



## EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE CONTROLE NA INDÚSTRIA: COMPARATIVO ENTRE CONTROLADORES PID E *FUZZY* OTIMIZADOS

Rafael Cardoso do Nascimento<sup>\*1</sup>, Thiago de Almeida Ushikoshi<sup>1</sup>, Lucas Lima Carneiro<sup>1</sup>, Victor Santos Matos<sup>1</sup>, Luis Ricardo Cândido Cortes<sup>2</sup>, Thiago Pereira das Chagas<sup>1</sup> e Ad Jefferson Custódio Gomes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UESC - Universidade Estadual de Santa Cruz

<sup>2</sup>UFU - Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia

**Resumo** - O objetivo desse trabalho é analisar a eficiência energética entre métodos de controle clássicos e modernos, motivado pela filosofia do PROCEL Indústria, que visa educar e incentivar a economia de energia no setor industrial. Um controlador PID é comparado a um controlador moderno baseado em lógica *fuzzy*, ambos otimizados via Otimização por Enxame de Partículas (PSO). Os controladores são aplicados, via simulação e experimentalmente, a um tanque com controle de nível que emula uma mini planta industrial. A análise dos esforços de controle e gasto de energia evidenciaram que, apesar de resultados de nível bastante semelhantes, o controlador *fuzzy* apresenta uma economia de cerca de 8% de energia em relação ao PID. O controle *fuzzy* ainda apresentou esforços de controle mais suaves, mostrando sua vantagem operacional ao controle PID.

**Palavras-Chave** - Controle *fuzzy*, Eficiência Energética, Otimização, PROCEL

### STUDY OF ENERGY EFFICIENCY IN INDUSTRY CONTROL SYSTEMS: COMPARING OPTIMIZED PID AND *FUZZY* CONTROLLERS

**Abstract** - The aim of this paper is to analyze energy efficiency between classic and modern control methods, motivated on the philosophy of PROCEL Indústria which aims to educate and encourage energy saving in industrial sector. A PID controller is compared to a modern *fuzzy* logic based control method, both optimized by Particle Swarm Optimization (PSO). Controllers are simulated and experimentally applied to a level control tank that emulates a mini industrial plant. The analysis of control efforts and energy expenditure showed that, despite very similar level results, the *fuzzy* controller presents an energy saving of about 8 % in relation to the PID. *Fuzzy* control still had smoother control efforts, showing its operational advantage over PID control.

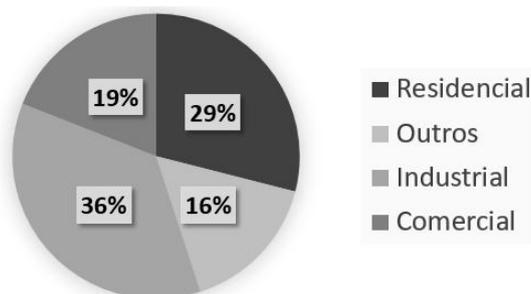
**Keywords** - *fuzzy* Control, Electric efficiency, Optimization, PROCEL

\*rafacardoso8@hotmail.com

## I. INTRODUÇÃO

No Brasil - segundo estudos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) - o consumo energético do setor industrial em 2018 representou 36% de toda energia consumida no país. A Figura 1 mostra como está dividido o consumo por setor. Desses 36% aproximadamente 62% representam consumo de máquinas motrizes como motores elétricos [1].

Figura 1: Consumo de Energia Elétrica por setor



O crescimento do consumo nesse setor trouxe de volta discussões acerca da eficiência energética das instalações industriais. A importância da implementação de medidas de eficiência se baseia em objetivos mais abrangentes que a simples redução da conta de energia, como por exemplo: aumentar a confiabilidade no sistema elétrico, reduzir ou postergar necessidades de ampliação nas redes de transmissão, reduzir impactos ambientais, etc [2].

Desde 1985, o Brasil tenta estabelecer diretrizes para incentivar um uso mais eficiente da energia elétrica. A criação do Programa de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) visa estabelecer uma consciência política acerca do tema através de linhas de ação. Uma dessas linhas é o PROCEL Indústria, que foca em dar suporte técnico aos diversos segmentos industriais e suas instalações. Atualmente o programa é altamente focado na otimização de máquinas motrizes [3].

