

Anais do Seminário de Pesquisa na Área de Engenharia Elétrica



PAEE



Seminário de Pesquisa na Área
de Engenharia Elétrica | SPAEE

1º Seminário de Pesquisa na Área de Engenharia Elétrica

O Seminário de Pesquisa na Área de Engenharia Elétrica (SPAEE) é um evento anual organizado pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (Mestrado) e Programa de Pós-Graduação Associado em Engenharia Elétrica UEL/UTFPR-CP (Doutorado) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procópio (UTFPR-CP). O principal objetivo do SPAEE é promover a divulgação científica dos trabalhos de pesquisa realizado por discentes ligados ao Departamento de Engenharia Elétrica (DAELE) da UTFPR-CP, desde o Ensino Médio, Graduação, Mestrado e Doutorado. Os resumos publicados se referem tanto a trabalhos em andamento quanto a trabalhos já finalizados, e o conteúdo é de responsabilidade dos autores.

Comissão Organizadora

Aylla Rafaela Menezes Guedes
Clayton Luiz Graciola
Cristiano Marcos Agulhari
Esdras Battosti da Silva
Felipe Andrei de Oliveira Silva
Gabriel de Abreu Silva
Gabriel Távore de Arruda
Guilherme Pajares Sanches
Hiago Galindo de Almeida
Joachim Ngodie Tuepagouon
José Pedro Barbosa Neto
Leonardo Poltronieri Sampaio
Marcelo Favoretto Castoldi
Oliver Pincelli Westin
Patrícia Lopes Silva
Rogério Pignelli
Ruhan Pontes Policarpo de Souza
Sergio Augusto Oliveira da Silva
Wesley Angelino de Souza



ESTUDO DE UMA MICRORREDE BIPOLAR

Anderson Aparecido Dionizio¹, Leonardo Poltronieri Sampaio², Sérgio Augusto Oliveira da Silva³

^{1,2,3} Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

Nos últimos anos com o avanço do setor tecnológico e industrial, além do aumento populacional e um maior uso de equipamentos elétricos e eletrônicos, a eletricidade tem sido considerada um recurso estratégico. Dentre as diversas fontes de geração de eletricidade, principalmente nas chamadas fontes de energia renováveis (FERs), a geração pode ocorrer em corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA).

As principais motivações para o uso da eletricidade CC podem ser divididas em: i) aumento da instalação de arranjos fotovoltaicos (FV), os quais geram eletricidade em CC; ii) aumento da participação de veículos elétricos, os quais apresentam baterias com níveis de tensão entre 350-900 V CC; iii) maior participação de cargas CC, como empregadas na iluminação por LEDs, cargas automotivas e telecomunicações. Os motivos mencionados justificam a implementação de microrredes CC, unipolares ou bipolares, uma vez que as mesmas podem garantir reduzidas etapas de conversão de energia e um rendimento global superior [1].

Os conversores de uma microrrede CC podem ser bidirecionais CC/CC, por exemplo, utilizados como interface entre sistemas de armazenamento de energia (SAE) e barramento CC da microrrede. Também podem compor a microrrede conversores CA/CC, onde a rede CA fornece energia para a microrrede manter a tensão do barramento CC, caso o conversor CA/CC seja bidirecional é possível que quando haja excedente de energia esta possa ser injetada na rede CA. No contexto de microrrede CC bipolares, existe o uso de conversores que atuam na melhora da qualidade de energia da mesma, como os balanceadores de tensão e redistribuidores de correntes. Através destas motivações este trabalho propõe a análise de uma microrrede CC bipolar, a qual é visualizada na Figura 1.

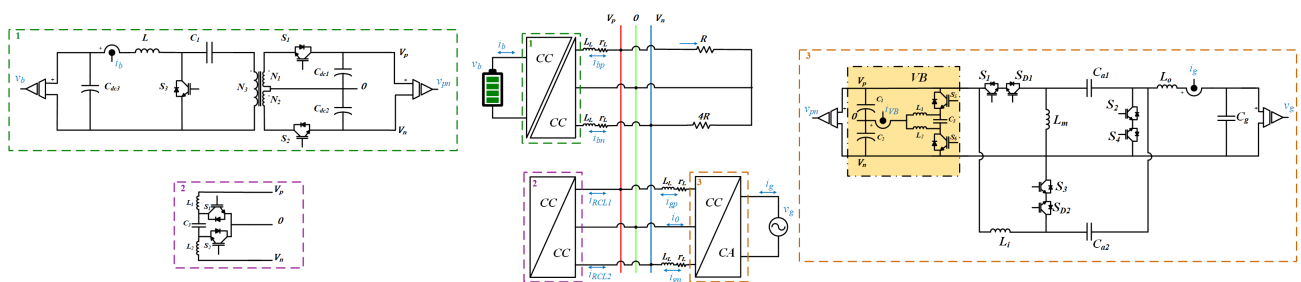


Figura 1: Microrrede proposta.

O conversor de interface entre o SAE é baseado na topologia do conversor SEPIC, apresenta isolamento galvânica e fluxo bidirecional de energia (conversor 1 na Figura 1). O redistribuidor de correntes empregado foi inicialmente proposto por [2] como uma estrutura de balanceador de tensão Čuk (BTC) (conversor 2 na Figura 1). O balanceador de tensão é similar ao BTC, apresentando a vantagem do capacitor intermediário

¹dionizio@alunos.utfpr.edu.br

²sampaio@utfpr.edu.br

³augus@utfpr.edu.br

da topologia apresentar tensão média nula (destaque alaranjado no conversor 3 na Figura 1). O conversor de interface entre a rede CA é considerado uma evolução do conversor proposto em [3], no qual é adicionado a bidirecionalidade (conversor 3 na Figura 1).

Em uma configuração em que o conversor de interface com o SAE e o conversor de interface com a rede operam como formadores de rede, regulando as tensões do barramento (Figura 2 (a)) é utilizado o controle por *droop* para o compartilhamento da potência da carga (Figura 2 (b)), o balanceador de tensão é utilizado em cascata ao conversor de interface da rede, o qual garante a utilização de corrente senoidal em fase com a rede (Figura 2 (d)). Enquanto o redistribuidor de correntes é associado em paralelo à carga, consumindo correntes semelhantes dos polos e simultaneamente tornando as correntes nos indutores do balanceador de tensão próximas a zero (Figura 2 (c)). Os parâmetros do conversor de interface com o SAE são: $L = 5,83 \text{ mH}$, $C_{Vb} = 0,47 \text{ mF}$, $C_1 = 0,96 \text{ }\mu\text{F}$, $C_{dc1} = C_{dc2} = 2,2 \text{ mF}$, $N_1 = N_2 = N_3 = 10$ e $V_b = 120\text{V}$. Já para o redistribuidor de correntes: $L_1 = L_2 = 1 \text{ mH}$ e $C_1 = 10 \text{ }\mu\text{F}$. Para o balanceador de tensão: $L_1 = L_2 = 1 \text{ mH}$ e $C_1 = 10 \text{ }\mu\text{F}$. Já para interface com a rede: $L_o = 1,5 \text{ mH}$, $L_m = L_i = 50 \text{ }\mu\text{H}$, $C_{a1} = C_{a2} = 1 \text{ }\mu\text{F}$ e $V_g = 127 \text{ V}/60 \text{ Hz}$. Os demais parâmetros da microrrede: $V_{p0} = V_{0n} = 48 \text{ V}$, $L_L = 1 \text{ mH}$, $R_L = 10 \text{ }\mu\Omega$ e $R = 3 \text{ }\Omega$.

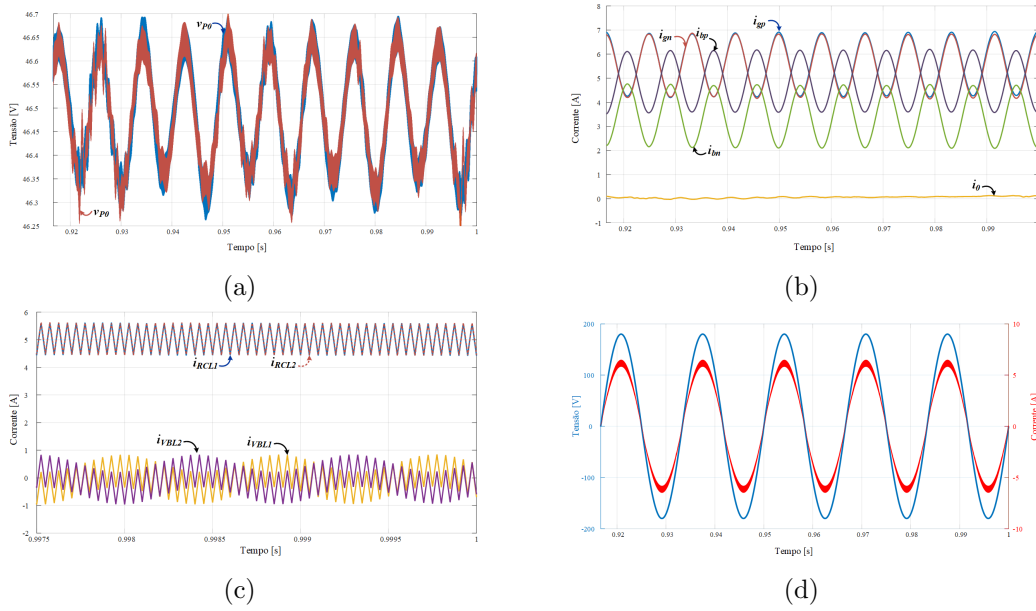


Figura 2: Resultados de simulação: a) Tensões nos polos; b) Compartilhamento de potência; c) Corrente nos indutores do balanceador de tensão e redistribuidor de correntes; d) Tensão e corrente da rede elétrica.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro recebido do CNPq (Processos 308620/2021-6 e 304707/2021-0) e o apoio da CAPES - Código de Financiamento 001.

Referências

- [1] V. F. Pires, A. Cordeiro, C. Roncero-Clemente, S. Rivera, and T. Dragičević, “Dc–dc converters for bipolar microgrid voltage balancing: A comprehensive review of architectures and topologies,” *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 11, no. 1, pp. 981–998, 2023.
- [2] Y. Guo and H. Sun, “A bipolar output active-switched-inductor converter for bipolar dc microgrid,” *International Journal of Photoenergy*, vol. 2022, no. 1, p. 7252163, 2022.
- [3] A. A. Dionizio, A. R. M. Guedes, L. P. Sampaio, S. A. O. da Silva, and P. Westin, “Inversor integrado zeta/Ćuk para aplicações monofásicas autônomas,” Jan. 2025.

DETECÇÃO DE CURTO-CIRCUITO EM ESTADORES DE MOTORES DE INDUÇÃO
ACIONADOS POR INVERSORES UTILIZANDO PARÂMETROS DE HJORTH MODIFICADO

Arthur Carvalho Santos¹, Marcelo Favoretto Castoldi², Wesley Angelino de Souza³, Alessandro Goedtel⁴, Gustavo Henrique Bazan⁵

^{1,2,3,4}Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil

⁵Instituto Federal do Paraná (IFPR), Av. Dr Tito 801, Jacarezinho, Paraná, Brasil

Resumo

As máquinas elétricas estão presentes em 80% dos processos industriais, devido a sua confiabilidade e baixos custos de manutenção. Entre as possíveis falhas que a máquina pode apresentar, o estator é responsável por 37% das falhas, impactando na continuidade e segurança da operação [1].

Devida o alta ocorrência de falhas que esse componente apresenta, diferentes métodos baseados na análise do sinal de corrente vem sendo explorados com o objetivo de detectar as falhas de estator. Entre os diferentes tipos de falhas que o estator pode apresentar, destacam-se os curto-circuitos entre espiras, quando não detectado pode evoluir para falhas mais severas, tornando essencial o desenvolvimento de métodos eficazes para realizar o diagnóstico [1].

Este trabalho emprega os parâmetros de Hjorth - Atividade, Mobilidade e Complexidade - juntos dos parâmetros modificados Chaos e Hazard como atributos para realizar o treinamento de modelos de aprendizado de máquina supervisionados. Os parâmetros de Hjorth já foram implementados na detecção de falhas de rolamento [2] e em barras quebradas no rotor [3], porém sua aplicação em diagnóstico de curtos-circuitos entre espiras no estator de motores alimentados por inversores de frequência ainda é pouco explorada.

A metodologia proposta extraiu os parâmetros de Hjorth modificados do sinal de corrente da saída do inversor para cada uma das fases, totalizando 15 atributos. Esses atributos foram utilizados no treinamento de cinco algoritmos de aprendizado de máquina, sendo eles k-Vizinhos Mais Próximos (KNN), Máquina de Vetores de Suporte (SVM), Perceptron Multicamadas (MLP), Floresta Aleatória (RF) e XGBOOST, que tiveram seus hiperparâmetros ajustados através da busca em grade, e o processo de redução de dimensionalidade por meio da técnica *sequential feature selection* (SFS), com o objetivo de obter o subconjunto que retorna o maior nível de acurácia com a menor quantidade de atributos. Os modelos passaram por uma nova rodada de treinamento utilizando os subconjuntos selecionados para cada modelo para maximizar o seu desempenho.

Os sinais de corrente utilizados neste trabalho foram coletados de forma experimental utilizando dois motores de indução trifásicos, sendo um com potência de 1 CV e outro com potência de 2 CV, modificados para permitir injetar de forma controlado curto-circuito entre espiras no estator com severidades de 1%, 3%, 5% e 10%. Além de variar a severidade de curto-circuito, a frequência síncrona do inversor foi variada entre 12 Hz e 60 Hz, com incrementos de 6 Hz. O procedimento experimental é apresentado com mais detalhes

¹arthur.2019@alunos.utfpr.edu.br

²marcastoldi@utfpr.edu.br

³wesleyangelino@utfpr.edu.br

⁴agoedtel@utfpr.edu.br

⁵gustavo.bazan@ifpr.edu.br

em [4]. Este trabalho utilizou apenas os dados provenientes do motor de 1 CV para extrair os parâmetros de Hjorth modificados e treinar os algoritmos de aprendizado de máquina para realizar a identificação das diferentes severidades curto-circuito.

A Tabela 1 apresenta as métricas de desempenho obtidas pelos classificadores considerando os subconjuntos selecionados pelo SFS, assim como a variação percentual em relação aos resultados obtidos antes da etapa de redução de dimensionalidade. Dentre os modelos avaliados, o classificador do MLP apresentou

Tabela 1: Métricas de Desempenho dos Classificadores

Classificador	Acurácia	Precisão	Recall	F1-Score
KNN	76(↑ 9%)	77(↑ 7%)	77(↑ 9%)	77(↑ 8%)
SVM	91(↓ 2%)	92(↓ 1%)	91(↓ 2%)	91(↓ 2%)
MLP	98(↑ 1%)	98(↑ 1%)	98(↑ 1%)	98(↑ 1%)
RF	77(↑ 4%)	78(↑ 4%)	78(↑ 4%)	78(↑ 5%)
XGBOOST	74(−0%)	75(−0%)	75(−0%)	75(−0%)

o melhor desempenho global, atingindo acurácia de 98%. O desempenho obtido apresentou acréscimo de 1 ponto percentual, mesmo após uma redução de 20% no subconjunto de atributos. Os atributos descartados foram a Mobilidade da fase C, e o Chaos da fase A e B, enquanto os parâmetros de Hjorth Modificados que permaneceram no subconjunto representa 40% do atributos.

Os resultados obtidos indicaram que a utilização desses parâmetros, em conjunto com a técnica de redução de dimensionalidade, possibilitou a construção de modelos com desempenho elevado e complexidade reduzida. Especificamente, o classificador perceptron multicamadas (MLP) alcançou acurácia de 98%, mesmo após uma redução de 20% na quantidade de atributos utilizados. Essa redução permitiu um aumento no desempenho do classificador em 1 ponto percentual, além disso os parâmetros modificados apresentaram uma contribuição significativa, reforçando potencial como descritores complementares em cenários com sinais distorcidos pela comutação do inversor.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho por meio de uma bolsa de estudos de Demanda Social (CAPES-DS), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão de recursos via projetos de pesquisa, processos 311634/2022-2 e 302521/2023-2 e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pela estrutura disponibilizada.

Referências

- [1] M. U. Sardar, T. Vaimann, L. Kütt, A. Kallaste, B. Asad, S. Akbar, and K. Kudelina, “Inverter-Fed Motor Drive System: A Systematic Analysis of Condition Monitoring and Practical Diagnostic Techniques,” *Energies*, July 2023.
- [2] A. C. Santos, W. A. Souza, G. V. Barbara, M. F. Castoldi, and A. Goedel, “Diagnostics of Early Faults in Wind Generator Bearings Using Hjorth Parameters,” *Sustainability*, Oct. 2023.
- [3] R. D. Barcenas-Peralta, C. A. Perez-Ramirez, J. R. Rivera-Guillen, J. P. Amezcua-Sanchez, M. Valtierra-Rodriguez, R. Hernandez-Maldonado, and J. J. De Santiago-Perez, “Hjorth Parameters for Broken Rotor Bars Failures Characterization in Induction Motors,” in *2023 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, (Ixtapa, Mexico), IEEE, Oct. 2023.
- [4] W. F. Godoy, I. N. Da Silva, A. Goedel, and R. H. Cunha Palácios, “Evaluation of stator winding faults severity in inverter-fed induction motors,” *Applied Soft Computing*, vol. 32, July 2015.

ESTRATÉGIA MULTIVARIÁVEL PARA MODELAGEM E CONTROLE DE UM UPQC MONOFÁSICO

Beatriz Masquetti Pelz¹, Sérgio Augusto Oliveira da Silva², Guilherme Masquetti Pelz³,

Leonardo Bruno Garcia Campanhol⁴, Leonardo Poltronieri Sampaio⁵

^{1,2,3,5} Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

⁴ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil

Resumo

Nos últimos anos, o avanço da eletrônica de potência e o aumento da demanda energética intensificaram a conexão de cargas não-lineares e geração distribuída, afetando a qualidade da energia devido às correntes injetadas [1]. Para mitigar esses problemas, o condicionador unificado de qualidade de energia (UPQC) é utilizado para compensar distúrbios de tensão e corrente, operando no modo dual neste estudo [2].

Geralmente, os conversores do UPQC são modelados separadamente, limitando a análise de distúrbios. Este trabalho propõe um modelo e controle multivariável que considera todos os estados do UPQC monofásico, visto na Figura 1(a). Além disso, apresenta uma metodologia para projeto de controladores baseada no regulador quadrático linear (LQR) e otimização por evolução diferencial (DE), com validação.

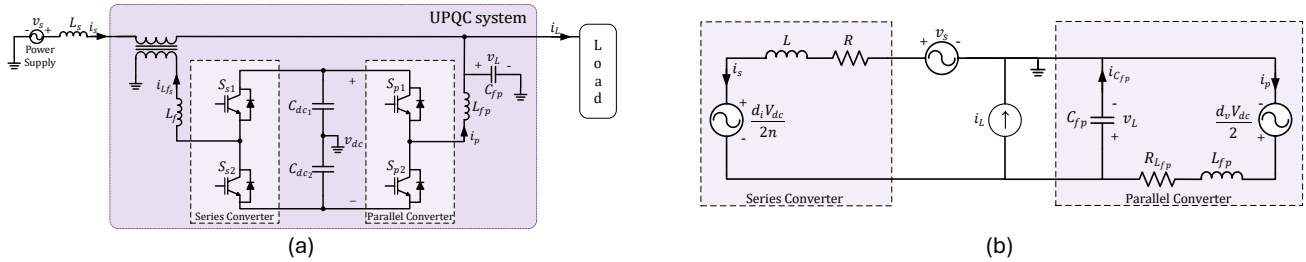


Figura 1: Conversor UPQC: (a) Diagrama de Potência; (b) Circuito equivalente.

Para isso, foi construído o circuito equivalente completo do UPQC (Figura 1 (b)) no qual engloba as saídas e entradas de ambos os conversores e obtido a representação completa em espaço de estados, como segue:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_p \\ \dot{\hat{v}}_L \\ \dot{\hat{i}}_s \end{bmatrix}_{x_M} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{Lfp}}{L_{fp}} & -\frac{1}{L_{fp}} & 0 \\ \frac{1}{C_{fp}} & 0 & \frac{1}{C_{fp}} \\ 0 & -\frac{1}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}_{A_M} \begin{bmatrix} \hat{x}_p \\ \hat{v}_L \\ \hat{i}_s \end{bmatrix}_{x_M} + \begin{bmatrix} \frac{V_{dc}}{L_{fp}} & 0 \\ 0 & \frac{V_{dc}}{nL} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{B_{Md}} \begin{bmatrix} \hat{d}_p \\ \hat{d}_i \end{bmatrix}_{u_{Md}} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C_{fp}} & 0 \\ -\frac{1}{C_{fp}} & 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix}_{B_{Mw}} \begin{bmatrix} \hat{i}_L \\ \hat{v}_s \end{bmatrix}_{u_{Mw}} \quad \hat{y}_M = \begin{bmatrix} \hat{v}_L \\ \hat{i}_s \end{bmatrix}_{y_M} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{C_M} \begin{bmatrix} \hat{x}_p \\ \hat{v}_L \\ \hat{i}_s \end{bmatrix}_{x_M} \quad (1)$$

O modelo completo do conversor UPQC é um sistema MIMO (múltiplas entradas e saídas). Tradicionalmente, a tensão da carga v_L e a corrente da rede i_s eram tratadas apenas como distúrbios. eram tratadas apenas como distúrbios. No entanto, no modelo multivariável proposto, essas variáveis foram incluídas como estados do sistema, permitindo um controle mais robusto, com maior rejeição a ruídos e estabilidade diante de distúrbios. O controle proposto segue referências senoidais de corrente e tensão, rejeitando distúrbios harmônicos. Para isso, utiliza um controlador multi-ressonante com realimentação de estados, adicionando a integral do erro entre referência e saída. Além disso, para assegurar erro nulo e rejeição de distúrbios harmônicos, incluem-se estados ressonantes para cada saída e frequência. O sistema de malha aberta final possui n_u entradas, n_o saídas, n_i estados originais, n_w distúrbios, n_r^o termos ressoantes por entrada o e um total de $n_r = \sum_{o=1}^{n_o} n_r^o$ termos ressonantes, da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_{n_i} \\ \dot{\hat{e}}_{n_o} \\ \dot{\hat{x}}_{r,m} \end{bmatrix}_{\hat{x}_r} = \begin{bmatrix} [A]_{n_i \times n_i} & [0]_{n_i \times n_o} & [0]_{n_i \times 2n_r} \\ [-C]_{n_o \times n_i} & [0]_{n_o \times n_o} & [0]_{n_o \times 2n_r} \\ 0 & [B_e]_{2n_r \times n_o} & [A_{er}]_{2n_r \times 2n_r} \end{bmatrix}_{A_r} \begin{bmatrix} \hat{x}_{n_i} \\ \hat{e}_{n_o} \\ \hat{x}_{r,m} \end{bmatrix}_{\hat{x}_r} + \begin{bmatrix} [B]_{n_i \times n_u} \\ [0]_{n_o \times n_u} \\ [0]_{2n_r \times n_u} \end{bmatrix}_{B_r} \hat{d}_{n_u} + \begin{bmatrix} [0]_{n_i \times n_o} \\ I_{n_o} \\ [0]_{2n_r \times n_o} \end{bmatrix}_{B_{Re}} \hat{Re}(t) + \begin{bmatrix} [B_w]_{n_i \times n_w} \\ [0]_{n_o \times n_w} \\ [0]_{2n_r \times n_w} \end{bmatrix}_{B_{wr}} \hat{w}_{n_w} \quad y(t) = \begin{bmatrix} [C]_{n_o \times n_i} & [0]_{n_o \times n_o} & [0]_{n_o \times 2n_r} \end{bmatrix}_{C_r} \hat{x}_r(t) \quad (2)$$

onde, e_o e Re são vetores da integral dos erros e os sinais de referência, $x_{r,m}^o$ é o vetor de estados dos termos ressonantes, A_{er} e B_e definem os estados e entradas dos termos ressonantes associados a cada erro.

Os ganhos de realimentação em espaço de estados são definidos por $K_{LQR} = [K_x^d]_{n_u \times n_i} [K_e^d]_{n_u \times n_o} [K_r^d]_{n_u \times 2n_r}$, onde K_x^d , K_e^d , K_r^d contêm os ganhos que atuam sobre os n_i estados físicos da planta, os n_o estados da integral dos erros e os $2n_r$ estados dos termos ressonantes. O diagrama em blocos do controle genérico, discretizado pelo método de Tustin, é apresentado na Figura 2. Vale destacar que, independentemente da quantidade de

¹ beatrizpelz@alunos.utfpr.edu.br

⁴ campanhol@utfpr.edu.br

² augus@utfpr.edu.br

⁵ sampaio@utfpr.edu.br

³ pelz@utfpr.edu.br

saídas e termos ressonantes, todos os estados $\hat{x}_r[k]$ são utilizados no cálculo das ações de controle.

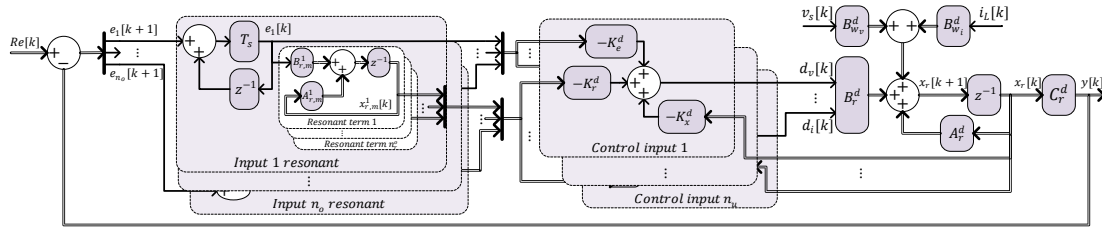


Figura 2: Diagrama de blocos do sistema de controle completo.

Os ganhos K_{LQR} foram ajustados utilizando a abordagem do LQR, que requer a definição das matrizes positivas definidas Hermitiana Q_x e R_x . A otimização metaheurística DE proposta em [3] foi expandida para sistemas multivariáveis, permitindo o ajuste simultâneo dos termos de Q_x e R_x . Dessa forma, a otimização é baseada na minimização da seguinte função custo genérica para sistemas multivariáveis:

$$C_f = \sum_{o=1}^{n_o} \left[w_1^o THD_o + \frac{w_2^o}{t_{sim}} \sum_{k=1}^n kT_s |e_o[k]| + \frac{w_3^o}{t_{sim}} \sum_{k=1}^n (kT_s |d_{o_{max}}[k]| + kT_s |d_{o_{min}}[k]|) \right] \quad (3)$$

onde w_1^o , w_2^o e w_3^o são os fatores de ponderação; THD_o é a distorção harmônica total; $e_o[k]$ é o erro na malha de controle na iteração k ; e $d_{o_{max}}$ e $d_{o_{min}}$ valores unitários que indicam saturação positiva ou negativa do controle na iteração k , todos relacionados a cada saída n_o e t_{sim} é o tempo de simulação.

O desempenho do UPQC com o controlador MIMO foi avaliado experimentalmente, utilizando os parâmetros da Tabela 1, tempo de aquisição de 1/60 ms no microcontrolador e 20 kHz de frequência de chaveamento. Foram aplicados distúrbios em ambas as entradas, considerando uma tensão de rede não senoidal e uma carga não linear composta por retificadores em ponte completa seguidos por cargas RL e RC.

Tabela 1– Parâmetros do sistema do conversor UPQC.

Tensão de pico da rede	$V_p = 179.6 \text{ V}$	Indutância do conversor paralelo	$L_{fp} = 1.5 \text{ mH}$
Indutância equivalente do conversor série	$L = 1.936 \text{ mH}$	Resistência interna do indutor do conversor paralelo	$R_{L_{fp}} = 170 \text{ m}\Omega$
Resistência equivalente do conversor série	$R_{Lf} = 332 \text{ m}\Omega$	Capacitor do conversor paralelo	$C_{fp} = 50 \text{ }\mu\text{F}$
Tensão total do barramento CC	$v_{dc} = 440 \text{ V}$	Capacitores do barramento CC	$C_{dc1,2} = 4.7 \text{ mF}$

Na Figura 3, observam-se os resultados experimentais, incluindo tensões e correntes da carga (v_L e i_L) e da rede (v_s e i_s), além das correntes controladas dos conversores série (i_s) e paralelo ($i_{L_{fp}}$) e a da carga (i_L) e as tensões de compensação do transformador (v_T), do conversor paralelo (v_L) e da rede (v_s).

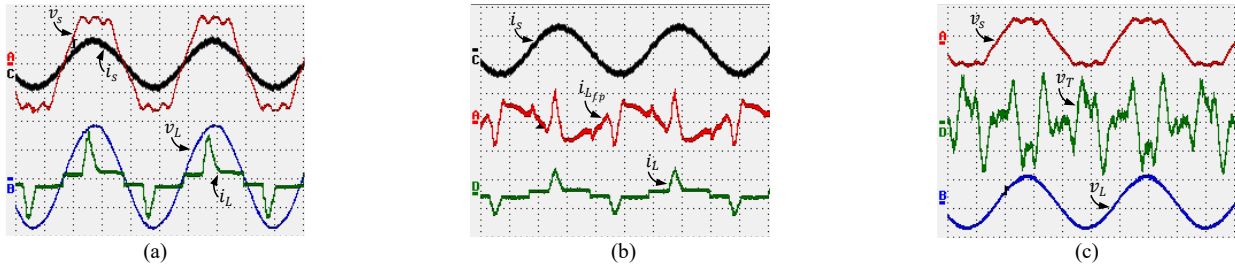


Figura 3: Resultados para o controle MIMO (4 ms/div): (a) tensões: v_s e v_L (100 V/div) e correntes: i_s e i_L (10 A/div); (b) correntes: i_s e $i_{L_{fp}}$ (10 A/div) e i_L (20 A/div); (c) tensões: v_s e v_L (200 V/div) e v_T (20 V/div).

Os resultados confirmam o desempenho satisfatório do controle MIMO, mantendo a corrente da rede com 3,9 % e a tensão da carga com 1,7 % de THD, rejeitando simultaneamente ambos os distúrbios. Esses valores estão abaixo dos limites recomendados pela norma IEEE 519, de 5 % de corrente e de 8 % para tensão.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro recebido do CNPq (Processos 304707/2021-0 e 308620/2021-6) e o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

- [1] A. Ghosh, G. Ledwich, Power quality enhancement using custom power devices, Springer US, Boston, 2002.
- [2] S.A.O. Da Silva, L.B.G. Campanhol, G.M. Pelz, V. De Souza, Comparative performance analysis involving a three-phase UPQC operating with conventional and dual/inverted power-line conditioning strategies, IEEE Trans Power Electron 35 (2020) 11652–11665.
- [3] G.M. Pelz, et al, Tuning of state-feedback multi-resonant controllers based on LQR using differential evolution metaheuristic, International Journal of Electrical Power and Energy Systems 139 (2022).

ESTUDO DOS MODELOS DE CONVERSÃO DE VOZ APLICADO EM VOZ SUSSURRADA

César Fumio Yamamura¹, Paulo Rogério Scalassara²

^{1,2} Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

A fala sussurrada é essencial para a comunicação discreta e frequentemente utilizada por indivíduos com distúrbios da fala, especialmente aqueles que sofrem de condições como paralisia das pregas vocais, nódulos vocais ou outras patologias relacionadas que limitam a capacidade de produzir fala normal devido à ausência ou comprometimento das vibrações das pregas vocais [1]. A Conversão de Voz (VC) *Whisper-to-Normal* surge como uma solução relevante, permitindo modificar as características vocais da fala sussurrada, tornando-a semelhante à fala normal, preservando o conteúdo linguístico.

No entanto, a tarefa de *Whisper-to-Normal* apresenta desafios específicos que a diferenciam das tarefas convencionais de VC. Diferentemente da fala normal, a fala sussurrada carece de frequência fundamental, pois não há vibração das cordas vocais, e possui níveis de energia significativamente mais baixos, tornando-a mais suscetível a ruídos externos [1]. Além disso, em aplicações do mundo real, os usuários podem alternar imprevisivelmente entre sussurros e fala normal, exigindo um sistema capaz de se adaptar dinamicamente a essas transições. Assim, a VC *Whisper-to-Normal* deve transformar a fala sussurrada para que soe como uma voz normalmente falada, estimando a frequência fundamental e restaurando as qualidades tonais ausentes no sussurro.

Foi implementado quatro modelos de VC: WAV2VEC-VC [2], TRIAAN-VC [3], KNN-VC [4] e LVC-VC [5]. Para comparação, foi utilizado o banco de dados DyNaVoicer [6], disponibilizado pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), que contém fala normal e sussurrada do mesmo orador. O objetivo deste trabalho é avaliar esses métodos para a conversão de fala sussurrada para fala normal. Como mostrado na Figura 1, a voz de entrada é a fala sussurrada, que o codificador de conteúdo processa. Esse processo envolve a extração adequada dos dados, isso inclui detalhes sobre o conteúdo da fala, ritmo e entonação. A voz de referência é a fala normal, que não necessariamente precisa ter o mesmo conteúdo linguístico que a voz de entrada, a qual é processada pelo codificador de orador. Esse processo envolve a extração de informações sobre a identidade do falante. O decodificador é responsável por processar os dados obtidos dos codificadores para produzir uma saída de áudio manipulada de forma adequada pelo vocoder, que é um sintetizador de fala que gera formas de onda de áudio a partir de características acústicas, sendo capaz de produzir fala semelhante à humana. Por fim, a voz convertida é o resultado dos modelos de VC. As amostras de áudio convertidas por voz estão na página web³.

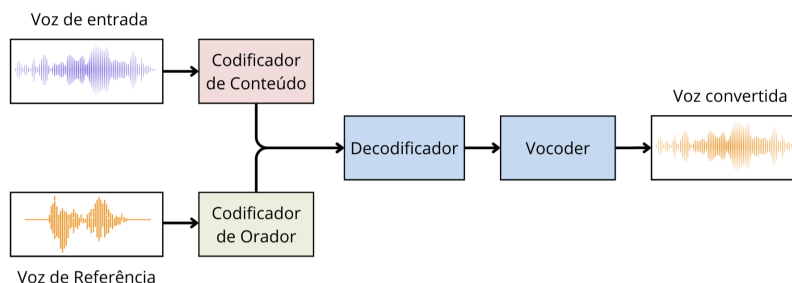


Figura 1: Rede típica de auto-codificação para conversão de voz.

¹cezaryamamura@alunos.utfpr.edu.br

²prscalassara@utfpr.edu.br

³<https://cezaryamamura.github.io/w-vc-demo/>

Para a avaliação, foi realizado um teste perceptual de fala MUSHRA [7] com 6 áudios: cada um dos modelos estudado, o áudio sussurrado e um áudio normal como referência. Os voluntários avaliaram as amostras quanto à inteligibilidade, naturalidade e qualidade geral em relação à referência, em uma escala de 0 a 100, posteriormente normalizada para 0 a 5. O teste Tukey foi realizado para determinar quais pares de modelos diferem significativamente em suas médias. Este teste permite comparações pareadas entre todos os grupos após um teste ANOVA inicial. Os resultados do Tukey são mostrados na Figura 2.

A partir dos resultados do teste Tukey, foram encontradas diferenças significativas entre a maioria dos pares de modelos. Como esperado, o áudio de referência teve o melhor desempenho em comparação com os outros modelos, enquanto o sussurro foi o pior. Esse resultado está alinhado com as instruções dadas aos voluntários, que foram orientados a atribuir uma pontuação alta ao áudio de referência e pontuações mais baixas ao áudio sussurrado.

Além disso, o KNN obteve uma pontuação estatisticamente maior em comparação com o LVC, TRIAAN e WAV2VEC. No entanto, não foram encontradas diferenças significativas entre TRIAAN e WAV2VEC, ou entre TRIAAN e Sussurrado. Ao separar os dados por gênero, tanto para casos masculinos quanto femininos, os modelos de Referência e KNN não se sobrepõem com nenhum outro modelo, indicando diferenças estatisticamente significativas. Por outro lado, o áudio sussurrado se sobrepõe com TRIAAN e LVC para os dados femininos e com WAV2VEC para os dados masculinos, sugerindo que as diferenças nas suas médias podem não ser estatisticamente significativas.

Futuros trabalhos incluem o ajuste fino do modelo com dados de fala sussurrada e a integração dos pontos fortes dos modelos estudados para desenvolver um sistema personalizado de VC *Whisper-to-Normal*.

