

**Proposta de modelo matemático de estimação da eficiência energética de motores de indução alimentados por tensões elétricas desequilibradas e distorcidas****Mathematical model proposal to estimate the energy efficiency of induction motors fed by unbalanced and distorted electrical voltages**

DOI:10.34115/basrv4n6-002

Recebimento dos originais: 19/10/2020

Aceitação para publicação: 06/11/2020

**Arthur Fernando Bonelli**

M.Sc. Universidade Federal de Uberlândia (2010)

Instituição: Furnas Centrais Elétricas S.A

Endereço: R. Olívio de Andrade Ribeiro, 167, bairro Jardim Primavera, Itumbiara/GO, Brasil

E-mail: afbonelli@gmail.com

**Alexandre Rasi Aoki**

D.Sc. Universidade Federal de Itajubá (2003)

Instituição: Universidade Federal do Paraná

Endereço: Rua João Antonio Prosdócimo, 450, Casa 8 – Bairro Uberaba, Curitiba/PR, Brasil

E-mail: aoki@ufpr.br

**Mateus Duarte Teixeira**

D.Sc. Universidade Federal do Paraná (2016)

Instituição: Universidade Federal do Paraná

Endereço: Avenida República Argentina, 755 – Bairro Água Verde, Curitiba/PR, Brasil

E-mail: mateus.teixeira@ufpr.br

**André Luiz Langner**

M.Sc. Universidade Federal do Paraná (2016)

Instituição: Siemens

Endereço: 10900 Wayzata Blvd, Minnetonka, MN. 55305

E-mail: andre\_langner@ieee.org

**Wyrllen Everson de Souza**

D.Sc. Universidade Federal do Paraná (2012)

Instituição: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Campo Mourão.

Endereço: Via Marginal Rosalina Maria dos Santos, Área Urbanizada I, Campo Mourão/PR, Brasil

E-mail: wyrllensouza@utfpr.edu.br

**Fábio Antonio Filipini**

M.Sc. Universidade Federal do Paraná (2002)

Instituição: GRAPHUS Eficiência Energética

Endereço: Avenida República Argentina, 1160 – sala 1210 – Bairro Água verde, Curitiba/PR, Brasil

E-mail: fabio@graphusenergia.com.br

**Ronoel Anderson Nehls**

Engenheiro Eletricista Universidade Tecnológica Federal do Paraná (1986)

Instituição: Consultor Independente

Endereço: Rua Angelo Zeni, 226, Bairro Bom Retiro, Curitiba/PR, Brasil  
E-mail: ronoel@onda.com.br

## RESUMO

A eficiência energética tem sido uma preocupação cada vez maior, especialmente indústrias que possuem como um dos principais insumos, a energia elétrica. Uma vez que os motores de indução trifásicos (MITs) representam a maior parte do consumo da indústria brasileira, a busca pelo melhor rendimento eletromecânico destes equipamentos é de fundamental importância. Todavia, além do correto dimensionamento e instalação, problemas de qualidade de energia presentes na tensão de alimentação podem trazer efeitos para a performance dos MITs. Dentro desta perspectiva, o presente trabalho desenvolveu uma proposta de modelo matemático baseado em uma ampla medição de campo os quais relacionam desequilíbrio de tensão e distorção harmônica de tensão para prever o impacto destes fenômenos no rendimento dos motores. Assim, este artigo apresenta os modelos desenvolvidos para motores de alto rendimento, standard e rebobinados.

**Palavras-chave:** Desequilíbrio de tensão, distorção harmônica total de tensão, medições de campo, modelo matemático, motor de indução trifásico.

## ABSTRACT

Energy efficiency has been an increasing concern in industries that have electricity as one of the main inputs. Considering that the three-phase induction motors (TIMs) represent the majority of consumption in the Brazilian industry, it is important to run for the best electromechanical performance of this equipment. However, in addition to the correct specification and installation, electrical power quality problems present in the supply voltage can have effects on the performance of TIMs. Within this perspective, the present work developed a mathematical model based on a wide measurement campaign in industries in the state of Paraná, which relates voltage imbalance and harmonic voltage distortion to predict the impact of these phenomena on TIM performance. Thus, this article presents the models developed for high-performance, standard and rewound engines.

**Keywords:** Voltage imbalance, total harmonic voltage distortion, field measurements, mathematical model, three-phase induction motor.