O acionamento e controle dessas máquinas, assim como atuadores hidráulicos, pneumáticos e dispositivos de alarme, é habitualmente feito por controladores do tipo Proporcional Integral Derivativo (PID). Um estudo da Honeywell feito em 2000 estimou que 97% dos sistemas de controle presentes na

indústria eram do tipo PID [4].

Atualmente, no Brasil, a situação continua bastante semelhante. Contudo, a teoria de sistemas de controle evoluiu da abordagem clássica do PID para teorias de controle moderno, por exemplo: controle ótimo, controle adaptativo, controle preditivo e controle robusto. Uma diferença crucial entre o controle clássico e o controle moderno é a eficiência energética entre as duas abordagens. Em geral, as técnicas de controle moderno permitem uma maior otimização do esforço de controle para uma mesma especificação de desempenho [5].

Entre as diversas abordagens na teoria de controle moderno está o controle *fuzzy*. O controle *fuzzy* foi desenvolvido no final da década de 60 baseada na lógica *fuzzy* (nebulosa). Essa lógica, diferentemente da lógica binária, pode assumir valores intermediários entre verdadeiro (1) e falso (0), que podem ser descritos linguisticamente como por exemplo: muito verdadeiro, verdadeiro, pouco verdadeiro [9].

Essa principal característica da lógica *fuzzy* permite implementar ações de controle baseada em heurísticas, assim como incorporar a experiência humana em esquemas de controle com modelos desconhecidos ou complexos [10]. Os controladores *fuzzy* são comumente divididos em dois principais tipos: Mamdani e Takashi-Sugeno. Esse trabalho utiliza a abordagem Mamdani, que consiste em um conjunto de regras "SE-ENTÃO", aonde ambos antecedentes e consequentes são definidos de forma linguística [7]. A desvantagem da abordagem Mamdani é a impossibilidade de provar a estabilidade do controlador pelos métodos de Lyapunov [11]. Os estudos de [5], mostraram que mesmo para controladores clássicos, a otimização de parâmetros no projeto do controlador leva a diferenças significantes no esforço de controle. Visto isso, para melhorar ainda mais o esforço e a as especificações de desempenho, algoritmos de otimização podem ser usados para encontrar valores ótimos os parâmetros dos controladores.

Dentre os algoritmos de otimização, destaca-se a Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization* - PSO) [8]. Ela consiste na busca de parâmetros ótimos com base em uma função custo que ele deve minimizar. Este algoritmo já foi utilizado na otimização de um controlador *fuzzy* anteriormente e obteve resultados satisfatórios [12].

Visto essa lacuna de conhecimento sobre a eficiência energética dos controladores presentes na indústria em detrimento a técnicas de controle moderno, esse trabalho se propõe a comparar os esforços de controle de um controlador PID ótimo com um controlador *fuzzy* Mamdani ótimo. Em [6] o modelo de um tanque com controle de nível é proposto, e nele é aplicado um controlador *fuzzy* ótimo. O controlador *fuzzy* ótimo e o modelo do tanque considerado em [6] são usados como referência nesse trabalho.

O trabalho se propõe a alinhar as novas técnicas de controle às propostas de ação do PROCEL Indústria, que visa adequar instalações industriais a medidas de eficiência energética. A Seção II. mostra o histórico do PROCEL e como ele atua na indústria. Na Seção III. os controladores PID e *fuzzy* ótimos são apresentados. Na Seção IV. a metodologia de análise é descrita. Na Seção V. serão apresentados os resultados e discussões. Por fim, a Seção VI. apresenta as principais conclusões do trabalho.

