

Avaliação dos Impactos de Modelos de Máquina de Indução Trifásica no Fluxo de Potência Multifásico

Fernando R. M. S. Costa*, Antônio S. C. Martins **
Leandro R. Araujo***, Débora R. R. P. Araujo****

*Universidade Federal de Juiz de Fora
Juiz de Fora, Brasil (e-mail: fernando.costa@engenharia.uff.br)

** Universidade Federal de Juiz de Fora

Juiz de Fora, Brasil (e-mail: antonio.sobrinho@engenharia.uff.br)

*** Departamento de Energia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora,
Juiz de Fora, Brasil (e-mail: leandro.araujo@uff.edu.br)

**** Departamento de Energia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora,
Juiz de Fora, Brasil (e-mail: debora.rosana@uff.edu.br)

Abstract: Induction machines are widely used to drive loads in industrial environments and are increasingly being used as generators in distributed generation (DG) projects due to the increasing technological development in this area. Thus, the correct modeling of this equipment for power flow studies, both for the machine operating as motor or generator, is extremely important. This article aims to establish comparisons between models of induction motors in analysis in steady state regime, explaining the impacts of a more detailed modeling in relation to the representation commonly used in the literature. The three-phase power flow is used as a simulation tool in this work and was solved using the N-Phase Conductor Current Injection Method. The study was done based on unbalanced distribution systems. To validate the desired purposes, analysis were performed on the test-feeders IEEE 4 Node System, IEEE 13 Node System and IEEE 34 Node System, with different levels of imbalance.

Resumo: As máquinas de indução são largamente empregadas para acionamento de cargas em ambientes industriais e, atualmente, têm sido cada vez mais utilizadas como geradores em projetos de geração distribuída (GD), devido ao crescente desenvolvimento tecnológico nessa área. Dessa forma, a modelagem correta deste equipamento, tanto para a máquina operando como motor ou gerador, é de extrema importância. O presente artigo objetiva estabelecer comparações acerca de modelos para motores de indução em análises em regime permanente, explicitando os impactos de uma modelagem mais detalhada em relação à representação comumente usada na literatura. O Fluxo de Potência Trifásico é utilizado como ferramenta de simulação neste trabalho e foi solucionado por meio do Método de Injeção de Correntes a N Condutores. O estudo foi feito tendo como base sistemas de distribuição desequilibrados. Para validação dos propósitos desejados, foram realizadas análises nos sistemas IEEE 4 barras, IEEE 13 barras e IEEE 34 barras, com diferentes níveis de desequilíbrio.

Keywords: Induction machines; three-phase power flow; distribution systems; current injection method.

Palavras-chaves: Máquina de Indução; fluxo de potência trifásico; sistemas de distribuição; método de injeção de correntes.

1. INTRODUÇÃO

Os Sistemas de Distribuição (SD) são desequilibrados devido à própria assimetria das redes e à distribuição de cargas entre as fases. Quando são realizados estudos de fluxo de potência, a consideração dos SD como equilibrados resulta em erros significativos, principalmente quando existem altos níveis de desequilíbrio (Penido *et al.*, 2010). Portanto, é imprescindível que as redes e os demais componentes elétricos sejam modelados adequadamente, objetivando análises mais precisas. Nesse sentido, é interessante a representação correta

também do motor de indução, à medida que tal elemento constitui uma grande parcela das cargas dos SD.

A modelagem de motores de indução em métodos de fluxo de potência desequilibrado não é muito apresentada na literatura. A grande maioria dos autores e casos de *benchmark* considera a modelagem de motores de forma bem simples. Na literatura, é comum ver sua representação como carga do tipo ‘potência constante’, como carga do tipo ‘impedância constante’ ou ainda como uma composição destas.

A representação do motor de indução como ‘potência constante’ tende a ser mais imprecisa à medida que o desequilíbrio aumenta, uma vez que sua demanda de potência pode não ser igual para as três fases. Por outro lado, a modelagem via impedância determinada através de um escorregamento constante, como visto em Kersting e Rathbun (2000), pode também não exprimir a realidade de forma conveniente, visto que não é usual a especificação de um escorregamento que traduz uma situação prática (Kocar *et al.*, 2018).

Alguns autores apresentaram trabalhos relacionados a alguma dessas abordagens na questão das máquinas de indução em SD considerando estudos de fluxo de potência. Em Amber *et al.* (2014) é proposta a representação da máquina por meio de cargas do tipo ‘potência constante’, distribuídas igualmente entre as fases. Dessa forma, o fluxo é calculado levando em consideração esses elementos nos circuitos de sequência da máquina. O resultado é depois convertido para as coordenadas de fase. Contudo, os resultados podem apresentar erros em situações de desequilíbrio.