## 1 INTRODUÇÃO

Pesquisas desenvolvidas nos últimos anos baseadas em medições de campo [1, 2] vêm demonstrando que tensões idealmente senoidais e equilibradas não constituem condições reais presentes no sistema elétrico, devido à sua própria dinâmica. Constata-se, pois, que a tensão fornecida pelas concessionárias de energia possui distúrbios de qualidade que aumentam a discrepância do padrão de um sistema ideal. Dentre os principais fenômenos de qualidade da energia elétrica (QEE) presentes na rede de distribuição destacam-se a distorção harmônica, as variações de tensão de curta e longa duração, os desequilíbrios de tensão e as flutuações de tensão. Esses fenômenos podem causar, conjunta ou separadamente, alterações no comportamento de equipamentos conectados à rede e podem resultar em perda de desempenho, redução de vida útil e queima [2].

No Brasil, do total de energia fornecida pelas concessionárias, cerca de 44% é consumida pelo setor industrial [3]. Outro ponto importante trata-se de que mesmo as indústrias possuindo características

distintas, grande parcela do consumo resulta da utilização de motores elétricos, uma vez que estes representam cerca de 50% do consumo de energia elétrica pelas indústrias [3].

Resultados encontrados por meio de testes laboratoriais monitorando o torque e rendimento de motores trifásicos de indução (MIT), permitiram observar que tensões equilibradas, mas com distorção harmônica em apenas uma frequência, não causaram efeitos significativos no torque e na eficiência do MIT avaliado. No entanto, essas distorções harmônicas somadas ao desequilíbrio de tensão culminaram, na maioria dos casos, em uma redução do torque e da eficiência [4].

Outro trabalho empregou modelagem matemática de sequência positiva e negativa implementadas no Matlab Simulink para avaliar os efeitos do desequilíbrio de tensão e distorções harmônicas para o torque, potência, perdas no cobre e eficiência de motores de indução. Os resultados demonstraram que os efeitos adversos do desequilíbrio de tensão e harmônicos de ordem superior são mais severos que sobretensões e harmônicos de baixa ordem [5]. Enquanto isso, em [6] um modelo matemático foi desenvolvido para a estimativa de perdas em motores de indução de alta eficiência alimentados por tensão distorcidas. Foi verificado que os motores Premium apresentam perdas superiores que os motores padrão de alta eficiência devido ao fato de os motores Premium possuírem impedâncias de partida e regime menores que os motores standards, facilitando a circulação de correntes harmônicas de alta frequência.

Por fim, estudos desenvolvidos com base em modelos térmicos mostraram a importância do monitoramento do ponto quente de motores submetidos a tensões distorcidas de forma a aumentar a expectativa da vida útil dos mesmos [7].

Neste contexto, o presente trabalho apresenta uma ampla investigação de campo com motores de alto rendimento, padrões e até motores rebobinados sob o impacto da perda da qualidade da tensão elétrica de alimentação. Assim foram conduzidas medições elétricas em mais de 900 motores em diversos tipos de indústrias no Estado do Paraná (Brasil) que culminaram no desenvolvimento de modelos matemáticos capazes de indicar a influência do desequilíbrio de tensão e da distorção harmônica total de tensão no rendimento dos MITs. A escolha destes fenômenos de qualidade da energia elétrica foi feita amparada na conhecida característica de que estes afetam significativamente o rendimento de motores elétricos [8, 9].

Assim, o presente trabalho relata algumas informações sucintas sobre a campanha de medição, e, discute a metodologia utilizada para o desenvolvimento dos modelos matemáticos. Como resultado, são obtidos modelos matemáticos das superfícies onde são relacionados: rendimento do motor, desequilíbrio e distorção de tensão.

**2 CAMPANHA DE MEDIÇÃO**

O primeiro passo para a realização da campanha de medição foi dimensionar o dimensionamento de uma amostra de motores de consumidores residenciais pertencentes à área de concessão da concessionária de energia elétrica do estado do paraná (COPEL) estatisticamente representativo do setor para a companhia. Deve-se comentar que a pesquisa de campo foi voltada para obter informações sobre os motores das indústrias, e não das indústrias propriamente ditas.

Após esta ação, voltou-se o processo de comunicação e convencimento do benefício da empresa em participar da pesquisa, o qual seria o recebimento de um relatório de cada motor apontando a viabilidade de troca ou não deste.