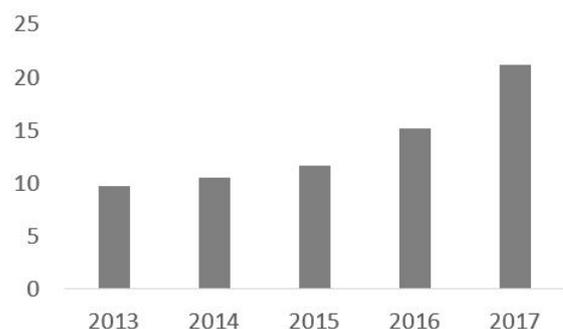
## II. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO BRASIL- PROCEL INDÚSTRIA

O PROCEL é um programa do governo coordenado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e executado pela Eletrobrás. Em 30 de dezembro de 1985 foi instituído pela Portaria Interministerial n. 1.877, objetivando o combate ao desperdício de energia elétrica e o seu uso eficiente. O programa visa desenvolver ações que contribuam para o aumento da eficiência de produtos e serviços, desenvolvimento de bons hábitos e consciência acerca do consumo de energia elétrica. O PROCEL desenvolve diferentes linhas de ação, que focam em desenvolver medidas de eficiência energética para suas áreas de foco, as linhas estão listadas abaixo [3].

- **PROCEL Equipamentos:** identificação por meio do Selo PROCEL os equipamentos e eletrodomésticos mais eficientes, visando pressionar o desenvolvimento de tecnologias que evitem o desperdício.
- **PROCEL Edificações:** promove o uso eficiente da energia elétrica no setor da construção civil em edificações residenciais e comerciais e públicas.
- **PROCEL Iluminação Pública:** apoio a prefeitura em projetos de substituição de equipamentos e melhorias na iluminação pública.
- **PROCEL Poder Público:** desenvolvimento de projetos de treinamento em auxílio que visem o menor consumo de energia no âmbito municipal e estadual.
- **PROCEL Conhecimento:** disseminação de informação qualificada em eficiência energética, por meio de ações educacionais no ensino formal ou na divulgação de livros, *softwares* ou manuais técnicos.
- **PROCEL Indústria:** treinamentos, manuais e ferramentas computacionais voltados para redução do desperdício no segmento industrial, assim como a otimização de sistemas produtivos.

O PROCEL vem trazendo resultados reais durante os últimos anos, com a economia acumulada de 1987 a 2017 da ordem de 128,6 bilhões de kWh. A Figura 2 mostra a economia em bilhões de kWh nos últimos anos em razão das ações do PROCEL.

Figura 2: Economia de energia elétrica nos últimos anos em razão do PROCEL.



O presente trabalho visa unir a filosofia da linha PROCEL Indústria, que foca na adequação de instalações industriais, ao uso de controladores modernos aplicado a plantas industriais. O subprograma PROCEL Indústria foi criado no ano de 2003 e desde então vem focando nos sistemas motrizes. Para alcançar esses objetivos, o programa faz parcerias com federações estaduais de indústria, universidades e outras instituições. O PROCEL Indústria promove um autodiagnóstico energético nas indústrias que atua, através de relatórios e medidas. No âmbito das universidades ele atua capacitando multiplicadores (professores e técnicos) em eficiência energética.

### III. CONTROLADORES PID E FUZZY ÓTIMO

Nessa seção são definidos os parâmetros da simulação e feita uma análise dos índices de erro como em [6]. Um controlador ótimo PID é proposto e comparado com o controlador *fuzzy* ótimo proposto em [6].

#### A. Otimização por Enxame de Partículas

O PSO é um algoritmo de otimização iterativo fundamentado no fenômeno da migração de pássaros [8]. Nele, cada entrada (conjunto de parâmetros) para o sistema é denominado partícula e para cada uma é calculado o valor correspondente da função custo. Em cada iteração as partículas são atualizadas e novos valores são calculados. Para a inicialização do algoritmo é necessário definir o número de partículas e o número máximo de iterações a serem realizadas. É recomendado que o algoritmo seja executado várias vezes para evitar mínimos locais. Neste trabalho, a utilização do algoritmo é dada como em [6].

#### B. Controladores de nível

O principal objetivo desse trabalho é comparar a eficiência energética de uma mini planta industrial utilizando dois controladores distintos. Um dos controladores a ser comparado foi proposto por [6], sendo ele um controlador *fuzzy* otimizado utilizando-se o método por enxame de partículas (PSO). Em contrapartida, o outro controlador será um PID convencional cujos ganhos serão otimizados buscando-se uma comparação entre os tipos de controle utilizados.

