

PROPOSTA PARA AGRUPAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO APLICADA A ESTUDOS DINÂMICOS DE 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_engeletrica@yahoo.com.br, gcaixetag@yahoo.com.br

Resumo – O crescimento dos sistemas industriais tem requisitado o desenvolvimento de estudos dinâmicos acerca de sua operação. Neste contexto, torna-se de grande importância a modelagem computacional dos elementos elétricos da planta, cuja principal dificuldade se dá pela grande quantidade de motores existentes. Assim, esse trabalho tem por objetivo apresentar uma metodologia para agrupamento de MIT, a partir dos 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.

PROPOSAL FOR INDUCTION MOTORS GROUPING APPLIED TO DYNAMIC STUDIES OF ELECTRIC INDUSTRIAL SYSTEMS

Abstract - The growth of industrial systems has prompted the development of dynamic studies about its operation. In this context, it is of great importance the computer modeling of the electrical elements of the plant, whose main difficulty is the large number of existing motors. Thus, this work aims to present a MIT grouping methodology, from manufacturers data and the equivalent circuit parameters determination. The computer studies were performed using software PSAT (Power System Analysis Toolbox), executing power flow and dynamic stability simulations of a 9-bar grid. The results show the effectiveness of the proposed method according to work purpose.

Keywords - Dynamic study, Equivalent circuit, 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

O motor de indução trifásico (MIT) de rotor tipo gaiola é o tipo dominante no mercado de motores elétricos, e participa 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 uma carga representativa tanto no setor industrial com 49% referente à força motriz, segundo dados do PROCEL Programa Nacional de Conservação de Energia, como no setor comercial. Portanto, ações de conservação de energia nestes equipamentos são de grande importância [1].

Por isso, é cada vez maior o número de indústrias que buscam avaliar a demanda instalada devido as cargas motoras por interesse na aplicação ou substituição dos MIT por motores mais eficientes, e por isso torna-se necessário analisar mais cuidadosamente o seu comportamento e desempenho, evitando assim motores sobre dimensionados, que provocam uma considerável perda de energia no sistema. Neste sentido, modelagens matemáticas do MIT, através do seu circuito equivalente possibilitam uma melhor análise do seu comportamento dinâmico.

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].

Devido a esta resolução, as indústrias estão cada vez mais buscando consultorias nesta área a fim de melhorar o desempenho energético do seu sistema. O fato é que as indústrias possuem sistemas elétricos complexos, inviabilizando o estudo na arquitetura real, e mais ainda por falta de dados e parâmetros suficientemente confiáveis para



XIII CEEL - ISSN 2178-8308
12 a 16 de Outubro de 2015
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

serem simulados estes sistemas com o estudo de dinâmica de sistemas elétricos.

Assim, este trabalho visa apresentar uma metodologia para o agrupamento de MIT a partir dos dados de catálogos fornecidos pelo fabricante, de modo a viabilizar 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].

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 circuito equivalente do motor de indução trifásico é normalmente representado por fase e referido ao estator, conforme ilustrado na Figura 1 [5, 6].

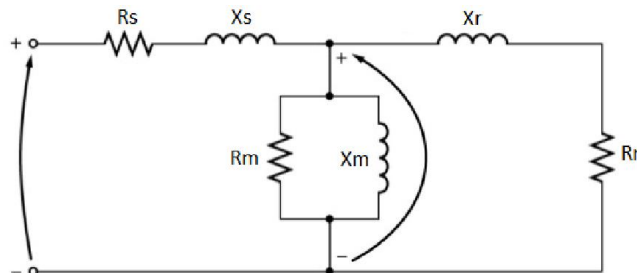


Fig. 1. Circuito equivalente do MIT.

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, 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 polos; 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 de 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 R_m , cujo valor pode ser desprezado quando comparado à reatância de magnetização X_m .

III. PROPOSTA PARA AGRUPAMENTO DE MOTORES

A complexidade dos sistemas elétricos industriais, é devido ao grande número de cargas (estáticas e dinâmicas) existentes, para isso surgiu então 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 de placa, o que eleva a dificuldade em levantar os parâmetros corretos para o estudo.

O primeiro ponto crítico refere-se ao levantamento dos dados do sistema. 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.