Desta forma, foram realizadas medições em 916 motores de 12 indústrias distribuídas em todo o estado do Paraná. Os motores mensurados foram divididos por tipos (standard, alto rendimento e rebobinado) e faixas de potência. A Tabela I apresenta o número de motores medidos em cada categoria.

Ressalta-se que, cada grupo de motores (Tipo x Faixa de potência) apresentado na Tabela I deu origem a um modelo matemático do impacto da QEE, totalizando 15 distintos modelos. Como a escolha das faixas de potência influenciaria diretamente nos modelos, esta seguiu alguns critérios. A princípio, foi considerada uma classificação típica utilizada pelos fabricantes de motores. Esta deu apoio à realização das medições em campo, para que houvesse uma quantidade mínima de motores mensurados em todos os grupos. Posteriormente, de posse dos dados, foi realizado um tratamento estatístico baseado em matriz de correlação. Tal procedimento teve intuito de analisar a similaridade dos grupos pré-arranjados. Assim, tais grupos sofreram algumas alterações, onde a classificação final é apresentada neste trabalho.

TABELA I - NÚMERO DE MOTORES MENSURADOS E CLASSIFICADOS POR TIPO (STANDARD, ALTO RENDIMENTO E REBOBINADO) E FAIXAS DE POTÊNCIA

Faixa de Potência (CV)	Motores de Indução Trifásicos			
	Standard	Alto Rendimento	Rebobinado	Subtotal
Até 1	46	12	51	<b>109</b>
Maiores que 1 a 10	243	59	121	<b>423</b>
Maiores que 10 a 40	93	26	100	<b>219</b>
Maiores que 40 a 300	69	35	40	<b>144</b>
Acima de 300	5	5	11	<b>21</b>
Subtotal	<b>456</b>	<b>137</b>	<b>323</b>	
<b>TOTAL</b>	<b>916</b>			

### 3 DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA

Os modelos apresentados neste trabalho foram desenvolvidos a partir de dados de medições em motores de diversas plantas industriais. Esta abordagem foi escolhida pelos seguintes motivos:

- Ser o primeiro trabalho, que se tenha conhecimento, a realizar uma grande campanha de medição de motores de indução trifásicos instalados em ambiente industrial. Obtendo-se, assim, um cenário real da situação das instalações existentes nas indústrias;
- Traduzir a realidade industrial de operação do motor, uma vez que todos os demais trabalhos desenvolvidos até o presente momento, os quais abordam o efeito da Qualidade da Energia Elétrica nos MITs, utilizam dados advindos de simulações computacionais, as quais dependem da modelagem utilizada e de ensaios laboratoriais, os quais ocorrem em ambientes controlados.

Para as medições e estudos de qualidade de energia, foram selecionadas as duas variáveis de maior influência no desempenho dos motores de indução. Estas são: desequilíbrio de tensão (FD) e distorção harmônica total de tensão (DTT).

Ressalta-se que as medições do desequilíbrio de tensão e da distorção harmônica total de tensão estão em consonância com a norma nacional, o PRODIST/ANEEL – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Módulo 8 [10], e com as normas internacionais do IEC – International Electrotechnical Commission - 61000-4-30 [11] e do IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers - Std 1159-1995 [12].

### 4 MÉTODO NUMÉRICO EMPREGADO NA CONFECÇÃO DOS MODELOS

A principal proposta deste trabalho foi desenvolver uma técnica de estimativa de rendimento e carregamento de motores de indução trifásicos, quando estes estão alimentados por redes com problemas de desequilíbrio e distorção harmônica de tensão. Ressalta-se que a mesma foi comparada com as técnicas de estimativa apresentadas em [13]-[15], e se revelou mais coerente, tanto em casos de redes ideais, quanto em situações onde há presença de desequilíbrio e distorção de tensão.

Assim, a metodologia assume como valores iniciais os dados de placa de motores. A partir deste ponto, inicia-se um método iterativo o qual vai ajustando o carregamento e o rendimento dos motores de acordo com os resultados das medições advindas do analisador de qualidade da energia elétrica. Com equacionamentos extraídos das literaturas supraditas, a mesma adequa, a cada passo de interação, as possíveis perdas por desequilíbrio e distorção nos motores.

Desta maneira, de posse dos dados de campo, voltou-se para a confecção dos modelos através de técnicas de ajuste de superfícies. Tais superfícies (modelos) são compostas pelas seguintes variáveis: rendimento do motor; desequilíbrio de tensão e distorção harmônica total de tensão.

