



DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO DE AGREGAÇÃO DE CARGA DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS USANDO O MÉTODO DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

Yuri Von Cosmy Bottoli Rodrigues*¹, Victor Lucas Sousa Gomes¹, Fernando Bento Silva¹ e Geraldo Caixeta Guimarães¹

¹FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

Resumo - Em sistemas elétricos industriais, os motores elétricos de indução trifásicos representam cerca de 62% da carga utilizada, e por este motivo são necessários estudos do comportamento eletrodinâmico relacionado ao seu funcionamento, possibilitando o dimensionamento de condutores, barramentos e quadro de circuitos de comando de motores a instalação, além de estudos sobre coordenação de proteção e isolamento em sistemas de baixa e média tensão industriais e de subestações. Assim, esse artigo tem como objetivo apresentar uma metodologia de agregação da carga composta por motores de indução trifásicos, utilizando a lei de conservação de energia. Para tanto são utilizados parâmetros do circuito equivalente destes motores fornecidos pelo fabricante. Os resultados obtidos por meio de simulações computacionais demonstram a eficiência do método proposto para obtenção do motor de indução trifásico equivalente.

Palavras-Chave – Equivalência de potência, motor de indução trifásico equivalente, motor de indução trifásico máquinas elétricas.

DEVELOPMENT OF A AGGREGATED LOAD MODEL COMPRISED BY THREE-PHASE INDUCTION MOTORS USING THE CONSERVATION ENERGY METHOD

Abstract - In industrial electrical systems, three-phase induction motors represent about 62% of the used load, and for this reason the study of the electrodynamic behavior related to its functioning is necessary, allowing the sizing of conductors, busbars and circuit control board of the installation, in addition to studies on protection coordination and isolation in industrial low and medium voltage systems and substations. Thus, this article aims to present a methodology of load aggregation composed of three-phase induction motors, using the law of conservation of energy. For this parameters of the equivalent circuit of these engines, supplied by the manufacturer, are used. The results obtained by computational simulations, prove the efficiency of the

proposed method to obtain the equivalent three-phase induction motor.

Keywords – Equivalent three-phase induction motor, power equivalence, power electrical machines, three-phase induction motor.

NOMENCLATURA

MIT	Motor de indução trifásico.
P_{mec}	Potência mecânica.
η	Rendimento.
FP	Fator de potência.
$P_{3\phi}$	Potência ativa trifásica.
P_{PCE}	Perdas no cobre do estator.
P_{NU}	Perdas no núcleo.
P_{PCR}	Perdas no cobre do rotor.
P_{mec}^{bar}	Potência mecânica do barramento.
$S_{3\phi}^{bar}$	Potência aparente trifásica do barramento.
$P_{3\phi}^{bar}$	Potência ativa trifásica do barramento.
$Q_{3\phi}^{bar}$	Potência reativa trifásica do barramento.
I_L^{bar}	Corrente de linha do barramento.
FP^{bar}	Fator de potência do barramento.
P_{mec}^{agr}	Potência mecânica do agregado.
$S_{3\phi}^{agr}$	Potência aparente trifásica do motor equivalente.
$P_{3\phi}^{agr}$	Potência ativa trifásica do motor equivalente.
$Q_{3\phi}^{agr}$	Potência reativa trifásica do motor equivalente.
I_L^{agr}	Corrente de linha do motor equivalente.
FP^{agr}	Fator de potência do motor equivalente.
V_1	Tensão de fase.
I_1	Corrente do estator.
I_{fe}	Corrente que passa na resistência do ferro.
I_m	Corrente que passa na reatância de magnetização.
I_2	Corrente do rotor.
I_L	Corrente de linha.
P	Número de polos.
N_R	Velocidade do rotor.
J	Momento de inércia.
s	Escorregamento.
R_1	Resistência do estator por fase.
X_1	Reatância do estator por fase.
R_2	Resistência do rotor referida ao estator por fase.
X_2	Reatância de dispersão do rotor referida ao estator por fase.

