



**GRUPO IV**

**GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA (GAT)**

**MITZIT: UMA ABORDAGEM ALTERNATIVA PARA A MODELAGEM DINÂMICA DA CARGA**

Cláudio Ferreira\*      Germano Lambert Torres      Alexandre P. Alves da Silva

EFEI - Escola Federal de Engenharia de Itajubá

**RESUMO**

Os motores de indução normalmente constituem a grande maioria das cargas industriais, o que mostra a importância de um modelo específico para este tipo de carga. Na literatura se encontram muitos artigos nos quais as cargas com características dinâmicas (motores) são agregadas em um modelo simples de motor de indução, ou em um modelo que combina uma carga estática com motor de indução. Este artigo apresenta um modelo dinâmico de motor de indução agregado com uma carga estática ZIP (impedância, corrente e potência), sendo o modelo do motor de indução desenvolvido com uma maior ou menor precisão. Os resultados obtidos com este modelo serão comparados com o modelo ZIP e com um modelo denominado LINEAR.

**PALAVRAS-CHAVE**

Modelagem de carga, Estabilidade, Motor de Indução

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O motor de indução, dentre os motores de corrente alternada, é o de mais extenso uso (estima-se que cerca de 90% dos motores fabricados sejam deste tipo). Muitos programas computacionais existentes de transitórios eletromecânicos tem a opção de representar este elemento com uma maior ou menor precisão. Também são encontrados na literatura muitos artigos nos quais as cargas que apresentam características dinâmicas são agregadas em um modelo de motor de indução [1], ou em um modelo que combina uma carga estática com motor de indução [2-4]. Uma série grande de artigos também apresentam técnicas para agregação de motores de indução em uma unidade equivalente [5].

Este artigo apresenta um modelo de carga dinâmico, denominado MITZIP, o qual agrega um motor de indução (característica dinâmica da carga) com uma carga estática ZIP (impedância-corrente-potência constante).

Na seção 2 é apresentado o equacionamento do motor de indução e a influência de seus parâmetros na potência elétrica de entrada do mesmo. Na seção 3 é desenvolvido o modelo MITZIP, enquanto na seção 4 é apresentados os resultados obtidos com este modelo em comparação com os modelos ZIP e LINEAR. Finalmente, na seção 5 são listadas as conclusões obtidas deste trabalho.

**2.0 - MOTOR DE INDUÇÃO**

Resumidamente o motor de indução é constituído de duas partes principais: o estator e o rotor. O estator constitui a parte fixa e o rotor a parte móvel. Tanto o estator como o rotor apresentam estruturas magnéticas cilíndricas e simétricas. Também os enrolamentos do estator e do rotor são iguais entre si e igualmente defasados. Teoricamente qualquer um dos dois enrolamentos, do estator ou do rotor, pode constituir o enrolamento primário, mas por motivos práticos quase todos os motores de indução são construídos com o enrolamento primário no estator e o secundário no rotor. Para que se possa representar matematicamente o motor de indução as seguintes hipóteses serão adotadas:

os três enrolamentos do estator e do rotor iguais entre si e igualmente defasados eletricamente.

o entreferro considerado constante.

o circuito magnético considerado ideal portanto, não existindo saturação.

a distribuição da densidade do fluxo magnético no entreferro radial e senoidal.

as perdas magnéticas por histerese e Foucault desprezadas.

A seguinte expressão de tensão pode ser escrita para o estator ( S ) e rotor ( R ):

$$[ v_{dS} ] = [ R_S ] [ i_{dS} ] + \frac{d [ \mathbf{f}_{dS} ]}{dt} \quad (1)$$

$$[ v_{qS} ] = [ R_S ] [ i_{qS} ] + \frac{d [ \mathbf{f}_{qS} ]}{dt}$$

sendo  $\mathbf{f}_S$  e  $\mathbf{f}_R$  os fluxos concatenados do estator e do rotor.

