



## CARACTERÍSTICA DO FUNCIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS QUANDO ACIONADOS COM FREQUÊNCIA FORA DO PADRÃO

Isabela Oliveira Zaparoli\*<sup>1</sup>, Josemar de Souza Moreira<sup>1</sup>

<sup>1</sup>PPGEL – Universidade Federal de São João Del Rei

**Resumo** - As máquinas elétricas são elementos que cumprem papel de grande importância nas indústrias. O presente artigo apresenta as características elétricas de motores de indução trifásicos bobinados para 60 HZ quando ligados a uma rede de 50 HZ. O motor em estudo foi acionado por um inversor partindo a vazio e submetido às condições de 50% e 100% de carga, onde foram analisadas as seguintes características: Potência, Corrente, Velocidade nominal, Escorregamento, Eficiência e Torque. Os sinais de origem elétrica foram coletados nas três fases de alimentação do motor. Os resultados mostram-se dentro dos limites toleráveis.

**Palavras-Chave** - Corrente, Inversores de Frequência, Motores de Indução, Potência, Torque.

### CHARACTERISTICS OF THE OPERATION OF THREE-PHASE INDUCTION MOTOR WHEN OPERATED WITH FREQUENCY OUTSIDE THE STANDARD

**Abstract** - Electrical machines are elements that play a major role in industries. The present article presents the electrical characteristics of three - phase wound induction motors to 60 HZ when connected to a 50 HZ grid. The motor under study was driven by an inverter starting with no load and subjected to conditions of 50% and 100% load, where the following characteristics were analyzed: Power, Current, Nominal Speed, Slip, Efficiency and Torque. Signals of electrical origin were collected in the three phases of powering the motor. Results are within tolerable limits.

**Keywords** - Current, Frequency Inverters, Induction Motors, Power, Torque.

#### I. INTRODUÇÃO

Motores elétricos são máquinas capazes de promover uma transformação de energia elétrica em energia mecânica com algumas perdas de energia. Isto se deve principalmente à sua

robustez, rendimento aceitável e baixo custo. Ainda com advento de sistemas de controle de velocidade e torque aplicados a este tipo de motor, é comum sua utilização em processos críticos ou de grande importância para a planta, área antes dominada por motores de corrente contínua [1].

No Brasil, de acordo com Ministério de Minas e Energia no documento “Plano Nacional de Eficiência Energética”, a indústria consome 43,7% de toda energia elétrica nacional e a força motriz em operação usa 68% desta parcela. Sendo assim, constata-se que aproximadamente 30% da energia elétrica do país é consumida por motores elétricos, ANEEL [2]. Diante da relevância e representatividade dos motores no consumo de energia elétrica, torna-se importante conhecer e monitorar as condições de funcionamento dos motores, afim de evitar eventuais problemas.

Com a industrialização, a proliferação de equipamentos eletrônicos é cada vez maior de forma a rentabilizar processos e otimizar lucros, levando a indústria a se preocupar cada vez mais com os parâmetros de qualidade de energia [3].