*ybottoli@gmail.com

R_{fe}	Resistência do ferro por fase.
X_m	Reatância de magnetização por fase.
R_S	Resistência de perda suplementar por fase
R_1^{agr}	Resistência do estator do motor equivalente.
X_1^{agr}	Reatância de dispersão do estator do motor equivalente.
R_2^{agr}	Resistência do rotor referido ao estator do motor equivalente.
X_2^{agr}	Reatância do rotor referido ao estator do motor equivalente.
R_{fe}^{agr}	Resistência do ferro do motor equivalente.
X_m^{agr}	Reatância de magnetização do motor equivalente.
R_S^{agr}	Resistência de perda suplementar do motor equivalente.
L_1^{agr}	Indutância de dispersão do estator do motor equivalente.
L_2^{agr}	Indutância de dispersão do rotor referido ao estator do motor equivalente.
L_m^{agr}	Indutância de magnetização do motor equivalente.
P^{agr}	Número de polos do motor equivalente.
J^{agr}	Momento de inércia do motor equivalente.
s^{agr}	Escorregamento do motor equivalente.

I. INTRODUÇÃO

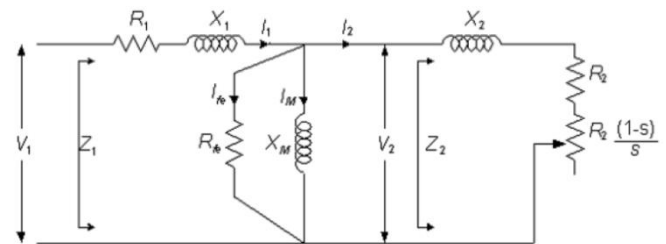
Os motores de indução trifásicos são o primordial uso final da energia elétrica gerada no Brasil, sendo que o mesmo tem grande participação no setor industrial. O montante de energia que os motores elétricos processam é de aproximadamente 60% da energia elétrica total consumida no país. Segundo dados do PROCEL [1] (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica) os mesmos apresentam cerca de 62% da demanda de energia em instalações industriais. Portanto as medidas tomadas em projetos de eficiência energética e de coordenação de proteção e isolamento em sistemas elétricos industriais, principalmente em sistemas motrizes, é de primordial importância ter-se o estudo detalhado do comportamento eletrodinâmico desses sistemas. Por isso, é crescente o número de indústrias que buscam realizar simulações do comportamento dinâmico dos sistemas motrizes, uma vez que é necessário avaliar os distúrbios causados por transitórios eletromecânicos na planta industrial ou no sistema elétrico da empresa distribuidora ou transmissora de energia, visto que em motores de grande potência, a concessionária de energia solicita a avaliação e análise da carga conectada no sistema elétrico de potência por meio de simulações computacionais, utilizando softwares profissionais para tal. Assim, esse artigo visa apresentar uma metodologia para agregação de carga de motores de indução trifásicos, para redução de recursos computacionais, baseada na conservação de energia.

II. CIRCUITO EQUIVALENTE DO MIT

O motor de indução possui $3n$ ($n = 1,2,3,\dots$) enrolamentos simetricamente distribuídos no estator, que, quando o mesmo é alimentado por três tensões senoidais defasadas de 120° entre si, gera no estator um campo magnético girante de $2n$ polos, e que esse campo induz no rotor da máquina uma tensão, e conseqüentemente uma corrente, que desenvolve o

