

EFEITOS DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA SOBRE A OPERAÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Olívio C. N. Souto (MSc) José C. de Oliveira (PhD) José H. Vilela (MSc) Luciano M. Neto (Dr)

Universidade Federal de Uberlândia
Departamento de Engenharia Elétrica
Av. João Naves de Ávila, 2100 - Uberlândia - MG
Telefone: (034) 236-5099 - email: jcoliveira@ufu.br

Resumo - Este artigo tem por objetivo apresentar as investigações relacionadas com a operação de motores de indução trifásicos, rotor em gaiola, sob condições não ideais de suprimento elétrico, ou seja distorções harmônicas, desequilíbrios, “sag”, “swell”, etc. Os estudos foram conduzidos utilizando-se da modelagem do motor no domínio do tempo e implementada no simulador SABER. Este, por sua vez, fornece como resultados, as formas de onda das diversas grandezas elétricas e/ou mecânicas do motor, as quais foram comparadas com aquelas oriundas da operação do mesmo com tensões puramente senoidais, equilibradas e simétricas. Adicionalmente, procedeu-se ao cálculo dos custos adicionais com a energia elétrica, associados à operação de motores sob as condições operacionais supra citadas.

Palavras-Chave - Qualidade da Energia Elétrica, Motores de Indução Trifásicos, Simulações Computacionais

Abstract - This paper aims to present investigation results related to induction motors operation under non ideal supply conditions. The motors are of squirrel cage type and the non ideal conditions are associated to harmonics, unbalances, voltage sag and swell, etc. The studies are carried out using time domain modelling and the SABER simulator. The computational results compare the non ideal motor performance to the ideal ones so that the real supply conditions effect upon the motor is highlighted. In addition to this, the economic impact of power quality is also considered.

Keywords - Power Quality, Three-Phase Induction Motors, Computational Simulations

1. INTRODUÇÃO

A qualidade da energia elétrica tem assumido uma crescente importância devido a vários fatores, dentre os quais destaca-se a crescente utilização de equipamentos elétricos mais sensíveis à qualidade da energia elétrica de suprimento, o aumento em número e porte de equipamentos responsáveis por perda da qualidade e as exigências maiores quanto a qualidade da energia fornecida aos mais diferentes consumidores. Em decorrência destes fatos, vários estudos, pesquisas e desenvolvimentos tem sido realizados no intuito de conhecer, assegurar ou mesmo melhorar os padrões de qualidade requeridas ao bom funcionamento dos sistemas elétricos, bem como investigar os efeitos sobre os diversos equipamentos presentes nas redes elétricas [1] [2]. Dentro deste contexto, e, reconhecendo-se que cerca de 80% da carga conectada aos sistemas elétricos industriais constitui-se de motores elétricos de indução, torna-se importante investigar o comportamento destes dispositivos quando os mesmos estão sujeitos aos problemas oriundos de uma rede com qualidade comprometida. Assim, a título de exemplo, as referências [3] [4], investigam não somente o comportamento do motor mas também a perda da vida útil destes equipamentos quando sujeitos a tensões distorcidas. No entanto, o

contexto da qualidade da energia elétrica é mais amplo e estende além das questões relacionadas apenas com distorções harmônicas. Desta forma, desequilíbrios, variações de tensão, transitórios, etc., são itens extremamente importantes e que necessariamente devem ser avaliados. Assim, este artigo tem por objetivo investigar o comportamento de motores de indução trifásico, com rotor em gaiola, quando os mesmos estão submetidos à diversas anomalias de suprimento, tais como:

- desvios da forma puramente senoidal;
- desequilíbrios;
- subtensões;
- sobretensões;
- etc.

Para atingir os objetivos acima propostos, é conveniente a modelagem do motor de indução utilizando-se de técnicas no domínio do tempo e, incorporá-la a um programa computacional apropriado. No caso, a escolha recaiu sobre o pacote computacional designado por SABER desenvolvido e distribuído pela empresa norte-americana ANALOGY Inc.

2. MODELAGEM NO DOMÍNIO DO TEMPO

O modelo utilizado nas simulações computacionais é derivado com base nas equações de fluxos enlaçados

nos enrolamentos e a equação de equilíbrio de conjugado. Neste sentido, o modelo matemático é o conhecido modelo “a b c” onde as equações são escritas para uma máquina trifásica equilibrada, resultando, num conjunto de equações diferenciais não lineares que representam a operação da máquina. Cabe ressaltar, que esta estratégia permite a representação trifásica, com as três fases sendo independentemente modeladas, o que conduz a substanciais flexibilidade e versatilidade para os estudos de desempenho dos motores, sob as mais diferentes condições de suprimento.

