

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FELIPE PIRES GONÇALVES

**ESTUDO PRÁTICO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA
CONSIDERANDO A SATURAÇÃO MAGNÉTICA**

VIÇOSA
2014

FELIPE PIRES GONÇALVES

**ESTUDO PRÁTICO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA
CONSIDERANDO A SATURAÇÃO MAGNÉTICA**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário; e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Tarcísio Resende

VIÇOSA
2014

FELIPE PIRES GONÇALVES

**ESTUDO PRÁTICO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA
CONSIDERANDO A SATURAÇÃO MAGNÉTICA**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 07 de julho de 2014.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. José Tarcisio Resende - Orientador
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. José Carlos da Costa Campos - Membro
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. André Gomes Torres - Membro
Universidade Federal de Viçosa

“Ninguém vai bater mais forte do que a vida, não importa como você bate, e sim o quanto aguenta apanhar e continuar lutando. O quanto pode suportar e seguir em frente. É assim que se ganha.”

Rocky Balboa

Dedico esse trabalho aos meus pais Carlos e Anizia.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente as pessoas que mais me incentivaram a entrar em uma universidade e dar continuidade sempre aos meus estudos: meus pais Anizia e Carlos, meus irmãos Fernanda e Lucas e meus tios Eustáquio e Angélica.

À família do alojamento 2032, por ajudarem muito no meu crescimento pessoal.

A Iara pelo carinho, apoio e pelos diversos momentos felizes que passamos juntos, pela compreensão quando os fins de semanas tinham que ser dedicados aos estudos e trabalhos.

Ao meu orientador, José Tarsisio Resende, que sempre com muito boa vontade me apoiou, orientou e tirou minhas dúvidas neste trabalho.

À República dos Descolados, Casa da Discordia e aos Piratas do Espaço que me proporcionaram felizes anos em Viçosa. A todos da CBG e amigos da banda.

Aos amigos, Roger e Bernardo, que me ajudaram no desenvolvimento deste trabalho.

Aos demais amigos da turma de Engenharia Elétrica – 2009 espero que as amizades construídas não se percam com o tempo.

Aos demais amigos da Engenharia Elétrica e de Viçosa.

Ao professor José Carlos da Costa Campos, por ter me orientado no meu trabalho de iniciação científica e por aceitar fazer parte da banca avaliadora assim como o professor André Gomes.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Viçosa e do Laboratório de Engenharia Elétrica de Viçosa pela ajuda nesse e em outros trabalhos desenvolvidos.

Agradeço também a qualquer leitor que venha a se interessar por este trabalho.

Resumo

Os motores de indução trifásicos a cada dia são mais utilizados em vários setores. Isso se deve ao fato do avanço da eletrônica de potência, fazendo com que os motores de corrente contínua, que são utilizados em vários trabalhos, especialmente no setor industrial, sejam substituídos pelos motores de indução, que são de custos bem menores, além de serem bastante robustos e exigirem menos manutenção em relação ao motor cc. Por outro lado, com a utilização da eletrônica de potência para o acionamento do motor, se faz necessário um estudo mais aprofundado do seu comportamento. Um dos estudos se refere as distorções harmônicas, provocadas pelos componentes de eletrônica de potência, o outro é o efeito da saturação magnética do motor. Um projeto bem otimizado de um motor exige que o mesmo opere próximo do joelho de sua curva normal de magnetização operando com certos níveis de saturação magnética, onde, surge os níveis de harmônicos, especialmente o terceiro. A saturação do motor interfere também nos componentes eletrônicos podendo queimá-los. Neste sentido, este trabalho tem o objetivo de estudar através de simulação digital e de medições práticas, os níveis de distorções harmônicas do motor, para o mesmo operando em vazio e com cargas ligadas no eixo, em vários pontos da sua curva normal de magnetização. Os resultados da simulação são comparados com os obtidos em laboratório para confrontações teórico – experimentais. Os dados coletados em laboratório serão utilizados para validar uma modelagem dinâmica do motor de indução trifásico desenvolvida no sistema de coordenadas abc. O estudo é feito para um motor de indução trifásico, com rotor em gaiola de esquilo, tendo os terminais dos enrolamentos do estator ligados em triângulo.

Abstract

The three phase induction motors are more constantly used in various sectors nowadays. This fact is because of the advancement of power electronics, replacing DC motors to induction motors which have much lower costs and are more robust besides they require less maintenance. Moreover, with the use of power electronics for motor It is necessary to do some detailed studies. One study relates the harmonic distortion, caused by components of power electronics and the other is the effect of magnetic saturation of the motor. The design of a well optimized engine requires it to operate in the nonlinear region of the magnetization curve operating with certain levels of magnetic saturation, where the levels of harmonics especially the third arises. The saturation of the engine also interfere in electronic components and this fact may burn them. Thus, this paper aims to study through computer simulation and practical measurements, levels of harmonic distortion of the engine, for the same operating in vacuum and with loads connected on the shaft at various points of their normal magnetization curve. The simulation results are compared with those obtained in the laboratory for some theoretical/experimental confrontations. The data collected in the laboratory will be used to validate a mathematical model of three-phase induction motor in the abc coordinate system. The study is done for a three phase induction motor with squirrel cage rotor, with the terminals of the stator windings connected in delta.

Sumário

1	Introdução.....	13
1.1	Justificativa.....	13
1.2	Objetivo	14
2	Referencial Teórico	15
2.1	Motor de Indução Trifásico	15
2.2	Qualidade de energia	17
2.3	Modelagem Matemática do Motor	19
3	Materiais e Métodos	24
4	Resultados e Discussões.....	29
5	Conclusões.....	35
	Referências Bibliográficas	36

Lista de Figuras

Figura 1 Máquina de indução com rotor bobinado.	15
Figura 2 Rotor de gaiola de esquilo.....	16
Figura 3 Circuito equivalente do motor de indução por fase	17
Figura 4 Onda fundamental e suas harmônicas	18
Figura 5 Distribuição espacial da força magnetomotriz (a) Corte transversal do estator e do rotor (b) Linearização da linha média do entre-ferro – l_m [7].....	21
Figura 6: Distribuição da Densidade de Fluxo Magnético com o Efeito Saturação.....	22
Figura 7: Circuito equivalente da MIT na velocidade síncrona.	25
Figura 8: Componente fundamental da característica de magnetização da máquina de indução estudada.....	27
Figura 9: Componente harmônica de terceira ordem da característica de magnetização da máquina de indução estudada.	28
Figura 10 Corrente do motor operando a vazio sem filtrar	29
Figura 11 Corrente do motor operando com 33,33% de carga sem filtrar	30
Figura 12 Espectro de frequência para o motor operando a vazio	30
Figura 13 Correntes do motor funcionando a 180 V, na região linear.	31
Figura 14 Correntes do motor funcionando a vazio com tensão nominal 220V	32
Figura 15 Correntes do motor funcionando com 33,33% de carga.....	32
Figura 16 Correntes do motor funcionando com 87,5% de carga.....	32
Figura 17 Correntes do motor funcionando com 112% de carga.....	33
Figura 18 Correntes, velocidade e torque do motor funcionando com 100% de carga.....	33

Lista de Tabelas

Tabela 1: Valores dos ensaios da máquina.....	24
Tabela 2: Parâmetros da máquina de indução estudada.	24
Tabela 3: Características nominais da máquina.	25
Tabela 4 Porcentagens de distorção causadas pelo 3° harmônico	34

1 Introdução

Grande parte dos motores de indução são projetados para operar em sua região de saturação magnética, ou seja, aproximadamente em torno do joelho da sua curva de magnetização. O que leva a geração de harmônicos. Neste sentido, no presente trabalho será estudado o índice de harmônicos na corrente para o motor operando em vazio e com carga. Como o aumento de cargas não lineares aumentou se também os níveis harmônicos presentes na rede

Desta forma, é de suma importância compreender a geração dos harmônicos pelo motor, visto que, quando somados aos da rede podem aumentar o nível de distorções de tensões e correntes no motor. Esse aumento provoca aquecimento no motor, como também, ocasiona vibrações mecânicas e desalinhamento do motor, reduzindo sua vida útil.

1.1 Justificativa

Os motores de indução trifásicos (MIT) estão sendo cada vez mais utilizados nas indústrias, representando cerca de 60% da energia consumida por elas, segundo o Balanço Energético Nacional (2009). Mais de 25% da energia consumida é destinada ao acionamento dos motores de indução trifásicos. Isso ocorre porque os motores de indução são de custos mais reduzidos, comparados aos outros motores, exigem menos manutenção, são mais robustos, operam com velocidades aproximadamente constantes, são viáveis para acionar diversos tipos de cargas, etc.