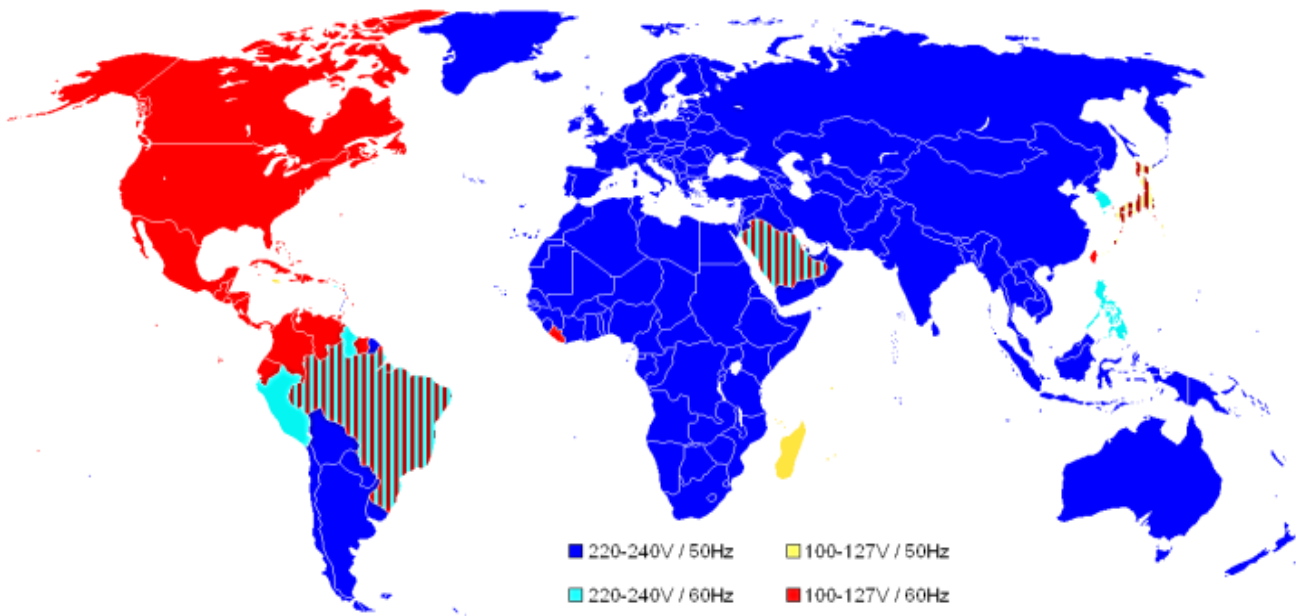
Nesse contexto, em um cenário onde é comum a importação e exportação de máquinas elétricas, torna-se de fundamental importância conhecer os padrões elétricos de tensão e frequência da rede a qual os motores elétricos serão ligados, afim de garantir o funcionamento adequado dos mesmos. De acordo com Neves [4] e estudos realizados pela Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE), existem diferentes padrões de tensão e frequência para cada país.

Segundo [5], os motores de indução trifásicos deverão operar com sucesso em condições de funcionamento à carga nominal e em tensão nominal com uma variação de frequência de até 5% acima ou abaixo da frequência nominal. O desempenho dentro desta variação não estará necessariamente de acordo com as normas estabelecidas para a operação na frequência nominal.

A motivação para esta pesquisa vem da importância de conhecer e quantificar os efeitos que uma rede de 50 HZ causa sobre motores de indução trifásicos projetados para rede de 60 HZ, além de descobrir a real possibilidade de operação dos motores nestas condições. Fato que ocasionalmente pode ocorrer quando motores são instalados sem uso de dispositivos de eletrônica de potência em locais onde o padrão de frequência da rede é de 50HZ.

\* oliveirazaparoli@gmail.com

Figura 1: Padrões de tensão e frequência no mundo. Fonte: Neves [4].



O motor em estudo foi acionado por um inversor de frequência a 60 HZ e 50 HZ respectivamente, partindo a vazio e submetido à condição de plena carga, onde foram analisadas as seguintes características: Potência, corrente, velocidade nominal, escorregamento, eficiência e torque.

## II. QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

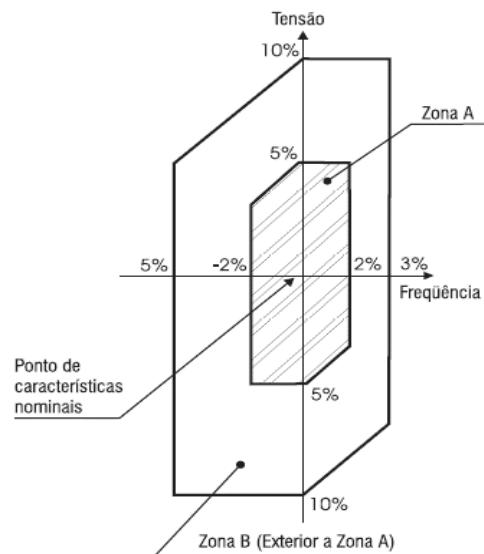
O conceito de Qualidade de Energia está relacionado a um conjunto de alterações que podem ocorrer no sistema elétrico. Define-se bem o problema de qualidade de energia como sendo “Qualquer problema de energia manifestado na tensão, corrente ou nas variações de frequência que resulte em falha ou má operação de equipamentos” [6]. Estas alterações ocorrem em várias partes do sistema de energia, seja nas instalações de consumidores ou no sistema supridor da concessionária.