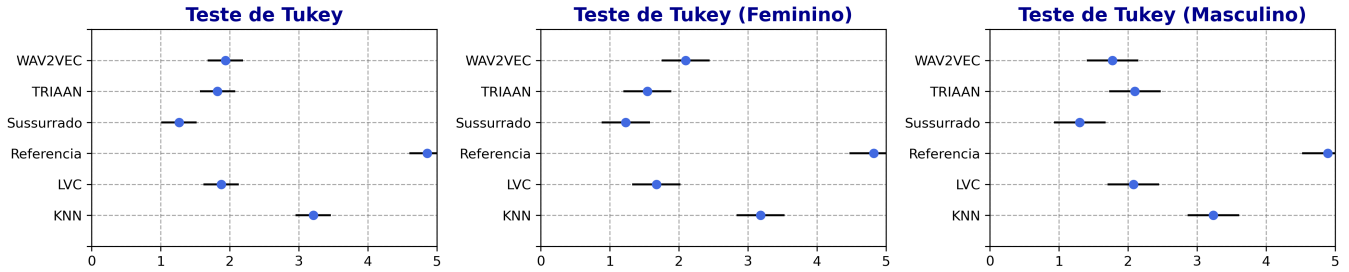


Figura 2: Teste de Tukey.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Os autores também agradecem à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil.

Referências

- [1] C. F. Yamamura, P. R. Scalassara, M. A. Oliveira, and A. J. S. Ferreira, “Neural network models for whisper to normal speech conversion,” *U. Porto Journal of Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 116–129, 2025.
- [2] J. Lim and K. Kim, “Wav2vec-vc: Voice conversion via hidden representations of wav2vec 2.0,” in *ICASSP 2024-2024 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 10326–10330, IEEE, 2024.
- [3] H. J. Park, S. W. Yang, J. S. Kim, W. Shin, and S. W. Han, “Triaan-vc: Triple adaptive attention normalization for any-to-any voice conversion,” in *ICASSP 2023-2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 1–5, IEEE, 2023.
- [4] M. Baas, B. van Niekerk, and H. Kamper, “Voice conversion with just nearest neighbors,” *arXiv preprint arXiv:2305.18975*, 2023.
- [5] W. Kang, M. Hasegawa-Johnson, and D. Roy, “End-to-end zero-shot voice conversion with location-variable convolutions,” *arXiv preprint arXiv:2205.09784*, 2022.
- [6] “Projeto DyNaVoiceR.” <https://paginas.fe.up.pt/~voicestudies/dynavoicer>, 2018.
- [7] M. Schoeffler, S. Bartoschek, F.-R. Stöter, M. Roess, S. Westphal, B. Edler, and J. Herre, “webMUSHRA — a comprehensive framework for web-based listening tests,” *Journal of open research software*, vol. 6, no. 1, 2018.

MINIMIZAÇÃO DE PERDAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS ACIONADOS POR
ESTRATÉGIAS DE CONTROLE PREDITIVOClayton Luiz Graciola¹, Alessandro Goedtel², Marcelo Favoretto Castoldi³, Wesley Angelino de Souza⁴¹ Departamento de Controle e Processos Industriais, Instituto Federal do Paraná, Jacarezinho, Paraná, Brasil^{1,2,3,4} Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

Os Motores de Indução Trifásicos (MIT) são amplamente utilizados em aplicações industriais devido ao seu baixo custo, robustez, alta confiabilidade e simplicidade construtiva [1, 2]. No entanto, a crescente demanda por eficiência energética, impulsionada pela necessidade global de otimizar o consumo e desenvolver tecnologias limpas e renováveis, torna essencial a busca por estratégias que melhorem o desempenho desses motores [3].

Os MITs podem operar conectados diretamente à rede elétrica ou acionados por conversores eletrônicos de potência (inversores), permitindo variação de velocidade e diferentes formas de controle em malha fechada, abrangendo variáveis como velocidade, torque, corrente e consumo de energia [4]. Em geral, as topologias de controle visam maximizar o desempenho do motor no ponto de operação desejado, garantindo fluxo constante no entreferro. Contudo, essa abordagem convencional só assegura um rendimento ótimo na condição nominal de carga e velocidade, ou seja, quando o motor opera em sua potência máxima. Além disso, o fluxo magnético possui uma relação direta com as perdas no núcleo, pois seu aumento eleva as perdas ferromagnéticas, enquanto sua relação com as perdas no cobre é indireta, uma vez que a redução do fluxo pode exigir um aumento na corrente para atender à demanda de torque, impactando assim essas perdas [5].

Em muitas aplicações, os motores de indução operam sob cargas variáveis, frequentemente subdimensionados. Nesses casos, estratégias de controle de fluxo podem melhorar significativamente a eficiência energética. Este trabalho investiga o comportamento do MIT diante da minimização do consumo de energia elétrica por meio de técnicas de controle preditivo. O Controle Preditivo Baseado em Modelo (Model Predictive Control - MPC) surge como uma alternativa promissora aos controladores clássicos, pois prevê o comportamento do sistema com base em seu modelo matemático e seleciona a melhor atuação do sistema ao minimizar uma função custo. Dentre as abordagens de MPC aplicadas aos motores de indução trifásicos, destacam-se o Controle Preditivo de Torque (Model Predictive Torque Control - MPTC) e o Controle Preditivo de Corrente (Model Predictive Current Control - MPCC) [6].

A metodologia deste estudo envolve a aplicação de diferentes pontos de operação de torque e velocidade para avaliar o rendimento do motor sob as estratégias MPTC e MPCC, considerando diversas referências de fluxo magnético. O objetivo é analisar o desempenho dinâmico e o potencial de redução do consumo energético em cada topologia de controle.

Os resultados iniciais, obtidos por meio de simulações no ambiente Matlab/Simulink, indicaram ganhos de eficiência de até 16,44% para o controle MPTC e 16,6% para o controle MPCC, em um motor de 1 CV,

¹clayton.graciola@ifpr.edu.br²agoedtel@utfpr.edu.br³marcastoldi@utfpr.edu.br⁴wesleyangelino@utfpr.edu.br

4 polos e 60 Hz. Os melhores resultados foram observados em cargas leves (0,5 N.m) e baixa velocidade (30 rad/s). Comparado a um controle escalar clássico com otimização de rendimento, os controladores preditivos atingiram um rendimento máximo para cada ponto de operação, com melhor desempenho no controle de velocidade e maior robustez para se manter no ponto de operação desejado [7].

Atualmente, o estudo avança para a implementação experimental dos controladores preditivos em uma plataforma de acionamento e controle de máquinas, instalada na bancada de ensaios do Laboratório de Sistemas Inteligentes (LSI). Esse ambiente possibilita a aplicação de diferentes níveis de carga e a análise detalhada do consumo e fornecimento de energia pelo MIT.

Com base nos dados obtidos, será investigada uma estratégia de minimização online de perdas, visando maximizar o aproveitamento energético enquanto se mantém o desempenho dinâmico característico dos acionamentos baseados em controle preditivo.

Os resultados obtidos demonstram o potencial do controle preditivo na otimização do rendimento energético de motores de indução trifásicos, superando abordagens convencionais ao adaptar-se dinamicamente às condições de carga e velocidade. A implementação experimental proporcionará uma validação mais abrangente das estratégias propostas, consolidando o impacto dessas técnicas na redução do consumo energético industrial. Com isso, espera-se contribuir para o desenvolvimento de acionamentos mais eficientes e inteligentes, alinhados às demandas atuais por sustentabilidade e eficiência energética.

Agradecimentos

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro por meio das concessões 302521/2023-2 e 311634/2022-2. Também expressamos nossa gratidão à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) por disponibilizar sua infraestrutura e suporte para a realização deste trabalho.

Referências

- [1] I. Culbert, *Design, Construction, and Manufacture of Squirrel Cage Rotors: Industrial Application and Case Histories*, pp. 39–54. 12 2016.
- [2] L. A. Pereira, M. Perin, L. F. A. Pereira, J. R. Ruthes, F. L. M. [de Sousa], and E. C. P. [de Oliveira], “Performance estimation of three-phase induction motors from no-load startup test without speed acquisition,” *ISA Transactions*, vol. 96, pp. 376 – 389, 2020.
- [3] P. K. Ghosh, P. K. Sadhu, R. Basak, and A. Sanyal, “Energy efficient design of three phase induction motor by water cycle algorithm,” *Ain Shams Engineering Journal*, 2020.
- [4] S. N. Manias, “12 - introduction to motor drive systems,” in *Power Electronics and Motor Drive Systems* (S. N. Manias, ed.), pp. 843 – 967, Academic Press, 2017.
- [5] B. K. Bose, *Prentice - Modern Power Electronics and AC Drives*. Upper Saddle River, NJ-USA: Prentice Hall, 2002.
- [6] P. R. U. Guazzelli, W. C. de Andrade Pereira, C. M. R. de Oliveira, A. G. de Castro, and M. L. de Aguiar, “Weighting factors optimization of predictive torque control of induction motor by multiobjective genetic algorithm,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 7, pp. 6628–6638, 2019.
- [7] C. L. Graciola, A. Goedel, M. F. Castoldi, W. A. Souza, E. A. Nunes, T. H. Santos, and L. C. P. da Silva and, “Comparison between predictive and scalar control strategies for minimizing losses in induction motors,” *Systems Science & Control Engineering*, vol. 13, no. 1, p. 2481942, 2025.

SISTEMAS DE IDENTIFICAÇÃO E DESAGREGAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DE CARGAS POR TRAJETÓRIA VI

Eduardo Mestre da Gloria¹, Wesley Angelino de Souza²

¹ Departamento Acadêmico de Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

² Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

Atualmente, soluções computacionais são apresentadas para reduzir o consumo de energia e diversas técnicas estão sendo desenvolvidas para a obtenção de informações do sistema elétrico, incluindo a desagregação do consumo de energia elétrica por cargas. Entre técnicas para a desagregação, tem-se a trajetória VI, que através do comportamento de tensão e corrente, permite a identificação dos dispositivos ligados ou desligados em um determinado ponto de conexão elétrica. Desta forma, este trabalho tem como objetivo propor uma metodologia que pode ser adicionada aos medidores de energia residenciais, permitindo a divisão do consumo de energia por eletrodomésticos.

Um modelo de rede neural convolucional (CNN, do inglês Convolutional Neural Network) é capaz de identificar automaticamente quais aparelhos estão ligados no ponto de medição, utilizando apenas a imagem gerada a partir da captação da tensão e da corrente no instante, como ilustrado na Figura 1. Com este propósito, foi utilizado o sistema embarcado Beaglebone Rev C para a coleta de dados dos sensores, e posteriormente, como sistema dedicado para a identificação automática utilizando um modelo de rede convolucional treinado através da base de dados Plug-Level Appliance Identification Dataset (PLAID). Com a análise de 11 eletrodomésticos, tem-se como resultado a acurácia de 95,4%, explicado na Figura 2, com uma matriz de confusão e um gráfico comparando diferentes modelos. Finalmente, foi possível validar e ter um modelo treinado para o uso no sistema embarcado e estudar a metodologia de monitoramento não intrusivo de cargas.

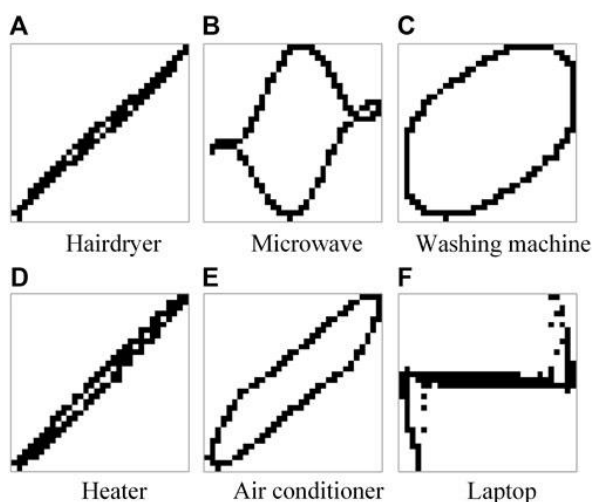


Figura 1: Trajetórias VI feitas a partir de dados do PLAID dataset [1].

¹ egloria@alunos.utfpr.edu.br

² wesleyangelino@utfpr.edu.br

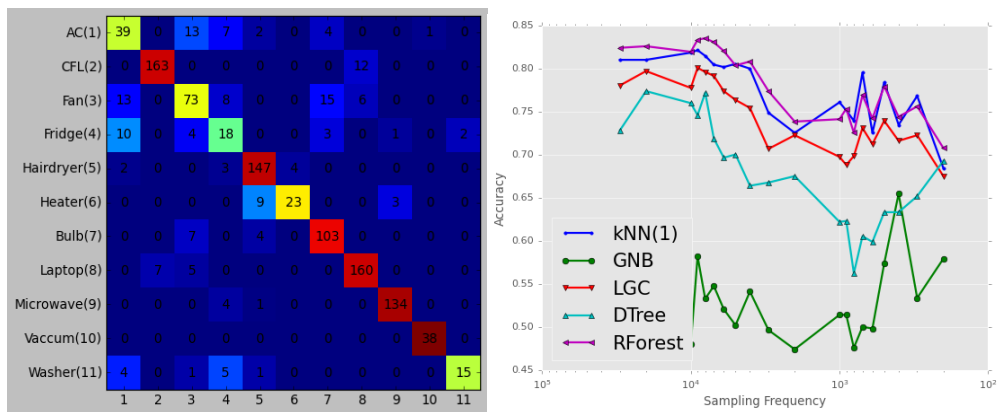


Figura 2 – a) Matriz de confusão do Random Forest; b) Gráfico de comparação entre os modelos [2].

O Beaglebone Black rev-c foi o microcontrolador escolhido para o projeto pois o seu ADC de 12-bits de resolução, seu processador ARM Cortex™-A8 com clock de 1GHz, e seus dois PRUs, são precisos e potentes o suficiente para adquirir os sinais de uma rede elétrica com uma alta precisão temporal e de casas decimais, além de fazer as trajetórias VI, e alimentar o modelo de rede neural com elas em tempo real.

Foi feito o uso de um sensor SCT013-100A para a coleta de corrente e o uso de resistor divisor para a tensão, conforme o circuito apresentado na Figura 3. Foi adicionado um offset de 0,9 Volts, considerando que o fundo de escala do ADC do Beaglebone Black Rev.C é de 1,8 Volts.

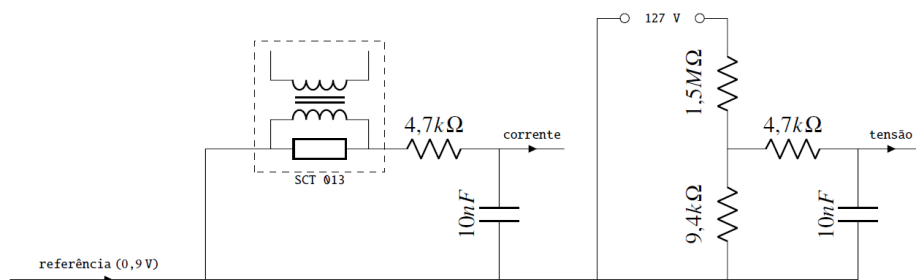


Figura 3 – Circuitos dos condicionamentos de tensão e corrente. Fonte: Própria autoria (2024).

Referências

- [1] XIANG, Y. et al. Non-Invasive Load Identification Algorithm Based on Color Coding and Feature Fusion of Power and Current. *Frontiers in Energy Research*, v. 10, 9 maio 2022.
- [2] GAO, Jingkun et al. A feasibility study of automated plug-load identification from high-frequency measurements. In: 1. IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP). Orlando, FL, USA: IEEE, 2015. v. 2015, p. 220–224.

ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS VARIANTES NO TEMPO EM UM SISTEMA TORSIONAL COM ESTADOS ESTIMADOS

Esdras B. da Silva¹, Ruhan P. P. de Souza², Cristiano M. Agulhari³, Glaucia M. Bressan⁴, Wesley A. de Souza⁵

^{1,2,3,5} Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

⁴ Departamento Acadêmico de Matemática, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

A estimação de parâmetros é uma técnica frequentemente utilizada nos contextos de controle adaptativo, onde busca-se sintetizar controladores que se adaptam à variação dos parâmetros [1]. Muitos sistemas físicos não podem ser descritos adequadamente sem a utilização de parâmetros variantes no tempo, uma abordagem comum neste caso é a LPV (*Linear Parameter-Varying*) [2], onde o sistema é descrito com uma dependência linear a parâmetros exógenos que podem ser variantes no tempo. Entretanto, muitas técnicas de estimação paramétrica consideram apenas parâmetros estáticos. Além disso, uma condição comumente necessária é o conhecimento completo dos estados do sistema, o que não se pode atender em muitas aplicações práticas.

Este trabalho tem como o objetivo desenvolver uma técnica de estimação de parâmetros variantes no tempo considerando estados não disponíveis para leitura. A lei de adaptação é descrita em (1) a (3), onde δ, Γ, κ e Q_0 são coeficientes determinados pelo projetista. Ainda, $\hat{x}(t)$ são os estados estimados, $\hat{\phi}(t)$ é a estimativa das componentes independentes do parâmetro e $\hat{\Phi}(t)$ a estimativa das componentes dependentes.

$$\begin{cases} \dot{G}(t) = -\delta G(t) + \hat{\Phi}(t)^\top \hat{\Phi}(t), & G(0) = 0, \\ \dot{S}(t) = -\delta S(t) + \hat{\Phi}(t)^\top [\hat{x}(t) - \hat{\phi}(t)], & S(0) = 0, \\ \dot{Q}(t) = \delta Q(t) - Q(t) \hat{\Phi}(t)^\top \hat{\Phi}(t) Q(t), & Q_0 = Q^{-1}(0) > 0. \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} P_1(t) = G(t) \hat{\theta}(t) - S(t), \\ P_2(t) = \hat{\Phi}(t)^\top \hat{\Phi}(t) \hat{\theta}(t) - \hat{\Phi}(t)^\top [\hat{x}(t) - \hat{\phi}(t)], \end{cases} \quad (2)$$

$$\dot{\hat{\theta}}(t) = -\Gamma Q(t) (P_1(t) + \kappa P_2(t)), \quad (3)$$

Um filtro robusto com norma $\mathcal{H}_2$ é sintetizado de forma a estimar os estados indisponíveis do sistema, que em conjunto ao estimador paramétrico permitem a estimação dos parâmetros exógenos com um erro limitado. A metodologia proposta é testada no sistema torsional ECP 205a [3] com 2 graus de liberdade (Figura 1), que é descrito no espaço de estados em (4) onde $y(t) = [x_1(t) \ x_3(t)]^\top$ é o sinal de saída, $u(t)$ a entrada de controle e $w(t)$ um sinal de ruído limitado. Os coeficientes considerados são: $k = 1,37$ N/rad, $c_1 = 0,007$ N/rad/s, $J_1 = 0,0108$ kg · m², $c_2 = 0,001$ N/rad/s e $J_2 = [0,0071 \ 0,0103]$ kg · m².

¹esdras.2019@alunos.utfpr.edu.br

²ruhanp@utfpr.edu.br

³agulhari@utfpr.edu.br

⁴glauciabressan@utfpr.edu.br

⁵wesleyangelino@utfpr.edu.br

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k}{J_1} & -\frac{c_1}{J_1} & \frac{k}{J_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k}{J_2} & 0 & -\frac{k}{J_2} & -\frac{c_2}{J_2} \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0,1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} w(t), \quad (4)$$

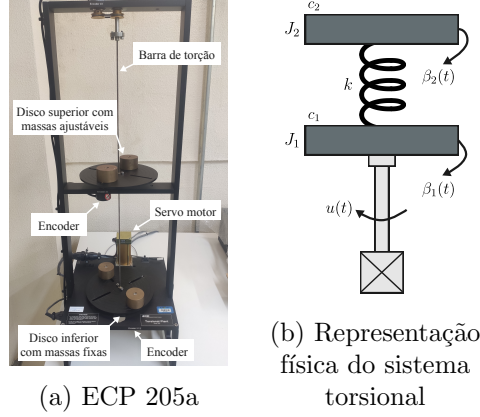


Figura 1: Sistema torsional com 2 graus de liberdade

O objetivo do experimento é estimar a posição das massas no disco superior $\theta(t) = -\exp(-t/5)(\cos(t/2)-1)$, a qual influenciam o momento de inércia na forma $1/J_2 = 140,8451 - 43,7577\theta(t)$. Para $\theta = 0$ as massas estão a 7 cm do centro e a 9 cm quando $\theta = 1$. Os resultados obtidos em ambiente simulado mostram a capacidade em estimar o parâmetro variante sujeito a estados estimados e ruídos limitados. Na Figura 2 é mostrada a estimação do parâmetro $\theta(t)$, resultando em um Coeficiente de Determinação $R^2 = 0,7810$ e um Erro Absoluto Médio (MAE) de 0,0569.

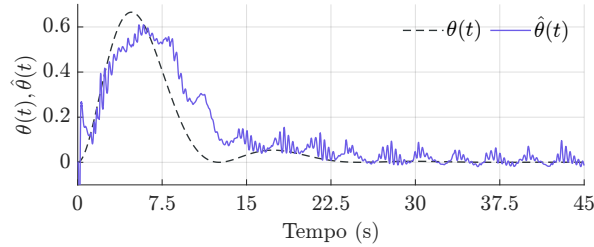


Figura 2: Estimação paramétrica no sistema torsional

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), processo nº 88887.992875/2024-00.

Referências

- [1] K. J. Astrom and B. Wittenmark, *Adaptive Control: Second Edition*. Dover Books on Electrical Engineering, Mineola, New York, USA: Dover Publications, 2008.
- [2] R. Tóth, *Modeling and Identification of Linear Parameter-Varying Systems*, vol. 403 of *Lecture Notes in Control and Information Sciences*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
- [3] T. R. Parks, *Manual for Model 205/205a – Torsional Control System*. 1 Buckskin Court, Bell Canyon, CA 91307, instructor's edition ed., 1999.

PRIORIZAÇÃO DE MANUTENÇÃO EM EQUIPAMENTOS DO SISTEMA DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: UMA ABORDAGEM HÍBRIDA INTEGRANDO
MODELOS MULTICRITÉRIOS E ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO HEURÍSTICAFabrício Augusto de Souza ¹, Marcelo Favoretto Castoldi ², Alessandro Goedtel³, Wesley Angelino de Souza ⁴¹ Companhia Paranaense de Energia - Copel Distribuição, Paraná, Brasil^{2,3,4} Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

Para as concessionárias de distribuição, a priorização dos serviços de manutenção no sistema é fundamental, pois contribui para minimizar falhas e interrupções, garantindo um fornecimento de energia elétrica contínuo e de qualidade. Dada a importância do tema, a busca por estratégias que permitam a alocação mais eficiente dos recursos de manutenção tem sido amplamente estudada na literatura. Dessa forma, a análise multicritério se destaca como uma solução promissora, pois possibilita uma distribuição mais eficaz dos recursos e, conseqüentemente, a melhoria na qualidade dos serviços prestados pelas concessionárias [1].

Logo, estabelecer prioridades diante de uma série de alternativas não é uma tarefa fácil e exige um planejamento assertivo e responsável, especialmente no contexto de uma concessionária de distribuição, onde os critérios e alternativas podem ser numerosos e frequentemente interrelacionados. Neste cenário, as decisões podem ser consideravelmente influenciadas por vieses dos decisores envolvidos no processo de modelagem do problema, o que torna o desafio ainda maior.

Portanto, este trabalho propõe uma metodologia para a alocação ótima de pesos em problemas de análise multicritério, aplicada à priorização da manutenção de equipamentos inoperantes no sistema de distribuição de uma concessionária de energia elétrica, a Companhia Paranaense de Energia - Copel Distribuição, localizada na região sul do Brasil. A abordagem híbrida proposta combina o método Processo Analítico Hierárquico (AHP - do inglês, *Analytic Hierarchy Process*) e a Técnica de Ordenação de Preferências por Similaridade com a Solução Ideal (TOPSIS - do inglês, *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*). O método AHP é empregado para estruturar a hierarquia do problema e para avaliar os critérios com base na opinião de especialistas, por meio de um questionário, resultando na atribuição de pesos a cada critério. Em seguida, esses pesos são utilizados no TOPSIS para ordenar as alternativas. A combinação das técnicas AHP e TOPSIS possibilita a análise de um maior número de alternativas, superando as limitações do AHP quando aplicado isoladamente. Isso justifica a adoção da abordagem híbrida nesta pesquisa.

Além disso, a Análise Relacional Grey (GRA - do inglês, *Grey Relational Analysis*) é aplicada para validar os rankings obtidos. Esse método avalia a similaridade entre as curvas geométricas das sequências de dados disponíveis, determinando o grau de proximidade entre suas relações. Quanto maior a semelhança entre as curvas, mais forte é a relação entre as sequências, o que torna a GRA adequada para a análise de problemas de ordenação [2] e [3]. Neste estudo, a métrica utilizada é o Grau Relacional Grey (GRG), conforme descrito na Equação (1):

¹fabricao.souza@copel.com²marcastoldi@utfpr.edu.br³agoedtel@utfpr.edu.br⁴wesleyangelino@utfpr.edu.br

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n w_k \xi_i(k) \quad (1)$$

no qual, γ_i é o Grau Relacional Grey; n é o número total de elementos; w_k é o peso do elemento i ; $\xi_i(k)$ é o valor do elemento i .

A Figura 1 apresenta os resultados preliminares da pesquisa por meio de gráficos de dispersão dos valores de GRG obtidos no experimento. O eixo x representa a posição das amostras (de 0 a 149), enquanto o eixo y indica os valores de GRG para cada posição no ranking. Além disso, os gráficos incluem uma reta de regressão linear e o índice de correlação calculados para as amostras analisadas.

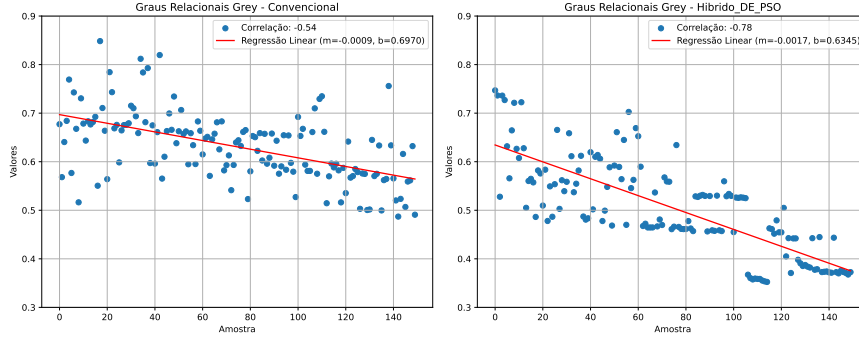


Figura 1: Gráficos de Dispersão do GRC: (a) Agregação dos Pesos. (b) Otimização dos Pesos.

O primeiro gráfico ilustra a dispersão do GRC resultante da agregação dos pesos dos melhores avaliadores (método convencional). Já, o segundo gráfico exibe os resultados obtidos com a aplicação de técnicas de otimização, um algoritmo híbrido de Evolução Diferencial (DE - do inglês, *Differential Evolution*) e Otimização por Enxame de Partícula (PSO - do inglês, *Particle Swarm Optimization*) para determinar os pesos ótimos e obter os melhores rankings. Nota-se, no segundo gráfico, uma maior tendência de convergência, evidenciada pelo declínio maior da reta de regressão linear, o que indica um melhor ordenamento dos dados.

Por fim, esta pesquisa busca apresentar uma contribuição para a obtenção de melhores rankings de priorização por meio da alocação ótima dos pesos obtidos utilizando técnicas de otimização, reduzindo a subjetividade dos avaliadores, minimizando qualquer tipo de viés não racional dos tomadores de decisão, resultando em julgamentos mais confiáveis e precisos na resolução deste tipo de problema.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia Elétrica da UTFPR-CP e à Copel Distribuição pelo projeto conjunto desenvolvido no Programa Sinergia.

Referências

- [1] I. S. Lopes, P. Senra, B. Neto, R. Costa, M. Sousa, T. Cabo, and J. A. Oliveira, “Multi-criteria classification for prioritization of preventive maintenance tasks to support maintenance scheduling,” in *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, pp. 2102–2106, 2017.
- [2] S. Liu, Y. Yang, and J. Forrest, *GREY SYSTEMS ANALYSIS: Methods, Models and Applications*. Singapore: Springer, 2023.
- [3] S. Abdallah, S. Ali, and S. Pervaiz, “Performance optimization of 3d printed polyamide 12 via multi jet fusion: A taguchi grey relational analysis (tgra),” *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol. 6, no. 1, pp. 72–81, 2023.

REALIDADE AUMENTADA APLICADA A UMA PLANTA DIDÁTICA INDUSTRIAL

Felipe Andrei de Oliveira Silva¹, Cléber Gimenez Corrêa², Guilherme Serpa Sestito³^{1,3} Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil² Departamento Acadêmico de Computação, Universidade de Cornélio Procópio, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

A Indústria 4.0 visa aumentar a eficiência e reduzir desperdícios, elevando a produção de forma sustentável. Entretanto, devido aos avanços obtidos pela integração de tecnologias, os métodos convencionais de coleta e visualização dos dados tornam-se obsoletos, dificultando o gerenciamento do grande fluxo de informações, o que pode causar problemas de foco e aumentar o tempo para tomada de decisões. Em decorrência disso, surge a necessidade de implementação de ferramentas que possibilitem uma melhor interação entre o usuário e os dispositivos digitais, sem que seja necessário que o trabalhador se desloque do campo até um computador que possua supervisorio [1]. Neste contexto, este trabalho busca solucionar esses problemas por meio do uso de Realidade Aumentada (RA) para localização espacial de transmissores [2] em uma planta didática industrial, combinando informações virtuais e objetos reais. O sistema foi criado com o auxílio da ferramenta de desenvolvimento de aplicações 3D Unity, de forma a ser possível integrar a RA com múltiplos marcadores, cada um representando um dispositivo encontrado na planta. A metodologia é apresentada pela Figura 1.

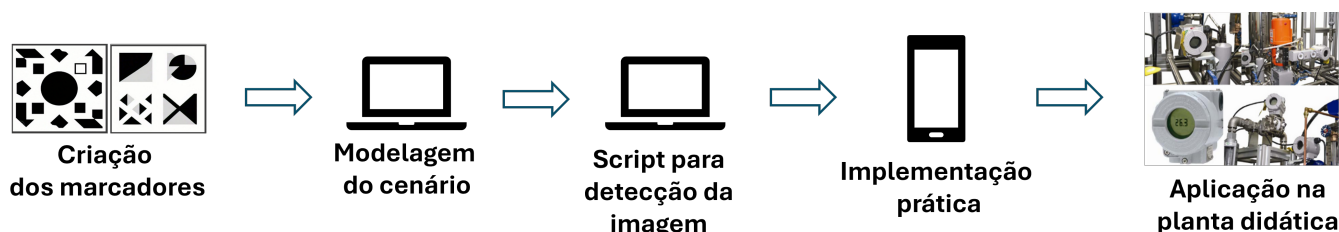


Figura 1: Sequência de passos da metodologia

O sistema pode ser executado em *smartphones Android*, possibilitando a visualização e projeção da RA. A partir disso, foram realizados testes para verificar o funcionamento do sistema desenvolvido em diferentes situações. Os marcadores e o QR code com o link para download do sistema são apresentados pela Figura 2. Dessa forma, os testes realizados deveriam determinar até que ponto o sistema conseguiria se manter estável quando considerada sua taxa de quadros por segundo. Além disso, foi verificada até que distância, entre o dispositivo móvel e o marcador, o programa desenvolvido continuaria identificando a imagem para manter a projeção ativa.

A partir dos resultados obtidos após múltiplos testes, foi encontrado qual fator traria problemas para o uso do sistema implementado. A distância maior que 30 centímetros e em alguns casos, 25 centímetros pode levar o sistema a deixar de rastrear os marcadores. Entretanto, foi também verificado que esse tipo de

¹felipesilva.2018@alunos.utfpr.edu.br²clebergimenez@utfpr.edu.br³sestito@utfpr.edu.br

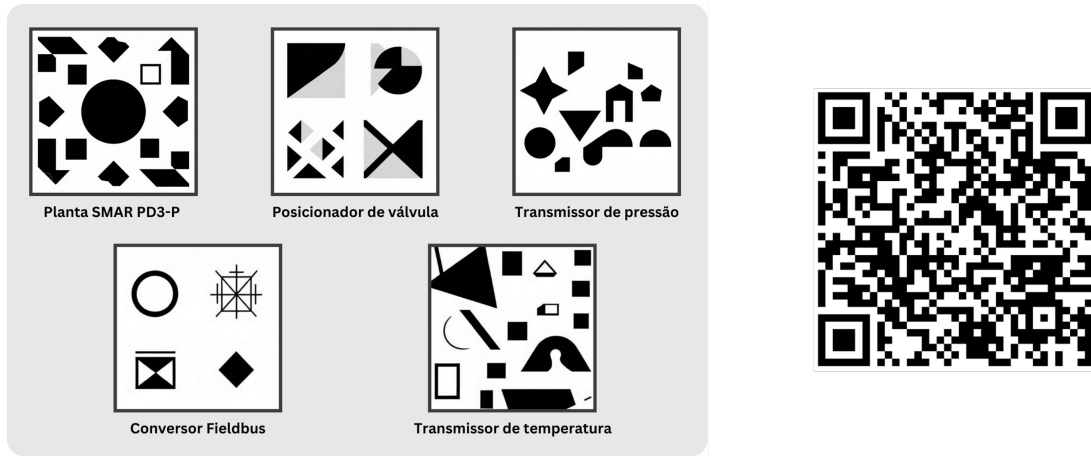


Figura 2: Marcadores utilizados e QR Code com o link para download

aplicação utilizando um *smartphone*, conseguiu manter quase que constante a taxa de quadros por segundo. Os resultados da aplicação na planta são apresentados pela Figura 3.

Outro ponto validado foi a possibilidade de localização de múltiplos marcadores de forma simultânea, tornando viável sua utilização em espaços com muitos aparelhos acumulados. Dessa forma, foi comprovada a viabilidade da implementação de RA para identificação de dispositivos de campo encontrados em uma planta didática industrial, com uma taxa de quadros por segundo de 30, mesmo em situações com 5 marcadores.



Figura 3: Realidade Aumentada na planta didática

O sistema desenvolvido mostra-se justificado e atual com as demandas da automação moderna, visto que pode ser aplicado para capacitação de profissionais, ensino de assuntos relacionados à engenharia, auxílio na detecção de diagnósticos de falhas e gerenciamento de ativos.

Referências

- [1] A. P. Jaganathan and S. K. Baloch, “Performance analysis of machine learning models for predicting order process management,” in *2024 IEEE 15th Annual Ubiquitous Computing, Electronics amp; Mobile Communication Conference (UEMCON)*, p. 730–736, IEEE, Oct. 2024.
- [2] J. V. R. Santana, R. P. Pontarolli, and E. P. Godoy, “Tecnologias digitais para o monitoramento de processos na indústria 4.0,” in *2023 15th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, pp. 1549–1554, 2023.

SISTEMA EMBARCADO DE MONITORAMENTO E APRIMORAMENTO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Gabriela Esteves Barbosa¹, Wesley Angelino de Souza², Alessandro Goedtel³, Tiago Henrique dos Santos⁴, Marcelo Favoretto Castoldi⁵

^{1,2,3,5} Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

⁴ Instituto Federal do Paraná, Araçongas, Paraná, Brasil

Resumo

Nos dias atuais, a demanda energética aumentou consideravelmente e com esse fato a qualidade da energia também se tornou um fator importante. Atualmente, existem diversos distúrbios na rede que podem provocar oscilações na tensão. Esses distúrbios podem ser as variações de tensão de regime permanente, de regime transitório, a flutuação de tensão, e a variação de frequência [1].

De maneira geral, de acordo com a ABNT NBR 17094 (2008) e IEC 60034-1, os motores elétricos são construídos para operar em uma faixa de tensão e frequência e apresentam desempenho pior se operados em condições fora da nominal. Assim, uma das formas de reduzir os efeitos dos problemas de qualidade de energia elétrica na operação dos motores elétricos consiste na utilização de inversores de frequência. Inversores de frequência são dispositivos amplamente utilizados em aplicações industriais, como controle de velocidade de motores e pode ser utilizado para atuar na eficiência do sistema de acionamento [2]. De acordo com [3], inversores de frequência são considerados os mais relevantes conversores estáticos da atualidade, apresentando imensuráveis aplicações.

Existem diversos métodos de modulação que são aplicados em inversores a fim de controlar a velocidade e torque de motores. O método *Pulse Width Modulation* (PWM) convencional compara-se um sinal constante com uma onda triangular, chamada de portadora. A comparação gera ondas quadradas com a mesma frequência da onda portadora, onde o ciclo de trabalho pode ser alterado com a mudança do sinal constante [4]. O método *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) consiste na comparação entre um sinal senoidal e um triangular, gerando um pulso que aplicado ao inversor controla a frequência e a amplitude da saída, por meio da variação da tensão eficaz nos enrolamentos do motor [2,3].

