

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

CARLOS TEIXEIRA DE ANDRADE NETO

**ANÁLISE DE UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO SUBMETIDO A
TENSÕES DE ALIMENTAÇÃO DISTORCIDAS**

VIÇOSA
2012

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

CARLOS TEIXEIRA DE ANDRADE NETO

**ANÁLISE DE UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO SUBMETIDO A
TENSÕES DE ALIMENTAÇÃO DISTORCIDAS**

VIÇOSA
2012

CARLOS TEIXEIRA DE ANDRADE NETO

**ANÁLISE DE UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO SUBMETIDO A
TENSÕES DE ALIMENTAÇÃO DISTORCIDAS**

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. M.Sc. Mauro de Oliveira Prates.

VIÇOSA
2012

CARLOS TEIXEIRA DE ANDRADE NETO

**ANÁLISE DE UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO SUBMETIDO A
TENSÕES DE ALIMENTAÇÃO DISTORCIDAS**

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 31 de Outubro de 2012.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. M.Sc. Mauro de Oliveira Prates - Orientador
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. José Tarcísio de Resende - Membro
Universidade Federal de Viçosa

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

*“O início da sabedoria é a admissão da própria ignorância. Todo o meu saber consistem em
saber que nada sei.”
(Sócrates)*

Aos meus pais, por toda confiança, amor e apoio que me foram passados.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado uma vida repleta de grandes oportunidades e privilégios, como a de poder ter estudado numa ótima Instituição Superior como a UFV e realizar este trabalho, além de ter-me oferecido uma família maravilhosa e grandes amizades.

Agradeço ainda aos meus pais, Josivel e Marly, que sempre me auxiliaram e fizeram do que estava aos seus alcances, muitas vezes, além disso, para me dar todo suporte e ajuda em minha vida universitária, forçando-me a acreditar que iria conseguir sempre que surgiam problemas no caminho.

Ao amigo e professor, Mauro Prates, com toda sua simplicidade e humildade, de onde recebi grande apoio e toda orientação necessária para realizar este trabalho. Por fim, aos colegas e amigos de curso, pela companhia e apoio em toda graduação.

Resumo

Devido à crescente exigência de um controle preciso e maior desempenho das máquinas de indução em uma indústria moderna, o aparecimento de harmônicos de tensão no sistema de alimentação tem atraído muita atenção recentemente. Seu impacto sobre os motores de indução trifásicos é uma das principais preocupações dos sistemas industriais de energia. Neste âmbito, o trabalho aqui apresentado utiliza a ferramenta computacional SIMULINK/MATLAB como ambiente de simulação para investigar o desempenho de um motor de indução trifásico de 3 HP, 220 V, 60 Hz, 4 pólos, operando em plena carga, sobre influência de tensões com diferentes níveis e ordens de distorções harmônicas. As grandezas monitoradas no motor incluem a eficiência do motor, torque eletromagnético, escorregamento, fator de potência e corrente do estator. Dessa forma o trabalho tem como objetivo mostrar até que ponto as distorções harmônicas podem ser desprezadas, tomando como base os resultados obtidos e as normas de recomendações do IEEE [3]. Este trabalho mostra que embora o torque eletromagnético médio praticamente não seja afetado, o torque instantâneo tem uma oscilação considerável que pode produzir uma tensão mecânica indesejada no eixo da máquina que possivelmente ocasionará vibrações e desgaste mecânico. Por fim, verifica-se que a análise isolada apenas do fator de potência de deslocamento não indica de forma a presença ou influência de distorções no motor de indução, sendo, portanto o fator de potência total (ou verdadeiro) a medida correta recomendada. Além disso, é verificado que o fator mais prejudicado pelas distorções harmônicas na máquina de indução é o rendimento.

Abstract

Due to the growing demand for precise control and increased performance of induction machines in a modern facility, the appearance of voltage harmonics in the power system has attracted much attention recently. His impact on induction motors is a major concern for industrial energy systems. In this context, the work presented here uses the computational tool SIMULINK / MATLAB as a simulation environment to investigate the performance of a three-phase induction motor 3 HP, 220 V, 60 Hz, 4 poles, operating at full load, over voltage influence with different levels and orders of harmonic distortion. The quantities monitored the engine include engine efficiency, electromagnetic torque, slip, power factor and stator current. Thus the paper aims to show the extent to which the harmonic distortions can be neglected, based on the results and recommendations of IEEE standards [3]. This study shows that although the average electromagnetic torque practically not affected, the instantaneous torque has an oscillation that can produce considerable mechanical stress on the machine shaft unwanted possibly will cause vibration and mechanical wear. Finally, it appears that the analysis only isolated power factor displacement does not indicate the presence of shape or influence of distortions in the induction motor, therefore the total power factor (or true) the correct measurement recommended. Moreover, it is verified that the most adversely affected by harmonic distortion in the induction machine is yield.

Sumário

1	Introdução.....	14
1.1	Objetivos.....	15
1.1.1	Objetivos gerais	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
1.2	Organização do Texto	16
1.3	Parâmetros de Medição de Harmônicos.....	16
1.3.1	As Distorções Harmônicas	16
1.4	O Motor de Indução Trifásico.....	21
1.4.1	Análise Harmônica do MIT	22
1.4.2	Efeito sobre os Motores de Indução.....	24
1.5	Qualidade de Energia	26
1.5.1	O impacto das Distorções Harmônicas na Qualidade de Energia.....	27
2	Materiais e Métodos.....	29
2.1	Simulink	29
2.2	O Motor de Indução escolhido.....	30
2.3	Metodologia de Ensaio.....	31
3	Resultados e Discussões.....	31
4	Conclusões	39
Referências Bibliográficas		41
Apêndice A – Exemplo de Aplicação		42
A.2	Desenvolvimento do script de Simulação de interface com Simulink	43
A.2.1	Desenvolvimento da segunda parte script de Simulação de interface com Simulink.	46
A.2.2	Desenvolvimento da terceira parte do script de Simulação usando apenas os Parâmetros do motor de Indução.	47
A.2.3	Desenvolvimento da quarta parte do script de Simulação: Função que modela o circuito equivalente do MI usado.	48

Índice de Figuras

Figura 1: Circuito Equivalente do MIT.....	22
Figura 2: Gráfico do Torque Médio do MI em função do THD.....	32
Figura 3: Gráfico do Torque Eletromagnético em função do tempo para alimentação com e sem distorção.	33
Figura 4: Gráfico do Escorregamento do MI em função do THD.....	34
Figura 5: Gráfico da Corrente Total de Alimentação do Estator em função do THD.....	35
Figura 6: Gráfico das Correntes Harmônicas do Estator em função do THD.....	35
Figura 7: Gráfico do Fator de Potência de Deslocamento em função do THD.....	36
Figura 8: do Fator de Potência do MI em função do Escorregamento.	37
Figura 9: Gráfico do Fator de Potência Total (ou Verdadeiro) em função do THD.	38
Figura 10: Gráfico do Rendimento do MI em função do THD.....	39

Índice de Tabelas

Tabela 1: Limites de Distorção Harmônica de Tensão.....	18
Tabela 2: Limites de Distorção Harmônica de Corrente em % de IL	19
Tabela 3: Classificação dos Harmônicos.....	20
Tabela 4: Parâmetros Elétricos do MIT ensaiado.....	30
Tabela 5: Parâmetros do circuito Equivalente do MI.....	30

1 Introdução

Nos últimos anos, o número crescente de cargas não lineares tem afetado negativamente a qualidade da energia elétrica. Harmônicas e desequilíbrios entre fases são, entre outros, fatores causadores da degradação da forma de onda.

Com a crescente inovação tecnológica e aumento da produção de aparelhos eletrônicos com dispositivos estáticos e ainda aqueles que utilizam sistemas de controle microprocessados, possuem comprovadamente a capacidade de gerar harmônicos e distorcer a forma de onda original da fonte. Dessa forma, torna-se cada vez mais necessário o estudo desses tipos de distorções na rede. A importância desse estudo relativo aos harmônicos visa principalmente saber qual a influência dos mesmos em sistemas elétricos de potência e até que ponto seu efeito pode ser desprezado ou tolerado.

Além disso, esses tipos de distorções são danosos tanto às concessionárias de energia quanto aos consumidores. Empresas de grande porte também são diretamente afetadas por isso, já que fazem o uso de máquinas elétricas que sofrem sobreaquecimento e vibrações mecânicas quando expostas a esse tipo de ruído.

O IEEE tem um importante regulamento que estipula o limite que o THD (nível de distorção harmônica total) pode atingir em um sistema elétrico sem causar maiores danos à rede e aos consumidores [3]. Percebe-se então a importância da teoria de qualidade de energia e sua aplicação direta em soluções como formas de reduzir ou filtrar tais sinais ruidosos.

A energia elétrica deve ser fornecida ao consumidor com segurança, confiabilidade e qualidade. Os dois primeiros aspectos estão ligados à operação e ao planejamento do sistema elétrico, e são tratados seguindo procedimentos de rede e políticas de expansão e manutenção observando-se preceitos técnicos consolidados. A qualidade, por sua vez, envolve todos os segmentos do sistema de energia elétrica e tem seu ponto crítico no relacionamento distribuidor-consumidor. Muitas vezes, alguns dos conceitos referentes à qualidade ainda não se encontram completamente desenvolvidos. Segundo a literatura, uma adequada qualidade da energia elétrica é a ausência de qualquer problema presente na tensão, corrente ou frequência de um sistema elétrico, que resulte em falha ou operação inadequada de um equipamento do consumidor final.