Hoje em dia, com a evolução da eletrônica de potência, os motores podem ter sua velocidade facilmente controlada, o que antes era considerado como uma das desvantagens desta máquina. Por outro lado, os componentes eletrônicos introduzem harmônicos nos motores e além do mais, estes motores sob certas condições, operam com o seu circuito magnético saturado. Por tudo isso, se faz necessário um estudo mais aprofundado do motor. As poucas desvantagens desse motor são que os mesmos possuem altas correntes de partida e baixos fatores de potência, quando utilizados para acionar cargas muito baixas em relação as suas cargas nominais e precisam de fontes externas para suprir a sua necessidade de reativos. Mas essas desvantagens são insignificantes em relação as vantagens..

1.2 Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é comprovar a validade de uma modelagem matemática da máquina de indução trifásica, na qual é incluída a saturação magnética. Para isso é simulado em um software de programação uma máquina de indução trifásica do Laboratório de Engenharia Elétrica da UFV. Os resultados de simulação são comparados com medições feitas no laboratório para confrontações teórico-experimentais. Além disso, o presente trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- Analisar as distorções nas formas de onda das correntes do estator, frente aos harmônicos, para a situação sem carga e com diferentes valores de carga;
- Fazer comparações da forma de onda para cada caso.

2 *Referencial Teórico*

Para facilitar o entendimento deste trabalho, se faz necessário uma revisão dos aspectos gerais da máquina de indução trifásica, além de uma revisão sobre distorções harmônicas e sobre a modelagem proposta por RESENDE (1999).

2.1 Motor de Indução Trifásico

As máquinas de indução são constituídas por dois circuitos elétricos, o estator e o rotor, e um circuito magnético. O estator é a parte imóvel, em que é produzido o campo magnético girante, possuindo três bobinas defasadas geometricamente no espaço da periferia do estator de 120° elétricos que, quando alimentadas por três correntes senoidais, defasadas 120° elétricos no tempo, produz o campo magnético girante, o campo girante que o princípio básico de funcionamento do motor. O rotor é a parte móvel da máquina podendo ser em gaiola de esquilo ou rotor bobinado. O rotor bobinado é construído de maneira semelhante ao estator, com o mesmo número de polos, mostrado na Figura 1. A gaiola de esquilo, mostrado na Figura 2, é constituído por barras condutoras colocadas nas ranhuras do ferro do rotor, e curto-circuitadas em suas extremidades através de anéis condutores.

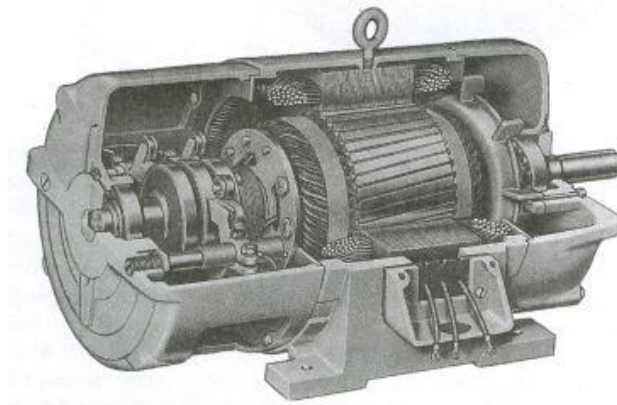


Figura 1 Máquina de indução com rotor bobinado.

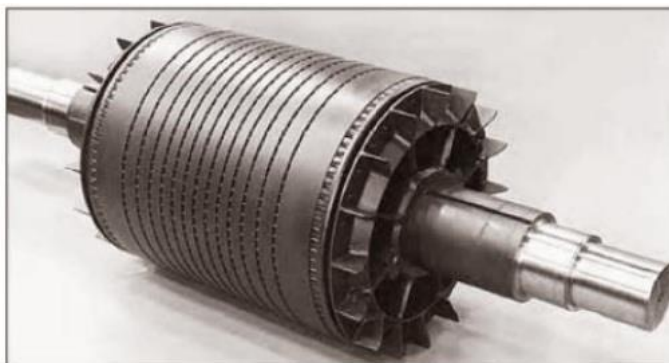


Figura 2 Rotor de gaiola de esquilo.

O rotor do motor de indução gira no mesmo sentido do campo girante, produzido pelo estator, onde a velocidade do campo girante é dada pela equação 1:

$$n_s = \frac{120 \cdot f_s}{p} \quad (1)$$

Onde: n_s é a velocidade síncrona em rpm, f_s é a frequência síncrona e p é o número de pólos magnéticos da máquina.

As tensões são induzidas no rotor por indução eletromagnética, através do campo girante produzido pelo estator, que por sua vez induz correntes no rotor, produzindo também um campo girante no rotor. Esse último campo interage com o campo girante do estator, produzindo o conjugado eletromagnético, fazendo com que o rotor gire. O rotor gira com velocidade abaixo do campo girante, mas sempre seguindo o sentido do campo girante. A diferença entre a velocidade do campo girante e do rotor é chamada de escorregamento.

O escorregamento é dado por:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2)$$

Na equação 2, s é o escorregamento e n_r é a velocidade mecânica do rotor em rpm.

Para estudar o comportamento de um motor de indução trifásico, como perdas, rendimento, curvas características, pode-se utilizar o seu circuito equivalente em regime permanente conforme mostrado na Figura 3, onde os parâmetros do circuito equivalente são dados em valores por fase.

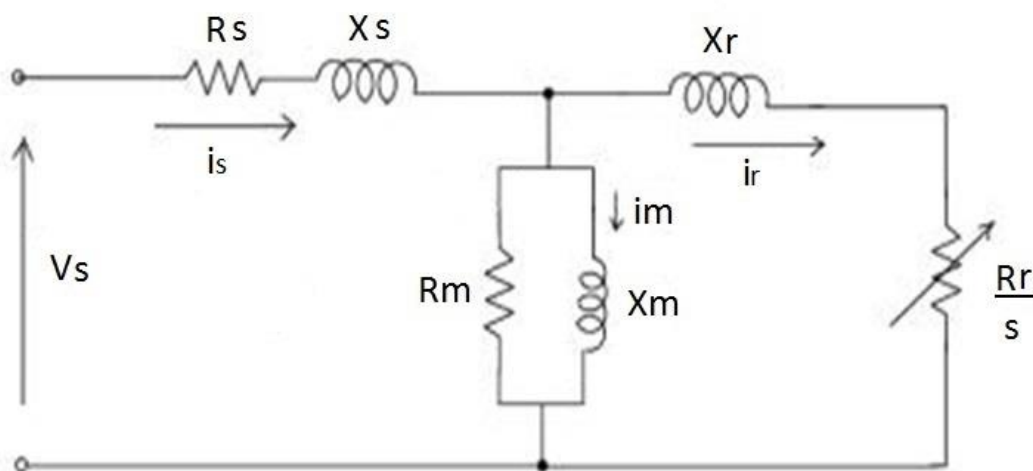


Figura 3 Circuito equivalente do motor de indução por fase

Sendo na Figura 3:

R_s = resistência do estator

R_r = resistência do rotor

R_m = resistência do meio magnético

X_s = reatância do estator

X_r = reatância do rotor

X_m = reatância de magnetização

i_s = corrente no estator

i_r = corrente no rotor

i_m = corrente de magnetização

Agora quando se deseja estudar mais detalhadamente o motor é preciso ter uma modelagem dinâmica do mesmo.

2.2 Qualidade de energia

Aqui é feita um resumo da qualidade de energia relacionada do motor de indução. Em outras palavras so será tratado o fenômeno de harmônicos, mas vale lembra que qualidade de energia envolve também afundamentos, elevações de tensão, transitorios oscilatórios entre outros fenômenos.

No tocante à Qualidade de Energia Elétrica, o motor de indução representa uma carga não linear para a rede quando o mesmo opera com seu circuito magnético saturado. Por

questões de otimização de projeto o motor sempre opera com certos níveis de distorções harmônicas, ou seja, funciona na região de saturação da sua curva normal de magnetização.

Neste trabalho, é feita uma análise dos harmônicos gerados pelo motor de indução, quando operado nestas condições. Para facilitar o entendimento dos harmônicos se faz necessário uma breve revisão do mesmo.

Os harmônicos são constituídos por formas de ondas com frequência que são múltiplas da frequência fundamental. A frequência gerada no Brasil é 60 Hz, sendo assim, o 1º harmônico ou fundamental possui frequência de 60 Hz, o 2º harmônico possui frequência de 120 Hz e a 3ª harmônica 180 Hz. Na Figura 4, está representada a onda fundamental, a 3ª e 5ª harmônicas e a somatória delas. Observa-se que decompondo a fundamental e os harmônicos na serie de Fourier, a soma fasorial resulta numa onda distorcida.

Para qualidade da energia uma distorção se refere à deformidade na forma de onda da tensão e/ou da corrente alternada senoidal. Quando a onda de tensão ou de corrente estão distorcidas elas perdem sua conformidade senoidal. No caso das distorções harmônicas o sinal, além de apresentar a componente fundamental, possui também seus múltiplos [5].