Por conta das características intrínsecas de como o desequilíbrio de tensão e a distorção harmônica de tensão impacta no rendimento dos motores, foi utilizada uma regressão por mínimos quadrados com as seguintes particularidades:

- Minimização de erro pelo critério da soma dos quadrados dos resíduos;
- Regressão múltipla (superfície);
- Regressão não linear, pois as perdas advindas dos problemas de QEE não possuem comportamento linear.

- 

Quanto à formulação não linear utilizada para o ajuste das superfícies dos motores elétricos, esta é apresentada em (1).

$$z(x, y) = a - (b \cdot e^{-x/c}) - (d \cdot e^{-y/f}) \quad (1)$$

Onde:

$z$  – variável representativa do rendimento;

$x$  – variável representativa do desequilíbrio de tensão;

$y$  – variável representativa da distorção harmônica total de tensão;

$a, b, c, d$  e  $f$  – coeficientes da equação determinados computacionalmente, sendo relativos ao ajuste dos pontos à superfície.

A escolha de (1) foi realizada empiricamente com base em trabalhos que apresentam a influência que o rendimento do motor de indução sofre quando alimentado por redes contendo desequilíbrio e distorção de tensão [13, 14, 15].

Assim, a partir dos dados provenientes das medições foram gerados pontos no espaço tridimensional (rendimento x desequilíbrio x distorção), onde cada ponto representa um motor.

De posse de tais pontos, voltou-se para uma ferramenta específica do Matlab® denominada por SFTOOL “Surface Fitting Tool”, onde se fez o ajuste dos pontos a uma superfície. Esta ferramenta também forneceu:

- Os coeficientes de (1) que representam o gráfico da superfície de cada modelo;
- Os erros de aproximação dos pontos medidos à superfície gerada.

## 5 RESULTADOS OBTIDOS

Muito embora o trabalho tenha abrangido uma ampla gama de potências de motores de indução, este artigo será dedicado à apresentação dos resultados obtidos para os motores de 1 a 10 CV, que representam cerca de 46% de todos os motores estudados.

### 5.1 MOTORES STANDARD

A Tabela II apresenta o resultado do tratamento estatístico das medições. Já a Fig. 1 apresenta o modelo ajustado para o grupo de motores standard maiores que 1 até 10 CV. Por sua vez, a Tabela III contém os coeficientes a serem aplicados à (1) os quais representam a superfície encontrada.

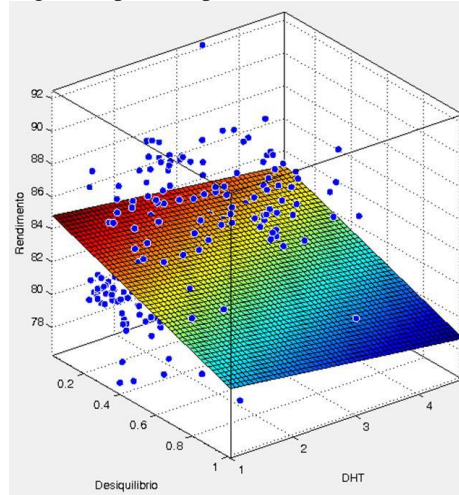
TABELA II - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS MOTORES STANDARD

Indicador Estatístico	Rendimento (%)	FD (%)	DTT (%)
<b>Média</b>	82,6931	0,2803	2,6379
<b>Desvio Padrão</b>	3,5147	0,1750	2,0507
<b>Mínimo</b>	66,3700	0,0200	1,0000
<b>Máximo</b>	92,5000	1,0100	4,7000

TABELA III - COEFICIENTES PARA (1) QUE MODELAM O GRUPO DE MOTORES STANDARD

a	b	c	d	f
8267	8277	-1900	75,19	-155,9

Fig. 1. Superfície para os motores standard



Deve-se ressaltar que o limite de aplicação deste modelo é de 1,01% para desequilíbrio de tensão e 4,70% para distorção harmônica total de tensão. Assim, segundo o referido modelo, quando tais motores estão alimentados por redes sem distúrbios de QEE, o rendimento se encontra em aproximadamente 85,2%.



Já com a aplicação de 0,5% de desequilíbrio, o rendimento cai para 83,0%. Caso a rede conter 1,0% de desequilíbrio, o rendimento vai para 80,8%. Ressalta-se que 1,0% é metade do valor de referência descrito no PRODIST/ANEEL [17], o qual aconselha no máximo 2,0% de desequilíbrio.