Dada a necessidade de garantir que o motor opere dentro das condições de frequência e tensão nominais, este trabalho tem como objetivo implementar um inversor com modulação SPWM capaz de manter a eficiência do motor mesmo em condições cujo a rede apresente algum distúrbio ou possíveis falhas na qualidade de energia no sistema elétrico. O sistema proposto também pode ser utilizado como material didático para ensino e pesquisas no campo de acionamento de máquinas elétricos.

Um conversor *Full-Bridge* monofásico foi desenvolvido e com a implementação de duas placas iguais tem-se um inversor trifásico a três ou quatro fios, sendo a configuração a três fios necessária para realizar o acionamento de um motor de indução trifásico, com potência nominal de até 1,5 CV, e manter a tensão eficaz e a frequência de forma constante. Para isso foi projetada uma placa de circuito impresso com dois braços

¹ gabrielaesteves@alunos.utfpr.edu.br

² wesleyangelino@utfpr.edu.br

³ agoedtel@utfpr.edu.br

⁴ tiago.santos@ifpr.edu.br

⁵ marcastoldi@utfpr.edu.br

inversores capaz de suportar 311V no barramento de corrente contínua (CC) e corrente eficaz de 5A, a referida placa é apresentada na Figura 1. Os circuitos *Snubber*, responsáveis por atenuar os picos de tensão, evitando, assim, a degradação das chaves semicondutoras utilizadas no chaveamento, foram calculadas de acordo com a metodologia da *Texas Instruments* [5].

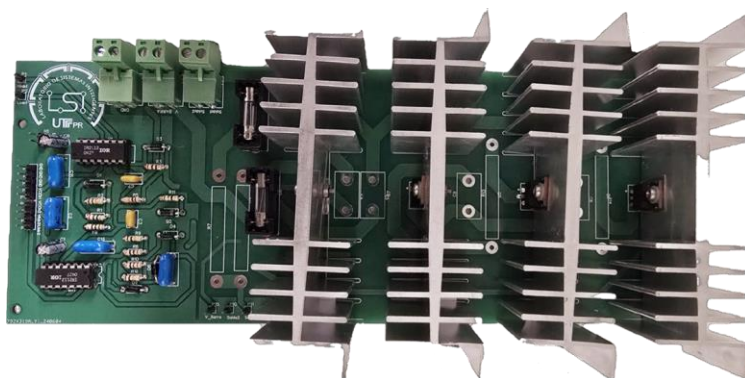


Figura 1: Placa PCB.

Dado o intuito de verificar se a placa atende as condições nominais especificadas no projeto, foram realizados 2 testes: i) com corrente nominal e ii) com tensão nominal no barramento CC. Os testes foram realizados utilizando SPWM com índice de modulação de 0,9, na configuração Full-Bridge.

Nos testes realizados, visando-se medir os parâmetros de controle, tensão no barramento e corrente eficaz na fonte, utilizou-se dois multímetros modelo TY720 da marca Yokogawa. Para o teste de corrente eficaz nominal, foi utilizado uma resistência de 16 Ω de 3000W, enquanto, para o segundo teste, com tensão nominal no barramento, foi necessário associar em série 4 resistências de 16 Ω de 3000W cada. Dessa maneira, a corrente não ultrapassaria a nominal. O sistema operou corretamente em todos os testes.

Visto que o sistema operou dentro do esperado, trabalhos futuros envolvem a utilização de duas placas para compor um inversor de frequência trifásico, com o intuito de avaliar a eficiência energética do motor em situações de distúrbios na rede.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Iniciação Tecnológica (PIBIT) ao Conselho Nacional de desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro à pesquisa, ao Laboratório de Sistemas Inteligentes (LSI) e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procópio, pela oportunidade de desenvolvimento deste estudo.

Referências

- [1] ANEEL, “Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST, módulo 8 – qualidade do fornecimento de energia elétrica - agência nacional de energia elétrica,” 2021.
- [2] RASHID, Muhammad H. “Power Electronics: Circuits, Devices and Applications”, 3. ed. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2003.
- [3] BARBI, Ivo. “Inversores monofásicos”. Florianópolis: Ed. Do Autor, 2022.
- [4] OLIVEIRA, T. “O que é PWM: a técnica de controle de energia em eletrônica!”. Eletrônica geral, 2022. Disponível em: <https://eltgeral.com.br/o-que-e-pwm/>. Acesso em: 29 mar. 2025.
- [5] TEXAS INSTRUMENTS. “User’s Guide Power Stage Designer”. [S. l.], 2017. Disponível em: https://www.ti.com/lit/ug/slvubb4b/slvubb4b.pdf?ts=1695074280314&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. Acesso em: 29 mar. 2025.

DESAGREGAÇÃO DE CARGAS UTILIZANDO IMAGENS BINÁRIAS DA TRAJETÓRIA V-I
COM REDES NEURAIS CONVOLUCIONAIS

Gabriel de Abreu Silva¹, Wesley Angelino de Souza², Alessandro Goedtel³, Marcelo Favoretto Castoldi⁴,
Hiago Galindo de Almeida⁵

^{1,2,3,4,5} Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

O aumento da demanda energética, impulsionado pelo crescimento populacional e tecnológico, tem sido suprido em parte por fontes renováveis, mas eventos como a pandemia e conflitos geopolíticos evidenciaram a vulnerabilidade do setor energético. Para enfrentar esses desafios, Redes Elétricas Inteligentes (*Smart Grids*) e os Medidores Inteligentes (*Smart Meters*) têm modernizado a distribuição de energia, tornando o processo de fornecimento mais eficiente e permitindo o monitoramento contínuo do consumo, embora ainda apresentem limitações na identificação do consumo individual de aparelhos [1]. Nesse contexto, a Desagregação de Cargas busca identificar o consumo individual de dispositivos a partir de medições agregadas de corrente e tensão. A técnica de Monitoramento Não Intrusivo de Cargas (NILM, sigla do inglês para *Non-Intrusive Load Monitoring*) possibilita a visualização detalhada dos perfis de consumo e a adoção de estratégias de economia de energia, sendo que abordagens baseadas em aprendizado de máquina têm se destacado na extração de padrões complexos [2].

A análise de sinais elétricos no NILM tradicionalmente utiliza parâmetros no domínio do tempo, como potência ativa e corrente RMS [3]. No entanto, a adoção de aprendizado profundo tem impulsionado representações alternativas, como imagens espectrotemporais e morfologias de formas de onda. Entre essas, a Trajetória V-I se destaca por representar a relação entre tensão e corrente, evidenciando propriedades não lineares das cargas [4]. A partir dessas trajetórias, é possível gerar imagens binárias que servem como entradas para Redes Neurais Convolucionais (CNNs), modelos eficazes na extração automática de características. Essa abordagem tem mostrado potencial para NILM, especialmente em sistemas embarcados de baixo custo.

Este trabalho propõe uma técnica de classificação de cargas baseada na análise da Trajetória V-I, cujas representações gráficas são convertidas em imagens binárias e utilizadas como entradas para uma CNN. A metodologia adotada neste trabalho está estruturada em três etapas principais: (i) aquisição dos sinais de tensão e corrente de dispositivos eletrodomésticos; (ii) processamento dos sinais, incluindo a geração das trajetórias V-I e sua conversão em imagens binárias; e (iii) classificação das cargas a partir das imagens geradas por meio de CNNs.

A etapa de aquisição dos sinais foi realizada com os sensores SCT-013 para corrente e ZMPT101B para tensão, processados pela placa STM32L476, que possui ADCs de 12 bits com capacidade de amostragem simultânea. Os sinais adquiridos são utilizados para gerar trajetórias V-I, onde são extraídos um ciclo de cada sinal, que são normalizados e convertidos em matrizes 20×20. Cada ponto indica a ocorrência de uma combinação V-I, resultando em imagens binárias que servem como entrada para a CNN. A Figura 1 ilustra a comparação entre uma trajetória obtida e sua representação binária.

¹gsilva.2000@alunos.utfpr.edu.br

²wesleyangelino@utfpr.edu.br

³agoedtel@utfpr.edu.br

⁴marcastoldi@utfpr.edu.br

⁵hiagoalmeida@alunos.utfpr.edu.br

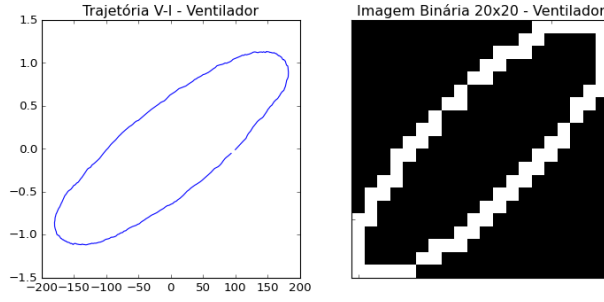


Figura 1: Comparação entre Trajetória V-I e imagem binária - Ventilador

O desempenho da rede CNN foi avaliado com base em um conjunto de dados obtidos experimentalmente a partir da medição de consumo de sete tipos de aparelhos residenciais: ventilador, máquina de lavar, notebook, geladeira, micro-ondas, aspirador de pó e TV. Para uma maior diversidade dos dados, foram incluídas variações de modelos e modos de operação. As imagens binárias geradas a partir desses dados foram utilizadas no treinamento da rede, onde 70% dos dados foram utilizados para o treinamento, enquanto os 30% restantes foram utilizados para teste.

Para o conjunto de teste, o modelo alcançou uma acurácia global de 96,14%. Os dispositivos como geladeira, máquina de lavar e micro-ondas apresentaram taxas de acerto individuais de 100%, demonstrando que suas trajetórias V-I apresentam características distintas, facilitando a classificação precisa pela rede. No caso de dispositivos como notebook e TV, que apresentaram taxas de acurácia de 93,33%, a similaridade entre algumas das trajetórias V-I obtidas demonstram a dificuldade da rede em classificar aparelhos com padrões de consumo semelhantes.

A alta taxa de acerto demonstra que a Trajetória V-I é capaz de capturar características relevantes relacionadas aos padrões de consumo dos aparelhos. Entretanto, a sensibilidade da rede a pequenas variações evidencia a necessidade de técnicas complementares como *data augmentation*, a utilização de camadas de regularização ou até mesmo a utilização de arquiteturas híbridas, combinando a CNN com outros modelos. Os resultados obtidos, aliados à simplicidade da topologia e a eficiência no processamento de imagens pequenas, reforçam o potencial da abordagem para NILM embarcado. Em estudos futuros deve-se considerar a robustez frente a distúrbios elétricos, a adaptação em tempo real e a integração com sistemas de gerenciamento energético residencial.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos professores orientadores e aos colegas do Laboratório de Sistemas Inteligentes (LSI) pelo apoio técnico e intelectual prestado durante o desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- [1] G. Dileep, “A survey on smart grid technologies and applications,” *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 2589–2625, 2020.
- [2] M. Kaselimi, E. Protopapadakis, A. Voulodimos, N. Doulamis, and A. Doulamis, “Towards trustworthy energy disaggregation: A review of challenges, methods, and perspectives for non-intrusive load monitoring,” *Sensors*, vol. 22, no. 15, 2022.
- [3] W. A. Souza, A. M. Alonso, T. B. Bosco, F. D. Garcia, F. A. Gonçalves, and F. P. Marafão, “Selection of features from power theories to compose nilm datasets,” *Advanced Engineering Informatics*, vol. 52, p. 101556, 2022.
- [4] J. Lu, R. Zhao, B. Liu, Z. Yu, J. Zhang, and Z. Xu, “An overview of non-intrusive load monitoring based on v-i trajectory signature,” *Energies*, vol. 16, no. 2, 2023.

ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS DE UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO DEGRAU DE TENSÃO CONTÍNUA

Gabriel Lourenço¹, Marcelo Favoretto Castoldi², Wesley Angelino de Souza³, Alessandro Goedtel⁴.

^{1,2,3,4} Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil

Resumo

O Motor de Indução Trifásico (MIT) é amplamente utilizado na conversão eletromecânica de energia no setor industrial, devido à sua estrutura simples, robustez e custo efetividade, porém sua operação prolongada pode causar desgaste, alterando os parâmetros elétricos e afetando o desempenho e controle [1]. Assim, a estimativa precisa desses parâmetros torna-se crucial e pode ser realizada por métodos tradicionais, como ensaios de rotor bloqueado e a vazio, ou por técnicas computacionais baseadas em otimização [2].

Dessa forma, o presente estudo propõe um modelo matemático que relaciona a corrente em regime transitório de uma das fases do MIT, quando excitado por um degrau de tensão contínua, para estimar os parâmetros elétricos do circuito equivalente. A estimação é realizada a partir da curva de corrente estimada, utilizando um algoritmo quasi-Newton baseado no algoritmo de Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) de memória limitada, utilizando a linguagem C. Os parâmetros estimados pelo método de otimização são comparados com os obtidos por ensaios da Norma IEEE 112-2017, bem como os dados de catálogo do motor.

A metodologia apresentada propõe a Equação (1), que representa a corrente de estator $i_s(t)$ quando uma das fases é excitada por um degrau de tensão contínua U e as outras duas são curto-circuitadas. A partir da Equação (1) é possível estimar cinco parâmetros elétricos de circuito equivalente da máquina, sendo estes a resistência de estator R_s , a indutância de dispersão de estator $l_{\sigma s}$, a indutância de magnetização L_m , resistência de rotor R_r e a indutância de dispersão de rotor $l_{\sigma r}$.

$$i_s(t) = \frac{2}{3} \frac{U}{R_s} \cdot \left(1 + \frac{\left(\frac{L_m + l_{\sigma r}}{R_r} - T_1 \right)}{T_1 - T_2} \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{\left(T_2 - \frac{L_m + l_{\sigma r}}{R_r} \right)}{T_1 - T_2} \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} \right) \quad (1)$$

Onde os termos T_1 e T_2 são expressos pela Equação (2).

$$T_{1,2} = \frac{\frac{L_m + l_{\sigma r}}{R_r} + \frac{L_m + l_{\sigma s}}{R_s} \pm \sqrt{\left(\frac{L_m + l_{\sigma r}}{R_r} + \frac{L_m + l_{\sigma s}}{R_s} \right)^2 - 4 \cdot \frac{L_m \cdot l_{\sigma s} + L_m \cdot l_{\sigma r} + l_{\sigma s} \cdot l_{\sigma r}}{R_s \cdot R_r}}}{2} \quad (2)$$

A partir da curva de corrente coletada do MIT de 1 HP e utilizando o algoritmo desenvolvido baseado no BFGS de memória limitada, foi possível estimar os parâmetros elétricos da máquina. A Figura 1 exibe a curva estimada com o conjunto de parâmetros, em comparação à curva coletada experimentalmente. Para a

¹lourencog@alunos.utfpr.edu.br

²marcastoldi@utfpr.edu.br

³wesleyangelino@utfpr.edu.br

⁴agoedtel@utfpr.edu.br

validação dos parâmetros, foram adquiridas curvas de corrente sob três condições de carga: 2 $N.m$, 3 $N.m$ e 4 $N.m$. Utilizando os parâmetros estimados, o MIT foi simulado para essas condições de carga e comparado com os valores reais para determinar a menor discrepância. A Tabela 1 apresenta os erros relativos em porcentagem obtidos ao comparar as correntes.

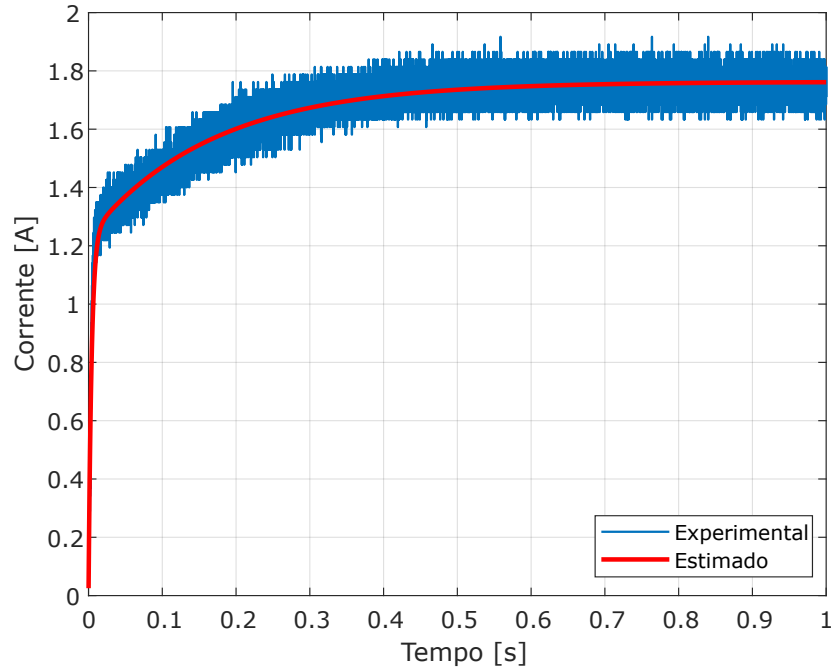


Figura 1: Corrente experimental coletada e curva estimada.

Tabela 1: Erros relativos entre as correntes estimadas e a real para o MIT de 1 HP.

	<i>Datasheet</i> [%]	IEEE [%]	BFGS [%]
2 $N.m$	21,22	5,61	4,95
3 $N.m$	17,10	5,05	3,72
4 $N.m$	13,73	4,54	2,58

A análise revelou que a curva gerada pela solução obtida se ajusta à curva experimental, confirmando a viabilidade do conjunto, mesmo sem o uso de técnicas de filtragem para testar a robustez da metodologia. As correntes estimadas via BFGS demonstraram maior acurácia, com erro de 2,59% para uma carga de 4 $N.m$, em comparação com 13,73% e 4,54% obtidos com dados de fabricação e a Norma IEEE 112-2017, respectivamente. Assim, o modelo matemático validou-se como uma alternativa simples e eficaz para estimar parâmetros de motores de indução trifásicos com rotor de gaiola de esquilo, utilizando apenas a excitação dos terminais de uma fase com um degrau de tensão contínua.

Referências

- [1] S. A. Odhano, P. Pescetto, H. A. A. Awan, M. Hinkkanen, G. Pellegrino, and R. Bojoi, “Parameter Identification and Self-Commissioning in AC Motor Drives: A Technology Status Review,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, pp. 3603–3614, Apr. 2019.
- [2] U. Sengamalai, G. Anbazhagan, T. M. Thamizh Thentral, P. Vishnuram, T. Khurshaid, and S. Kamel, “Three phase induction motor drive: A systematic review on dynamic modeling, parameter estimation, and control schemes,” *Energies*, vol. 15, no. 21, 2022.

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE DUAS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE NA ESTABILIZAÇÃO DE UM ESTADO SUBATUADO DE UM GIROSCÓPIO DE MOMENTO COM DOIS GRAUS DE LIBERDADE

Gabriel Oliveira Miranda¹, Cristiano Marcos Agulhari²

^{1,2} Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

Tendo em vista a crescente demanda de aplicações tecnológicas que vêm surgindo em diversos setores da sociedade, não podemos deixar de notar a necessidade do projeto de controladores para sistemas cada vez mais complexos com comportamentos não-lineares. Carros e robôs autônomos, sistemas de estabilização de aeronaves e embarcações mais eficientes, drones autoguiados, satélites e módulos espaciais inteligentes, dentre outros, são alguns exemplos dos inúmeros casos de aplicações que a sociedade tem feito surgir nos campos das tecnologias de sistemas de automação e controle [1].

Motivado pelo mencionado contexto, o presente trabalho visa realizar uma análise comparativa entre diferentes abordagens de sistemas de controle aplicadas a um giroscópio didático de bancada ECP Control Moment Gyroscope Model 750, representado pela Figura 1. O principal objetivo consiste em verificar e validar a eficácia do uso de uma estratégia de controle não-linear baseada em equações de Lyapunov em comparação com estratégias de controle linear clássicas para realizar controle eficaz de sistemas não-lineares. Com isso, a partir da avaliação das ações de controle atuando no sistema, torna-se possível ressaltar as diversas aplicações de ambos os controladores.

Dessa forma, torna-se interessante a apresentação da equação linearizada dada pelo manual do fabricante do equipamento que representa o comportamento do giroscópio quando atuado com apenas dois graus de liberdade. A expressão é obtida bloqueando o movimento do eixo 3, mantendo-o parado numa posição desejada, enquanto os outros eixos do giroscópio variam livremente conforme torques aplicados em qualquer um deles. As matrizes de estado a seguir, obtidas de [2], ilustram a configuração adotada.

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_4 \\ \dot{\omega}_2 \\ \dot{\omega}_4 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{-J_D \Omega_D}{I_C + I_D} \\ 0 & \frac{-J_D \Omega_D}{I_D + K_A + K_B + K_C} & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} q_4 \\ \omega_2 \\ \omega_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{I_C + I_D} \\ 0 \end{bmatrix} T_2 \quad (1)$$

As variáveis apresentadas na Equação (1) são a posição angular do eixo 4 (q_4), as velocidades angulares dos eixos 2 e 4 (ω_2 e ω_4), velocidade angular do disco D (Ω_D), momento de inércia no disco D (J_D), componentes escalares dos momentos de inércia em cada eixo do equipamento (I_C , I_D , K_A , K_B e K_C) em relação a cada direção do eixo cartesiano e, por fim, T_2 o torque aplicado ao eixo 2.

¹miranda.2019@alunos.utfpr.edu.br

²agulhari@utfpr.edu.br

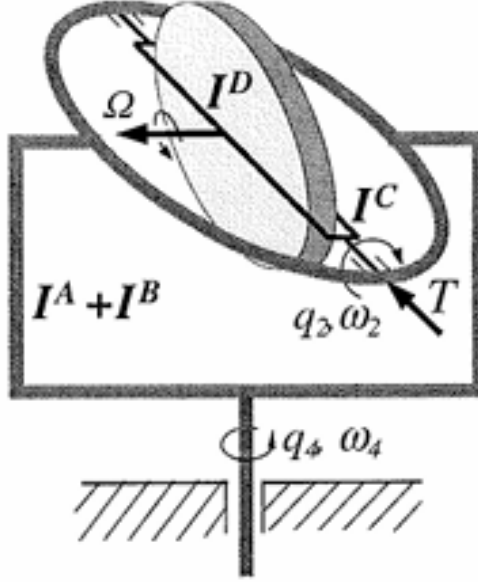


Figura 1: Esquemático do giroscópio [2].

Duas estratégias de controle são aplicadas e comparadas: controlador LPV (Linear Parameter Varying - variante no tempo) e controlador PID clássico (invariante no tempo). Na primeira abordagem, o controlador é capaz de assegurar a estabilidade para todo um intervalo de valores de Ω_D , e seus ganhos também variam para se ajustar automaticamente às variações de dinâmica do sistema [3]. O controle PID, por sua vez, é capaz de garantir estabilidade somente para valores constantes de Ω_D , atuando com ganhos que também não variam com o tempo [4]. As equações a seguir demonstram a estrutura dos controladores mencionados.

$$u(t) = K(\Omega_D)x(t) \quad (2)$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

As variáveis apresentadas nas equações (2) e (3) são, respectivamente, $K(\Omega_D)$ que representa a lei de controle do controlador LPV em função de Ω_D , K_p , K_i e K_d são respectivamente os ganhos proporcional, integral e derivativo de um PID clássico e $e(t)$ o erro (em estado estacionário) entre a saída controlada e a referência escolhida.

Referências

- [1] N. S. Nise, *Engenharia de Sistemas de Controle*. LTC, 6a ed., 2012.
- [2] E. C. Products, *Manual do Giroscópio ECP Model 750*, 1991.
- [3] C. Hoffman and H. Werner, "Lft-lpv modeling and control of a control moment gyroscope," *IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, pp. 1–6, 2015.
- [4] K. Ogata, *Engenharia de Controle Moderno*. Pearson, 5a ed., 2014.

IDENTIFICAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS COM
A ANÁLISE HARMÔNICA DO FLUXO DISPERSOGabriel T. de Arruda¹, Wesley A. de Souza², Alessandro Goedtel³, Marcelo F. Castoldi⁴, Clayton L. Graciola⁵^{1,2,3,4,5} Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil

Resumo

Os motores de indução trifásicos (MITs) são amplamente utilizados na indústria, atribuindo-se suas aplicações a características como robustez construtiva e alta confiabilidade, entretanto, são suscetíveis a uma variedade de falhas durante a operação [1]. Entre os modos de falha mais prevalentes, destaca-se o curto-circuito entre espiras do estator, cuja incidência pode representar de 20% a 40% das falhas registradas em Máquinas Elétricas de Indução (MITs) [2]. Diversas estratégias de diagnóstico foram propostas para a identificação precoce dessas falhas, entretanto diversas enfrentam limitações, incluindo questões de intrusividade, tempo de processamento, escalabilidade e a necessidade de sensores dedicados.

A análise de sinais de fluxo disperso, conhecida como *Stray Flux Signature Analysis* (SFSA), representa uma alternativa viável, uma vez que possibilita a coleta de informações externas ao motor, sem a necessidade de intervenção direta em sua estrutura física e sem interromper o processo [3, 4]. A extração de atributos espectrais utilizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT) aplicada ao sinal de fluxo disperso permite uma representação do comportamento da máquina no domínio da frequência.

Entretanto, a seleção dos atributos a serem utilizados na tarefa de classificação representa uma etapa crítica no processo, a presença de atributos redundantes ou irrelevantes pode comprometer o desempenho dos classificadores, além de aumentar a complexidade computacional do modelo. Dessa forma a seleção de atributos se destaca como uma etapa fundamental na construção de sistemas diagnósticos eficientes.

Neste trabalho, propõe-se uma abordagem experimental focada no diagnóstico de curto-circuitos entre espiras em motores de indução trifásicos. A metodologia adotada envolve a coleta de sinais de fluxo disperso utilizando um sensor não intrusivo. Seguida da extração de 31 atributos espectrais por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT), referentes às 31 componentes harmônicas múltiplas da frequência fundamental de 60 Hz, compreendendo a 1ª até a 31ª harmônica. Posteriormente, são aplicadas múltiplas técnicas de seleção de atributos e em seguida a classificação dos dados é realizada com o uso de uma rede Perceptron Multi-Camadas (PMC).

Os ensaios foram conduzidos sob diferentes condições de carga e alimentação. O torque resistivo aplicado ao eixo do motor foi variado de 0,5 a 5,0 N·m, em incrementos de 0,5 N·m. Quanto à alimentação, foram consideradas situações com tensões equilibradas, desbalanceamento na fase A (de 0% a 10%, com passo de 2%) e combinações de sobretensão na fase B e subtensão na fase C (de 2% a 10%, com passo de 2%). Os sinais foram adquiridos com taxa de amostragem de 16 kHz, durante intervalos de 3 segundos, totalizando 48.000 amostras por experimento. O sistema de aquisição foi composto por placa NI-USB6210, com resolução de 16 bits.

Os métodos de seleção de atributos utilizados estão agrupados em quatro categorias: estatísticos, recursivos, sequenciais e meta-heurísticos. Nos métodos determinísticos, foi fixado o número de quatro atributos a serem selecionados. Para os algoritmos meta-heurísticos, não foi definida uma cardinalidade prévia, permitindo a seleção adaptativa de atributos com base em critérios internos de otimização.

A tarefa de classificação foi conduzida por meio de uma rede neural do tipo Perceptron Multi-Camadas (PMC). A topologia da rede inclui uma camada de entrada com quatro neurônios (correspondentes aos atributos selecionados), uma camada oculta com dois neurônios e função de ativação ReLU, e uma camada de saída com um único neurônio, com ativação sigmoidal.

A etapa de aquisição resultou em um total de 220 experimentos, dos quais 110 foram realizados com o motor de indução trifásico (MIT) operando em condição saudável, e 110 com a presença de curto-circuito entre espiras na fase A (aproximadamente 3% das espiras afetadas). A base de dados foi dividida em conjuntos de treinamento (70%) e teste (30%), totalizando 154 amostras para treinamento e 66 para validação. O rótulo de classe foi codificado como 0 para motores saudáveis e 1 para motores com 3% de curto-circuito.

Após a aplicação da FFT e a obtenção das 31 componentes harmônicas, os atributos passaram pelos algoritmos de seleção, e o resultado é mostrado na Tabela 1.

¹gabriel.2019@alunos.utfpr.edu.br,²wesleyangelino@utfpr.edu.br,³agoedtel@utfpr.edu.br,⁴marcastoldi@utfpr.edu.br, ⁵clayton.graciola@ifpr.edu.br

Tabela 1: Resultados dos Algoritmos de Seleção de Atributos

Método	Atributos	Método	Atributos
1 Select K-Best	2, 4, 7, 6	13 Extra Tree <i>Backward</i>	1, 2, 26, 31
2 XGB	1, 2, 4, 7	14 ANN <i>Forward</i>	2, 5, 7, 23
3 RFE	1, 2, 5, 7	15 ANN <i>Backward</i>	2, 4, 7, 27
4 Random Forest	2, 4, 7, 6	16 AdaBoost <i>Forward</i>	1, 2, 5, 23
5 SFS	2, 7, 9, 11	17 AdaBoost <i>Backward</i>	1, 2, 7, 28
6 KNN <i>Forward</i>	2, 7, 11, 12	18 Grey Wolf	1, 2
7 KNN <i>Backward</i>	2, 4, 7, 9	19 Differential evolution	1, 4, 7, 9, 11, 29
8 SVM <i>Forward</i>	2, 4, 5, 7	20 Algoritmo Genético	1, 2
9 SVM <i>Backward</i>	2, 7, 11, 31	21 Particle Swarm Optimization	1, 4, 7, 16, 20, 27
10 XGB <i>Forward</i>	1, 2, 3, 12	22 Water Cycle Algorithm	1, 2
11 XGB <i>Backward</i>	1, 2, 24, 31	23 Simulated Annealing	1, 4, 7, 11, 12, 13, 20, 30
12 Extra Tree <i>Forward</i>	1, 2, 5, 7		

Para definir os quatro atributos mais relevantes, foi realizada uma contagem de frequência dos índices mais recorrentes nas seleções. Os atributos de maior recorrência utilizados na etapa de classificação foram os de índices [1, 2, 4, 7], correspondentes às harmônicas fundamentais e de ordem baixa, que apresentam maior sensibilidade às alterações provocadas pela falha.

Na etapa de classificação, a rede PMC foi treinada durante 400 épocas, convergindo para um mínimo local estável. A Figura 1 apresenta a matriz de confusão obtida na fase de testes.

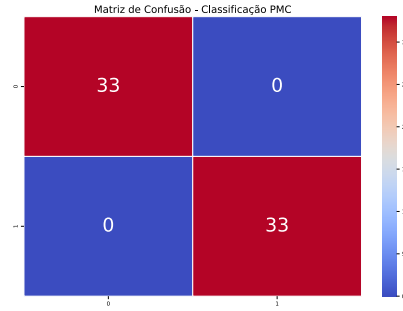


Figura 1: Matriz de Confusão - PMC - Classificação com 4 atributos

Observa-se que a rede foi capaz de classificar corretamente todas as amostras de teste, atingindo uma acurácia de 100%. Esse resultado evidencia o impacto positivo da seleção de atributos, tanto na eliminação de informações redundantes quanto na generalização do modelo.

Como direções para trabalhos futuros, propõe-se a investigação de outras variáveis físicas oriundas da máquina elétrica, tais como sinais de corrente, vibração ou temperatura, com o objetivo de ampliar a capacidade diagnóstica para diferentes tipos de falha. Por fim, recomenda-se a avaliação do desempenho da abordagem proposta em ambientes industriais reais, sujeitos a ruídos e perturbações não controladas, a fim de validar sua robustez e aplicabilidade em sistemas de manutenção preditiva.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho por meio de uma bolsa de estudos de Demanda Social (CAPES-DS), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão de recursos via projetos de pesquisa, processos 311634/2022-2 e 302521/2023-2 e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pela estrutura disponibilizada.

Referências

- [1] I. M. Gaber, O. Shalash, and M. S. Hamad, “Optimized inter-turn short circuit fault diagnosis for induction motors using neural networks with leleru,” in *2023 IEEE Conference on Power Electronics and Renewable Energy (CPERE)*, pp. 1–5, 2023.
- [2] A. Alloui, K. Laadjal, M. Sahraoui, and A. J. Marques Cardoso, “Online interturn short-circuit fault diagnosis in induction motors operating under unbalanced supply voltage and load variations, using the stlsp technique,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 3, pp. 3080–3089, 2023.
- [3] A. O. Louzada, W. A. Souza, A. L. O. Vitor, M. F. Castoldi, and A. Goedtel, “Detection of stator faults in three-phase induction motors using stray flux and machine learning,” *Energies*, vol. 18, no. 6, 2025.
- [4] A. U. Rehman, Y. Chen, S. Zhao, G. Huang, Y. Yang, S. Wang, Y. Zhao, Y. Zhao, Y. Cheng, and T. Tanaka, “Current and flux correlation analysis for detection, location, and phase identification of stator inter-turn short-circuit fault in doubly-fed induction generator,” *Computers and Electrical Engineering*, vol. 117, p. 109281, 2024.

IM-OCDM FOR ISAC: JOINT COMMUNICATION AND SENSING USING INDEX MODULATION AND LFM RADAR

George Lucas Lima Takemiya¹, José Miracy de Souza Filho², José Carlos Marinello Filho³

^{1,2,3}Electrical Engineering Department, Federal University of Technology, Cornélio Procopio, Paraná, Brazil

Abstract

The sixth-generation (6G) networks will integrate sensing and communication (ISAC) into a unified framework, optimizing spectral and hardware efficiency [1, 2]. While Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) has been widely adopted, its communication-centric design limits sensing performance [3, 4]. Since 5G maintained OFDM without new waveforms [5], innovative designs are needed for balanced ISAC functionality [6, 7]. This work proposes IM-OCDM (index Modulation - Orthogonal Chirp Division Multiplex) [8] for Integrated Sensing and Communication (ISAC) in 6G networks, combining index-modulated OCDM with LFM radar signals. Unlike OFDM-based approaches [4], our solution simultaneously transmits 16-QAM data on active subchirps while embedding radar signals in inactive ones, achieving superior spectral efficiency. Key innovations include: (1) dynamic resource allocation through index modulation, and (2) BiLSTM-based (Bi-directional Long Short Term Memory with attention mechanism) receiver that separates communication/radar components [9].

The transmitter architecture (Fig. 1) uses two subsets of 128 subchirps each: Ω_{IM} carries 16QAM data (X_k) while Ω_{Radar} transmits LFM signals ($LFM_k(n) = Ae^{j(\pi\beta n^2 + 2\pi f_0 n)}$). The composite signal is:

$$x(n) = \sum_{k \in \Omega_{\text{IM}}} X_k \psi_k(n) + \sum_{k \in \Omega_{\text{Radar}}} LFM_k(n) \quad (1)$$

Briefly, our proposed system architecture is very similar to [4], but it replaces the inverse Fast Fourier Transform (IFFT) with the inverse Discrete Fresnel Transform (IDFnT) to modulate the 16-QAM mapped communication signal, which are encoded in active subchirps via index modulation. The inactive subchirps are embedded with LFM radar transmission, enabling joint transmission. At the receiver, a trained BiLSTM network separates the communication and radar components by analyzing the IM-OCDM Spectrogram computed via Short-Time Fourier Transform (STFT) allowing each signal to be routed to its respective processing chain, i.e., the communication subsystem for the 16-QAM data and the radar sensing subsystem for LFM signal. STFT converts the signal into a time-frequency matrix, where the vertical axis represents frequencies (features for classification) and the horizontal axis represents time (steps for the BiLSTM).

The receiver BiLSTM network for joint processing is formulated by:

$$[\hat{X}_k, \hat{LFM}_k] = \text{BiLSTM}(y(n)), \quad y(n) = h(n) * x(n) + w(n) \quad (2)$$

where $h(n)$ is Rayleigh fading and $w(n)$ is AWGN.

A simplified flow diagram of the proposed system is shown in Figure 1, providing a visual representation of the signal processing steps.

¹georgetakemiya@alunos.utfpr.edu.br

²jmiracy@alunos.utfpr.edu.br

³jcmarinello@utfpr.edu.br

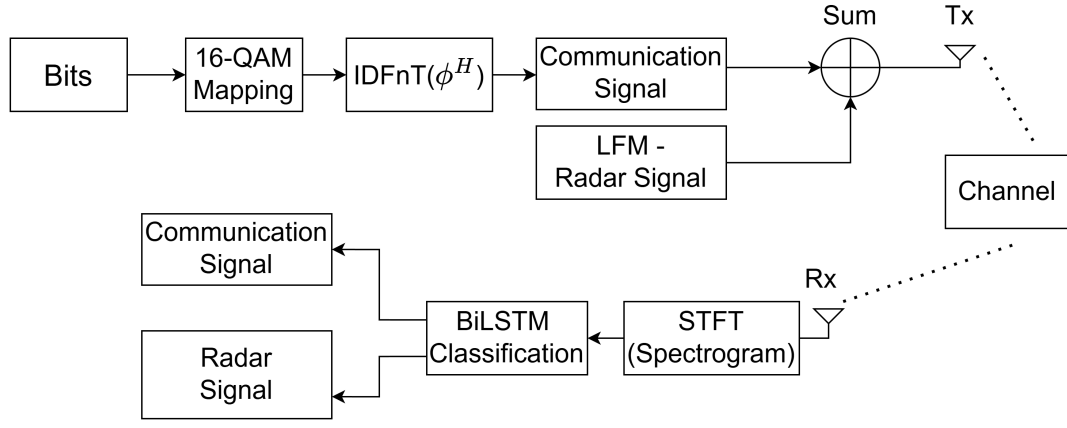


Figura 1: Proposed IM-OCDM ISAC system architecture.