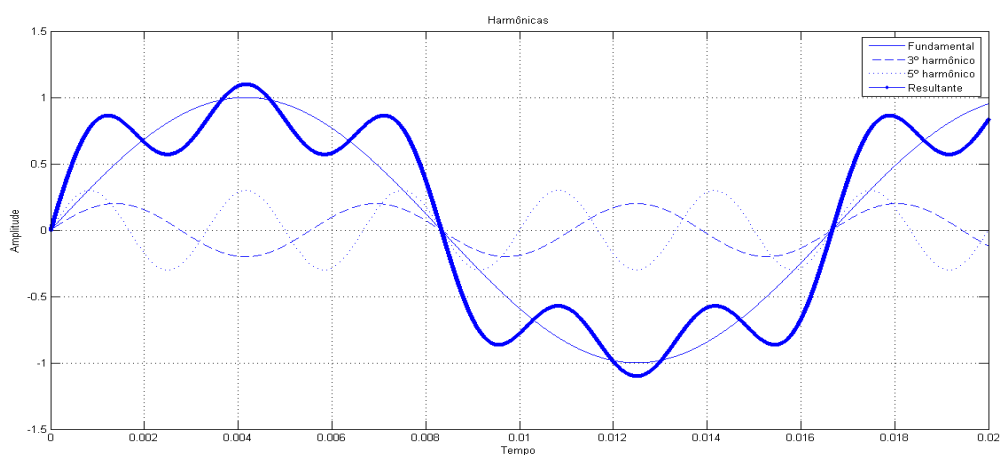


Figura 4 Onda fundamental e suas harmônicas

As perturbações harmônicas são geradas por cargas não lineares, sendo estas dispositivos de eletrônica de potência, motores, transformadores, dispositivos a arco, etc. Máquinas em geral geram harmônicos quando operam com o seu circuito magnético saturado. Como todos estes equipamentos são muito utilizados nas indústrias, deve ter o cuidado para que as perturbações geradas por ele não prejudiquem a rede. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é responsável por regulamentar os níveis de distorções que essas perturbações são consideradas aceitáveis no Brasil. Os limites para a distorção harmônica

total DHT na tensão para até 69kV é de 5%, entre 6,9kV e 161kV é de 2,5% e para tensões acima de 161kV é de 1,5%.

Para calcular a DHT utiliza se:

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h \neq 1} V_h^2}}{V_1} \quad (3)$$

Na equação 3 V_h são as tensões harmônicas, e V_1 é a tensão fundamental. A DHT da corrente é obtida de forma semelhante a DHT_V . Todos os valores são rms.

Os problemas causados pelos harmônicos podem ser classificados em [5]:

- Efeitos Imediatos, ocorrem no momento em que estão presentes os harmônicos, como por exemplo, o baixo fator de potência, o sobreaquecimento de transformadores e motores e o aumento na vibração.
- Efeitos de longo prazo, são efeitos que ocorrem devido à reincidência de harmônicos em um determinado sistema, por exemplo, o estresse no isolamento, estresse térmico e redução da vida útil.

Os motores geram distorções harmônicas por causa das suas características físicas como: tipo de enrolamento, o número de bobinas, e pelas suas características magnéticas, como saturação magnética. Para um estudo mais detalhado dos níveis de harmônicos, especialmente o terceiro harmônico gerado pelo motor, que é o mais predominante, foi desenvolvida uma modelagem para a máquina de indução trifásica, na qual é incluída a saturação magnética, como descrita a seguir.

2.3 Modelagem Matemática do Motor

Para dimensionar um motor, antes de utilizá-lo, deve-se estudar a influência que esse terá no sistema em que será inserido. Para isso, existem as modelagens matemáticas para a máquina de indução. Muitos modelos que existem nos livros de máquinas elétricas são baseados no circuito equivalente em regime permanente, não caracterizando a dinâmica da máquina em si. Os que tratam da dinâmica da máquina na maioria das vezes não contemplam a saturação magnética.

Desta forma, para um estudo mais aprofundado do motor é proposta uma modelagem matemática, que leva em conta a saturação magnética da máquina RESENDE (1999). Essa modelagem faz uso das características físicas do motor para descrevê-lo.

Para uma das fases genéricas do estator de uma máquina de indução trifásica a sua tensão de alimentação é:

$$v_i = R_i i_i + \frac{d\lambda_i}{dt} \quad (4)$$

Na equação 4, v_i representa a tensão de fase, i_i a corrente de fase, λ_i o fluxo concatenado e R_i a resistência por fase da fase i .

O concatenamento total do fluxo, assumindo que não ocorre a saturação na parcela de dispersão, pode ser escrito como sendo:

$$\lambda_i = \lambda m_i + L_i i_i \quad (5)$$

Nas equações 4 e 5 i representa as fases a, b e c e A, B e C, do estator e do rotor, respectivamente.

Em (5) o fluxo magnetizante por fase é representado por λm_i , L_i é indutância de dispersão dos enrolamentos de fase. O objetivo básico é obter λm_i , que é o fator que inclui o harmônico.

As equações 4 como a 5 são as bases dessa modelagem, pois tendo conhecimento de R_i e L_i , a tensão terminal v_i , é possível estabelecer uma relação entre a corrente de fase e o fluxo magnetizante, levando em conta a parcela magnetizante do fluxo concatenado.

Para obtenção desse fluxo, é necessário o conhecimento das características magnéticas da máquina. É importante observar que estas características são proporcionadas pelas funções harmônicas magnéticas descritas a seguir.

Com a parcela magnetizante em mãos, obtém-se i_i através da equação 5. Obtendo-se i_i e λ_i da equação 4 uma vez que v_i é conhecida.

O fluxo magnetizante é obtido apenas admitindo a componente fundamental da distribuição espacial da força magnetomotriz resultante, produzida pelas correntes de todos os enrolamentos do rotor e do estator. Tomando-se como referência angular o eixo da fase “a” do estator e admitindo a sequência de fases “abc”, em um determinado instante, o valor máximo da resultante da força magnetomotriz se encontra em uma posição qualquer, definida por um ângulo α , como é mostrado na Figura 5 [7].

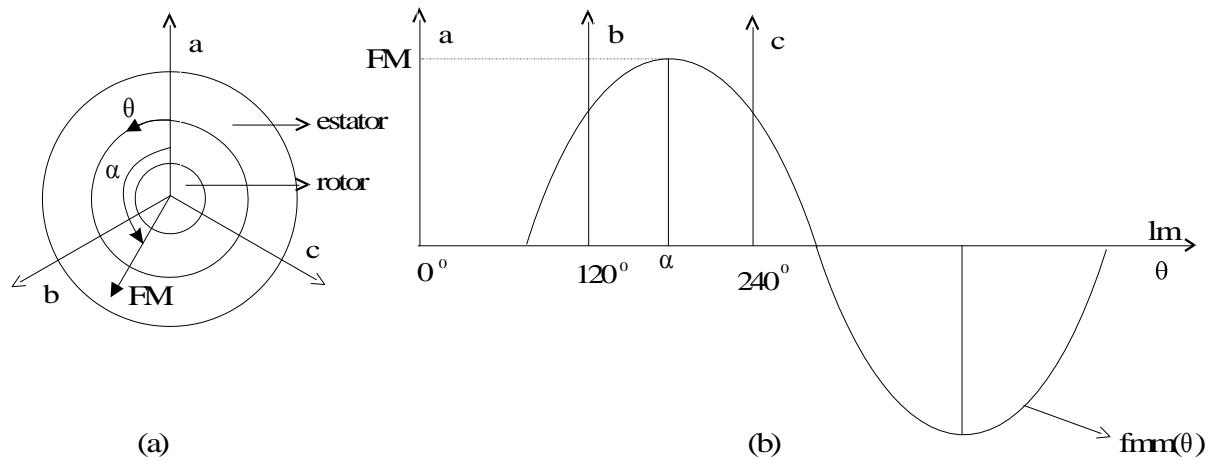


Figura 5 Distribuição espacial da força magnetomotriz (a) Corte transversal do estator e do rotor (b) Linearização da linha média do entre-ferro – lm [7]

Da Figura 5, a componente fundamental da distribuição espacial de força magnetomotriz total pode ser definida pela equação 6.

$$fmm(\theta) = FM \cos(\theta - \alpha) \quad (6)$$

Para um enrolamento de uma fase qualquer “ i ” a equação 6 pode relacionada a equação 7 [7]:

$$fmm(\theta) = \sum_{i=A,B,C,a,b,c} 2 K_i i_i \cos(\theta - \theta_i) \quad (7)$$

Onde:

K_i – fatores dos enrolamentos do estator e do rotor.

A força magnetomotriz produz uma distribuição de densidade de fluxo magnético $B(\theta)$, a qual, devido à saturação magnética, apresenta um achatamento próximo aos seus valores máximos e mínimos, como mostrado na Figura 6. [7].