#### C. Controlador PID ótimo

Os controladores que alimentam o erro adiante para a planta são denominados sistemas de controle proporcional (P), os que alimentam a integral do erro são os sistemas de controle integral (I) e os que alimentam a derivada do erro são os sistemas de controle derivativo (D) [13]. Um controlador do tipo PID pode ser equacionado no domínio de Laplace como

$$C(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (1)$$

onde  $K_P$ ,  $K_I$  e  $K_D$  são os ganhos proporcional, integral e derivativo do controlador [13].

Para encontrar a sintonia ótima do controlador PID, foi utilizado um algoritmo de otimização por enxame de partículas. Para isso, um modelo computacional foi desenvolvido a fim

de representar o sistema e, em seguida, o algoritmo ajustou iterativamente os ganhos do controlador buscando reduzir o valor da função custo, que por sua vez está relacionada com o erro do sistema e o esforço de controle. Maiores detalhes sobre a metodologia de otimização podem ser encontrados em [6]. Como resultado da otimização obteve-se o controlador PID com ganhos  $K_P = 5576$ ,  $K_I = 0$  e  $K_D = 0$ .

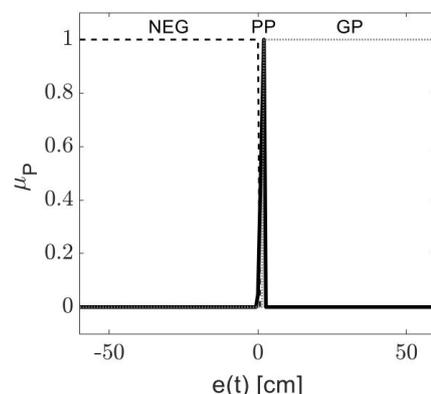
#### D. Controlador Fuzzy ótimo

De maneira sucinta, o projeto de um controlador *fuzzy* engloba a definição das operações *fuzzy* utilizadas, a escolha das variáveis de entrada e saída, a seleção de todas as funções de pertinência e a definição dos métodos de implicação e agregação. Além disso, no caso de sistemas de controle do tipo Mamdani, a saída do mecanismo de inferência consiste em um conjunto *fuzzy* e requer uma operação de defuzzificação para que seja possível retornar um resultado compatível com o problema alvo.

O controlador *fuzzy* ótimo proposto por [6], denominado PSO-FL-C, também é resultante de uma otimização PSO e maiores detalhes acerca da metodologia de projeto do PSO-FL-C podem ser encontrados em [6]. Este controlador é do tipo SISO (*Single Input Single Output*, do inglês) e possui o erro  $e(t)$  como entrada, que é a diferença entre o nível de referência  $h_{ref}(t)$  e o nível medido  $h(t)$ , e a vazão da bomba de circulação  $w_{in(ref)}(t)$  como saída. Seus universos de discurso são, respectivamente,  $-60 \leq e(t) \leq 60 \text{ cm}$  e  $0 \leq w_{in(ref)} \leq 24 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$ .

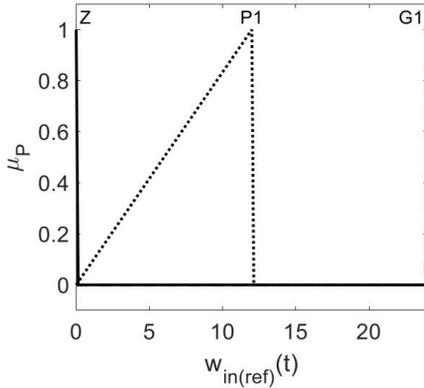
Além disso, o controlador PSO-FL-C utiliza t-normas e s-normas convencionais (*min* e *max*, respectivamente), método de implicação mínimo, método de agregação máximo e método de defuzzificação centroide (COG - *Center of Gravity*, do inglês) [6]. As funções de pertinência das variáveis de entrada e saída desse controlador são apresentadas nas Figuras 3 e 4, respectivamente.

Figura 3: Funções de pertinência da entrada erro ( $e(t)$ ) e da saída vazão de referência ( $w_{in(ref)}(t)$ ) para o controlador PSO-FL-C. Fonte: [6].