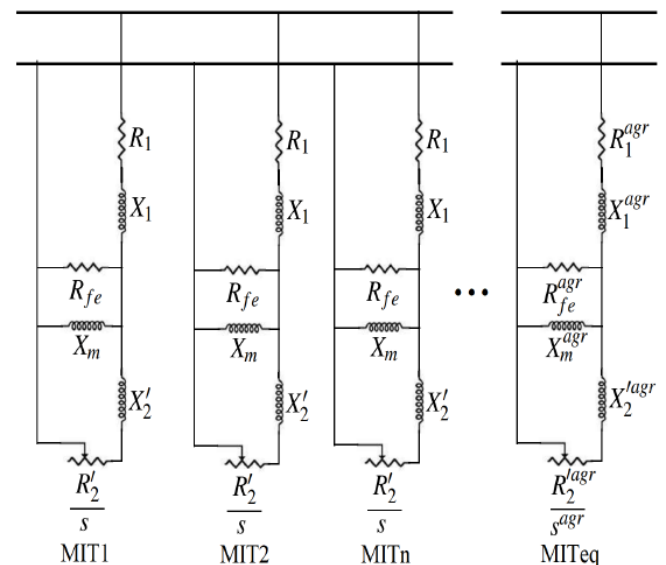
torque no rotor pela interação entre campos magnéticos do estator e rotor. Em regime permanente, o circuito equivalente por fase, como mostrado na Figura 1, representa em condições nominais de operação, as quedas das tensões internas no motor, as perdas por efeito Joule e a potência mecânica de saída no eixo do motor para uma dada velocidade mecânica. Com os parâmetros do circuito equivalente do MIT, podem-se determinar as correntes de cada ramo do circuito, as perdas, a energia armazenada no campo magnético e a potência desenvolvida no eixo da máquina, e com essas informações de todos os MIT pode-se determinar um circuito equivalente para a máquina agregada, como mostrado na Figura 2.

Figura 1: Circuito equivalente do MIT.



Fonte: IEEE-112 [2].

Figura 2: Circuito equivalente do MIT agrupado.



III. METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DO MIT EQUIVALENTE

Para obter-se o MIT equivalente, agrupam-se "n" MIT's de um barramento de mesma tensão e frequência em um MIT equivalente que atenda a mesma corrente e potência mecânica do grupo de "n" MIT's. Para conseguir os parâmetros do MIT agregado adotou-se o método de conservação de energia, que consiste em obter a mesma potência dissipada por efeito Joule nos elementos resistivos e a mesma potência armazenada nos elementos indutivos de cada elemento do circuito equivalente e de cada MIT conectado ao barramento. Para obter-se os parâmetros do

circuito equivalente do MIT agrupado, adota-se como sendo verdadeiro que a soma das correntes de cada elemento de cada MIT como sendo a corrente que passa no elemento do circuito do MIT equivalente, como apresentado nas equações dadas por:

$$I_1^{agr} = \sum_{i=1}^n I_{li} \quad (A) \quad (1)$$

$$I_{fe}^{agr} = \sum_{i=1}^n I_{fei} \quad (A) \quad (2)$$

$$I_m^{agr} = \sum_{i=1}^n I_{mi} \quad (A) \quad (3)$$

$$I_2^{agr} = \sum_{i=1}^n I_{2i} \quad (A) \quad (4)$$

Para obter-se R_1^{agr} , X_1^{agr} , R_{fe}^{agr} , X_m^{agr} , R_2^{agr} , X_2^{agr} e R_S^{agr} do MIT equivalente, utiliza-se as equações dadas por:

$$R_1^{agr} = \frac{\sum_{i=1}^n [R_{li} |I_{li}|^2]}{|I_1^{agr}|^2} \quad (\Omega) \quad (5)$$

$$X_1^{agr} = \frac{\sum_{i=1}^n [X_{li} |I_{li}|^2]}{|I_1^{agr}|^2} \quad (\Omega) \quad (6)$$

$$R_{fe1}^{agr} = \frac{\sum_{i=1}^n [R_{fei} |I_{fei}|^2]}{|I_{fe}^{agr}|^2} \quad (\Omega) \quad (7)$$