Transformando para os eixos d e q as equações resultam em:

$$v_{dS} = R_S i_{dS} - \omega_s \mathbf{f}_{qS} + \frac{d \mathbf{f}_{dS}}{dt}$$

$$v_{qS} = R_S i_{qS} + \omega_s \mathbf{f}_{dS} + \frac{d \mathbf{f}_{qS}}{dt} \quad (2)$$

$$v_{dR} = R_R i_{dR} - s \omega_s \mathbf{f}_{qR} + \frac{d \mathbf{f}_{dR}}{dt}$$

$$v_{qR} = R_R i_{qR} + s \omega_s \mathbf{f}_{dR} + \frac{d \mathbf{f}_{qR}}{dt}$$

A relação entre os fluxos concatenados e a corrente são:

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_{dS} &= L_S i_{dS} + L_M ( i_{dS} + i_{dR} ) \\ \mathbf{f}_{qS} &= L_S i_{qS} + L_M ( i_{qS} + i_{qR} ) \\ \mathbf{f}_{dR} &= L_R i_{dR} + L_M ( i_{dS} + i_{dR} ) \\ \mathbf{f}_{qR} &= L_R i_{qR} + L_M ( i_{qS} + i_{qR} ) \end{aligned} \quad (3)$$

onde:

$R_S$  - resistência ôhmica do estator.

$R_R$  - resistência ôhmica do rotor.

$L_S$  - indutância de dispersão do estator.

$L_R$  - indutância de dispersão do rotor.

$L_M$  - indutância mútua entre o estator e o rotor.

$s$  - escorregamento, dado por:

$$s = \frac{\omega_S - \omega_R}{\omega_S} \quad (4)$$

sendo:

$\omega_S$  - velocidade angular do campo magnético do estator (velocidade síncrona).

$\omega_R$  - velocidade angular elétrica do rotor.

As equações diferenciais que descrevem o motor de indução são:

$$\frac{d \mathbf{f}_{dS}}{dt} = v_{dS} + \omega_s \mathbf{f}_{qS} - \frac{R_S L_{RR}}{K} \mathbf{f}_{dS} + \frac{R_S L_M}{K} \mathbf{f}_{dR}$$

$$\frac{d \mathbf{f}_{qS}}{dt} = v_{qS} - \omega_s \mathbf{f}_{dS} - \frac{R_S L_{RR}}{K} \mathbf{f}_{qS} + \frac{R_S L_M}{K} \mathbf{f}_{qR}$$

$$\frac{d \mathbf{f}_{dR}}{dt} = v_{dR} + s \omega_s \mathbf{f}_{qR} - \frac{R_R L_{SS}}{K} \mathbf{f}_{dR} + \frac{R_R L_M}{K} \mathbf{f}_{dS}$$

$$\frac{d \mathbf{f}_{qR}}{dt} = v_{qR} - s \omega_s \mathbf{f}_{dR} - \frac{R_R L_{SS}}{K} \mathbf{f}_{qR} + \frac{R_R L_M}{K} \mathbf{f}_{qS} \quad (5)$$

onde:

$$L_{SS} = L_S + L_M$$

$$L_{RR} = L_R + L_M$$

$$K = L_S L_R - L_M^2$$

(6)

A equação de oscilação dinâmica do rotor é dada por:

$$\frac{d \omega_r}{dt} = - \frac{ds}{dt} = \frac{1}{2H} [ T_E - T_M ] \quad (7)$$

onde:

$H$  - constante de inércia do motor.

$T_E$  - torque elétrico do motor:

$$T_E = \mathbf{f}_{qR} i_{dR} - \mathbf{f}_{dR} i_{qR} \quad (8)$$

$T_M$  - conjugado resistente da carga aplicada ao motor, normalmente uma função da velocidade do rotor, podendo ser representada por:

$$T_M = T_w \omega_r^m = T_s s^m \quad (9)$$

onde o expoente da carga  $m$  depende do tipo da carga que está acoplada ao motor. Já que a maioria das cargas mecânicas acionadas pelo motor apresentam conjugados cujos expoentes de carga são iguais a 0, 1 ou 2, tem-se:

$$T_M = T_0 ( A \omega_r^2 + B \omega_r + C ) = T_0 ( a s^2 + b s + c ) \quad (10)$$

onde os coeficientes  $A$ ,  $B$  e  $C$  (ou  $a$ ,  $b$  e  $c$ ) dependem do tipo da carga a ser acionada.