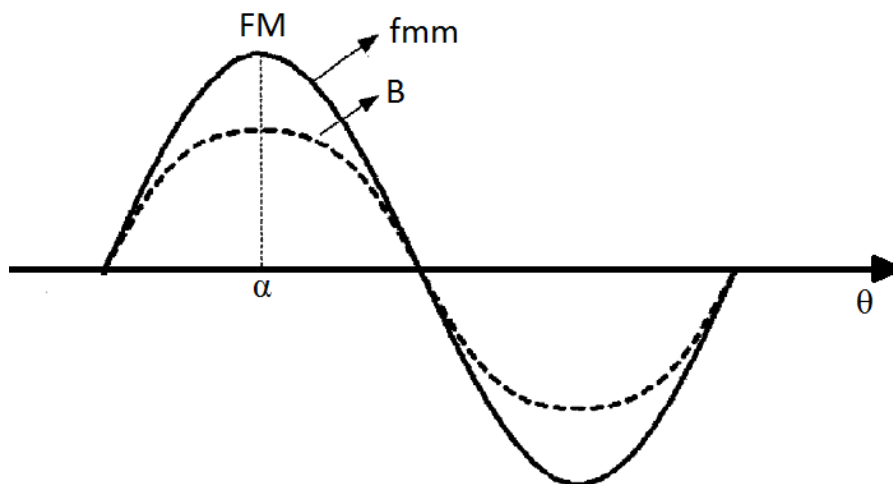


Figura 6: Distribuição da Densidade de Fluxo Magnético com o Efeito Saturação.

Aspectos importantes acerca da modelagem podem ser percebidos na Figura 6. Primeiramente, a distribuição $B(\theta)$ é simétrica em relação ao eixo de distribuição de força magnetomotriz. Portanto, quando decomposta na série de Fourier apenas as harmônicas ímpares existirão e $B(\theta)$ pode ser escrita segundo a equação 8:

$$B(\theta) = \sum_{h \rightarrow \text{ímpar}} B_h \cos[h(\theta - \alpha)] \quad (8)$$

Na equação 8, h representa a ordem da componente harmônica e B_h a amplitude dessa componente.

Outra questão importante é o achatamento na forma de onda da distribuição de densidade de fluxo, proporcionado em sua maior parte, pela componente de terceiro harmônico. Isso permitiu uma simplificação na modelagem através da não inclusão dos efeitos das componentes harmônicas superiores à terceira. Tal simplificação facilitou o desenvolvimento e a solução numérica, não introduzindo erros consideráveis nos resultados experimentais obtidos em outros trabalhos [7].

Seguindo com o desenvolvimento, proposto por RESENDE (1999), o fluxo magnetizante devido a $B(\theta)$ pode ser computado através de:

$$\lambda m_i = \sum_h F_h(\overline{FM}) \cos[h(\alpha - \theta_i)] \quad (9)$$

Na equação 9, \overline{FM} é o valor máximo de cada componente harmônica do fluxo magnetizante de fase. $F_h(\overline{FM})$ é aqui definida como a função harmônica magnética obtida experimentalmente.

Considerando agora uma máquina de indução trifásica simétrica, e a equação 9:

$$\overline{FM} = \frac{FM}{2K} \quad (10)$$

Onde:

$$K_i = K(i = a, b, c, A, B, C)$$

$\theta_a = 0^\circ$, $\theta_b = -120^\circ$, $\theta_c = 120^\circ$, $\theta_A = \theta_R$, $\theta_B = \theta_R - 120^\circ$, $\theta_C = \theta_R + 120^\circ$, sendo θ_R a posição angular do rotor em relação ao eixo da fase “a” do estator.

O desenvolvimento das equações 5, 8 e 9, chega se as equações [7].

$$f_R(\lambda) = \sum_i \frac{\lambda_i}{L_i} \cos(\theta_i) \quad (11)$$

$$f_l(\lambda) = \sum_i \frac{\lambda_i}{L_i} \text{sen}(\theta_i) \quad (12)$$

$$f^2(\lambda) = f_R^2(\lambda) + f_l^2(\lambda) \quad (13)$$

$$F_1(\overline{FM}) = \frac{1}{A} f(\lambda) - \frac{1}{A} \overline{FM} \quad (14)$$

$$tg(\alpha) = \frac{f_l(\lambda)}{f_R(\lambda)} \quad (15)$$

$$A = \frac{3}{2} \left(\frac{1}{L_S} + \frac{1}{L_R} \right) \quad (16)$$

As equações de 11 a 16, juntamente com as funções harmônicas magnéticas obtidas experimentalmente, completam o sistema de equações a ser resolvido numericamente.

Para a solução numérica, a equação 4 deve ser integrada durante um passo de integração. A seguir, com as equações de 11 a 13 obtém-se o valor de $f(\lambda)$ e a equação 14 torna-se a equação de uma reta, cujo coeficiente linear é $f(\lambda)/A$ e o coeficiente angular é $-1/A$. Através do cálculo do ponto de interseção desta reta com a curva de magnetização normal da máquina, a qual relacionando $F_1(\overline{FM})$ com (\overline{FM}) tem-se o valor instantâneo do fluxo magnetizante, e, por interpolação, utilizando a curva de magnetização de terceiro harmônico, obtém-se essa componente de terceiro harmônico do fluxo magnetizante.

Para a simulação dinâmica da máquina deve levar em consideração também as equações mecânicas, desenvolvidas por [7].

3 *Materiais e Métodos*

Na primeira etapa, foram determinados os parâmetros do circuito equivalente do motor, mostrado na Figura 3. Esses parâmetros foram obtidos através dos ensaios em vazio e de rotor bloqueado e medição da resistência do estator, aplicando tensão contínua na bobina do estator até circular a sua corrente nominal.

No ensaio em vazio, deve se acionar o motor de indução sem nenhuma carga acoplada ao eixo, na sua tensão nominal. No teste de rotor bloqueado, com o eixo imóvel alimenta se o motor na sua corrente nominal. Já no ensaio cc alimenta-se o estator com uma tensão cc, até circular sua corrente nominal. Para medir os valores de tensão, corrente e potência, utilizou se de multímetros e wattímetros em cada fase.

Os dados dos ensaios são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Valores dos ensaios da máquina.

Ensaio a Vazio			Teste Rotor Bloqueado			Ensaio CC	
Tensão	Corrente	Potência	Tensão	Corrente	Potência	Tensão	Corrente
220 V	3,78 A	860 W	69 V	9,05 A	580 W	13	9,06

De posse dos ensaios são determinados os parâmetros do circuito equivalente, mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros da máquina de indução estudada.

Rs	Rr	Xs	Xr	Xm	Rm
2,29 Ω	5,52 Ω	6.57 Ω	6.57 Ω	75,29 Ω	334,23 Ω

Além dos parâmetros apresentados na Tabela 2, a Tabela 3 apresenta as características nominais da máquina a ser estudada.

Para levantar as curvas de magnetização do motor, necessárias para a simulação do motor de indução trifásico, as funções $F_1(\overline{FM})$ e $F_3(\overline{FM})$ devem ser determinadas.

Tabela 3: Características nominais da máquina.

Dados da Placa						
Rotor	Potência Nominal	Velocidade Nominal	Frequência	Tensão Δ/Y	Corrente Δ/Y	Fator de Potência
Bobinado	2,24 KW	1690 rpm	60 Hz	220/380V	9,0/5,2A	0,8

As características magnéticas $F_1(\overline{FM})$ e $F_3(\overline{FM})$ são obtidas utilizando-se uma modelagem desenvolvida em [7].

Para a determinação das características magnéticas foi utilizado um osciloscópio, onde foram capturados os valores instantâneos de tensão e corrente de uma fase, não sendo possível a medição dos valores instantâneos das três fases, como proposto em [7], por falta de um sistema de aquisição de dados. Para levantar estas curvas foi acionado na velocidade síncrona, por meio de um motor síncrono e os terminais do estator do motor de indução foi ligados em triângulo. A tensão de alimentação foi variada, através de um varivolt de 0 V a 245 V, obtendo assim, tanto pontos na região linear como na região de saturação magnética.

O circuito equivalente para determinação das características magnéticas fica como mostrado na Figura 7:

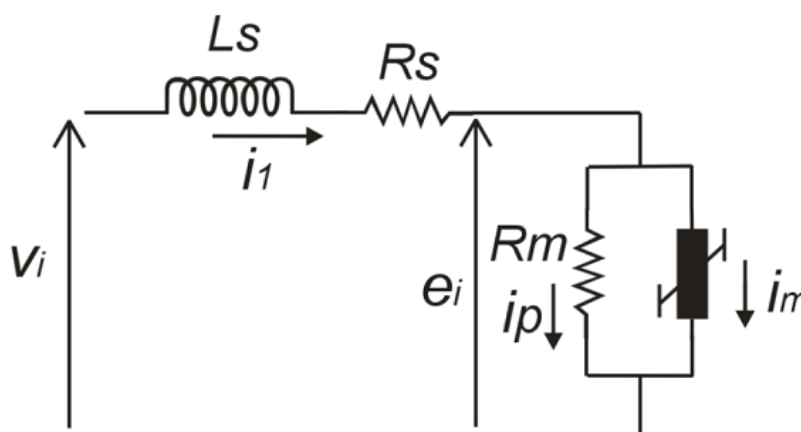


Figura 7: Circuito equivalente da MIT na velocidade síncrona.

