

UMA METODOLOGIA DE AGRUPAMENTO DE MIT PARA ESTUDOS DE CURTO-CIRCUITO EM SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS

G. G. C. de Luna, D. A. Caixeta, G. C. Guimarães

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia-MG (Brasil).
glauber.luna@gmail.com, daniel_engletrica@yahoo.com.br, gcaixetag@yahoo.com.br

Resumo – Grandes sistemas industriais apresentam complexidade principalmente devido à grande quantidade de motores de indução existentes na planta. Assim, o desenvolvimento de estudos dinâmicos acerca da operação dessas unidades torna-se vital. Assim, esse trabalho tem por objetivo analisar a metodologia para agrupamento de MIT, cuja finalidade é reduzir a complexidade da modelagem computacional devido ao elevado número de motores existentes na planta, utilizando dados de fabricantes e da determinação dos parâmetros do seu circuito equivalente. Os estudos computacionais foram realizados utilizando o software PSAT (Power System Analysis Toolbox), abordando simulações de fluxo de potência e estabilidade dinâmica em um sistema contendo 9 barras. Os resultados obtidos demonstram a eficácia do método proposto de acordo com a meta pretendida na pesquisa.

Palavras-Chave – Circuito equivalente, Estudo dinâmico, Motor de indução, PSAT.

A METHODOLOGY OF MIT GROUPING FOR STUDIES OF SHORT CIRCUIT IN ELECTRIC INDUSTRIAL SYSTEMS

Abstract - Large industrial systems have complex mainly due to the large amount of existing induction motors in the plant. Thus, the development of studies on the dynamic operation of these units becomes vital. Thus, this work aims to analyze the methodology for group of MIT, whose purpose is to reduce the complexity of computational modeling due to the high number of engines in the plant, using data from manufacturers and the determination of its equivalent circuit parameters. Computational studies were performed using the software PSAT (Power System Analysis Toolbox), addressing power flow simulations and dynamic stability in a system containing 9 bars. The results demonstrate the effectiveness of the proposed method according to the desired target in the research.

Keywords - Equivalent circuit, Dynamic study, induction motor, PSAT.

NOMENCLATURA

MIT	Motor de indução trifásico.
R_s	Resistência do estator.
R_r	Resistência do rotor referida ao estator.
R_m	Resistência de magnetização.
X_s	Reatância de dispersão do estator.
X_r	Reatância de dispersão do rotor referida ao estator.
P	Potência ativa.
I_p	Corrente de partida.
I_n	Corrente nominal.
J	Momento de inércia.
ω	Velocidade angular.
η	Rendimento.
$\cos \varphi$	Fator de potência.

I. INTRODUÇÃO

Motor de indução trifásico (MIT) de rotor tipo gaiola domina o mercado de motores elétricos, participando com mais de 97% de unidades vendidas. Aos motores de indução trifásicos cabe uma parcela importante do total da energia elétrica consumida no Brasil, quase 25%, sendo que 49% desta carga está no setor industrial, referente à força motriz demandada, segundo dados do PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia, assim como no setor comercial [1]. Portanto, ações de conservação de energia nestes sistemas ou equipamentos são de grande importância.

Devido a tal estatística, as indústrias, preocupadas com a eficiência de seus sistemas elétricos, buscam consultoria especializada para avaliar com maior rigor a demanda instalada, com principal interesse nas cargas motoras, para aplicação ou substituição dos MIT por unidades mais eficientes. Por isso, torna-se necessário analisar seu desempenho, minimizando por exemplo a operação de motores sobre dimensionados, que provocam uma considerável perda de energia no sistema.

A Portaria nº 1.569, de 23 de dezembro de 1993 juntamente com a Resolução Normativa nº 414/2010 da ANEEL, que mantém o fator de potência de deslocamento de referência (capacitivo ou indutivo) para 0,92, e passou-se a ter a possibilidade de faturamento pelo excedente de energia reativa capacitiva no período noturno para alguns consumidores, obrigou as indústrias a se adequarem [2].