Das expressões acima pode-se obter para o motor de indução um circuito elétrico equivalente em regime permanente [6], onde os parâmetros já foram definidos anteriormente.

Normalmente os enrolamentos do rotor são curto-circuitados, ou seja,  $\dot{V}_R = 0$ . No circuito elétrico acima, foi representado uma resistência de perdas no ferro  $R_m$ , referentes as perdas por histerese e Foucault

(hipótese adotada). Normalmente, esta perda é muito pequena e portanto desprezada.

Os dados de entrada para o modelo de carga elétrica representado por um motor de indução são a tensão e a frequência do barramento onde a carga está conectada. É importante analisar a influência destes elementos na potência ativa e reativa consumidas pelo motor de indução que nada mais são do que as potências ativa e reativa da carga do barramento no qual se deseja obter o modelo.

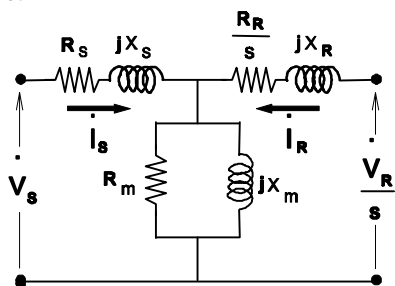


FIGURA 1 - Circuito elétrico equivalente do motor de indução

Pode-se observar que a frequência do barramento não influi significativamente nas potências ativa e reativa consumidas pelo motor. Já a tensão do barramento apresenta uma influência bem maior. Para a potência ativa a influência da tensão diminui para baixos valores de escorregamento. Já para a potência reativa a influência do escorregamento é pequena.

Como na obtenção do modelo de carga representativo por um motor de indução são necessários estimar os parâmetros do mesmo, torna-se necessário analisar a influência desses parâmetros na potência consumida pelo motor. As figuras 2 a 6 ilustram a influência dos parâmetros do motor nas potências ativa e reativa consumidas pelo mesmo para vários valores de escorregamento. Para baixos valores de escorregamento a variação dos parâmetros não é significativo para as potências ativa e reativas consumidas, sendo maior a influência na potência reativa. A medida que o escorregamento cresce a influência dos parâmetros também aumenta principalmente na faixa dos valores normais dos parâmetros do motor de indução.

### 3.0 - MODELO AGREGADO MITZIP

A divisão da carga elétrica em seus componentes individuais é uma tarefa muito difícil de ser realizada, o que leva a se tentar obter um modelo agregado, resultante a composição dos mais variados modelos de carga. O modelo desenvolvido neste item, denominado MITZIP, agrega o modelo do motor de indução (MIT) com o modelo de carga ZIP, tentando englobar todos os tipos de cargas.