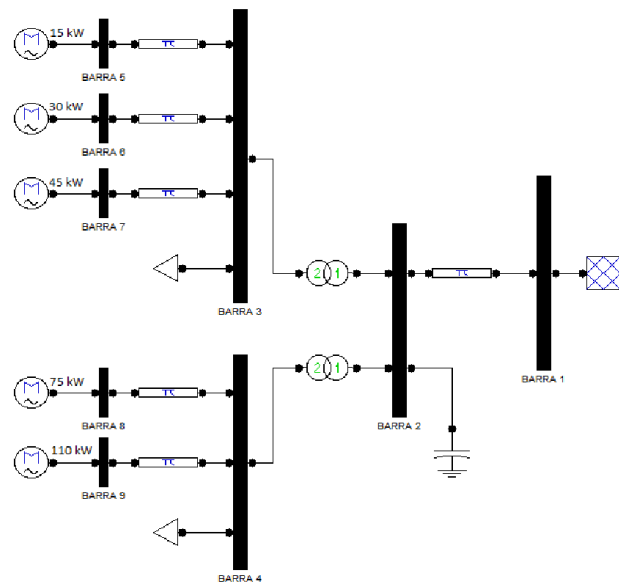


Fig. 2. Sistema elétrico proposto para o estudo.

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 do 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 complementares dos MIT's

P [kW]	Ip / In	J [kgm ²]	ω [rpm]	H [100%]	cos ϕ [100%]	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

Fonte: Baseado em [9]

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 – Dados dos 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

Fonte: Baseado em [9]

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

A proposta reside em se agrupar os MIT da Barra 3 (15 kW, 30 kW e 45 kW) em um motor de 90 kW. Posteriormente, serão agrupados os motores da Barra 4 (75 kW e 110 kW) em um motor de 185 kW, conforme Figura 3.

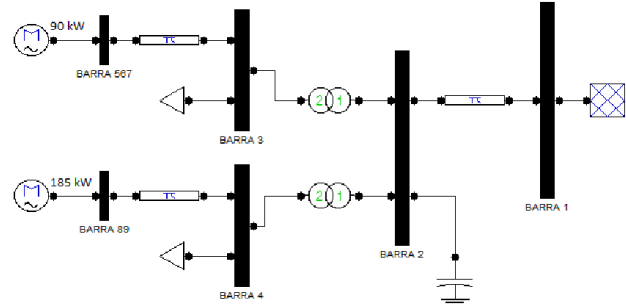


Fig. 3. Sistema elétrico equivalente para o estudo.

Para o estudo 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 [kgm ²]	ω [rpm]	H [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

Fonte: Baseado em [9]

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 potências nominais dos motores.

Tabela V – Dados dos parâmetros do circuito equivalente dos MIT's equivalentes

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

Fonte: Baseado em [9]

IV. ESTUDOS 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. A seguir são mostrados os distintos cenários analisados com relação ao agrupamento das cargas do sistema industrial estudado.

A. Partida de Motores das Barras 8 e 9

Nesta seção é analisada a condição de partida direta dos motores de 75 kW e 110 kW das barras 8 e 9, respectivamente, sendo então monitoradas a tensão na barra 4 e a corrente elétrica entre as barras 2 e 4 para os casos sem e com o método de agrupamento de motores aplicado.

As curvas em azul e verde da Figura 4 ilustram a tensão na barra 4 do sistema para a condição sem e com o método de agrupamento proposto, respectivamente. Nota-se que ambas apresentam o valor de aproximadamente 1,0 pu anteriormente à partida dos motores, ocorrida no instante $t = 5,0$ s. Apesar de apresentarem regimes transitórios distintos, com valor mínimo de 0,94 pu, ambas se estabilizam próximo a 0,99 pu em torno de 5 s após a partida.

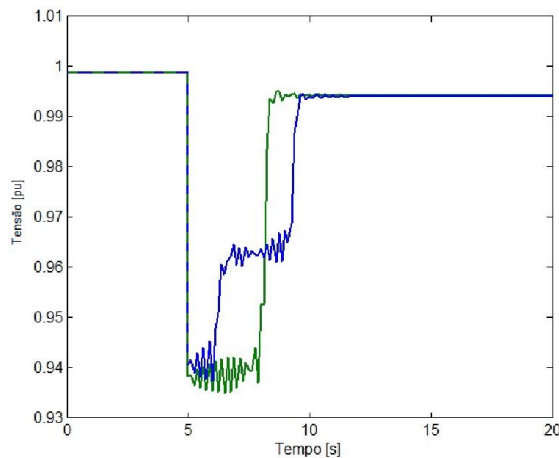


Fig. 4. Tensão na barra 4 do sistema industrial.