Em Kersting e Carr (2006) é utilizado um circuito equivalente em regime permanente para calcular as impedâncias dos circuitos de sequência da máquina. Com esses dados, é possível determinar as correntes nos terminais do motor e utilizá-las para a resolução do fluxo de potência em sistemas desequilibrados. Mas o modelo é fixo e não leva em conta as condições operativas dos motores.

Em Penido *et al.* (2006) são realizados estudos de fluxo de potência em sistemas desequilibrados que contêm máquinas de indução. São introduzidas equações de controle que permitem especificar escorregamento, potência elétrica ou potência mecânica. No primeiro caso, a sua modelagem se reduz a uma matriz de admitâncias constante e nos demais o escorregamento não é fixado, tornando-se uma variável de estado. Estudos comparativos entre os diversos modelos de motores não foram realizados.

Já em Kocar *et al.* (2018), é apresentada uma outra forma de calcular as injeções de correntes referentes à máquina de indução. O equacionamento é baseado no circuito equivalente de regime permanente e que difere da proposta por Kersting e Carr (2006). A diferença em relação aos modelos citados anteriormente está no cálculo das impedâncias dos circuitos de sequência da máquina. Os autores sugerem que o escorregamento seja considerado uma variável de estado para a obtenção de melhores resultados. Assim, como em Penido *et al.* (2006), estudos comparativos com os modelos comumente utilizados não foram realizados, não sendo possível verificar os erros aferidos, especialmente em condições de desequilíbrio.

Tendo em vista o cenário descrito, a contribuição do presente trabalho é estabelecer comparações entre o modelo do motor de indução proposto em Kocar *et al.* (2018) com aqueles vistos de forma mais comum na literatura (‘potência constante’ e ‘impedância constante’). Para este artigo foram realizados 36 testes, considerando diferentes casos de desequilíbrio, modelagens do motor e topologias de redes.

Além desta seção introdutória, o artigo está dividido em cinco partes: a seção 2 trata da modelagem do motor de indução; a seção 3 apresenta a formulação do problema e na seção 4 são discutidos os procedimentos adotados para a realização dos testes; a seção 5 é responsável por apresentar os resultados das simulações propostas e a seção 6 encerra o trabalho com as conclusões obtidas.

2. MODELAGENS DO MOTOR DE INDUÇÃO

Essa seção tem como objetivo descrever as diferentes modelagens do motor utilizadas nesse trabalho.

2.1 Modelagem Convencional

Chama-se de “modelagem convencional” a mais vista na literatura. Trata-se da utilização dos modelos de carga ‘potência constante’ e ‘impedância constante’ para a modelagem de motores de indução. Ambos podem ser introduzidos no equacionamento do fluxo de potência trifásico por meio do modelo exponencial. Um elemento de carga S_{km} conectado entre os nós k e m pode ser expresso pela seguinte equação, denotada por (1).

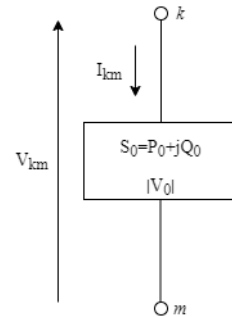


Fig. 1 Representação do elemento carga.

$$S_{km} = P_0 \left(\frac{|V_{km}|}{|V_0|} \right)^\alpha + jQ_0 \left(\frac{|V_{km}|}{|V_0|} \right)^\beta \quad (1)$$

As grandezas P_0 e Q_0 são as potências ativa e reativa nominais da carga, V_{km} é a tensão entre os nós aos quais a carga está conectada e V_0 é a tensão nominal. Os expoentes α e β traduzem o tipo de carga. Quando ambos são nulos, a carga é do tipo ‘potência constante’. Quando eles assumem valores quadráticos, representam uma ‘impedância constante’. Nesse trabalho, são utilizados esses dois tipos de representação. As injeções de corrente podem ser determinadas, conforme a equação (2).

$$I_{km} = \left(\frac{S_{km}}{V_{km}} \right)^* \quad (2)$$

Além disso, P_0 e Q_0 são os valores de consumo de potência do motor quando submetido a tensão V_0 . Na maioria dos modelos a potência total trifásica é dividida igualmente pelas três fases.

2.2 Modelagem de Kocar *et al.* (2018)

A modelagem apresentada por Kocar *et al.* (2018) é baseada na determinação das impedâncias de sequência do motor. Portanto, a notação Z_1 , Z_2 e Z_0 está atrelada às impedâncias de sequência positiva, negativa e zero, respectivamente. Já as impedâncias de sequência da máquina são calculadas através de seu modelo de regime permanente. Um circuito equivalente da máquina de indução é visto na Fig. 2.