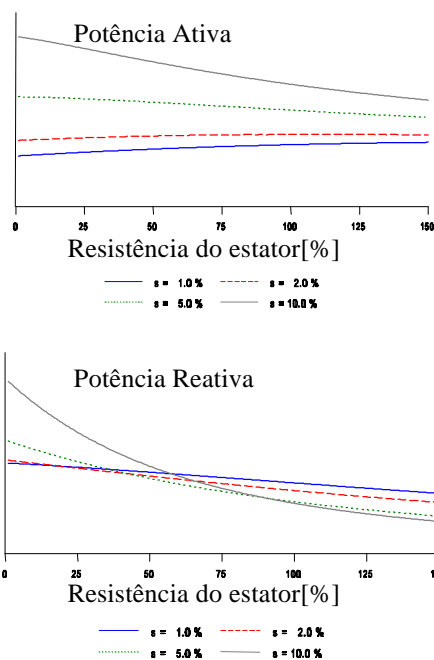


FIGURA 2 - Influência da resistência do estator

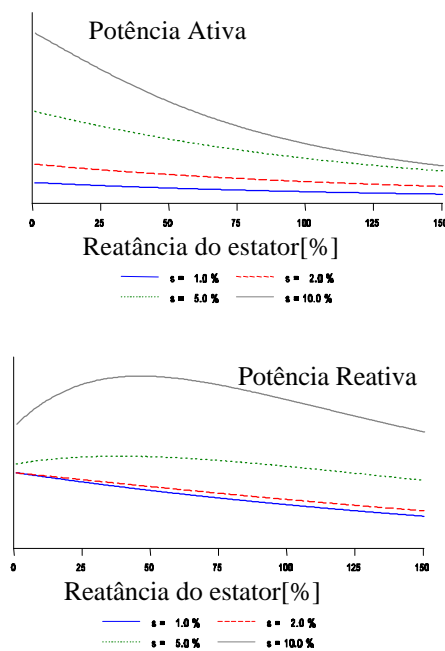
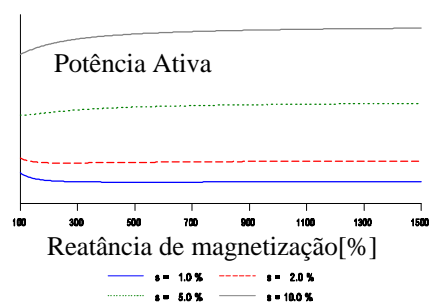


FIGURA 3 - Influência da reatância do estator



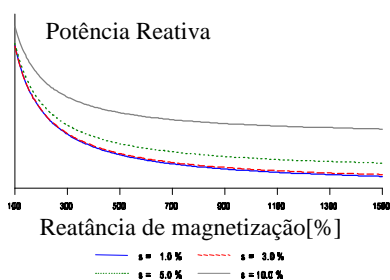


FIGURA 4 - Influência da reactância de magnetização

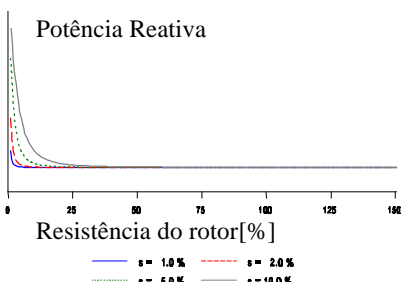
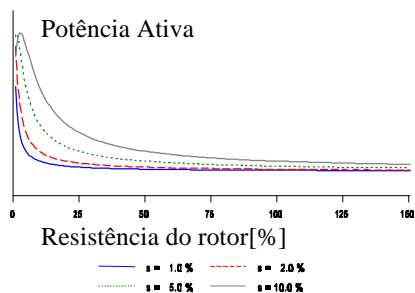


FIGURA 5 - Influência da resistência do rotor

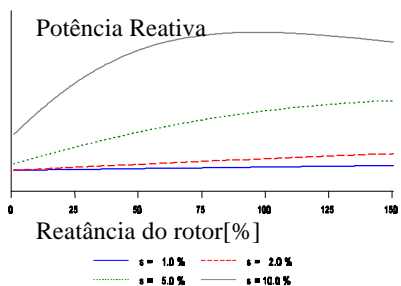
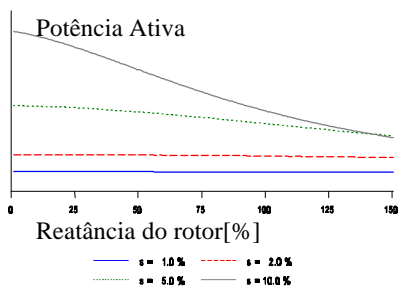


FIGURA 6 - Influência da reactância do rotor

O modelo de carga ZIP, por si só, já é um modelo que agrega as cargas de impedância, corrente e potência constantes, que são cargas passivas. O modelo do

motor de indução representa as cargas ativas, ou seja, aquelas que possuem dinâmica (influência de inércia e de constantes de tempo). A figura 7 ilustra este modelo:

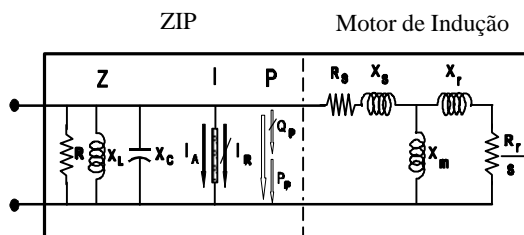


FIGURA 7 - Modelo agregado MITZIP

Para obter os parâmetros deste modelo (14 parâmetros) pode-se utilizar de vários métodos. Foi utilizado o método de recozimento simulado [7], que é um método baseado em uma busca heurística.