Por se tratar de um problema SISO onde tanto a entrada quanto a saída possuem 3 funções de pertinência, existem apenas 3 regras de inferência, sendo elas: Se  $e(t)$  é NEG então  $w_{in(ref)}$  é Z; Se  $e(t)$  é PP então  $w_{in(ref)}$  é P1; e por fim, Se  $e(t)$  é GP então  $w_{in(ref)}$  é G1 [6].

Figura 4: Funções de pertinência da saída vazão de referência ( $w_{in(ref)}(t)$ ) para o controlador PSO-FLC. Fonte: [6].



#### IV. METODOLOGIA DE COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

##### A. Erros

Para comparar o resultado teórico ao prático do nível do tanque após os degraus de entrada, calculou-se o erro acumulado  $e_{ac}$  somando-se os erros absolutos ponto a ponto entre o valor obtido com o respectivo controlador e o degrau referência via (2). Em seguida o erro relativo  $e_{rel}$  foi calculado usando (3), visando mostrar a proximidade do resultado experimental ao simulado.

$$e_{ac} = \sum |nível_{ref}(t) - nível(t)| \quad (2)$$

$$e_{rel} = \frac{|e_{ac}(pratico) - e_{ac}(simulado)|}{e_{ac}(simulado)} \quad (3)$$

Para comparar os esforços de controle entre si, foi usado o conceito de norma vetorial, que associa cada ponto a um número real não-negativo. Os valores das normas ponto a ponto serão somadas para chegar a um valor de  $\delta_{esf}$  que irá indicar qual controlador possui maior esforço de controle.

$$\delta_{esf} = \sum |w_{in}(ref)| \quad (4)$$

##### B. Eficiência Energética

No exemplo estudado, a bomba presente na mini planta industrial recebe como entrada a saída do controlador, ou seja, o esforço de controle  $w_{in}(ref)$ . O sistema embarcado possui internamente um controlador proporcional integrativo (PI) para a bomba, que irá converter  $w_{in}(ref)$  para uma tensão  $V_b$  a ser aplicada na bomba [6]. Visto que a ação integral garante erro nulo, o gasto energético é proporcional à forma da entrada. Comparar o esforço de controle, nessa ocasião, significa comparar o quanto de tensão é aplicada à bomba, e o quanto de energia é gasta, uma vez que a corrente circulante irá depender majoritariamente da resistência de armadura  $R_m$ , ao considerar a indutância de armadura  $L_m = 0$ . Para a planta considerada, verificou-se que  $R_m = 34.39\Omega$ . É possível medir a tensão  $V_b$  aplicada a bomba para o caso experimental, dessa forma, é possível obter uma estimativa das perdas elétricas no cobre  $P_{el}$  por (5).

$$P_{el} = \frac{V_b^2}{R_m} \quad (5)$$

Para obter a energia  $E$  gasta em Joules, usa-se integração numérica trapezoidal pela equação (6) sobre a curva de potência  $P_{el}$  no tempo.

$$E = \int_0^{T_f} P_{el}.dt = \frac{b-a}{2N} \sum (P_{el}(t_n) + P_{el}(t_{n+1})) \quad (6)$$

Onde  $T_f$  é tempo final,  $N$  o número de amostras e  $a < x_1 < x_2 < \dots < x_N = b$ .

#### V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 5 mostra o resultado da simulação para o controlador PID, *fuzzy* e o nível de referência. Já a Figura 6 mostra o resultado do experimento prático.

Figura 5: Simulação do Nível para ambos controladores e a referência para o caso simulado.

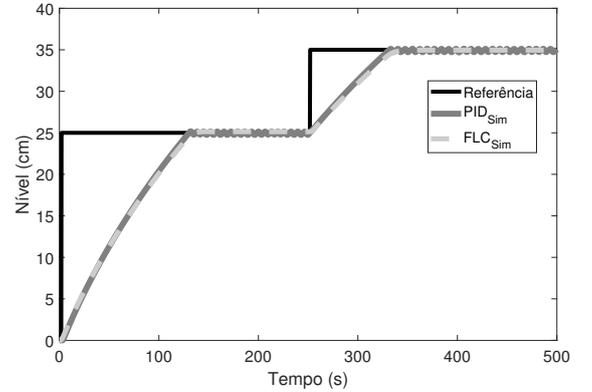
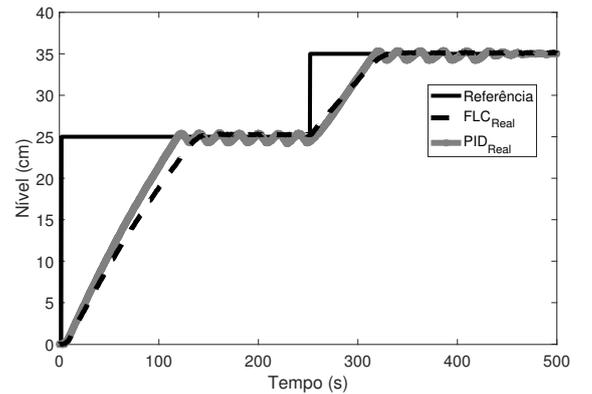