Equação Elétrica

De acordo com a referência [5], adotando a convenção de receptor e denominando “a, b, c” as fases do estator e “A, B, C” as fases do rotor, pode-se escrever, genericamente:

$$v_i = r_i i_i + \frac{dI_i}{dt} \quad (1)$$

onde:

v_i, i_i : - valores instantâneos da tensão e corrente na fase “i” (i pode ser a, b, c, A, B, C).

λ_i : - fluxo concatenado na fase “i”.

Equação Mecânica

O valor instantâneo do conjugado eletromagnético T pode ser obtido através da variação da coenergia magnética em relação aos deslocamentos angulares mecânicos do rotor. Desta forma, obtém-se como resultado a expressão (2), onde p é o número de polos da máquina.

$$T = \frac{p}{2} \sum_i \sum_j i_i j_j \frac{dL_{ij}}{dq_R} \quad (2)$$

e i_i e i_j são as correntes nos enrolamentos i e j respectivamente, com i e j assumindo os índices a, b, c, A, B, C.

Sistemas de Equações Dinâmicas para a Máquina de Indução Trifásica

Fazendo-se “i” assumir a, b, c, A, B, C, obtém-se, a partir de (1), o sistema de equações, que pode ser colocado na forma matricial (3). Quanto as equações mecânicas da máquina, estas são descritas por (4) e (5).

$$\frac{d[I]}{dt} = [L]^{-1} ([V] - [D][I]) \quad (3)$$

$$\frac{dw_R}{dt} = \frac{p}{j} (T - T_c) \quad (4)$$

$$\frac{dq_R}{dt} = w_R \quad (5)$$

onde:

[L]- diagonal principal $\Rightarrow L_i$ para i = a, b, c, A, B, C;

[D]- $d[L]/dt + R$;

[R]- matriz diagonal das resistências por fase de estator e rotor;

[I] - matriz coluna das correntes das fases a,b,c,A,B, C;

[V]- matrizes coluna das tensões das fases a,b,c,A,B, C;

j - momento de inércia das partes girantes;

T - conjugado eletromagnético dado por (2)

T_c - conjugado de carga em função de w_R

Para o caso particular da máquina equilibrada, a matriz [L] e a equação do conjugado T tornam-se, respectivamente, (6) e (7):

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{SS} + L_S & M_{SS} & M_{SS} & MA_{SR} & MB_{SR} & MC_{SR} \\ M_{SS} & L_{SS} + L_S & M_{SS} & MC_{SR} & MA_{SR} & MB_{SR} \\ M_{SS} & M_{SS} & L_{SS} + L_S & MB_{SR} & MC_{SR} & MA_{SR} \\ MA_{SR} & MC_{SR} & MB_{SR} & L_{RR} + L_R & M_{RR} & M_{RR} \\ MB_{SR} & MA_{SR} & MC_{SR} & M_{RR} & L_{RR} + L_R & M_{RR} \\ MC_{SR} & MB_{SR} & MA_{SR} & M_{RR} & M_{RR} & L_{RR} + L_R \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$T = -L_{SR} \frac{p}{2} \left\{ \begin{array}{l} (i_a i_A + i_b i_B + i_c i_C) \text{sen}(\mathbf{q}_R) \\ + (i_a i_B + i_b i_C + i_c i_A) \text{sen}\left(\mathbf{q}_R + \frac{2p}{3}\right) \\ + (i_a i_C + i_b i_A + i_c i_B) \text{sen}\left(\mathbf{q}_R - \frac{2p}{3}\right) \end{array} \right\} \quad (7)$$

$$M_{SS} = L_{SS} \cos\left(\frac{2p}{3}\right) \quad (8)$$

$$M_{RR} = L_{RR} \cos\left(\frac{2p}{3}\right) \quad (9)$$

$$MA_{SR} = L_{SR} \cos(\mathbf{q}_R) \quad (10)$$

$$MB_{SR} = L_{SR} \cos\left(\mathbf{q}_R + \frac{2p}{3}\right) \quad (11)$$

$$MC_{SR} = L_{SR} \cos\left(\mathbf{q}_R - \frac{2p}{3}\right) \quad (12)$$

onde:

L_S - indutância de dispersão por fase do estator;

L_R - indutância de dispersão por fase do rotor, referida ao estator;

$L_{SR} = L_{RR} = L_{SS} - 2/3$ da indutância de magnetização por fase;

3. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Com vistas a investigar o comportamento de um motor de indução quando o mesmo está submetido a diversas condições de suprimento, utilizou-se do

simulador anteriormente citado. Uma vez implementado a modelagem dinâmica do motor no simulador, procedeu-se aos estudos computacionais com vistas a avaliar o desempenho do dispositivo através da análise das formas de onda de grandezas elétricas e/ou mecânicas, bem como efetuar a determinação da potência ativa de entrada, potência de saída no eixo, fator de potência, etc.