Onde:

e_i = força eletromotriz induzida na fase i em valores instantâneos.

i_p = corrente de perdas no núcleo magnético em valores instantâneos.

i_m = corrente de magnetização, em valores instantâneos.

R_m = resistência referente às perdas no núcleo magnético.

Assim, do circuito da Figura 7 pode-se escrever a força eletromotriz como:

$$e_i = V_i + R_s i_i - L_s \frac{d\lambda_i}{dt} \quad (17)$$

Com os valores de R_s , L_s , V_i e i_i em mãos, consegue-se através de (17) a força eletromotriz induzida no circuito magnético. Assim, obtém-se a corrente de perdas no ferro através das perdas no ferro (P_{fei}), sendo esta a diferença entre a potência média de entrada e a perda Joule na resistência do estator como mostra (18).

$$P_{fei} = P_i - R_s (I_{efi})^2 \quad (18)$$

Onde:

$$P_i = \frac{1}{T} \int_0^T V_i I_i dt \quad (19)$$

I_{efi} = corrente na fase “i” em valor eficaz

T = período

Sendo:

$$I_{fei} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_i^2 dt} \quad (20)$$

Da Figura 7, a corrente de perdas no ferro é:

$$I_{pi} = \frac{e_i}{R_m} \quad (21)$$

E da relação para a perda de potência ativa no núcleo tem-se:

$$R_m = \frac{E_i^2}{P_{fei}} \quad (22)$$

Onde:

$$E_i = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T e_i^2 dt} \quad (23)$$

Com os resultados encontrados de e_i , I_{fei} , E_i , e P_i obtém-se os valores instantâneos da corrente de perdas por fase.

$$I_{pi} = \frac{e_i (P_i - R_s (I_{efi})^2)}{E_i^2} \quad (24)$$

Assim, de i_{pi} e i_i obtém-se i_{mi} :

$$I_{mi} = I_i - I_{pi} \quad (25)$$

Decompondo, através da série de Fourier, o valor máximo da componente fundamental de I_{mi} , presente em 25, obtém-se a componente fundamental de FM dada por:

$$FM = \frac{3}{2} I_m \quad (26)$$

I_m = valor máximo da componente fundamental da corrente de magnetização.

O fluxo magnetizante λ_{mi} das equações.

$$\frac{d\lambda_i}{dt} = v_i - R_i I_{mi} \quad (27)$$

$$\lambda_{mi} = \lambda_{mi} - I_{mi} L_s \quad (28)$$

Decompondo λ_{mi} na série de Fourier, obtém-se $F_1(\overline{FM})$ e $F_3(\overline{FM})$, que são os valores máximos das componentes harmônicas de primeira e terceira ordens, respectivamente.

Os gráficos que relacionam $F_1(\overline{FM})$ versus \overline{FM} e $F_3(\overline{FM})$ versus \overline{FM} são mostrados respectivamente nas Figura 8 e Figura 9.

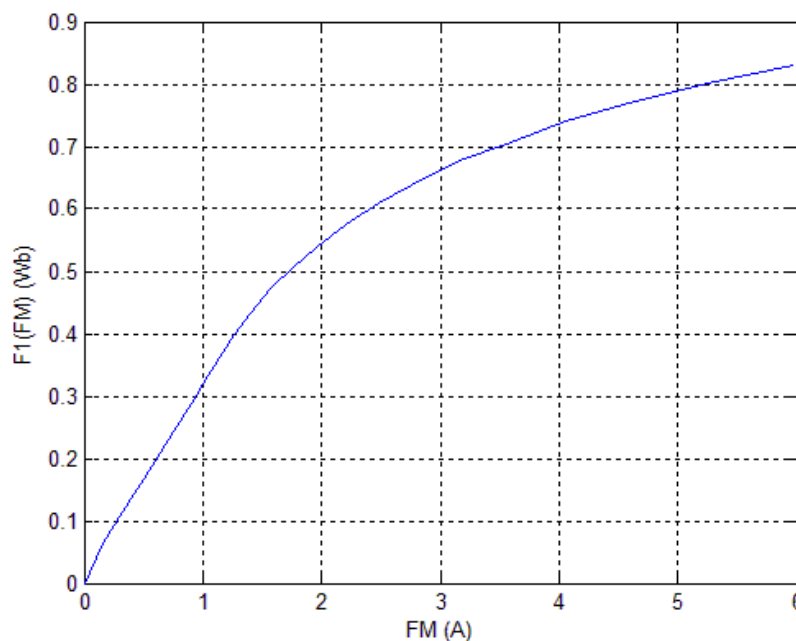


Figura 8: Componente fundamental da característica de magnetização da máquina de indução estudada.

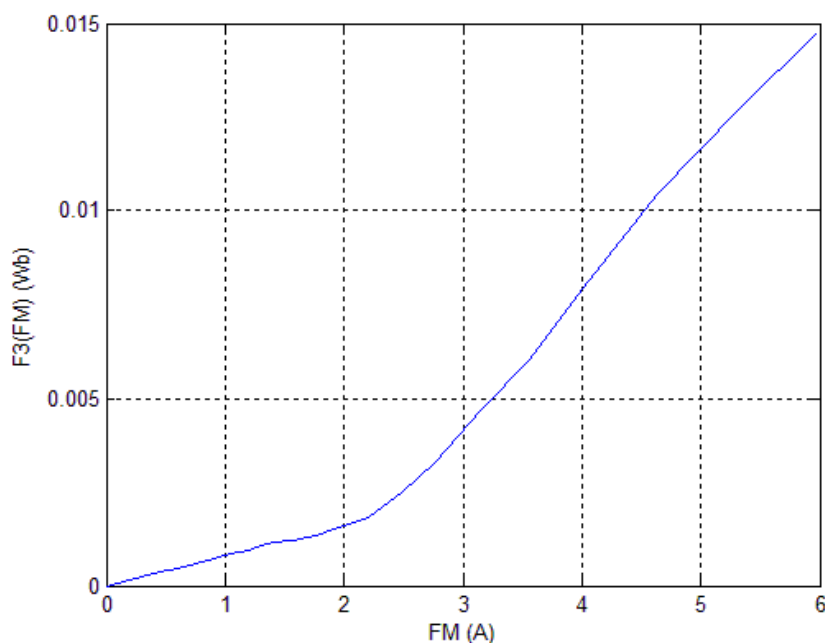


Figura 9: Componente harmônica de terceira ordem da característica de magnetização da máquina de indução estudada.

Após obtidos os valores de FM, F1(FM) e F3(FM), e dos parâmetros do circuito equivalente e utilizando o software de programação para simular a modelagem, em vazio e com diferentes valores de carga.

Em vazio foram feitas simulações para as tensões 180 V, que esta na região linear da curva de magnetização, e 220 V, que esta na região de saturação da curva de magnetização e com carga correspondente a 33,33%, 72%, 87,5%, 100% e 112% da carga nominal. Os valores foram escolhidos de acordo com o que foi possível realizar na prática. Finalmente fez a comparação entre os resultados da simulação e os da prática, para validar o modelo matemático. A máquina utilizada teve os terminais do estator ligados em triângulo.

Na prática o motor de indução foi alimentado por uma fonte de tensão variável através de um autotransformador trifásico (varivolt). Os valores instantâneos de tensão e corrente foram capturados por um osciloscópio. Foi acoplado um gerador síncrono no motor de indução para funcionar como uma carga mecânica. Aos terminais do gerador síncrono foram ligadas lâmpadas. Em outras palavras o motor de indução acionava máquina síncrona essa por sua vez acendia as lâmpadas, quanto mais lâmpadas eram acesas maior era a potência consumida, as lâmpas e o gerador síncrono foram ligadas em estrela, o motor de indução foi ligado em triângulo.

4 *Resultados e Discussões*

As formas de onda e valores em porcentagem de harmônicos na corrente foram coletados de duas formas diferentes, utilizando um medidor de qualidade de energia e um osciloscópio. O osciloscópio do laboratório de Engenharia Elétrica possui apenas dois canais, com isso, não foi possível capturar as três formas de ondas juntas e plotá-las com seus devidos defasamentos. Portanto, optou-se por reconstruir a forma de onda utilizando os valores de corrente fundamental, corrente de terceiro harmônico e ângulos de fase, estes valores foram fornecidos pelo medidor de qualidade de energia. Neste trabalho só serão analisadas as componentes harmônicas presentes nas correntes, isso será feito porque as correntes são as mais afetadas devido as perturbações harmônicas, para ligação em triângulo.