Figura 6: Simulação do Nível para ambos controladores e a referência para o caso real.



As Figuras 5 e 6 mostram que os controladores foram capazes de alcançar a referência em dado momento para as entradas degrau, tanto na simulação quanto no experimento prático. Tanto o controlador PID quanto o *fuzzy* apresentaram uma razão de subida semelhante, visto que a bomba estava operando em vazão máxima em ambos os casos. Logo, esse tempo se trata de uma limitação física do arranjo. Contudo, ao chegar na referência, o controlador *fuzzy* apresentou melhores resultados devido a ausência de oscilações visíveis, enquanto o PID, mesmo otimizado, oscilava durante o regime. A justificativa para essa oscilação é dada através da análise do esforço de controle.

As Figuras 7 e 8 mostram os esforços de controle  $w_{in(ref)}$  para os casos simulados e experimentais, respectivamente. É nítida a dificuldade do PID de manter uma vazão constante quando o nível chega se aproxima da referência. Nas redondezas da referência, o esforço de controle tem formato de onda chaveado, ligando e desligando a bomba constantemente para manter o nível. A intermitência da bomba ocasiona diversos problemas como desgaste dos enrolamentos, gastos energéticos mais elevados nas diversas partidas, necessidade um conversor de frequência mais robusto e também perdas na performance em decorrência do atraso de resposta em razão da zona morta do motor. Além disso, as oscilações de alta frequência não são bem reproduzidas pelo movimento rotacional do eixo do motor.

Figura 7: Simulação do Esforço de Controle para ambos controladores para o caso simulado.

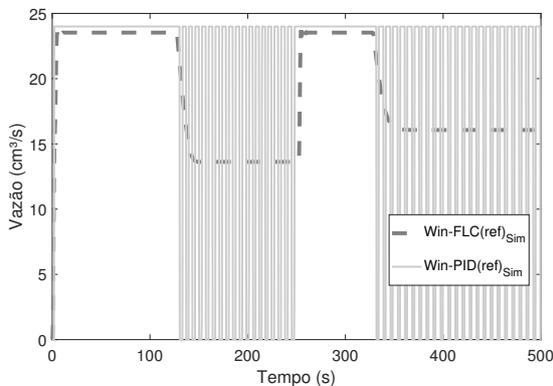
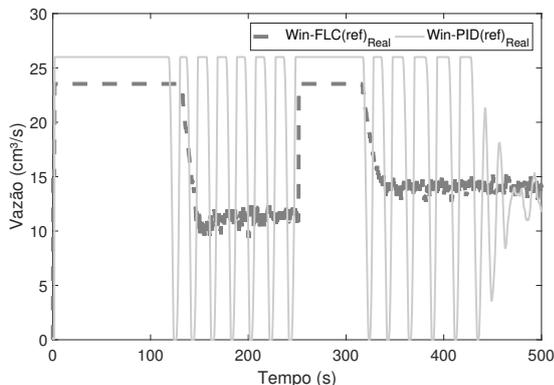


Figura 8: Simulação do Esforço de Controle para ambos controladores para o caso real.



Comparando-se as Figuras 7 e 8, nota-se que existe uma discrepância significativa entre os esforços de controle simulados e experimentais. Isso representa algum grau de divergência entre a planta real e o modelo matemático utilizado, indicando a necessidade de aplicar métodos mais precisos de modelagem e identificação paramétrica - para que assim os resultados do estudo sejam mais realísticos. A exemplo do esforço de controle para o PID experimental em comparação ao simulado. O sistema real apresenta uma frequência no chaveamento menor que o simulado, indicando que este apresenta uma característica passa-baixa mais acentuada do que a prevista pelo modelo.