Esta deve ser uma meta constantemente buscada pela concessionária de energia elétrica e seu cumprimento é frequentemente exigido por parte dos consumidores. Dentre os distúrbios que comprometem a qualidade da energia elétrica, um dos mais difundidos é a distorção harmônica das ondas de tensão e corrente. Ao contrário de outros fenômenos que influem na qualidade, como, por exemplo, as flutuações de tensão (efeito flicker) e as variações de curta duração de tensão, os harmônicos caracterizam-se por exibirem frequências elétricas múltiplas inteiras da frequência de 60 Hz e também por serem um fenômeno de regime estacionário.

Sabe-se que, em um motor de indução, tensões de alimentação distorcidas podem produzir sobreaquecimento, perda de eficiência, queda no fator de potência verdadeiro e vibrações mecânicas na máquina. No entanto, é fato que para determinadas ordens harmônicas de distorções, juntamente com o aumento da intensidade do distúrbio mensurado pela distorção harmônica total (THD), estes efeitos danosos se agravam mais no motor [3].

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos gerais

O objetivo geral deste trabalho é analisar os impactos negativos da inserção de distorções harmônicas na tensão de alimentação dos terminais do estator de um motor de indução trifásico.

1.1.2 Objetivos Específicos

O objetivo principal deste trabalho é estudar os harmônicos e seus efeitos sobre o motor de indução trifásico, bem como quanto seu desempenho é afetado pela inserção de tais distorções, e para este fim tais análises são realizadas através de simulações usando as ferramentas computacionais “Simulink” do Matlab®. Tem-se como objetivos específicos:

- i. Analisar as variações do torque do MIT submetido aos diversos harmônicos;
- ii. Analisar o escorregamento do MIT frente aos harmônicos;
- iii. Analisar as variações de corrente do estator em função do THD;
- iv. Analisar o fator de potência e rendimento frente ao distúrbio estudado.

1.2 Organização do Texto

Este trabalho foi estruturado em quatro capítulos. O primeiro, aqui descrito, mostra a introdução com os aspectos gerais do problema dos harmônicos na rede e é seguido por uma breve revisão bibliográfica.

Nos tópicos seguintes do mesmo capítulo são abordados os aspectos teóricos relacionados aos harmônicos no sistema de modo geral – onde é apresentada a formulação matemática para análise dos mesmos, definições de alguns índices de qualidade de energia e análise do motor de indução trifásico submetido a situações de distorções na alimentação.

No capítulo dois são mostrados os materiais e metodologia de simulação utilizada, sendo feito um estudo dos casos através de simulações de um motor de indução trifásico submetido a distorções harmônicas de sequência positiva e negativa até a 13ª ordem.

Finalmente, o capítulo quatro apresenta a conclusão e as principais contribuições desta pesquisa, bem como propostas de trabalhos futuros.

1.3 Parâmetros de Medição de Harmônicos

1.3.1 As Distorções Harmônicas

Segundo [2], é devido ao aumento das cargas não lineares na rede que aumentam também as correntes harmônicas, provocando assim uma degradação da forma de onda da tensão. As harmônicas são correntes ou tensões com frequências múltiplas da fundamental (estabelecida em 60 Hz no Brasil), onde a enésima ordem “n” da harmônica representa o múltiplo da frequência fundamental.

Sabe-se que harmônicas de tensão e corrente em sistemas elétricos de potência podem vir de diversas fontes ligadas na rede. Teoricamente, qualquer forma de onda periódica não sinusoidal pode ser transformada em outra através da análise da transformada de Fourier. Partindo deste fato, um sinal periódico distorcido de tensão e corrente, pode ser decomposto pelas equações mostradas em (1) e (2).

$$v(t) = \sqrt{2} [V_1 \text{sen}(\omega_1 t) + \sum_{h=2}^{\infty} V_h \text{sen}(h\omega_1 t + \alpha_h)] \quad (\text{Eq. 1})$$

$$i(t) = \sqrt{2} [I_1 \text{sen}(\omega_1 t) + \sum_{h=2}^{\infty} I_h \text{sen}(h\omega_1 t + \theta_h)] \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

V_1 e I_1 são os valores eficazes fundamentais da tensão e da corrente;
 V_h , I_h são os valores eficazes de tensão e corrente para a harmônica de ordem h;

α_h, θ_h são os ângulos de fase da tensão e corrente para a harmônica de ordem h ;

ω_1 é a frequência angular da fundamental.

Os valores rms de $v(t)$ ou $i(t)$ se relacionam com os valores rms das tensões e correntes para cada harmônica de ordem h . Por exemplo, para a corrente, tem-se:

$$I_{rms}^2 = I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots \quad (\text{Eq. 3})$$

De acordo com a recomendação IEEE Std 519-1992 [3], a taxa de distorção harmônica de tensão é calculada por:

$$THD_V(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (\text{Eq. 4})$$

A recomendação IEEE Std 519-1992 [3] recomenda para a baixa tensão uma distorção máxima de 10% na tensão, na situação em que o consumidor possui muitas cargas não lineares.

Antes de analisar a influencia dos harmônicos no sistema elétrico de potência se faz necessário entender o que é harmônico e as ferramentas principais de análise dos mesmos, bem como principais fontes geradoras de harmônicos. Este capítulo faz uma abordagem sobre esses assuntos.

As harmônicas são tensões ou correntes senoidais com frequências múltiplas inteiras da frequência a qual um sistema de energia está projetado para operar (denominado frequência fundamental; normalmente 50Hz ou 60Hz). As harmônicas combinam-se com a tensão ou corrente fundamental, e produzem as distorções harmônicas. A distorção harmônica existe devido à presença de cargas e dispositivos com características não-lineares no sistema elétrico.

Estes dispositivos podem ser modelados como fontes de correntes que injetam correntes harmônicas no sistema de energia elétrica. A distorção de tensão é resultado de quedas de tensão não lineares causadas pelas correntes harmônicas atravessando as impedâncias do sistema. A distorção harmônica é uma preocupação crescente para muitos consumidores e para o sistema elétrico de energia no geral, devido ao aumento da aplicação de equipamentos da eletrônica de potência [2].

Os níveis de distorção harmônica podem ser caracterizados pela análise do espectro de harmônicas considerando as amplitudes e ângulos de fase de cada componente harmônica individualmente. Também é comum utilizar uma medida global, a distorção harmônica total

(THD ou DHT, do inglês *Total Harmonic Distortion*), medida que considera a magnitude de toda a distorção harmônica apresentada, conforme (Eq. 5). A Tabela 1 mostra os limites de distorção harmônica de tensão recomendados segundo IEEE Std. 519-1992 [3].

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (\text{Eq. 5})$$

onde V_h é a amplitude das componentes harmônicas individuais, h é a ordem das harmônicas e V_1 é o valor eficaz da tensão fundamental.

Tabela 1: Limites de Distorção Harmônica de Tensão.

Barra de Tensão	Distorção Harmônica Individual de Tensão (%)	Distorção Harmônica Total de Tensão THD (%)
$V_n \leq 69\text{kV}$	3,0	5,0
$69\text{kV} < V_n \leq 161\text{kV}$	1,5	2,5
$V_n > 161\text{kV}$	1,0	1,5

As harmônicas de corrente resultam da operação normal de cargas não lineares conectadas ao sistema de energia. Os níveis de distorção de corrente podem ser caracterizados pela distorção harmônica total, mas frequentemente isto pode gerar equívocos. Por exemplo, muitos controladores de velocidade ajustáveis apresentarão valores elevados de distorção harmônica para a corrente de entrada quando estes operarem com cargas muito leves. Neste caso isso não é significativo, pois a amplitude da harmônica de corrente é baixa e ainda assim a distorção total é relativamente alta.

Na Tabela 2 são apresentados os limites de distorção harmônica de corrente segundo o que recomenda IEEE Std. 519-1992 [5], onde I_{SC} é a corrente de curto-circuito no ponto de acoplamento comum (PAC), que se trata o ponto de ligação entre a concessionária e os vários consumidores. A sigla DDT refere-se a total distorção harmônica de corrente associada à I_{SC} .

Tabela 2: Limites de Distorção Harmônica de Corrente em % de IL

Vn ≤ 69kV						
I _{sc} /I _L	h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	DDT
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20-50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50-100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100-1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0
69kV < Vn ≤ 161kV						
< 20	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20-50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50-100	5,0	2,25	2,0	1,25	0,35	6,0
100-1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
> 1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10
Vn > 161kV						
< 50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
≤ 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0

Os sinais harmônicos são classificados quanto à sua ordem (pares ou ímpares) e sequência (positiva, negativa ou zero), conforme mostrado pela Tabela 3, na qual está representada até a nona harmônica para fins de exemplificação.

As harmônicas de ordem ímpar são frequentes nas instalações elétricas em geral, enquanto as de ordem par são mais comuns nos casos de assimetrias do sinal, devido à presença de componente contínua. Quanto a sequência das harmônicas, importantes conclusões poder ser obtidas: de um modo geral, as de sequência positiva causam aquecimentos, vibrações e perdas adicionais; as de sequência negativa geram esses mesmos efeitos, além de reduzir o torque médio útil das máquinas; já as harmônicas de sequência zero indicam que pode haver significativa corrente circulando pelo neutro, no caso de conexão Y a 4 fios, ou pela malha no triângulo, na conexão Δ. Essas últimas são consideradas as harmônicas mais preocupantes, trazendo vários problemas para a instalação e os equipamentos a ela ligados [5].