As Figura 10 e **Figura 11** mostra as formas de onda da corrente, com o motor operando a vazio e com 33,33% de sua carga nominal. Essas são as formas de ondas fornecidas pelo osciloscópio. Percebe-se que sem passar por nenhum tipo de tratamento para eliminar ruídos e demais harmônicos (além do terceiro) as formas de onda se parecem muito com as simuladas. Estas são visualizadas na Figura 10 para o motor a vazio e na Figura 11 para o motor com 33,33% de carga.

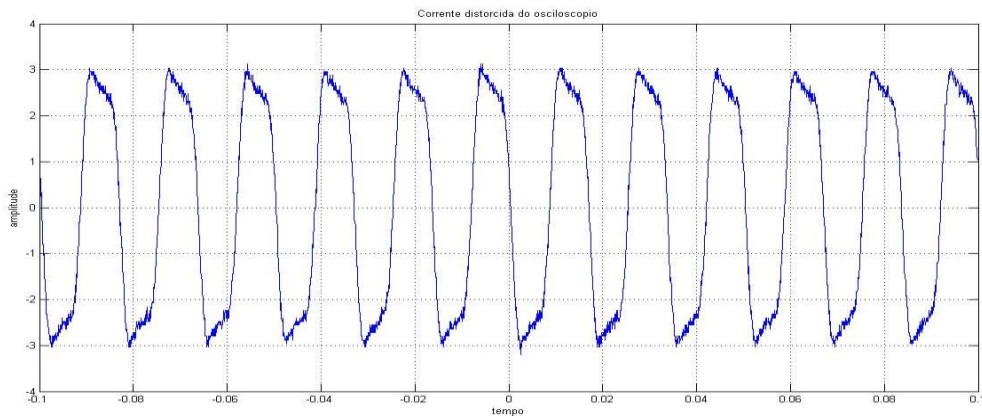


Figura 10 Corrente do motor operando a vazio sem filtrar

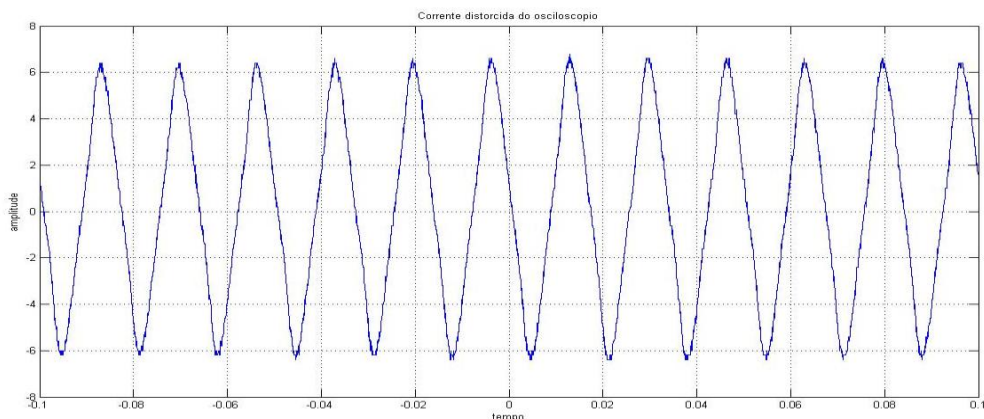


Figura 11 Corrente do motor operando com 33,33% de carga sem filtrar

Percebe-se pelas Figura 10 e Figura 11 que as ondas de corrente apresentadas possuem não só o terceiro harmônico, mas também outras componentes como, por exemplo, o quinto e o sétimo harmônico. Para descobrir os harmônicos presentes na onda plotou-se o gráfico do espectro de frequência, mostrado na Figura 10 para a situação do motor de indução trifásico a vazio.

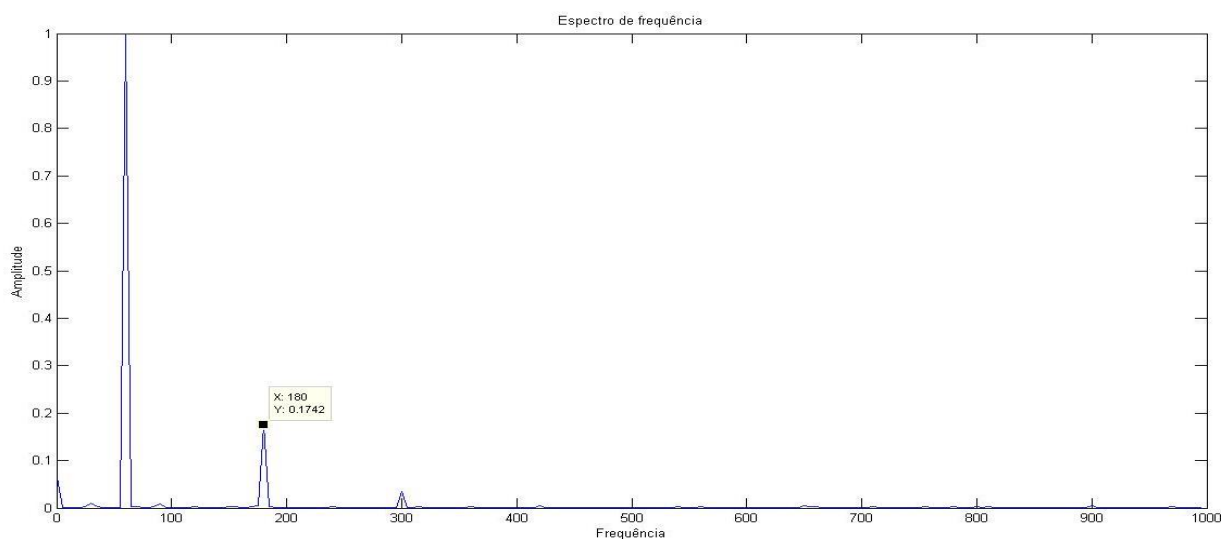


Figura 12 Espectro de frequência para o motor operando a vazio

Pela Figura 13 percebe-se que além do 3º harmônico, o motor apresenta outras componentes harmônicas. Nessa figura é possível ver que o nível do terceiro harmônico é maior que os demais, ficando em torno de 17,42% da fundamental, enquanto o 5º harmônico ficou em torno de 3,54% da corrente fundamental e o 7º harmônico chegou a 0,39% da

fundamental. Sendo assim é possível perceber que o terceiro harmônico é o mais influente no motor de indução, sendo assim, a partir desse ponto é analisada somente essa componente.

As Figura 13 e Figura 17 mostram os gráficos das correntes, sendo que o gráfico da esquerda é o simulado e o da direita o obtido experimentalmente. A Figura 13 é para motor alimentado em 180 V, na região linear da curva de magnetização. Percebe-se as distorções harmônicas em torno de 10% do valor da corrente fundamental. Vale ressaltar que, todas as correntes experimentais foram definidamente filtradas para que possuissem apenas a componente de 3º harmônico, visto que, esse é o principal fator a ser analisado neste trabalho.

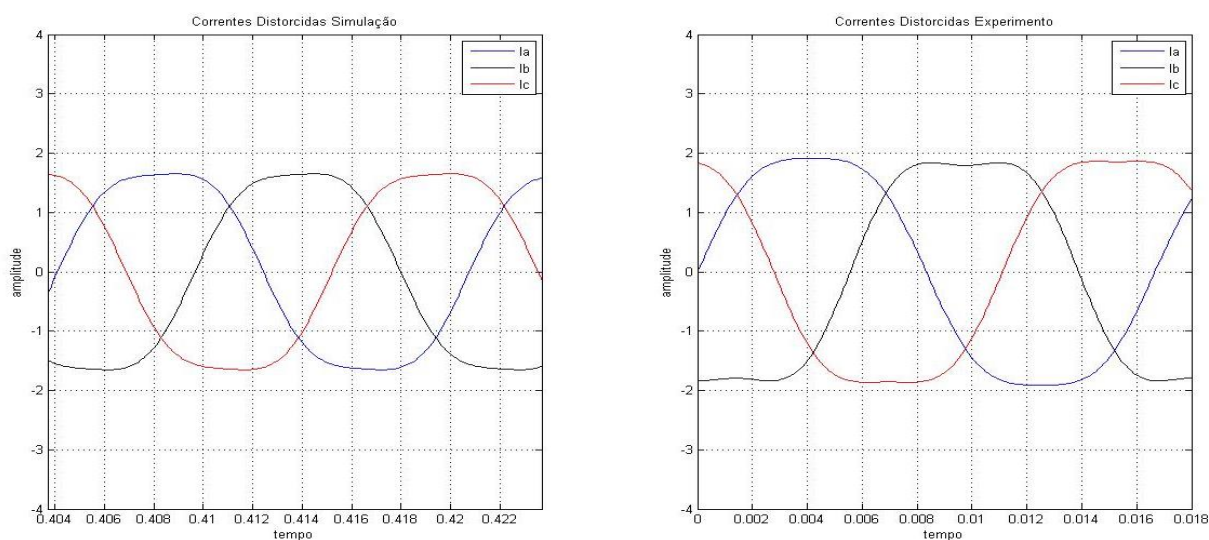


Figura 13 Correntes do motor funcionando a 180 V, na região linear.