O trabalho analisa a metodologia para o agrupamento de MIT, a partir dos dados fornecidos pelo fabricante, afim de simplificar a modelagem computacional de sistemas industriais complexos. Para tal, a partir dos parâmetros do circuito equivalente do MIT serão realizadas simulações computacionais no PSAT (Power System Analysis Toolbox) para verificar a eficácia do método retratado [3].



XIV CEEL - ISSN 2178-8308
03 a 07 de Outubro de 2016
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

II. CIRCUITO EQUIVALENTE DO MIT

O motor de indução possui enrolamentos trifásicos distribuídos, simétricos e equilibrados no estator, que pode ser caracterizado por três bobinas concentradas. Cada fase é distribuída espacialmente por 120° no perímetro do estator, e cada enrolamento possui o mesmo número de espiras. O modelo matemático para a operação em regime permanente, chamado modelo de circuito equivalente, caracteriza a operação do motor de indução sob condição de alimentação senoidal e equilibrada, e com velocidade mecânica constante.

O primeiro passo para se obter uma análise do seu desempenho e especificação está na determinação do circuito equivalente do MIT. Através deste, é possível calcular parâmetros relevantes como queda de tensão, correntes, perdas e conjugado.

O circuito equivalente do motor de indução trifásico utilizado neste estudo será representado por fase, e referido ao estator, tornando desta forma um sistema mais didático e, com isso, simplificando a interpretação dos resultados, conforme ilustrado na Figura 1 [5, 6].

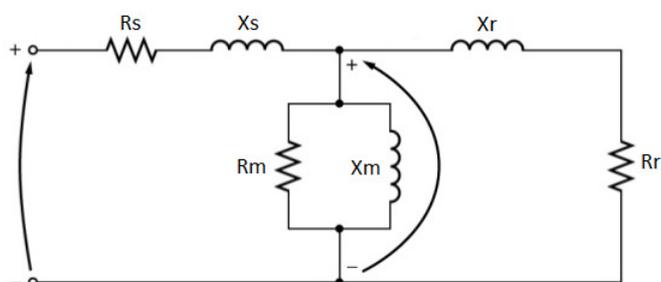


Fig. 1. Circuito equivalente do MIT.

O primeiro passo para se obter uma análise do seu desempenho e especificação está na determinação do circuito equivalente do MIT. Através deste, é possível calcular a queda de tensão, correntes, perdas, conjugado.

Análises realizadas no circuito equivalente do MIT são muito importantes, pois, uma melhor representação do motor, contribui para uma maior eficiência do modelo nos estudos de dinâmica de sistemas elétricos [6, 7, 8].

Para o cálculo dos parâmetros do circuito equivalente do motor de indução, são usados os dados fornecidos pelo fabricante, e de acordo com a NBR 7094/2003, o catálogo do motor deve apresentar os seguintes dados: número de fases; tensão nominal; frequência nominal; tipo de motor (rotor gaiola, rotor bobinado); potência nominal; velocidade síncrona ou número de pólos; classe de temperatura da isolamento do motor; velocidade de rotação nominal; corrente nominal; corrente com rotor bloqueado; conjugado nominal; conjugado com rotor bloqueado; conjugado máximo; rendimento a 100%, 75% e 50% da potência nominal; fator de potência a 100%, 75% e 50% da potência nominal; tempo admissível com rotor bloqueado, partindo da temperatura de operação [8].

Com estes dados pode-se então determinar todos os parâmetros a serem utilizados na modelagem, com exceção da resistência de magnetização R_m , cujo valor pode ser desprezado quando comparado à reatância de magnetização X_m .

III. AGRUPAMENTO DE MIT EM UM SISTEMA ELÉTRICO DE 9 BARRAS

A complexidade dos sistemas elétricos industriais é devido ao grande número de cargas (estáticas e dinâmicas) existentes. Para isso é então apresentada a proposta de metodologia para o agrupamento de motores visando identificar um “motor equivalente” o qual possa melhor representar um grupo de motores alimentados pela mesma barra.

A proposta de metodologia para o agrupamento de MIT, também chamados neste artigo de “motores equivalentes”, pode ser melhor compreendida com base nas etapas apresentadas na sequência.