Tabela 3: Classificação dos Harmônicos.

Ordem	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°
Frequência (Hz)	60	120	180	240	300	360	420	480	540
Sequência	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Existem várias cargas não lineares geradoras de harmônicos. Com a invenção e o desenvolvimento do tiristor, equipamentos de baixo custo e grande eficiência se tornaram disponíveis para que os motores CC ou de indução em gaiola de esquilo atuassem no acionamento de bombas, ventiladores e máquinas, com habilidade de controlar a velocidade das mesmas. A tecnologia cresceu rapidamente e a aplicação destes acionamentos incorporou-se ao processo de acionamento em todas as indústrias. Estas cargas não lineares aumentaram significativamente a partir dos anos 70 [3].

Atualmente os conversores estáticos constituem uma das principais classes de cargas não lineares nos sistemas de potência. Englobando inversores, *soft-starters* e retificadores, podem ser divididos em três grupos com relação à geração de harmônicos: conversores de grande, média e baixa potência. Os de baixa potência estão relacionados com equipamentos de pequeno porte, tais como televisores, computadores e vários outros eletrodomésticos.

Os conversores eletrônicos de potência trifásicos diferem dos conversores monofásicos em particular porque não produzem correntes de 3ª ordem e seus múltiplos (a ordem h da harmônica pode ser obtida pela expressão $h=kq\pm 1$, no qual q é o número de pulsos do conversor e k é qualquer inteiro positivo). Isto representa uma vantagem, uma vez que as harmônicas triplas são aditivas no neutro de um sistema trifásico. No entanto, os conversores trifásicos constituem significantes fontes de harmônicos, como às presentes nos acionamentos de velocidade variável e fontes ininterruptas de energia.

É comum a presença de cargas monofásicas com fontes chaveadas monofásicas em edifícios comerciais. Uma característica distintiva das fontes chaveadas monofásicas é o alto conteúdo de 3ª harmônica presente na corrente. O crescente aumento dessas fontes causa preocupação com a sobrecarga no neutro, em especial em instalações mais antigas. Há ainda uma preocupação com o sobreaquecimento de transformadores devido à combinação de conteúdo harmônico da corrente, fluxo de dispersão, e elevada corrente no neutro.

Também apresenta características não lineares o grupo das lâmpadas fluorescentes, que incluem lâmpadas com processo de funcionamento de descargas elétricas a partir do

starter ou reator, e também decargas elétricas a partir de circuito eletrônico. De acordo com [10], são responsáveis por 40 a 60% da carga elétrica comercial, o que representa uma parcela importante na geração de harmônicos. Alguns fabricantes têm melhorado os seus projetos de reatores eletrônicos, obtendo uma forma de onda mais limpa.

Equipamentos com dispositivos saturáveis incluem transformadores, motores e outros dispositivos com núcleo de ferro. Os transformadores de potência são fontes de harmônicos uma vez que, por razões econômicas, os transformadores são construídos com dimensões tais que sempre ocorre saturação magnética do material ferromagnético que constitui o seu núcleo, quando este opera próximo das condições nominais. Isso resulta em correntes harmônicas, principalmente de 3º ordem. Quando operados em condição de carga leve, serão conduzidos para as regiões saturadas de seu núcleo ferromagnético resultando em uma corrente de excitação com amplitude maior que o normal e significativamente distorcida [2].

1.4 O Motor de Indução Trifásico

Segundo a ANEEL [06], o motor de indução trifásico corresponde a, aproximadamente, 25 % da carga elétrica do Brasil, ou seja, 50 % da carga industrial que, por sua vez, corresponde a 50 % da carga total. A grande vantagem do motor de indução trifásico é a sua capacidade de operar sem necessidade de contato com os enrolamentos do rotor. Isso reduz significativamente os custos e a manutenção. A alimentação do motor de indução trifásico (MIT) é em corrente alternada, sendo esta a alimentação feita pelo estator. Os enrolamentos do rotor podem ser de dois tipos: “bobinado” ou “gaiola de esquilo”. O rotor bobinado, menos usado, tem bobinas trifásicas no rotor e anéis coletores no eixo de forma a permitir o acesso às correntes induzidas nos enrolamentos do rotor.

O rotor tipo gaiola de esquilo é composto de barramentos condutores alojados em ranhuras do rotor e curto circuitados. Este tipo de enrolamento permite a construção de equipamentos bastante robustos. É a forma mais comum dos MIT. A velocidade de operação do MIT é aproximadamente constante e sempre menor que a velocidade síncrona, por esta razão este motor é também chamado motor assíncrono [4].

1.4.1 Análise Harmônica do MIT

O circuito equivalente, por fase, de um motor de indução trifásico é apresentado na Figura 1, e pode ser utilizado para análise de MI em regime permanente como sendo um circuito de seqüência positiva ou negativa.

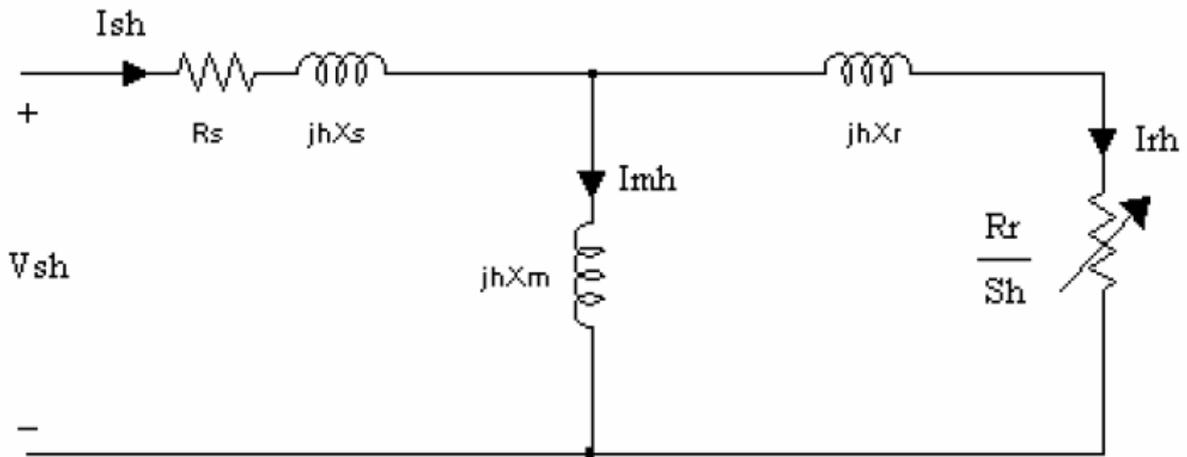


Figura 1: Circuito Equivalente do MIT.

Onde V_{sh} é a componente harmônica de ordem h da tensão de alimentação; R_s , hX_s e I_{sh} a resistência de enrolamento, reatância de dispersão e corrente do estator, respectivamente; R_r , hX_r e I_{rh} a resistência de enrolamento, reatância de dispersão e corrente do rotor, respectivamente; hX_m e I_{mh} a reatância e corrente de magnetização, respectivamente; e s_h o escorregamento do motor.

O índice h denota a ordem do harmônico sob consideração. Geralmente o MI é conectado em delta ou estrela não aterrada, portanto a representação do circuito de seqüência zero do MI não é incluída no modelo da máquina. Conseqüentemente serão consideradas somente as harmônicas de seqüência positiva e negativa ($h=2, 4, 5, 7, 8, 10, \dots$).

Para a utilização do circuito na frequência fundamental, tem-se que $h=1$.

Quando uma tensão não sinusoidal é aplicada à um motor trifásico de indução, o rotor do mesmo tem um escorregamento S correspondente ao fundamental e vários escorregamentos harmônicos S_h correspondentes aos h -ésimos harmônicos, e pode ser expresso por (Eq. 6):

$$S_k = \frac{k.Ns + (1-s_1).Ns}{k.Ns} = \frac{k + (1-s_1)}{k} \quad (\text{Eq. 6})$$

sendo s_1 , o escorregamento na frequência fundamental, definido como:

$$s_1 = \frac{n_{s1} - n}{n_{s1}} \quad (\text{Eq. 7})$$

n_{s1} é a velocidade síncrona na frequência fundamental; n é a velocidade do rotor.

De acordo com a direção da força magnetomotriz (FMM), os harmônicos de ordem 4, 7, 10, ... , de ordem positiva, (obedecendo $[3n+1]$, $n=1,2,\dots$) favorecem com o torque e FMM na direção positiva. Os harmônicos de ordem 2, 5, ... , $[3n+2]$, $n=0, 1, 2, \dots$, de ordem negativa fornecem torque e FMM contrários. Já os harmônicos de sequência zero tais como os de ordem 3, 6, 9, ..., $[3n+3]$, $n=0, 1, 2,\dots$, não contribuem com nenhum torque nem força magnetomotriz girante (FMM). Embora as harmônicas de sequência positiva adicionem um impulso positivo para a sequência do torque e assim se mostrarem benéficos e favoráveis ao motor, os efeitos de aquecimento das harmônicas neutralizam a vantagem do torque de sequência positiva [4].