$$X_m^{agr} = \frac{\sum_{i=1}^n [X_{mi} |I_{mi}|^2]}{|I_m^{agr}|^2} \quad (\Omega) \quad (8)$$

$$R_2^{agr} = \frac{\sum_{i=1}^n [R'_{2i} |I_{2i}|^2]}{|I_2^{agr}|^2} \quad (\Omega) \quad (9)$$

$$X_2^{agr} = \frac{\sum_{i=1}^n [X'_{2i} |I_{2i}|^2]}{|I_2^{agr}|^2} \quad (\Omega) \quad (10)$$

$$R_S^{agr} = \frac{\sum_{i=1}^n [R_{Si} |I_{2i}|^2]}{|I_2^{agr}|^2} \quad (\Omega) \quad (11)$$

Para obter-se o escorregamento, momento de inércia e o número de polos do MIT equivalente, utilizam-se as equações dadas por:

$$P_{PCR} = 3|I_{2i}|^2 (R'_{2i} + R_{Si}) \quad (W) \quad (12)$$

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} |V_L| |I_{Li}| FP_i \quad (W) \quad (13)$$

$$P_{PCE} = 3|I_{li}|^2 R_{li} \quad (W) \quad (14)$$

$$P_{NU} = 3|I_{fei}|^2 R_{fei} \quad (W) \quad (15)$$

$$s^{agr} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{PCRi}}{\sum_{i=1}^n [P_{3\phi i} - P_{PCEi} - P_{NUi}]} \quad (p.u.) \quad (16)$$

$$p^{agr} = \frac{120f \sum_{i=1}^n (P_{meci})}{\sum_{i=1}^n [N_{Si} (P_{meci})]} \quad (17)$$

$$J^{agr} = \frac{\sum_{i=1}^n (J_i N_{Si}^2)}{(N_S^{agr})^2} \quad (kg.m^2) \quad (18)$$

IV. OBTENÇÃO DO MIT EQUIVALENTE

Para obtenção do MIT equivalente, foram utilizados os dados de placa e os parâmetros do circuito equivalente dos MIT's obtidos por ensaios em laboratório utilizando as normas de especificação (IEC 60034-1 / ABNT NBR 17094-1) e ensaios (IEC 60034-2 / ABNT NBR 17094-3) cordialmente fornecidos pela WEG S/A, conforme apresentado nas Tabelas I, II e III.

Tabela I: Dados dos MIT's WEG

MIT	Pmec (kW/Hp)	p	I _L	η(%)	FP	N _R	s(%)
M1	7,5/10	4	14,7	92	0,84	1765	1,94
M2	11/15	4	21,8	92,4	0,83	1760	2,22
M3	75/100	4	140	95,5	0,85	1780	1,11

Fonte: WEG [3].

Tabela II: Dados dos MIT's WEG

MIT	R ₁ (Ω)	R' ₂ (Ω)	R _{fe} (Ω)	R _S (Ω)
M1	1,1664	0,7447	2784,538	0,2376
M2	0,767	0,5173	1912,589	0,1725
M3	0,0571	0,0374	462,7432	0,0192

Fonte: WEG [3].

Tabela III: Dados dos MIT's WEG

MIT	X ₁ (Ω)	X' ₂ (Ω)	X _m (Ω)	J (kg.m ²)
M1	3,0190	3,5491	93,8908	0,0563
M2	2,0461	2,5075	65,6592	0,0672
M3	0,3223	0,4970	10,8168	1,01

Fonte: WEG [3].

Utilizando-se as equações apresentadas outrora, obtém-se os parâmetros do circuito equivalente do MIT agregado. Para

fins de comparação, foram calculados os erros relativos, a potência mecânica de saída, a potência aparente, a potência ativa, a potência reativa, a corrente de linha, e fator de potência do barramento de “n” MIT’s e do MIT agregado conforme mostrado nas Tabelas IV e V. Sendo que a tensão de linha do barramento é de 380V e a frequência de 60Hz, e foi permitido como limite os erros relativos de até 5% em todos os parâmetros calculados. Nas Tabelas IV e V, compreende-se como MITagr o agrupamento dos motores M1, M2 e M3 da Tabela I.