Já a Figura 5 descreve o comportamento da corrente entre as barras 2 e 4 do sistema, onde as curvas em preto e em vermelho retratam a condição de ausência e presença da metodologia citada, respectivamente. Nota-se que ambas possuem valor inicial igual a 0,001 pu e atingem o valor máximo de aproximadamente 0,016 pu. Ainda, apesar de apresentarem comportamentos transitórios distintos durante a partida, as duas curvas estabilizam-se próximas a 0,003 pu no instante $t = 12$ s.

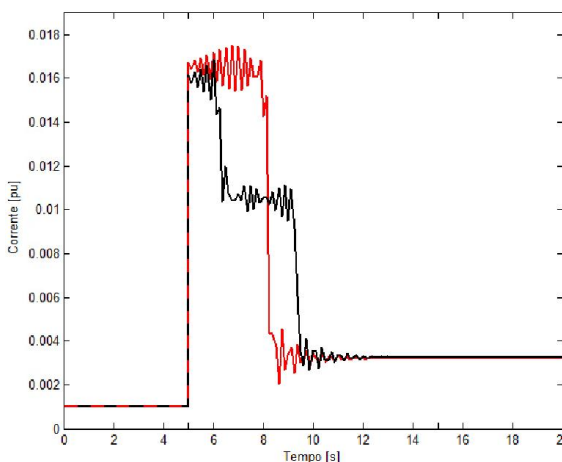


Fig. 5. Corrente entre as barras 2 e 4 do sistema industrial

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.

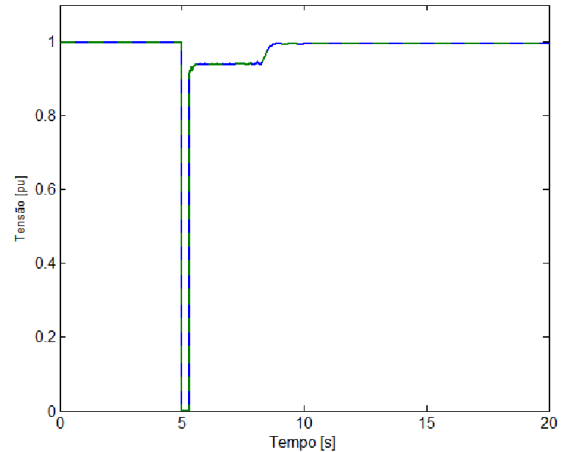


Fig. 6. Tensão na barra 4 do sistema industrial

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 trifásico.

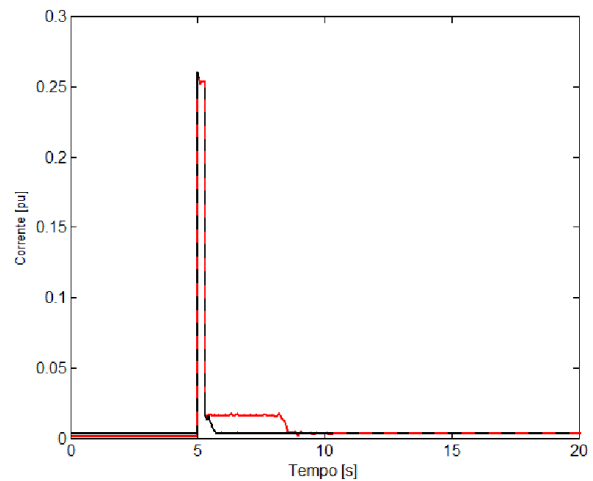


Fig. 7. Corrente entre as barras 2 e 4 do sistema industrial

C. Partida de Motores das Barra 5,6 e 7

Nesta etapa será analisada a condição de partida direta dos motores de 15 kW, 30 kW e 45 kW das barras 5, 6 e 7, respectivamente, sendo então observadas a tensão na barra 3 e a corrente elétrica entre as barras 2 e 3 para os casos sem e com a técnica proposta.

Na Figura 8, as curvas em azul e verde retratam a tensão na barra 3 do sistema para a condição sem e com a técnica proposta, respectivamente. Observa-se que, anteriormente à partida dos motores, ambas apresentam o valor de praticamente 1,0 pu, atingindo o valor mínimo de 0,965 pu durante o período transitório e estabilizando próximas a 0,99 pu ao final da simulação.