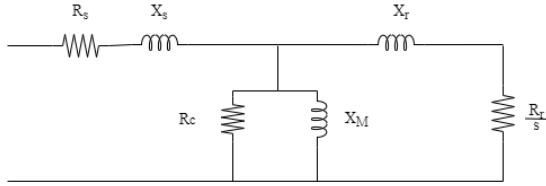


Fig. 2 Circuito equivalente da máquina de indução.

$$Z_1(s) = R_s + jX_s + \frac{1}{\frac{1}{k_1(s)} + \frac{1}{R_c} - \frac{j}{X_M}} \quad (3)$$

$$Z_2(s) = R_s + jX_s + \frac{1}{\frac{1}{k_2(s)} + \frac{1}{R_c} - \frac{j}{X_M}} \quad (4)$$

Nas equações (3) e (4), R_s é a resistência do estator, X_s é a reatância de dispersão do estator, R_c é a resistência do núcleo e X_M é a reatância de magnetização. Os fatores k_1 e k_2 são funções do escorregamento s , definidas pelas equações (5) e (6). Nessas equações, R_r e X_r são, respectivamente, a resistência e reatância de dispersão do rotor.

$$k_1 = \frac{R_r}{s} + jX_r \quad (5)$$

$$k_2 = \frac{R_r}{2-s} + jX_r \quad (6)$$

A impedância Z_0 para esse trabalho é nula, pois foram considerados casos nos quais o motor está conectado em delta.

Após a determinação das impedâncias de sequência, é possível calcular as injeções de corrente em componentes de fase, conforme equação (7). Nela, $\mathbf{T}$ é a matriz de transformação de componentes simétricas de Fortescue.

$$[\mathbf{I}_{abc}] = [\mathbf{T}][\mathbf{Z}_{012}]^{-1}[\mathbf{T}]^{-1}[\mathbf{V}_{abc}] \quad (7)$$

3. EQUACIONAMENTO PARA O ESTUDO

Neste trabalho, o fluxo de potência trifásico é utilizado como ferramenta de solução dos sistemas em regime permanente, especialmente para analisar os impactos dos modelos de motor de indução. Assim, neste trabalho o fluxo de potência trifásico foi formulado como um sistema não-linear, utilizando as equações do Método de Injeção de Correntes a N Condutores (Penido *et al.*, 2010), considerando a possibilidade de modelagem de motores de indução. As variáveis de estado são as componentes reais e imaginárias dos fasores de tensão de cada nó, a potência tanto ativa quanto reativa da barra de referência e o escorregamento da máquina, quando necessário.

As equações que compõem o sistema não-linear a ser resolvido são expressas de forma genérica por (8) e (9), onde $\mathbf{I}_k$ são as injeções de corrente para cada nó k , $\mathbf{V}_{RE_k}$ e $\mathbf{V}_{IM_k}$ são as componentes real e imaginária de cada tensão nodal, $\mathbf{P}_i$ e $\mathbf{Q}_i$ são as potências da barra de referência, s é o escorregamento da máquina, que só é considerado na modelagem de Kocar *et al.* (2018), e $\mathbf{g}$ são as equações de controle.

$$\mathbf{I}_k(\mathbf{V}_{RE_k}, \mathbf{V}_{IM_k}, \mathbf{P}_i, \mathbf{Q}_i, s) = 0 \quad (8)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{V}_{RE_k}, \mathbf{V}_{IM_k}, \mathbf{P}_i, \mathbf{Q}_i, s) = 0 \quad (9)$$

No caso particular das máquinas de indução, o equacionamento adotado para suas injeções de corrente é o visto na seção 2, dependendo da modelagem desejada.

Além disso, foi inserida também uma equação adicional de controle da potência ativa de entrada do motor, expressa por (10).

$$P_{ESP}^{in} - P_{CALC}^{in} = 0 \quad (10)$$

Em tal equação, P_{ESP}^{in} é a potência ativa especificada e P_{CALC}^{in} é a potência calculada para o motor, determinada por meio da equação (11).

$$P_{CALC}^{in} = \text{Re}([\mathbf{V}_m^{abc}]^t * [\mathbf{Y}_{abc}(s)] * [\mathbf{V}_m^{abc}]^*) \quad (11)$$

Nessa equação, $[\mathbf{V}_m^{abc}]$ é o vetor de tensões dos nós aos quais o motor está conectado e $[\mathbf{Y}_{abc}(s)]$ é a matriz de admitâncias do motor, cujos elementos dependem do escorregamento s . Essa equação pode ser encontrada em Penido *et al.* (2006).

4. TESTES

As simulações para validação dos modelos foram realizadas no software Matlab[®]. Os testes foram divididos em grupos, de acordo com as condições operativas. Foram realizadas simulações em três topologias: IEEE 4 barras, IEEE 13 barras e IEEE 34 barras (IEEE, 2019).