Para os estudos realizados utilizou-se de um motor de indução trifásico com rotor em gaiola cujos dados encontram-se na tabela I.

PARÂMETRO	UNIDADE	VALOR
Potência nominal	cv	100
Tensão nominal	V	440
Tipo de conexão	-	delta
Rotação nominal	rpm	1775
Resistência do estator - R_s	ohms	0,088
Resistência do rotor - R_r	ohms	0,0615
Reatância do estator - X_s	ohms	0,3019
Reatância do rotor - X_r	ohms	0,7397
Reatância de magnetiz. - X_m	ohms	16,26
Resistência de perdas - R_m	ohms	225
Momento de Inércia - J_m	$Kg.m^2$	0,9843
Número de pólos - np	-	4

Tabela I - Parâmetros do Motor de Indução

obs.: o carregamento imposto ao motor nas simulações é da ordem de 50% de sua carga nominal e de característica quadrática.

O objetivo principal dos estudos computacionais é verificar o desempenho do motor de indução quando submetido a diversas condições não ideais de suprimento. Desta forma, apresenta-se na tabela II um resumo dos diversos casos processados.

CASOS	CARACTERÍSTICAS
Caso 1	Motor alimentado por tensões puramente senoidais, equilibradas e simétricas.
Caso 2	Sistema de suprimento com 5% de desequilíbrio.
Caso 3	Sistema de suprimento com 14 % de distorção harmônica de tensão.
Caso 4	Sistema de suprimento apresentando 15% de subtensão.
Caso 5	Sistema de suprimento apresentando 10% de sobretensão.
Caso 6	Sistema de suprimento apresentando 5% de desequilíbrio, 14 % de distorção harmônica e 15% de subtensão.

Tabela II - Principais Casos Processados.

CASO 1

Neste primeiro caso buscou-se analisar a operação do motor de indução quando alimentado com tensões puramente senoidais, equilibradas e simétricas. A análise das formas de onda de correntes, conjugado e velocidade permite obter informações qualitativas e quantitativas do desempenho do motor. A título de ilustração, as figuras de 1 a 4 mostram as formas de onda de tensões, correntes e conjugado (motor e carga). Cabe ressaltar que para esta condição de suprimento elétrico, as formas de onda são amplamente conhecidas.

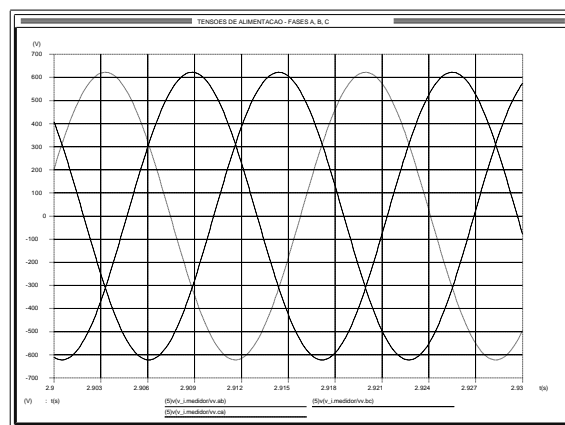


Figura (1) - Tensões fase-neutro de suprimento do motor em regime permanente - Caso 1

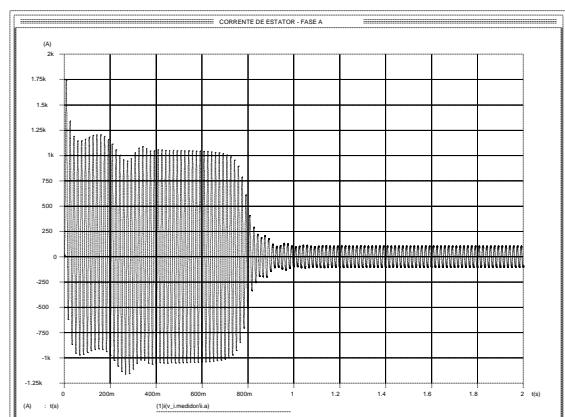


Figura (2) - Corrente de linha na fase A durante o tempo total de simulação - Caso 1.