A. Primeira etapa – Dados do sistema elétrico industrial

Embora possua grande aplicação em indústrias, os MIT, devido ao processo contínuo de manutenção da indústria, acabam perdendo suas especificações técnicas fornecidas pelo fabricante através dos dados de placa, com isso, elevando a dificuldade em levantar os parâmetros corretos para o estudo.

O ponto crítico seria então de ir a campo levantar todos os dados atuais do sistema, para posteriormente tratar estes dados em um simulador. Para facilitar o entendimento o estudo propõe modelar um sistema elétrico industrial simplificado com 9 barras, 2 cargas estáticas, 2 transformadores, um banco capacitivo e 5 MIT conforme Figura 2.

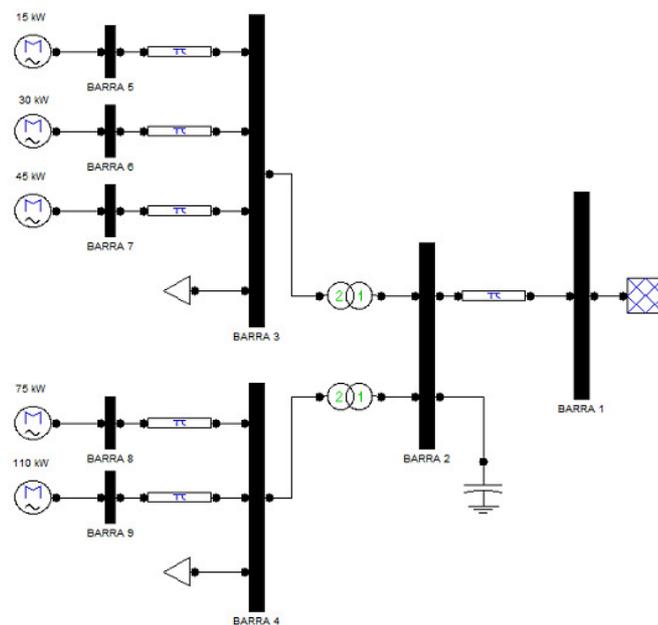


Fig. 2. Sistema elétrico proposto para o estudo.

O sistema elétrico proposto abrange uma faixa significativa dos sistemas elétricos industriais, pois, atinge uma faixa de potência de MIT bastante utilizada nas indústrias. Na Tabela I estão listados os dados dos motores de indução trifásicos utilizados no sistema elétrico proposto para o estudo.

Tabela I - Dados dos MIT's utilizados no sistema em estudo

P [kW]	S [MVA]	Vn [kV]	Freq. [Hz]	Nº polos
15	0,01958531	0,44	60	4
30	0,03783293	0,44	60	4
45	0,05502164	0,44	60	4
75	0,09131864	0,44	60	4
110	0,1107556	0,44	60	4
90	0,13351459	0,44	60	4
185	0,22081379	0,44	60	4

B. Segunda etapa – Dados de placa dos MIT

Conforme prescrito pela NBR 7094, os fabricantes de motores elétricos devem informar as características elétricas e mecânicas de operação. Estes dados, também são obtidos dos ensaios de rotor bloqueado e a vazio além do ensaio de carregamento e de elevação de temperatura; estes ensaios caracterizam o ensaio tipo previsto pela ABNT [8].

Para o estudo deste sistema elétrico foram utilizados os dados de MIT da linha W22 IR3 Premium disponíveis no site da WEG [9]. Todos os MIT analisados possuem frequência de 60 Hz, 4 polos e tensão de 440 V, já os dados complementares fornecidos pelo fabricante estão descritos na Tabela II.

Tabela II - Dados adicionais dos MIT's utilizados no estudo

P [kW]	Ip / In	J [kgm²]	ω [rpm]	η [%]	cos φ [%]	In [A]
15	7.7	0.14707	1775	93.4	0.82	25.7
30	6.6	0.32017	1775	94.4	0.84	49.6
45	7.5	0.74182	1780	95.1	0.86	72.2
75	7.4	1.71411	1785	95.5	0.86	120
110	7.0	2.66455	1790	95.8	0.86	175

C. Terceira etapa – Parâmetros do circuito equivalente do MIT

Com base nos dados do fabricante pode-se então determinar os valores dos parâmetros para o circuito equivalente, apresentados na Tabela III.