É possível perceber na Figura 13 que a onda de corrente já sofre um achatamento, isso ocorre devido a presença do terceiro harmônico. Mesmo sendo 10% do valor nominal já começa a distorcer a forma de onda.

A Figura 14 mostra o gráfico para o motor ligado em 220 V a vazio. Quando motor está a vazio e em sua tensão nominal, é quando as distorções harmônicas são mais altas. Nas Figura 14 e Figura 16 as ondas de corrente estão desequilibradas em torno de 1%. Isso acontece porque a fonte de tensão utilizada para alimentar o motor não é perfeitamente senoidal e equilibrada.

As distorções harmônicas presentes nas correntes do motor funcionando a 33,33%, 72% e 87,5% foram bem próximas em valores, entretanto, divergeriam um pouco em relação a forma de onda, mostrados nas Figura 14 a 17. Os valores das porcentagens de harmônicos podem ser vistos na tabela 4.

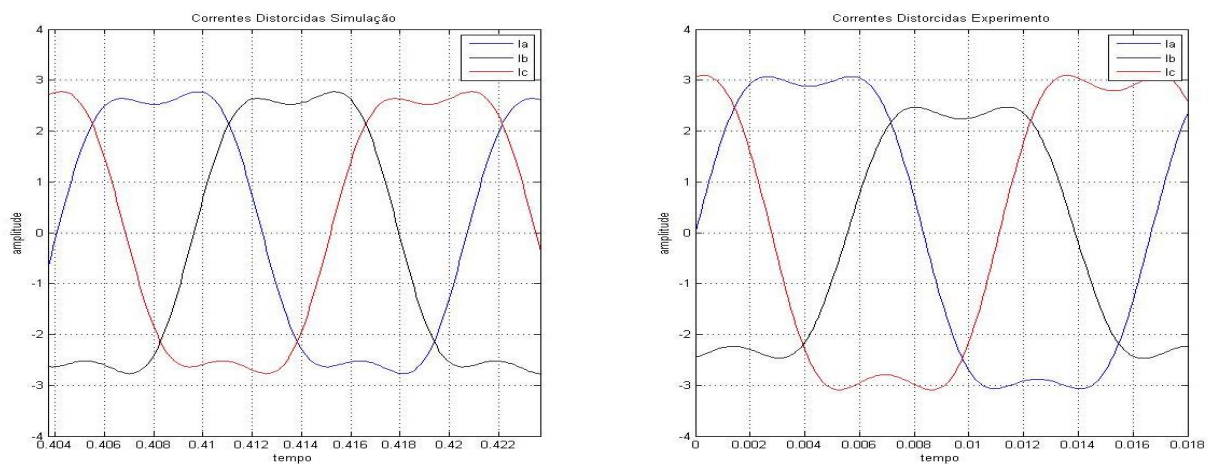


Figura 14 Correntes do motor funcionando a vazio com tensão nominal 220V

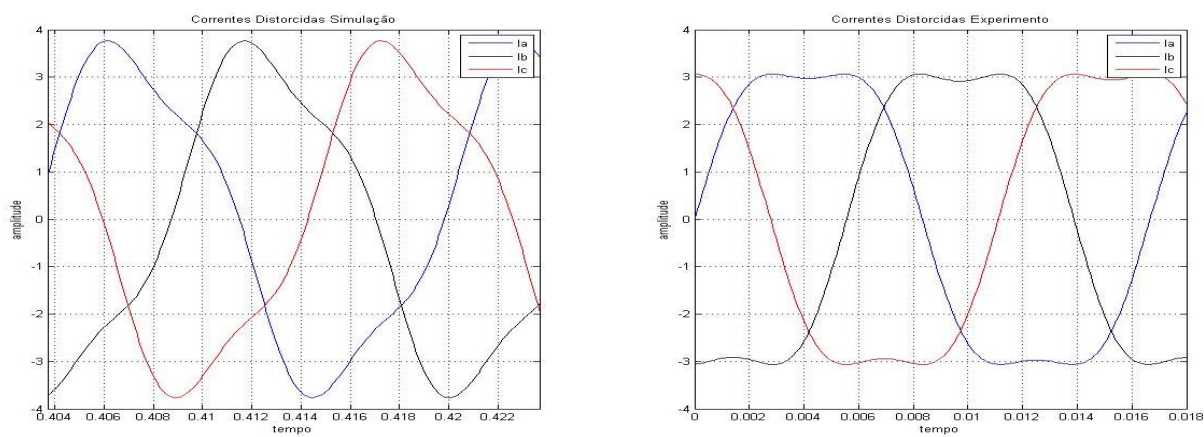


Figura 15 Correntes do motor funcionando com 33,33% de carga

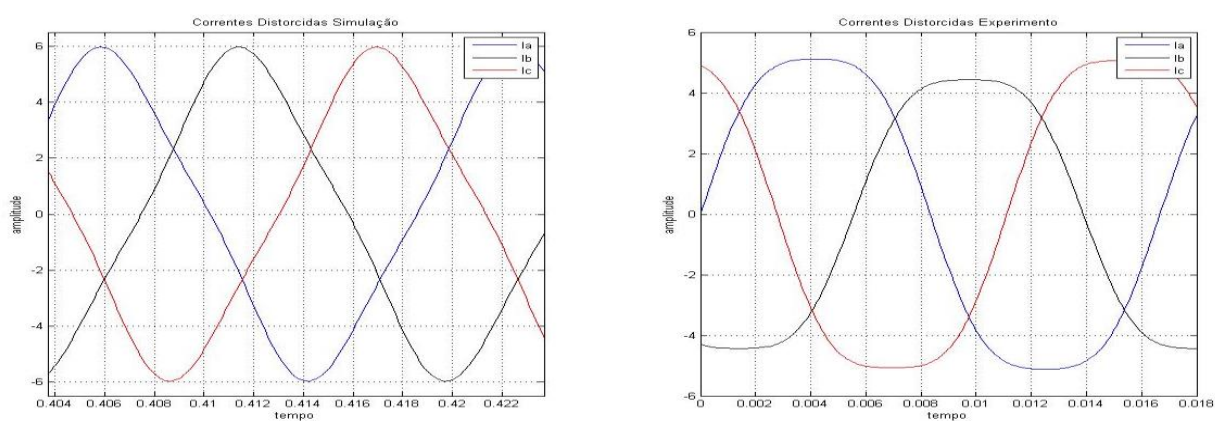


Figura 16 Correntes do motor funcionando com 87,5% de carga

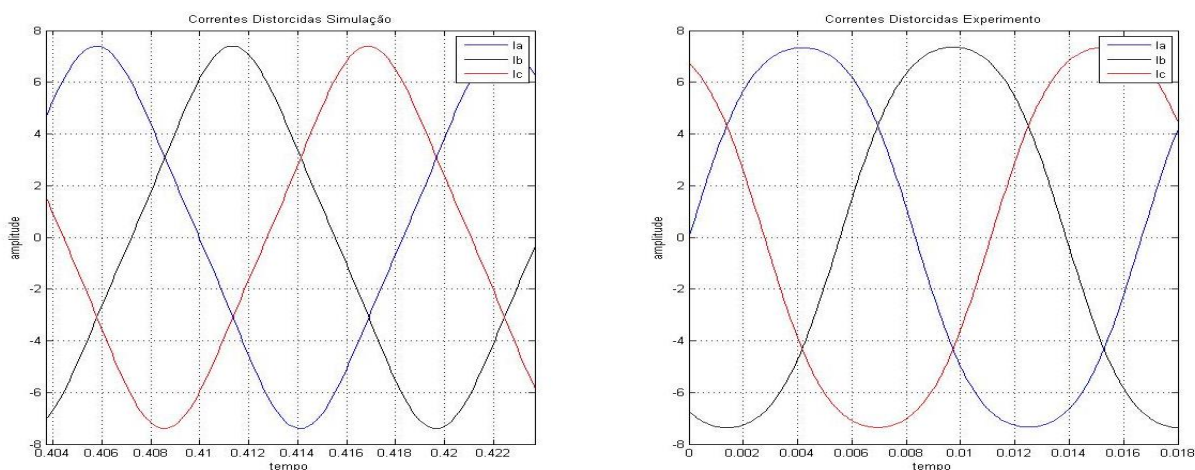


Figura 17 Correntes do motor funcionando com 112% de carga

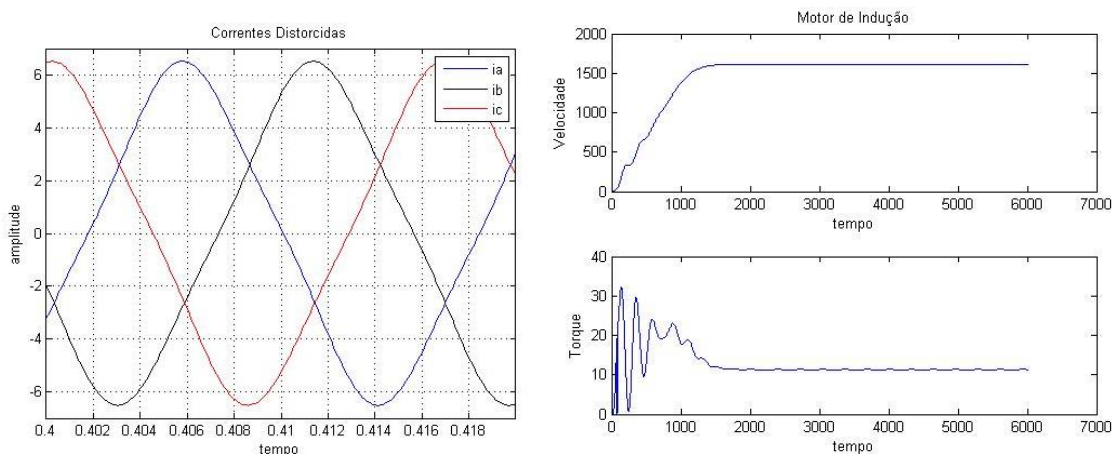


Figura 18 Correntes, velocidade e torque do motor funcionando com 100% de carga

Quanto à parte experimental, o motor não foi operado com uma carga de exatamente 100%. Isto é porque para a simulação da carga no eixo, o motor de indução acionou um gerador síncrono, com lâmpadas colocadas nos seus terminais. O gerador síncrono desta forma simula a carga no eixo, que não retrata o valor real obtido da simulação digital. Os gráficos são mostrados na Figura 18 são os valores simulados de corrente, torque e velocidade. De acordo com o gráfico do torque, que pode ser visto no canto direito inferior da Figura 18, ele oscila levemente quando o motor está funcionando com a carga nominal.

De acordo com a Tabela 4 percebe-se que os valores simulados de distorção harmônicas presentes na corrente se aproximam muito dos valores medidos experimentalmente. Todos os valores apresentados na tabela 4 são dados em porcentagem. A Tabela 4 possui três valores de porcentagem de distorção harmônica, cada um referente a uma fase. Percebe-se que estes variam entre si. Isso ocorre devido ao desequilíbrio presente entre as fases do sistema.

Tabela 4 Porcentagens de distorção causadas pelo 3º harmônico

Região de saturação				
Taxa de Distorção 3º Harmônica				
Carga	Simulação	Experimento		
0,00%	18,84	18,88	21,00	21,7
33,33%	15,52	15,82	16,77	17,54
72,00%	9,99	9,98	11,25	11,35
87,50%	8,32	9,5	10,53	10,53
100,00%	7,25	-	-	-
112,00%	6,36	6,48	7,26	6,94
Região Linear				
Carga	Simulação	Experimento		
0,00%	10,62	9,88	12,41	15,19

Com o medidor de qualidade de energia foi possível identificar as fases da corrente fundamental e das correntes de terceiro harmônico, além de perceber que a componente de terceiro harmônico estão em fase, enquanto as fundamentais são defasadas de 120° elétricos no tempo.

As distorções ocorrem apenas nas correntes de fase, porque o motor foi ligado em triângulo e o terceiro harmônico circula dentro do triângulo. Já as correntes de linha ficam senoidais, uma vez que é a soma fasorial das correntes de fase, que estão em fase.

5 *Conclusões*

Conclui-se a partir dos resultados obtidos, que o modelo matemático estudado descreveu satisfatoriamente o nível de distorção de 3º harmônico presente na corrente tanto na parte linear da curva de magnetização quanto na região de saturação, validando assim a modelagem apresentada. O erro entre os valores simulados e os valores experimentais para o motor a vazio ficou próximo de 4%, para o motor com 87,5% da carga esse erro ficou em torno de 8%.