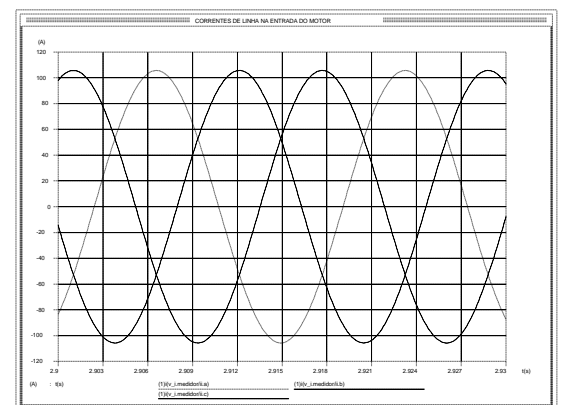


Figura (3) - Zoom das correntes de linha na entrada do motor em regime permanente - Caso 1.

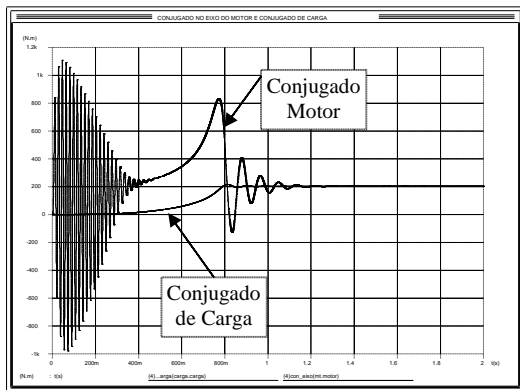


Figura (4) - Conjugado do motor e conjugado de carga durante o tempo total de simulação - Caso 1.

CASO 2

Com vistas a analisar o desempenho do motor no que tange aos possíveis desequilíbrios existentes nas tensões de suprimento, procede-se, a seguir, a apresentação de um conjunto de resultados correspondentes às formas de onda de corrente e conjugado (motor e de carga). Deve-se ressaltar que as tensões de alimentação (fase-neutro) para as fases A, B e C são, respectivamente, $241,33\angle 0^\circ$, $260,61\angle -117,58$, $260,61\angle 117,58$.

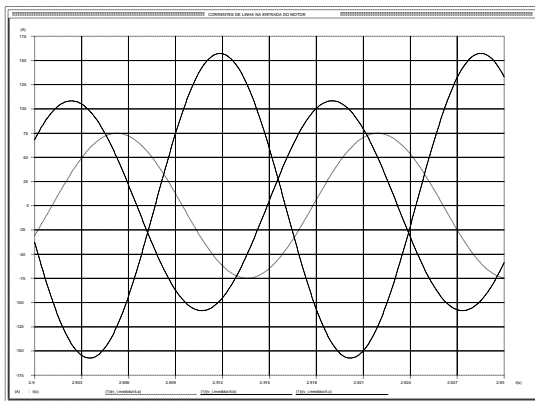


Figura (5) - Zoom das correntes de linha na entrada do motor em regime permanente - Caso 2.

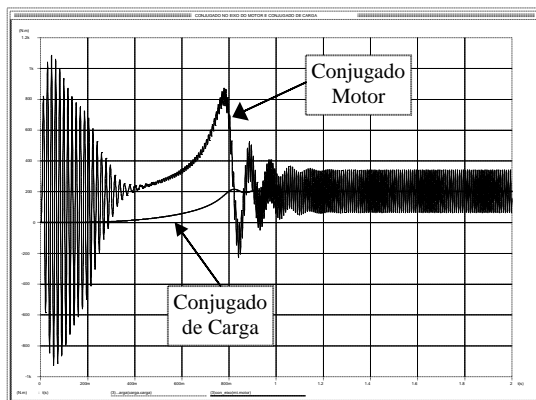


Figura (6) - Conjugado do motor e conjugado de carga durante o tempo total de simulação - Caso 2.

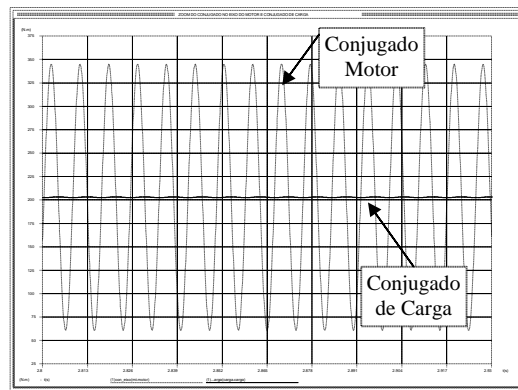


Figura (7) - Zoom do conjugado do motor e do conjugado de carga - Caso 2.