Tabela IV: Dados do motor agregado

Parâmetros	MIT _{agr}
R_1^{agr} (Ω)	0,055953
X_1^{agr} (Ω)	0,25501
L_1^{agr} (H)	0,00067643
R_2^{agr} (Ω)	0,036694
X_2^{agr} (Ω)	0,37571
L_2^{agr} (H)	0,00099661
X_m^{agr} (Ω)	8,4513
L_m^{agr} (H)	0,022418
R_{fe}^{agr} (Ω)	328,6375
R_S^{agr} (Ω)	0,016393
s^{agr} (%)	1,318
p^{agr}	4
J^{agr} ($kg \cdot m^2$)	1,1335

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela V: Potências e fator de potência do barramento de “n” motores e do motor agregado, e erros relativos.

Cálculos	MIT _{agr}
P_{mec}^{bar} (kW)	95,188
$S_{3\phi}^{bar}$ (kVA)	118,023
$P_{3\phi}^{bar}$ (kW)	99,4486
$Q_{3\phi}^{bar}$ (kvar)	63,5564
I_L^{bar} (A)	179,3175
FP^{bar} (p.u.)	0,84262
P_{mec}^{agr} (kW)	95,1774
$S_{3\phi}^{agr}$ (kVA)	118,0184
$P_{3\phi}^{agr}$ (kW)	99,4
$Q_{3\phi}^{agr}$ (kvar)	63,5613
I_L^{agr} (A)	179,3105
FP^{agr} (p.u.)	0,84258
Erro $S_{3\phi}$ (%)	0,0039001
Erro $P_{3\phi}$ (%)	0,0086249
Erro $Q_{3\phi}$ (%)	0,007667
Erro I_L (%)	0,0039001
Erro FP (%)	0,004725
Erro P_{mec} (%)	0,011103

Fonte: Elaborado pelo autor.

V. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Foram realizadas simulações computacionais no software MATLAB/Simulink®, como mostrado no sistema da Figura 3, onde foram comparados os torques, as potências mecânicas, as potências ativas, as potências reativas e as correntes do grupo de “n” motores e do motor equivalente. O grupo de motores e o motor equivalente estão em regime permanente (a vazio) e passa por um regime transitório ($t = 0.6(s)$) quando é aplicada a carga nominal no eixo dos motores.

A Figura 4 apresenta a curva transitória do torque de saída do grupo de motores (em azul) e do motor equivalente (em vermelho), onde ocorre o pico transitório de torque do grupo

de motores de 744,4(Nm) em 0,641(s) e do motor agregado de 771,8(Nm) em 0,641(s).

Figura 3: Diagrama multifilar do grupo de motores e do motor equivalente em um barramento.