Em regime permanente, s_1 é baixo (em torno de 5%). Segundo [1], conforme a ordem das harmônicas aumenta, pode ser observado que s_k tende a 1. Portanto, para harmônicas de altas ordens, existe pouca influência no escorregamento s_h do MI. A impedância equivalente de sequência Z_{Mh} do circuito é dada por:

$$Z_{Mh} = R_s + jhX_s + \frac{(jhX_m)\left(\frac{R_r}{s_h} + jhX_r\right)}{\left(\frac{R_r}{s_h}\right) + jh(X_m + X_r)} \quad (\text{Eq. 8})$$

Segundo [1], o torque e o fator de potência também são afetados pelas distorções de tensão. O primeiro é afetado de forma quase imperceptível se for olhado apenas pelo lado de seu valor médio de conjugado, entretanto seu aspecto pulsante em função do tempo geram as oscilações mecânicas extremamente prejudicial à máquina. Já a segunda variável, o fator de potência, deve ser interpretado de forma mais intrínseca. Sobretudo, pelo fato das medições do fator de potência, quando realizadas, muitas vezes são feitas de forma errônea já que não levam em conta o fato que as Potências Aparente e Ativa irão se alterar quando houverem distorções e por isso devem ser calculadas de outra forma.

O fator de potência de deslocamento, usualmente denota a relação entre a potência ativa e aparente da carga ou ao cosseno ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente (fundamentais).

$$FPD = \frac{P_1}{|S_1|} = \cos(\theta) \quad (\text{Eq. 9})$$

Sendo FDP a sigla de fator de potência de deslocamento, pois está associado apenas às componentes fundamentais de tensão e corrente. Para o caso de distorção deve-se levar em consideração o fator de potência total ou verdadeiro:

$$FP = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} V_{efh} \cdot I_{efh} \cdot \cos(\theta_h)}{\sum_{h=1}^{\infty} (V_{efh})^2 \cdot \sum_{h=1}^{\infty} (I_{efh})^2} \quad (\text{Eq. 10})$$

Este fator de potência retrata a real influência das formas de ondas harmônicas de tensão e corrente na carga.

O fluxo do entreferro do MI, produzido pelo estator, ao interagir com as outras formas de onda, além da fundamental, gera torque pulsantes no eixo. Como um dos efeitos das distorções no MI são justamente essas vibrações e torques pulsantes, a expressão que representa tal efeito é mostrada na (Eq.11).

$$Th = \frac{3 \cdot (I_{rh})^2 \cdot Rr}{\pm h s_h \cdot \omega_1} \quad (\text{Eq. 11})$$

É possível notar que, quanto maior a ordem da harmônica, menor o torque gerado, ou T_h cresce de forma inversamente proporcional a h . Além disso, para harmônicas de sequência positiva, será considerado o sinal “+” e para ordens negativas, “-”.

1.4.2 Efeito sobre os Motores de Indução

As máquinas elétricas, de uma maneira geral, apresentam uma baixa impedância para as componentes harmônicas. Por exemplo, enquanto o escorregamento para a frequência fundamental é da ordem de dois por cento, para as frequências harmônicas os correspondentes escorregamentos serão praticamente unitários. As componentes de sequência zero, que não produzem efeito de campo girante, não foram consideradas. A influência dos harmônicos nos motores de indução manifesta-se de duas formas:

Influência dos Harmônicos sobre o Conjugado do Motor. Estudos teóricos e medições práticas mostram que o efeito de uma distorção harmônica total de 1 a 20% tem efeito desprezível sobre os torques de regime e de partida de um motor assíncrono (de indução). Porém observa-se o aparecimento de torques oscilatórios devido à interação de correntes harmônicas e campo magnético com a componente fundamental.

Essa interação gera um torque oscilatório e, sua magnitude é proporcional às magnitudes das correntes harmônicas. Como exemplo, se a corrente harmônica é da ordem de dez por cento da nominal, a magnitude do torque oscilatório tem aproximadamente o mesmo valor. Cabe observar que o torque médio, responsável pela realização de trabalho mecânico, não é afetado por tais harmônicos, porém os torques oscilatórios podem provocar vibrações mecânicas no motor e em cargas acopladas.

Influência dos harmônicos sobre as perdas suplementares no ferro e no cobre. Estudos mostram que as perdas suplementares no ferro são praticamente desprezíveis com a presença de componentes harmônicos. Porém as perdas no cobre são significativas [1].

Na prática, máquinas de indução enfrentam sobretensões e subtensões, dependendo da localização do motor e o comprimento do alimentador usado. Durante horário de pico, alguns consumidores com motores trifásicos poderiam experimentar tensão mínima garantida pela utilização da fonte. Além disso, a tensão da fonte nem sempre é balanceada. Portanto, o motor irá experimentar uma combinação de sobre e subtensões com desequilíbrio de tensão.

Segundo [4], motores de indução, mesmo operando sobre condições normais, o que implica numa tensão da fonte perfeitamente sinusoidal, produzem uma quantidade relativamente limitada de correntes harmônicas devido à disposição do enrolamento e ao comportamento não linear do núcleo de ferro. No caso da tensão da fonte estar consideravelmente distorcida, em certas partes, o desempenho do motor de indução é excessivamente afetado e uma avaliação deve ser realizada. A avaliação mencionada é baseada nas características do motor e é fortemente dependente do conteúdo harmônico e da forma de onda de tensão, ambos em magnitude e, além disso, a análise dele está principalmente associada com as perdas no núcleo envolvidas.

Tensões não sinusoidais aplicadas em máquinas elétricas podem causar sobreaquecimento, torques pulsantes (vibrações) ou ruídos. Além disso, para melhorar as linhas de aplicações, motores com ajuste de controle de velocidade são alimentados por inversores que podem produzir significantes distorções na tensão.

Devido ao desequilíbrio de tensão, motores de indução enfrentam quatro tipos de problemas. Primeiro, a máquina não pode produzir o torque máximo dela, pois como o sistema do campo magnético inversamente girante na sequência negativa provoca um torque negativo de frenagem, este deve ser subtraído do torque base conectado ao campo magnético girante de forma normal. Segundo, o eixo pode sofrer dano mecânico devido a componente de

torque induzido no sistema de frequência dupla. Terceiro, a redução na eficiência e finalmente, o quarto motivo deve-se ao estator, e, especialmente o rotor, que são excessivamente aquecidos, possivelmente acelerando a ação térmica de forma mais rápida que o normal [4].

1.5 Qualidade de Energia

O conceito desde termo está relacionado com um conjunto de alterações que venham a ocorrer em um sistema elétrico e venha trazer algum prejuízo ou dano aos componentes. Uma boa definição para o problema de qualidade de energia seria a de que 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, como:

- i. 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.
- ii. Maior sensibilidade dos equipamentos instalados aos efeitos dos fenômenos (distúrbios) de qualidade de energia.

Em alguns ramos de atividade, como as indústrias têxtil, siderúrgica e petroquímica, os impactos econômicos da qualidade da energia são enormes. Nestes setores, uma interrupção elétrica de até 1 minuto pode ocasionar prejuízos de até US\$ 500 mil. E diante deste potencial de prejuízos possíveis, fica evidente a importância de uma análise e diagnóstico da qualidade da energia elétrica, no intuito de determinar as causas e as conseqüências dos distúrbios no sistema, além de apresentar medidas técnicas e economicamente viáveis para solucionar o problema [3].

Portanto, é importante salientar, que para monitorar a rede elétrica com possíveis distorções, devem-se utilizar sistemas de medição cujas informações coletadas possam ser processadas por meio de recurso computacional e atendendo os requisitos quanto aos

protocolos de medição definidos pela ANEEL [6]. Para os de sistemas elétricos trifásicos, as medições de distorção harmônica devem ser feitas através das tensões fase-neutro para sistemas estrela aterrado, e fase-fase para as demais configurações. O espectro harmônico a ser considerado para fins de cálculo da distorção total deve compreender uma faixa de frequências que considere a frequência fundamental e até no mínimo, a 25ª ordem harmônica ($h_{\min}=25$).

1.5.1 O impacto das Distorções Harmônicas na Qualidade de Energia

As distorções harmônicas vão contra os objetivos da qualidade do suprimento promovido por uma concessionária de energia elétrica, a qual deve fornecer aos seus consumidores uma tensão puramente senoidal, com amplitude e frequência constantes. Entretanto, o fornecimento de energia a determinados consumidores que causam deformações no sistema supridor prejudica não apenas o consumidor responsável pelo distúrbio, mas também outros conectados à mesma rede elétrica.

No passado não havia maiores preocupações com harmônicos. Cargas com características não lineares eram pouco utilizadas e os equipamentos eram mais resistentes aos efeitos provocados por harmônicas. Entretanto, nos últimos anos, com o rápido desenvolvimento da eletrônica de potência, e a utilização de métodos que buscam o uso mais racional da energia elétrica, o conteúdo harmônico presente nos sistemas tem-se elevado, causando uma série de efeitos indesejáveis em diversos equipamentos, comprometendo a qualidade e o próprio uso racional da energia elétrica [3].

Assim, é de grande importância deixar evidentes os vários tipos de cargas elétricas com características não lineares, que têm sido implantadas em grande quantidade no sistema elétrico brasileiro:

- Circuitos de iluminação com lâmpadas de descarga;
- Fornos a arco;
- Compensadores estáticos tipo reator saturado, etc.
- Motores de corrente contínua controlados por retificadores;
- Motores de indução controlados por inversores com comutação forçada;

- Processos de eletrólise através de retificadores não-controlados;
- Motores síncronos controlados por cicloconversores;
- Fornos de indução de alta frequência, etc.
- Fornos de indução controlados por reatores saturados;
- Cargas de aquecimento controladas por tiristores;
- Velocidade dos motores CA controlados por tensão de estator;
- Reguladores de tensão a núcleo saturado;
- Computadores;
- Eletrodomésticos com fontes chaveadas, etc.

