

# EFEITOS DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÕES DE SUPRIMENTOS NOS MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

PAULO HENRIQUE OLIVEIRA REZENDE <sup>1</sup>, MILTON ITSUO SAMESIMA <sup>2</sup>

## **Resumo**

O objetivo deste artigo é discutir e demonstrar os efeitos causados em um motor de indução, quando esse é alimentado por tensões desequilibradas. Todos os parâmetros discutidos em motores elétricos em condições de funcionamento ideal são expostos neste trabalho com uma abordagem voltada para o desequilíbrio de tensão. O trabalho inicia-se definindo o que é um desequilíbrio de tensão, como ocorre e classifica-se esse fenômeno. Posteriormente é mostrado o equacionamento do circuito equivalente do motor para a nova condição de alimentação, e é a partir dessas equações que é feito um modelo do motor de indução no ATPDraw e simulado algumas condições impostas e comparado com ensaios laboratoriais.

**Palavras-Chave** – Desequilíbrio de tensão, efeitos, equacionamento, motor de indução, simulação computacional.

## EFFECTS OF IMBALANCE OF SUPPLY VOLTAGES IN INDUCTION MOTORS

## **Abstract**

The objectives of this paper is to discuss and demonstrate the effects of an induction motor, when this is fed by unbalanced voltages. All the parameters discussed in electric motors in ideal operating conditions are set out in this work with an approach focused on the imbalance of tension. The work begins by defining what is an imbalance of tension and as it happens, terming this phenomenon. It is then shown the solution to the equivalent circuit of the engine to the new feeding condition, and it is from these equations that is made a model of the motor in ATPDraw and simulated a number of conditions imposed and compared with laboratory tests.

**Keywords** – Computer simulation, effects, induction motor, negotiation, voltage unbalance.

---

<sup>1</sup>Acadêmico do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Uberlândia.. FEELT/UFU - Avenida João Naves de Ávila, 2121 – Santa Mônica – Uberlândia (MG) – Brasil – CEP 38400-902. e-mail: paulohenrique16@gmail.com

<sup>2</sup>Professor da Faculdade de Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Uberlândia. FEELT/UFU – Av. João Naves de Ávila, 2121 – Santa Mônica – Uberlândia (MG) – Brasil – CEP 38400-902. e-mail: samesima@ufu.br

## 1. INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico mundial, a utilização de motores de indução trifásicos é imprescindível, uma vez que, no Brasil cerca de 44 % da energia elétrica gerada é para atender a demanda industrial. Sendo os motores responsáveis por 55% desse consumo, estudar quaisquer desequilíbrios de tensão, harmônicas, flutuações e perturbações que possam atingir os mesmos, é de suma importância para um bom aproveitamento e eficiência da máquina. [1]

Um dos fatores que colaboram bastante para o aumento nas perdas nos motores trifásicos é a alimentação com desequilíbrio de fases, que geram correntes excessivas circulando no motor, provocando perdas, elevação de temperatura e conseqüente redução da vida útil.

Entre as causas do desequilíbrio de um sistema trifásico, a principal é a ligação desproporcional de cargas monofásicas, tais como, sistemas de iluminação e motores monofásicos, nas suas três fases de forma aleatória.

O desequilíbrio das tensões provoca vários problemas tais como:

- Desperdício de energia devido à existência de maiores perdas provocadas por altas correntes desequilibradas (redução de rendimento);
- Elevação da temperatura acima dos limites aceitáveis pelo motor;
- Redução do conjugado disponível para a carga, pela existência de componente de campo magnético girante em sentido contrário ao da rotação do motor.

O desequilíbrio das tensões de fase influencia no desequilíbrio das correntes. Por exemplo, um desequilíbrio de 1% das tensões provoca um desequilíbrio das correntes de plena carga na faixa de 7,5 a 8,5% e de 12,5 a 15% em vazio.

Segundo [2], estudos já demonstraram que desequilíbrios de 3,5% na tensão podem aumentar as perdas do motor em 20% e desequilíbrios acima de 5% causam problemas imediatos. Pequenos valores na faixa de 1 a 2% também são prejudiciais, pois podem ocasionar significativos aumentos no consumo de energia por muito tempo, sem serem detectados, principalmente se o motor está superdimensionado. Assim, tensão da rede deve ser regularmente monitorada e um desequilíbrio maior do que 1% deve ser corrigido.

A norma indica também, que quando motores (categoria N) são utilizados em sistemas desbalanceados, devem-se aplicar fatores de redução para a potência disponível no eixo, de modo que a elevação de temperatura admissível não seja excedida. Para as outras categorias, é recomendável consultar o fabricante ou examinar as medições de temperatura de funcionamento.

Há, no Brasil, um aumento expressivo no interesse dos órgãos reguladores, das concessionárias de energia, dos centros de pesquisa e, principalmente, dos consumidores de energia elétrica pelo conhecimento das condições da qualidade de energia, tanto nos aspectos relativos à qualidade do serviço como nos aspectos da qualidade do produto da energia elétrica fornecida. Após a criação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e das agências reguladoras estaduais, um esforço muito grande tem sido feito pelos vários agentes envolvidos para definir medidas e estabelecer procedimentos que visam garantir os direitos dos consumidores, melhorando a qualidade do serviço e do produto, além de preservar os sistemas elétricos de fornecimento de energia. Embora a definição desses procedimentos seja uma tarefa bastante difícil, devido aos interesses conflitantes entre os agentes envolvidos, esses procedimentos são de fundamental importância para garantir a regulação dos serviços, através da criação, supervisão e controle de indicadores da qualidade da prestação de serviços e do produto de fornecimento da energia elétrica. Neste sentido, a exigência de índices de qualidade adequados, por parte dos órgãos reguladores, cria condições para preservar e melhorar a qualidade do serviço e a qualidade do produto de fornecimento de energia elétrica e, a par disso, preservar as empresas de serviços públicos sob controle do capital privado, garantindo, em consequência, um atendimento adequado aos clientes.

## **2. QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**

A disponibilidade da energia elétrica representa um incremento na qualidade de vida das populações. Num primeiro momento em que se implanta um sistema de distribuição de energia elétrica, a população local imediatamente passa a constar com inúmeros benefícios, tanto do ponto de vista de maior conforto doméstico como de melhores possibilidades de emprego e produção.

À medida que os benefícios da energia elétrica passam a fazer parte do dia-a-dia das pessoas, é natural que se inicie um processo de discussão quanto à qualidade daquele produto. Numa análise inicial preocupa-se com a continuidade do serviço, já que fica evidente que qualquer interrupção do fornecimento implicará em transtornos de toda ordem. Não tão evidente, no entanto, é a questão da qualidade da energia elétrica como um produto comercial, mesmo que não ocorram interrupções. Isso normalmente só é percebido de forma um pouco difusa, através de falhas de funcionamento em alguns equipamentos.

A questão da qualidade da energia elétrica aparece, portanto a partir do momento em que os consumidores constatarem interrupções no fornecimento, mas à medida que tais consumidores

tornam-se mais sofisticados sob o ponto de vista tecnológico, outros fatores começam a ser considerados [3].

O Termo O conceito de Qualidade de Energia está relacionado a um conjunto de alterações que podem ocorrer no sistema elétrico. Uma boa definição para o problema de qualidade de energia é: "Qualquer problema de energia manifestado na tensão, corrente ou nas variações de frequência que resulte em falha ou má operação de equipamentos de consumidores". Tais alterações podem ocorrer em várias partes do sistema de energia, seja nas instalações de consumidores ou no sistema supridor da concessionária.

Estes problemas vêm se agravando rapidamente em todo o mundo por diversas razões, das quais destacamos duas:

- Instalação cada vez maior de cargas não lineares. O crescente interesse pela racionalização e conservação da energia elétrica tem aumentado o uso de equipamentos que, em muitos casos, aumentam os níveis de distorções harmônicas e podem levar o sistema a condições de ressonância;
- Maior sensibilidade dos equipamentos instalados aos efeitos dos fenômenos (distúrbios) de qualidade de energia.

Pode-se distinguir e monitorar a qualidade do suprimento: a) quanto ao padrão de continuidade do serviço, e; b) quanto ao padrão da tensão de fornecimento referente à forma de onda.