A Tabela 1 mostra que apesar de oscilar, o erro acumulado

para o controlador PID é menor que o erro para o controlador *fuzzy*. Embora essa diferença seja ligeira, o PID o faz em detrimento de um esforço de controle maior e mais prejudicial ao sistema.

Tabela 1: Erros para nível em ambos controladores em relação a referência.

$e_{ac}$	PID	FLC
<b>Simulado</b>	$6.1925 \times 10^3$	$6.2763 \times 10^3$
<b>Real</b>	$6.3737 \times 10^3$	$7.0068 \times 10^3$
$e_{rel}$	2.92%	11.63%

A Tabela 2 mostra os valores de  $\delta_{esf}$ , que indicam a comparação entre os esforços de controle do PID e do *fuzzy* para o caso experimental.

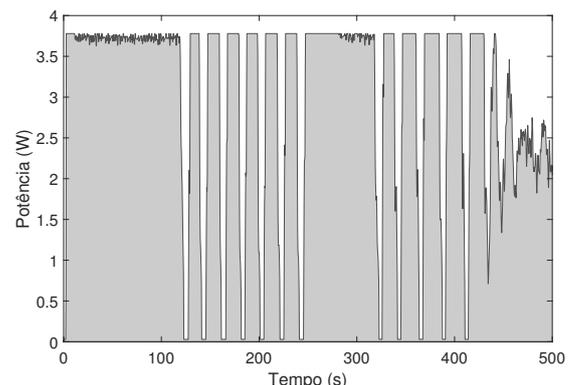
Tabela 2: Comparação entre esforços de controle para o caso experimental.

	PID	FLC
$\delta_{esf}$	$3.2640 \times 10^4$	$2.8979 \times 10^4$
<b>Economia</b>	12.6%	

Os resultados mostram um esforço de controle significativamente menor no controlador *fuzzy*, tanto visualmente através da Figura 8 quanto pelo valor de  $\delta_{esf}$ , o que implica em condições mais favoráveis para a operação dos motores, com menos chaveamento e tensões menores de operação. Além de mitigar as oscilações de nível, o que é desejável para maioria dos processos industriais.

As estimativas de perdas elétricas na resistência de armadura  $P_{el}$  para o experimento em ambos controladores são exibidas nas Figuras 9 e 10. Não foi possível estimar as mesmas grandezas para o sistema simulado, uma vez que valores como a tensão aplicada  $V_b$  estão implícitos no modelo, sendo necessário o uso de um estimador de estados, como o Filtro de Kalman, para determinar o estado.

Figura 9: Potência consumida para controle PID.



A potência demandada pelo controle PID, Figura 9, em geral chaveia entre 0W e 3.75W. Além disso, nota-se que esse chaveamento da potência acompanha a característica do esforço de controle vista na Figura 8. Já a potência demandada pelo controle *fuzzy*, Figura 10, apresenta um valor médio menor. Apesar de possuir caráter oscilatório, o valor mais baixo não chega a 0W, o que significa que a bomba não fica intermitente durante a operação de controle de nível - evitando não-linearidades imprevistas, tais como a existência de uma zona morta. A energia gasta por ambos controladores obtida

por (6) é exibida na Tabela 3.

Figura 10: Potência consumida para controle *fuzzy*.

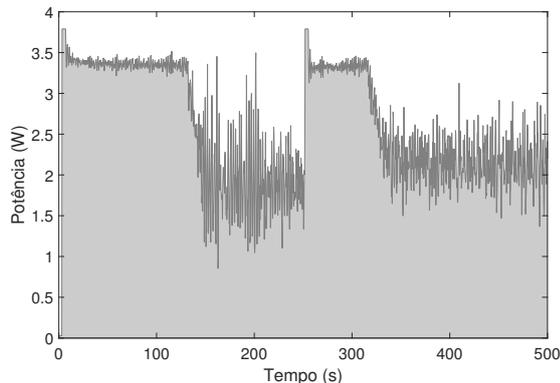


Tabela 3: Gasto de energia em Joules para cada controle.