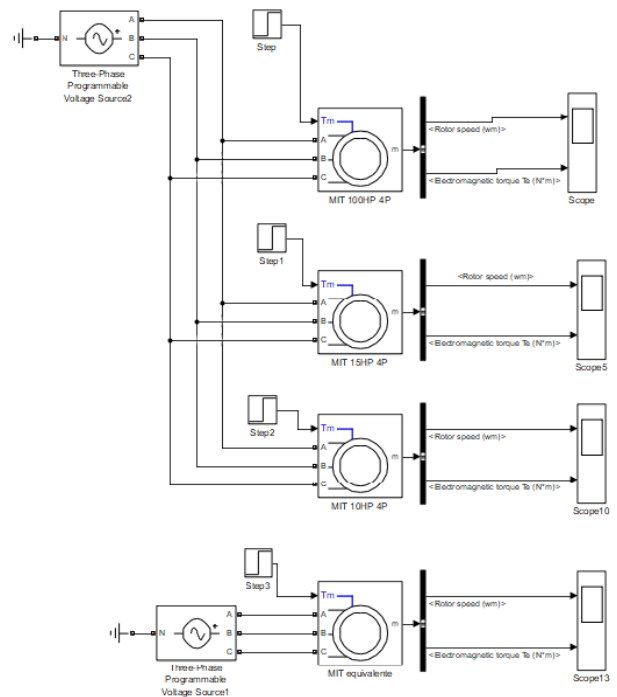
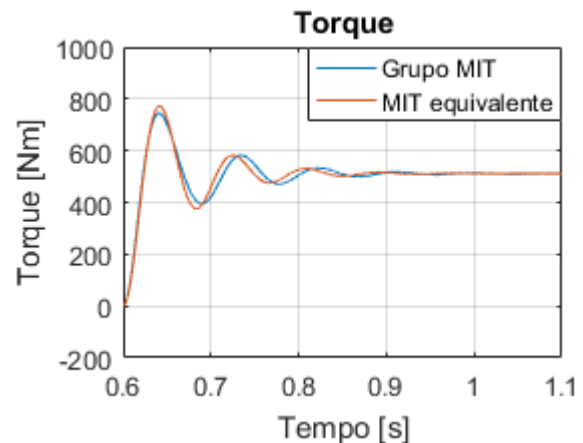


Figura 4: Torque.



Já na Figura 5 é apresentada a curva transitória da potência mecânica de saída do grupo de motores (em azul) e do motor equivalente (em vermelho), onde ocorre o pico transitório da potência mecânica do grupo de motores de 187,2(HP) em 0,641(s) e do motor agregado de 194,0(HP) em 0,642(s).

A Figura 6 apresenta a curva transitória da potência ativa do grupo de motores (em azul) e do motor equivalente (em vermelho), onde ocorre o pico transitório da potência ativa do grupo de motores de 143,4(kW) em 0,641(s) e do motor agregado de 148,9(kW) em 0,641(s).

A Figura 7 apresenta a curva transitória da potência reativa do grupo de motores (em azul) e do motor equivalente (em vermelho), onde ocorre o pico transitório da

potência reativa do grupo de motores de 68,46(kVAr) em 0,652(s) e do motor agregado de 68,03(kVAr) em 0,653(s).

A Figura 8 apresenta a curva transitória da corrente RMS do grupo de motores (em azul) e do motor equivalente (em vermelho), onde ocorre o pico transitório da corrente do grupo de motores de 136,7(A) em 0,651(s) e do motor agregado de 140,5(A) em 0,651(s).

Figura 5: Potência mecânica.

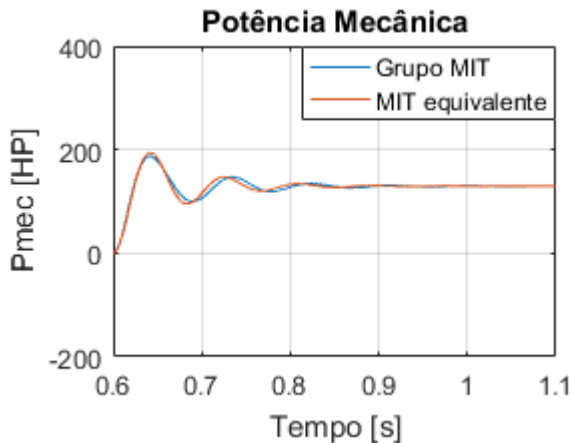


Figura 6: Potência ativa.