No primeiro caso (caso a), monitoram-se ocorrências que provocam interrupções no fornecimento de energia. Obtêm-se, dessa monitoração, indicadores relativos à continuidade do serviço.

No segundo caso (caso b), ao se considerar o padrão de forma de onda da tensão de fornecimento, surge à necessidade de serem definidas outras categorias de fenômenos que são diferenciados em função de suas naturezas e durações e que podem ser separadas em fenômenos transitórios, de curta duração e de longa duração ou permanentes.

Os fenômenos transitórios são os que possuem as menores durações, em geral na faixa de alguns micro-segundos a alguns milésimos de segundos. De acordo com a sua natureza ou sua forma de onda, esses fenômenos podem ser divididos em impulsivos (geralmente de origem atmosférica) e oscilatórios (geralmente resultados de chaveamentos ou outras situações em que há uma mudança súbita no regime permanente) [4].

Entende-se como variação de tensão de curta duração (VTCD) a variação no valor eficaz do sinal de tensão com duração compreendida entre 8,33 ms (0,5 ciclo de um sinal com frequência fundamental de 60 Hz) e 1 minuto [5]. Geralmente, essa variação no valor eficaz é

resultado da variação na amplitude da forma de onda. Essas variações são capazes de sensibilizar dispositivos de proteção, desligando processos, ou afetar o funcionamento de equipamentos, podendo provocar grandes prejuízos a clientes conectados ao sistema de fornecimento de energia, devido à parada na produção ou comprometimento da qualidade da produção.

Os fenômenos de longa duração, ou comumente denominados de regime permanente, incluem as variações lentas nas amplitudes das tensões e variações nas formas de onda das tensões. Desses tipos de variações originam-se os fenômenos como variação dos níveis de tensão, distorção harmônica de tensão e desequilíbrio de tensão. Os fenômenos de longa duração também são caracterizados por valores eficazes. A forma de tratar os valores eficazes ao longo do tempo tenta representar efeitos de aquecimento térmico em equipamentos elétricos submetidos a condições não adequadas de fornecimento. As medições e apurações de indicadores relacionados a esses fenômenos considerando intervalos de tempo apropriados possibilitam avaliar os efeitos térmicos dos fenômenos sobre equipamentos elétricos com constantes de tempo térmicas bem diferentes, como equipamentos eletrônicos com constantes de tempo de 600 ms, pequenos transformadores ou motores com constantes de tempo da ordem de 2 minutos e transformadores ou motores de maior porte com constantes de tempo térmica da ordem de 20 minutos a horas.

Uma outra categoria de indicadores é definida para flutuações rápidas na amplitude da tensão (modulação na amplitude da tensão com frequências entre 0 e 30 Hz). Essas flutuações dão origem a um fenômeno conhecido como cintilação (*Flicker*), que é o resultado da variação na luminância de lâmpadas elétricas, principalmente as incandescentes. Esse fenômeno relaciona-se à percepção visual do olho humano quando de oscilações da intensidade luminosa emitida por uma lâmpada incandescente, quando a amplitude de sua tensão de alimentação está sujeita a flutuações rápidas. Além do efeito de cintilação, as flutuações rápidas na amplitude da tensão causam também efeitos danosos sobre motores elétricos.

### **3. DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO**

O desequilíbrio em um sistema elétrico trifásico é uma condição na qual as três fases apresentam diferentes valores de tensão em módulo ou defasagem angular entre fases diferentes de 120° elétricos ou, ainda, as duas condições simultaneamente [6].

Os equipamentos trifásicos operando com tensões desbalanceadas geralmente funcionarão de forma inadequada, podendo sofrer danos e redução da vida útil.

Um sistema trifásico ideal, livre de desequilíbrios, considerando a fase A na referência e seqüência de fases positiva, é dado em pu por:

$$\bar{V}_A = 1,0 \angle 0^\circ \quad \bar{V}_B = 1,0 \angle -120^\circ \quad \bar{V}_C = 1,0 \angle 120^\circ$$

As Figura 1 (a) e 1 (b) são exemplo de tensões equilibrada e desequilibrada, respectivamente.

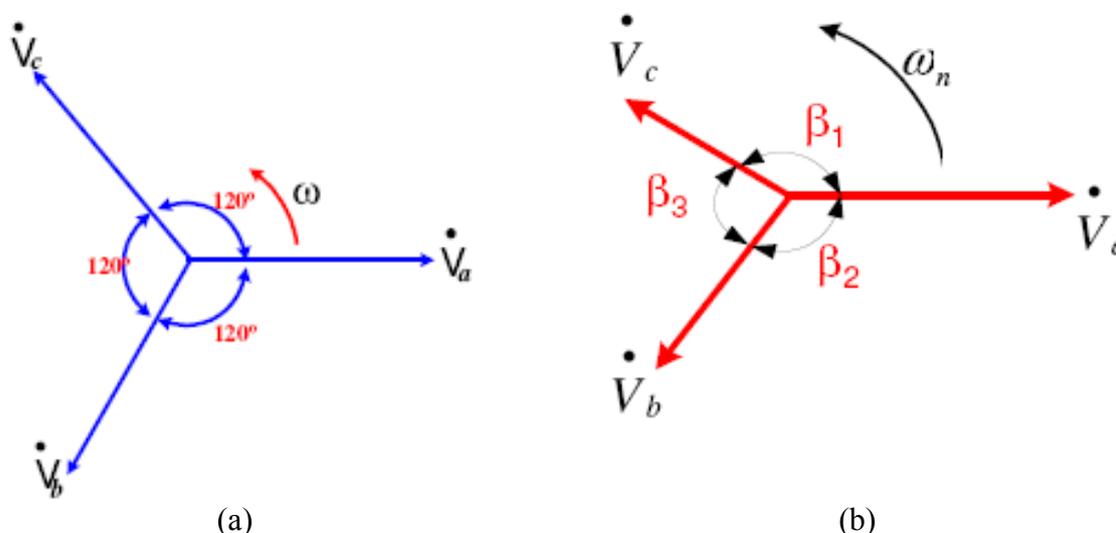


Figura 1 – (a) Tensão Trifásica Equilibrada, (b) Tensão Trifásica Desequilibrada.

Para o estudo dos desequilíbrios é usado o método de componentes simétricas Figura 2. Este consiste na decomposição da tensão ou corrente trifásicos desequilibrados em dois sistemas trifásicos equilibrados, ou seja, mesmo módulo e defasados de  $120^\circ$  e um com mesmo módulo e defasados de  $0^\circ$ . Um chamado de Seqüência Positiva segue a mesma seqüência de fase do sistema original, outro chamado de Seqüência Negativa segue a seqüência de fase contrária a original e o chamado Seqüência Zero que é sistema defasado de zero graus.

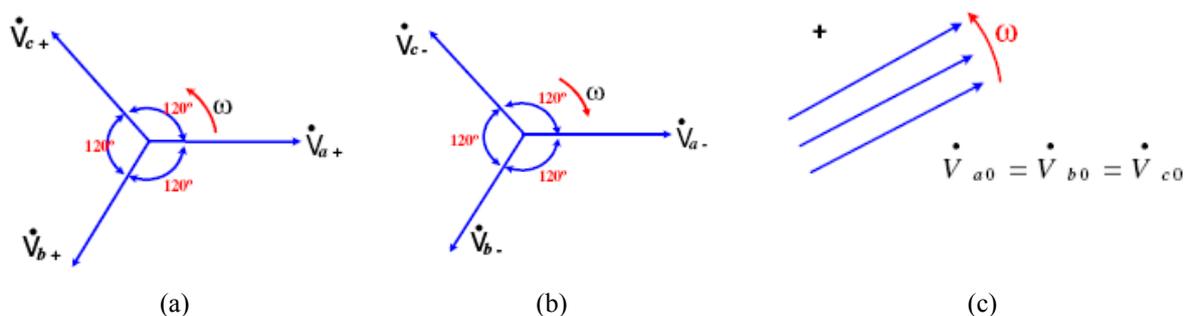


Figura 2 – Componentes simétrica: (a) Seqüência Positiva; (b) Seqüência Negativa; (c) Seqüência Zero.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a+} \\ \dot{V}_{a-} \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a+} \\ \dot{V}_{a-} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix}$$

Figura 3 – Matrizes de Decomposição.

