamento começa com as duas ventilações no máximo, tendo poucas diferenças nas curvas de resfriamento (cerca 10 minutos para o resfriamento em ambas).

Figura 9: Ensaio de Manutenção: Controle Clássico para Potência Alta.

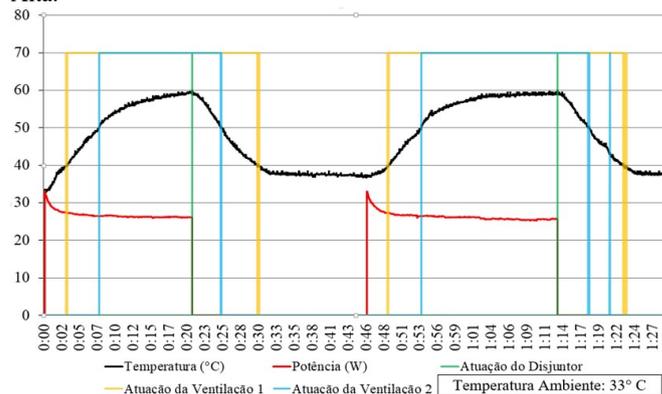
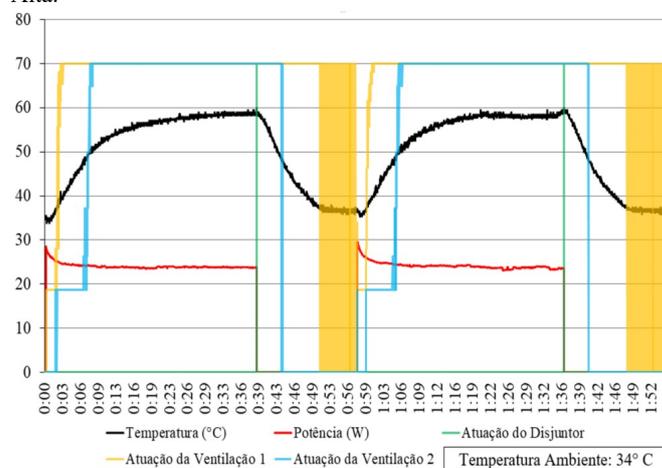


Figura 10: Ensaio de Manutenção: Controle Fuzzy para Potência Alta.



Ressalte-se as temperaturas dos ambientes neste experimento. Para o Controle Fuzzy, a temperatura ambiente mostrada na Figura 10, estava em 34°C e o sistema foi capaz de fornecer energia durante cerca de 40 minutos até a atuação da proteção do disjuntor. Já para Controle Clássico, na Figura 9, o fornecimento de energia durou cerca de 22 minutos na temperatura ambiente de 33°C, mostrando novamente que para tais sistemas o controle Fuzzy possui eficiência maior em relação ao tempo de fornecimento de energia em condições de sobrecarga. O motivo desse melhor desempenho está relacionado ao fato de que o controle Fuzzy conseguir ajustar a temperatura de forma gradual e linear, e inversamente proporcional a curva de aquecimento do transformador.

Na Figura 11 pode-se notar, que a Ventilação 1 é acionada rapidamente em sua velocidade máxima, enquanto na Figura 12 é visto que na Lógica Fuzzy temos as duas ventilações adiando a necessidade de aumento de potência. Neste ensaio, nota-se que para os mesmos níveis de consumo de potência existe uma tendência em estabilizar a temperatura e o fornecimento de potência para o Controle Fuzzy, o que não se observa no Controle Clássico.

Figura 11: Controle Clássico: Ensaio de Demanda de um Sistema Real.

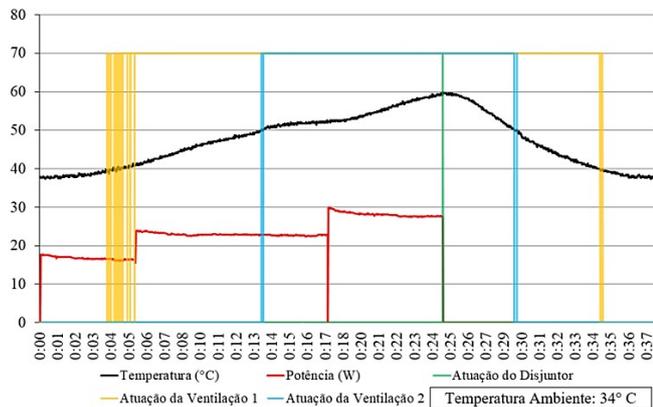
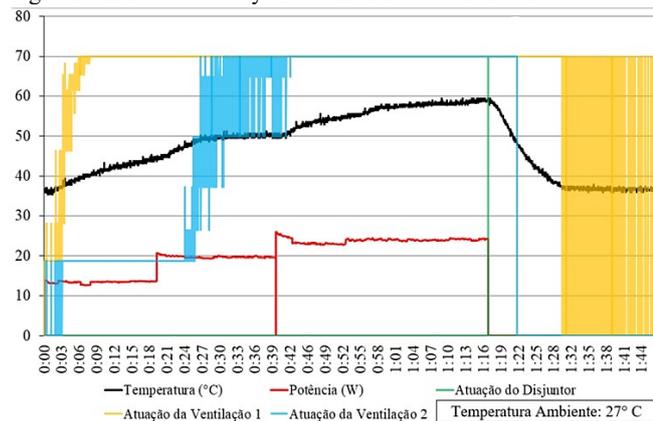


Figura 12: Controle Fuzzy: Ensaio de demanda de um Sistema Real.