Tabela III - Parâmetros do circuito equivalente dos MIT's

P [kW]	Xs [pu]	Rs [pu]	Rr [pu]	Xr [pu]	Xm [pu]
15	0.059013	0.043342	0.015461	0.059013	1.83605
30	0.072719	0.035868	0.014913	0.072719	2.08794
45	0.063768	0.032951	0.011824	0.063768	2.22527
75	0.065427	0.031802	0.008856	0.065427	2.24380
110	0.070017	0.031513	0.005881	0.070017	2.28366

D. Quarta etapa – Agrupamento dos motores (Motor equivalente)

A proposta reside em agrupar os MIT da Barra 3 do sistema elétrico em estudo (15 kW, 30 kW e 45 kW) em um motor de 90 kW conforme o sistema elétrico equivalente.

Posteriormente, serão agrupados os motores da Barra 4 do sistema elétrico em estudo (75 kW e 110 kW) em um motor de 185 kW para o sistema elétrico equivalente, conforme Figura 3.

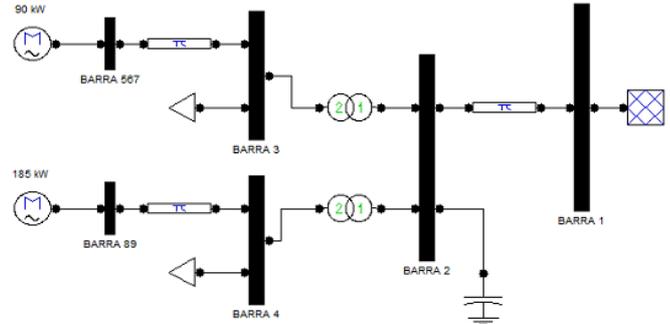


Fig. 3. Sistema elétrico equivalente proposto para o estudo.

Para o estudo deste do sistema elétrico equivalente foram utilizados também MIT da linha W22 Premium da WEG. Todos os MIT utilizados possuem frequência de 60Hz, 4 polos e tensão de 440 V, já os dados complementares fornecidos pelo fabricante estão descritos na Tabela IV

Tabela IV - Dados complementares dos MIT's equivalentes

P [kW]	Ip / In	J [kgm²]	ω [rpm]	η [100%]	cos φ [100%]	In [A]
90	7.2	2.44250	1790	95.6	0.85	145
185	7.6	3.88580	1790	96.3	0.87	290

A Tabela V apresenta os valores dos parâmetros calculados para o circuito equivalente dos MIT utilizados no sistema elétrico equivalente, os quais correspondem ao agrupamento dos motores de menor potência em um de potência equivalente a soma das suas potências nominais.

Tabela V - Parâmetros do circuito equivalente dos MIT's utilizados no sistema equivalente em estudo

P [kW]	Xs [pu]	Rs [pu]	Rr [pu]	Xr [pu]	Xm [pu]
90	0.067757	0.032858	0.005953	0.067757	2.15670
185	0.064525	0.027505	0.005874	0.064525	2.36936

IV. ESTUDO DE CASO

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações computacionais efetuadas no software PSAT de modo a verificar a eficácia da metodologia apresentada. O diagrama unifilar ilustrado na Figura 2 representa a distribuição de cargas do complexo analisado, sabendo que os ensaios foram comparados com o diagrama unifilar evidenciado na Figura 3.

A. Curto-circuito Trifásico na Barra 3

Neste cenário são analisados os mesmos parâmetros sob a ocorrência de um curto-circuito trifásico na Barra 3 do sistema, aplicado no instante de tempo de 5 s durante um intervalo de 200 ms. A Figura 4 ilustra a tensão na Barra 3, onde, mais uma vez, as curvas em azul em verde representam a condição sem e com a técnica proposta, respectivamente. Para esta condição, a linha em verde sobrepõe a azul pois ambas curvas apresentam o mesmo comportamento, saindo de 1,0 pu, alcançando o valor nulo durante o curto circuito trifásico e retornando ao valor inicial em $t = 7$ s.