### 3.1 Origens do desequilíbrio de tensão

O desequilíbrio de tensão possui basicamente dois tipos de origem: estrutural e funcional.

As causas estruturais correspondem a qualquer desequilíbrio na rede elétrica, como transformadores, linhas de transmissão e bancos de capacitores desbalanceados. Esse tipo de causa é praticamente constante, devido à pequena variação dos parâmetros da rede elétrica. As causas funcionais correspondem a distribuições desiguais de carga nas três fases, seja pela presença de cargas trifásicas desequilibradas, pela má distribuição de cargas monofásicas ou pela variação nos ciclos de demanda de cada fase. Consumidores residenciais e industriais são exemplos de causas funcionais.

A seguir são mostrados alguns exemplos de causas funcionais de desequilíbrio de tensão:

- Sistemas monofásicos;
- Fornos Monofásicos;
- Fornos de indução;
- Fornos trifásicos à arco;
- Máquinas de solda elétrica;
- Aparelhos de Raios-X;
- Rebocadores;
- Suprimentos de tração em áreas remotas;
- Anomalias no sistema, tais como: abertura de um condutor, curto-circuito, falha na isolação de equipamentos;
- Linhas aéreas assimétricas e sem transposição;
- Correntes de magnetização de transformadores trifásicos, devido às diferenças magnéticas oriundas da sua própria construção.

### 3.2 Quantificação do desequilíbrio de tensão

Existem atualmente quatro métodos amplamente empregados para a quantificação do desequilíbrio de tensão (fator K) [7]: o método NEMA, o método IEEE, o método das componentes simétricas e o método CIGRÉ. Os dois primeiros métodos levam em conta o fato de que muitos medidores de tensão não fornecem os valores angulares das tensões, trabalhando unicamente com os módulos. O terceiro método se baseia no teorema de Fortescue, que decompõe o sistema trifásico em três sistemas equilibrados, exigindo conhecimento tanto dos módulos como dos ângulos das tensões de fase. O método CIGRÉ fornece o mesmo resultado que o método das componentes simétricas, porém a forma de cálculo é diferente, utilizando somente o valor dos módulos das tensões de linha do sistema.

#### 3.2.1 Método NEMA

A norma NEMA – MG1 – 14.34, da “National Electrical Manufacturers Association of USA”, define o fator K como sendo a razão entre o máximo desvio das tensões de linha em relação ao seu valor médio, e este mesmo valor médio, equação 1 [7]. Ou seja, o método NEMA analisa o desvio das tensões de linha em relação valor médio delas:

$$K\% = \frac{\Delta V}{V_m} \times 100 \quad (01)$$

Em que  $V_m$  é o valor médio das tensões de linha, e  $\Delta V$  é o máximo desvio das tensões de linha em relação a  $V_m$ .

#### 3.2.2 Método IEEE

Existem dois métodos desenvolvidos pelo IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers). De acordo com o documento mais recente desse instituto (Bollen, 2002), o fator K é quantificado pela razão entre a diferença entre o maior e o menor valor das tensões de fase e a média destas, equação (2.4). Diferentemente do método NEMA, o método IEEE leva em conta o máximo desvio entre as tensões:

$$K\% = \frac{3(V_{\max} - V_{\min})}{V_A + V_B + V_C} \times 100 \quad (02)$$

Em que  $V_A$ ,  $V_B$  e  $V_C$  representam os módulos das tensões das fases A, B e C, e  $V_{\max}$  e  $V_{\min}$  correspondem ao maior e menor dos módulos das tensões de fase, respectivamente.

### 3.2.3 Método das componentes simétricas

O método das componentes simétricas quantifica o fator K através da decomposição das tensões de fase em três seqüências equilibradas, as seqüências positiva, negativa e zero. A seqüência positiva é representada por três fasores equilibrados com seqüência de fases ABC; a seqüência negativa, por três fasores equilibrados com seqüência ACB; e a seqüência zero, por três fasores paralelos entre si.

Em um sistema equilibrado, só existe a seqüência positiva ou negativa, dependendo da ordem com que o sistema foi composto. Isto é, um sistema com fases  $\overline{V}_A = 1,0 \angle 0^\circ$ ,  $\overline{V}_B = 1,0 \angle -120^\circ$  e  $\overline{V}_C = 1,0 \angle 120^\circ$  possui somente a seqüência positiva, e um sistema com fases  $\overline{V}_A = 1,0 \angle 0^\circ$ ,  $\overline{V}_B = 1,0 \angle 120^\circ$  e  $\overline{V}_C = 1,0 \angle -120^\circ$  possui somente a seqüência negativa. A presença de desequilíbrio em uma ou mais fases de um sistema com seqüência de fases positiva se traduz no surgimento de seqüências negativas e zero.

O motor de indução pode auxiliar na interpretação física dos efeitos das componentes simétricas [8]. A aplicação de excitação desequilibrada sobre este motor se traduz na aplicação dos três sistemas equilibrados das componentes simétricas. A seqüência negativa gira o rotor no sentido oposto da seqüência positiva, e a seqüência zero não gira o rotor, visto que ela não gera campo magnético girante.

O método das componentes simétricas se baseia nessas observações para quantificar o desequilíbrio [8]. A seqüência negativa tem maior impacto sobre cargas conectadas ao sistema trifásico desequilibrado, de forma que a seqüência zero não é considerada na quantificação. Dessa forma, o fator K é definido pela razão entre os módulos das seqüências negativa ( $V_2$ ) e positiva ( $V_1$ ), equação 03.

$$K\% = \frac{V_2}{V_1} \times 100 \quad (03)$$

O método das componentes simétricas/CIGRÉ é considerado o método de análise do desequilíbrio de tensão matematicamente mais rigoroso, por levar em conta a real configuração do sistema, empregando os valores dos módulos e dos ângulos das três fases. O método NEMA também considera módulos e ângulos das fases (implícitos nos módulos das tensões de linha), mas não segue uma formulação matemática tão elaborada quanto o método das componentes simétricas.

### 3.2.4 Método CIGRÉ

O método CIGRÉ fornece o mesmo resultado do método das componentes simétricas (Gosbell, 2002), mas se utiliza de uma série de manipulações algébricas para expressar o desequilíbrio a partir dos módulos das tensões de linha:

$$K\% = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (04)$$

$$\beta = \frac{V_{AB}^4 + V_{BC}^4 + V_{CA}^4}{(V_{AB}^2 + V_{BC}^2 + V_{CA}^2)^2} \quad (05)$$

Em que  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  e  $V_{CA}$  são os módulos das tensões de linha.

### 3.3 Consequência do desequilíbrio de tensão nos equipamentos elétricos

**Motores de Indução:** Estudos demonstraram que um pequeno desequilíbrio de 3,5 % na tensão pode aumentar, em 20%, as perdas do motor de indução trifásico. Um desequilíbrio de 5% ou mais pode destruí-lo, rapidamente. Segundo a norma NBR 7097/1996, devem ser aplicados fatores de redução para a potência disponível no eixo de motores categoria N, quando estes são alimentados por tensões desequilibradas, de modo que a elevação de temperatura admissível não seja excedida. Para as outras categorias, é recomendável consultar o fabricante (ELETROBRÁS, 2004).

Segundo Eletrobrás (2004), a alteração na amplitude de tensão pode influenciar a eficiência e o fator de potência de motores elétricos, pois, este equipamento é influenciado, diretamente, pelo valor da tensão de alimentação.

Normalmente, estes motores são projetados para suportar variações máximas numa faixa de 10 % acima e abaixo da tensão nominal.

Valores pequenos, na faixa de 1% a 2%, também são prejudiciais, pois além de aumentarem o consumo de energia também reduzem vida útil do motor, devido ao aquecimento gerado pelo aumento das perdas internas. Por isso a rede deve ser regularmente monitorada e desequilíbrios na tensão maiores que 1% devem ser corrigidos.