Foram considerados quatro casos de desequilíbrio. Na primeira situação, todas as linhas são trifásicas e equilibradas, com as cargas se distribuindo igualmente entre as fases. Trata-se do caso 'Equilibrado', denotado por EQ. O segundo caso apresenta ramais monofásicos, linhas desequilibradas e um maior nível de desequilíbrio das cargas entre as fases. Este último cenário citado apresenta as configurações de rede semelhantes aos casos desequilibrados vistos em IEEE (2019). Trata-se do caso 'Desequilibrado', denotado por DES. No terceiro caso, todas as cargas conectadas nos nós de fase A foram reduzidas em 10% em relação ao caso anterior, enquanto as de fase C foram acrescidas de 10%. Trata-se do caso DES10%. De modo similar, foi simulado o caso DES20%, considerando situação semelhante, porém com um desbalanço de 20% em tais fases.

Por fim, foram testadas três modelagens diferentes para o motor de indução: através do equacionamento mais detalhado (Kocar *et al.*, 2018), por meio de uma carga do tipo 'potência constante' e através de uma 'impedância constante'.

É importante destacar que, para todos os casos simulados, a potência ativa trifásica de entrada de cada motor foi especificada, lembrando que no modelo Zcte há uma variação quadrática desta potência com a tensão. Nos casos em que há a modelagem com o escorregamento, este é considerado uma variável de estado do problema. Dessa forma, todos os valores de escorregamento mostrados na seção 5 são os valores obtidos por meio da solução do sistema não-linear de equações baseado no modelo de Kocar *et al.* (2018). No caso da modelagem por ‘potência constante’ as potências totais trifásicas ativas e reativas do motor são especificadas, tendo como base os valores trifásicos obtidos através da simulação com o modelo que considera o escorregamento, e foram distribuídas igualmente entre as fases.

Todas essas situações são independentes entre si, sendo simuladas todas as combinações possíveis de topologias, casos de desequilíbrio e modelagens do motor. A Fig. 3 demonstra de forma visual as configurações consideradas.

No total foram feitos 36 testes.

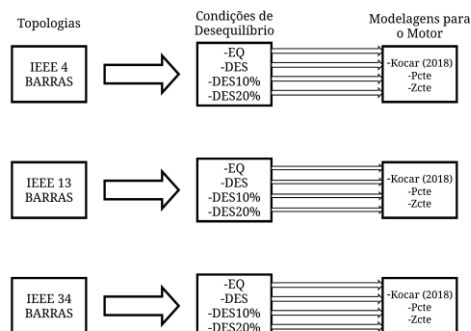


Fig. 3 Fluxograma com as condições dos testes.

Por questões de espaço, foram escolhidos alguns resultados de alguns testes para reportar. As principais análises objetivadas neste trabalho podem ser vistas nos resultados que serão mostrados e também foram verificadas de forma semelhante em todos os outros testes realizados.

Ressalta-se que os casos em que o perfil de tensão não se enquadrava nos limites impostos pelo PRODIST (ANEEL, 2018) foram realizadas compensações com reativos, sempre com o cuidado de realizar esse processo igualmente para as diferentes modelagens do motor, para que fosse possível realizar as comparações de maneira correta.

5. RESULTADOS

Os parâmetros das máquinas utilizadas nas simulações estão dispostos nas Tabelas 1 e 2. Os dados foram baseados em Kocar *et al.* (2018).

Nos resultados as diferentes modelagens serão indicadas respectivamente por Pcte, Zcte (que são também chamadas convencionais) e Motor (que considera o escorregamento, sendo considerada o padrão de comparação).

Tabela 1. Parâmetros dos Motores Utilizados - Potências

Topologia	Potência Nominal [kVA]	Potência Controlada [kW]
IEEE 4 Barras	1200	1000
IEEE 13 Barras	1200	1000
IEEE 34 Barras	660	400

Tabela 2. Parâmetros dos Motores de Indução

Tensão Nominal [V]	480
Resistência do Estator [pu]	0,0053
Reatância do estator [pu]	0,1060
Resistência do Rotor [pu]	0,0070
Reatância do Rotor [pu]	0,1200
Retância de Magnetização [pu]	4,0000

5.1 IEEE 4 Barras – Caso Desequilibrado (DES)

Na Fig. 4 é mostrado o primeiro sistema trabalhado.

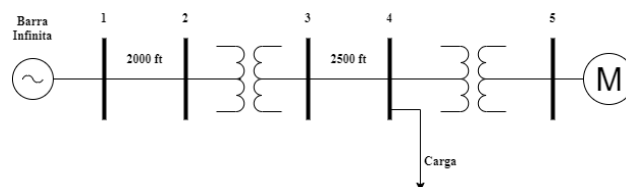


Fig. 4 Sistema IEEE 4 barras modificado.

Trata-se de um sistema cujo carregamento total, sem levar em consideração o motor, é de 1275 kW, 1800 kW e 2375 kW, respectivamente, nas fases A, B e C. Foi adicionada uma barra extra para ser conectada a máquina de indução.