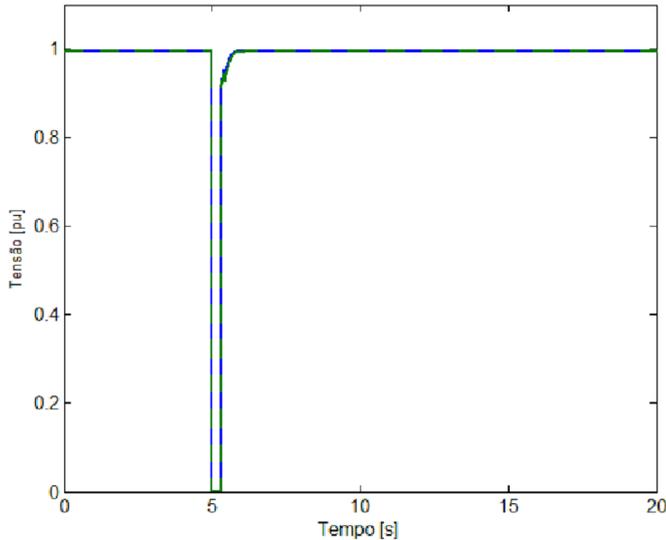


Fig. 4. Tensão na Barra 3 dos sistemas elétricos em estudo.

O comportamento da corrente entre as Barras 2 e 3 do sistema pode ser observado na Figura 5, onde, novamente, as curvas em preto e em vermelho representam a condição de ausência e presença da metodologia citada, respectivamente. Nota-se que as mesmas se iniciam em 0,001 pu e atingem picos em torno de 0,25 pu, estabilizando-se, posteriormente, próximas ao valor inicial.

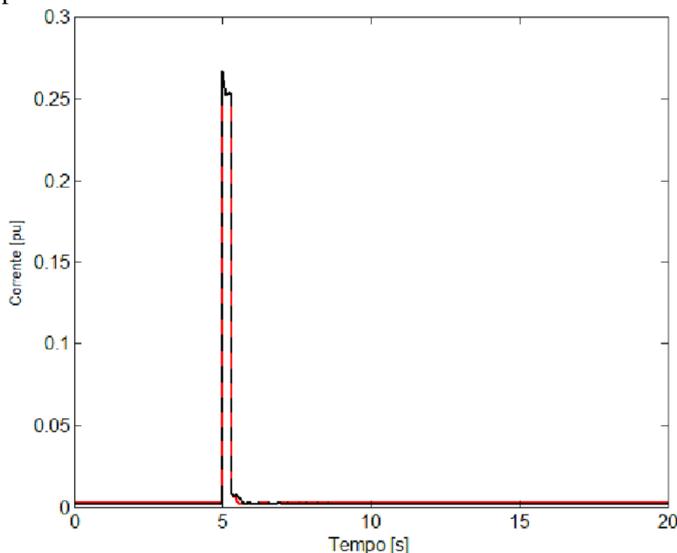


Fig. 5. Corrente entre as Barras 2 e 3 do sistema industrial.

B. Curto-circuito Trifásico na Barra 4

Nesta etapa são analisados os mesmos parâmetros do caso anterior, mas sob a ocorrência de um curto-circuito trifásico na Barra 4 do sistema, aplicado no instante de tempo de 5 s durante um intervalo de 200 ms. A Figura 6 ilustra a tensão na Barra 4, onde, novamente, as curvas em azul em verde representam a condição sem e com o método de agrupamento proposto, respectivamente. Ressalta-se ainda que, como ambas as curvas apresentam o mesmo comportamento, a linha em azul é sobreposta pela verde, saindo de 1,0 pu, atingindo o valor nulo durante o distúrbio e retornando ao valor inicial em $t = 10$ s.