O alto grau de desequilíbrio de corrente, ilustrado pela figura 5, deve-se ao fato de que a impedância de sequência negativa do motor é bem inferior a correspondente de sequência positiva. Desta forma, os efeitos advindos da presença de correntes de sequência negativa são o aumento das perdas internas, bem como a produção de conjugados contrários ao de sequência positiva, resultando desta forma, em fortes oscilações no eixo da máquina, claramente retratadas pela figura 7.

CASO 3

Nesta etapa dos estudos procurou-se analisar o comportamento do motor quando este encontra-se alimentado por tensões contendo distorções harmônicas, como mostrado na figura 8. Já a figura 9, mostra o oscilograma das correntes absorvidas pelo motor, as quais, apresentam-se distorcidas, contribuindo, desta forma, para o aumento das perdas internas. Outro efeito da presença de correntes harmônicas no estator, é a geração de um conjugado resultante no eixo da máquina de natureza oscilante. Este efeito, observado também na figura 7, causa ruídos e vibrações na máquina, podendo resultar na fadiga dos componentes mecânicos. Adicionalmente, o funcionamento da carga acionada fica comprometido devido as oscilações de conjugado e velocidade no eixo do motor.

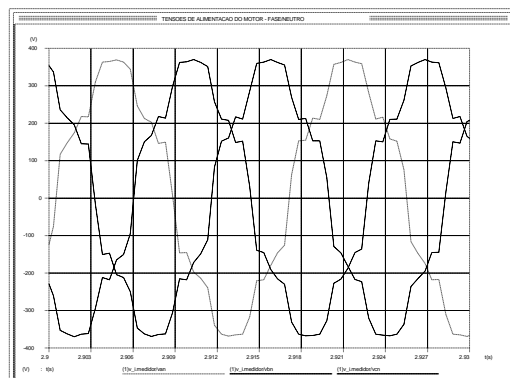


Figura (8) - Zoom das tensões (fase-neutro) de suprimento em regime permanente - Caso 3.

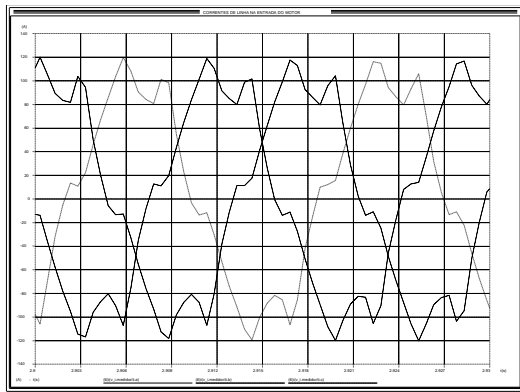


Figura (9) - Zoom das correntes de linha na entrada do motor em regime permanente - Caso 3.

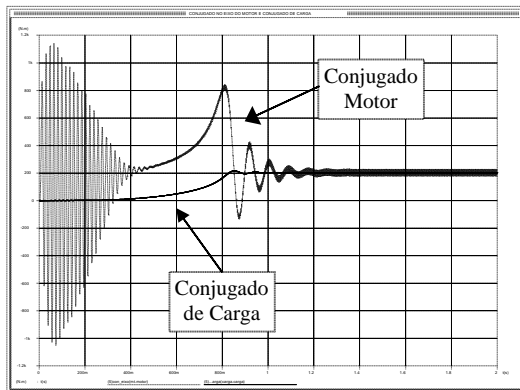


Figura (10) - Conjugado do motor e conjugado de carga durante o tempo total de simulação - Caso 3.

CASO 4

Seguindo nos estudos da operação do motor quando submetido aos mais diversos problemas de qualidade, procedeu-se a alimentação do mesmo com uma rede apresentando cerca de 15% de subtensão. Nesta situação operacional, tem-se uma redução não somente do conjugado resultante no eixo, bem como da potência de entrada do motor. As figuras a seguir ilustram, respectivamente, as correntes de entrada e o conjugado do motor e de carga.

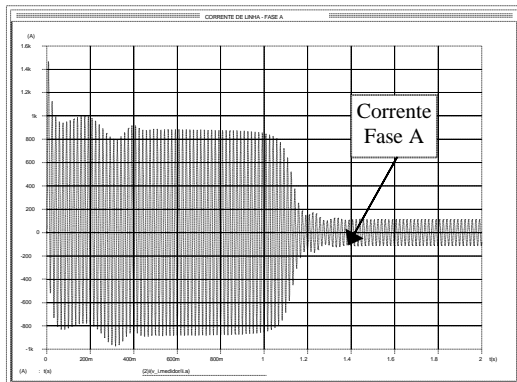


Figura (11) - Correntes de linha na entrada do motor durante o tempo total de simulação - Caso 4.