Pesquisando sobre o assunto, todos relatam os possíveis problemas que os motores podem sofrer quando submetidos ao desequilíbrio, esses são citados abaixo:

- Aumento de perdas internas (redução do rendimento);
- Elevação de temperatura de operação (redução de vida útil);
- Surgimento de torque eletromagnético que age no sentido de frear o motor;
- Alterações no tempo de partida no motor;
- Diminuição do fator de potência;

Esses fatores são de suma importância para o funcionamento adequado do motor, assim estudá-lo é de suma importância.

**Máquinas Síncronas:** Como no caso anterior, a corrente de seqüência negativa fluindo através do estator de uma máquina síncrona, cria um campo magnético girante com velocidade igual à do rotor, porém, no sentido contrário ao de rotação definido pela seqüência positiva. Conseqüentemente, as tensões e correntes induzidas nos enrolamentos de campo, de amortecimento e na superfície do ferro do rotor, terão uma freqüência igual a duas vezes à da rede, aumentando significativamente as perdas no rotor.

**Retificadores:** Uma ponte retificadora CA/CC, controlada ou não, injeta na rede CA, quando esta opera sob condições nominais, correntes harmônicas características (de ordem 5, 7, 11, 13, etc). Entretanto, quando o sistema supridor encontra-se desequilibrado, os retificadores passam a gerar além das correntes harmônicas características, o terceiro harmônico e seus múltiplos. A presença do terceiro harmônico e seus múltiplos no sistema elétrico é extremamente indesejável, pois possibilita manifestação de ressonâncias não previstas, causando danos a uma série de equipamentos.

### 3.4 Redução de vida útil

A vida útil de um motor está intimamente ligada ao aquecimento das bobinas dos enrolamentos fora dos limites previstos da fabricação da máquina, o que acarreta temperaturas superiores aos limites da isolação. Assim, uma elevação de temperatura de 10°C na temperatura de isolação de um motor reduz a sua vida útil pela metade.

O aquecimento, fator principal da redução da vida útil de um motor, provoca um envelhecimento gradual e generalizado do isolamento até o limite de tensão a que está submetido, quando então o motor ficará sujeito a um curto-circuito interno de conseqüência desastrosas.

Existem algumas teorias que justificam a perda da vida útil das isolações. De acordo com uma delas, conhecida como teoria disruptiva, as ligações moleculares dos materiais isolantes sólidos são rompidas, provocando a ruptura dos mesmos.

Quando as correntes absorvidas pelos motores de indução estão desequilibradas o campo de seqüência negativa que gira ao contrário do campo normal ou de seqüência positiva induz nas barras do rotor uma corrente na freqüência duas vezes superior à freqüência industrial. Motivado pelo efeito *skin*, em que as correntes indesejadas de alta freqüência tendem a circular através da superfície dos condutores dos enrolamentos, o rotor fica submetido de imediato aos efeitos térmicos resultantes do processo, enquanto o estator praticamente não é alterado termicamente e nem absorve nenhuma corrente adicional, já que a potência no eixo permanece constante.

Se o motor estiver operando na sua potência nominal, o rotor irá sofrer um aquecimento acima do seu limite térmico e as proteções instaladas nos condutores de alimentação não serão sensibilizadas.

A equação 01 mostra como calcular a redução de vida útil nos motores com alimentação desequilibrada, partindo-se da elevação de temperatura provocada pelo desequilíbrio.

$$\lambda = \lambda_{nom} e^{-\frac{E}{k} \left( \frac{\Delta\theta}{\theta_{nom} (\theta_{nom} + \Delta\theta)} \right)} \quad (06)$$

Onde:

$\lambda$  - Tempo de vida útil;

$\lambda_{nom}$  - Tempo de vida útil nominal;

$\theta\Delta$  - Acréscimo de temperatura em °C;

$\theta_{nom}$  - Temperatura nominal do motor em °K.

A tabela 01 mostra a aplicação dessa equação para diferentes pontos.

Tabela 01: Vida útil em motores

Elevação de Temperatura $\Delta\theta$ (°C)	Tempo de Vida útil (Anos)	Redução de Vida útil (%)
0	20	0
1	18,46	7,7
2	17,04	14,8
3	15,73	21,4
4	14,54	27,3
5	13,43	32,8
6	12,42	37,9
7	11,49	42,5
8	10,63	46,8
9	9,84	50,8
10	9,11	54,4
15	6,24	68,8
20	4,31	78,4

## 4. MODELAGEM DO MOTOR DE INDUÇÃO COM ALIMENTAÇÃO DESEQUILIBRADA

### 4.1. Considerações iniciais

Na análise do comportamento do motor de indução trifásico, tanto no que tange ao desempenho elétrico, faz-se necessário o emprego de modelos matemáticos da máquina. Tais representações retratam os diversos fenômenos físicos que ocorrem no motor quando o mesmo encontra-se em operação. Assim, torna-se possível determinar as diversas grandezas elétricas associadas à operação da máquina submetida a condições ideais ou não de funcionamento.

Para a avaliação do desempenho elétrico do motor, têm-se, basicamente, duas estratégias, a qual a sua escolha depende dos objetivos específicos dos estudos. A primeira consiste na modelagem do motor através das equações diferenciais que governam seu funcionamento. Uma segunda metodologia de análise consiste na representação do motor através de circuitos equivalentes que satisfazem as condições encontradas no funcionamento da máquina quando em regime permanente, denotando, a modelagem no domínio da frequência.

De acordo com o exposto, este capítulo tem por meta apresentar a segunda forma de modelagem dos motores de indução trifásicos, ou seja, a no domínio da frequência. É

importante ressaltar que, usualmente, tais modelos englobam apenas as condições ideais de suprimento de energia elétrica, ou seja, tensões puramente senoidais, equilibradas e constantes. Contudo, para as necessidades impostas neste trabalho, será empregado um modelo adaptado, de forma a permitir análises das grandezas elétricas em motores de indução trifásicos submetidos aos desequilíbrios de tensão presentes nas redes de alimentação.

#### **4.2 Modelagem matemática com tensão desequilibrada**

O estudo da operação do motor de indução trifásico, com tensões desbalanceadas, e empregando técnicas no domínio da frequência, passa, necessariamente, pela decomposição das tensões de alimentação em componentes simétricas. Em outras palavras, isto significa que o motor é avaliado, de forma independente, submetido a tensões de seqüência negativa sobreposta as de seqüência positiva. Neste sentido, a máquina de indução é representada, para cada componente simétrica, através de um circuito equivalente. Esta estratégia de ação deve-se ao fato de que para cada conjunto de tensões trifásicas, quais sejam, as de seqüência positiva, negativa e zero, o comportamento físico do motor é específico.

Dentro deste contexto, o modelo do motor contempla, basicamente, dois circuitos equivalentes: um associado às componentes de seqüência positiva e o segundo para as tensões de seqüência negativa. Não é demais repetir, neste momento, que a omissão de observações em relação às componentes de seqüência zero, deve-se ao fato de que, usualmente, o enrolamento do estator é conectado em triângulo ou estrela não-aterrada. Nestas condições, embora possam existir tensões de seqüência zero, as correntes resultantes serão nulas, devido ao fato de não existir caminho para circulação destas correntes. Conseqüentemente, as componentes de seqüência zero do fluxo magnético se anulam no entreferro para a máquina simétrica, não produzindo nenhum efeito no rotor.

Diante do exposto e com vistas à determinação das características operacionais do motor submetido a tensões desequilibradas, algumas considerações devem ser ressaltadas:

- Motor é considerado como sendo uma carga linear, ou seja, os efeitos da saturação do circuito magnético são desprezados;
- Enrolamentos do estator e rotor são perfeitamente simétricos, o que significa uma mesma relação entre tensão e corrente para as três fases;
- Tensões perfeitamente senoidais;
- Entreferro da máquina é totalmente uniforme.

Mediante estas considerações, e reconhecendo que os objetivos, neste momento, consistem em avaliar o comportamento da máquina de indução no que diz respeito às potências elétricas, perdas elétricas, conjugado desenvolvido, rendimento e fator de potência, procede-se ao equacionamento do motor tendo como base os circuitos equivalentes para seqüência positiva e negativa. Para o circuito equivalente de seqüência positiva usa-se o mesmo diagrama que é utilizado para o motor alimentado com tensões de suprimento ideais, onde não vem ao caso discutir neste trabalho, o circuito equivalente está representado na Figura 3. Já o de seqüência negativa é ilustrado na Figura 4.