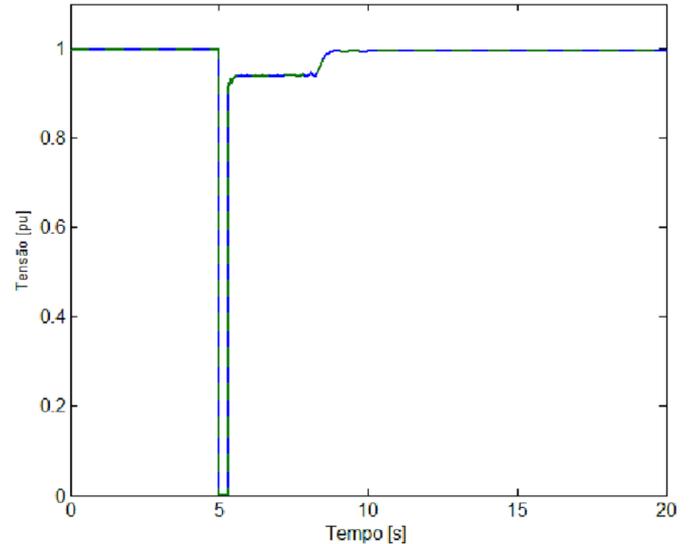


Fig. 6. Tensão na Barra 4 dos sistemas elétricos em estudo.

A Figura 7 evidencia o comportamento da corrente entre as Barras 2 e 4 do sistema, onde, novamente, as curvas em preto e em vermelho representam a condição de ausência e presença da metodologia citada, respectivamente. Percebe-se que ambas se iniciam em 0,001 pu e atingem picos em torno de 0,25 pu, estabilizando-se, posteriormente, próximas ao valor inicial após regimes transitórios semelhantes durante o curto-circuito.

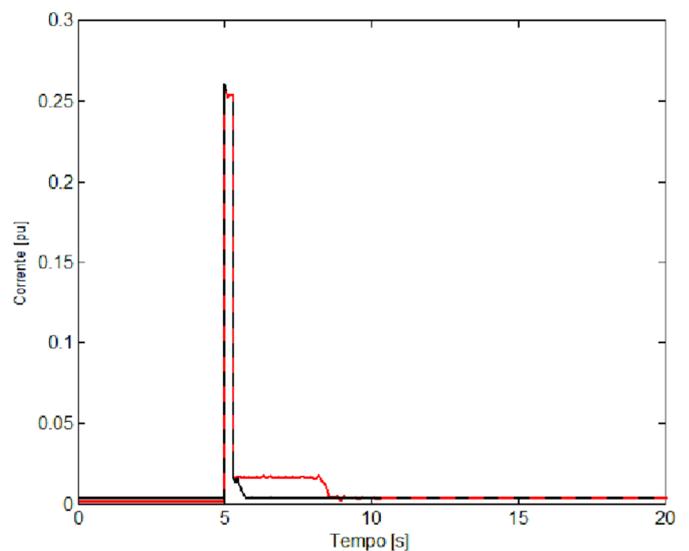


Fig. 7. Corrente entre as Barras 2 e 4 do sistema industrial.

V. CONCLUSÕES

O crescimento dos sistemas industriais tem requisitado o desenvolvimento de estudos a respeito da estabilidade dinâmica das cargas instaladas em suas plantas. Assim, torna-se de profunda importância o agrupamento dos inúmeros motores presentes no sistema de modo a viabilizar o a modelagem computacional do diagrama em estudo.

Dessa forma, utilizando dados de catálogos de fabricantes de motores, este trabalho objetivou apresentar uma metodologia para agrupamento de MIT em sistemas industriais. Em suma, a técnica retratada se baseou em dados do circuito elétrico equivalente calculados afim de possibilitar a modelagem computacional no software PSAT para a simulação de fluxo de potência e estabilidade dinâmica.

O estudo apresentou dois casos analisados, abordando o mesmo distúrbio (curto-circuito trifásico), além de retratar as condições de ausência e presença da metodologia proposta. Foram então analisadas a tensão e a corrente em diferentes pontos do sistema de modo a permitir a verificação da eficácia da aplicação do método.