A análise das figuras permite observar o aumento do tempo de partida do motor, bem como o decréscimo

da corrente em regime permanente, absorvida pelo mesmo.

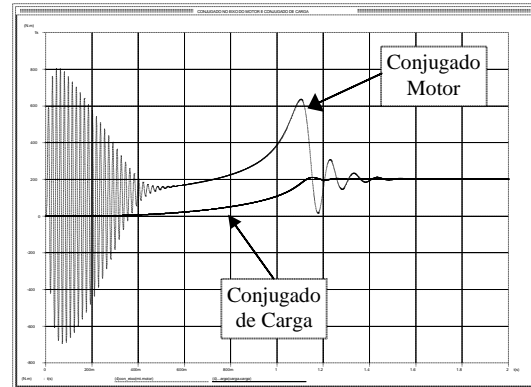


Figura (12) - Conjugado do motor e conjugado de carga durante o tempo total de simulação - Caso 4.

CASO 5

Este caso tem como objetivo simular o motor de indução quando da ocorrência de uma sobretensão nos seus terminais de entrada. Como era de se esperar, há um acréscimo tanto da potência elétrica de entrada como da potência mecânica disponível no eixo do motor.

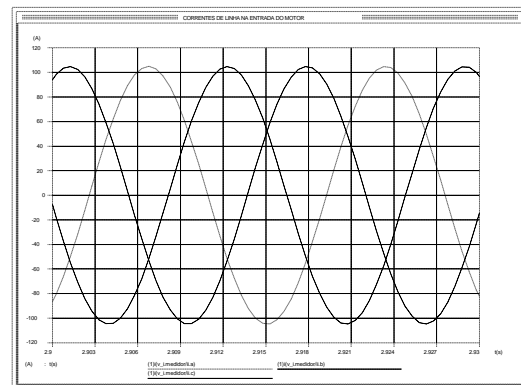


Figura (13) - Zoom das correntes de linha na entrada do motor em regime permanente - Caso 5.

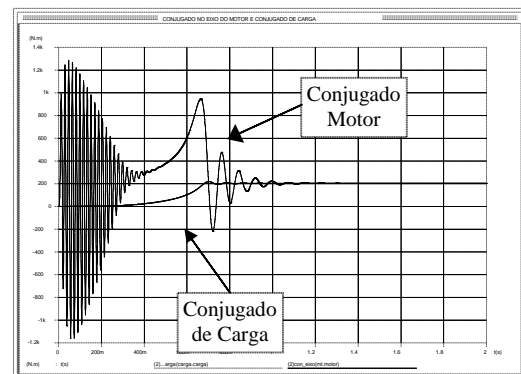


Figura (14) - Conjugado do motor e conjugado de carga durante o tempo total de simulação - Caso 5.

As figuras mostram a característica do conjugado no eixo do motor e o conjugado de carga. Observa-se que na partida, o motor sofre acentuadas oscilações

de conjugado, bem como o tempo de partida diminuído devido à sobretensão imposta ao motor.

CASO 6

Finalmente, procurou-se avaliar o desempenho do motor para uma situação em que o sistema supridor encontra-se com baixos níveis de qualidade. Assim, as tensões de alimentação caracterizaram-se por apresentarem um conjunto de problemas de qualidade, tais como distorções nas suas formas de onda, desequilíbrio e subtensões. As figuras subsequentes mostram, mais uma vez, as correntes na entrada do motor, bem como os conjugados no eixo e de carga.

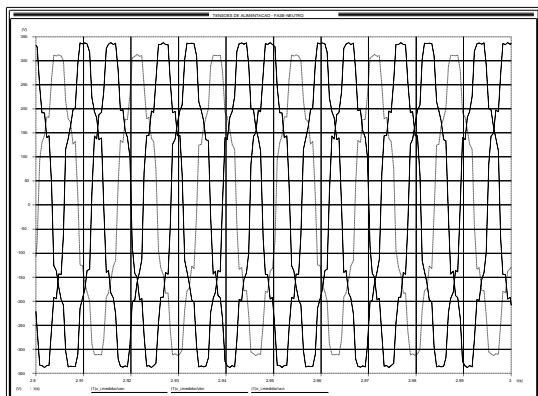


Figura (15) - Zoom das tensões fase-neutro de suprimento em regime permanente - Caso 6.