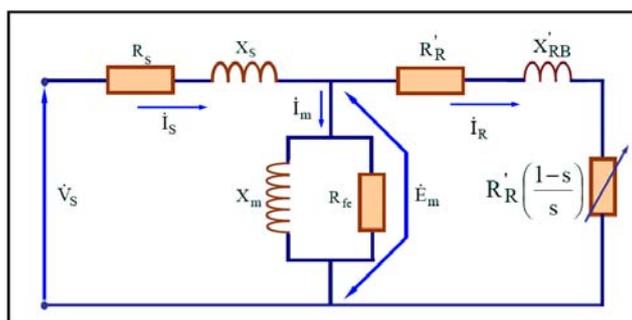


Figura 3 – Circuito equivalente seqüência +

O circuito que representa a seqüência negativa está representado pela Figura 4 e logo em seguida é discutido o seu equacionamento.

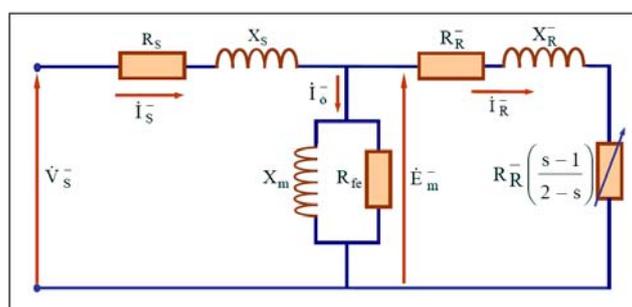


Figura 4 – Circuito equivalente seqüência -

Como se observa, os circuitos equivalentes de seqüência positiva e negativa apresentam parâmetros específicos, indicando à necessidade de se proceder a correção dos mesmos, de acordo com seqüência de fase das tensões de alimentação.

Considerando-se, inicialmente, um sistema de tensões equilibradas de seqüência positiva aplicado aos terminais de um motor, os parâmetros, aqui utilizados, são aqueles, usualmente, empregados para análise com tensões puramente senoidais [7].

Inicialmente, deve-se determinar a impedância do estator e rotor considerando-se o circuito de seqüência positiva. Assim, para o estator tem-se:

$$\dot{Z}_S^+ = R_S + jX_S \quad (07)$$

A impedância referente ao enrolamento do rotor, para um dado escorregamento  $s$ :

$$\dot{Z}_R^+ = \frac{R_R^+}{s} + jX_R^+ \quad (08)$$

Com relação ao circuito de magnetização, a impedância equivalente é obtida pela expressão:

$$\dot{Z}_m = \frac{jR_{fe}X_m}{R_{fe} + jX_m} \quad (09)$$

A impedância equivalente do motor considerando seqüência de fases positiva pode ser obtida a partir das equações desenvolvidas anteriormente, neste sentido:

$$\dot{Z}_{eq}^+ = \dot{Z}_S^+ + \frac{\dot{Z}_m \dot{Z}_R^+}{\dot{Z}_m + \dot{Z}_R^+} \quad (10)$$

Uma vez determinada a impedância equivalente do motor, é possível calcular a corrente, por fase, absorvida pelo motor, assim tem-se:

$$\dot{I}_S^+ = \frac{\dot{V}_S^+}{\dot{Z}_{eq}^+} \quad (11)$$

A tensão, por fase, induzida no enrolamento do estator pelo campo magnético girante síncrono no entreferro resultante dos campos produzidos pelas correntes do estator e do rotor, se relaciona com a tensão aplicada ao estator através de:

$$\dot{E}_m^+ = \dot{V}_S^+ - [R_S + jX_S]\dot{I}_S^+ \quad (12)$$

E a corrente do rotor:

$$\dot{I}_R^+ = \frac{\dot{E}_m^+}{\dot{Z}_R^+} \quad (13)$$

Uma vez analisado o circuito de seqüência positiva, o passo seguinte consiste em determinar as grandezas associadas ao motor alimentado pelas componentes de seqüência negativa das tensões desequilibradas. Para tanto, emprega-se o circuito descrito na Figura 5, onde os parâmetros, lá representados, estão associados às características operacionais na seqüência de fase mencionada.

Ao se avaliar a máquina de indução trifásica com tensões desequilibradas, a estratégia consiste em, após o estudo com tensões de seqüência positiva, sobrepor a esta, a resposta do

motor alimentado com tensões de seqüência negativa. Nestas condições operacionais, o fenômeno físico que deve ser ressaltado é o fato de o campo magnético girante produzido pelas tensões de seqüência negativa girar à mesma velocidade, porém em direção oposta à do campo girante principal, o qual é oriundo das componentes de tensão de seqüência positiva. Portanto os sentidos de rotação do motor e do campo magnético de seqüência negativa são opostos, ou seja:

$$\omega_s^+ = -\omega_s^- \quad (14)$$

Onde,

$\omega_s^+$  = velocidade angular do campo magnético girante de seqüência positiva;

$\omega_s^-$  = velocidade angular do campo magnético girante de seqüência negativa.

Estando o rotor girando com um escorregamento ( $s$ ) em relação à velocidade  $\omega_s^+$ , o escorregamento em relação à seqüência negativa é obtido pela relação:

$$s^- = 2 - s \quad (15)$$

Onde,

$S^-$  = Escorregamento para a seqüência negativa;

$S$  = escorregamento nominal para a seqüência positiva.

Nos circuitos equivalentes apresentados nas Figuras 4 e 5, a resistência do rotor foi dividida em duas partes, uma das quais representando as perdas “Joule” e a outra a carga mecânica no eixo da máquina. Está última, sendo dependente do escorregamento do rotor, apresenta uma expressão analítica própria para cada circuito. Para tanto, substitui-se o escorregamento para componente de seqüência negativa por aquele fornecido pela equação logo acima.

O equacionamento desenvolvido para a análise com tensões de seqüência negativa segue basicamente àquele desenvolvido para o circuito de seqüência positiva. A diferença, conforme já citado anteriormente, consiste na adequação dos diversos parâmetros para seqüência negativa e o respectivo escorregamento.

Neste sentido, as expressões serão repetidas, tendo o cuidado, porém, de empregar os parâmetros corretos.

No que se refere ao enrolamento do estator e o circuito de magnetização, os parâmetros são considerados os mesmos que os de seqüência positiva. Desta forma, a impedância do estator é:

$$\dot{Z}_S^- = \dot{Z}_S^+ = \dot{Z}_S = R_S + jX_S \quad (16)$$

O exame da equação indica que embora se tenha empregado uma nomenclatura diferenciada para seqüência negativa, os valores da resistência e reatância de dispersão do estator são mantidos constantes.

Quanto ao ramo que representa a magnetização do núcleo magnético, os valores da resistência de perdas (histerese e correntes parasitas) e da reatância de magnetização, são iguais àqueles obtidos para análise com tensões ideais (equilibradas e senoidais). Vale ressaltar que esta consideração, particularmente no que se refere à resistência representativa das perdas no núcleo magnético, está limitada a desequilíbrios máximos de 15 %.

Quanto ao enrolamento do rotor, devido ao fato dos parâmetros sofrerem variações significativas, com a freqüência da corrente induzida, a impedância é efetivamente diferenciada quando da análise com tensões de seqüência positiva. A equação abaixo permite obter o valor desta impedância:

$$\dot{Z}_R^- = \frac{R_R^-}{2-S} + jX_R^- \quad (17)$$

Uma vez determinadas às impedâncias dos enrolamentos de estator e rotor e do ramo de magnetização quando da alimentação com tensões de seqüência negativa, procede-se ao cálculo da impedância equivalente do motor, vista pelos terminais do estator. Assim, tem-se:

$$\dot{Z}_{eq}^- = \dot{Z}_S + \frac{\dot{Z}_m \dot{Z}_R^-}{\dot{Z}_m + \dot{Z}_R^-} \quad (18)$$

A partir da impedância equivalente de seqüência negativa, obtém-se a correspondente corrente absorvida pela máquina:

$$\dot{I}_S^- = \frac{\dot{V}_S^-}{\dot{Z}_{eq}^-} \quad (19)$$

A determinação da corrente que circula no enrolamento do rotor pode ser obtida através de um divisor de corrente ou calculando-se a tensão induzida, de seqüência negativa, no estator e, posteriormente, calcular a referida corrente.

$$\dot{E}_m^- = \dot{V}_S^- - [R_S + jX_S] \dot{I}_S^- \quad (20)$$

A corrente de seqüência negativa no enrolamento do rotor é obtida pela expressão:

$$\dot{I}_R^- = \frac{\dot{E}_m^-}{\dot{Z}_R^-} \quad (21)$$

Considerando-se as equações desenvolvidas até o momento, a próxima etapa consiste em avaliar as perdas no motor operando sob condições de tensões desequilibradas.