De forma geral, pôde-se notar pelos resultados das simulações efetuadas que, apesar de os parâmetros apresentarem comportamentos transitórios distintos durante os distúrbios (efeito das diferentes inércias entre as máquinas individuais e a equivalente), o método de agrupamento desenvolvido levou a resultados bastante semelhantes com relação às condições de regime permanente do sistema.

Portanto, nota-se que o método proposto se mostrou eficaz com relação ao objetivo pretendido. Dessa forma, o estudo apresentado pode servir como ferramenta de grande utilidade para viabilizar o desenvolvimento de estudos dinâmicos acerca de complexos sistemas industriais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pelo apoio financeiro a pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] A.T. José, A.N.B.C. Tereza, “Determinação dos parâmetros do circuito equivalente do MIT através de dados de catálogos de fabricante”, UFSJ – Universidade Federal de São João del-Rei, no. 14, 2006.
- [2] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, “Resolução Normativa nº 414/2010”. Acessado em: 2 de maio de 2015, em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/bren2010414.pdf>
- [3] F. Milano. Get PSAT. Acessado em 6 de maio de 2015, em: [http://itee.uq.edu.au/pss-l/test%20system.htm#Transmission system](http://itee.uq.edu.au/pss-l/test%20system.htm#Transmission%20system).
- [4] G. C. Guimarães; Curso de Dinâmica de Sistemas Elétricos – Parte I: Modelagem de uma Máquina Síncrona e seus Controles para Estudos de Estabilidade Transitória, Universidade Federal de Uberlândia, 2008.

- [5] G. C. Guimarães; Curso de Dinâmica de Sistemas Elétricos – Parte II: Modelagem de uma Máquina Síncrona e seus Controles para Estudos de Estabilidade Transitória, Universidade Federal de Uberlândia, 2008.
- [6] ASSUNÇÃO; J. T., “Análise e Especificação de Motores de Indução Trifásicos com Rotor Tipo Gaiola Controlados Através do Valor Eficaz e Frequência da Tensão do Estator”, Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica, EFEI - Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 1990.
- [7] LOBOSCO, O.S. e DIAS, J. L. P. C., “Seleção e Aplicação de Motores Elétricos”, Ed. McGraw-Hill: Siemens, AS, São Paulo, 351p, 1988.
- [8] NBR 7094/2003, "Máquinas elétricas girantes Motores de indução - Especificação", ABNT, 2003.
- [9] WEG – Catálogo de motores elétricos industriais W22 IR3 Premium. Acessado em: 15 de maio de 2015, em: http://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_motor_sel_web.asp.

DADOS BIOGRÁFICOS



Glauber George Coelho de Luna, nasceu em Caruaru-PE, em 1982. Graduiu-se em Engenharia de Computação pela Universidade de Uberaba –UNIUBE em 2008, em 2012 obteve o título de Especialista em Segurança do Trabalho pela Faculdade Pitágoras – Belo Horizonte. Atualmente é professor da Faculdade Pitágoras de Uberlândia e mestrando em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Uberlândia – FEELT e pesquisador do Laboratório de Dinâmica de Sistemas Elétricos



Daniel Araújo Caixeta nasceu em Uberlândia-MG, em 1985. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia – UFU – em 2008 e obteve seu título de mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC – em 2010. Já o título de doutor em Engenharia Elétrica foi obtido em 2014 pela UFU.

Atualmente é professor da Faculdade Pitágoras de Uberlândia e pesquisador do Laboratório de Dinâmica de Sistemas Elétricos da UFU. Suas áreas de pesquisa são: geração eólica, geração distribuída, estabilidade de sistemas elétricos e redes elétricas inteligentes.



Geraldo Caixeta Guimarães graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia – UFU – em 1977. Ele obteve o título de mestre pela Universidade Federal de Santa Catarina em 1984 e de Ph.D. pela Universidade de Aberdeen, no Reino Unido. Atualmente é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UFU. Suas áreas de pesquisa são: geração eólica, geração distribuída. Dinâmica e controle de sistemas elétricos, fluxo de potência, estabilidade transitória e de tensão e eletromagnetismo aplicado.