O escorregamento obtido utilizando o equacionamento da seção 3 para esse caso foi 0,7172%.

Ao se utilizar uma modelagem convencional, são cometidas imprecisões em relação à modelagem de Kocar *et al.* (2018). Foram constatados erros associados aos cálculos de tensão, corrente, potência ativa e reativa. O gráfico mostrado na Fig. 5 demonstra essa disparidade. Decidiu-se representar a variação da potência reativa requerida pelo motor. As demais grandezas possuem discrepâncias análogas.

Na Fig. 5, a barra em azul corresponde à potência reativa demandada pelo motor quando a modelagem segue as equações de Kocar *et al.* (2018). Já a barra laranja está atrelada a sua representação como ‘potência constante’. Por fim, a barra cinza traduz o caso no qual o motor é representado por uma ‘impedância constante’. É possível perceber que, mediante desequilíbrio, as duas últimas modelagens são insatisfatórias.

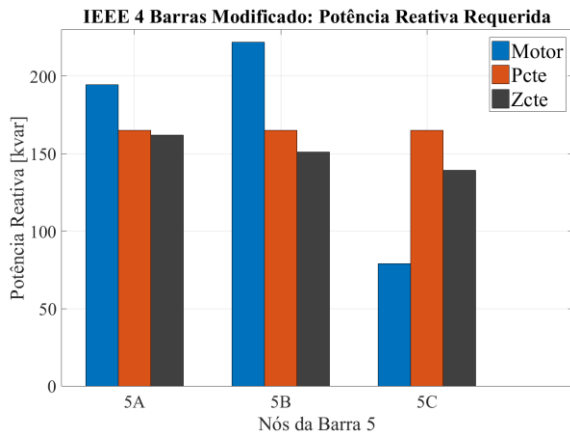


Fig. 5 Potência reativa requerida para o motor no caso IEEE 4 barras modificado.

5.2 IEEE 13 Barras – Caso Desequilibrado (DES)

Tem-se na Fig. 6 o sistema IEEE 13 barras, modificado com a adição de barras extras para incluir os motores de indução.

O carregamento do sistema no seu caso desequilibrado é de 1175 kW, 1039 kW e 1252 kW nas fases A, B e C, respectivamente. Além da carga citada, foram incluídos quatro motores de indução.

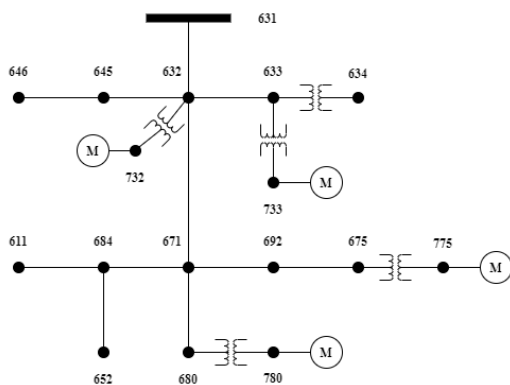


Fig. 6 Sistema IEEE 13 barras modificado.

Os escorregamentos obtidos utilizando o equacionamento da seção 3 para esse caso foram 0,6754%, 0,6839%, 0,7587% e 0,7576%, respectivamente, para os motores conectados às barras 732, 733, 775 e 780.

De forma análoga ao caso anterior, foram feitas comparações para avaliar os resultados dos casos nos quais o motor é modelado como ‘potência constante’ ou como ‘impedância constante’.

É possível perceber que os erros cometidos ao modelar o motor de forma simplificada, e até mesmo inadequada para vários estudos, são significativos. Aqui, optou-se por representar o perfil de tensão. As variações das demais grandezas apresentam disparidades semelhantes.

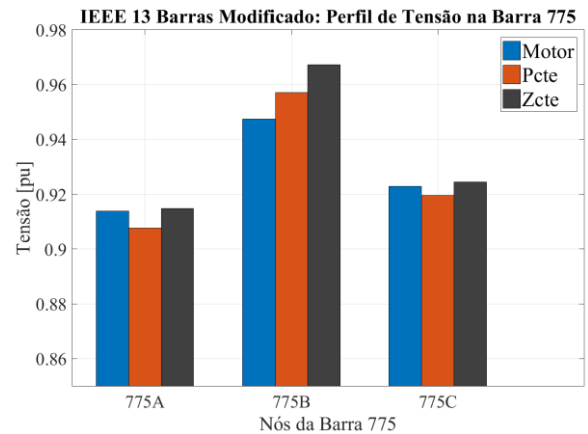


Fig. 7 Perfil de tensão na barra 775 no caso IEEE 13 barras modificado.