Acknowledgments

Financial support was provided by CNPq through PIBIC, under Grant No. 104331/2025-9.

References

- [1] N. González-Prelcic, M. F. Keskin, O. Kaltiokallio, M. Valkama, D. Dardari, X. Shen, Y. Shen, M. Bayraktar, and H. Wymeersch, “The Integrated Sensing and Communication Revolution for 6G: Vision, Techniques, and Applications,” *Proceedings of the IEEE*, pp. 1–0, 2024.
- [2] W. Zhou, R. Zhang, G. Chen, and W. Wu, “Integrated Sensing and Communication Waveform Design: A Survey,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 3, pp. 1930–1949, 2022.
- [3] Y. Chen, G. Liao, Y. Liu, H. Li, and X. Liu, “Joint Subcarrier and Power Allocation for Integrated OFDM Waveform in RadCom Systems,” *IEEE Communications Letters*, vol. 27, no. 1, pp. 253–257, 2023.
- [4] B. Yang, S. Zhao, and M. Yi, “Subcarrier Multiplexing OFDM-based Radar Communication Integration,” in *2021 13th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, pp. 1–5, 2021.
- [5] M. S. J. Solaija, S. E. Zegrar, and H. Arslan, “Orthogonal frequency division multiplexing: The way forward for 6g physical layer design?,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 19, no. 1, pp. 45–54, 2024.
- [6] S. Mura, D. Tagliaferri, M. Mizmizi, U. Spagnolini, and A. Petropulu, “Waveform Design for OFDM-Based ISAC Systems Under Resource Occupancy Constraint,” in *2024 IEEE Radar Conference (RadarConf24)*, pp. 1–6, 2024.
- [7] A. Liu, Z. Huang, M. Li, Y. Wan, W. Li, T. X. Han, C. Liu, R. Du, D. K. P. Tan, J. Lu, Y. Shen, F. Colone, and K. Chetty, “A Survey on Fundamental Limits of Integrated Sensing and Communication,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, no. 2, pp. 994–1034, 2022.
- [8] J. Liu, P. Yang, T. Q. S. Quek, Y. Xiao, and W. Xiang, “Orthogonal chirp division multiplexing with index modulation,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 72, no. 8, pp. 4577–4590, 2024.
- [9] V. Clerico, J. González-López, G. Agam, and J. Grajal, “Lstm framework for classification of radar and communications signals,” in *2023 IEEE Radar Conference (RadarConf23)*, pp. 1–6, 2023.

IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS UTILIZANDO
FERRAMENTAS DE APRENDIZAGEM DE MÁQUINASGustavo Henrique Bazan¹, Alessandro Goedel², Marcelo Favoretto Castoldi³, Wesley Angelino de Souza⁴¹ Instituto Federal do Paraná, Jacarezinho, Paraná, Brasil^{1,2,3,4} Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

Os motores indução trifásicos (MIT) são amplamente utilizados em aplicações de conversão eletromecânica de energia, por possuir uma estrutura simples, alta confiabilidade e um baixo custo de manutenção e produção, além de demonstrar boa capacidade de desempenho em diversas condições de operação [1]. Segundo o Balanço Energético Nacional apresentado em 2024, estima-se que no ano de 2023, 31,8% de toda energia elétrica produzida no Brasil foi consumida pelo setor industrial brasileiro, onde os MITs são os maiores responsáveis por esse consumo [2]. Além disso, deve-se ressaltar que 80% da conversão de energia nos setores industriais e comerciais no mundo todo são realizados por esses equipamentos, evidenciando a sua importância nessas aplicações [3].

Ainda que tenham confiabilidade na operação, os MITs estão sujeitos a várias falhas internas, que podem prejudicar a sua operação normal. As principais falhas que ocorrem nos MITs podem ser classificadas em falhas nos rolamentos, no estator e no rotor, e são causadas por estresses térmicos, elétricos, mecânicos e ambientais [4]. A identificação incipiente das falhas dos MITs auxilia na atividade de manutenção, bem como reduz as paradas não-programadas de processo, evitando assim danos financeiros irreversíveis a indústria [3].

Tendo isso em vista, a contribuição dessa pesquisa consiste em avaliar diversas medidas estatísticas extraídas dos sinais de correntes das máquinas, com o intuito avaliar os atributos mais relevantes para um eficiente diagnóstico de falhas de estator, de rolamentos e de rotor em MITs sujeitos a diversas condições de operação, como desequilíbrios de tensão e de conjugado de carga. A Figura 1 apresenta o sistema proposto para o monitoramento de falhas em motores de indução trifásicos.

Os sinais de corrente das máquinas são coletados na bancada de ensaios do Laboratório de Sistemas Inteligentes (LSI), que foi projetada para simular diversas condições de operação como variação na alimentação e no conjugado de carga, bem como emular os defeitos dos MITs. Em seguida, esses sinais são analisados por meio de técnicas de processamento de sinais, com o intuito de extrair e selecionar as características mais relevantes e assim, obter os padrões para cada situação de operação das máquinas, seja sem ou com defeitos. Os atributos avaliados são as seguintes medidas estatísticas: média aritmética, desvio padrão, desvio médio, variância, coeficiente de variação, mediana, RMS, curtose, moda, *skewness*, valor máximo, pico a pico, quartis e histogramas, a fim de verificar as *features* importantes na identificação das falhas. Após essa etapa, emprega-se a técnica de seleção de atributos Sequential Forward Selection (SFS) para eliminar

¹gustavo.bazan@ifpr.edu.br²agoedel@utfpr.edu.br³marcastoldi@utfpr.edu.br⁴wesleyangelino@utfpr.edu.br

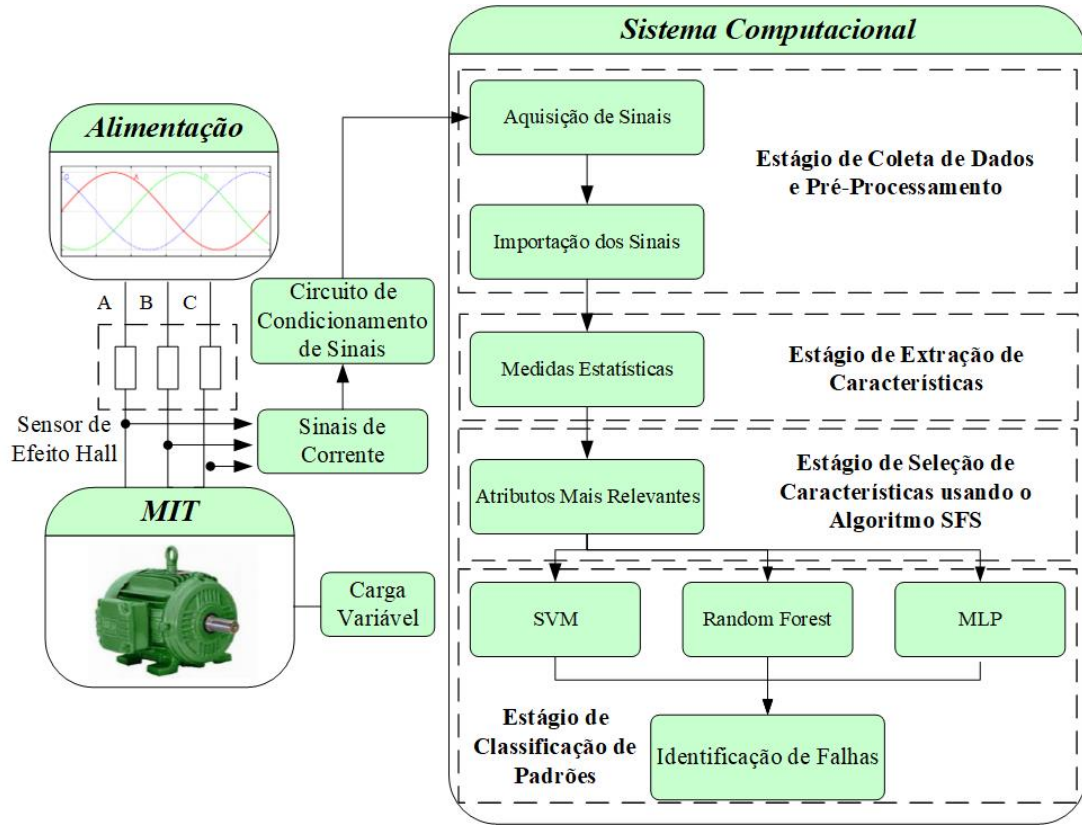


Figura 1: Fluxograma do sistema proposto para o monitoramento de falhas em motores de indução trifásicos.

as redundâncias do conjunto de dados. Por fim, estes padrões são condicionados e enviados às entradas das ferramentas de sistemas inteligentes para a construção dos modelos classificadores, e posteriormente, para a classificação dos padrões. São realizadas avaliações de desempenho para os algoritmos inteligentes *Support Vector Machine* (SVM), *Random Forest* (RF) e *Rede Neural Multilayer Perceptron* (MLP), a fim de se encontrar o sistema de monitoramento de falhas mais eficiente.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de recursos via projetos de pesquisa, processos 311634/2022-2 e 302521/2023-2, e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pela estrutura disponibilizada.

Referências

- [1] Y.-H. Wu, M.-Y. Liu, H. Song, C. Li, and X.-L. Yang, “A temperature and magnetic field-based approach for stator inter-turn fault detection,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 18, pp. 17799–17807, 2022.
- [2] E. de Pesquisa Energetica EPE, “Balanço energético nacional 2024 - ano base 2023 - relatório final,” 2024.
- [3] A. Alloui, K. Laadjal, M. Sahraoui, and A. J. Marques Cardoso, “Online interturn short-circuit fault diagnosis in induction motors operating under unbalanced supply voltage and load variations, using the stlsp technique,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 3, pp. 3080–3089, 2023.
- [4] P. Chen and Y. Xie, “Harmonics analysis of air-gap magnetic field of induction motors with stator inter-turn fault,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 58, no. 7, pp. 1–9, 2022.

CLASSIFICAÇÃO DE CARGAS RESIDENCIAIS COM ESPECTROGRAMAS E REDES
NEURAIS CONVOLUCIONAIS

Hiago Galindo de Almeida¹, Wesley Angelino de Souza², Alessandro Goedtel³, Marcelo Favoretto Castoldi⁴, Gabriel de Abreu Silva⁵

^{1,2,3,4,5} Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

O aumento contínuo da demanda por energia elétrica, impulsionado pelo crescimento da população, pela rápida urbanização e pela expansão das atividades industriais e comerciais, tem gerado desafios significativos para a infraestrutura de distribuição e a gestão eficiente dos recursos energéticos [1]. Diante desse cenário, a busca pela eficiência energética torna-se um fator essencial nas estratégias de sustentabilidade, incentivando o desenvolvimento de tecnologias voltadas para a otimização do consumo de eletricidade em residências, comércios e indústrias [2].

O Monitoramento Não Intrusivo de Cargas (NILM) surge como uma solução eficiente para identificar o consumo individual de dispositivos elétricos a partir de medições agregadas de corrente e tensão, dispensando sensores dedicados para cada carga [3, 4]. Essa abordagem permite uma análise detalhada do consumo energético com baixo custo de implementação, tornando-se uma alternativa promissora para sistemas inteligentes de gerenciamento de energia [5]. Apesar dos avanços proporcionados por medidores e redes elétricas inteligentes, essas tecnologias ainda enfrentam limitações na identificação específica de cargas, pois operam com dados agregados. Esse cenário reforça a necessidade de soluções complementares, como o NILM e a desagregação de cargas, para aprimorar a automação residencial e otimizar a gestão energética.

Nesse cenário, este estudo apresenta o desenvolvimento de um classificador de cargas utilizando espectrogramas e redes neurais convolucionais, visando a identificação automática de dispositivos elétricos residenciais a partir da medição de corrente e tensão em um único ponto do sistema. A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada em 3 etapas principais: (i) aquisição dos sinais elétricos referente aos eletrodomésticos; (ii) processamento dos sinais coletados; e (iii) classificação dos sinais a partir do espectrograma gerado por meio de uma rede neural convolucional (CNN).

A aquisição dos sinais foi realizada com o microcontrolador STM32 L476, que utilizou seus ADCs de 12 bits para amostragem simultânea de corrente e tensão nos canais 1 e 2. A corrente foi medida pelo sensor SCT-013, com saída de -1 V a 1 V para um intervalo de 0 a 20 A, e a tensão foi medida pelo sensor ZMPT101B, com saída de 0 V a 3,3 V para 0 a 240 Vac. Um offset de 1,65 V foi adicionado ao sinal de corrente para ajustar o valor ao intervalo de operação do ADC.

Após a aquisição dos sinais, foi obtido um banco de dados contendo medições de 7 eletrodomésticos diferentes — aspirador, geladeira, máquina de lavar, micro-ondas, notebook, TV e ventilador — com 50 medições para cada equipamento. Esses sinais foram segmentados e convertidos em espectrogramas utilizando a transformada de Fourier de curto tempo (STFT), implementada com a biblioteca `scipy.signal` na linguagem Python. Um exemplo de espectrograma gerado de uma geladeira pode ser verificado na Figura

¹hiagolmeida@utfpr.edu.br

²wesleyangelino@utfpr.edu.br

³agoedtel@utfpr.edu.br

⁴marcastoldi@utfpr.edu.br

⁵gsilva.2000@alunos.utfpr.edu.br

1. Cada espectrograma cobre um intervalo de 0,5 segundos, com resolução em frequência de até 1400 Hz, abrangendo aproximadamente até a 23^a harmônica da frequência fundamental. Os espectrogramas foram representados em escala logarítmica (decibéis) e normalizados.

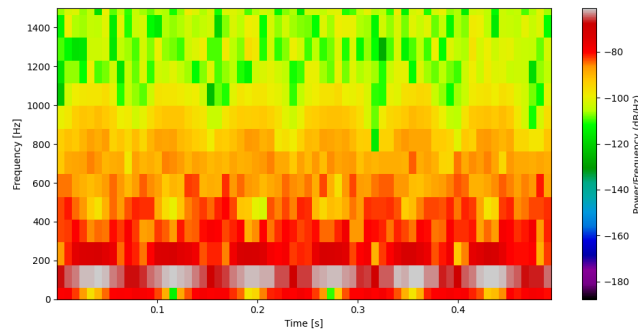


Figura 1: Espectrograma Geladeira.

O treinamento da rede foi realizado utilizando os espectrogramas gerados a partir do banco de dados, com 80% dos dados destinados ao treino e 20% para teste. O desempenho da rede foi avaliado com base na acurácia geral, que alcançou 87% de acertos. As classes que apresentaram maior taxa de acertos foram o aspirador, geladeira, máquina de lavar, micro-ondas e TV, todas atingindo uma acurácia individual de 100%. Por outro lado, os dispositivos notebook e ventilador obtiveram acurácias de 40% e 70%, respectivamente. Esses erros podem ser atribuídos a similaridade das imagens de alguns espectrogramas que podem causar confusão na classificação da rede.

Os resultados, com acurácia global de 87% na classificação de sete dispositivos residenciais, demonstram o potencial da técnica no monitoramento energético inteligente. A CNN identificou cargas com assinaturas espectrais bem definidas, mas teve dificuldades com dispositivos de espectro sobreposto ou variações operacionais. Essas limitações indicam a necessidade de aprimoramentos, como ampliação da base de dados, inclusão de transientes e uso de arquiteturas híbridas. O estudo valida uma abordagem viável para sistemas embarcados de baixo custo, reforçando sua aplicabilidade em cenários reais e abrindo espaço para futuras melhorias em precisão e escalabilidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos professores orientadores e aos colegas do Laboratório de Sistemas Inteligentes (LSI) pelo apoio técnico e intelectual prestado durante o desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- [1] W. A. Souza, *Estudos de técnicas de análise e tecnologias para o desenvolvimento de medidores inteligentes de energia residenciais*. Tese (doutorado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2016.
- [2] IEA, “Executive Summary – World Energy Outlook 2024 – Analysis,” Oct. 2024.
- [3] G. Hart, “Nonintrusive appliance load monitoring,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 80, no. 12, pp. 1870–1891, 1992.
- [4] H. A. D. Azzini, J. G. I. Cypriano, W. A. D. Souza, R. C. Monzani, L. H. C. P. D. Silva, and A. C. V. D. Silva, “Comparação das técnicas de monitoramento de cargas para a desagregação do consumo de energia elétrica,” *Congresso Brasileiro de Automática - CBA*, vol. 1, no. 1, 2019.
- [5] F. D. Garcia, W. A. Souza, and F. P. Marafão, “Embedded nilm as home energy management system: A heterogeneous computing approach,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, no. 02, pp. 360–367, 2020.

DETECÇÃO DE PADRÃO SEMG DE CONTRAÇÃO E RELAXAMENTO MUSCULAR COM
ATRIBUTOS ESPECTRAIS EM INDIVÍDUO COM LESÃO DE PLEXO BRAQUIALHygor V. P. Martins¹, Eddy Krueger², Paulo R. Scalassara³^{1,3} Laboratório de Processamento de Sinais e Aplicações, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil² Laboratório de Engenharia Neural e de Reabilitação, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Paraná, Brasil

Resumo

O eletromiógrafo (EMG) coleta sinais mioelétricos de superfície (sEMG) por eletrodos não invasivos, avaliando propriedades neuromusculares como sinergia, fadiga, amplitude, e espectro de frequência [1]. A transformada de Fourier, embora útil para sinais estacionários, não é adequada para sEMG, que é um sinal não estacionário [2]. A transformada *wavelet* permite a análise simultânea de tempo, frequência e intensidade, sendo mais eficaz para capturar padrões dinâmicos de ativação muscular [1, 2, 3]. A perda de função em membros superiores, como em lesões do plexo braquial, compromete a autoestima e autonomia do indivíduo [4], órteses robóticas para a mão auxiliam nas atividades de vida diárias, mas desafios de reconhecimento de padrões dificultam a replicação de movimentos naturais. Este estudo analisa o espectro sEMG usando *wavelets* de Cauchy (CaW) para decompor os sEMG de contração e relaxamento muscular em bandas de frequência, e a seleção sequencial de características (SFS) para determinar o conjunto ótimo de bandas, de onde a raiz quadrada média (RMS) de cada banda foi extraída como característica para avaliar os algoritmos clássicos na discriminação das duas classes: máquina de vetores de suporte (SVM - *kernels* linear, e função de base radial), análise discriminante linear (LDA) e k vizinhos mais próximos (KNN) [5]. A proposta foi aprovada pelo Comitê de Ética em Pesquisa Envolvendo Seres Humanos da UEL, CAAE: 55850722.2.0000.5231, parecer nº 5.363.242 e emendas nº 5.827.875 e nº 7.047.015. Os sEMG foram coletados do participante (33 anos, com lesão no plexo braquial causado por um acidente de motocicleta) no *OpenSignals* através do Bitalino conectado em três canais com eletrodos MedPex: (i) bíceps braquial, (ii) deltoide/coracobraquial e (iii) peitoral maior, a referência foi posicionada na clavícula (Figura 1.a). O participante, sentado, realizou contrações isométricas dos músculos ipsilaterais à lesão com auxílio de um metrônomo de 80 BPM: contraindo na primeira batida e mantendo a contração por durações e intensidades variadas nas cinco batidas seguintes, gerando um conjunto sEMG dinâmico (Figura 1.b). Os sinais foram pré-processados com normalização por contração voluntária máxima, e filtros Notch (60 Hz) e Butterworth 4ª ordem passa-banda (30–450 Hz) para mitigar ruídos de sinais cardíacos do tronco [1]. Os canais 1 e 3 foram descartados devido ao alto nível de ruído e baixo sEMG residual, causado pela lesão. O janelamento de contração/relaxamento muscular no canal 2 foi feita com base em um valor limiar, gerando janelas disruptivas de 1 s para cada classe. A CaW foi aplicada nas bandas de 30, 42, 56, 72, 90, 110, 131, 155, 180, 207 e 237 Hz. Os valores RMS para cada banda foram usados para treinar os algoritmos SVM, LDA e KNN com hiperparâmetros *default*. O conjunto de dados (76 amostras) foi dividido em 70% para treinamento (53 amostras) e 30% para teste (23 amostras), e a SFS com validação cruzada 5-*fold* foi aplicada (Figura

¹hygormartins@alunos.utfpr.edu.br²ekrueger@uel.br³prscalassara@utfpr.edu.br

1.c). Em trabalhos futuros, serão testados algoritmos de aprendizagem profunda e *template matching* para verificar a eficiência do uso de CaW na otimização da escolha de bandas para extração de características em sEMG.

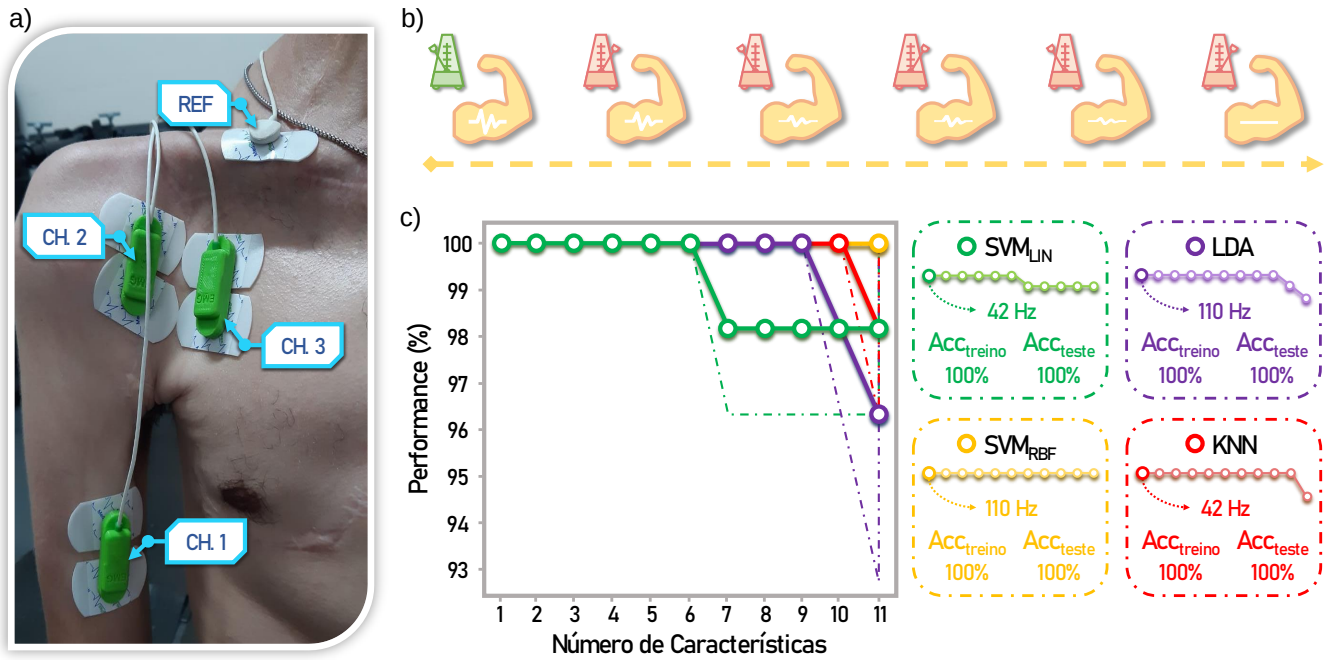


Figura 1: (a) Posicionamento dos eletrodos adesivos MedPex nos três canais selecionados e referência; (b) Protocolo de aquisição usando metrônomo em 80 BPM com 6 batidas; (c) Performance dos classificadores, a linha tracejada representa o erro padrão (variabilidade da média dos resultados) do classificador.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

- [1] V. von Tscharner, B. Eskofier, and P. Federolf, "Removal of the electrocardiogram signal from surface EMG recordings using non-linearly scaled wavelets," *J Electromyogr Kinesiol*, pp. 683–688, 2011.
- [2] I. Koenig, P. Eichelberger, A. Blasimann, J.-P. Baeyens, and L. Radlinger, "Wavelet analyses of electromyographic signals derived from lower extremity muscles while walking or running: A systematic review," *PLoS ONE*, vol. 13, aug 2018.
- [3] L. E. Peñailillo, R. Silvestre, and K. Nosaka, "Changes in surface EMG assessed by discrete wavelet transform during maximal isometric voluntary contractions following supramaximal cycling," *European Journal of Applied Physiology*, vol. 113, pp. 895 – 904, 2012.
- [4] E. M. Gane, M. L. Plinsinga, C. L. Brakenridge, E. J. Smits, T. Aplin, and V. Johnston, "The impact of musculoskeletal injuries sustained in road traffic crashes on work-related outcomes: A systematic review," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, p. 11504, November 2021.
- [5] J. Camargo and A. Young, "Feature selection and non-linear classifiers: Effects on simultaneous motion recognition in upper limb," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 27, no. 4, pp. 743–750, 2019.

ESTUDO E ANÁLISE DE UM NOVO INVERSOR INTEGRADO MONOFÁSICO UTILIZANDO
A TOPOLOGIA ZETA BUCK-BOOST.

Jhonatan Felipe Pereira ¹, Anderson Aparecido Dionizio ², Sérgio Augusto Oliveira da Silva ³, Wesley Angelino de Souza ⁴, Leonardo Poltronieri Sampaio ⁵

^{1,2,3,4,5}Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

O Brasil apresenta um imenso potencial para a geração de energia a partir de fontes renováveis, favorecido por suas condições geográficas e climáticas privilegiadas. Atualmente, a energia hidrelétrica se destaca como a principal fonte renovável. Nos últimos anos, o país tem intensificado os investimentos em outras fontes renováveis, como a energia eólica e solar, demonstrando avanços expressivos na capacidade instalada [1, 2].

As fontes renováveis de energia elétrica, como solar fotovoltaica, eólica e hidráulica, nem sempre podem ser utilizadas diretamente em aplicações residenciais, comerciais e industriais. Para isso, é necessário o condicionamento da energia por meio da eletrônica de potência, convencionalmente utilizando dois estágios de conversão composto por um um conversor CC/CC elevador associado a um inversor CC/CA. Embora essa abordagem seja simples, pode apresentar menor eficiência, maior volume e peso devido ao maior número de componentes. Para contornar essas limitações, têm sido estudadas topologias de conversores de estágio único, conhecidas como estruturas integradas [3].

O Zeta Buck-Boost (ZBB) proposto é baseado nos conversores Zeta e Buck-Boost modificados, combinando características operacionais similares ao conversor Zeta durante o semiciclo positivo da rede e do conversor Buck-Boost no semiciclo negativo da rede. Ao todo, a estrutura possui seis etapas de operação, a estrutura funciona como Zeta modificado durante o semiciclo positivo da tensão de saída possuindo três etapas em um período de chaveamento, e durante o semiciclo negativo da saída, mais três etapas em um período de chaveamento funcionando como um Buck-Boost modificado. O ZBB proposto é projetado para operar no modo de condução descontínuo (MCD).

O presente estudo propõe a aplicação do ZBB como um inversor integrado em um sistema autônomo formando rede elétrica regulada e controlada em sua saída, destinada ao fornecimento de energia em cargas locais como mostrado pela Figura 1. A modelagem do ZBB foi realizada como proposto em [3]. A validação da operação do ZBB foi realizada por meio de simulação computacional e comparada com os resultados experimentais. Os elementos do ZBB foram projetados considerando a frequência de chaveamento de 50 kHz, potência de saída de 432 W, tensão de entrada CC de 140 V e tensão de saída CA de 180 V de pico e frequência de 60 Hz. Os valores dos elementos passivos são: 60 μ H em L_m e 0,7 mH em $L_z = L_b$; capacitores C_a e C_o possuem 1 μ F. Projetou-se o controlador de acordo com a metodologia proposta em [4] obtendo os ganhos de $K_p = 0,0011$ e $K_i = 13,6002$.

O resultado de simulação é apresentado na Figura 2(a), onde apresenta-se a forma de onda da corrente e tensão de saída durante um degrau de carga de 60%, obtendo uma distorção harmônica total (DHT) de

¹jhonatanpereira@alunos.utfpr.edu.br

²dionizio@alunos.utfpr.edu.br

³augus@utfpr.edu.br

⁴wesleyangelino@utfpr.edu.br

⁵sampaio@utfpr.edu.br

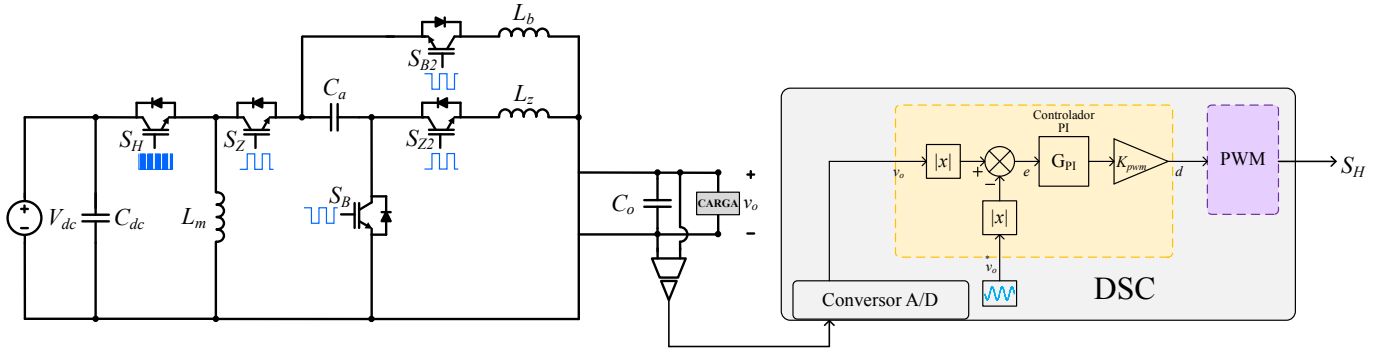


Figura 1: Ilustração do ZBB e sua estratégia de controle.

0,88% na potência nominal, enquanto na Figura 2(b) é apresentado o resultado experimental com DHT de 1,1% na potência nominal. Os valores de DHT abaixo de 5% apresentam conformidade com as principais normas vigentes, como a IEEE 1547-2022.

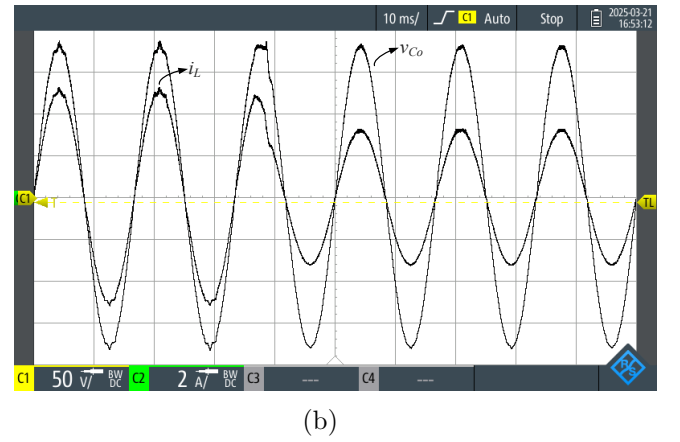
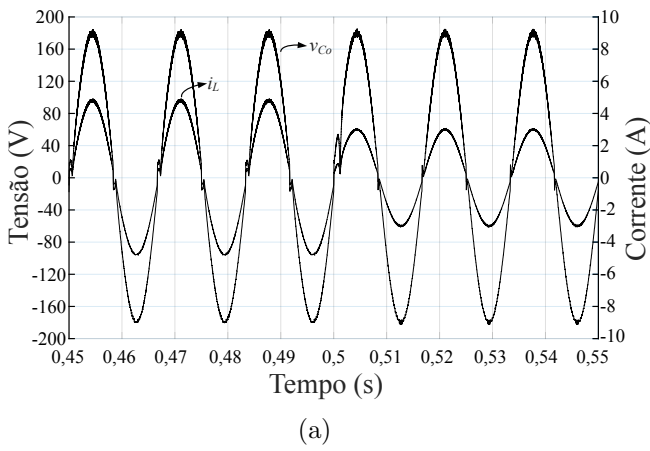


Figura 2: Formas de onda de tensão e corrente na carga; (a) Simulação; (b) Experimental.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro recebido do CNPq (Processos 308620/2021-6 e 304707/2021-0) e o apoio da CAPES - Código de Financiamento 001.

Referências

- [1] J. ELIAS, “Transição da matriz energética para fontes renováveis como meio de redução da pobreza energética no brasil: um estudo sob a perspectiva do direito constitucional.” Centro Universitário-UNDB, 2023. São Luís.
- [2] J. BUZANELLO, “A evolução da energia solar fotovoltaica no brasil.” Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, 2020. Rio de Janeiro.
- [3] A. A. Dionizio, L. P. Sampaio, and S. A. O. da Silva, “Generalized state-space averaging modeling to fourth-order power converters operating in dcm,” *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 53, no. 2, pp. 1031–1055, 2025.
- [4] B. A. Angélico, L. B. Campanhol, and S. A. Oliveira da Silva, “Proportional–integral/proportional–integral–derivative tuning procedure of a single-phase shunt active power filter using bode diagram,” *IET Power Electronics*, vol. 7, no. 10, pp. 2647–2659, 2014.

CONTROLADOR LQR A TEMPO DISCRETO: ANÁLISE DE ERRO SOB CONTROLE DISCRETO

Joachim Ngodie Tuepagouon.¹, Alessandro do Nascimento Vargas.²

^{1,2} Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

Os sistemas de controle modernos dependem de uma transição necessária entre os sinais analógicos dos sistemas físicos e os comandos digitais dos controladores, realizada por meio de um codificador e um decodificador. De fato, um conversor analógico-digital (A/D) assegura a conversão dos sinais analógicos em valores digitais, enquanto um conversor digital-analógico (D/A) reconverte esses valores em sinais analógicos para o sistema [1, 2]. Esse processo de conversão gera um erro de quantização, definido como a diferença entre o valor digital e sua representação analógica original. Esse erro, inerente às limitações desses sistemas, constitui um desafio central para a precisão do controle. Neste contexto, este trabalho visa a propor uma abordagem que utiliza um limite de incerteza em torno das ações de controle discreto, a fim de atenuar os efeitos da quantização e aproximar o controle ótimo.

A contextualização matemática do problema é dada pelas equações (1) e (2), e pela desigualdade (3), nas quais u_k^* e u_k representam, respectivamente, as ações de controle ótimo contínuo e não ótimo discreto, com u_k pertencendo a um conjunto de ações possíveis U , cujos elementos são incrementados de forma aritmética pela sensibilidade ϵ do dispositivo de controle digital, como ilustrado abaixo.

$$x_{k+1}^* = Ax_k^* + Bu_k^*, \quad x_0 \in \mathbb{R}^n. \quad (1)$$

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k, \quad x_0 \in \mathbb{R}^n. \quad (2)$$

$$\|u_k^* - u_k\| < \epsilon \quad \text{com}, \quad u_k \in U. \quad (3)$$

$$U = \{\nu_1, \dots, \nu_r\}, \quad \nu_r = \nu_1 + (r-1)\epsilon, \quad r = 2^n, \quad e, \quad \epsilon = \frac{\Delta V}{r}. \quad (4)$$

Nesse contexto, as ações de controle ótimas contínuas são obtidas pela lei de comando $u_k^* = G^* x_k^*$, onde G^* é o ganho ótimo de Riccati. Além disso, a eficiência do formalismo proposto é baseada no respeito à relação (5), na qual os parâmetros $\gamma \geq 1$ e $\xi \in (0, 1)$ são obtidos conforme os resultados propostos por Kubrusly em seu artigo *Uniform stability for time-varying infinite-dimensional discrete linear systems* [3].

$$\|z_k\|^2 \leq m_k, \quad \text{com}, \quad m_k = \gamma \epsilon^2 \|B\|^2 \frac{1 - \xi^k}{1 - \xi}. \quad (5)$$

Entretanto, a análise do erro decorrente da diferença entre os custos cumulativos ótimo $J^{*N}(x_0)$ e não ótimo $J^N(x_0)$ permitiu chegar à majoração dada pela equação (7), na qual se pode deduzir, após a passagem ao custo médio de longo prazo, uma independência da condição inicial x_0 .

$$J^N(x_0) - J^{*N}(x_0) = \sum_{k=0}^N \left[\|M(G_k)^{1/2} x_k\|^2 - \|M(G^*)^{1/2} x_k^*\|^2 \right]. \quad (6)$$

$$J^N(x_0) - J^{*N}(x_0) \leq \gamma^* \eta_1^2 \|x_0\|^2 \frac{1 - (\xi^*)^{N+1}}{1 - \xi^*} + \frac{\gamma \eta_2^2 \epsilon^2 \|B\|^2}{1 - \xi} \left(N + 1 - \frac{1 - (\xi)^{N+1}}{1 - \xi} \right). \quad (7)$$

¹ joachim@alunos.utfpr.edu.br

² avargas@utfpr.edu.br

$$\limsup_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N+1} (J^N(x_0) - J^{*N}(x_0)) \leq \frac{\gamma \eta_2^2 \epsilon^2 \|B\|^2}{1 - \xi}. \quad (8)$$

A validação desses resultados é ilustrada pelas Figuras 1 e 2.