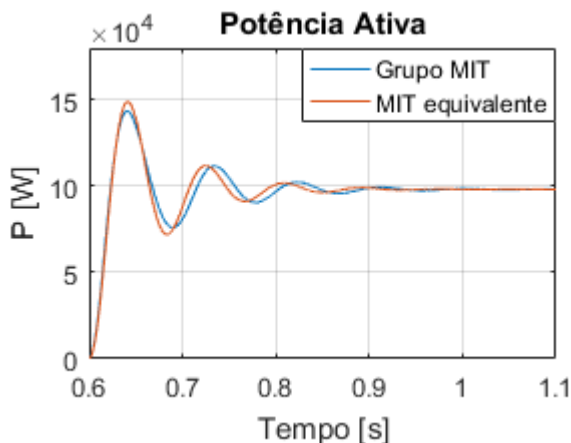


Figura 7: Potência reativa.

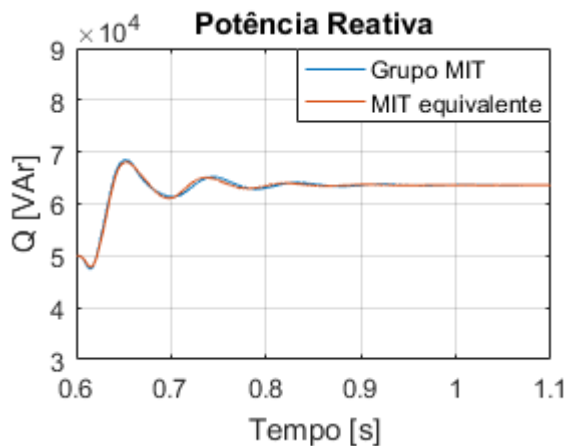
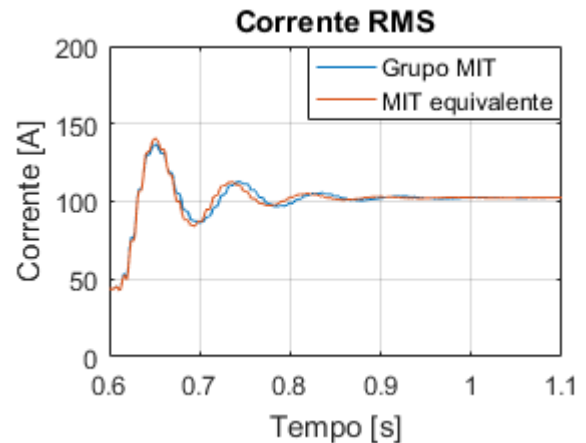


Figura 8: Corrente elétrica.



VI. CONCLUSÕES

Este trabalho descreveu uma metodologia para a agregação de um grupo de motores de indução trifásico para fins de redução de recursos computacionais, uma vez que a fonte “enxerga” esse grupo de motores como um motor equivalente. Ressalvando que essa metodologia é utilizada para análise e simulações de distúrbios causados em barramentos ou à montante deles e não para uma máquina específica ao agrupamento dos motores. Os resultados obtidos mostraram a eficiência desta metodologia, que apresentou um erro relativo máximo de 0,011103%.

REFERÊNCIAS

- [1] FERREIRA, C.A. (Coord.), Motor elétrico Premium, Rio de Janeiro, Eletrobras, 2016. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/>. Acesso em: 05 de jul.2018.
- [2] IEEE, 112-2017 - IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=8291808>. Acesso em: 05 de jul. 2018.
- [3] WEG S/A, Folha de dados: Motor Trifásico de Indução - Rotor de Gaiola. Propriedade WEG S/A, 2018.
- [4] Aree, P. Aggregating method of induction motor group using energy conservation law, 2013.
- [5] Kunakorn, A.; Banyatnopparat,T., Representation of a Group of Three-phase Induction Motors Using Per Unit Aggregation Model , 2009. Disponível em: http://www.ipstconf.org/papers/Proc_IPST2009/09IPST041.pdf. Acesso em: 05 de jul. 2018.
- [6] Stevenson, W. D., Elementos de análise de sistemas de potência, 2a ed., São Paulo, 1986.
- [7] Chapman, S. J., Fundamentos de máquinas elétricas, 5ªed., Porto Alegre, 2013.