5.3 IEEE 34 Barras – Caso Desequilibrado (DES)

Na Fig. 8 é apresentada o sistema IEEE 34 barras com as modificações adotadas para incluir os motores de indução adicionais. Trata-se de uma topologia cuja carga total é de 471 kW, 449 kW e 444 kW, respectivamente, nas fases A, B e C, sem considerar os motores.

Os escorregamentos obtidos utilizando o equacionamento da seção 3 para esse caso foram 0,5246% e 0,4714%, respectivamente, para os motores conectados às barras 948 e 990.

Mais uma vez é possível verificar diferenças consideráveis dependendo da modelagem empregada para o motor. Isso pode ser visto, por exemplo, no gráfico apresentado na Fig. 9.

As grandezas elétricas do sistema se mostram diferentes nos resultados por intermédio de modelagens distintas. Essas diferenças tendem a crescer com a complexidade do sistema e com o nível de desequilíbrio, como será visto na seção seguinte.

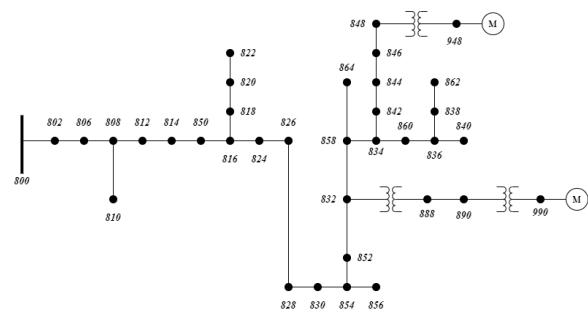


Fig. 8 Sistema IEEE 34 barras modificado.

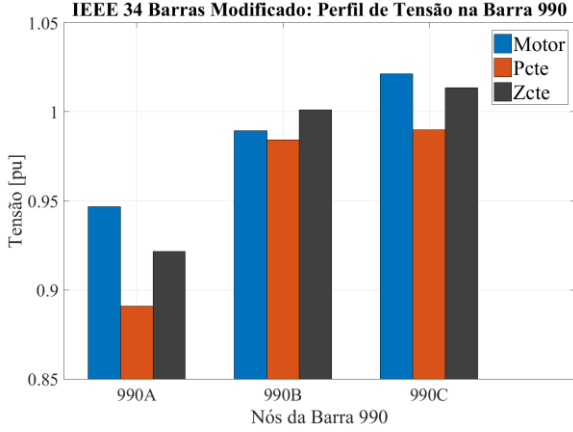


Fig. 9 Perfil de tensão na barra 990 no caso IEEE 34 barras modificado.

5.4 Análise Mediante Diferentes Níveis de Desequilíbrio

Essa subseção objetiva comparar de forma ampla os 36 casos simulados, investigando o impacto da modelagem dos motores em situações diversas, seja por meio de topologias diferentes ou por níveis de desequilíbrio distintos. Para ajudar a estabelecer um critério qualitativo, foram criadas duas variáveis auxiliares, uma para caracterizar o erro da modelagem ‘potência constante’ e outra para o mesmo propósito, porém considerando ‘impedância constante’. As definições das variáveis são expressas pelas equações (12) e (13). Considera-se a modelagem que tem o escorregamento como variável de estado como a mais detalhada e esta será comparada com as convencionais.

$$\epsilon_{P_i}^v = \left(\frac{|V_M^i - V_P^i|}{|V_M^i|} \right) * 100\% \quad (12)$$

$$\epsilon_{Z_i}^v = \left(\frac{|V_M^i - V_Z^i|}{|V_M^i|} \right) * 100\% \quad (13)$$

A primeira variável, $\epsilon_{P_i}^v$, qualifica o erro da tensão do nó i entre a modelagem mais detalhada, designada pelo subscrito M, em relação a uma carga ‘potência constante’, indicada pelo subscrito P. A segunda variável, $\epsilon_{Z_i}^v$ é análoga à primeira, porém se refere ao erro apresentado pela modelagem ‘impedância constante’. Foram criadas mais duas variáveis auxiliares com funções semelhantes, porém responsáveis por medir os erros existentes nas correntes. São denominadas $\epsilon_{P_j}^i$ e $\epsilon_{Z_j}^i$ e computam os erros de correntes em todos os ramos j considerados. Dessa forma, forma-se um banco de dados com todos os erros cometidos em tensão e corrente, nas três topologias consideradas e com os quatro casos de desequilíbrio.

Logo, é possível construir um gráfico que relaciona os erros máximos que podem ser cometidos ao adotar determinada modelagem para o motor de indução e em determinada topologia. Tais dados foram contemplados nos gráficos apresentados na Fig. 10.