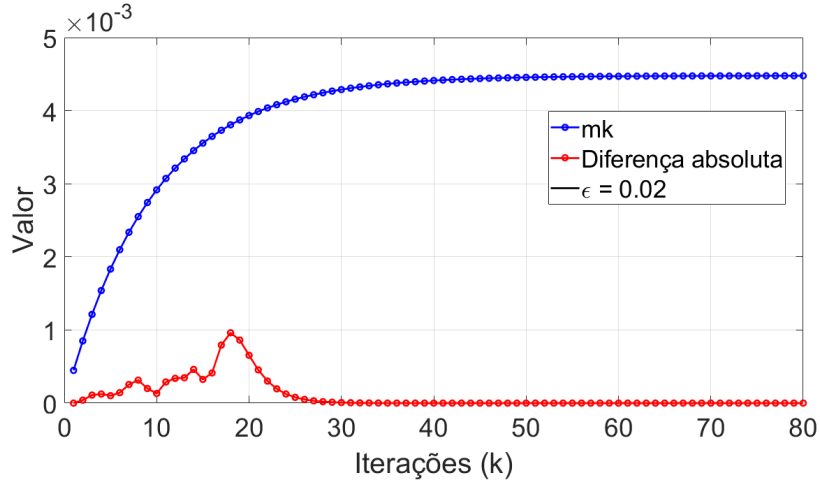


Figura 1: Curva de m_k e diferença absoluta $\|z_k\|^2$ por $n = 8$.

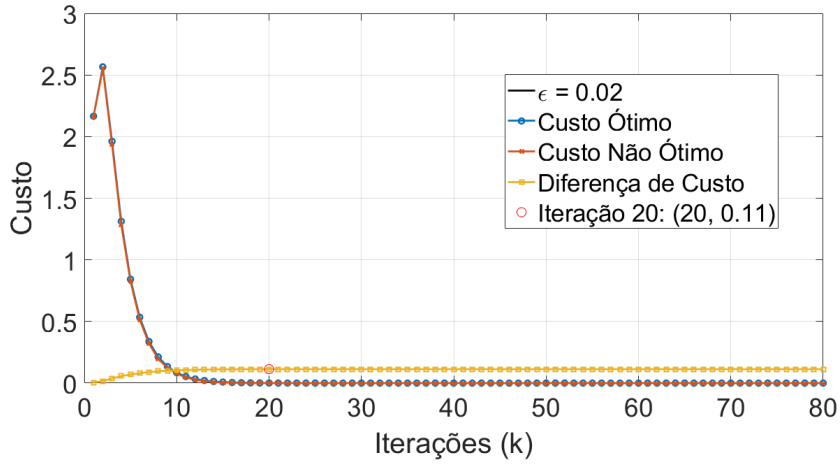


Figura 2: Curvas de custos e erro por $n = 8$.

Agradecimentos

Agradeço a todos os professores, bem como à UTFPR, campus Cornélio Procópio, e à CAPES, por toda a estrutura e pelo apoio financeiro disponibilizado para o desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- [1] F. Clavel, *An optimal digital control system design*. PhD thesis, The Faculty of the Department of Electrical Engineering University of Houston, 1981.
- [2] R. Isermann, *Digital control systems*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [3] C. Kubrusly, “Uniform stability for time-varying infinite-dimensional discrete linear systems,” *IMA Journal of Mathematical Control and Information*, vol. 5, no. 4, pp. 269–283, 1988.

DIAGNÓSTICO DE FALHA DE ESTATOR EM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO
UTILIZANDO TEORIA DE COMPONENTES FÍSICOS DE CORRENTEJosé Pedro Barbosa Neto¹, Wesley Angelino de Souza², Marcelo Favoretto Castoldi³, Alessandro Goedtel⁴.^{1,2,3,4} Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

Os Motores de Indução Trifásicos (MITs) são amplamente utilizados na indústria para conversão de energia elétrica em energia mecânica, estando presentes em sistemas de transporte, manufatura, mineração, além de outras aplicações em larga escala. Estima-se que esses motores sejam responsáveis por aproximadamente 70% do consumo de energia elétrica no setor industrial, o que representa cerca de 30% da demanda elétrica global [1].

Apesar da robustez e confiabilidade associadas aos MITs, esses equipamentos estão sujeitos a diferentes tipos de falhas ao longo do seu ciclo de vida. A ocorrência de falhas pode comprometer a eficiência energética, causar interrupções não programadas e demandar ações corretivas com custos operacionais significativos.

Dentre as falhas mais frequentemente observadas, além dos danos em rolamentos e barras do rotor, destacam-se as falhas nos enrolamentos do estator (28% a 40%) [2]. Nesse caso, as falhas por curto-circuito entre espiras apresentam alta criticidade, devido ao seu desenvolvimento acelerado e ao potencial de evoluir rapidamente para danos irreversíveis, caso não sejam detectadas precocemente.

A complexidade envolvida na identificação de falhas em estágios iniciais tem motivado a adoção de métodos baseados em inteligência artificial, os quais têm-se mostrado promissores na literatura recente para aplicações de diagnóstico preditivo [3, 4]. Para aplicar técnicas, em especial, de aprendizado de máquina, é fundamental extrair características dos dados coletados. Essa etapa é essencial tanto para alimentar os modelos quanto para realizar seus treinamentos de forma eficiente.

Por isso, a estratégia adotada para essa extração baseia-se na Teoria das Componentes Físicas de Corrente (CPC, do inglês *Currents' Physical Components*). Proposta por [5], essa abordagem permite decompor a corrente elétrica em componentes associadas a diferentes fenômenos físicos, como desequilíbrios, distorções harmônicas e defasagens [6].

Após o devido equacionamento fundamentado pela Teoria CPC - com seus dados estabelecidos no domínio da frequência - para sistemas trifásicos com tensões não senoidais e cargas lineares invariantes no tempo, a corrente total $\mathbf{i}(t)$ pode ser decomposta em cinco componentes ortogonais. Conforme mostrado na Equação (1), $\mathbf{i}_a(t)$ é a corrente ativa, $\mathbf{i}_r(t)$ reativa, $\mathbf{i}_s(t)$ de dispersão, $\mathbf{i}_u(t)$ de desbalanço e $\mathbf{i}_g(t)$ a gerada pela carga.

$$\mathbf{i}(t) = \mathbf{i}_a(t) + \mathbf{i}_r(t) + \mathbf{i}_s(t) + \mathbf{i}_u(t) + \mathbf{i}_g(t) \quad (1)$$

Essa decomposição conduz ao cálculo de diferentes grandezas de potência, de forma que cada parcela de corrente refere-se à uma grandeza de potência diferente. De acordo com a Equação (2), $\mathbf{P}_c$ representa a potência ativa, $\mathbf{Q}_c$ a reativa, $\mathbf{D}_{cs}$ de dispersão, $\mathbf{D}_{cu}$ de desbalanço e $\mathbf{D}_g$ de geração reversa.

¹ joseneto.1996@alunos.utfpr.edu.br² wesleyangelino@utfpr.edu.br³ marcastoldi@utfpr.edu.br⁴ agoedtel@utfpr.edu.br

$$S^2 = P_c^2 + Q_c^2 + D_{cs}^2 + D_{cu}^2 + D_g^2 \quad (2)$$

Os dados utilizados para aplicação da Teoria CPC foram obtidos experimentalmente. Os sinais de tensão e corrente trifásicos utilizados contemplam diversos cenários - variação de torque, condições saudável (sem falha) e sob falhas de curto-circuito com severidades de 1 %, 3 %, 5 % e 10 %, além de desbalanço de tensão - que abrangem diferentes condições operacionais ao qual o MIT pode ser exposto.

Após a aplicação da CPC, as parcelas das potências foram calculadas e utilizadas como os atributos de entrada para os modelos de classificação. Foram utilizados cinco algoritmos supervisionados: Rede Neural Perceptron Multicamadas (PMC), K-Vizinhos Mais Próximos (KNN), Árvore de Decisão (DT), Floresta Aleatória (RF) e o método de *Boosting* baseado em gradiente (XGBoost).

Cada técnica possui seus próprios hiperparâmetros e, para ajustá-los visando à sua otimização, foi realizada a busca em grade. Com o auxílio das métricas de avaliação acurácia, precisão, *recall* e F1-score, verificou-se que o melhor classificador foi o XGBoost, como mostra a Tabela 1:

Tabela 1: Desempenho do melhor classificador na tarefa de diagnóstico.

Classificador	Acurácia	Precisão	Recall	F1-Score
XGBoost	0,9997	0,9998	0,9999	0,9998

Assim, pode-se concluir que a abordagem baseada na Teoria CPC para diagnóstico de falhas no estator de MITs, ao integrar a extração de potências decompostas com classificadores de aprendizado de máquina, foi eficaz e proporcionou alta separabilidade entre amostras saudáveis e com falhas.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, e apoiado em parte pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através do Processo 302521/2023-2 e Processo 311634/2022-2; em parte pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Referências

- [1] M. Soleimani, M. N. Alizadeh, and M. Moallem, “Economical replacement decision for induction motors in industry,” in *2018 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, pp. 1–6, 2018.
- [2] A. L. O. Vitor, A. Goedel, M. F. Castoldi, W. A. Souza, and G. H. Bazan, “Induction machine fault diagnosis with quadratic time–frequency distributions: State of the art,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 72, pp. 1–16, 2023.
- [3] T. Mian, A. Choudhary, and S. Fatima, “A sensor fusion based approach for bearing fault diagnosis of rotating machine,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O*, vol. 236, no. 5, pp. 661–675, 2022.
- [4] A. Choudhary, T. Mian, S. Fatima, and B. K. Panigrahi, “Nature-inspired artificial bee colony-based hyperparameter optimization of cnn for anomaly detection in induction motor,” *Expert Systems*, vol. 41, no. 7, p. e13407, 2024.
- [5] L. S. Czarnecki, “Currents’ physical components (cpc) concept: A fundamental of power theory,” in *International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation*, pp. 1–11, 2008.
- [6] L. S. Czarnecki, “Currents’ physical components (cpc)-based power theory a review part ii: Filters and reactive, switching and hybrid compensators.,” *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 96, no. 4, 2020.

PROJETO DE CONTROLE POR MODOS DESLIZANTES BASEADO EM LMIS

Julia Nogueira Bueno¹ Luiz Francisco Sanches Buzzacchero²

¹² Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

A estabilização e o controle do pêndulo invertido são amplamente estudados na literatura devido à sua complexidade e relevância em sistemas dinâmicos não lineares. Esse problema é frequentemente utilizado como referência para validação de técnicas de controle robusto, dado seu comportamento altamente instável e sensível a perturbações. Este documento apresenta a implementação do controle de um sistema pêndulo invertido rotacional (conhecido também como pêndulo de Furuta) por meio de modos deslizantes concebido em uma formulação mesclada com LMIs, onde o objetivo de garantir a robustez, a estabilidade e o desempenho do sistema diante de incertezas.

Com base nas matrizes de estado do pêndulo disponibilizadas pelo fabricante [1], foi realizada a modelagem do sistema, considerando uma incerteza de 30% na entrada, simulando uma falha no atuador, sendo a robustez do sistema garantida pela estratégia de modos deslizantes [2]. A partir do modelo obtido, foi desenvolvido um controle LQR por meio de Desigualdades Matriciais Lineares (LMIs) [3] com o objetivo de determinar uma matriz P que o desempenho do sistema. No projeto do controle LQR, priorizou-se o primeiro estado, enquanto as entradas receberam o mesmo nível de prioridade. Com a matriz P definida, empregou-se o controle por modo deslizante para o pêndulo invertido. A estratégia de controle utilizada é apresentada utilizando a matriz P projetada previamente por LQR-LMIs é apresentada nas equações (1) e (2), sendo $u(t)$ a entrada de controle e s a variável deslizante A e B as matrizes da dinâmica do sistema, δ_f o limitante superior da incerteza e ϵ_0 um escalar positivo que garante que a derivada da função de Lyapunov será negativa.

$$u(t) = -(B^T P B)^{-1} B^T P A x(t) - (B^T P B)^{-1} (|B^T P B| \delta_f + \epsilon_0) \text{sign}(s) \quad (1)$$

$$s = B^T P x(t) = 0 \quad (2)$$

Os testes foram conduzidos exclusivamente em ambiente de simulação. Os gráficos apresentados nas Figuras 1 e 2 ilustram, respectivamente, a entrada de controle aplicada e a evolução dos quatro estados do sistema.

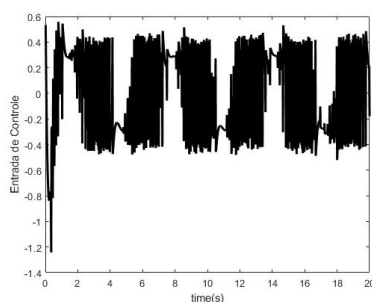


Figura 1: Entrada de controle.

¹ julianogueira@alunos.utfpr.edu.br

² luizf@utfpr.edu.br

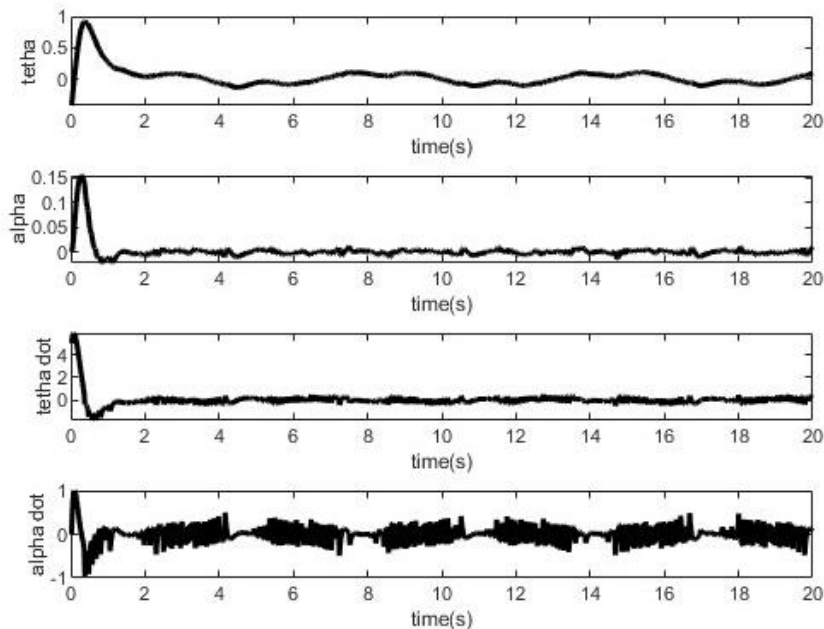


Figura 2: Progresso dos estados do pêndulo invertido rotacional.

Os resultados obtidos nas simulações demonstram que a abordagem proposta para o controle do pêndulo invertido do sistema QUBE da fabricante Quanser [2], baseada em modos deslizantes, foi eficaz na estabilização do sistema, validando uma formulação melhorada em que o desempenho é garantido por LMIs e a robustez foi suprimida pela estratégia de modos deslizantes. A modelagem do sistema incerto e a utilização de LMIs para o projeto do controle LQR permitiram garantir a otimização do controle priorizando o desempenho da posição angular do pêndulo, mesmo na ocorrência de uma falha na entrada tratada como incerteza. No entanto, apesar do desempenho satisfatório em ambiente de simulação, os resultados não podem ser considerados conclusivos, uma vez que o controle não foi validado experimentalmente no pêndulo físico, sendo esta a etapa imediata do desenvolvimento desta pesquisa. Testes práticos são necessários para verificar a aplicabilidade do método em condições reais, considerando fatores como atrito, ruídos de sensores e atrasos na atuação, que podem influenciar a estabilidade e o desempenho do sistema.

Agradecimentos

O presente trabalho contou com o apoio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica, financiado pelo CNPq, Fundação Araucária e UTFPR, aos quais se agradece pelo incentivo à pesquisa por meio da concessão da bolsa. Agradecimentos são também dirigidos ao Prof. Dr. Luiz Francisco Sanches Buzzacchero pela orientação, dedicação e pelas relevantes contribuições prestadas durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Referências

- [1] QUANSER. QUBE – Servo 2. 2016. Disponível em: <<https://www.quanser.com/products/qube-servo-2/>>. Acesso em: 20 mar. 2025.
- [2] J. Liu and X. Wang, Advanced Sliding Mode Control for Mechanical Systems: Design, Analysis and MATLAB Simulation. Beijing: Tsinghua University Press, 2011, pp. 81–96.
- [3] CAUN, R. P.; ASSUNCAO, E. ; TEIXEIRA, M. C. M. ; CAUN, A. P. . Projeto de Controladores LQR-LMI com Restrição de Taxa de Decaimento e Estabilidade Estendida. In: XXI Congresso Brasileiro de Automática, 2016, Vitória/ES. Anais do XXI Congresso Brasileiro de Automática, 2016. p. 72-79.

DETECÇÃO DE FALHAS DE ESTATOR EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS
ATRAVÉS DE ANÁLISE ACÚSTICA

Júlia Rossi Smaniotto¹, Marcelo Favoretto Castoldi², Wesley Angelino de Souza³, Alessandro Goedtel⁴, Gustavo Henrique Bazan⁵

^{1,2,3,4}Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

⁵ Instituto Federal do Paraná (IFPR), Jacarezinho, Paraná, Brasil

Resumo

Motores de indução trifásicos (MIT) são amplamente utilizados, representando aproximadamente 40% do consumo mundial de energia elétrica. Isso se deve ao fato de apresentarem características tais como confiabilidade, robustez e baixo custo [1]. Dada sua relevância, esses motores têm impulsionado avanços significativos em escala, mercado e inovação tecnológica [2]. No entanto, devido ao uso contínuo, estão sujeitos a diversos tipos de esforços, o que pode levar ao surgimento de falhas. Entre essas, destaca-se a falha por curto-circuito no estator, uma das mais comuns, representando cerca de 36% das ocorrências [3]. A detecção e correção precoce dessas falhas são fundamentais para evitar interrupções operacionais, minimizar danos a outros equipamentos e reduzir tanto o risco de acidentes quanto os custos operacionais [2].

Este trabalho tem como objetivo detectar falhas no estator de um MIT por meio da análise de sinais de áudio adquiridos tanto em condições normais quanto em situações de falha. O banco de dados utilizado foi fornecido pelo Laboratório de Sistemas Inteligentes (LSI) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e contém registros de um motor de 1 CV. Os sinais foram captados utilizando cinco microfones distintos, abrangendo diferentes modelos e marcas.

As falhas no estator são classificadas conforme a fase afetada (A, B ou C) e apresentam níveis de curto-circuito de 1%, 3%, 5% e 10%. Além disso, cada uma dessas condições foi analisada sob 10 níveis de torque distintos, variando de 0,5 Nm (motor operando a vazio) a 5 Nm, sendo que 4 Nm o motor está operando a plena carga. Os dados estão organizados em duas situações: equilibradas e com desequilíbrio de tensão, sendo este último analisado em diferentes porcentagens, variando entre 2%, 4%, 6%, 8% e 10%.

A metodologia adotada neste trabalho consiste, primeiramente, na extração de um conjunto de características representativas dos sinais, visando a transformação dos dados brutos em um conjunto de atributos que possam ser usados para a tarefa de classificação, sendo estes desvio padrão, centróide espectral, *Zero-Crossing Rate* (ZCR), largura de banda espectral, *Root Mean Square* (RMS) e Coeficientes Cepstrais da Frequência Mel (MFCC).

Após a extração das características selecionadas, o segundo passo envolve o treinamento e a avaliação de diferentes modelos de classificação. Para esta tarefa, foram selecionados os seguintes algoritmos: *Random Forest*, *Perceptron Multicamadas* (PMC), *Support Vector Machines* (SVM), *K-Nearest Neighbour* (KNN), *Decision Tree* e *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost) e seus resultados são apresentados na Tabela 1.

A terceira etapa consiste na aplicação do método de seleção de atributos baseado em árvores de decisão, com o objetivo de identificar as variáveis mais relevantes para a classificação dos dados, reduzindo a dimensionalidade e aprimorando a eficiência do modelo. Esse processo envolve a construção de uma árvore de decisão, na qual os atributos são avaliados de acordo com sua capacidade de separar as classes. Após a construção da árvore, a importância de cada atributo é determinada com base na redução da impureza nos nós onde é utilizado. Os atributos de maior relevância são mantidos, enquanto aqueles com menor contribuição são descartados [4]. Por meio desse procedimento, foi possível identificar que os parâmetros mais relevantes para a classificação foram o ZCR e o RMS. A partir dessa seleção, os modelos foram retreinados, apresentando os resultados exibidos na Tabela 2.

¹juliasmaniotto@alunos.utfpr.edu.br,

²marcastoldi@utfpr.edu.br,

³wesleyangelino@utfpr.edu.br,

⁴agoedtel@utfpr.edu.br, ⁵gustavo.bazan@ifpr.edu.br

Tabela 1: Resultados de cada modelo.

Modelo	Acurácia [%]			
	Falha 1%	Falha 3%	Falha 5%	Falha 10%
Random Forest	97	99	100	100
Perceptron Multicamadas	77	90	96	100
Support Vector Machines	80	90	97	100
K-Nearest Neighbour	75	82	91	100
Decision Tree	100	100	100	100
Extreme Gradient Boosting	100	100	100	100

Tabela 2: Resultados de cada modelo.

Modelo	Acurácia [%]			
	Falha 1%	Falha 3%	Falha 5%	Falha 10%
Random Forest	100	100	100	100
Perceptron Multicamadas	100	100	100	100
Support Vector Machines	85	91	91	100
K-Nearest Neighbour	100	100	100	100
Decision Tree	100	100	100	100
Extreme Gradient Boosting	100	100	100	100

A partir dos valores obtidos, observa-se que todos os modelos apresentaram um desempenho superior após a aplicação da seleção de atributos, alcançando acurácias próximas ou iguais a 100%. No entanto, o modelo SVM não apresentou resultados tão satisfatórios em comparação com os demais. Esse desempenho inferior deve-se à dificuldade do modelo em classificar corretamente as amostras da classe 0 (sinais saudáveis), conforme ilustrado na Tabela 3.

Tabela 3: Métricas de desempenho do modelo SVM.

	Falha 1%		Falha 3%		Falha 5%		Falha 10%	
	0	1	0	1	0	1	0	1
Precisão	0.91	0.84	0.87	0.92	0.95	0.92	1.00	1.00
Recall	0.44	0.99	0.75	0.96	0.96	0.96	1.00	1.00
F1-Score	0.59	0.91	0.81	0.94	0.96	0.94	1.00	1.00

Além disso, ao analisar os resultados, percebe-se que a precisão da classificação aumenta conforme o nível de falha se intensifica. Esse comportamento sugere que falhas mais severas geram padrões mais distintos, tornando a diferenciação entre as classes mais evidente para os modelos. Logo, conclui-se que um conjunto reduzido de atributos é capaz de realizar a classificação dos dados de forma eficaz e que a metodologia empregada demonstrou resultados significativos para o estudo conduzido.

Referências

- [1] M. E. E. D. Atta, D. K. Ibrahim, and M. I. Gilany, “Broken bar fault detection and diagnosis techniques for induction motors and drives: State of the art,” *IEEE Access*, vol. 10, 2022.
- [2] M. F. Yakhni, S. Cauet, A. Sakout, H. Assoum, E. Etien, L. Rambault, and M. El-Gohary, “Variable speed induction motors’ fault detection based on transient motor current signatures analysis: A review,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 184, 2023.
- [3] X. Liang, M. Z. Ali, and H. Zhang, “Induction motors fault diagnosis using finite element method: A review,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020.
- [4] S. Dutta, S. Ghosh, A. K. Das, and D. Samanta, *Data Analytics for Social Microblogging Platforms*. Academic Press, 2023.

CONVERSOR CC/CC BIDIRECIONAL BUCK-BOOST NÃO-ISOLADO APLICADO AO CONTROLE DE CARGA DE BATERIAS

Luan Henrique Alves¹, Leonardo Bruno Garcia Campanhol², Luis Gustavo Ferrareto Espontão³, Sérgio Augusto Oliveira da Silva⁴

^{1,4} Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

² Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil

³ Laboratório de Mobilidade e Energia Inteligente (LMEI), Instituto SENAI de Tecnologia da Informação e Comunicação, Londrina, Paraná, Brasil

Resumo

A adoção de fontes como solar e eólica, aliada à eletrificação do transporte, pode reduzir as emissões de CO₂ em até 40% [1]. No entanto, a intermitência dessas fontes exige soluções para garantir o fornecimento contínuo de energia. Um sistema de armazenamento de energia permite aproveitar o excedente de energia gerado nos períodos de baixa demanda, tornando-o disponível quando necessário.

Nesse cenário, as baterias eletroquímicas se destacam por sua eficiência, com aplicações em sistemas de alimentação ininterrupta (UPS-*Uninterruptible Power Supply*) e sistemas de armazenamento de energia em baterias (BESS - *Battery Energy Storage System*) [2]. Com a expansão das fontes limpas de energia e dos veículos elétricos, as baterias recarregáveis têm papel essencial na transição energética. Dentre os modelos disponíveis, as de íons de lítio se destacam pela alta densidade energética, longa vida útil e baixa emissão de poluentes [3].

Além disso, a gestão eficiente do fluxo bidirecional de energia é crucial para a segurança e confiabilidade dos sistemas de armazenamento de energia, garantindo o desempenho ideal das baterias e sua integração com as redes elétricas e fontes renováveis. Nesse contexto, existem diversos tipos de conversores bidirecionais de potência que podem ser empregados para desempenhar esse controle de carga das baterias, com destaque à topologia Bidirecional Buck-Boost mostrada na Figura 1. Esse conversor CC/CC é capaz de realizar tal função utilizando um menor número de componentes magnéticos e eletrônicos, destacando-se então por sua simplicidade, custo e massa [4].

Nesse contexto, o presente trabalho realiza um estudo sobre os modos de operação e a modelagem do conversor, aplicado no controle de carga de baterias.

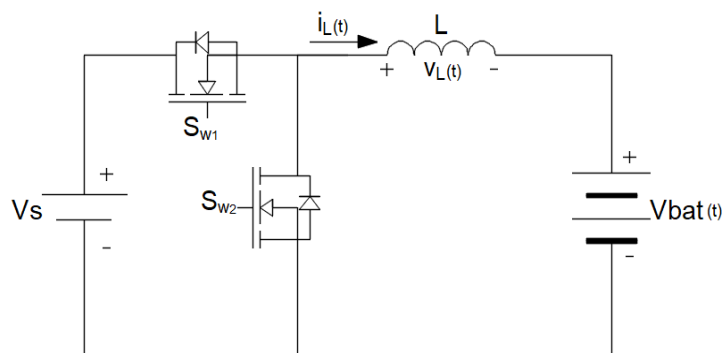


Figura 1: Conversor Buck-Boost.

¹ luan.2020@alunos.utfpr.edu.br

² campanhol@utfpr.edu.br

³ luis.espontao@gmail.com

⁴ augus@utfpr.edu.br

A metodologia do trabalho proposto consiste no estudo das etapas de operação do conversor, modelagem matemática e respectivo projeto do controlador PI da malha de corrente, em conjunto com as simulações computacionais. Ao observar o conversor operando no modo Buck, considerando que D corresponde a razão cíclica que comanda a chave Sw1, obtém-se a equação (1) que relaciona as tensões de entrada e saída em função de D. Ao observar o conversor operando no modo Boost, sendo 1-D o ciclo de trabalho da chave Sw2, obtém-se a relação dada pela equação (2)

$$V_{bat} = DV_S \quad (1)$$

$$V_{bat} = \frac{1}{(1-D)} V_S \quad (2)$$

A equação (1) permite determinar o valor de equilíbrio para D. Quando D é menor que esse valor, o conversor opera como Boost, carregando a bateria, conforme ilustrado na Figura 2-a. Por outro lado, quando D é maior, o conversor atua como Buck, carregando a bateria, como mostrado na Figura 2-b. Assim, o controle de D garante a bidirecionalidade dessa topologia. Já a equação (3) fornece a função de transferência que relaciona a corrente do indutor (i_L) com D, sendo fundamental para o projeto do controlador PI da malha de controle de corrente.

$$G_{id}(s) = \frac{RC_S + 1}{RCL_{S^2} + L_S + R} V_S \quad (3)$$

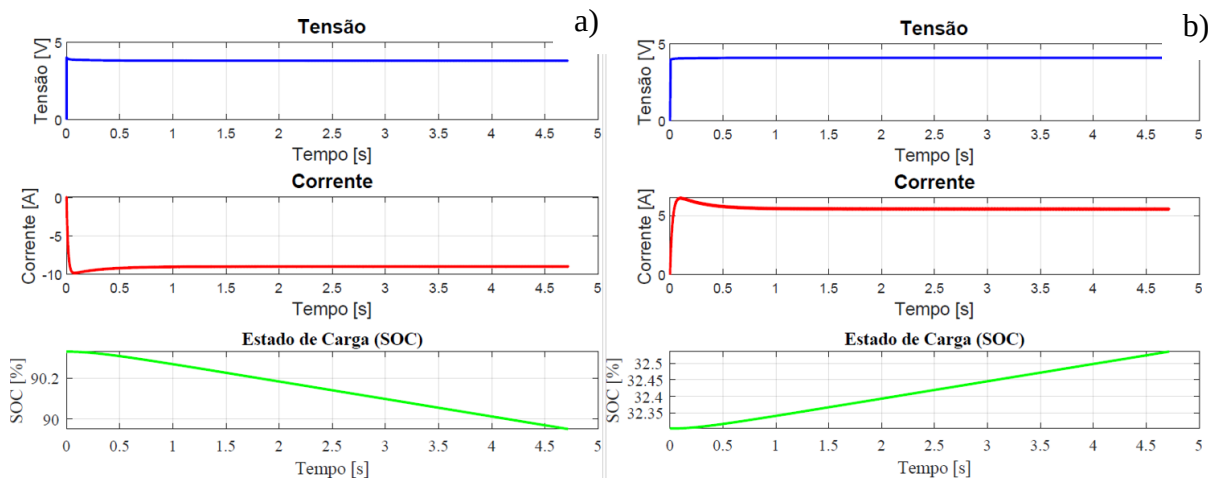


Figura 2: Resultados da simulação do conversor – (a) modo Boost, (b) modo Buck.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CNPq pelo apoio financeiro recebido durante o projeto.

Referências

- [1] KUMAR, R. R. et al. **Advances in batteries, battery modeling, battery management system, battery thermal management, SOC, SOH, and charge/discharge characteristics in EV applications**. IEEE Access, v. 11, p. 105761–105809, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3318121.
- [2] CERAOLO, M. New dynamical models of lead–acid batteries. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 15, n. 4, p. 1184–1190, nov. 2000. DOI: 10.1109/59.898088.
- [3] CARVALHO, E. L. et al. **Desenvolvimento de um Conversor Bidirecional Isolado Aplicado na Carga e Descarga de Bancos de Baterias**, Eletrônica de Potência, vol. 23, no. 3, pp. 349–359, Sep. 2018.
- [4] JUNQUEIRA, Gabriella Carneiro. **Modelagem, projeto e simulação do controle de um conversor DC/DC bidirecional para aplicação em satélites artificiais em órbitas LEO**. 2022. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2022.

UM ESTUDO SOBRE GERADORES DE INDUÇÃO ACOPLADOS A VOLANTES INERCIAIS

Lucas Pedroso Shiomi¹, Alessandro Goedtel², Marcelo Castoldi³, Wesley Angelino de Souza⁴^{1,2,3,4} Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

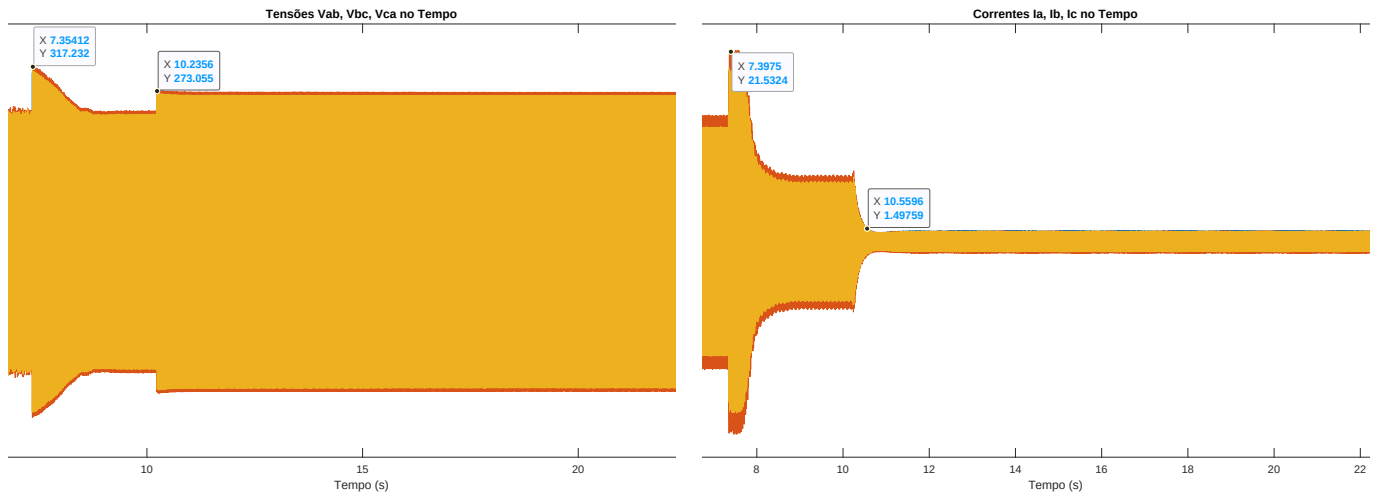
Nos últimos anos, a implantação de fontes de energia renovável baseadas em energia solar fotovoltaica e eólica, que são altamente intermitentes e variáveis, tem crescido rapidamente [1]. Devido à natureza periódica dessas fontes, surgem desafios no fornecimento de energia ao longo do tempo [2], entre os quais se destacam sobretensões, afundamentos de tensão, transitórios e interrupções [3].

Este trabalho propõe analisar o efeito de um volante inercial acoplado a um gerador de indução com rotor gaiola de esquilo (GIRGE) e a um motor de indução trifásico, juntamente com indutores toroidais de 10 mH, para amenizar os efeitos de afundamentos de tensão e transitórios de corrente na rede elétrica por meio do armazenamento de energia cinética.

Para o ensaio experimental, as correntes e tensões trifásicas do gerador são adquiridas enquanto se simula uma subtensão de 0,2 pu na alimentação, utilizando um variac trifásico. Na Figura 1 (a), observa-se que, após o desligamento dos indutores toroidais por volta de 7,314 segundos, ocorre também a simulação da subtensão. Em seguida, ao desligar o motor em 10,235 segundos, o GIRGE opera isoladamente com o volante inercial, permitindo visualizar a energia cinética acumulada sendo convertida em energia elétrica pelo GIRGE, garantindo uma tensão mais estável. Já na Figura 1 (b), observa-se uma redução da corrente após o desligamento do motor, com o GIRGE operando apenas com o volante inercial e sua energia cinética.

Dessa forma, o sistema de gerador de indução acoplado a um volante inercial demonstrou-se satisfatório. Os ensaios experimentais comprovaram a eficácia da conservação energética para mitigar afundamentos de tensão de 0,2 pu. Portanto, o volante inercial se mostra promissor como uma solução para atenuar pequenas falhas de subtensão, uma vez que eventuais distúrbios na rede elétrica frequentemente apresentam magnitudes inferiores a 0,1 pu.

¹shiomi@alunos.utfpr.edu.br²agoedtel@utfpr.edu.br³marcastoldi@utfpr.edu.br⁴wesleyangelino@utfpr.edu.br



(a) Tensões trifásicas no gerador.

(b) Correntes trifásicas no gerador.

Figura 1: Comparação das tensões e correntes no gerador.

Agradecimentos

Expresso minha gratidão ao Programa de Iniciação Tecnológica (PIBIT) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro à pesquisa, assim como ao Laboratório de Sistemas Inteligentes (LSI) e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procopio, pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa.