É sabido que as distorções harmônicas causam muitos prejuízos às plantas industriais. O de maior importância é a perda de produtividade e de vendas devido a paradas de produção causadas por inesperadas falhas em motores, acionamentos, fontes ou simplesmente desmarmes inesperados de disjuntores. Os maiores prejuízos podem ser sentidos com relação aos seguintes componentes:

- Capacitores: queima de fusíveis, e redução da vida útil.
- Motores: redução da vida útil, e impossibilidade de atingir potência máxima.
- Fusíveis/Disjuntores: operação falsa/errônea, e componentes danificados.
- Transformadores: aumento de perdas, causando redução de capacidade e diminuição da vida útil.
- Medidores: possibilidade de medições errôneas e de maiores contas.
- Telefones: interferências.
- Máquinas Síncronas: sobreaquecimento das sapatas polares, causado pela circulação de correntes harmônicas nos enrolamentos amortecedores.
- Acionamentos/Fontes: operações errôneas devido a múltiplas passagens por zero, e falha na comutação de circuitos.
- Carregamento exagerado do circuito de neutro, principalmente em instalações que agregam muitos aparelhos eletrônicos e possuem malhas de terra mal projetadas.

Os principais problemas causados por harmônicos, no entanto, se dão junto a bancos de capacitores, que podem originar condições de ressonância, caracterizando uma sobretensão nos terminais das unidades capacitivas.

Em decorrência desta sobretensão, tem-se uma degradação do isolamento das unidades capacitivas, e em casos extremos, uma completa danificação dos capacitores. Além disso, consumidores conectados no mesmo ponto ficam submetidos a tensões perigosas, mesmo não sendo portadores de cargas poluidoras em sua instalação. Mesmo sem uma condição de ressonância, um capacitor é sempre um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas, e sempre estará sujeito a sobrecarga e sobreaquecimento excessivo [3].

2 *Materiais e Métodos*

Visando uma implementação de rapidez e que ao mesmo tempo fornecesse precisão considerável, utilizou-se do ambiente Simulink do software MATLAB, como ferramenta de simulação, para estudar o comportamento do motor de indução trifásico quando submetido às distorções harmônicas na sua tensão de alimentação do estator. Além disso, foi utilizada também a interface de programação do MATLAB para automatizar o modelo Simulink tornando o programa de forma mais iterativa.

2.1 *Simulink*

No âmbito de metodologia, foi construído um modelo detalhado de uma rede elétrica contendo uma fonte trifásica programável e um motor de indução trifásico, recorrendo ao Power Systems Toolbox (Matlab/Simulink). A obtenção desse modelo de simulação necessitou incluir blocos de armazenamentos das principais variáveis como tensão, corrente, torque e velocidade para efetuar o processamento e aquisição dos resultados, que depois de obtidos através da simulação serão apresentados e discutidos.

O software usado permite a modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos lineares e não lineares. Os modelos propostos, que recorrem a motores trifásicos de indução e fontes trifásicas programáveis, foram construídos utilizando a toolbox POWERSYS do Matlab/Simulink. Tanto ao motor de indução quanto à fonte de alimentação foram atribuídos blocos representativos, fornecidos pela própria ferramenta de simulação, que traduzem com precisão as características desses equipamentos juntamente com a modelagem matemática que lhes são atribuídas.

Na figura A.1 do apêndice A é ilustrada a ferramenta de simulação com seus blocos e funções representativas.

2.2 O Motor de Indução escolhido

Todas as análises feitas neste trabalho são baseadas em um único modelo de Motor de Indução Trifásico com características elétricas e mecânicas como mostradas na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros Elétricos do MIT ensaiado.

PARÂMETROS DO MIT ENSAIADO	
Potência	3 HP
Pólos	4
Tensão (fase-fase)	220 V
Frequência Fundamental	60 hz
Torque Nominal	11.9 N.m
Corrente Nominal	8,483 A
Escorregamento Nominal	0,0404
Velocidade Nominal	1725 RPM

Os parâmetros do circuito equivalente do MI são mostrados na tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros do circuito Equivalente do MI.

PARÂMETRO	VALOR
R_s	0.435 Ω
X_s	2*2e-3 H
X_m	69.31e-3 H
X_r	2e-3 H
R_r	0.816 Ω

É importante ressaltar que tais dados foram obtidos da própria *toolbox* do motor de indução do Simulink, através de um exemplo obtido nas descrições do mesmo.

2.3 Metodologia de Ensaio

Todas as implementações e programas de ensaio utilizados são mostradas nos APÊNDICES A.1 e A.2 e tiveram como objetivo estudar o comportamento eletromecânico da máquina de indução em regime permanente, com carga nominal e submetido a tensões distorcidas de 0 até 20% de THD, com apenas harmônicas individuais de sequência positiva e negativa. O critério da exclusão da coleta dos dados de harmônicas de sequência zero deve-se ao motivo de que como o motor de indução é, em geral, conectado em delta ou estrela não aterrada, as harmônicas de sequência zero não circulam nas linhas de alimentação. Além disso, de qualquer forma, é fato que harmônicas de tensão de sequência negativa nunca estarão presentes nas tensões de linha de alimentação do motor devido à simetria do mesmo. Devido a isto, este trabalho seguiu a mesma linha de metodologia utilizada por [1] e realizou os ensaios considerando apenas distorções harmônicas de sequência positiva e negativa.

Basicamente, toda a análise feita nas implementações foi, escolher a ordem da harmônica a ser estudada (até a 13^a), variar a taxa da distorção através do THD (distorção harmônica total) de zero à vinte por cento e por fim coletar e plotar os resultados. Dessa forma, seria possível visualizar todas as harmônicas juntas e verificar quais as mais prejudiciais e até quanto os efeitos das distorções podem ser desprezados.

3 Resultados e Discussões

Ao iniciar o software do programa através do arquivo *‘.m’*, (disponível em APÊNDICE A.2), o matlab irá solicitar à ferramenta Simulink a abertura das *toolboxes* do modelo de simulação com a inicialização do arquivo *‘.mdl’* (conforme está ilustrado em APÊNDICE A.1).

A partir daí, o programa irá inicializar as variáveis e rodar uma sequência de dois comandos *‘for’* para variar os parâmetros da simulação referentes ao THD e à ordem harmônica na qual será plotada a curva, para cada variável a ser coletada. Em todos os resultados o nível de THD foi incrementado para variar de 0 à 20% com taxa de incremento

de 1% a cada ciclo do *for* relativo a ele. Já a variável que revela a ordem do harmônico foi implementada do 2º ao 13º harmônicos passando apenas por harmônicos de sequências positivas e negativas conforme $h=[2,4,5,7,8,10,11,13]$. O tempo de simulação completa até serem extraídos os gráficos é cerca de oito minutos.

O primeiro resultado é referente ao torque médio conforme é mostrado na figura 2, referente ao valor médio das oscilações do torque eletromagnético, em pu, do MI submetido a tensões distorcidas. É importante salientar que a potência nominal, a velocidade síncrona e a tensão de linha são adotadas para determinação dos valores de base e assim obter um valor de 11,9 N.m para o torque do MIT em condições nominais. A máxima variação do torque ocorre para $TDH = 20\%$ e $h=2$, e seu valor é insignificante. Devido ao fato de que os valores de máximo e mínimo do torque médio praticamente não variam, e por isso tem uma diferença de ordem de grandeza muito pequena, é mostrado apenas o valor arredondado no resultado plotado no gráfico, que é o mesmo para qualquer ponto (1 pu).

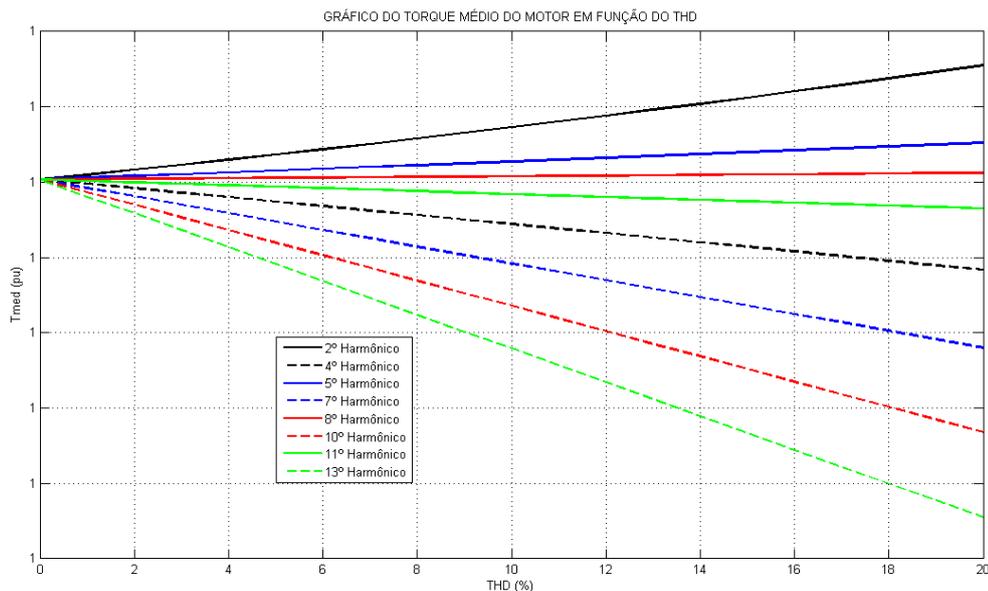


Figura 2: Gráfico do Torque Médio do MI em função do THD.