O transitório no motor de indução pode ser modelado com maior ou menor complexidade, dependendo de simplificações feitas no equacionamento:

modelo de quinta ordem - utilizam as 4 equações do fluxo concatenado (equação 5) e a equação de oscilação mecânica (equação 7).

modelo de terceira ordem - são desprezados os transitórios do estator. Utilizam as equações do fluxo concatenado do rotor (equação 5) e a equação de oscilação mecânica (equação 7).

modelo de primeira ordem - são desprezados os transitórios elétricos do estator e do rotor. O motor é considerado em regime permanente eletromagnético. É utilizada a equação de oscilação mecânica (equação 7).

Para os testes do modelo MITZIP foram modelados os barramentos de uma SE em 138 kV, compostas de cargas predominantemente industriais, através de dados coletados de distúrbios (selecionadas 18 perturbações) ocorridas na mesma. Para treinamento do modelo foram utilizados 12 distúrbios e para testes 6. O número de padrões correspondentes aos 12 distúrbios para treinamento é da ordem de 900, sendo gasto em torno de 90 minutos de simulação para se obter os parâmetros do modelo MITZIP, através do processo de recozimento simulado, em um computador Pentium de 166 MHz.

#### 4.0 – TESTES REALIZADOS

Vários testes foram realizados com o modelo MITZIP. Serão apresentados aqui somente dois distúrbios para a potência ativa e um para a potência reativa.

Serão desenvolvidos para cada grupo de distúrbios nove modelos agregados MITZIP, ou seja, os modelos motor de indução (MIT), motor de indução agregado a

uma carga de impedância constante (Z + MIT) e motor de indução agregado a uma carga de impedância-corrente-potência constantes (ZIP + MIT). Os modelos usados para o motor de indução são os de primeira, terceira e quinta ordens.

Os distúrbios selecionados para análise serão testados com todos os modelos desenvolvidos e escolhido para comparação com os modelos ZIP e LINEAR [8,9] aquele que apresentar o menor erro médio durante todo o transitório.

Para o primeiro caso de potência ativa a variação dos níveis de tensão e frequência foram de cerca de 10.5% e 1.2%, respectivamente. Para o modelo MITZIP o que apresentou o melhor comportamento foi o MIT + ZIP com modelo do motor de indução de primeira ordem, denominado MITZIP1. As respostas dos modelos de carga estão apresentadas na figura 8.

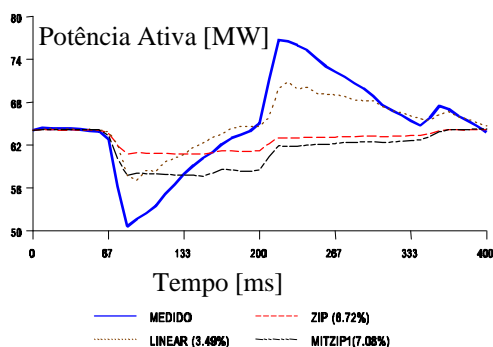


FIGURA 8 - Potência ativa para o primeiro distúrbio

Pode-se observar que o modelo MITZIP1 apresenta o pior comportamento dentre os modelos analisados, sendo muito parecido como o do modelo ZIP. Isto é devido que a variação percentual da potência ativa registrada no distúrbio foi muito maior que a variação de tensão, não conseguindo o modelo MITZIP1 reproduzir esta situação visto que o mesmo é muito dependente da tensão.

Para o segundo caso de potência ativa o distúrbio é caracterizado por uma variação de tensão e frequência da ordem de 5.1% e 0.5% respectivamente. A figura 9 apresenta os resultados obtidos com os modelos de carga.

Como pode ser observado os modelos ZIP e MITZIP1 fornecem resultados muito pobres, se comparados com o modelo LINEAR.