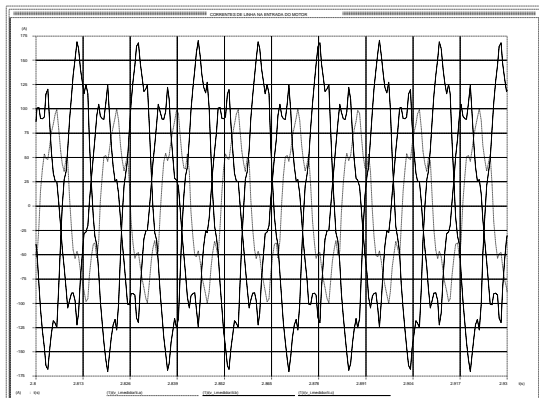


Figura (14) - Zoom das correntes de linha na entrada do motor em regime permanente - Caso 6.

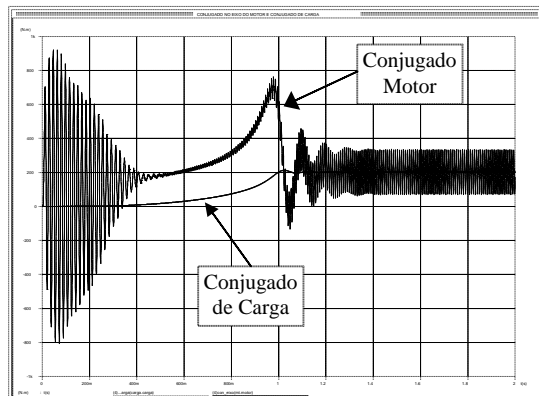


Figura (15) - Conjugado do motor e conjugado de carga durante o tempo total de simulação - Caso 6.

As observações feitas para os casos 2, 3 e 4 se aplicam para o presente caso. No entanto, deve-se ressaltar a natureza não linear do motor de indução, pois não se observou uma superposição dos diversos efeitos, conforme relatados nas simulações anteriores, em separado.

Para uma melhor visualização dos diversos casos processados, encontram-se descritos na tabela III, no final do artigo, as principais grandezas elétricas obtidas a partir das simulações realizadas.

4. ANÁLISE DE DESEMPENHO

A fim de verificar o comportamento do motor frente a um sistema supridor com características não ideais, procedeu-se ao cálculo das potências de entrada, da potência disponível no eixo do motor e do respectivo rendimento, para os diversos casos processados. Na tabela IV, encontram-se os valores destas grandezas, onde considerou-se como valores de referência aqueles processados conforme as condições impostas no caso 1, ou seja, alimentação sob condições ideais.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
P_{saída} - kW	38,13	38,07	38,06	37,86	38,15	37,94
P_{entrada} - kW	42,77	43,01	43,72	42,47	43,89	43,25
Rendimento - h %	89,15	88,51	87,05	89,14	86,92	87,72

Tabela IV - Cálculo de rendimento do motor.

A análise da tabela mostra que o rendimento do motor sofre alterações de acordo com as condições de suprimento imposta ao mesmo. Este fato está relacionado com o aumento das perdas internas (joule, no ferro, etc.). De acordo com a ref. [3], pequenos aumentos na temperatura interna do motor, ocasionam uma significativa redução de sua vida útil. Desta forma, é de fundamental importância, quando da instalação destes dispositivos, investigar as condições operacionais as quais estarão sujeitos e, caso necessário, proceder a uma redução no carregamento com vistas a manter a expectativa nominal da vida útil do motor.

Até o presente momento, o artigo procurou analisar, sob o ponto de vista técnico, o motor de indução para diversas condições operacionais, como aquelas descritas na tabela II. No entanto, conforme ficou evidenciado na tabela IV, as variações ocorridas no rendimento do motor não foram significativas e, assim, a análise deve ser estendida aos valores obtidos para a potência elétrica de entrada e a potência mecânica de saída do equipamento. Como pode ser verificado, a potência elétrica fornecida nos terminais do motor, para cada condição operacional, apresentou valores distintos. Diante do exposto, fica evidente a necessidade de proceder a uma análise econômica para cada caso processado, objetivando computar os gastos adicionais resultantes do aumento do consumo energético do motor.

5. ANÁLISE ECONÔMICA

Uma vez determinado as perdas adicionais resultantes da operação do motor de indução, em função das diversas condições operacionais, procedeu-se ao cálculo dos custos adicionais anuais, gastos com a energia elétrica (kWh) para suprir tais perdas. Para tanto, adotou-se como referência, a operação do motor sob condições ideais, com período de funcionamento correspondente a 24 horas por dia. Desta forma, a figura 16 mostra os gastos adicionais obtidos de acordo com cada caso processado. Vale ressaltar que o custo do kWh adotado foi de R\$ 0,14.