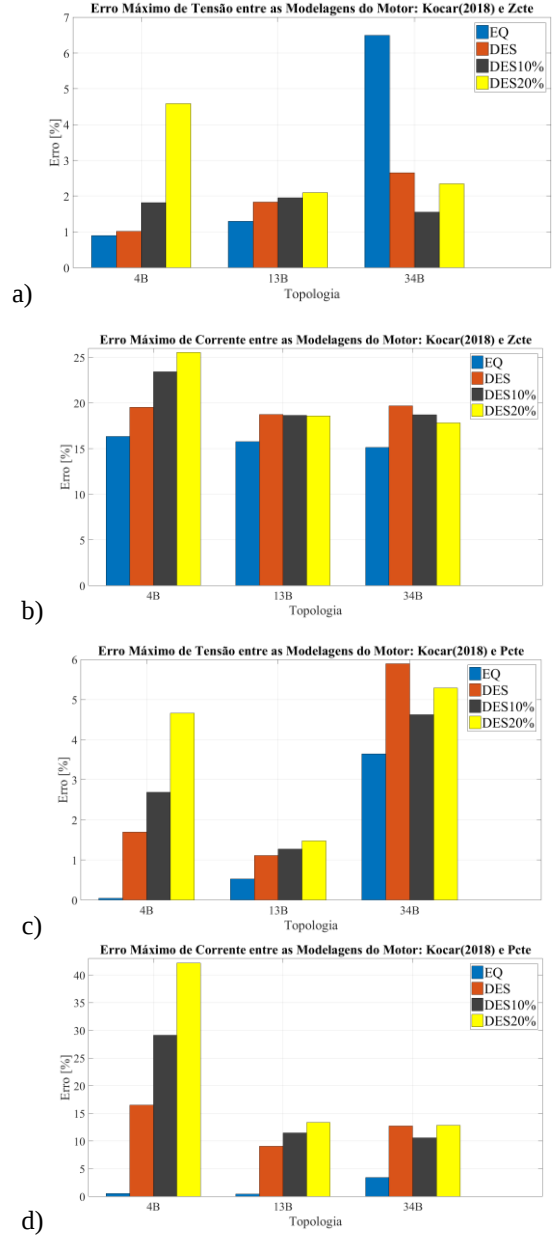


Fig. 10 Erros máximos cometidos de: (a) tensão pelo modelo ‘impedância constante’; (b) corrente pelo modelo ‘impedância constante’; (c) tensão pelo modelo ‘potência constante’; (d) corrente pelo modelo ‘potência constante’.

A partir da análise da Fig. 10 é possível concluir que, quando o motor é modelado como impedância ou como potência constante, os erros tendem a crescer com a complexidade do sistema e com o nível de desequilíbrio. Os erros, nesse caso, podem ser próximos de 40%, o que traduz uma imprecisão altamente significativa.

Posteriormente, são apresentados dois gráficos com a evolução do consumo de potência ativa por fase do motor, à medida que o desequilíbrio do sistema vai aumentando. Tal situação é comparada com aquelas em que o motor é modelado via ‘potência constante’ ou ‘impedância constante’. Os casos escolhidos para retratar foram IEEE 13 barras

modificado, no motor da barra 775, fase A, e IEEE 34 barras modificado, no motor da barra 990, fase A.

Esses gráficos levam a um entendimento visual da variação da potência ativa consumida pelo motor à medida que o nível de desequilíbrio aumenta. Isto inviabiliza as modelagens convencionais, principalmente ‘potência constante’, que considera a distribuição de potência de maneira igualitária entre as fases.

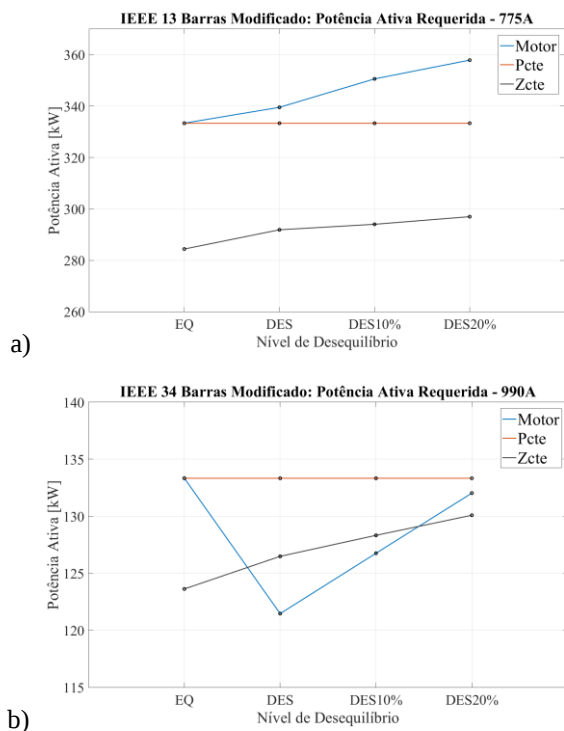


Fig. 11 Evolução da potência consumida pelo motor para diferentes condições de desequilíbrio para: (a) IEEE 13 barras; (b) IEEE 34 barras.