Referências

- [1] D. Peralta, C. Cañizares, and K. Bhattacharya, "Practical modeling of flywheel energy storage for primary frequency control in power grids," in *2018 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM)*, pp. 1–5, 2018.
- [2] S. Choudhury, "Flywheel energy storage systems: A critical review on technologies, applications, and future prospects," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 31, no. 9, p. e13024, 2021.
- [3] R. K. Miyamoto, A. Goedtel, and M. F. Castoldi, "A proposal for the improvement of electrical energy quality by energy storage in flywheels applied to synchronized grid generator systems," *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, vol. 118, p. 105797, 2020.

ESTUDO DE TOPOLOGIAS DE CONVERSORES MODULARES MULTINÍVEL
INTEGRADOS A BANCOS DE BATERIAS DE ÍON-LÍTIO

Luis Gustavo Ferrareto Espontão¹, Leonardo B. Garcia Campanhol², Sérgio A. Oliveira da Silva³, Paulo Broniera Júnior⁴

^{1,2,3} Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

⁴ Laboratório de Mobilidade e Energia Inteligente (LMEI), Instituto SENAI de Tecnologia da Informação e Comunicação, Londrina, Paraná, Brasil

Resumo

A utilização de Conversores Modulares Multinível (MMC - *Modular Multilvel Converter*, permite a integração de forma modular, o que aumenta a confiabilidade e a manutenibilidade do conversor.

Em [1] e [2] é apresentada a possibilidade de utilizar baterias como fontes para os módulos do MMC, permitindo um controle a nível de célula dentro de um *pack* de baterias. Neste contexto, o objetivo é realizar a modelagem e controle de um MMC alimentado por baterias de íons de Lítio, de forma a controlar a direcionalidade da corrente nos módulos em conjunto a sua conexão ao conversor.

Para o contexto inicial devemos classificar as baterias como primárias e secundárias, onde as primárias se tratam das células que não podem ser recarregadas, devido à sua reação química ser irreversível, comumente chamamos de pilha. Já as secundárias possuem características reversíveis, possibilitando a carga e descarga, normalmente denominada bateria, que será o foco deste estudo [3].

Baterias de lítio destacam-se por alta densidade de energia, baixa manutenção e ausência de efeito memória. Apesar das vantagens, lítio é sensível à temperatura e tensão excessiva, exigindo o emprego de um Sistema de Gerenciamento de Bateria (BMS - *Battery Management System*) para o balanceamento de cargas e segurança [4].

O estado da arte utiliza modelos matemáticos dinâmicos para baterias de lítio [5], com SOC (Estado de Carga, do inglês *State of Charge*) como variável de estado.

A partir deste conceito sobre a modelagem da bateria, caracterizando as fontes de potência para o conversor de interesse. A estrutura de um Conversor Modular Multinível para saída em Corrente Contínua (MMC-CC), exibida na Fig. 1, é composta por submódulos de baixa tensão.

O MMC-CC apresenta vantagens relevantes como modularidade, capacidade de isolamento de falhas e eficiência otimizada, demandando um controle coordenado para o balanceamento de tensão nos submódulos e o gerenciamento das baterias integradas.

Alinhado ao estado da arte, o controle proposto para o barramento CC contempla a interface bidirecional com a bateria, que opera de forma análoga a um conversor *Boost* durante a descarga e *Buck* durante a carga.

A contribuição central deste estudo reside na estruturação, modelagem conceitual e implementação das malhas de controle em simulação para o sistema MMC-CC com armazenamento de energia por baterias.

¹luis.espontao@sistemafiep.org.br

²campanhol@utfpr.edu.br

³augus@utfpr.edu.br

⁴paulo.broniera@sistemafiep.org.br

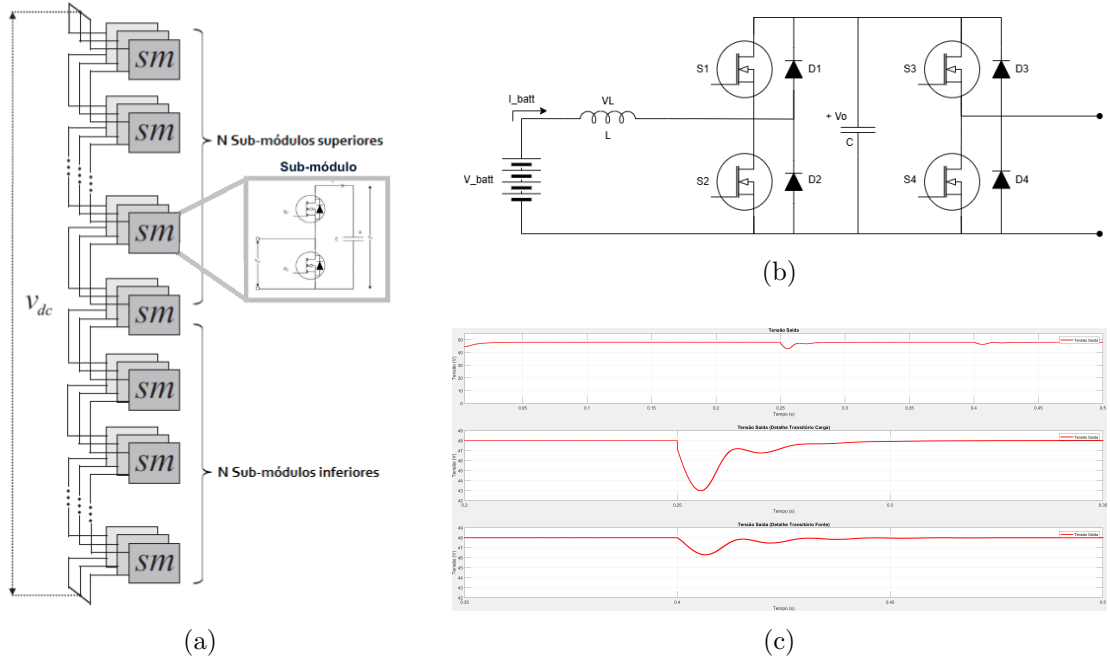


Figura 1: Topologia dos conversores: (a) Estrutura típica de um conversor MMC-CC. Adaptado de [2]; (b) Circuito de Sub-Módulo com bateria integrada. Adaptado de [6]; (c) Simulação da tensão de saída do sistema a resposta de carga

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto SENAI de Tecnologia da Comunicação e Informação (TIC) pelo generoso apoio na realização do presente trabalho. Como também ao grupo de pesquisa vinculado ao Laboratório de Eletrônica de Potência, Qualidade de Energia e Energias Renováveis (LEPQER) do PPGEE-CP

Referências

- [1] A. M. Rauf, M. Abdel-Monem, T. Geury, and O. Hegazy, “A review on multilevel converters for efficient integration of battery systems in stationary applications,” *Energies*, vol. 16, no. 10, 2023.
- [2] J. H. D. G. Pinto, *Modeling design and performance evaluation of battery energy storage systems based on modular multilevel converter*. Ph.d. thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, 2022. Orientador: Seleme Isaac Seleme Júnior; Coorientadores: Allan Fagner Cupertino, Heverton Augusto Pereira.
- [3] ABNT NBR 16975, “Armazenamento de energia elétrica em baterias estacionárias: requisitos de desempenho,” Standard ABNT NBR 16975:2021, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, BR, 2021.
- [4] M. Hohmann, “Avaliação de métodos para a caracterização de baterias de lítio em segunda vida,” 2022. Orientador: Aline Kirsten Vidal de Oliveira.
- [5] O. Tremblay and L.-A. Dessaint, “Experimental validation of a battery dynamic model for ev applications,” *World Electric Vehicle Journal*, vol. 3, no. 2, pp. 289–298, 2009.
- [6] A. Watson, “Modular multilevel converter with embedded batteries as a motor controller,” master’s thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2021.

IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS NO ESTATOR DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS
UTILIZANDO TEORIAS DE POTÊNCIA

Mariana Pelisson¹, Wesley Angelino de Souza², Alessandro Goedel³, Marcelo Favoretto Castoldi⁴

^{1,2,3,4}Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil.

Resumo

Os motores de indução trifásicos (MITs) são amplamente utilizados na indústria devido à sua simplicidade e robustez. No entanto, o uso contínuo torna-os suscetíveis a falhas, especialmente nos enrolamentos do estator [1]. Essas falhas representam até 40% das falhas elétricas, gerando paradas não planejadas e custos elevados [2]. As falhas no estator geralmente começam com um curto-circuito em algumas voltas da mesma fase. Detectar esses curtos-circuitos iniciais é essencial, pois eles precedem falhas mais graves, como curtos entre bobinas e entre fases, que podem levar a danos irreversíveis no estator [3].

Esse trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia que integra as teorias de potência CPT (do inglês, *Conservative Power Theory*) e Teoria de Potência Instantânea, conhecida como Teoria $p-q$, com aprendizado de máquina para monitorar e identificar falhas em MITs. Esse sistema serve como base para a manutenção preditiva, capaz de identificar condições de falha antes que elas impactem a operação industrial, minimizando assim custos e tempo de inatividade dos MITs em processos industriais em casos de falha agravada.

A CPT é descrita no domínio do tempo e foi inicialmente proposta em 2003 e reformulada em 2010 [4], sob a suposição de frequência de operação variável, o que possibilita sua aplicação em sistemas de geração distribuída e redes inteligentes. Essa teoria considera diversos fenômenos causados por diferentes tipos de cargas e condições de fornecimento de tensão. Ela permite a decomposição ortogonal da corrente elétrica, associando-se a diferentes propriedades físicas da carga. As parcelas resultantes incluem potência aparente, ativa, reativa, de desbalanço, residual e fatores de conformidades [5].

A Teoria $p-q$ tem como base a transformação de Clarke, na qual as coordenadas abc são transpostas para as coordenadas $\alpha\beta 0$. Através das tensões e correntes nessas coordenadas $\alpha\beta 0$, são descritas três componentes de potência instantâneas, conhecidas como: potência real (p), potência imaginária (q) e potência de sequência zero (p_0). Essas componentes de potência ainda são decompostas em partes médias e oscilantes [6]. As parcelas oscilantes podem representar os desbalanços e harmônicos gerados pela carga, assim como os desequilíbrios e distorções nas tensões da fonte.

Os dados utilizados nesse estudo foram obtidos a partir de experimentos controlados no Laboratório de Sistemas Inteligentes da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), no Câmpus Cornélio Procopio, conforme descrito em [7]. O conjunto de dados é composto por dois motores de indução trifásicos, com potências de 1 CV e 2 CV, presença de falhas de curto-circuito de 1%, 3%, 5% e 10%, variação de tensão e diferentes níveis de carga.

¹marianapelsson@alunos.utfpr.edu.br

²wesleyangelino@utfpr.edu.br

³agoedel@utfpr.edu.br

⁴marcastoldi@utfpr.edu.br

Foi aplicado o conjunto de dados nas Teorias CPT e $p-q$ para a extração de 9 atributos cada uma. Esses atributos representam propriedades eletromagnéticas da carga. Portanto, a investigação sugere que a sensibilidade a alterações nessas características pode facilitar a identificação de falhas em MITs. Esses atributos são utilizados como variáveis de entrada em modelos de aprendizado de máquina, incluindo k-Vizinhos Mais Próximos (k -NN), Floresta Aleatória (RF) e XGBoost. Após o primeiro treinamento, os modelos passaram por um processo de seleção das características mais relevantes, utilizando a técnica de *Sequential Feature Selection* (SFS). Esse método adiciona gradualmente novas características ao conjunto de dados, aprimorando a acurácia e a capacidade de generalização de cada modelo.

A Tabela 1 apresenta as métricas de desempenho obtidas pelos classificadores considerando o conjunto selecionado pelo SFS. Observa-se que, apesar da redução da dimensionalidade, os modelos obtiveram acurácias satisfatórias.

Tabela 1: Resultados após a aplicação do SFS.

Motor de 1 CV	CPT	PQ
k-NN	0.9976	0.9926
XGBoost	0.9978	0.9989
RF	0.9971	0.9989
Motor de 2 CV	CPT	PQ
k-NN	0.9981	0.9943
XGBoost	0.9987	0.9989
RF	0.9986	0.9995

Os resultados apresentados confirmam a eficácia da integração entre as teorias de potência e as técnicas de aprendizado de máquina supervisionado, especialmente quando precedida por um processo criterioso de seleção de atributos, evidenciando o potencial da abordagem proposta para diagnosticar falhas de curto circuito em motores de indução trifásicos.

Referências

- [1] A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, and G.-A. Capolino, “Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, pp. 4109–4126, Dec. 2008.
- [2] M. Soleimani, M. N. Alizadeh, and M. Moallem, “Economical replacement decision for induction motors in industry,” in *Proceedings of the Texas Power and Energy Conference*, pp. 1–6, 2018.
- [3] M. Drif and A. J. M. Cardoso, “Stator Fault Diagnostics in Squirrel Cage Three-Phase Induction Motor Drives Using the Instantaneous Active and Reactive Power Signature Analyses,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, pp. 1348–1360, May 2014.
- [4] H. Kelis Morales Paredes, *Teoria de potência conservativa: uma nova abordagem para o controle cooperativo de condicionadores de energia e considerações sobre atribuição de responsabilidades*. Doutor em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Mar. 2011.
- [5] A. Bogila, *Teorias de potência conservativa e instantânea: análise comparativa*. Dissertação (mestrado), Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia, Aug. 2014.
- [6] H. Akagi, E. H. Watanabe, and M. Aredes, “Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning | IEEE eBooks | IEEE Xplore,” 2007.
- [7] G. V. Barbara, “Um estudo sobre multissensoriamento no diagnóstico de falhas em motores de indução trifásicos,” Master’s thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, May 2023.

APLICAÇÃO DA TEORIA DOS COMPONENTES FÍSICOS DE CORRENTE NA DETECÇÃO
DE FALHAS NO ROTOR DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOSMurillo Garcia Gentil¹, Alessandro Goedtel², Marcelo Favoretto Castoldi³, Wesley Angelino de Souza⁴^{1,2,3,4} Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

O Motor de Indução Trifásico (MIT) é um dos elementos mais importantes na conversão de energia eletromecânica nos processos industriais devido à sua robustez, facilidade de manutenção, baixo custo de aquisição e adaptabilidade a diferentes perfis de carga [1]. No entanto, embora essas máquinas sejam confiáveis, elas estão sujeitas a diferentes tipos de defeitos, sendo os mais comuns: falhas em rolamentos (69%), falhas no estator (21%), falhas no rotor (7%) e outros tipos de falhas (3%) [2].

As falhas de barras quebradas pode comprometer o desempenho do motor, reduzir sua eficiência energética e introduzir distorções harmônicas na rede elétrica, afetando a qualidade de energia. A detecção precoce dessas anomalias é, portanto, essencial para mitigar riscos operacionais e evitar sobrecargas nas barras adjacentes, uma vez que a alteração no fluxo de corrente resultante da falha provoca assimetrias no campo magnético do rotor [3].

Embora a literatura apresente diversas abordagens para extração de características, observa-se a carência de métodos que incorporem, de forma estruturada, informações físicas representativas do comportamento dinâmico do sistema. Nesse sentido, as teorias de potência surgem como ferramentas promissoras para a caracterização de anomalias elétricas, permitindo a análise do intercâmbio de energia entre a fonte e a carga sob condições não ideais [4]. Além de possibilitarem o desenvolvimento de modelos equivalentes e de índices de desempenho, essas teorias vêm sendo aplicadas em diversos contextos, como a compensação de distorções, a modelagem de cargas e a alocação de responsabilidades em sistemas elétricos [5].

Portanto, a estratégia adotada neste trabalho para a extração de características fundamenta-se na Teoria das Componentes Físicas de Corrente (CPC, do inglês *Currents' Physical Components*), proposta por [6]. Essa teoria estabelece uma decomposição ortogonal da corrente elétrica em componentes fisicamente interpretáveis, com base nas propriedades elétricas das cargas. Desenvolvida no domínio da frequência, especificamente por meio da análise espectral harmônica dos sinais de corrente e tensão, ela aplica-se a sistemas monofásicos e trifásicos, com ou sem fio neutro, sob condições de tensão senoidal ou não senoidal, e com cargas lineares ou não lineares.

A aplicação da Teoria CPC se justifica pela sua capacidade de decompor a corrente elétrica em componentes associadas a diferentes fenômenos eletromagnéticos, o que possibilita a identificação de distorções e desequilíbrios característicos de falhas mecânicas e elétricas em motores. A Figura 1 apresenta a distribuição dos valores das grandezas pela Teoria CPC para (a) uma condição saudável e para (b) o caso mais severo de falha com quatro barras quebradas, demonstrando o comportamento das grandezas elétricas sob diferentes condições operacionais.

¹mgentil@alunos.utfpr.edu.br²agoetel@utfpr.edu.br³marcastoldi@utfpr.edu.br⁴wesleangelino@utfpr.edu.br

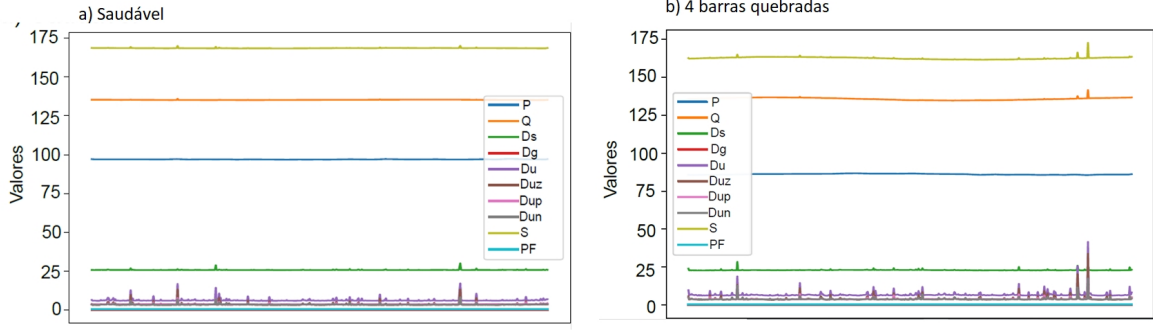


Figura 1: Atributos extraídos dos Componentes Físicos da Corrente.

Os atributos extraídos por meio da Teoria CPC são : **P**: Potência ativa, **Q** : Potência reativa, **D_s**: Potência de dispersão, **D_u**: Potência de desbalanço total, **D_{uz}**: Potência de desbalanço de sequência zero, **D_{up}**: Potência de desbalanço de sequência positiva, **D_{un}** : Potência de desbalanço de sequência negativa, **D_g** : Potência gerada pela carga, **S** : Potência Aparente, **PF** : Fator de potência.

Em seguida, esses atributos extraídos foram aplicados nos seguintes classificadores: *K-Nearest Neighbors* (*k*-NN) , Perceptron Multicamadas (PMC), Árvore de Decisão, *Random Forest* (RF) e XGBoost. Os classificadores *k*-NN, RF e XGBoost apresentaram desempenho elevado, com acurácia superior a 99%. O modelo de árvore de decisão apresentou desempenho satisfatório, enquanto o PMC demonstrou resultados significativamente inferiores.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, e apoiado em parte pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através do Processo 302521/2023-2 e Processo 311634/2022-2; em parte pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Ao Instituto Federal do Paraná, pelo apoio e pela oportunidade de realizar esta pesquisa.

Referências

- [1] M. Nazemi, X. Liang, and F. Haghjoo, "Convolutional neural network-based online stator inter-turn faults detection for line-connected induction motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 60, no. 3, pp. 4693–4707, 2024.
- [2] X. Liang, M. Z. Ali, and H. Zhang, "Induction motors fault diagnosis using finite element method: A review," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 2, pp. 1205–1217, 2020.
- [3] S. Halder, S. Bhat, D. Zychma, and P. Sowa, "Broken rotor bar fault diagnosis techniques based on motor current signature analysis for induction motor—a review," *Energies*, vol. 15, no. 22, 2022.
- [4] M. Weislik and P. Strzabala, "Simulation Analysis of a Single-Phase AC Circuit with a Nonlinear Load," *Energies*, vol. 16, p. 1386, Jan. 2023.
- [5] Y. Ding, M. Mao, and L. Chang, "Conservative power theory and its applications in modern smart grid: Review and prospect," *Applied Energy*, vol. 303, p. 117617, Dec. 2021.
- [6] L. S. Czarnecki, "Currents' Physical Components (CPC) concept: A fundamental of power theory," in *2008 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation*, pp. 1–11, June 2008. ISSN: 2375-1428.

UM ESTUDO SOBRE TÉCNICAS DE CHAVEAMENTO OTIMIZADO DE CARGAS RESISTIVAS APLICADAS A UMA BANCADA DE ENSAIOS DE MOTORES ELÉTRICOS

Natan Felipe Bueno Garcia¹, Alessandro Goedtel², Wesley Angelino de Souza³, Marcelo Favoretto Castoldi⁴

^{1,2,3,4} Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

A Indústria 4.0 diz respeito a um conceito proveniente de um projeto nacional promovido pela Alemanha em 2011, com o intuito de elencar ações que garantissem a competitividade alemã no cenário industrial. O termo foi popularizado por seu potencial de impactar positivamente os três pilares do conceito de sustentabilidade: econômico, ambiental e social. No Brasil, a Indústria 4.0 é comumente associada à Indústria Integrada ou 4º Revolução Industrial, representando o englobamento das principais inovações tecnológicas em automação, controle e tecnologia da informação, por meio de sistemas ciberfísicos, Internet das Coisas (IoT) e armazenamento em nuvem [1].

A Internet das Coisas é o elemento base da Indústria 4.0, realizando a integração dos processos físicos com os processos virtuais, compreendendo uma rede inteligente de dispositivos conectados, capazes de monitorar, coletar, trocar e analisar dados em grande volume provenientes de fontes diversificadas, em tempo real. Alinhada a esse princípio, a computação em nuvem representa a arquitetura flexível que possibilita o armazenamento e o processamento desses dados, oferecendo ao usuário acesso aos recursos computacionais de maneira remota. Desta maneira, cria-se um sistema no qual dispositivos comunicam-se entre si, acessam informações na Internet, recebem e armazenam dados, e interagem com usuários, criando ambientes altamente otimizados [2, 3].

A partir dessa premissa, este trabalho tem por objetivo a criação de uma interface de multissensoriamento de sinais de tensão, corrente e velocidade de um Gerador de Corrente Contínua (GCC), por meio de um sistema embarcado baseado em IoT, a fim de realizar um monitoramento prático e em tempo real dos parâmetros da máquina, durante a utilização da bancada de ensaios de motores elétricos em testes experimentais. Propõe-se, também, o desenvolvimento de um banco de resistências com chaveamento otimizado de configurações, acoplado à armadura do GCC, a fim de dissipar a potência gerada por este e permitir o monitoramento dos sinais de tensão e corrente.

A metodologia aplicada consiste na utilização do microcontrolador SMT32F446RE, da *STMicroelectronics*, que realiza a aquisição dos sinais de tensão e corrente, provenientes de sensores Hall, e de velocidade, provenientes de um tacogerador acoplado ao gerador. Para adequar os sinais ao conversor analógico-digital do microcontrolador, utiliza-se uma placa de condicionamento de sinais, que engloba os sensores e realiza todos os ajustes e ganhos necessários.

¹ ngarcia@alunos.utfpr.edu.br

² agoedtel@utfpr.edu.br

³ wesleyangelino@utfpr.edu.br

⁴ marcastoldi@utfpr.edu.br

Como o STM32F446RE não possui módulo Wi-fi próprio, utiliza-se um módulo ESP8266, que faz a conexão com a rede local por meio de comunicação serial e comandos AT (instruções de *attention*), base da comunicação entre qualquer modem e seu controlador *host*. Após a aquisição dos dados provenientes da placa de condicionamento de sinais e conexão com a Internet, o STM32 faz o envio dos dados para uma interface local por meio do protocolo MQTT.

O protocolo MQTT baseia-se no princípio de publicar mensagens e se inscrever em tópicos, configurado na plataforma *Home Assistant*, responsável também pela interface de monitoramento, implementada localmente em um Raspberry Pi 4. Os próximos passos da pesquisa consistem no desenvolvimento da interface gráfica na plataforma, que exibirá os gráficos e valores dos sinais aquisitados em tempo real, assim como portará o sistema de chaveamento digital do banco de cargas resistivas acoplado à armadura.

O banco de resistências é composto por 4 resistências aletadas de 16 Ω e 3 kW cada, associadas de maneira a fornecerem configurações de 32 Ω , 16 Ω , 8 Ω e 5,3 Ω , a fim de obter-se a melhor configuração de resistência requerida em cada aplicação, durante a utilização da bancada de ensaios. O banco possui ventilação forçada por meio de 6 ventiladores em configuração *push-pull* de vento (3 ventiladores fornecem ar frio para o interior do quadro, enquanto os outros 3 retiram o ar quente).

O chaveamento das configurações é realizado por meio de relés de estado sólido (SSR) para corrente contínua, comandados manualmente por chaves-alavancas no exterior do quadro. O acionamento pode ser feito também através de comandos digitais na interface, que acionam um módulo de relés eletromecânicos conectados às entradas de controle dos SSR, por meio do STM32. A Figura 1 apresenta o sistema interno do banco de resistências.

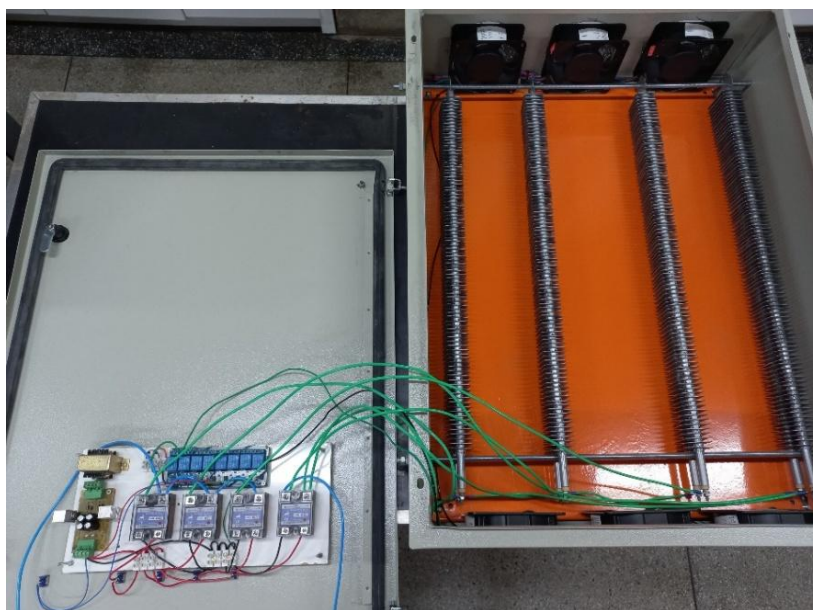


Figura 1: Interior do banco de resistências.

Referências

- [1] RIPKA, Adriana. Análise das políticas públicas para alavancagem das *startups* vinculadas à Indústria 4.0, aplicadas ao setor de energia elétrica brasileiro. Tese (Doutorado em Tecnologia e Sociedade) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.
- [2] FACCIONI FILHO, Mauro. Internet das Coisas. Palhoça: UnisulVirtual, 2016. E-book.
- [3] MINERVA, Roberto; BIRU, Abyi; ROTONDI, Domenico. Towards a definition of the Internet of Things (IoT). Monografia (Especialização em *Future Broadband Networks*) – Politecnico di Torino, Turim, 2015.

MICRO-INVERSOR INTEGRADO BASEADO NA TOPOLOGIA ZETA

Óliver Pincelli Westin¹, Anderson Aparecido Dionizio², Leonardo Poltronieri Sampaio³,
Sérgio Augusto Oliveira da Silva⁴

^{1,2,3,4} Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

A ampliação do uso de fontes renováveis para a produção de energia elétrica e a crescente demanda da mesma, está conduzindo o setor energético a uma mudança dos sistemas de geração, armazenamento e transmissão de energia a fim de torná-los mais eficientes. Para suprir essa demanda por eletricidade, a utilização de sistemas fotovoltaicos (FV) se popularizou, tanto aplicados com conexão direta à rede [1], quanto com operação de maneira autônoma, isolados da rede [2], tornando uma tecnologia essencial para aplicações em diferentes escalas de potências para o suprimento energético desde que exista incidência de luz solar [3]. Sistemas FV apresentam como característica a geração de energia em corrente contínua (CC), em contrapartida a rede elétrica convencional é apresentada em corrente alternada (CA). Quando se usa um sistema FV conectado à rede elétrica em CA são necessários um ou mais estágios de conversão de energia. Desta forma é apresentada a topologia do Inversor Integrado Duplo Zeta (I2DZ), Figura 1a, que apresenta a vantagem de realizar a extração de energia disponível em um arranjo FV, realizando simultaneamente o ajuste da tensão de entrada e a conversão CC/CA, injetando uma corrente senoidal, sincronizada e controlada na rede elétrica monofásica.

O controle do I2DZ é realizado por uma estratégia onde a malha interna controla a corrente que será injetada na rede, enquanto a externa controla a tensão do arranjo FV, garantindo a extração da máxima potência disponível. A malha interna utiliza um regulador linear quadrático (do inglês: LQR) [4], enquanto o controle da tensão do arranjo FV é realizado por um controlador Proporcional-Integral (PI), como apresentado na Figura 1b. O desempenho e viabilidade do I2DZ proposto são avaliados e confirmados por meio de resultados de simulação computacional, onde foi alcançado um rendimento teórico acima de 92% e uma taxa de distorção harmônica total (DHT) inferior a 4%.

A topologia do I2DZ apresentada na Figura 1a. Analisando um período de chaveamento, o I2DZ opera de maneira análoga ao conversor Zeta convencional. Nesta estrutura, os interruptores $S_{Z1,Z2}$ trabalham em alta frequência enquanto os demais interruptores são comandados em baixa frequência. Nas etapas 1 e 2 de funcionamento do I2DZ, os interruptores com subíndice 1 são comandados à condução. Já nas etapas 3 e 4, operam apenas os interruptores com subíndice 2, mantendo os demais abertos.

O arranjo FV escolhido é composto de oito módulos *KC-50T* conectados em série, que fornecem 432 W de pico, $V_{oc} = 173.6 V$ e $I_{sc} = 3.31 A$. Já os valores adotados para o circuito do I2DZ para os indutores e capacitores são de: $L_m = 250 \mu H$, $L_o = 3.5 mH$, $C_{1,2} = 6 mF$, $C_a = 3 \mu F$ e $C_o = 1.5 \mu F$. No controle K_u , K_{pv} , K_{iv} e $K_{1,5}$ são: 0.1, 0.008, 158, 0.023, 0.16, 0.002, -0.002 e -2450. São apresentados nas Figuras 2a e 2b, os resultados de simulação da topologia I2DZ operando em potência nominal e injetando uma corrente de $3.5 A_{rms}$ na rede local, neste caso com tensão de $127 V_{rms}$ e frequência de $60 Hz$.

¹oliverwestin@alunos.utfpr.edu.br

²dionizio@alunos.utfpr.edu.br

³sampaio@utfpr.edu.br

⁴augus@utfpr.edu.br

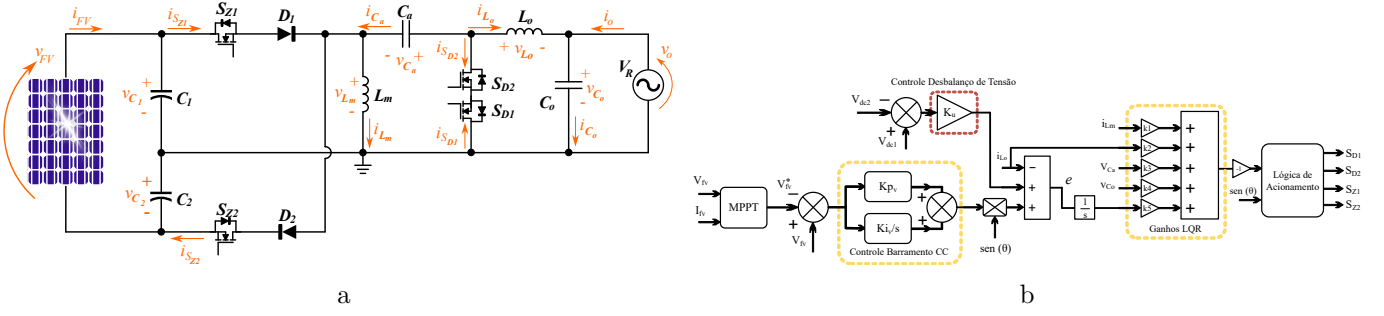


Figura 1: (a) Circuito do I2DZ; (b) Diagrama de controle proposto para o I2DZ.

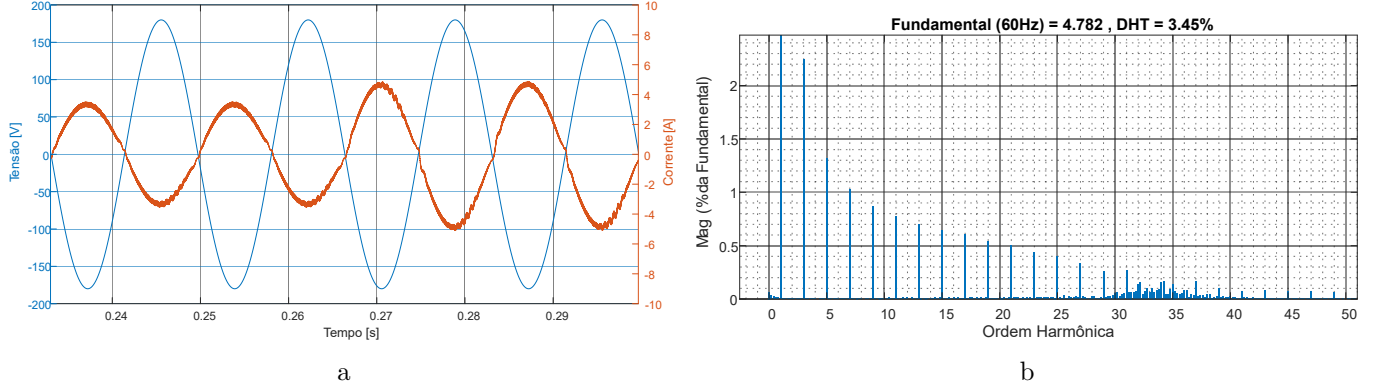


Figura 2: (a) Tensão da rede e corrente sendo injetada pelo I2DZ; (b) Taxa de Distorção Harmônica.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro recebido do CNPq (Processos 308620/2021-6 e 304707/2021-0 e iniciação científica) e ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

- [1] L. P. Sampaio, P. J. S. Costa, and S. A. O. da Silva, "Modified zeta inverter intended for single-phase grid-tied photovoltaic system," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, p. 102076, 2022.
- [2] A. A. Dionizio, A. R. M. Guedes, L. P. Sampaio, S. A. O. da Silva, and Ó. P. Westin, "Inversor integrado zeta/Ćuk para aplicações monofásicas autônomas," *Eletrônica de Potência*, vol. 30, p. e202505, Jan. 2025.
- [3] S. N. Vodapally and M. H. Ali, "A comprehensive review of solar photovoltaic (pv) technologies, architecture, and its applications to improved efficiency," *Energies*, vol. 16, no. 1, 2023.
- [4] N. Arab, B. Kedjar, A. Javadi, and K. Al-Haddad, "A multifunctional single-phase grid-integrated residential solar pv systems based on lqr control," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 2, pp. 2099–2109, 2019.

COMPARAÇÃO DE OBSERVADORES POR MODOS DESLIZANTES DE PRIMEIRA E SEGUNDA ORDEM APLICADOS A SISTEMAS LPV

Patricia L. Silva¹, Cristiano M. Agulhari²

^{1,2} Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

Este resumo apresenta brevemente os resultados da análise comparativa entre observadores por modos deslizantes de primeira e segunda ordem (1-SMO e 2-SMO) aplicados a um sistema não linear com parâmetros variantes no tempo (LPV) sujeito a incertezas paramétricas. A proposta central é analisar o comportamento desses observadores diante das variações dos parâmetros e avaliar seu desempenho em um sistema discretizado, destacando os efeitos da trepidação na estimação dos estados. Os testes foram realizados em um sistema dinâmico de giroscópio de momento (CMG-750), tanto no ambiente computacional quanto na planta prática, conforme ilustrado na Figura 1.