Para a distorção harmônica, com um valor de 2,5%, o rendimento vai para 84,0%. Já com 5% de distorção, o rendimento fica em 82,8%. Em relação ao valor de referência para distorção harmônica total de tensão citado no PRODIST/ANEEL, este é de 10% quando se analisam redes com tensão menor ou igual a 1.000 V.

Por fim, se a rede estiver alimentando o motor com 1,0% de desequilíbrio sobreposto a 5,0% de distorção harmônica, o rendimento vai para 78,5%.

Deve-se ressaltar que os valores de rendimento apresentados não devem ser levados como fato absoluto, pois há distintas características em cada motor, como: marcas, anos de fabricação, estado de conservação e até diferentes valores de potência dentro da faixa abordada pelo modelo. Assim, os modelos são apenas orientativos, apresentando uma estimativa da queda do rendimento quando aplicados os citados distúrbios de QEE.

## 5.2 MOTORES DE ALTO RENDIMENTO

A Tabela IV apresenta a análise estatística das medições para os motores de alto rendimento. Na sequência, têm-se o modelo para os motores de alto-rendimento exposto na Fig. 2. Quanto aos coeficientes de (1) que exprimem a referida superfície, estes estão apresentados na Tabela V.

TABELA IV - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS MOTORES ALTO RENDIMENTO

Indicador Estatístico	Rendimento (%)	FD (%)	DTT (%)
<b>Média</b>	87,4047	0,3447	1,9441
<b>Desvio Padrão</b>	2,0850	0,1453	0,7607
<b>Mínimo</b>	82,3500	0,0600	1,1000
<b>Máximo</b>	91,5200	0,7200	5,3000

TABELA V - COEFICIENTES PARA (1) QUE MODELAM O GRUPO DE MOTORES DE ALTO RENDIMENTO

a	b	c	d	f
855,6	0,05695	-0,1773	767,4	-6729

Para este modelo, os limites recomendados de aplicação estão em 0,72% para desequilíbrio de tensão e 5,3% para distorção harmônica total de tensão, sendo que o presente modelo exhibe rendimento de 88,1% para motores que são alimentados por redes livres de problemas de Qualidade da Energia Elétrica.

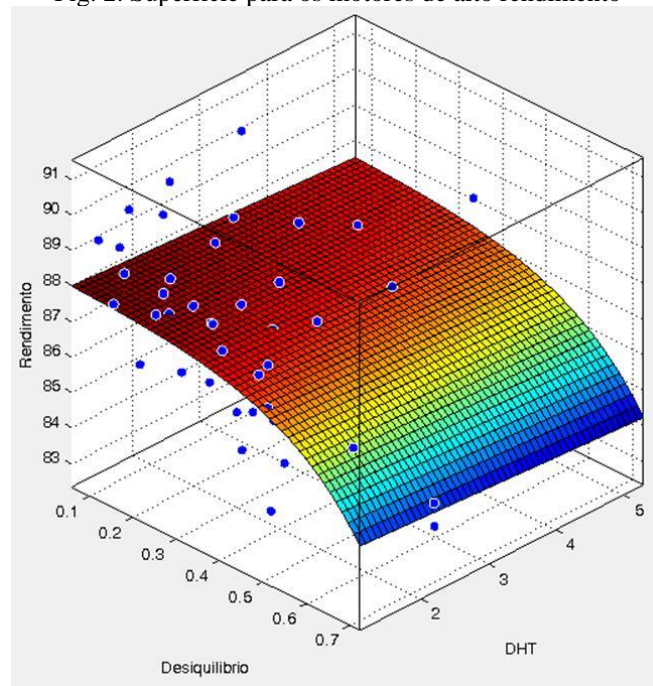


Por sua vez, quando se encontra 0,5% de desequilíbrio na instalação, o rendimento fica em 87,2%. E como uma rede contendo o valor limite de aplicação deste modelo para desequilíbrio, qual seja 0,72%, chega-se em um rendimento de 84,9%.

Voltando-se para a distorção, motores alimentados por uma tensão cuja distorção harmônica seja de 2,5%, obtém-se um rendimento de 87,9%. Caso se dobre este valor, ou seja, 5,0% de distorção total, os motores conterão um rendimento de 87,6%.

Assim, com a superposição dos dois fenômenos, onde o desequilíbrio se encontra em 0,72% e a distorção harmônica total de tensão em 5,0%, tem-se um rendimento nos motores de 84,3%.