Com relação ao enrolamento do estator, as perdas “Joule”, podem ser obtidas utilizando-se as correntes de estator de seqüência positiva e negativa, ou as correntes de fase absorvida pelo motor.

Utilizando-se as correntes obtidas, tem-se:

$$P_{JS_{desq}} = 3R_{S_{\theta ref}} I_S^{+2} + 3R_{S_{\theta ref}} I_S^{-2} \quad (22)$$

Para se avaliar as perdas totais nas barras do rotor emprega-se a equação:

$$P_{JR_{des}} = 3R_R^+ (I_R^+)^2 + 3R_R^- (I_R^-)^2 \quad (23)$$

Outra parcela de perdas que, necessariamente, deve ser avaliada, consiste na potência dissipada no núcleo magnético do estator e rotor. A metodologia resume-se em calcular as perdas no núcleo considerando os circuitos de seqüência positiva e negativa. Dentro deste contexto, tem-se:

$$P_{Fe_{des}} = 3 \left[ \frac{(V_S^+)^2}{R_{Fe}} + \frac{(V_S^-)^2}{R_{Fe}} \right] \quad (24)$$

Cumprе ressaltar, que as perdas no núcleo são consideradas praticamente constantes, até um nível máximo de desequilíbrio da ordem de 15% [9].

A potência eletromagnética transferida para o rotor, a menos das perdas na resistência das barras do mesmo, é obtida pela expressão:

$$P_{Mec} = 3R_R^+ (I_R^+)^2 \left( \frac{1-S}{S} \right) - 3R_R^- (I_R^-)^2 \left( \frac{1-S}{2-S} \right) \quad (25)$$

O conjugado desenvolvido pelo motor, submetido a tensões desbalanceadas pode ser determinado em função das grandezas e dos parâmetros presentes nos circuitos equivalentes de seqüência positiva e negativa, assim tem-se:

$$C_{e_{desq}} = \frac{180}{2\pi N_S} (I_R^+)^2 \left( \frac{R_R^+}{S} \right) - \frac{180}{2\pi N_S} (I_R^-)^2 \left( \frac{R_R^-}{2-S} \right) \quad (26)$$

Fica evidenciada, pela expressão, a presença de um conjugado contrário no eixo do rotor, devido a presença de correntes de seqüência negativa. Considerando-se que a carga mecânica mantém-se constante e igual à nominal, o efeito imediato é um leve aumento na corrente de seqüência positiva no estator para compensar o conjugado negativo com conseqüente aumento do escorregamento.

Finalmente, é importante salientar os reflexos dos desequilíbrios nas perdas adicionais. De acordo com observações anteriores, a obtenção destas perdas, de forma analítica, exige o conhecimento das dimensões físicas e construtivas do motor. Assim, de acordo com [9], o que se observa na literatura pesquisada é a proposição de equações empíricas as quais fornecem

valores aproximados. Dentre as diversas referências que tratam, especificamente, do assunto, há uma, a qual será utilizada, que apresenta duas equações onde as perdas adicionais são proporcionais à corrente no rotor e, subdivididas entre o estator e rotor.

$$P_{ad_{des}}^E = \left[ \left( \frac{I_R^+}{I_R} \right)^2 + \left( \frac{I_R^-}{I_R} \right)^2 \right] P_{ad}(0,25) \quad (27)$$

$$P_{ad_{des}}^R = \left( \frac{I_R^+}{I_R} \right)^2 P_{ad}(0,75) + \left( \frac{I_R^-}{I_R} \right)^2 P_{ad}(\sqrt{2})(0,75) \quad (28)$$

Onde,

$P_{ad}$  = Perdas adicionais para a alimentação equilibrada;

$P_{ad_{des}}^E$  = Perdas adicionais no estator para alimentação desequilibrada;

$P_{ad_{des}}^R$  = Perdas adicionais no rotor para alimentação desequilibrada.

As expressões fornecem as perdas que devem ser adicionadas àquelas dissipadas no enrolamento do estator e nas barras do rotor. Os fatores 0,25 e 0,75 indicam que 25% estão associadas ao estator e o restante, 75%, são oriundas do rotor. O valor 2 leva em consideração o aumento da frequência dos sinais elétricos nas barras do rotor para as componentes de seqüência negativa. Adicionalmente, vale lembrar que os valores das perdas adicionais são uma porcentagem daquelas obtidas em condições de operação nominal do motor.

Concluindo, para fins deste estudo, a resistência de seqüência positiva e a de seqüência negativa de ambos estator e rotor, terão os mesmos valores, bem como os valores de indutância de seqüência positiva e negativa, porque, como dito anteriormente, as conseqüências do efeito pelicular praticamente não são levadas em conta em motores de pequeno porte, o qual é o caso do presente trabalho. Já em relação à reatância do rotor de seqüência negativa será também igual à de seqüência positiva porque, como mostrada na fórmula, ela é representada pela reatância a rotor bloqueado (60 Hz), o que configura a permanência do seu valor, embora os sinais da tensão e da corrente no rotor sejam em torno de 120 Hz. O parâmetro que mais se modifica nesta análise é o escorregamento na seqüência negativa.

## 5. MODELAGEM COMPUTACIONAL

### 5.1 Introdução

Esta seção é destinada a modelagem computacional do motor de indução no ambiente ATPDraw. Feito essa modelagem e comprovada a sua confiabilidade será confrontado os resultados obtidos na simulação com os obtidos em ensaios laboratoriais.

### 5.2 Modelagem computacional

Para fazer o estudo computacional do comportamento do motor de indução sob condições de alimentação desequilibrada, optou-se em utilizar a plataforma do ATPDraw, que é uma interface gráfica do software ATP (Alternative Transient Program). Essa ferramenta permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, com configuração arbitrárias, através de um método que utiliza a matriz admitância de barras. A formulação matemática, é baseada no método das características (método de Bergeron) para elementos com parâmetros distribuídos e na regra de integração trapezoidal para elementos com parâmetros concentrados.

Para a montagem do modelo do ATPDraw foi utilizado um bloco de função do programa chamado UM3 INDUCTION, em que representa o motor de indução. Para complementar todas as saídas desse bloco, são feitas algumas analogias eletromecânicas. O circuito abaixo representa o bloco de função e todas as suas ligações necessárias para o funcionamento do motor.

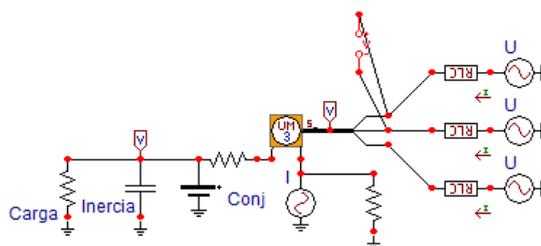


Figura 5 – Motor de indução no ATPDraw

Cada componente elétrico ligado ao bloco UM3 representa uma característica do motor.

#### Analogias Eletromecânicas:

**Capacitor:** O capacitor no circuito representa a inércia do eixo. O valor da inércia é análogo ao valor da capacitância em Farads. Multiplicado por  $10^6$ .

**Fonte de Corrente:** A fonte de corrente representa as perdas mecânicas que são representadas no circuito por um conjugado resistente.

O calculo do valor dessa corrente é dado como:

$$M_r = \frac{P_{mec}}{\omega_n} \quad (29)$$

E o valor encontrado é representado com um sinal negativo no valor nominal da fonte de corrente.

**Tensão nos terminais do capacitor:** A tensão nos terminais do capacitor é análogo a velocidade no eixo do motor em rad/seg.