	PID	FLC
$E(J)$	$2.5435 \times 10^3$	$2.3648 \times 10^3$
<b>Economia</b>		7.55%

O controle *fuzzy* se mostrou vantajoso em relação ao PID, apresentando um gasto energético aproximadamente 8% menor. Economia que pode ser significativa quando considerada em um ambiente industrial.

## VI. CONCLUSÃO

O PROCEL Indústria visa melhorar condições de operação no âmbito industrial para um aproveitamento da energia e otimização dos processos operacionais. O estudo da eficiência dos controladores com ênfase no aproveitamento energético é uma demanda latente, e nesse trabalho foram expostos dois controladores, um PID e um *fuzzy*, ambos otimizados e aplicados no modelo de uma mini planta industrial. Os resultados mostraram que, apesar de ambos controladores apresentarem desempenho semelhante no controle de nível, seus esforços de controle são bastante distintos - onde o PID atua de maneira mais agressiva e intensivamente chaveada. Além disso, verificou-se uma economia efetiva de aproximadamente 8% no gasto de energia para o controlador *fuzzy*, o que pode representar uma economia significativa em uma indústria ao longo de um ano. O controlador PID apresentou um esforço de controle chaveado, que compromete o bom funcionamento dos motores elétricos no longo prazo e causa efeitos adversos em sua operação. É sugerido para trabalhos futuros um estudo semelhante aplicado a motores de corrente alternada, visto que estes são os mais usados na indústria e apresentam peculiaridades não presentes nos motores de corrente contínua. Também é sugerido a comparação entre os resultados simulados de potência aplicada através do uso de estimadores de estado.

## VII. AGRADECIMENTOS

Esse trabalho foi financiado pela FAPESB através do projeto RED0004/2014, Aplicações de Controle em Sistemas Robóticos Não-Holonômicos.

## REFERÊNCIAS

- [1] FERREIRA, C. A. et al. Atuação da Eletrobrás, através do Procel, na eficiência energética de indústrias brasileiras. In: **LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION**. 2009.
- [2] JANNUZZI, Gilberto De Martino. Aumentando a eficiência nos usos finais de energia no Brasil. **Sustentabilidade na Geração e o Uso da Energia no Brasil: os próximos 20 anos**, p. 35, 2002.
- [3] PROCELINFO. Acesso em 19/07/2019, em: <http://www.procelinfo.com.br/>.
- [4] ASTROM, Karl Johan. PID Control. In: ASTROM, Karl Johan; MURRAY, Richard M. **Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers**. Lund University: DRAFT, 2007.
- [5] WU, Yongling et al. Optimization of Controller Parameters for Energy Saving. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 47, n. 3, p. 10281-10286, 2014.
- [6] MATOS, Victor S. et al. CONTROLADOR Fuzzy OTIMIZADO POR PSO APLICADO A UMA MINI PLANTA INDUSTRIAL. **XXVI Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica**. 2019.
- [7] USHIKOSHI, Thiago de A. et al. Fuzzy Maneuvering Controller applied to a Dynamic Model of a Differential Drive Mobile Robot. In: **2018 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)**. IEEE, 2018. p. 1-8.
- [8] KENNEDY, James. Particle swarm optimization. **Encyclopedia of machine learning**, p. 760-766, 2010.
- [9] WANG, Li-Xin; WANG, Li-Xin. **A course in fuzzy systems and control**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 1997.
- [10] ZADEH, Lotfi A. Fuzzy sets. **Information and control**, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.
- [11] USHIKOSHI, Thiago; CARDOSO, Rafael; COUTINHO, Pedro; CHAGAS, Thiago. Real-Time Mamdani-type Fuzzy Maneuvering Control of a Differential-Drive Mobile Robot. **Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**, Ouro Preto - MG, p. 1-6, 2019.
- [12] ESMIN, A. A. A.; AOKI, A. R.; LAMBERT-TORRES, G. Particle swarm optimization for *fuzzy* membership functions optimization. In: **IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics**. IEEE, 2002. p. 6 pp. vol. 3.
- [13] NISE, Norman S.; DA SILVA, Fernando Ribeiro. **Engenharia de sistemas de controle**. LTC, 2002.