Fig. 2. Superfície para os motores de alto rendimento



### 5.3 MOTORES REBOBINADOS

A tabela VI a análise estatística descritiva dos motores rebobinados. O último modelo apresentado neste trabalho se encontra exposto na Fig. 3. Por sua vez, os coeficientes de (1) que modelam a referida superfície estão relatados na Tabela VII.

TABELA VI - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS MOTORES REBOBINADOS

Indicador Estatístico	Rendimento (%)	FD (%)	DTT (%)
<b>Média</b>	81,7411	0,4836	2,0629
<b>Desvio Padrão</b>	1,3835	0,5209	0,9405
<b>Mínimo</b>	76,2500	0,0300	1,1000
<b>Máximo</b>	86,3500	4,5400	9,0000

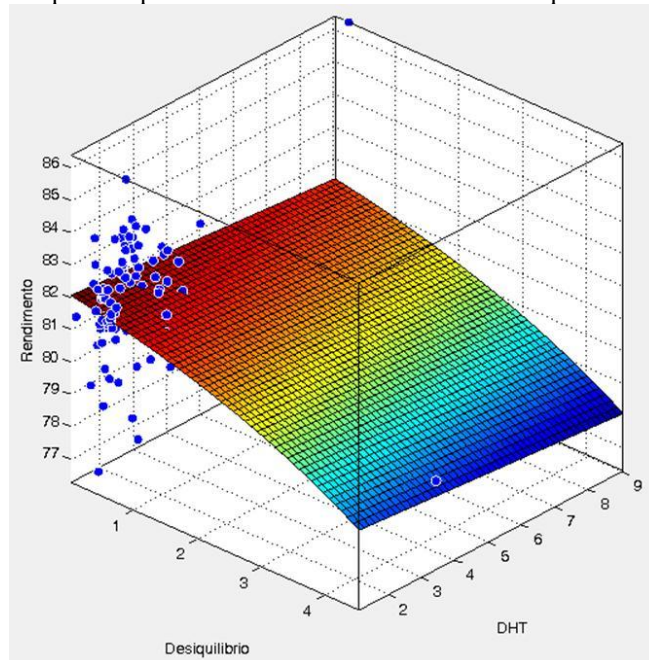
TABELA VII - COEFICIENTES PARA (1) QUE MODELAM O GRUPO DE MOTORES REBOBINADOS

a	b	c	d	f
866,3	1,356	-3,666	782,8	-8870

Quanto aos limites de aplicação do presente modelo, estes são de 4,5% para desequilíbrio de tensão e 9,0% para distorção harmônica total de tensão.

Voltando-se para a análise do rendimento de tais máquinas, estas possuem um valor de 82,2% quando a tensão fornecida a estas está isenta de desequilíbrio e distorção harmônica de tensão. Já com a aplicação de um desequilíbrio de tensão correspondente a 0,5%, o rendimento cai para 82,0%. No caso de se ter um valor de desequilíbrio de 1,0%, o rendimento fica em 81,7%.

Fig. 3. Superfície para os motores rebobinados maiores que 1 até 10 CV.



Por sua vez, quando tais motores estão em um barramento com uma distorção harmônica na tensão de 2,5%, o rendimento encontra-se em 82,9%. Já com o aumento da distorção para 5,0%, o rendimento destes MITs cai para 81,7%.

Finalmente, quando os motores são alimentados por uma rede com 1,0% de desequilíbrio sobreposto a uma distorção harmônica de tensão de 5,0%, seu rendimento fica em 81,3%.

**6 CONCLUSÕES**

O presente trabalho apresentou três modelos matemáticos, os quais apontam o impacto do desequilíbrio de tensão e da distorção harmônica total de tensão na eficiência energética de motores de indução trifásicos.

Tais modelos tiveram como insumo os dados de 916 motores mensurados em plantas industriais do Estado do Paraná (Brasil). Desta forma, esta base de dados levou em consideração a real situação das redes elétricas nas indústrias.

Os modelos desenvolvidos no presente trabalho são dependentes dos dados mensurados, e cada grupo de motores teve diferentes valores de desequilíbrio e distorção de tensão. Ainda deve-se comentar que os modelos possuem limites distintos de aplicação, não sendo recomendável a utilização dos mesmos fora das faixas apresentadas.