**Corrente  $I_1$  na resistência  $R_1$ :** Corrente que percorre a resistência  $R_1$  é análogo ao valor do conjugado do motor.

O motor elétrico simulado apresenta seus dados de placa na tabela abaixo:

Tabela 02: Dados de placa do motor

<b>MOTOR STANDARD</b>	
<b>Potência: 1.5 cv</b>	<b>1.1HP</b>
<b>Velocidade: 3395 rpm</b>	<b>60 Hz</b>
<b>CAT N</b>	<b>Reg S1</b>
<b>MAX Amb 40°C</b>	<b>Alt 1000m</b>
<b>FS 1.15</b>	<b>Isol B</b>
<b>Ip / In 7</b>	<b>Ip 55</b>
<b>220 /380 V</b>	<b>4.42 / 2.56 A</b>
<b>H 78.6%</b>	<b>cosφ 0.83</b>

Os parâmetros elétricos do circuito equivalente do motor de indução foram obtidos conforme aplicação em [9]. Os dados são correspondentes aos valores das três fases do motor.

$$R_s = 11,58 \Omega;$$

$$X_s = 24,27 \text{ mH};$$

$$R_r = 16,89 \Omega;$$

$$X_r = 221,22 \text{ mH};$$

$$X_m = 1249,65 \text{ mH}.$$

As perdas mecânicas inseridas no modelo computacional foram:

$$\Delta P_{Mec} = \frac{\Delta P_t}{2} \quad (30)$$

$$\Delta P_{Mec} = \frac{\sqrt{3}U_n I_n \cos\varphi - P_n \times 736}{2} \quad (31)$$

$$\Delta P_{mec} = 146,96 \text{ W} \quad (32)$$

A velocidade angular é calculada como:

$$\omega_{n[\text{rad/s}]} = \frac{2\pi}{60} \cdot \omega_{n[\text{rpm}]} \quad (33)$$

$$\omega_{n[\text{rad/s}]} = 355,52 \text{ rad/s} \quad (34)$$

O conjugado Resistente é calculado e inserido no modelo com seguinte valor:

$$M_r = \frac{P_{mec}}{\omega_n} \quad (35)$$

$$M_r = 0,413 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (36)$$

A carga nominal no eixo do motor pode ser representada por uma resistência de valor:

$$R = \frac{\omega_0^2}{P} \quad (37)$$

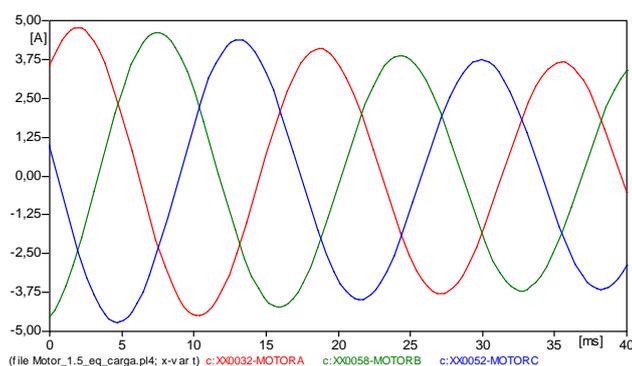
$$R = 113,61 \Omega \quad (38)$$

### 5.3 Simulação Computacional

Depois de montado o modelo computacional, o próximo passo foi à simulação desse modelo, primeiramente e situações ideais de alimentação, ou seja, tensão puramente senoidal e equilibrada para verificar a funcionalidade e confiabilidade do software.

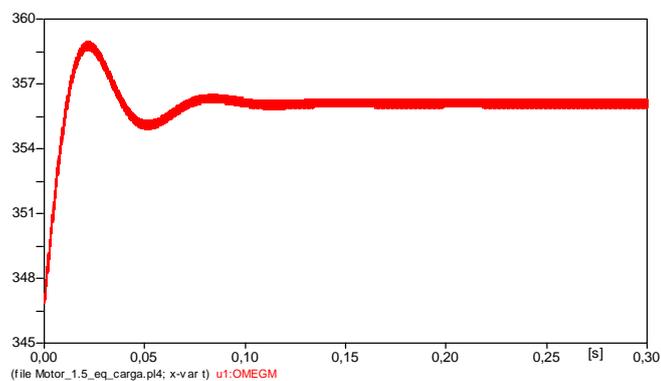
Tensão aplicada nas 3 fases: 220V

- Corrente:



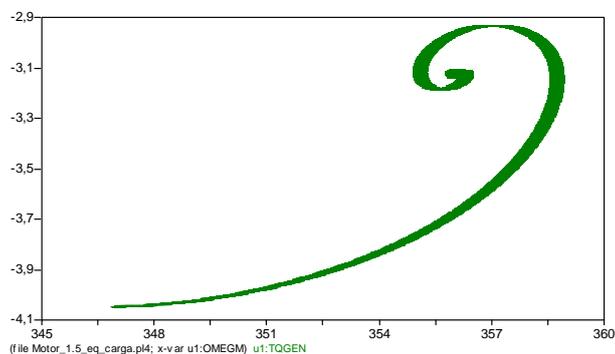
Apresentando um valor RMS de 2,52 A.

- Velocidade:



Valor da velocidade encontrado:  $\omega = 356.1$  rad/seg.

- Torque:



O torque em condição de velocidade nominal ( $\omega = 355$  rad/s) ficou bem próximo do nominal ( $T = 3,1$  N.m).

Os valores encontrados na simulação em condições ideais satisfazem para os fins de aplicação do objetivo desse estudo, alcançando valores bem próximos aos nominais do motor. Podendo desta maneira, prosseguir para outras condições de alimentação a fim de uma futura comparação com ensaios realizados em laboratórios de máquinas elétricas.

No primeiro teste aplicou-se um desequilíbrio de tensão de 1% embasado pelo método das componentes simétricas.

A componente de seqüência positiva da tensão será sempre a nominal fase-fase, ou seja, 220 V, variando-se somente a componente de seqüência negativa conforme os valores anteriormente citados. Os valores referentes à seqüência positiva são os mesmos referentes ao funcionamento do motor sob tensão senoidal e equilibrada.

Para o primeiro teste as tensões aplicadas ao modelo computacional é:

$$\begin{aligned}V_a &= 222,20\angle 0^\circ; \\V_b &= 218,91\angle -120,49^\circ; \\V_c &= 218,91\angle 120,49^\circ\end{aligned}$$

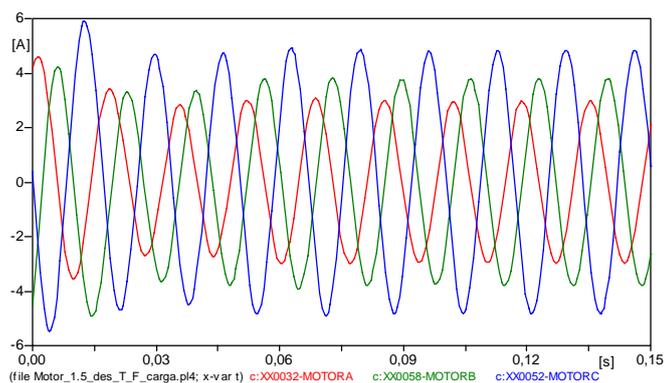
Nessa condição as mudanças foram praticamente nulas, permanecendo os gráficos da simulação em condições ideais.

O próximo ensaio é aplicado um grau de desequilíbrio igual 2%. Sendo assim as tensões aplicadas foram:

$$\begin{aligned}V_a &= 224,40\angle 0^\circ; \\V_b &= 217,83\angle -121,49^\circ; \\V_c &= 217,83\angle 121,49^\circ.\end{aligned}$$

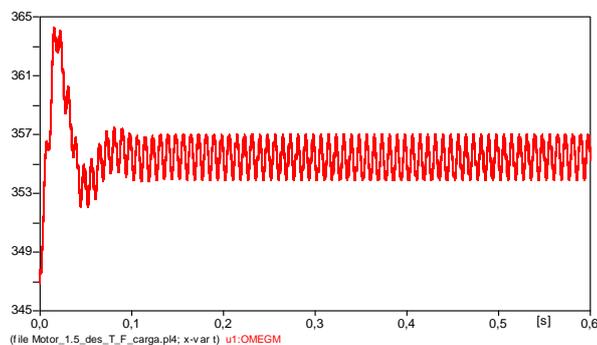
Diante da simulação feita os gráficos mostram o comportamento da máquina submetido ao desequilíbrio de 2%.