Logo, o valor médio das oscilações do torque eletromagnético pode ser desconsiderado para quaisquer taxas de distorção harmônica aplicada ao MI. No entanto, a figura 3 mostra que, ao contrário do torque médio, as oscilações do torque eletromagnético assumem grandes proporções em regime permanente para uma taxa de distorção de 20% e uma harmônica de 2ª ordem.

Como o resultado ilustra e comprova um dos principais efeitos das harmônicas em motores de indução é a vibração no eixo de rotação da máquina, o que pode, a longo prazo

danificar fisicamente a estrutura da máquina. Além disso, quanto maior o THD associado, maiores as oscilações.

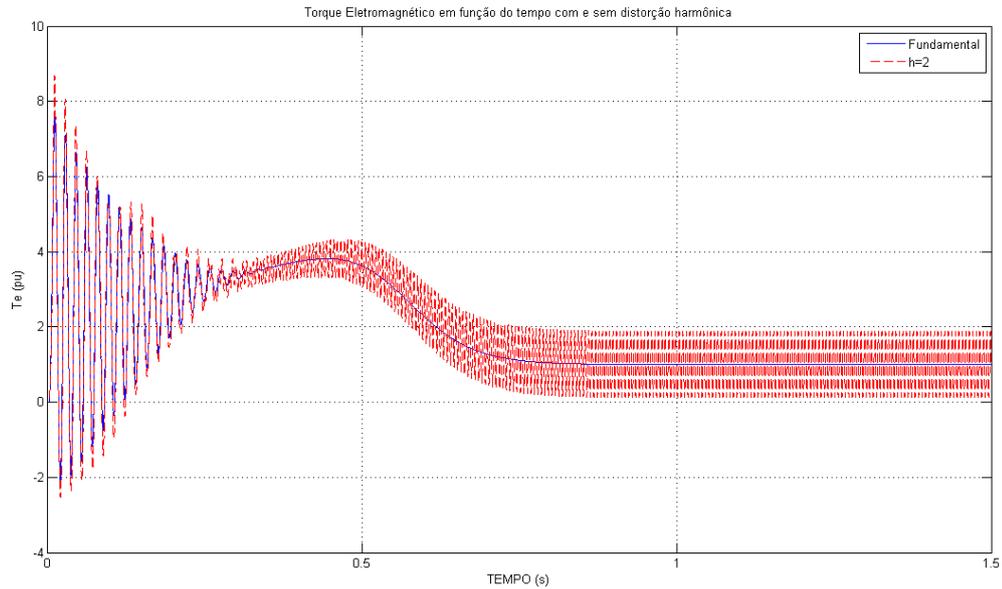


Figura 3: Gráfico do Torque Eletromagnético em função do tempo para alimentação com e sem distorção.

A Figura 4 mostra o escorregamento do MI em função da TDH, para harmônicas de 2^a à 13^a ordem. O escorregamento sofre uma maior variação apenas para as harmônicas de ordem 2 e 4, com evidenciando a influência sobre o torque como mostrado na Figura 4. No entanto, as harmônicas de ordem 5, 7, 8, 10, 11 e 13 praticamente não afetam o torque médio resultante, sendo, portanto a variação do escorregamento quase desprezível.

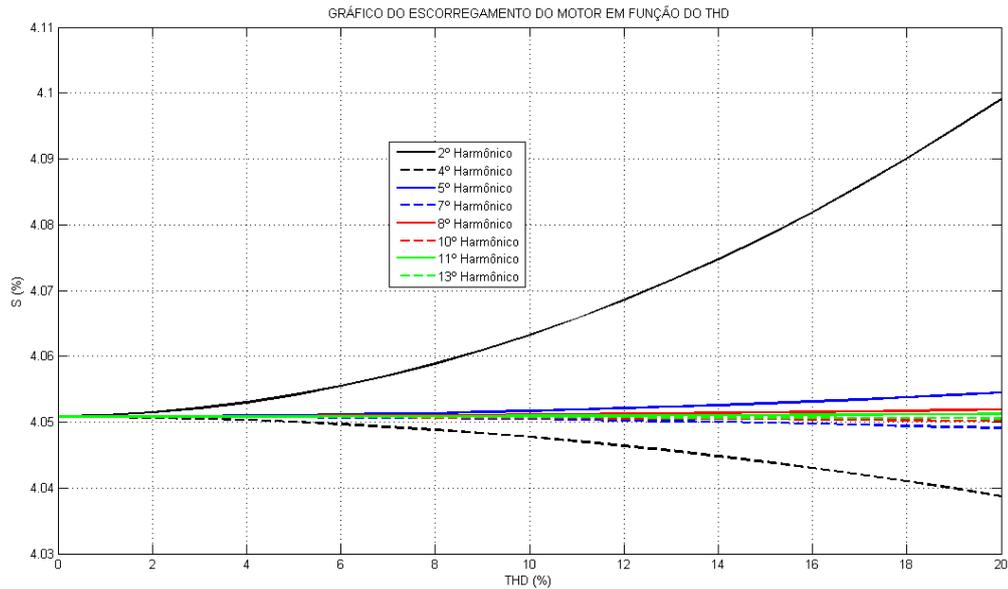


Figura 4: Gráfico do Escorregamento do MI em função do THD.

É interessante notar ainda que, harmônicas de sequência positiva são curvas decrescentes, enquanto as de sequência negativa são crescentes. Ou seja, harmônicas de sequência positiva aceleram suavemente o motor, enquanto as de sequência negativa o freiam da mesma maneira. Embora o escorregamento sofra influência de h e TDH, a máxima variação é de 1,23%, para $h=2$ e TDH=20%.

Na Figura 5 é mostrada a influência das harmônicas e da distorção da tensão sobre a corrente de alimentação do MI. Nesta figura é mostrada a corrente total que passa em cada linha do estator (em pu) ao ser incrementado o nível de THD. Nota-se que, novamente, o valor máximo é atingido pela 2ª harmônica, com 1,33 pu. Além disso, quanto maior a ordem da harmônica, menor a variação na corrente, considerando o THD máximo.

Na figura 6, as correntes são mostradas de forma diferente, considerando apenas a parte da corrente que passa no estator e que está associada a componente harmônica da tensão. Percebe-se que harmônicas de tensão de baixa ordem e altas TDH não contribuem de forma significativa para alterar a componente de corrente fundamental do MI. A corrente rms de alimentação do MI aumenta devido unicamente à elevação que ocorre nas componentes harmônicas de corrente. Pode ser verificado que praticamente a corrente fundamental permanece inalterada, enquanto as componentes harmônicas de corrente sofrem um aumento linear, de acordo com a relação obtida entre as componentes harmônicas de tensão e as impedâncias de sequência do MI para cada harmônica especificada.

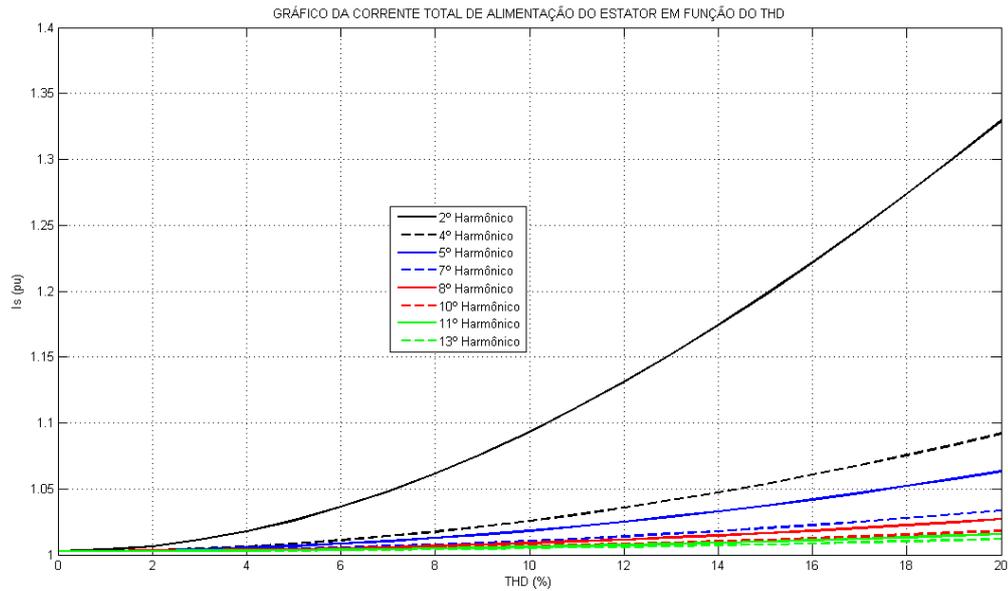


Figura 5: Gráfico da Corrente Total de Alimentação do Estator em função do THD.