## III. VARIAÇÃO DE TENSÃO E FREQUÊNCIA

Entende-se por tensão e frequência nominais, a tensão e a frequência para o qual o motor foi projetado. Estudos realizados pela WEG [7] mostram que existe uma tolerância à variação de tensão e frequência em motores de indução, conforme a norma NBR 17094:2013 que classifica a tolerância à variação de tensão e frequência em motores de indução como Zona A e Zona B, conforme mostrado na Figura 2.

De acordo com esta norma, um motor de indução trifásico deve operar com sucesso em condições de funcionamento à carga nominal na zona A, porém, pode não atender completamente suas características de desempenho, apresentando alguns desvios. Já na zona B o motor deve operar em condições de funcionamento à carga nominal, mas pode apresentar desvios superiores aqueles da zona A. Dessa forma, recomenda-se evitar o funcionamento prolongado na periferia da zona B.

Figura 2: Limite das variações de tensão e de frequência. Fonte: ABNT [8].



## IV. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Uma característica fundamental de um motor de indução é o comportamento do conjugado versus rotação. À plena carga, o motor de indução sempre irá girar a um escorregamento que segure o equilíbrio entre o torque eletromagnético desenvolvido pelo motor e o torque da carga.

Segundo Fitzgerald [9] uma carga mecânica requer uma determinada potência. Ou seja, quando o motor de indução aciona uma carga torna-se necessário que a característica mecânica do motor esteja adaptada as necessidades da carga mecânica.

Para um sistema dotado de movimento de rotação, a potência desenvolvida ( $P$ ) é calculada pela Equação 1, onde  $C$  é o conjugado desenvolvido e  $\omega$  é a velocidade angular.

$$P = C \times \omega \quad (1)$$

O torque eletromagnético do motor de indução pode ser obtido a partir do quociente da potência do eixo pela velocidade mecânica do rotor, dado pela Equação 2, onde  $T_{em}$  é o torque eletromagnético;  $P_{out}$  é a potência de saída (potência no eixo) e  $\omega$  é a velocidade mecânica do rotor.

$$T_{em} = \frac{P_{out}}{\omega} \quad (2)$$

Conforme a WEG [7], a velocidade síncrona do motor é definida pela velocidade de rotação do campo girante, que depende do número de polos do motor e da frequência de alimentação. Os enrolamentos podem ser construídos com um ou mais pares de polos, que se distribuem alternadamente ao longo da periferia do núcleo magnético. Assim, como o enrolamento tem  $p$  polos, a velocidade síncrona é calculada através da Equação 3, onde  $N_s$  é a Velocidade síncrona (rpm),  $f$  é a frequência da rede (Hz) e  $P$  é o número de polos.

$$N_s = \frac{120 \times f}{P} \quad (3)$$

Em um motor elétrico assíncrono, o rotor sempre irá girar com rotação abaixo da rotação do campo girante. A diferença relativa entre as velocidades do rotor e do campo girante do estator é conhecida como "escorregamento" e é representada pela Equação 4, onde  $N_s$  é a velocidade síncrona (rpm);  $N$  é a velocidade rotórica (rpm) e  $S$  é o escorregamento.

$$S = \frac{N_s - N}{N_s} \quad (4)$$

A velocidade nominal, é a velocidade do motor à potência nominal, sob tensão e frequência nominais. Esta velocidade depende do escorregamento e da velocidade síncrona e é dada pela Equação 5.

$$N = N_s(1 - S) \quad (5)$$

O motor elétrico absorve energia elétrica da linha e a transforma em energia mecânica disponível no eixo. O rendimento define a eficiência com que é feita esta transformação. Chamado potência útil ( $P_u$ ), a potência mecânica disponível no eixo e, potência absorvida ( $P_a$ ), a potência elétrica que o motor retira da rede, o rendimento será a relação entre as duas, ou seja, Equação 6, onde  $P_u$  é a Potência útil (W) e  $P_a$  é a Potência absorvida (W).