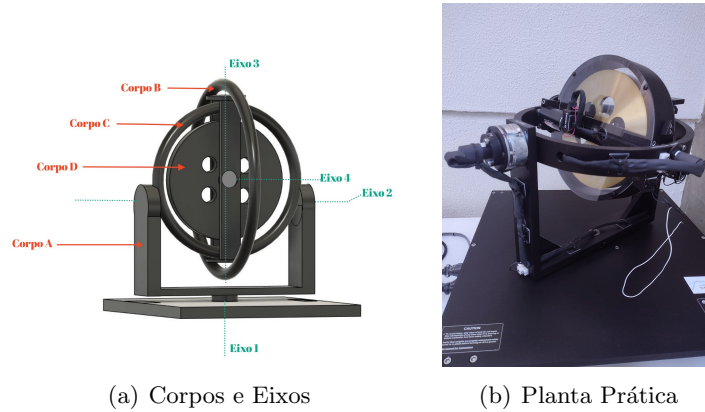


Figura 1: Giroscópio

A abordagem adotada utiliza desigualdades matriciais lineares (LMIs) para formular condições de estabilidade e desempenho do observador. Com base nos procedimentos apresentados em [1] e nas modificações inseridas, foram obtidas as LMIs utilizadas no desenvolvimento dos observadores por modos deslizantes de primeira ordem (1-SMO) e segunda ordem (2-SMO). Para avaliar a eficácia dos observadores, foi empregada a modelagem LPV, considerando a variação do parâmetro angular $\omega_d(t)$ do giroscópio, com discretização pelo método de Tustin [2]; [3]. Foi também inserida uma taxa mínima de decaimento para o erro de estimação do observador, que é uma das contribuições do trabalho. Para avaliar a eficácia dos observadores, foi empregada a modelagem LPV, considerando a variação do parâmetro angular $\omega_d(t)$ do giroscópio.

O modelo em tempo contínuo considerado para o CMG é dado por:

$$A(\omega_d) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{J_D \omega_d}{I_C + I_D} \\ 0 & \frac{-J_D \omega_d}{I_D + K_A + K_B + K_C} & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{I_C + I_D} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad x(t) = \begin{bmatrix} \theta_a(t) \\ \omega_c(t) \\ \omega_a(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

¹patricia.1993@alunos.utfpr.edu.br

²agulhari@utfpr.edu.br

onde $x(t)$ é composto pelo ângulo $\theta_a(t)$ e pela velocidade angular $\omega_a(t)$ do Corpo A, além da velocidade angular $\omega_c(t)$ do Corpo C. A entrada $u(t)$ corresponde ao torque aplicado diretamente ao Corpo C. A matriz dinâmica depende da velocidade angular $\omega_d(t)$ do Corpo D, tornando o sistema não linear, modelado por meio da abordagem LPV. A variável $\omega_d(t)$ é considerada com variações arbitrárias no intervalo $\omega_d \in [270 \ 300]$ rpm.

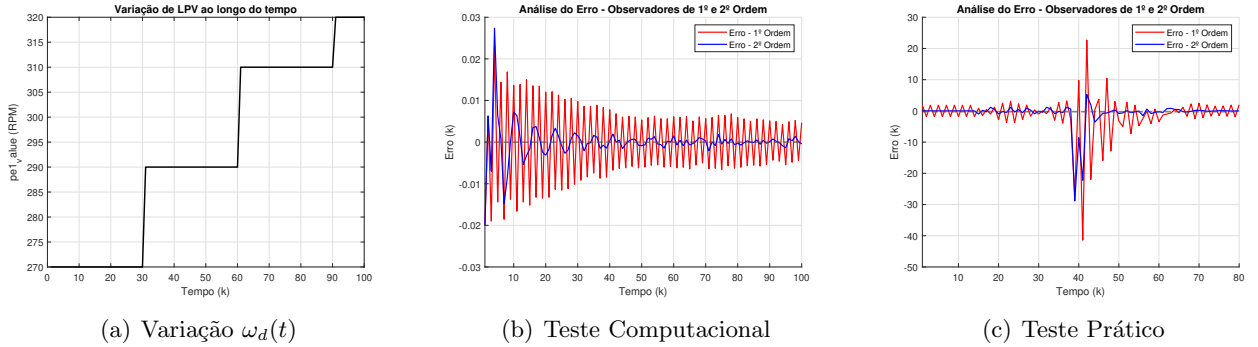


Figura 2: Variação LPV / Testes do Sistema

Os resultados através da Figura 2 mostraram que o 2-SMO apresenta um desempenho superior ao 1-SMO na redução do *chattering*, proporcionando respostas mais suaves e maior precisão na estimação dos estados. A análise dos erros de estimação revelou que o 1-SMO exibe oscilações de alta frequência ao longo de toda a execução, enquanto o 2-SMO reduz esse efeito devido às suas características. A utilização de LPV nas LMIs permitiram projetar observadores mais robustos e adaptáveis a variações paramétricas. Os testes experimentais confirmaram a eficiência do 2-SMO na redução do *chattering* e na melhoria da estimação dos estados, validando a proposta como uma solução viável para aplicações práticas em sistemas dinâmicos sujeitos a incertezas.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Processo (88887.005980/2024-00) e UTFPR.

Referências

- [1] K. Elghoul, K. Dehri, and R. Ben Abdennour, “A discrete second order sliding mode observer based on lmis approach,” in *2021 IEEE 2nd International Conference on Signal, Control and Communication (SCC)*, pp. 43–48, 2021.
- [2] S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron, and V. Balakrishnan, *Linear matrix inequalities in system and control theory*. SIAM, 1994.
- [3] Y. Asai, Y. Takahashi, and J. Yoneyama, “Observer design for takagi-sugeno fuzzy descriptor system using a lyapunov function with integrals of the membership functions,” in *2024 Joint 13th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 25th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS & ISIS)*, pp. 1–5, 2024.

ESTUDO DO CONTROLE DE SISTEMAS MULTIAGENTES

Pedro Henrique Alves Chiarelli¹, Cristiano Marcos Agulhari²

^(1,2) Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

No mundo atual, há um grande interesse no controle descentralizado de veículos autônomos, como drones minissatélites, veículos subaquáticos, entre outros [1]. Tal interesse se deve ao aumento da demanda por sistemas inteligentes capazes de operar de forma cooperativa e eficiente em um ambiente dinâmico e imprevisível.

O projeto desenvolvido se trata de uma pesquisa sobre sistemas multiagentes, o qual possui como finalidade ser aplicado em uma simulação com um conjunto mínimo de 3 agentes, no caso drones, para a realização de uma tarefa simples, que inicialmente será a formação de uma forma geométrica como um triângulo de dimensões definidas pelo usuário em qualquer lugar do ambiente simulado. A simulação será realizada no ambiente de simulações MATLAB.

Os agentes que compõem a simulação foram analisados diante do contexto e supõe-se inicialmente que são sistemas de malha fechada lineares. Com o intuito de realizar a síntese dos controladores desses agentes foi estudado e analisado o teorema de Lyapunov.

O teorema de Lyapunov, ou “método direto de Lyapunov”, aborda sobre como determinar que um sistema é estável sem que seja necessário obter a solução da equação diferencial do sistema. Nesse teorema é dito que se o sistema for assintoticamente estável ele é sempre dissipativo, bem como que para tal sistema certamente existe uma função de Lyapunov associada a ele [2]. Dessa forma, se existir uma função $V(x)$ que satisfaça as três condições a seguir, então o sistema é estável.

$$V(0) = 0; \quad (1)$$

$$V(x) > 0 \text{ para uma região } D - \{0\}; \quad (2)$$

$$\dot{V}(x) \leq 0 \text{ em } D. \quad (3)$$

Ainda, se

$$\dot{V}(x) < 0 \text{ em } D, \quad (4)$$

então o sistema é assintoticamente estável.

Com todo esse conhecimento, é possível não só determinar se o sistema é estável, mas também calcular o ganho de realimentação de estados K , o qual é o melhor tipo de controlador que um sistema pode possuir. Considere o sistema $\dot{x} = Ax(t) + Bu(t)$. Logo, aplicando a condição de análise no sistema em malha fechada para gerar a condição de síntese, é possível concluir [3] que, se existir $W = W' > 0$ e Z tais que

¹ chiarelli@alunos.utfpr.edu.br

² agulhari@utfpr.edu.br

$$WA' + Z'B' + AW + BZ < 0, \quad (5)$$

então $u = Kx$, com $K = ZW^{-1}$, estabiliza o sistema.

Considere agora que há N sistemas dinâmicos os quais obedecem ao ganho K conectados em uma rede, descrita como a matriz Laplaciana L , que corresponde ao sistema multiagente analisado neste projeto. Assim, de acordo com [1], é necessário projetar um ganho K que estabiliza a dinâmica total

$$\dot{x} = I_N \otimes Ax + L \otimes BK(x - h). \quad (6)$$

Na Equação (6), o vetor $h(t)$ descreve a formação desejada, e se refere ao produto de Kronecker, definido em [4]. Com todos esses conhecimentos apresentados, a pesquisa se propõe a calcular um ganho K que controle e estabilize o sistema de um dos agentes, tornando assim possível controlar o sistema multiagente e dar início às simulações digitais, para enfim validar a metodologia em um ambiente experimental com drones reais, analisando sua eficácia e desempenho sob diferentes condições operacionais.

Referências

- [1]. J. LAFFERRIERE, G.; WILLIAMS, A.; CAUGHMAN, J.; VEERMAN, J. J. P. *Decentralized control of vehicle formations*. Systems & Control Letters, v. 54, p. 899–910, 2005.
- [2]. KHALIL, Hassan K. **Nonlinear systems**. 3rd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.
- [3]. BOYD, Stephen; EL GHAOU, Laurent; FERON, E.; BALAKRISHNAN, V. **Linear matrix inequalities in system and control theory**. v. 15. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 1994.
- [4]. HORN, R. A.; JOHNSON, C. R. **Topics in matrix analysis**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.

ESTUDO DE UM CONVERSOR CC/CA BIDIRECIONAL

Rafael T. Inoue¹, Anderson A. Dionizio², Leonardo P. Sampaio³, Sérgio A. O. da Silva⁴^{1,2,3,4}Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

Recentemente, evidenciou-se a crescente demanda mundial por energia elétrica, devido à crescente eletrificação e o desenvolvimento industrial. Estas tendências ressaltam pesquisas em temas como microrredes, veículos elétricos, condicionamento de energia elétrica, entre outras. Em muitos destes temas, conversores bidirecionais são aplicados, por exemplo, conversores de interface em microrredes CC [1], interfaces V2G (*vehicle to grid*), sistemas com elementos armazenadores de energia, entre outras aplicações. Ainda mais, as estruturas integradas, as quais são capazes de conversão CC-CA simultânea com a adequação de tensão, podem oferecer melhor rendimento e maior densidade de potência em relação às estruturas com duplo estágio de conversão [2].

Tendo em vista as estruturas bidirecionais integradas e suas aplicações, este trabalho pretende propor uma adaptação bidirecional à topologia do inversor ĆUK integrado unidirecional (ICIU), a qual foi proposta em [2]. O ICIU consiste na integração do conversor CC-CC ĆUK ao inversor *full-bridge* VSI (*voltage source inverter*). Enquanto a adaptação realizada nesta estrutura é ilustrada na Figura 1 juntamente do diagrama de acionamentos dos interruptores nos modos inversor e retificador. A adaptação, denominada inversor ĆUK integrado bidirecional (ICIB), consiste na adição do interruptor S_{C2} , o que permite o conversor operar com a mesma dinâmica em ambos os sentidos do fluxo de potência. Esta característica possibilita utilizar o mesmo controlador para ambos os modos de operação. Além desta característica, o ICIB opera no modo de condução descontínua (MCD), possibilitando uma melhor dinâmica em relação ao modo de condução contínua devido ao ganho estático linear. Por sua vez, uma melhor dinâmica implica na possibilidade de empregar uma estratégia de controle simplificada, como uma única malha controle e um controlador proporcional-integral (PI).

A modelagem do ICIB foi realizada como proposto em [3]. Enquanto a validação da operação do ICIB foi realizada por meio de simulação computacional no *Matlab/Simulink*. Os elementos do ICIB foram projetados como visto em [1], onde considerou-se a frequência de chaveamento de 50 kHz, potência de saída de 450 W, tensão do barramento CC de 120 V e tensão do barramento CA de 127 V_{rms}. Os valores dos elementos passivos são: 57 μ H em L_1 e 1 mH em L_2 ; capacitores C e C_g possuem 1 μ F; capacitor C_{dc} com capacitância de 3 mF. Projetou-se o controlador de acordo com a metodologia proposta em [4]. Onde considerou-se os seguintes parâmetros: frequência de cruzamento de 1,6 kHz, margem de fase de 89° e K_{pwm} igual à $3,334 \times 10^{-4}$, resultando nos ganhos proporcional e integral de 61,698 e $1,539 \times 10^6$, respectivamente.

Os resultados de simulação são apresentados na Figura 2, onde apresenta-se as formas de onda da corrente e tensão da rede elétrica na transição entre os modos de operação do ICIB. Como observado, as correntes injetada e drenada da rede elétrica apresentaram baixo conteúdo harmônico, com 1,51% e 0,26% de distorção harmônica total (DHT), respectivamente. Os valores de DHT abaixo de 5% apresentam conformidade com as principais normas vigentes como a IEEE 1547 e a IEC 61727.

¹rafaeltakeshi@alunos.utfpr.edu.br²dionizio@alunos.utfpr.edu.br³sampaio@utfpr.edu.br⁴augus@utfpr.edu.br

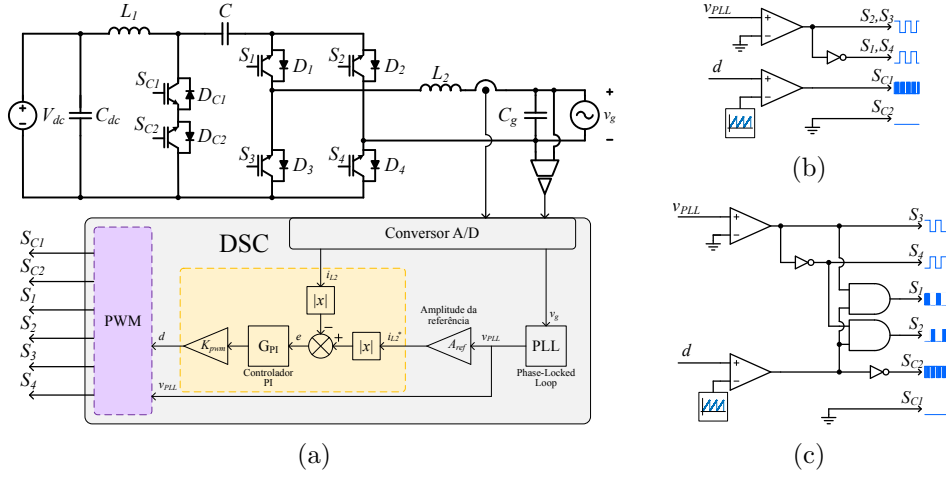


Figura 1: (a) Ilustração do ICIB e sua estratégia de controle. (b)-(c) diagrama de acionamento dos interruptores dos modos inversor e retificador, respectivamente.

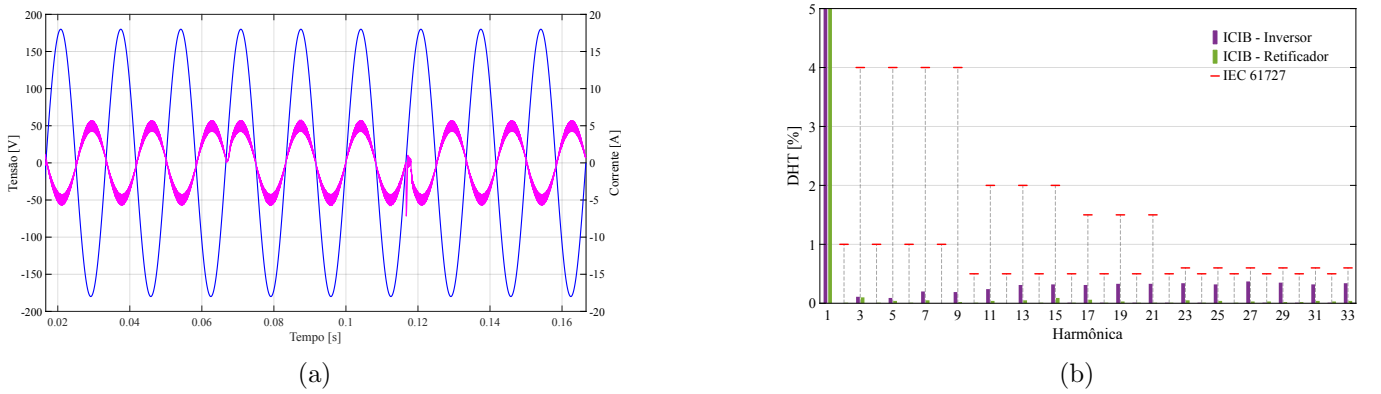


Figura 2: (a) Formas de onda de tensão e corrente da rede elétrica. (b) Espectro harmônico da corrente injetada e drenada da rede elétrica comparada à norma IEC 61727.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro recebido do CNPq (Processos 308620/2021-6 e 304707/2021-0) e o apoio da CAPES - Código de Financiamento 001.

Referências

- [1] R. T. Inoue, A. A. Dionizio, L. P. Sampaio, S. A. O. da Silva, M. A. G. de Brito, and G. M. Pelz, “Estudo do inversor Ćuk integrado monofásico em operação autônoma no modo de condução descontínua,” *Eletrônica de Potência*, vol. 29, p. e202418, Jul. 2024.
- [2] M. A. G. de Brito, L. P. Sampaio, J. C. U. Peña, and C. A. Canesin, “Família de inversores integrados monofásicos e trifásicos,” *Eletrônica de Potência*, vol. 19, p. 368–376, Nov. 2014.
- [3] A. A. Dionizio, L. P. Sampaio, and S. A. O. da Silva, “Generalized state-space averaging modeling to fourth-order power converters operating in dcm,” *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 53, no. 2, pp. 1031–1055, 2025.
- [4] B. A. Angélico, L. B. Campanhol, and S. A. Oliveira da Silva, “Proportional-integral/proportional-integral-derivative tuning procedure of a single-phase shunt active power filter using bode diagram,” *IET Power Electronics*, vol. 7, no. 10, pp. 2647–2659, 2014.

UM ESTUDO SOBRE CARGAS MECÂNICAS IMPOSTAS POR UM GERADOR CC A UM
MOTOR ELÉTRICO EM BANCADA DE ENSAIOSRaquelly Rodrigues¹, Alessandro Goedtel², Wesley Angelino de Souza³, Marcelo Favoretto Castoldi⁴^{1,2,3,4} Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

O consumo de energia elétrica por indústrias representa mais de 35% do consumo total brasileiro [1]. Neste contexto, os motores elétricos estão presentes em aproximadamente 80% dos processos realizados em ambiente industrial [2]. Em diversas aplicações, estas máquinas requerem controle de velocidade e torque para melhor desempenho e funcionamento, bem como aumento da eficiência de um processo. Com o avanço da tecnologia e o surgimento de chaves de potência e microprocessadores, esse cenário se alterou, tornando possível o controle de máquinas de corrente alternada [3].

Com a ampla utilização de máquinas elétricas, surge a necessidade de simular cargas mecânicas impostas a elas, com a finalidade de emular situações reais de operação para que seja possível a realização de análises a cerca do funcionamento do motor, em diferentes condições de carga. Na literatura, a realização de testes de bancada e práticas laboratoriais fiéis a real operação em ambientes industriais tem se mostrado como um grande desafio [4]. Mesmo com o grande avanço na emulações de cargas apresentado, ainda há a necessidade de desenvolvimento de soluções, utilizando máquinas encontradas em laboratórios educacionais e de pesquisas, visto que é considerada uma ferramenta valiosa para estudos e desenvolvimento de pesquisas, facilitando experiências práticas e possibilitando diferentes análises [5].

Este trabalho tem, como principal finalidade, aprimorar uma bancada de ensaios utilizada em pesquisas científicas, por meio da imposição de cargas mecânicas ao eixo de um Motor de Indução Trifásico (MIT), simulando situações reais de operação, utilizando uma máquina de corrente contínua, operando como geradora.

A bancada de ensaios consiste em um MIT, que possui seu eixo diretamente acoplado ao Gerador de Corrente Contínua (GCC) de excitação independente, um torquímetro girante e um tacômetro, responsáveis por mensurar o torque exigido no eixo e velocidade, respectivamente. Desse modo, para o adequado funcionamento do GCC, uma fonte de corrente contínua é utilizada para alimentação de seu enrolamento de campo e cargas resistivas de potência conectadas ao seu enrolamento de armadura, com o intuito de dissipar a potência gerada durante ensaios.

A metodologia propõe a alteração do torque aplicado ao eixo do MIT, por meio da comutação digital seletiva de cargas de potência conectadas ao enrolamento de armadura da máquina. Com a alteração da resistência de saída do gerador, por consequência, sua corrente no enrolamento será alterada, possibilitando assim, a variação do torque resistente aplicado ao eixo do MIT. O arranjo das cargas será definido com a utilização de um algoritmo de otimização, conforme a necessidade do ensaio. Além disso, a criação de uma plataforma que facilite e integre as comutações com grandezas monitoradas deste sistema, apresentando

¹raquellyrodrigues@alunos.utfpr.edu.br²agoedtel@utfpr.edu.br³wesleyangelino@utfpr.edu.br⁴marcastoldi@utfpr.edu.br

dados da situação atual do sistema e possíveis variações, implementada no microcontrolador STM32, bem como a realização de simulações para validação inicial.

Dessa maneira, as simulações produzidas abrangem as diferentes possibilidades de potência do MIT, para tal procedimento foram adotados os parâmetros de ambas máquinas, MIT e GCC, fornecidos pelo fabricante e por meio de ensaios, respectivamente. A Figura 1 apresenta o esquema idealizado, utilizando como ferramentas Matlab/Simulink.

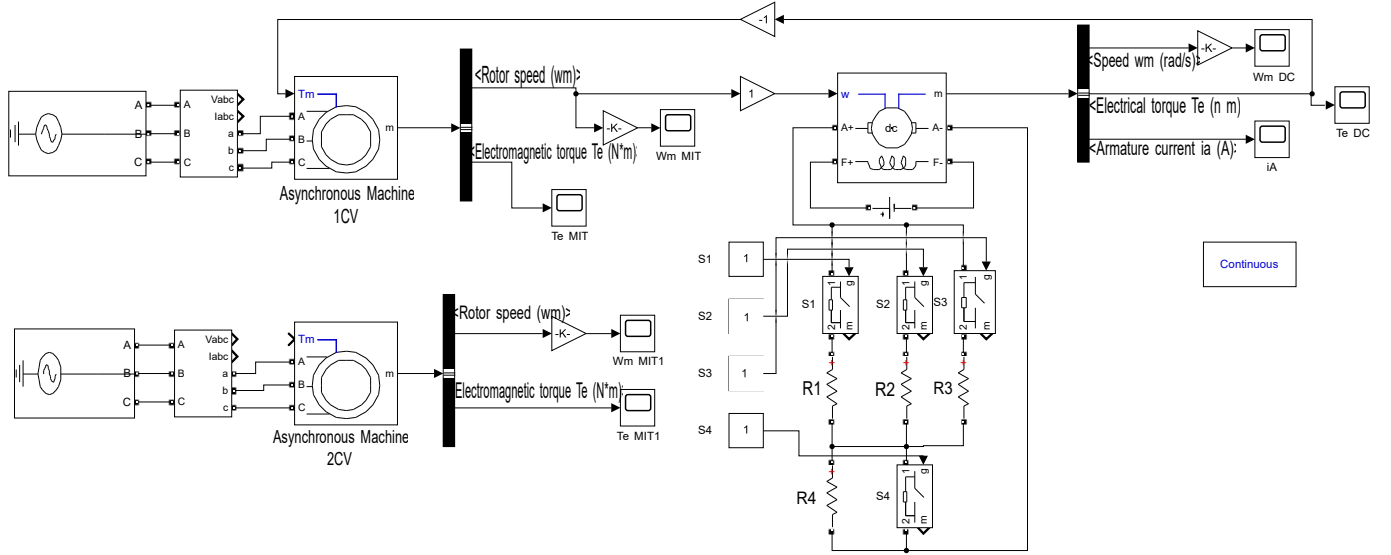


Figura 1: Esquema de simulação do sistema.

Dentre as máquinas que possuem os requisitos para imposição de cargas mecânicas à motores, o GCC foi escolhido por sua simplicidade construtiva e facilidade apresentada para controle de velocidade e conjugado, alterando a corrente em seu enrolamento de armadura.

Referências

- [1] E. de Pesquisa Energética, “Anuário estatístico de energia elétrica 2024,” 2024.
- [2] M. U. Sardar, T. Vaimann, L. Kütt, A. Kallaste, B. Asad, S. Akbar, and K. Kudelina, “Inverter-Fed Motor Drive System: A Systematic Analysis of Condition Monitoring and Practical Diagnostic Techniques,” *Energies*, July 2023.
- [3] S. D. Umans, “Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley,” vol. 7^o Edição, p. 569, 2014.
- [4] G. M. Hernández and R. G. Jiménez, “Relevance Of Laboratories In The Education Of Engineers,” *EDULEARN14 Proceedings*, 2014.
- [5] M. Caruso, B. W. França, V. S. Monteiro, and G. G. Sotelo, “Proposal of a low-cost didactic dynamic mechanical load emulator for electric machines lab’s course,” in *2023 IEEE 8th Southern Power Electronics Conference and 17th Brazilian Power Electronics Conference (SPEC/COBEP)*, pp. 1–6, 2023.

BALANCEADOR DE TENSÃO BUCK BIDIRECIONAL PARA APLICAÇÃO EM MICRORREDES CC

Renata Esperini Pascui¹, Anderson A. Dionizio², Leonardo P. Sampaio³

^{1,2,3} Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

Recentemente, pesquisas e demandas por microrredes CC têm aumentado. Uma microrrede é uma rede local de distribuição e consumo de energia elétrica que pode operar de forma autônoma ou conectada à rede. Ao interagir com diversas fontes de energia distribuídas (DES) e unidades de armazenamento, as microrredes aumentam a confiabilidade da rede de pequena escala, fortalecem a resiliência e mitigam perturbações ao operar conectadas à rede pública.

As principais vantagens da microrrede bipolar em relação à configuração unipolar são: (1) dois níveis de tensão facilitam a conexão com cargas CC e DESs; (2) maior confiabilidade, pois, em caso de falha operacional em um polo, o outro se mantém em funcionamento. Nas microrredes CC bipolares, devido a possíveis desbalanços de cargas, tem-se empregado amplamente o balanceador de tensão para equilibrar a tensão nos polos. A Figura 1a) apresenta um diagrama simplificado dessa configuração.

Para formar uma rede de distribuição CC bipolar, optou-se pelo balanceador de tensão devido à sua estrutura simples e maior eficiência. Portanto, este artigo apresenta a análise de um balanceador do tipo Buck aplicado a barramento CC da microrrede bipolar, conforme apresentado na Figura 1b).

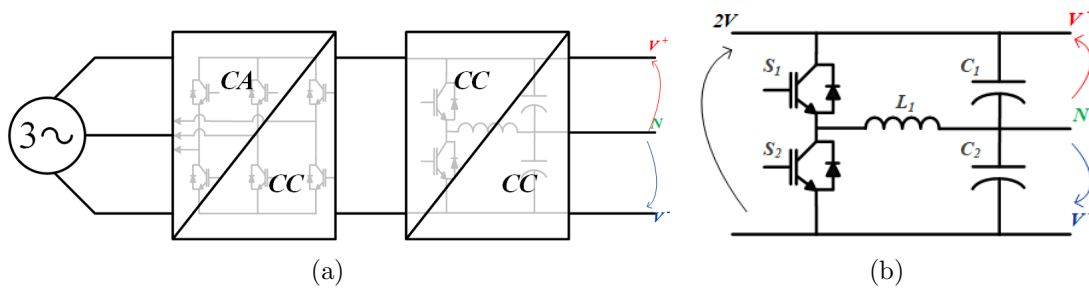


Figura 1: a) Conversor de interface CA/CC para aplicações em microrredes CC bipolares; b) Balanceador de tensão Buck

Para o projeto do balanceador, é necessário definir alguns parâmetros por meio da análise do circuito. Desta forma, por meio dos parâmetros de projetos especificados na Tabela 1 e das equações (1) e (2) determinou-se os valores dos elementos passivos do balanceador de tensão, conforme apresentado na Tabela 2.

(a) S1 em condução:

$$V_L = L \frac{di_1}{dt} = V_{in} - V_{o2} = V_{o1}; \quad i_L = \left(\frac{V_{o2}}{R_2} + C_2 \frac{dV_{o2}}{dt} \right) - \left(\frac{V_{o1}}{R_1} + C_1 \frac{dV_{o1}}{dt} \right) \quad (1)$$

¹renataesperini@alunos.utfpr.edu.br

²dionizio@alunos.utfpr.edu.br

³sampaio@utfpr.edu.br

(b) S2 em condução:

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = -V_{in} + V_{o1} = -V_{o2}; \quad i_L = \left(\frac{V_{o1}}{R1} + C1 \frac{dV_{o1}}{dt} \right) - \left(\frac{V_{o2}}{R2} + C2 \frac{dV_{o2}}{dt} \right) \quad (2)$$

Tabela 1: Parâmetros definidos.

Parâmetros	Valores
Tensão de entrada	96 V
Potência de entrada	1000 W
Frequência	20 KHz
Duty-Cycle	0,5
Ripple de corrente	20%

Tabela 2: Parâmetros calculados

Parâmetros	Valores
Capacitor 1	16,67 mF
Capacitor 2	16,67 mF
Indutor	480 uH
Corrente média no indutor	12,50 A

Os resultados em malha aberta do balanceador de tensão Buck estão apresentados na Figura 2. As próximas etapas englobam a modelagem de pequenos sinais para estratégia de controle nos polos, em seguida, o projeto do controlador proporcional e integral.

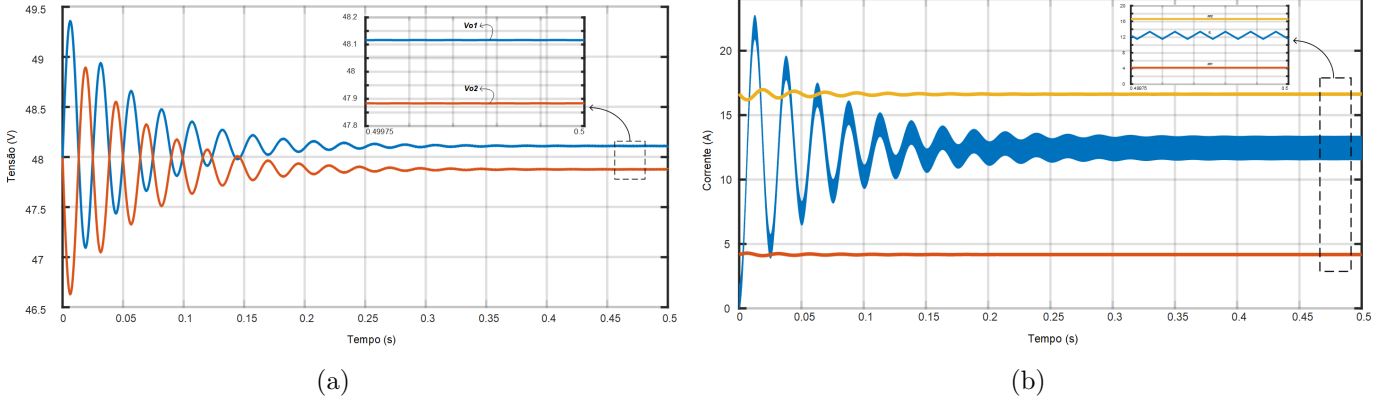


Figura 2: Resposta em malha aberta a) Tensão de saída nos polos; b) Correntes nas cargas e no indutor

Referências

- [1] F. Wang, Z. Lei, X. Xu, and X. Shu, “Topology deduction and analysis of voltage balancers for dc microgrid,” *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, no. 2, pp. 672–680, 2017.
- [2] C. Zhang, D. Jiang, H. Zheng, and L. Ye, “A bi-directional buck/boost voltage balancer for dc distribution system,” in *2013 Fourth International Conference on Digital Manufacturing Automation*, pp. 9–13, 2013.
- [3] V. F. Pires, A. Cordeiro, C. Roncero-Clemente, S. Rivera, and T. Dragičević, “Dc–dc converters for bipolar microgrid voltage balancing: A comprehensive review of architectures and topologies,” *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 11, no. 1, pp. 981–998, 2023.

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE APRENDIZAGEM DE MÁQUINA PARA DETECÇÃO DE
PATOLOGIA VOCALRogerio Pignelli¹, Paulo Rogério Scalassara², María Eugenia Dajer³, Danilo Hernane Spatti⁴^{1,2,3} Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil⁴ Departamento de Sistemas da Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brasil

Resumo

A voz é essencial para a comunicação, principalmente para profissionais que dependem intensamente desse recurso, como professores e cantores. Contudo, o uso inadequado pode ocasionar distúrbios vocais, os quais afetam mais de 16% da população adulta, com o edema de Reinke se destacando, especialmente entre mulheres, fumantes e profissionais vocais [1]. Tradicionalmente, o diagnóstico desses distúrbios utiliza métodos invasivos, como a laringoscopia, que são onerosos e desconfortáveis [2]. Em resposta, ferramentas de pré-diagnóstico não invasivas têm sido desenvolvidas, empregando técnicas de aprendizado de máquina com atributos extraídos dos domínios temporal, espectral e tempo-frequência [3]. A decomposição wavelet-packet (WPD) tem se mostrado eficaz para extrair atributos estatísticos relevantes, sendo aplicada em classificadores como MLP e SVM [4]. Entretanto, a análise detalhada desses atributos e comparação de modelos ainda são pouco investigados. Assim, este trabalho se propõe a explorar quais faixas de frequência são mais determinantes na identificação do edema de Reinke e determinar o modelo de classificação mais adequado para o desenvolvimento de um sistema automático de pré-diagnóstico. Nesse estudo, foram utilizados 36 áudios do fonema /a/ sustentado (20 de indivíduos saudáveis e 16 com edema de Reinke), fornecidos pelo Grupo de Engenharia Médica do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (GPME/CNPq), e gravados no Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo (HC-FMUSP), com taxas de 22.050 e 44.100 Hz, sendo todos reamostrados para 22.050 Hz. Após a remoção de silêncios e artefatos (como aspiração de ar), os sinais foram segmentados em janelas não sobrepostas de 4.096 pontos, resultando em 813 janelas completas. Em seguida, aplicou-se a decomposição wavelet-packet (WPD) até o sétimo nível, utilizando as famílias Haar e Daubechies (db2 e db5, com comprimento de filtro de 4 e 10, respectivamente). Foi calculado o desvio-padrão das folhas da decomposição, gerando 128 atributos por janela, os quais passaram por um filtro de correlação para redução da dimensionalidade. Quando dois atributos apresentaram correlação superior a 0,85, manteve-se apenas aquele com maior correlação com a classe. Apesar dos sinais de voz terem energia concentrada em frequências abaixo de 1000 Hz, dentre os atributos selecionados, os provenientes das folhas finais, correspondentes às faixas de maior frequência, se mostraram presentes em todas as famílias. Dos atributos filtrados, os 16 com maior correlação com a classe foram utilizados como entrada nos classificadores. Para a classificação, compararam-se SVM e MLP, ambos avaliados via validação cruzada de 5 dobras (70% dos dados para treinamento e 30% para teste). A seleção dos hiperparâmetros (função de ativação, número máximo de iterações e taxa de aprendizado para MLP; kernel, C e γ para SVM) foi realizada por busca em grade [5]. A arquitetura do MLP seguiu a estrutura

¹ rpignelli@alunos.utfpr.edu.br ² prscalassara@utfpr.edu.br ³ medajer@utfpr.edu.br ⁴ spatti@icmc.usp.br

definida em trabalhos anteriores, com 16, 28 e 1 neurônios nas três camadas ocultas, respectivamente [6]. Essa arquitetura foi definida por meio de uma busca metaheurística de hiperparâmetros.