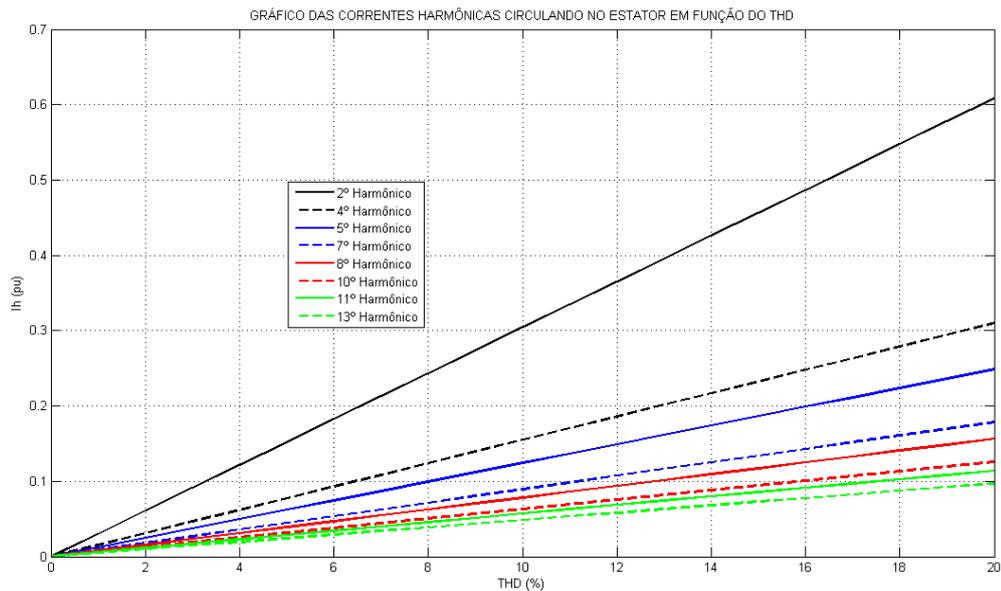


Figura 6: Gráfico das Correntes Harmônicas do Estator em função do THD.

A Figura 7 apresenta o fator de potência de deslocamento (FPD) do MI submetido a taxas de distorção de até 20%. É possível perceber que o fator de potência do motor de indução simulado, em situação nominal, possui um fator de potência bastante alto. FPD é o cosseno do ângulo de defasamento da tensão e corrente na frequência fundamental, ou seja, é o cosseno do ângulo da impedância do MI na frequência fundamental.

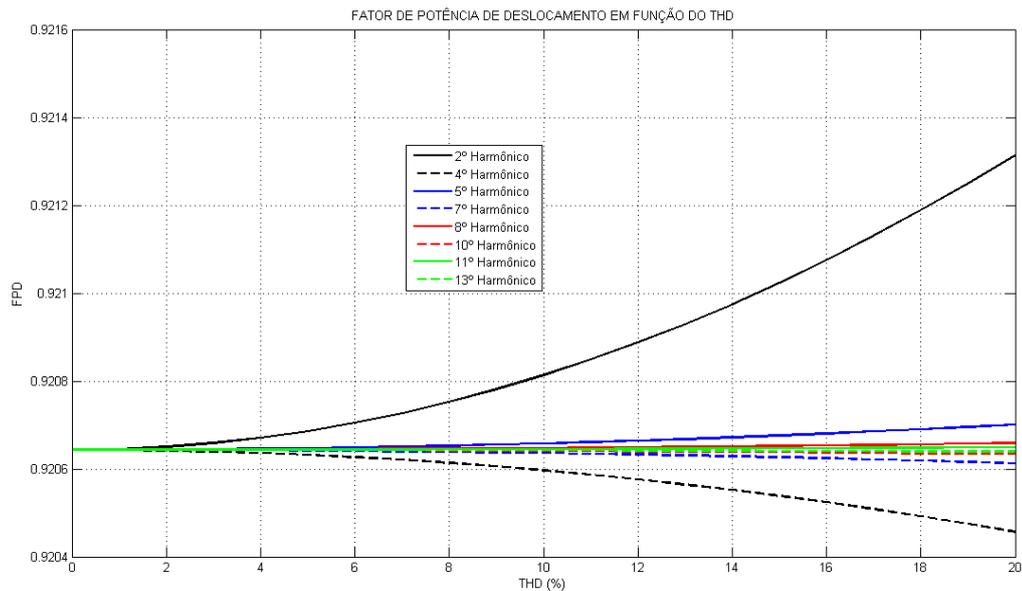


Figura 7: Gráfico do Fator de Potência de Deslocamento em função do THD.

Novamente as curvas do fator de potência de deslocamento se apresentam com comportamento análogo as curvas de escorregamento. Entretanto, segundo [2], ao se trabalhar com distorções deste tipo não se deve confiar nesta medição, já que matematicamente ela é falha.

A Figura 8 apresenta o fator de potência de deslocamento do motor de indução em função de seu escorregamento. Para esta implementação, foi utilizado um script diferente, como é mostrado no APÊNDICE 2.2. Para este caso, foram usados apenas os parâmetros do MIT para extrair a curva do fator de potência em função do escorregamento. Percebe-se que a variação do FPD é quase insignificante, apenas na terceira casa decimal.

Além disso, na região próxima ao escorregamento nominal (4,04%), ao ser considerada uma pequena variação positiva no escorregamento, o FPD também aumenta; e de forma análoga, para uma pequena redução do escorregamento (variação negativa), FPD diminui. Esse fato explica a razão na qual, para harmônicas de sequência positiva, a velocidade do MI tende a aumentar levemente pois ocorre um pequeno aumento do FPD, e para harmônicas de sequência negativa, que tendem a diminuir a velocidade do MI, ocorre uma redução do FPD.

Ainda pelos resultados da figura 7, como as variações do FPD são mínimas, praticamente desprezíveis (o valor máximo encontrado foi 0,085% maior, para $h=2$ e

TDH=20%), a simples leitura do FPD na presença de harmônicas não é capaz de indicar o grau de distorção presente na alimentação do MI assim como mostrado em [1]. O que confirma o fato de que o FPD é falho para avaliar a real relação que existe entre as potências do motor.

Portanto, este tipo de medição do fator de potência de deslocamento é ineficaz e inconclusiva, pois pode criar uma “ilusão” em relação à verdadeira relação existente entre as potências aparente, ativa e reativa absorvidas pelo MI.

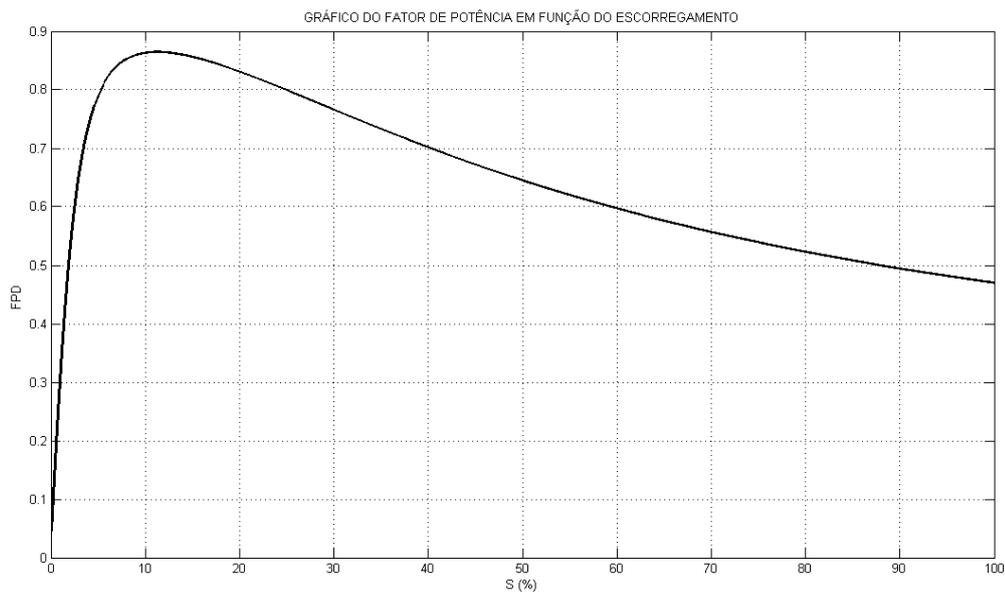


Figura 8: do Fator de Potência do MI em função do Escorregamento.

Porém, na figura 9 é mostrado o fator de potência total (FPT) em função da taxa de distorção e das várias ordens de harmônicos presentes. Agora está mais evidente que o aumento THD implica na redução do fator de potência real, fato que não ocorre no fator de potência de deslocamento. É fácil notar também que apenas o 2º harmônico afeta de forma considerável o fator de potência total para uma taxa de distorção menor que 10%.

Considerando o THD de 10% e $h=2$ a variação do FP é de 8,7%. Portanto, as harmônicas de ordem maior ou igual a 4 pouco influenciaram no fator de potência verdadeiro do MI para uma taxa de distorção de até 10%. Desta forma, é ficou provado que a utilização do fator de potência total pode indicar com maior precisão a quantidade de energia real estará sendo entregue a entrada da máquina.