Para o terceiro distúrbio analisado a variação no nível de tensão é de cerca de 9.9%, sendo a variação de frequência desprezível. A figura 10 apresenta a curva de tensão correspondente

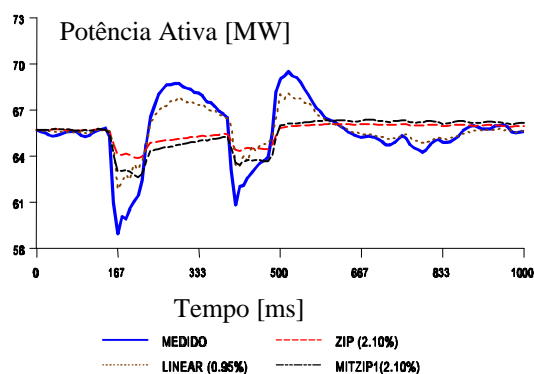


FIGURA 9 - Potência ativa para o segundo distúrbio

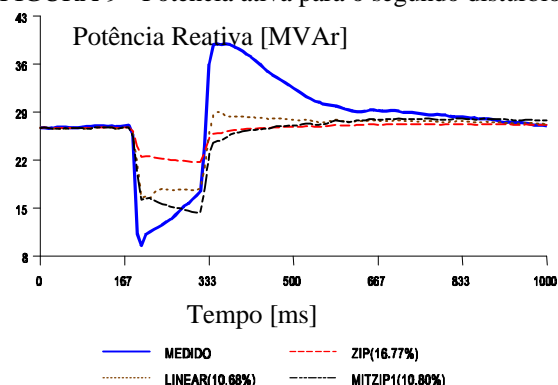


FIGURA 10 - Tensão para o terceiro distúrbio

A figura 11 apresenta os resultados obtidos para o terceiro distúrbio analisado.

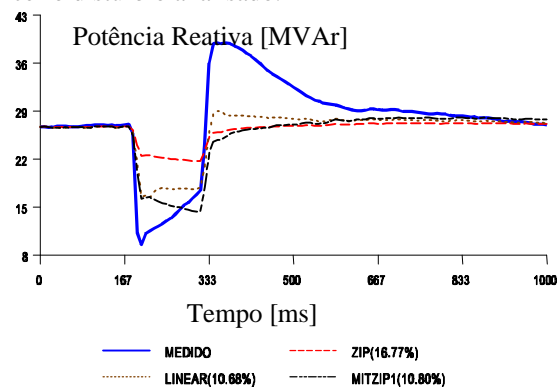


FIGURA 11 - Potência reativa para o terceiro distúrbio

Neste distúrbio o modelo MITZIP apresentou um comportamento melhor do que o modelo ZIP. Como o modelo MITZIP1 tenta acompanhar o comportamento da tensão, como pode ser observado na figura 12, ele apresentou um melhor desempenho no início do transitório (entre 200 e 350 ms) e no final do mesmo (após 550 ms), onde a potência reativa observada no transitório apresenta o mesmo comportamento que a tensão. Entre 350 e 550 ms ocorre uma grande oscilação de potência reativa sem que haja a correspondente oscilação de tensão. Neste período ocorrem os maiores erros de potência ativa entre o modelo MITZIP1 e os valores observados

Para o quarto distúrbio analisado as variações dos níveis de tensão (figura 12) e de frequência são de cerca de 5.5% e 0.87%, respectivamente. As respostas dos modelos da carga estão apresentadas na figura 13.