Pela Tabela 1, observou-se que, no conjunto Haar, o SVM ($C=100$, $\gamma = 1$, kernel rbf) obteve 99,59% de acurácia com tempo de treinamento de 0,0040 s, enquanto o MLP (tanh, lr=0,001, maxIt=1000) atingiu 97,95% de acurácia, mas com um tempo de treinamento de 1,9930 s. No conjunto db2, ambos os modelos apresentaram desempenhos robustos, com acurácias de 99,59% para o SVM (tempo de 0,0050 s) e 99,18% para o MLP (tempo de 2,2254 s). Já no conjunto db5, o SVM alcançou 100% de acurácia (tempo de 0,0050 s), em contraste com 99,18% obtidos pelo MLP (tempo de 0,5049s). Em síntese, embora ambos os classificadores

Tabela 1: Resumo dos Resultados de SVM e MLP nos conjuntos Haar, db2 e db5

Dataset	Classificador	Acurácia	Tempo de Treinamento (s)
Haar	SVM ($C=100$, $\gamma = 1$, rbf)	99,59%	0,0040
	MLP (tanh, lr=0,001, maxIt=1000)	97,95%	1,9930
db2	SVM ($C=100$, $\gamma = 1$, rbf)	99,59%	0,0050
	MLP (tanh, lr=0,001, maxIt=1000)	99,18%	2,2254
db5	SVM ($C=10$, $\gamma = 1$, rbf)	100,00%	0,0050
	MLP (tanh, lr=0,01, maxIt=200)	99,18%	0,5049

se mostrem eficazes na identificação do edema de Reinke, o SVM destaca-se por sua elevada acurácia aliada a um tempo de treinamento significativamente menor, sugerindo uma melhor relação entre desempenho e custo computacional. Além disso, pela análise dos atributos selecionados pelo método de filtro com correlação, presume-se que informações da voz em faixas de frequência mais altas podem ser relevantes na identificação do edema de Reinke. Esses resultados evidenciam a viabilidade de reduzir a dimensionalidade dos atributos sem prejuízo do desempenho classificatório e fundamentam a continuidade dos estudos com a seleção de atributos e a avaliação com outros distúrbios vocais para aprimorar ainda mais o pré-diagnóstico automatizado.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Referências

- [1] V. Lyberg-Åhlander, R. Rydell, P. Fredlund, C. Magnusson, and S. Wilén, “Prevalence of voice disorders in the general population, based on the stockholm public health cohort,” *Journal of Voice*, vol. 33, no. 6, pp. 900–905, 2019.
- [2] R. H. Colton, J. K. Casper, and R. Leonard, *Understanding voice problem: A physiological perspective for diagnosis and treatment*. USA: Lippincott Williams & Wilkins, fourth ed., 2011.
- [3] A. Sankaran and L. S. Kumar, “Advances in automated voice pathology detection: A comprehensive review of speech signal analysis techniques,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 181127–181148, 2024.
- [4] A. H. Barizão, M. A. Fermino, M. E. Dajer, L. H. Liboni, and D. H. Spatti, “Voice disorder classification using {MLP and wavelet packet transform,” in *2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, (Rio de Janeiro, Brazil), pp. 1–8, IEEE, 2018.
- [5] R. Pignelli, P. R. Scalassara, M. E. Dajer, and D. H. Spatti, “Feature selection and comparison of classifiers for reinke’s edema identification,” in *2024 IEEE 22nd Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, (Porto, Portugal), pp. 317–322, IEEE, 2024.
- [6] R. Pignelli, M. F. Castoldi, M. E. Dajer, D. H. Spatti, and P. R. Scalassara, “Algoritmos de otimização binários aplicados à seleção de hiperparâmetros do perceptron multicamadas para identificação de edema de reinke,” *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica*, 2024.

BALANCEADOR DE TENSÃO DUAL BUCK HALF-BRIDGE PARA MICRORREDES CC BIPOLARES

Samuel Ambrósio Marco¹, Anderson A. Dionizio², Leonardo P. Sampaio³

^{1,2,3} Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

Na última década, com a disseminação de fontes de energias renováveis como energia solar e eólica - que geram energia em CC e CA, respectivamente - bem como a proliferação dos sistemas de armazenamento de energia e a modernização de cargas eletrônicas tem contribuído para estudos sobre geração e distribuição de energia elétrica CC. De tal forma que se torne possível migrar o sistema de microrredes CA para microrredes CC conectadas ou isoladas da rede CA. As microrredes CC apresentam como vantagens maior simplicidade de controle, uma vez que não há controle de frequência e defasagem, outra vantagem é a fácil inserção de fontes de energia renováveis.

Dentro de uma microrrede CC é possível utilizar um conversor de interface com a rede elétrica do tipo full-bridge em cascata com o conversor CC/CC Dual Buck como balanceador de tensão, que torna possível converter barramento CC a dois fios em barramento CC a três fios, podendo alimentar cargas com diferentes níveis de tensão, permitindo maior flexibilidade.

Os principais problemas enfrentados nas microrredes CC bipolares é o desbalanço de tensão entre as cargas consumidoras e os geradores de energia, sendo assim, os balanceadores de tensão são responsáveis por equilibrar a diferença de tensão entre os polos, mantendo a tensão em cada polo em $V_{cc}/2$.

A seguir a Figura 1a) representa a microrrede CC bipolar conectada à rede CA e a Figura 1b) representa o diagrama esquemático do circuito balanceador de tensão:

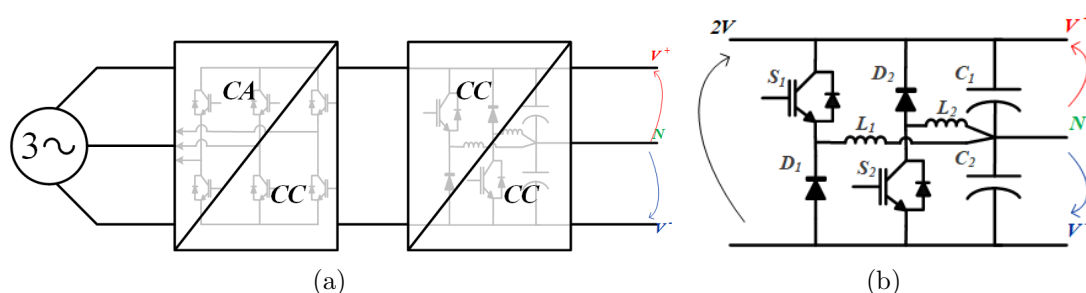


Figura 1: a) Microrrede CC bipolar com conversor de interface; b) Balanceador de tensão Dual Buck

A respeito do balanceador de tensão Dual Buck half-bridge, as seguintes considerações podem ser feitas: (1) não há problema de *shoot-through* por não existir chaves conectadas em série; (2) usar chaves em série com diodos permite uma frequência de comutação mais alta para reduzir peso e volume; (3) não requer período de *dead-time* entre os sinais PWM das duas chaves.

Da Figura 1b), a partir da modelagem de pequenos sinais obtêm-se as seguintes equações quando o braço esquerdo da meia ponte está no modo de condução contínua (MCC):

¹ samuelmarco.2020@alunos.utfpr.edu.br

² dionizio@alunos.utfpr.edu.br

³ sampaio@utfpr.edu.br

(a) S1 em condução;

$$L1 \frac{di1}{dt} = V_{in} - V_{o2} = V_{o1}; \quad i1 = \left(\frac{V_{o2}}{R2} + C2 \frac{dV_{o2}}{dt} \right) - \left(\frac{V_{o1}}{R1} + C1 \frac{dV_{o1}}{dt} \right) \quad (1)$$

(b) S1 em bloqueio;

$$L1 \frac{di1}{dt} = -V_{o2} = V_{o1} - V_{in}; \quad C2 \frac{dV_{o2}}{dt} = i1 + \left(\frac{V_{o1}}{R1} - \frac{V_{o2}}{R2} \right) + C1 \frac{dV_{o1}}{dt} \quad (2)$$

Aplicando a linearização do valor médio de tensão no indutor e do valor médio de corrente no capacitor e a transformada de Laplace, determina-se a função de transferência $G_{V_{od}}(s)$ no barramento V_{o2} para estratégia de controle:

$$G_{V_{od}}(s) = \frac{\hat{V}_o(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{V_{in}}{2LCs^2 + Ls \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} \right) + 1} \quad (3)$$

Projetando o circuito da Figura 1b) para um desbalanço de potência de quatro vezes, os seguintes resultados foram obtidos para malha aberta e malha fechada com controlador PI conforme a Figura 2:

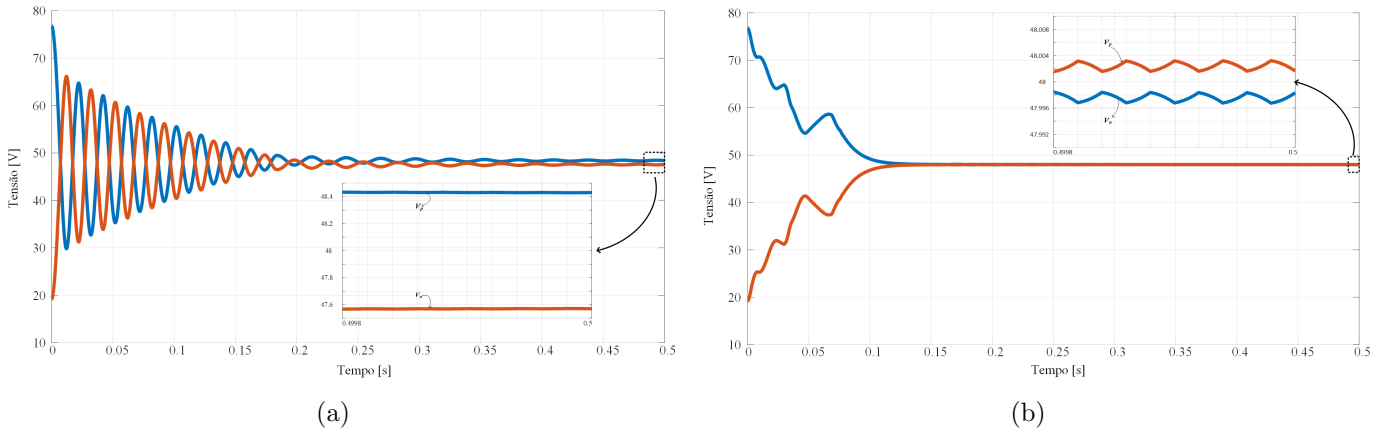


Figura 2: Tensão nos barramentos CC do balanceador de tensão a) em Malha Aberta; b) em Malha Fechada

Referências

- [1] X. Zhang and C. Gong, “Dual-buck half-bridge voltage balancer,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 8, pp. 3157–3164, 2013.
- [2] S. Rivera, R. Lizana F., S. Kouro, T. Dragičević, and B. Wu, “Bipolar dc power conversion: State-of-the-art and emerging technologies,” *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, no. 2, pp. 1192–1204, 2021.
- [3] V. F. Pires, A. Cordeiro, C. Roncero-Clemente, S. Rivera, and T. Dragičević, “Dc–dc converters for bipolar microgrid voltage balancing: A comprehensive review of architectures and topologies,” *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 11, no. 1, pp. 981–998, 2023.

TEORIA DE POTÊNCIA CONSERVATIVA APLICADA À IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS POR CURTO-CIRCUITO EM ESTATOR DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Victor Emanuel Correia De La Rosa¹, Marcelo Favoretto Castoldi², Alessandro Goedtel³, Wesley Angelino de Souza⁴

^{1,2,3,4} Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

Embora os motores de indução sejam conhecidos por sua robustez, as condições adversas a que são submetidos podem expô-los a esforços indesejáveis, como estresses térmicos, elétricos e mecânicos, além de variações nas cargas, resultando em desgaste e ocasionando falhas [1].

De acordo com estudos, entre 28% e 36% das falhas em motores de indução trifásicos (MIT) ocorrem no estator, sendo essa a segunda maior causa de problemas nesses motores [2]. Essas falhas, geralmente resultantes de problemas relacionados ao isolamento, podem se manifestar como falhas fase-terra ou fase-fase, evoluindo de defeitos menores para falhas mais graves e podendo alcançar níveis de danos irreversíveis [3]. Nesse contexto, há uma grande necessidade de sistemas capazes de detectar falhas rapidamente, a fim de garantir a continuidade da operação e reduzir os custos associados à manutenção e substituição dos componentes danificados.

O monitoramento e a detecção de falhas em máquinas elétricas evoluíram de métodos tradicionais para técnicas baseadas em inteligência artificial. Dentre essas técnicas, destacam-se os sistemas inteligentes. Uma das principais vantagens desses sistemas é sua baixa complexidade computacional, o que possibilita a identificação do tipo de falha em um MIT sem a necessidade de modelos matemáticos complexos relacionados à máquina.

Sinais elétricos do MIT, como tensão e corrente, aliados a técnicas de inteligência artificial, podem ser utilizados para a identificação de falhas em motores. Características extraídas desses sinais, quando aplicadas a *machine learning*, têm mostrado resultados promissores na literatura.

Este estudo aplica a Teoria de Potência Conservativa (CPT, do inglês *Conservative Power Theory*) à análise de sinais de tensão e corrente obtidos do MIT, visando a extração de características. Essas características são posteriormente empregadas em algoritmos de *machine learning* para a detecção de falhas de curto-circuito no estator da máquina.

Inicialmente proposta por [4] reformulada em [5], a CPT propõe uma decomposição da corrente que permite representar o comportamento de elementos lineares e não lineares. Em circuitos trifásicos, as componentes da corrente são decompostas em cinco parcelas: (i_a^b), ativas desbalanceadas (i_a^u), reativas balanceadas (i_r^b), reativas desbalanceadas (i_r^u) e residuais (i_v). A corrente total por fase é definida em (1).

$$i = i_a^b + i_r^b + i_a^u + i_r^u + i_v. \quad (1)$$

¹ victoremanuel@alunos.utfpr.edu.br

² marcastoldi@utfpr.edu.br

³ agoedtel@utfpr.edu.br

⁴ wesleyangelino@utfpr.edu.br

Cada componente da corrente decomposta está associada a uma fração específica da potência total, contribuindo de maneira distinta para a potência aparente. A definição da potência aparente é apresentada em (2).

$$A = \sqrt{P^2 + Q^2 + U_a^2 + U_r^2 + D^2}, \quad (2)$$

sendo P a potência ativa [W], Q a potência reativa [VAr], U_a potência ativa de desbalanço [W], U_r potência reativa de desbalanço [VAr] e D a potência residual [VA].

A abordagem adotada neste estudo considera diversos cenários operacionais, incluindo variação de carga, diferentes níveis de severidade das falhas e distintos graus de desequilíbrio de tensão. As características extraídas das potências resultantes da CPT são utilizadas como atributos de entrada em uma rede neural artificial *perceptron* de múltiplas camadas (PMC). Além disso, técnicas de busca de hiperparâmetros e seleção de atributos são aplicadas para otimizar os parâmetros da rede e identificar as características mais relevantes para o diagnóstico de falhas. A avaliação dos resultados é realizada por meio de métricas de desempenho, como acurácia, precisão, revocação e *F1-score*, conforme apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados

Classificador	Acurácia (%)	Precisão (%)	Revocação (%)	F1-score (%)
PMC	93,94	94,08	93,94	93,88

Portanto, essa abordagem demonstrou o potencial da aplicação da CPT aliada a técnicas de *machine learning* na identificação de falhas de curto-circuito no estator do MIT. A integração entre a CPT e os métodos empregados apresentou bons resultados na separabilidade das classes, alcançando uma acurácia de 93,94%, além de elevados índices de precisão, revocação e *F1-score*.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro fornecido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através dos Processos 311634/2022-2 e 302521/2023-2, e pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Referências

- [1] M.E.E.D. Atta, D.K. Ibrahim, and M.I. Gilany, "Broken bar fault detection and diagnosis techniques for induction motors and drives: State of the art." IEEE Access, vol. 10, pp. 88504–88526, 2022
- [2] P. Gangsar, and R. Tiwari, "Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art." Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 144, 2020.
- [3] B. H. Bahgat, E. A. Elhay and M. M. Elkholy, "Advanced fault detection technique of three phase induction motor: comprehensive review." Discover Electronics, vol. 1, 2024.
- [4] P. Tenti, P. Mattavelli, "A Time-Domain Approach to Power Term Definitions under Non- Sinusoidal Conditions." L'Energia Elettrica, vol. 81, pp. 75-84, 2003
- [5] H. K. M. Paredes, "Teoria de potência conservativa: uma nova abordagem para o controle cooperativo de condicionadores de energia e considerações sobre atribuição de responsabilidades." Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

UTILIZAÇÃO DO OTIMIZADOR LOBO CINZENTO NA ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS
DE FILTROS PASSIVOS PARALELOS PARA REDUÇÃO DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Vitor Correia Montagnini Santos¹, Gabriel Lourenço², Marcelo Favoretto Castoldi³, Alessandro Goedtel⁴,
Wesley Angelino de Souza⁵

^{1,2,3,4,5} Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

O aumento da presença de cargas não lineares em sistemas de potência, especialmente aquelas baseadas em eletrônica de potência, tem intensificado a presença de distorções harmônicas na rede elétrica, afetando diretamente os indicadores de qualidade da energia fornecida [1]. Dispositivos como retificadores, inversores e conversores estáticos, embora fundamentais para o controle e a eficiência dos processos, introduzem correntes com elevado conteúdo harmônico. Esse fenômeno pode resultar em diversos problemas indesejáveis, tais como sobrecarga em transformadores, aumento das perdas por efeito Joule, ocorrência de ressonâncias, falhas no funcionamento de dispositivos de proteção e deterioração do fator de potência [2].

Os Filtros Passivos Paralelos (FPPs) são uma alternativa econômica e robusta para mitigar a presença de harmônicas e são amplamente empregados em sistemas de distribuição, especialmente em ambientes industriais [3]. Compostos por combinações de capacitores, indutores e resistores, esses filtros possuem uma construção simplificada e atuam como um caminho de baixa impedância para correntes harmônicas, impedindo sua propagação na rede elétrica [4]. Os FPPs podem ser classificados em sintonizados, projetados para reduzir harmônicas específicas por meio do ajuste da frequência de ressonância, ou amortecidos, que desempenham a função de filtros passa-alta em uma determinada faixa de frequências [5].

O desempenho efetivo dos FPPs pode ser influenciado por diversos fatores, como a variação nos parâmetros dos componentes, alterações na impedância da rede e mudanças no perfil de carga. Os métodos tradicionais de dimensionamento, que geralmente se baseiam em modelos determinísticos e aproximações lineares, nem sempre garantem soluções ideais para as condições reais de operação [4]. A ausência de critérios de projeto mais robustos pode comprometer a eficácia do filtro, tanto na redução da Distorção Harmônica Total (DHT) quanto na preservação de níveis adequados do Fator de Potência (FP).

Nesse contexto, técnicas de otimização meta-heurística têm se destacado como alternativas promissoras para aprimorar o dimensionamento de FPPs. Esses métodos são capazes de explorar de forma eficiente espaços de busca complexos e multimodais, demonstrando boa capacidade de convergência mesmo em problemas com restrições não lineares e múltiplos objetivos. Entre os algoritmos bioinspirados recentemente desenvolvidos, ressalta-se o *Grey Wolf Optimizer* (GWO), cuja estratégia de exploração e exploração baseia-se no comportamento de caça cooperativa dos lobos cinzentos [6].

Este estudo propõe a aplicação do GWO para a otimização dos parâmetros de um FPP conectado a um sistema de distribuição, modelado com base no *benchmark* apresentado por [7]. Esse modelo considera três consumidores industriais conectados a diferentes PACs, cada um com perfis distintos de carga e distorção harmônica. O principal objetivo é determinar o conjunto ótimo de parâmetros dos filtros, de modo a minimizar a DHT e maximizar o FP em cada PAC, respeitando as condições operacionais definidas.

Com o objetivo de determinar o conjunto ótimo dos componentes passivos nos compensadores do sistema *benchmark*, realizaram-se simulações computacionais na plataforma MATLAB/Simulink. Para viabilizar uma comparação

¹vitorsantos.2019@alunos.utfpr.edu.br

²lourencog@alunos.utfpr.edu.br

³marcastoldi@utfpr.edu.br

⁴agoedtel@utfpr.edu.br

⁵wesleyangelino@utfpr.edu.br

direta com os resultados de [7], foram definidas sete variáveis de decisão a serem otimizadas: as energias reativas dos capacitores Q_1 , Q_2 e Q_3 , as resistências R_1 , R_2 e R_3 , e a indutância l_2 . Os índices 1, 2 e 3 referem-se, respectivamente, aos consumidores conectados nos PACs 1, 2 e 3. Os limites de busca foram definidos conforme segue: $R_i \in [1 \mu\Omega, 1 \Omega]$, $Q_i \in [50 \text{ kVAr}, 500 \text{ kVAr}]$, e $l_2 \in [1 \mu\text{H}, 1 \text{ H}]$.

A formulação da função objetivo (FO) foi desenvolvida considerando duas métricas essenciais para avaliar o desempenho dos FPPs: a DHT da corrente e o FP. A Equação (1) define a função a ser minimizada, atribuindo pesos a cada métrica para equilibrar sua influência na obtenção da solução ótima. Além disso, foi imposta a restrição expressa na Equação (2), garantindo que o FP de cada PAC permaneça acima do limite mínimo de 0,93.

$$\text{FO} = \min \sum_{i=1}^3 \left(0,2 \cdot \text{DHT}_i + 0,133 \cdot \left(\frac{1}{\text{FP}_i} \right) \right) \quad (1)$$

$$\text{FP}_i \geq 0,93 \quad \text{com } i = 1, 2, 3. \quad (2)$$

Os resultados demonstraram que o GWO foi capaz de reduzir significativamente as DHT nos três PACs, alcançando quedas de 16,420% para 3,256%, 7,981% para 2,531% e 2,992% para 0,772% nas fases A dos PACs 1, 2 e 3, respectivamente. Além disso, o FP foi elevado de 0,9868, 0,9866 e 0,9182 para 0,9995, 0,9955 e 0,9996, evidenciando a eficiência do método na melhoria da qualidade da energia elétrica. Esses resultados superam os limites mínimos estabelecidos por normas técnicas, como a IEEE 519 [8] e a IEC 61000-3-2 [9], que normalmente exigem fatores de potência superiores a 0,92 ou 0,95 em ambientes industriais.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho por meio de uma bolsa de estudos de Demanda Social (CAPES-DS), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão de recursos via projetos de pesquisa, processos 311634/2022-2 e 302521/2023-2 e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pela estrutura disponibilizada.

Referências

- [1] L. Michalec, M. Jasiński, T. Sikorski, Z. Leonowicz, L. Jasiński, and V. Suresh, “Impact of harmonic currents of nonlinear loads on power quality of a low voltage network—review and case study,” *Energies*, vol. 14, no. 12, p. 3665, 2021.
- [2] A. S. Abbas, R. A. El-Sehiemy, A. Abou El-Ela, E. S. Ali, K. Mahmoud, M. Lehtonen, and M. M. Darwish, “Optimal harmonic mitigation in distribution systems with inverter based distributed generation,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 2, p. 774, 2021.
- [3] K. Daniel, L. Kütt, M. N. Iqbal, N. Shabbir, H. A. Raja, and M. U. Sardar, “A review of harmonic detection, suppression, aggregation, and estimation techniques,” *Applied Sciences*, vol. 14, no. 23, p. 10966, 2024.
- [4] K.-Y. Lai and N.-C. Yang, “Compatible parameter-based method for multi-type passive filter design in distribution networks with harmonic distortions,” *Electric Power Systems Research*, vol. 236, p. 110929, 2024.
- [5] G. Schäffer, F. Moura, and M. Mendonça, “Conservative power theory (cpt): A new approach to the tuned passive filter design,” in *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (IREPQ'19)*, 2019.
- [6] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, “Grey Wolf Optimizer,” *Advances in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46–61, Mar. 2014.
- [7] I. Papič, D. Matvoz, A. Špelko, W. Xu, Y. Wang, D. Mueller, C. Miller, P. F. Ribeiro, R. Langella, and A. Testa, “A benchmark test system to evaluate methods of harmonic contribution determination,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 1, pp. 23–31, 2018.
- [8] IEEE, “IEEE standard for harmonic control in electric power systems,” *IEEE Std 519-2022 (Revision of IEEE Std 519-2014)*, pp. 1–31, 2022.
- [9] C. Adragna, A. Bianco, G. Gritti, and M. Sucameli, “State-of-the-art power factor correction: An industry perspective,” *Encyclopedia*, vol. 4, no. 3, pp. 1324–1354, 2024.

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SUSPENSÃO SEMIATIVA UTILIZANDO AS ABORDAGENS DE NORMA H2 E REPRESENTAÇÃO POLITÓPICA

Vitor Siqueira Proença dos Santos¹, Cristiano Marcos Agulhari²

^{1,2} Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

Há uma busca por melhorar o conforto e a capacidade de controle de automóveis. Algumas indústrias automotivas utilizam suspensões ativas, mas também existem sistemas passivos, semiativos ou totalmente ativos [1]. O controle de suspensões tem dois objetivos principais: proporcionar conforto ao condutor, relacionado diretamente à aceleração do chassi do veículo, e otimizar a carga sobre o pneu, o que influencia na aderência à estrada [2]. A vibração é considerada um problema, pois está associada a movimentos indesejados, ruídos e tensões que podem causar falhas ou fadiga em máquinas e estruturas. Além disso, gera perdas de energia, reduz a confiabilidade e compromete o desempenho esperado [3].

A suspensão ativa apresenta maior complexidade e custo operacional em comparação à semiativa [4]. Devido ao baixo consumo de energia necessário para controlar a suspensão semiativa, ela pode ser considerada uma suspensão passiva em determinadas condições [3]. Essa característica também aumenta a segurança, pois, em casos de falha no fornecimento de energia, a suspensão semiativa continua operando, diferentemente da suspensão ativa, que perde sua capacidade de controle nessa situação [5]. A suspensão atua como um filtro mecânico passa-baixo, atenuando os efeitos de perturbações, como irregularidades no perfil da estrada, sobre uma variável de saída [5].

Um dos problemas no projeto de uma suspensão é determinar a melhor rigidez e taxa de amortecimento que atendam aos requisitos de controle do veículo, conforto dos passageiros e segurança [5]. Portanto, não é uma tarefa trivial escolher o coeficiente de amortecimento adequado. Além disso, desenvolver um algoritmo capaz de fornecer um controle satisfatório também é um desafio [5].

Neste trabalho, são exploradas duas metodologias: a representação politópica e a norma H_2 . A representação politópica é utilizada para tratar as não linearidades do problema, enquanto a norma H_2 é aplicada para otimizar o desempenho do sistema. Para isso, empregam-se LMIs na determinação dos melhores ganhos K_s , possibilitando a realização de um controle com resultados satisfatórios. Além disso, destaca-se que o uso de redes neurais no controle de suspensões tem demonstrado grande potencial [6].

A análise do modelo completo de uma suspensão pode ser complexa, razão pela qual ele é simplificado em modelos menores para viabilizar os estudos [7]. Neste trabalho, adotou-se o modelo de 1/4 da suspensão para as análises de controle [3]. A representação por variáveis de estado proporciona uma visão mais detalhada da dinâmica interna do sistema, permitindo avaliar propriedades como a controlabilidade [8].

A modelagem foi realizada utilizando uma representação por equações de estados, conforme ilustrado na Figura 1. Os parâmetros do sistema analisado são: k_s (rigidez da mola), b_s (coeficiente de amortecimento), m_b (massa do corpo suspenso), m_w (massa da roda) e k_t (rigidez do pneu). Foram consideradas as variáveis x_b e x_w , que representam os deslocamentos verticais da massa da suspensão e da roda, respectivamente, além de $\dot{x}_1$ (velocidade vertical da massa suspensa), $\dot{x}_2$ (aceleração vertical da massa suspensa), $\dot{x}_3$ (velocidade vertical da roda) e $\dot{x}_4$ (aceleração vertical da roda). Com base na representação do sistema proposta por [9], foram realizados os cálculos e obtivemos a seguinte equação de estado, conforme mostrado nas Equação (1).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_s}{m_b} & -\frac{b_s}{m_b} & \frac{k_s}{m_b} & \frac{b_s}{m_b} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_s}{m_w} & \frac{b_s}{m_w} & -\frac{k_s+k_t}{m_w} & -\frac{b_s}{m_w} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{k_t}{m_w} \end{bmatrix} R \quad (1)$$

¹vitors.2000@alunos.utfpr.edu.br

²agulhari@utfpr.edu.br

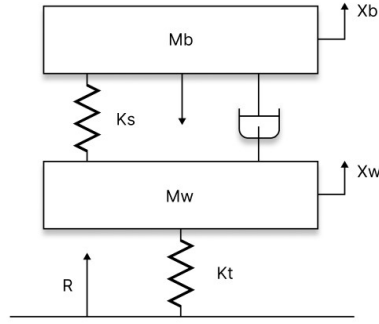


Figura 1: Sistema de suspensão. Adaptado de [9].

O sinal de entrada R do sistema, conforme apresentado na Equação (1), representa a informação referente à condição da pista, como ilustrado na Figura 1. Será utilizado um amortecedor semiativo para realizar o controle da suspensão, sendo que o controle será feito por meio da variação do coeficiente de amortecimento b_s . No entanto, esse processo apresenta um desafio devido à sua natureza não linear.

Este trabalho busca desenvolver um algoritmo para ajustar esse coeficiente e controlar o sistema, utilizando técnicas de controle robusto e evolução diferencial para projetar um controlador que atenda aos objetivos desejados e analisar suas vantagens e desvantagens. Os resultados das simulações indicam que o amortecedor semiativo, com controle robusto, proporciona uma melhora significativa da aceleração vertical da massa suspensa em relação ao amortecedor passivo. Foram analisados dois tipos de controle em três obstáculos diferentes para determinar qual deles apresenta o melhor desempenho.

A abordagem da norma H_2 foi escolhida devido ao comportamento não linear do sistema. O objetivo é projetar um ganho K que atenda à meta de melhorar a qualidade e o conforto para o passageiro. Com o modelo do sistema desenvolvido, também foi possível realizar diversas simulações variando os valores de R , o que permitiu simular o desempenho do controlador em diferentes tipos de terreno. Isso é relevante porque um dos desafios ao projetar uma suspensão é encontrar uma que funcione bem em várias situações. Dessa forma, conclui-se a importância da aplicação de técnicas de síntese de controladores voltados não apenas à estabilidade do sistema, mas também a otimizar seu desempenho.

Referências

- [1] H. Esmailzadeh, E.; Bateni, “Optimal active vehicle suspensions with full state feedback control,” *Society of Automotive Engineers*, vol. 101, no. 1, pp. 781–795, 1992.
- [2] M. Papadimitrakakis and A. Alexandridis, “Active vehicle suspension control using road preview model predictive control and radial basis function networks,” *Applied Soft Computing*, vol. 120, p. 108646, 2022.
- [3] G. Yakubu, G. Sani, S. Abdulkadir, A. Jimoh, and M. Francis, “Full car active damping system for vibration control,” *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*, vol. 6, no. 4, pp. 1–17, 2020.
- [4] H. E. Tseng and D. Hrovat, “State of the art survey: active and semi-active suspension control,” *Vehicle system dynamics*, vol. 53, no. 7, pp. 1034–1062, 2015.
- [5] S. M. Savarese *et al.*, “Semi-active suspension control design for vehicles,” *Elsevier Ltd.*, 2010.
- [6] Y. Huang, “Advances in artificial neural networks—methodological development and application,” *Algorithms*, vol. 2, no. 3, pp. 973–1007, 2009.
- [7] R. M. Picado, *Controle semi-ativo em suspensões automotivas*. PhD thesis, [sn], 1998.
- [8] K. Ogata, *Engenharia de Controle Moderno*. São Paulo, SP, Brasil: Pearson Education, 5th ed., 2010.
- [9] L. R. Miller, “Tuning passive, semiactive, and fully active suspension systems,” in *Proceedings of the 27th IEEE Conference on Decision and Control*, vol. 3, pp. 2047–2053, 1988.

IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS UTILIZANDO A TRANSFORMADA DE HILBERT-HUANG E MULTISSENSORIAMENTO SIMULTÂNEO DE CORRENTE, VIBRAÇÃO E SOM

Yuri Piccolo Bórnea¹, Alessandro Goedtel², Marcelo Favoretto Castoldi³, Wesley Angelino de Souza⁴^{1,2,3,4} Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Resumo

Os motores de indução (MIs) são amplamente utilizados em diversas aplicações industriais devido à sua robustez, confiabilidade e baixo custo de aquisição em comparação com outros tipos de motores, representando cerca de 90% de todos os motores em operação nas indústrias. Apesar disso, essas máquinas são suscetíveis a defeitos devido a condições adversas em suas operações, contribuindo para a sua quebra ou falha e consequente perda no processo industrial [1]. Dentre os componentes dos MIs que mais sofrem danos e apresentam maiores incidências de falhas, destacam-se os rolamentos (até 51% das falhas), enrolamentos de estator (até 36%) e rotor (até 9%), conforme descrito em [2]. Portanto, o desenvolvimento e uso de sistemas para diagnóstico de defeitos tornam-se cruciais para garantir a confiabilidade e a integralidade do processo industrial.

Para tal finalidade, diversos trabalhos presentes na literatura propõem estratégias para o uso de monitoramento de sinais provenientes destes MIs, como corrente elétrica, vibração, sinais acústicos e temperatura, com o intuito de extrair atributos que permitam caracterizar a condição saudável ou defeituosa do MI e diagnosticá-lo por meio de técnicas de aprendizagem de máquina (ML - do inglês, *machine learning*) [3].

Neste contexto, este trabalho propõe uma metodologia para identificação de falhas em MIs trifásicos, utilizando multissensoriamento simultâneo de sinais de vibração, corrente e som. Para isso, será utilizada a transformada de Hilbert-Huang (HHT - do inglês, *Hilbert-Huang transform*) como ferramenta para extrair atributos dos sinais e evidenciar as condições de MIs saudáveis ou defeituosos.

Proposta originalmente em [4], a HHT é uma técnica de tratamento de dados que permite a extração dos modos oscilatórios de sinais, denominados funções de modo intrínseco (IMF - do inglês, *intrinsic mode function*). Isso ocorre por meio da decomposição em modos empíricos (EMD - do inglês, *empirical mode decomposition*), que prevê a extração destas IMFs através da interpolação dos pontos máximos e mínimos do sinal. A segunda etapa dessa ferramenta implica na extração do espectro de Hilbert, em que se deseja verificar o comportamento do sinal decomposto em IMFs para analisar suas propriedades e características.

O resultado da HHT é uma distribuição do sinal no espectro do domínio de tempo-frequência, onde cada magnitude do sinal é associada a uma frequência instantânea e um instante de tempo. Desta forma, pode-se trabalhar com características não-estacionárias, que podem estar presentes em sinais de fonte ruidosa, como vibração, ou provenientes de ambientes ruidosos [5]. Entretanto, são necessários maiores estudos desta ferramenta devido a problemas em sua aplicação, como a mistura de modos que dificulta a identificação de padrões na aplicação da transformada conforme o sinal utilizado. Dentre as técnicas estudadas para

¹yuribornea@alunos.utfpr.edu.br²agoedtel@utfpr.edu.br³marcastoldi@utfpr.edu.br⁴wesleyangelino@utfpr.edu.br

contornar essas dificuldades estão as variações que preveem limitar os parâmetros de decomposição da EMD, as que introduzem ruído branco como a decomposição em modos empíricos em conjunto (EEMD - do inglês, *ensembled empirical mode decomposition*) conforme [6], ou até a aplicação da decomposição em modos variacionais (VMD - do inglês, *variational mode decomposition*) proposta em [7].

O presente trabalho prevê o estudo da HHT em sinais de corrente, vibração e som, através da delimitação de parâmetros ou uso de variações da EMD para extração de atributos dos sinais de MIs, e por fim classificá-los a fim de promover diagnóstico de falhas de curto-circuito em espiras de estator, desgaste abrasivo em rolamentos e barras quebradas de rotor. Dentre as contribuições previstas do trabalho, propõe-se o estudo da EMD e de suas variações, como as mencionadas no parágrafo acima, em sinais acústicos e de corrente, que são menos explorados na aplicação da HHT em comparação com sinais de vibração; o uso de uma abordagem de multissensoriamento simultâneo de sinais para diagnóstico de diferentes tipos de falhas de MIs trifásicos utilizando a HHT, sendo algumas falhas pouco exploradas na literatura como as de desgaste abrasivo de rolamento e as que estão em processo inicial de evolução; e a análise de atributos que possam evidenciar características de falha no espectro do tempo-frequência.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, e apoiado em parte pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através dos Processos 311634/2022-2 e 302521/2023-2, e em parte pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Referências

- [1] S. K. Gundewar and P. V. Kane, “Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor,” *J. Vib. Eng. Technol.*, vol. 9, pp. 643–674, jun 2021.
- [2] A. Choudhary, D. Goyal, S. L. Shimi, and A. Akula, “Condition monitoring and fault diagnosis of induction motors: A review,” *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 26, pp. 1221–1238, sep 2019.
- [3] P. Gangsar and R. Tiwari, “Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 144, p. 106908, oct 2020.
- [4] N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N.-C. Yen, C. C. Tung, and H. H. Liu, “The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis,” *Proc. Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 454, pp. 903–995, mar 1998.
- [5] R. Yan and R. X. Gao, “Hilbert–huang transform-based vibration signal analysis for machine health monitoring,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 55, no. 6, pp. 2320–2329, 2006.
- [6] Z. Wu and N. E. Huang, “Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method,” *Adv. Adapt. Data Anal.*, vol. 01, pp. 1–41, jan 2009.
- [7] K. Dragomiretskiy and D. Zosso, “Variational mode decomposition,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 62, no. 3, pp. 531–544, 2014.