Os modelos matemáticos apresentados permitem concluir que o desequilíbrio de tensão tem maior impacto na eficiência dos motores elétricos que a distorção harmônica de tensão, sendo que tal constatação vai de encontro a estudos anteriores [8].

Por fim, deve-se destacar que as análises foram feitas apenas para o impacto do rendimento dos motores. Não sendo abordados possíveis problemas mecânicos, como vibração, ruído, assim como efeitos elétricos no aquecimento dos motores, os quais poderiam ser impactados por correntes harmônicas de alta ordem.

**REFERÊNCIAS**

- [1] N. C. Jesus, Monitoramento e Simulação de Motores sob Condições Não-Ideais: Efeito Combinado Desequilíbrio e Distorção Harmônica Published in: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2007
- [2] Beaty, H. W., Santoso, S., Dugan, R. C. E Mcgranaghan, M. F. Electric Power Systems Quality, 2. ed., Mcgraw-hill, 2002
- [3] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). Atlas de energia elétrica do Brasil. 3. ed. Brasília, 2008. 236 p.
- [4] NEVES, A. B. F., MENDONÇA, M. V. B., Filho, A. L. F., Rosa, G. Z. Effects of Voltage Unbalance and Harmonic Distortion on the Torque and Efficiency of a Three-Phase Induction Motor. 2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). Belo Horizonte, Brazil. 16-19 Oct. 2016.
- [5] CHAUHAN, S. and SINGH, S. B. Effects of voltage unbalance and harmonics on 3-Phase induction motor during the condition of undervoltage and overvoltage. 2019 6th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks. Noida, India. 7-8 March 2019.
- [6] DONOLO, P. et. al. Impact of Voltage Waveform on the Losses and Performance of Energy Efficiency Induction Motors. IEEE ANDESCON 2018. Santiago de Cali, Colombia. 22-24 Aug. 2018.
- [7] MIRZAPOUR, O., KARIMI-ARPANAHI, S., ORAEE, H. Evaluating Grid Harmonics Effect on Induction Motor Using Reduced Thermal Model. Smart Grid Conference (SGC). Sanandaj, Iran. 28-29 Nov. 2018.
- [8] SOUTO, Olívio Carlos Nascimento. Modelagem e análise do desempenho térmico de motores de indução sob condições não ideais de alimentação. 384 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2001.
- [9] ARFAT, Siddique; S., Yadava G.; SINGH, Bhim. Effects of Voltage Unbalance on Induction Motors. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianápolis, 2004.
- [10] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional/Módulo 08 – Qualidade da Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>.
- [11] IEC – International Electrotechnique Commission. IEC 61000-4-30 – Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods. 2008.
- [12] IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Std 1159-1995 – Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. 1995.
- [13] MÔLDE, H.; VINNAL, T.; BELDJAJEV, V. Harmonic Losses in Induction Motors Caused by Voltage Waveform Distortions. Electric Power Quality and Supply Reliability Conference, 2010.

- [14] DUARTE, Silvio Xavier; KAGAN, Nelson. A Power-Quality Index to Assess the Impact of Voltage Harmonic Distortions and Unbalance to Three-Phase Induction Motors. *IEEE Transactions On Power Delivery*, 2010.
- [15] PÉREZ, John J.; CORTÉS, Camilo A.; GÓMEZ, Álvaro. A study of voltage sags in electric motors. *9th International Conference of Electrical Power Quality and Utilizations*, Barcelona, 2007.
- [16] BUCCI, G.; FIORUCCI, E.; OMETTO, A.; ROTONDALE, N. The Evaluation of the Effects of the Voltage Amplitude Modulations on Induction Motors. *IEEE Transaction*, 2008.
- [17] FERREIRA, Fernando. J. T. E.; ALMEIDA, Aníbal. T. Considerations on In-Field Induction Motor Load Estimation Methods. *Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical*, 2008.
- [18] MOTOR CHALLENGE, DOE/GO- 10097-517. FACT SHEET: The Program of the U. S. Department of Energy. "Determining Electric Motor Load and Efficiency".
- [19] BONELLI, Arthur F.; AOKI, Alexandre R.; TEIXEIRA, Mateus D.; LANGNER, André L.; SOUZA, Wyrllen. E.; FILIPINI, Fábio. A.; NEHLS, Ronoel A. Panorama do Impacto da Qualidade da Energia Elétrica Aplicada aos Motores das Indústrias Estado do Paraná. *IV SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Goiânia, 2012.