Por fim, são apresentados os gráficos com a variação do escorregamento à medida que o desequilíbrio aumenta. Foram escolhidas novamente as topologias de 13 barras e 34 barras para representar tal comportamento.

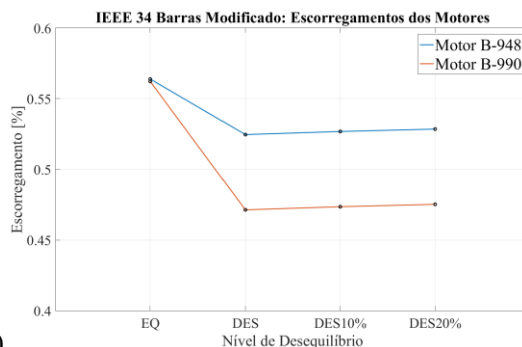
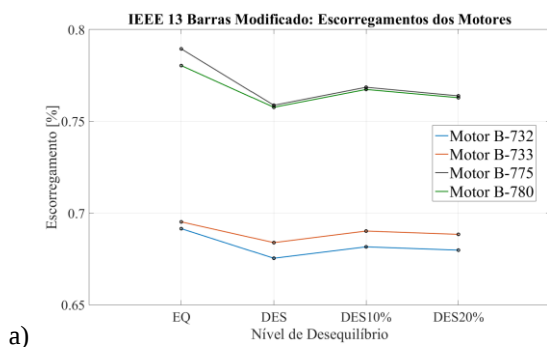


Fig. 12 Evolução do escorregamento dos motores para diferentes condições de desequilíbrio para: (a) IEEE 13 barras; (b) IEEE 34 barras.

6. CONCLUSÃO

Os motores de indução são equipamentos de grande importância na análise de redes, devido a sua grande disseminação e aplicabilidade, sobretudo em sistemas de distribuição. Entretanto, deve-se compreender a natureza de cada modelo adotado para representar a máquina, de acordo com o propósito desejado.

É comum sua representação por meio de cargas do tipo ‘potência constante’ ou ‘impedância constante’. Todavia, dependendo da análise requerida, tais modelos podem ser não ser suficientemente precisos.

Foi realizada a implementação de um modelo mais completo para representá-lo e foram feitas comparações críticas acerca dos mais usuais na literatura. Foi constatado que existem erros inerentes à modelagem, e, além disso, tais discrepâncias crescem à medida que a complexidade do sistema aumenta. Dois fatores preponderantes para o incremento do erro analisado são o número de barras do sistema e o nível de desequilíbrio.

Quanto maiores os desequilíbrios do sistema maiores as diferenças nos resultados em relação aos diferentes modelos.

Isso realça a importância de contemplar modelos mais precisos nos estudos elétricos. Em diversas aplicações são necessárias análises com maior exatidão, sobretudo em SD e em sistemas industriais, onde tais cargas são abundantes.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a CNPq, CAPES, FAPEMIG, INERGE e ao PPEE/UFJF.

REFERÊNCIAS

Amber, L., Ortmeier, T. H. & McGrath, P., 2014. Modeling Induction Machines and Core-form Transformers in Unbalanced Distribution Circuits. *2014 IEEE PES General Meeting Conference & Exposition*, July, pp. 1-5.

ANEEL, 2018. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST*, s.l.: s.n.

IEEE, 2019. *IEEE PES AMPS DSAS Test Feeder Working Group*,. [Online]. Available at: <https://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>

Kersiting, W. H. & Carr, W., 2006. Induction Machine Phase Frame Model. *IEEE-PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, pp. 568-574.

Kersting, W. H. & Rathbun, J. S., 2000. The Analysis of an Ungrounded Wye-Delta Transformer Bank Serving an Induction Motor and Single-Phase Lighting Loads. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 36(No. 1), pp. 39-45.

Kocar, I., Karaagac, U., Mahseredjian, J. & Cetindag, B., 2018. Multiphase Load-Flow Solution and Initialization of Induction Machines. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 33, pp. 1650-1658.

Penido, D. R. R., Araujo, L. R., Carneiro, S. & Pereira, J. L. R., 2006. Unbalanced Three-Phase Distribution System Load-flow Studies Including Induction Machines. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, June, pp. 1-5.

Penido, D. R. R., Araujo, L. R., Pereira, J. L. R. & Carneiro Jr, S., 2010. Metodologia para Análise de Sistemas Elétricos a N Condutores Pelo Método de Injeção de Correntes. *Revista Controle & Automação*, pp. 308-321.

Viawan, F. A. & Karlsson, D., 2007. Combined Local and Remote Voltage and Reactive Power Control in the Presence of Induction Machine Distributed Generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22(No. 4), pp. 2003-2012.