O terceiro harmônico encontrado na fase do motor de indução trifásico ligado em triângulo, é significativo dependendo da tensão e da corrente. Isso ocorre porque as componentes de 3º harmônicos circulam dentro do triângulo e estão em fase. As correntes de linha não são distorcidas, cuja a soma fasorial das correntes de fase dão formas senoidais nas correntes de linha, pois as correntes de terceiro harmônico se cancelam.

Vale ressaltar que, a modelagem, aqui simulada, contempla apenas as componentes fundamental e de terceiro harmônico. Isso é feito porque as componentes superiores a terceira harmônica contribuem muito pouco para as distorções nas formas de onda da corrente de fase. Além disso, a inclusão destas componentes tornaria o modelo mais complexo, e com pouca importância.

A análise dos efeitos das componentes harmônicas sobre os motores de indução trifásicos não deve ficar limitada aos resultados aqui apresentados. Para a continuidade deste trabalho, pode-se propor analisar o comportamento dos motores acionados por conversores, assim como, a inserção de outros distúrbios na rede, como afundamentos e elevações de tensão. Dadas estas situações indesejadas, propõe-se também a análise do desempenho de filtros de harmônicos para a correção destas distorções.

Referências Bibliográficas

Casos

- [01] Fitzgerald, A. E., Kingsley, C. Jr., Umans, S. D. 2006. Máquinas Elétricas. Artmed, Porto Alegre.
- [02] Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso, S., Beaty, H. W.. Electrical Power Systems Quality, second edition, 2002.
- [03] Ben/Mme, Balanço Energético Nacional/Ministério De Minas E Energia, Brasília, 2013.
- [04] Sen, P. C. 1997. Principles Of Electric Machines And Power Electronics. 2ª Edição John Wiley & Sons, Inc.
- [05] Leão, R. P. S., Sampaio, R. F., Antunes, F. L. M., Harmônicos Em Sistemas Elétricos. 1ª Edição, Rio De Janeiro, 2014.
- [06] Aneel, Agencia Nacional de Energia Elétrica, Qualidade da Energia Elétrica, Módulo 8.
- [07] Resende, José Tarcísio. Modelagem Da Máquina De Indução Trifásica, Incluindo A Saturação Magnética – Análise Dinâmica Do Gerador De Indução Auto-Excitado – Tese De Doutorado – Universidade Federal De Uberlândia – 1999.
- [08] Pinheiro, David Guedes (2007). Modelagem Matemática Do Gerador De Indução Trifásico, Incluindo A Saturação Magnética E O Controle Da Tensão Gerada – Universidade Federal De Viçosa – 2007.
- [09] Nippashi, Hernani Naoki (2010). Modelagem Da Máquina De Indução Trifásica Incluindo A Saturação Magnética – Análise Da Variação Da Tensão De Alimentação – Universidade Federal De Viçosa – 2010.
- [10] Pompeo, Gustavo Paiossin. Efeitos Das Harmônicas Sobre Curva De Torque De Motores De Indução Monofásicos Aplicados Em Compressores Herméticos – Escola De Engenharia De São Carlos – 2011.
- [11] Andrade, Darizon A. De; Freitas, Marcos A. A. De; Neto, Luciano M.; Paula, Hélder De; Domingos, José L. Effects Of Magnetic Saturation On Induction Machines Driven By Static Converters – Sba Controle & Automação – 2004.
- [12] Neto, Luciano Martins; Alvarenga, Bernardo Pinheiro De. Efeitos De Enrolamento E Saturação Magnética No Conjugado De Uma Máquina De Indução. – Sociedade Brasileira De Automática – Vol. 7 – 1996.
- [13] Duarte, Silvio Xavier; Proposta De Indicador De Qualidade De Tensão A Partir Do Impacto De Distorções Harmônicas E Desequilíbrios Sobre Motores De Indução – Escola Politécnica Da Universidade De São Paulo - 2006
- [14] Neto, Luciano M.; Resende, José Tarcísio; Uma Análise Da Saturação Magnética Em Umma Máquina De Indução Trifásica Através Dos Seus Terminais Elétricos – Xii Cba – Uberlândia – 1998.
- [15] Liao, Yuefeng; Lipo, Thomas A.. Effect Of Saturation Third Harmonic On The Performance Of Squirrel-Cage Induction Machines – Electric Machines And Power Systems – Vol. 22 – 1998.
- [16] Kosow, I. L. 2006. Máquinas Elétricas E Transformadores Globo, São Paulo.