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (6)$$

A corrente nominal de um motor trifásico é a corrente absorvida da rede quando o motor funciona à potência nominal, sob tensão e frequência nominais. O valor da corrente nominal depende do rendimento ( $\eta$ ) e do fator de potência ( $\cos\phi$ ) do motor. A corrente nominal é obtida através da Equação 7, onde  $I_n$  é a corrente nominal (A);  $P$  é a Potência (W);  $\eta$  é o rendimento e  $\cos(\alpha)$  é o fator de potência.

$$I_n = \frac{P}{\sqrt{3} \times V \times \eta \times \cos \alpha} \quad (7)$$

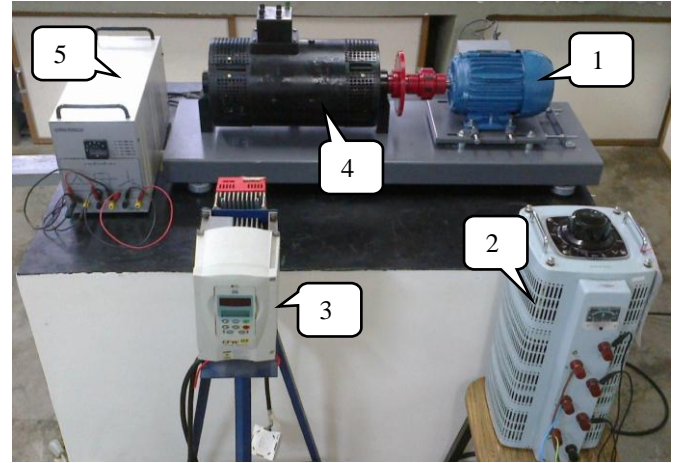
## V. METODOLOGIA

Os testes foram desenvolvidos em uma bancada didática mostrada na Figura 3. A bancada é composta por um motor de indução trifásico {1}, WEG, 2 CV, 1750 rpm, 220V, 60 Hz, 4 polos, categoria N, 5,98 A, rendimento 84,2%, rolamentos SKF 6204 ZZ e SKF 6205 ZZ. Para a

alimentação do sistema foi utilizado o Varivolt trifásico {2} e o inversor de frequência WEG CFW 09 {3}.

O sistema de carga é composto por um motor CC funcionando como gerador de corrente contínua {4} MOTRON M610-VIRB-2K, 5 CV, 2000 rpm, alimentado por um gerador monofásico CC ligado aos terminais de campo, assim a carga foi aplicada no motor através do ajuste da corrente de campo do gerador CC. Já os terminais de armadura foram ligados a um banco de resistores {5}.

Figura 3: Bancada de Testes do Laboratório de Sistemas Dinâmicos.



O inversor de frequência foi parametrizado inserindo-se os dados de placa do motor e selecionando o controle escalar V/F 60 HZ e V/F 50 HZ. As coletas dos sinais elétricos foram feitas utilizando alicates amperímetro e conectores tipo jacaré, ambos os sensores integram o equipamento Baker Explorer 3000, Figura 4, tecnologia desenvolvida para monitoramento de equipamentos em operação *on-line*.

Com a ligação dos alicates amperímetro e cabos de tensão tipo jacaré às três fases, os sinais foram processados e memorizados, possibilitando a análise através do próprio equipamento. O esquema de ligação do equipamento Baker Explorer 3000 é mostrado na Figura 5.

## VI. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Na Tabela I, tem-se os dados obtidos através do analisador de motores Baker Explorer, relacionando os valores de potência, corrente, velocidade, torque, eficiência e escorregamento.

Ao analisar os dados da Tabela I, percebe-se que em termos práticos a potência consumida se manteve, pois, a carga simulada nos testes é caracterizada por torque constante. Houve uma redução na velocidade de operação do motor já esperada, de acordo com a equação 3, a velocidade síncrona do motor é definida pela velocidade de rotação do campo girante que tem relação direta com a frequência de alimentação. Houve um aumento da corrente para as condições de funcionamento em 50 HZ, porém a mesma manteve-se abaixo da corrente nominal do motor. Também houve aumento do torque para as cargas simuladas em 50 HZ, pois, conforme a Equação 2, com a redução da velocidade nominal a razão entre a potência de saída e a velocidade nominal aumenta. O torque a plena carga em 50 HZ aumentou aproximadamente 12% em relação a plena

Figura 4: Equipamento Baker Explorer 3000. Fonte: Baker [10].



Figura 5: Esquema de ligação do Baker Explorer 3000.