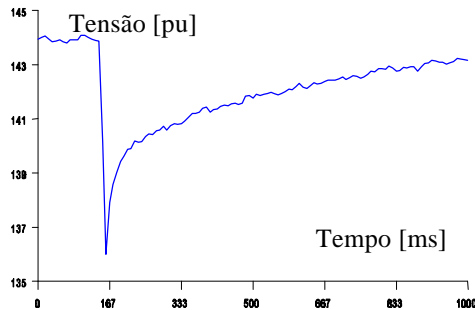


FIGURA 12 - Tensão para o quarto distúrbio

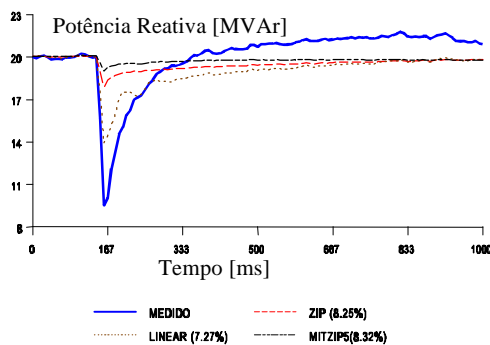


FIGURA 13 - Potência reativa para o quarto distúrbio

O modelo MITZIP5 apresenta o menor erro dentro os modelos de carga baseados em um motor de indução, mas a potência oscila pouco durante o transitório. Após o transitório da tensão a potência reativa rapidamente retorna para os níveis normais de regime mas a tensão retorna lentamente para um patamar inferior ao de antes do transitório. O modelo MITZIP5 tenta acompanhar a variação de tensão por isso não consegue reproduzir a potência reativa ficando em um valor inferior ao verificado no distúrbio.

## 5.0 - CONCLUSÕES

Dos testes simulados obtém-se as seguintes conclusões:

- a potência na entrada do motor de indução praticamente não sofre influência da variação da frequência de alimentação. Quanto maior o escorregamento que o motor está operando maior é a influência da tensão de alimentação na potência da entrada do mesmo;
- o desempenho apresentado pelo modelo do motor de indução é melhor a medida que ocorrem oscilações elevadas de tensão no sistema;

- caso as oscilações de tensão e/ou frequência sejam pequenas, não ocorrerão variações significativas no escorregamento e na tensão transitória do motor. Com isso o comportamento do modelo MITZIP se aproxima do comportamento do modelo ZIP;
- as potências ativa e reativa absorvidas pelo motor de indução apresentam acoplamento entre si, ou seja, não são independentes. Ao se obter o modelo MITZIP é considerado as potência ativa e reativa dos padrões de treinamento ao contrário dos demais modelos que não apresentam este acoplamento. Com isso o desempenho do modelo do motor de indução é prejudicado;
- o comportamento do modelo MITZIP é muito próximo do comportamento do modelo ZIP e não é competitivo sempre apresentando um desempenho pior que o modelo LINEAR.

## 6.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores deste artigo gostariam de agradecer ao suporte financeiro dado pela FINEP/RECOPE, FAPEMIG e CNPq, que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

## 7.0 - BIBLIOGRAFIA

- [1] Price, W.W., K.A.Wiragu, A.Murdoch, J.V.Mitache, E.Vashedi, M.A.El-Kady, 1988. "Load Modeling for Power Flow and Transient Stability Computer Studies", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 3, nº 1, february, 180-187.
- [2] Sabir, S.A.Y., D.C.Lee, 1982. "Dynamic Load Models Derived from Data Acquired During System Transients", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, PAS-101, nº 9, september, 3365-3372.
- [3] Rogers, G.J., J.Di Manno, R.T.H.Alden, 1984. "An Aggregate Induction Motor Model for Industrial Plants", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, PAS-103, nº 4, April 1984, pag. 683-690.
- [4] Wong, K.P., W.D.Humpage, T.T.Nguyen, K.K.K.Ho, 1985. "Dynamic Load Model Synthesis", IEE Proceedings, Vol. 132, Parte C, nº 4, july, 179-188.
- [5] Franklin D.C., A.Morelato, 1994. "Improving Dynamic Agrregation of Induction Motor Models", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, nº 4, november, 1934-1941.
- [6] Krause, P.C., 1986. *Analysis of Electric Machinery*, McGraw-Hill, Inc.
- [7] Rich E., K.Knight, 1994. *Inteligência Artificial*, 2ª Edição, Makron Books do Brasil Editora Ltda.
- [8] Dovan, T., T.S.Dillon, C.S.Berger, K.E.Forward, 1987. "A Microcomputer Based On-Line Identification Approach to Power System Dynamic Load Modelling", IEEE Transaction on Power Systems, PWR-2, nº 3, august, 529-536.
- [9] Valgas H.M., R.G.R.Pinto, C.França, G.Lambert-Torres, A.P.Alves da Silva, R.C.Pires, R.A.Costa Jr., 1994. "Electrical Load Modelling", IV SEPOPE, Foz do Iguaçu.