Uma contribuição extremamente relevante destes ensaios é mostrar como o fornecimento de potência de um sistema está sujeito ao aquecimento, tendo casos no qual a eficiência do transformador chega a ser 80% do esperado. Outra vantagem da utilização do Controle Fuzzy é em relação ao consumo de energia usado para o resfriamento. Por não estar com a atuação da ventilação em 100% da capacidade todo o tempo, tem-se uma economia de energia considerável quando comparada com o Controle Clássico.

IV. CONCLUSÃO

Realizou-se no presente trabalho um comparativo entre a Lógica Fuzzy e a Lógica Clássica, em um sistema de ventilação forçada de um transformador. No processo de resfriamento em Potência Alta, constatou-se que a Atuação da Ventilação 1 e a Atuação da Ventilação 2 ocorrem de forma mais linear no Controle Fuzzy, do que no Clássico, devido ao fato da Lógica Clássica sempre apresentar

respostas discretas (controle *ON/OFF*). Nota-se também que a atuação do disjuntor geral acontece em um tempo bem menor no Controle Clássico comparado ao Fuzzy.

No Ensaio de Manutenção não é possível notar grandes diferenças entre as lógicas discreta e Fuzzy, uma vez que o resfriamento se iniciou com as duas ventilações no máximo e as curvas de resfriamento apresentam pouca distinção, com tempos de resfriamento bastante próximos. Já no Ensaio de Demanda, a Lógica Fuzzy se mostrou mais eficiente, pois novamente, consegue manter o controle da temperatura e adiar a atuação dos disjuntores por mais tempo. Logo conclui-se que o controle com Lógica Fuzzy apresentou resultados satisfatórios quando comparado à Lógica Clássica.

Tais resultados são interessantes às concessionárias, pois auxilia na diminuição dos indicadores coletivos de continuidade, DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) [11], com relação aos defeitos causados por sobreaquecimento dos transformadores [12].

Durante a implementação do sistema foram encontrados diversos desafios tais como os ensaios para se obter funções de pertinência demandaram um tempo considerável, devido à natureza ferromagnética dos componentes. Além disso, a variação da temperatura ambiente de acordo com o tempo foi outro obstáculo para elaboração das funções de pertinência, já que a temperatura ambiente influencia no comportamento do sistema e na duração dos ensaios. Problemas como a intensidade de atuação das ventilações também foram encontrados, sendo necessário fazer ajustes nas curvas de pertinência. No processo de programação, houve dificuldade com o desenvolvimento do código devido a sua complexidade. É possível desenvolver trabalhos futuros que tratem sobre um sistema de resfriamento para transformadores que operam com resfriamento a óleo utilizando também um sistema de ventilação forçada utilizando controle Fuzzy.

REFERÊNCIAS

- [1] J.R. Silva. Modelagem para monitoramento térmico de transformadores em operação e avaliação do envelhecimento em função do perfil de carregamento. Universidade Federal De Santa Catarina Programa De Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, março de 2005.
- [2] N.C. Jesus, C.E.C. Figueiredo, D. P. Bernardon, G. Mello, F. Diuner, R. Rech. Análise do Comportamento Térmico de Transformadores. In: XVII SENDI - Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Belo Horizonte/MG, 2006.
- [3] L.A. Zadeh. "Fuzzy Sets", Information and Control, 8: 338-353, 1965.
- [4] R.C. Camillo, A.C.M. Pinto, E.L.Souza Filho, L.M.D. Pinheiro, V.H. Nascimento, V.S.Roque. Controle de Temperatura do Processador com Lógica Fuzzy. In: Mostra Nacional de Robótica 2020. Disponível

em:<http://sistemaolimpo.org/midias/uploads/408531738d079f057d8e5c8324286c85.pdf>. Acesso em 01/02/2020.

[5] M.C.S. Silva. Controle de Sistemas de Refrigeração Visando Conforto Térmico e Eficiência Energética. PB. 2018. 52f. Dissertação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande.

[6] W. Pedrycz, F. Gomide. An Introduction to Fuzzy Sets Analysis and Design. MIT Press, 1998.

[7] Robotic Research Group (RRG) – Universidade Estadual do Piauí (UESPI - Teresina) eFLL (Embedded Fuzzy Logic Library) v1.0.10. Acesso em: <https://github.com/zerokol/eFLL>.

[8] J. Vieira, F. Dias M., A. Mota. Neuro-Fuzzy Systems: A Survey. In: 5th WSEAS NNA International Conference on Neural Networks and Applications. Udine, Italia.

[9] R. Tanscheit. Sistemas Fuzzy. Disponível em: <http://www.inf.ufsc.br/~mauro.roisenberg/ine5377/Cursos-ICA/LN-Sistemas%20Fuzzy.pdf>.

[10] J.H.Harlow. Electric Power Transformer Engineering. CRC Press. New York, 2004.

[11] ANEEL. Indicadores Coletivos de Continuidade (DEC e FEC). Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/indicadores-coletivos-de-continuidade>. Acesso em 10/01/2019.

[12] C. Bengtsson. Status and Trends in Transformer Monitoring. IEEE Transactions on Power Delivery, 11 (3): 1379–1384, 1996.