•Corrente:



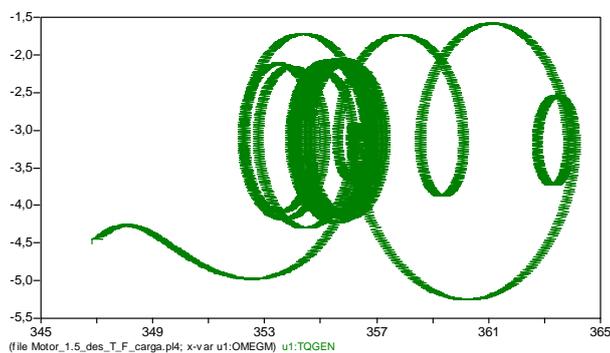
O valor RMS da corrente foi de  $I=1,23$  A.

•Velocidade:



A Velocidade foi de  $w= 355,5$  rad/seg.

•Torque:



Observe agora como começa a aparecer no torque o efeito da componente de seqüência negativa, fazendo com que o torque fique oscilante.

Os dados de simulação em laboratório para o mesmo motor e grau de desequilíbrio foi de:

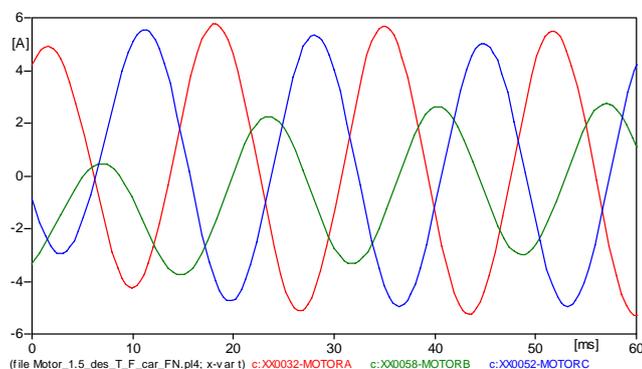
Corrente(I)= 0,954 A

Torque(T)= 0,002 N.m

Lembrando que um grau de desequilíbrio de 2% é permitido por norma, e mesmo assim foram observados condições de funcionamento inadequadas.

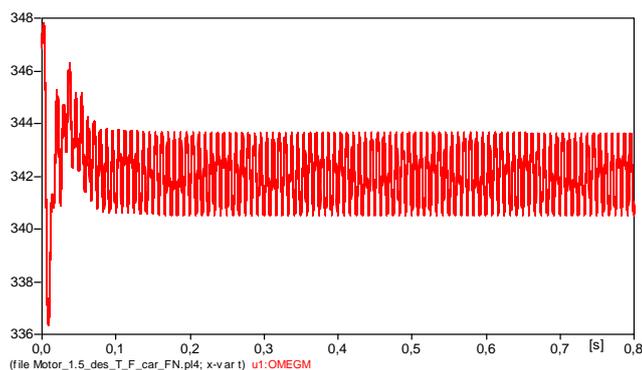
E por último foi simulado um grau de desequilíbrio acima da norma permitida de 5%. O efeito no motor foi ainda maior do que quando aplicado um desequilíbrio de 2%, chegando nesses casos o motor completamente inadequado para funcionar devido a serie de fatores comentado nos primeiros capítulos desse trabalho.

•Corrente:



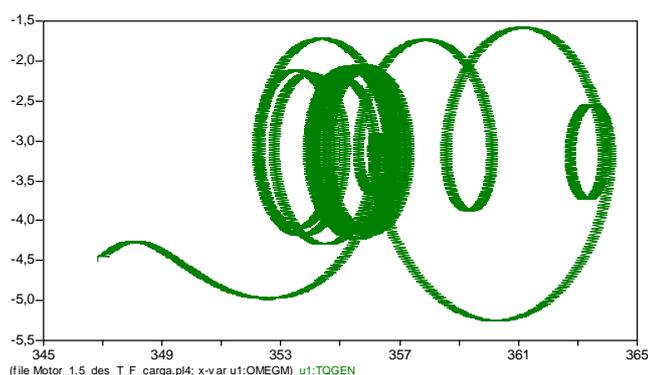
O valor RMS dessa corrente é  $I = 3.362$  A

•Velocidade:



O valor da velocidade foi de:  $\omega = 342$  rad/seg.

•Torque:



O torque sofreu ainda mais o efeito da componente de seqüência negativa, ficando ainda mais oscilatório em relação ao desequilíbrio de 2%.

Comparando os dados com os ensaios de laboratório, temos:

$$\text{Corrente}(I) = 1,42 \text{ A}$$

$$\text{Torque}(T) = 0,0013 \text{ N.m}$$

Nota-se que não foi muito a aproximação da simulação com os ensaios laboratoriais, isso é devido ao limite do modelo computacional quanto as tensões de alimentação quanto o seu grau de desequilíbrio, em que o modelo não é mais confiável.

Mas mesmo assim consegue ver que o valor da corrente tende a subir e o conjugado disponível na máquina tende a cair com o aumento do desequilíbrio.

## 6. CONCLUSÃO

Com as simulações da modelagem proposta para alimentação desequilibrada, ao alimentar-se o motor com tensões com 1% de desequilíbrio, praticamente não houve mudanças no desempenho dos motores, com variações insignificantes de suas respostas. Já com desequilíbrios de 2% houve alterações significativas nas perdas, principalmente do rotor e das suplementares, ocorrendo uma pequena queda do rendimento de da potência de saída. As simulações mostraram que com um desequilíbrio de 5%, o desempenho do motor fica um pouco comprometido, mostrando grandes aumentos das perdas e uma maior perda no rendimento e na potência de saída. Já nesta simulação o motor de alto rendimento teve um desempenho relativo levemente pior comparado ao da linha padrão, com suas perdas

provocado pela alimentação desequilibrada. Não houve variação dos valores de fator de potência para ambos os motores.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] FREITAS, P. C. F. Comparação dos rendimentos dos motores da linha padrão e de alto rendimento, obtidos de forma indireta. 2007 Trabalho de Iniciação Científica. Universidade federal de Uberlândia, Uberlândia 2005.

[2] ELETROBRÁS / PROCEL. Programa de efficientização industrial: modulo motor elétrico. Rio de Janeiro. 130 p. MEHL, Edvaldo L. M. Qualidade da energia elétrica. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/downloads/qualidade-energia.pdf>>. Acesso em: 18 out. 2007, 13:38.

[3] Hydro-Québec, CEA (Canadian Electricity Association) 220 D 711 – Power Quality Measurement Protocol CEA Guide to Performing Power Quality Surveys, Prepared by Hydro-Québec, May 1996.

[4] Books, C. L.; Dugan, R. C.; Waclawiak, M.; Sudaram, A. – Indices for Assessing Utility Distribution System RMS Variation Performance – [[www.pqnet.electrotek.com](http://www.pqnet.electrotek.com)]

[5] OLIVEIRA, José Carlos de. Desequilíbrios de tensão: capítulo VI. Disciplina de Qualidade e Racionamento de Energia. UFU – FEELT.

[6] Gosbell, V., Perera, S., Smith, V. (2002). Voltage Unbalance. Technical Note 06, Integral, Energy Power Quality Centre, University of Wollongong, School of Electrical, Computer & Telecommunications Engineering.

[7] ELETROBRÁS. Disseminação de informações em eficiência energética -Eficiência energética aplicada para comércio e indústria. Programa de combate ao desperdício de energia elétrica – PROCEL. Rio de Janeiro: PROCEL, 2004. 309p.

[8] SOUTO, Olívio Carlos Nascimento. Modelagem e análise do desempenho térmico de motores de indução sob condições não ideais de alimentação. Uberlândia, dez. 2001. 399 p.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia.

[9] REZENDE, P. H. O e BISPO, D. Obtenção das curvas características de motores originadas do circuito equivalente. **IV ENEEEL (Encontro Nacional dos estudantes de Engenharia Elétrica)**. Fortaleza, Brasil, julho/2009.