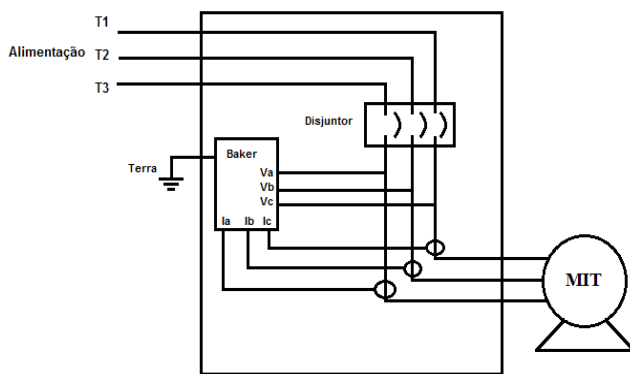


Tabela I: Parâmetros elétricos do motor.

	PARÂMETROS ELÉTRICOS			
	ANÁLISE DO MIT EM 60HZ		ANÁLISE DO MIT EM 50HZ	
CARGA DO MOTOR	50%	100%	50%	100%
POTÊNCIA (W)	750	1493,33	747,4	1490,01
CORRENTE (A)	3,49	5,31	4,54	5,64
VELOCIDADE (RPM)	1774,95	1741,32	1486,93	1467,95
TORQUE (N.m)	4,03	8,20	4,72	9,17
EFICIENCIA (%)	94,35	93,45	93,33	93,19
ESCORREGAMENTO	0,014	0,033	0,009	0,021

carga em 60 HZ. A eficiência do motor acionado em 50 HZ foi praticamente a mesma à 60 HZ.

Houve uma redução do escorregamento para ambas as condições de carga, nas diferentes frequências de alimentação. Como velocidade do campo girante do estator é menor, sua diferença em relação a velocidade do rotor também se torna menor.

## VII. CONCLUSÕES

Diante dos testes e das análises realizadas no motor sobre as condições de funcionamento em 60 HZ e 50 Hz, pode-se concluir que os resultados obtidos condizem com a teoria estudada sobre variação da frequência de alimentação em motores de indução trifásico, quando observa-se que há redução da velocidade com a redução da frequência, aumento do torque devido a redução da velocidade e redução do escorregamento.

As variações dos parâmetros elétricos, a princípio mostram-se dentro dos limites suportáveis pelo motor. Apesar disso, não é possível afirmar se haverá redução da vida útil bem como problemas associados ao desempenho de motores ao operarem permanentemente em redes de 50 HZ. Além disso, a condição de funcionamento em 50 HZ foi simulada com o uso de um inversor de frequência que não reproduz uma alimentação com frequência puramente senoidal.

## REFERÊNCIAS

- [1] Silva, J. G. B., 2008. *Aplicação da Análise de Componentes Principais (PCA) no Diagnóstico de Defeitos em Rolamentos através da Assinatura Elétrica de Motores de Indução*. Universidade Federal de Itajubá. Tese (Doutorado).
- [2] Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil) (ANEEL). "Incentivo à Substituição de Motores Elétricos: Promovendo A Eficiência Energética no Segmento de Força Motriz". Brasília, 2015.
- [3] Gonçalves, J. A. R. 2008. *Estudo do Comportamento do Motor de Indução Trifásico Sujeito a Perturbações na Qualidade da Energia*. Leiria: Faculdade de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 164p. Dissertação (Mestrado).
- [4] Neves, E. G. C. (2014). *Padrões Elétricos de Tensão e Frequência*. Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas. Setembro de 2014.
- [5] WEG, S.A. Equipamentos Elétricos. *Motores elétricos trifásicos: catálogo técnico*. Jaraguá do Sul. 2010.
- [6] Rezende, P. H. O., 2013. Samesima, M. I., 2013. *Efeitos do Desequilíbrio de Tensões de Suprimentos nos Motores de Indução*. Horizonte Científico, v. 6, n. 2.
- [7] WEG, S.A. Motores elétricos: Guia de especificação. WEG, Jaraguá do Sul-SC, 2012.
- [8] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 17094: Máquinas Elétricas Girantes - Motores de Indução - Parte 1:Trifásicos. Novembro de 2013.
- [9] Fitzferald, A. E., Charles Jr. Kingsley & S.D. Umans (2003), *Electric Machinery*, 6ª edição, McGraw-Hill, New York.
- [10] Baker, I. C., 2013. *User's Manual EXP3000/EXP3000R*. Baker Instrument Company. Avenue Suite 100 Fort Collins, CO 80525.