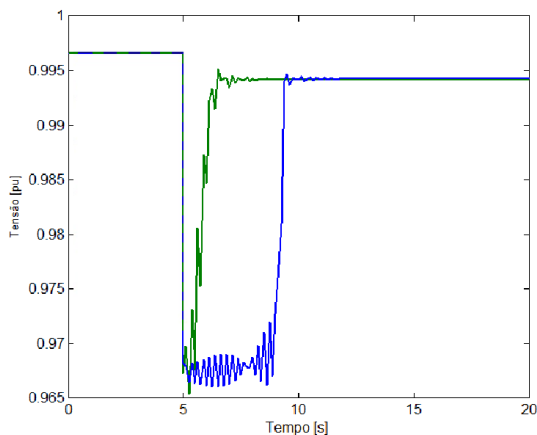


Fig. 8. Tensão na barra 3 do sistema industrial

A Figura 9 mostra o perfil da corrente elétrica entre as barras 2 e 3 do sistema, onde as curvas em preto e em vermelho mostram a condição de ausência e presença do método proposto, respectivamente. Pode-se notar que ambas possuem valor inicial igual a 0,001 pu e alcançam o valor máximo de aproximadamente 0,009 pu. Apesar de apresentarem comportamentos transitórios distintos durante a partida, as duas curvas estabilizam-se em 0,002 pu ao final do estudo.

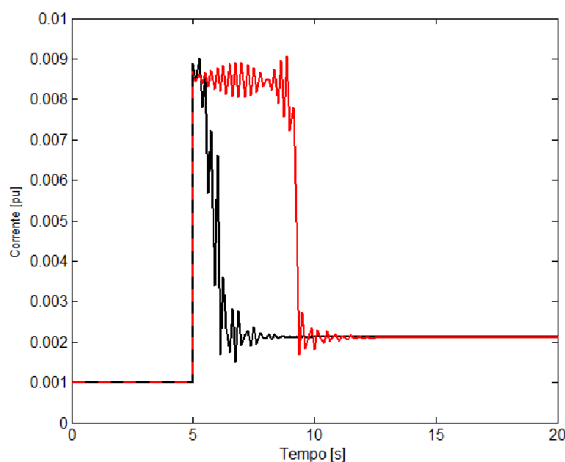


Fig. 9. Corrente entre as barras 2 e 3 do sistema industrial

D. Curto-circuito Trifásico na Barra 3

Neste cenário são analisados os mesmos parâmetros do caso anterior, mas 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 10 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. Da mesma forma que o Caso B, 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.

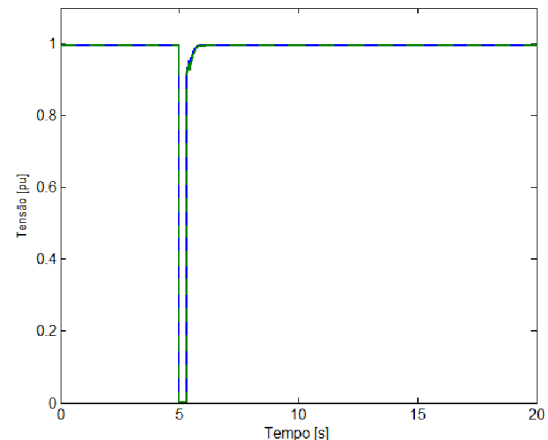


Fig. 10. Tensão na barra 4 do sistema industrial

O comportamento da corrente entre as barras 2 e 3 do sistema pode ser observado na Figura 11, 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 iniciam-se em 0,001 pu e atingem picos em torno de 0,25 pu, estabilizando-se, posteriormente, próximas ao valor inicial.

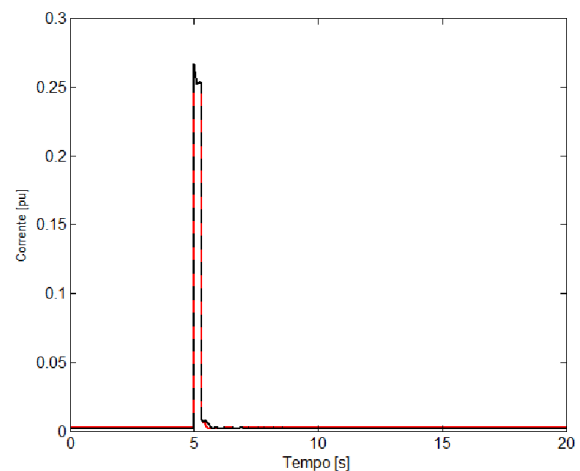


Fig. 11. Corrente entre as barras 2 e 3 do sistema industrial

V. CONCLUSÃO

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 quatro casos analisados, abordando distintos distúrbios na rede (partida direta de motores e 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 Freqüência 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 7094/1996, “*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.