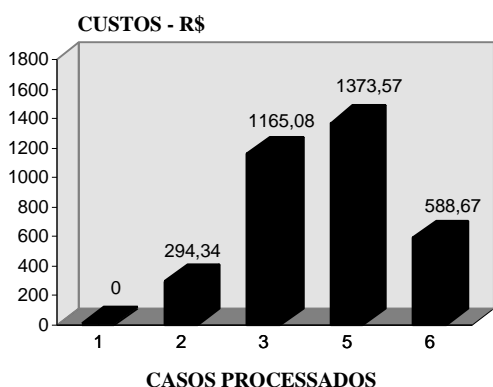


Figura 16 - Gastos adicionais com energia elétrica. (Valores anuais)

Tal análise pode ser estendida, quando o objetivo final é a implementação de soluções para a redução e/ou eliminação dos diversos problemas de qualidade da energia elétrica. Assim, uma vez determinado os custos relacionados com as possíveis soluções, através de um estudo comparativo, deve-se verificar o tempo necessário para o retorno dos investimentos, ou seja, o "pay-back".

6. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou os principais aspectos relacionados com a operação de motores de indução sob diversas condições de alimentação. Utilizando o simulador SABER, foi possível processar uma variedade de casos de tal forma que várias situações não ideais de suprimento foram analisadas.

GRANDEZAS ELÉTRICAS	UNIDADE	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5	CASO 6
CORRENTE DE LINHA (VALOR RMS)	A	$I_a = 74,72$	$I_a = 52,93$	$I_a = 75,96$	$I_a = 79,19$	$I_a = 73,98$	$I_a = 60,97$
		$I_b = 74,72$	$I_b = 111,24$	$I_b = 75,96$	$I_b = 79,19$	$I_b = 73,98$	$I_b = 110,43$
		$I_c = 74,72$	$I_c = 76,59$	$I_c = 75,96$	$I_c = 79,19$	$I_c = 73,98$	$I_c = 75,42$
CONJUGADO - C_{EIXO}	N.m	202,94	202,89	202,70	202,12	203,34	202,39
VELOCIDADE - n	rpm	1792	1792,3	1792	1788,6	1793,3	1789,8
ESCORREGAMENTO - S	%	0,44	0,43	0,44	0,63	0,37	0,57

Tabela III - Valores calculados a partir dos resultados computacionais.

Muito embora se reconheça que a proposta do artigo possa, a primeira vista, se mostrar dentro de um contexto bastante explorado na literatura, a avaliação de desempenho de motores de indução ressaltou não

somente a potencialidade da modelagem empregada como também, alertar ao engenheiro electricista a necessidade de uma análise mais criteriosa quando da instalação de tais dispositivos em instalações elétricas cuja qualidade encontra-se comprometida, ou seja, fora das condições ideais de suprimento. Sob o ponto de vista dos resultados atingidos, os diversos casos processados são auto esclarecedores e retratam com clareza os vários efeitos advindos de um sistema elétrico com baixo índice de qualidade. Finalmente, é conveniente ressaltar que a determinação dos custos adicionais gastos com energia elétrica, bem como o cálculo do tempo de retorno quando da implementação de soluções para a eliminação ou atenuação dos problemas de qualidade, é de extrema importância no processo do diagnóstico da qualidade da energia elétrica numa indústria.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - Dugan, R. et al, "Electrical Power System Quality", McGraw-Hill, USA, 1996.
- [2] - Arrilaga, J. et al, "Power Systems Harmonics", John Wiley & Sons, USA, 1985.
- [3] - E. F. Fuchs, D. J. Roesler and F. S. Alashhab, "Sensitivity of Electrical Appliances to Harmonics and Fractional Harmonics of the Power Systems Voltage. Part I: Transformers and Induction Machines," IEEE Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 2, April 1987.
- [4] - A. E. Emanuel, "The Effect of Harmonic Randomness upon Temperature Rise of Electrical Equipment", Proceedings of International Conferences on Harmonics in Power Systems, ICHIPS III, Nashville, Indiana, October 1988, pp. 257-62.
- [5] - Neto, L.M.; Salerno, C.H.; Alvarenga, B.P. - "Harmonic Inductance in the Linear Analysis of Induction Motor"- International Conference on Electrical Machines in Australia - Adelaide, Sep/1993.