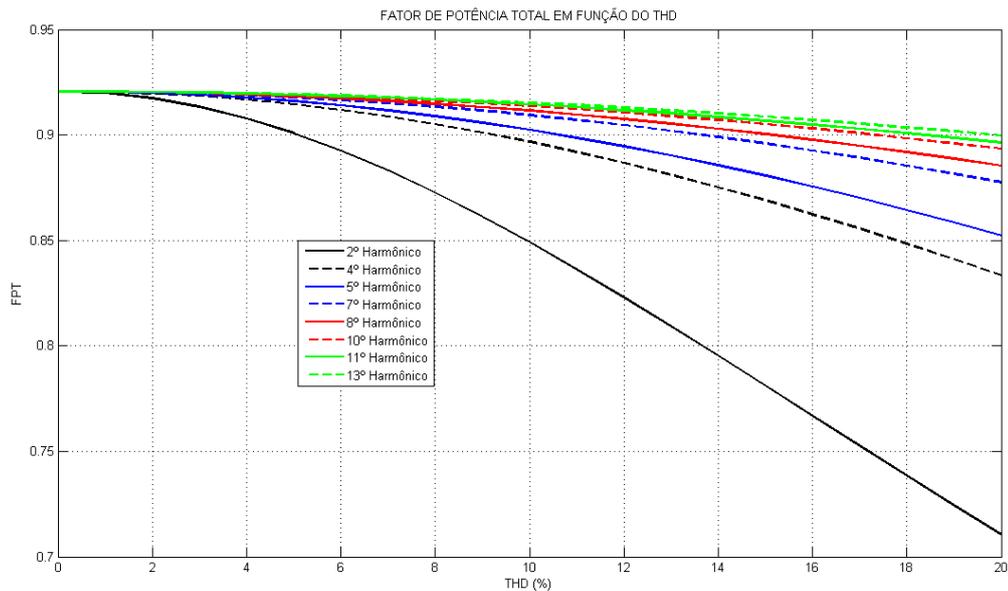


Figura 9: Gráfico do Fator de Potência Total (ou Verdadeiro) em função do THD.

Finalmente, na figura 10 é mostrado o rendimento do MI em função da taxa de distorção harmônica. Novamente, a harmônica de 2ª ordem mostra-se a mais influente e prejudicial ao desempenho do motor. Além disso, até $TDH=10\%$ não há uma queda considerável no rendimento do MI. Todavia, uma avaliação do rendimento feita no MI deve considerar também o aspecto de funcionamento do MI. Segundo [1], Embora a variação de perdas no estator e no rotor para harmônicas superiores à 2ª ordem com até 10% de THD não ultrapassem 1% de queda, o real dimensionamento das perdas em um MI está intimamente relacionado à capacidade da máquina de dissipação de calor, ou seja, aos aspectos construtivos e estruturais da carcaça, núcleo das chapas de aço ferromagnético que compõem o estator e o rotor, tampas e ventilação. Para [1], motores fabricados para operar em áreas de risco, em ambientes considerados explosivos, tais como indústrias petroquímicas, têm um tipo de proteção à prova de explosão que impede uma boa dissipação de calor, logo a variação de perdas para esses motores provoca uma elevação de temperatura maior que um motor fabricado para operar em ambientes de menor probabilidade de ocorrência de explosões

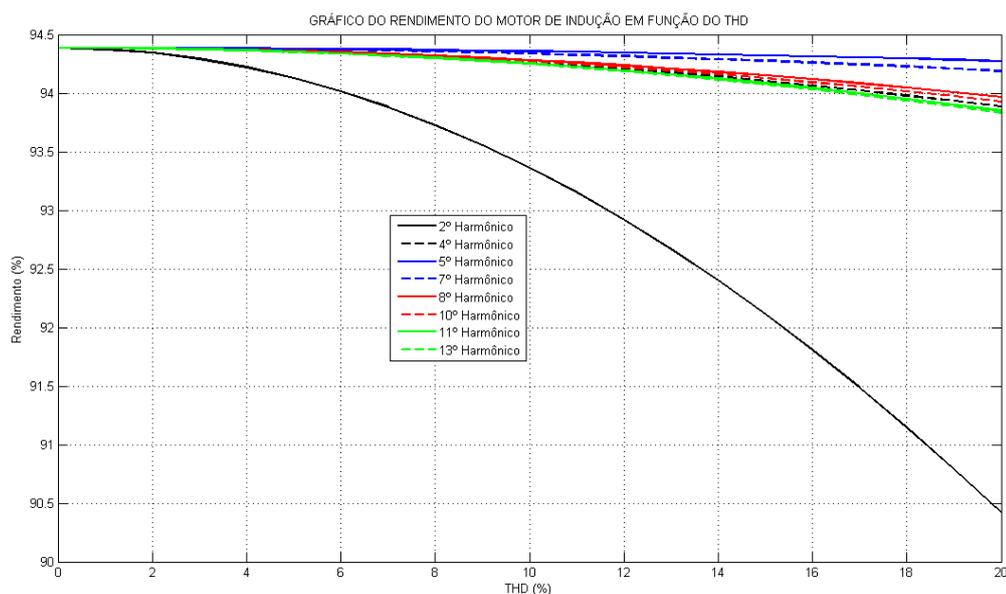


Figura 10: Gráfico do Rendimento do MI em função do THD.

No entanto, estudos demonstram que, independentemente da ordem da harmônica nas correntes do estator e do rotor do MI, o sobreaquecimento estará presente, provocando uma elevação de temperatura que pode danificar a isolação e o enrolamento do motor. Por isso, o sobreaquecimento, a elevação de temperatura e a vibração do rotor constituem o principal problema relacionado às harmônicas em motores de indução.

4 Conclusões

Foi possível verificar que para uma taxa de distorção THD maior que 10% o motor de indução começa a perder muito da sua eficiência, que se dá principalmente por sobreaquecimento gerado nas correntes de Foucault induzidas pelas tensões harmônicas na carcaça do rotor. Além disso, os níveis de vibração na máquina começam a crescer. Como foi mostrada na figura 3.2, as oscilações de torque para um THD de 20% podem, em longo prazo, danificar a estrutura física do motor.

Além disso, pequenas variações no escorregamento são verificadas devido às alterações no torque médio eletromagnético do motor. Harmônicas de sequência positiva tendem a aumentar levemente o torque médio e as de sequência negativa a reduzi-lo, afetando assim a velocidade e, conseqüentemente, o escorregamento do motor. No entanto, a variação do torque médio e do escorregamento não interfere de forma significativa, até uma taxa de

distorção harmônica de 20%, na componente fundamental da corrente de alimentação do motor, não chegando a atingir 1,23 % de seus valores originais. Portanto, a variação do torque médio pode ser considerada desprezível. No entanto, a corrente de alimentação do motor sofre uma elevação considerável devido unicamente às altas correntes de seqüência positiva ou negativa que surgem nos terminais do motor em função da sua tensão de alimentação.

É possível notar que a medição do fator de potência de deslocamento é falha para motores de indução com distorções de tensão. Medidores muito precisos poderiam indicar uma pequena elevação no fator de potência de deslocamento do motor de indução submetido a harmônicas de seqüência negativa, e uma redução para harmônicas de seqüência positiva, criando, assim, uma falsa avaliação do que realmente poderia representar as relações existentes entre as potências aparente, ativa e reativa absorvidas pelo motor. Por isso, a medição do fator de potência total é imprescindível para avaliar as condições de funcionamento do motor. Foi verificado que, para harmônicas de ordem igual ou superior a 4, com taxas de distorções menores que 10%, a variação no fator de potência total é praticamente desprezível. Comportamento similar foi observado com relação às taxas de variação de perdas no estator e no rotor, sendo, portanto, que somente o rendimento de 2ª ordem foi consideravelmente comprometido para uma distorção de até 10%.

Dessa forma, concluí-se que o motor de indução somente tem seu comportamento afetado para distorções harmônicas na tensão de alimentação acima de 10%, para harmônicas de ordens pequenas, principalmente a de 2ª ordem. É preciso levar em conta que, como foram consideradas somente as perdas nas resistências do estator e do rotor, sem influência da frequência das harmônicas, uma modificação no circuito de simulação do motor de indução no ambiente Simulink deve ser considerada, a fim de obter as perdas devido ao efeito pelicular e às perdas magnéticas por histerese e correntes parasitas, que sofrem influência da variação das frequências das componentes harmônicas na tensão de alimentação do motor.

Para a continuidade do trabalho, pode-se tentar buscar parâmetros mais reais da máquina e até mesmo validar esses resultados com motores de potências e características diferentes do usado como base de análise do trabalho. Além disso, pode-se analisar futuramente o comportamento de motores acionados por conversores eletrônicos frente a diversos distúrbios, como harmônicos, desequilíbrios, afundamentos e elevações de tensão.

Referências Bibliográficas

[01] Cavalcanti de Brito, Claudio Marzo (CEFET-PI) e Saraiva Leão, Ruth Pastôra (UFC). “Desempenho de um Motor de Indução Trifásico Submetido a Distorções Harmônicas na Tensão de Alimentação”.

[02] DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W. *Electrical Power Systems Quality - McGraw-Hill, Second Edition, New York, 2002, page 1.*

[03] IEEE STD 519-1992. *IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems (ANSI) of IEEE Standards Board. New York, USA, 1992.*

[04] C. Thanga Raj, Student Member, IEEE, Pramod Agarwal, Member, IEEE, and S. P. Srivastava. *Performance Analysis of a Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor under Unbalanced Sinusoidal and Balanced Non-Sinusoidal Supply Voltages.*

[05] ALVES, ANTÔNIO CÉSAR BALEEIRO. DOS SANTOS, EULER BUENO. UFG. ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO. CURSO DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA. *Harmônicos no Sistema de Distribuição: Uma Abordagem Conceitual com Estudo de Caso.*

[06] Resolução 345/2008 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

[07] A. Vamvakari, A. Kandianis, A. Kladas, S. Manias, and J. Tegopoulos. *Analysis of Supply Voltage Distortion Effects on Induction Motor Operation.*

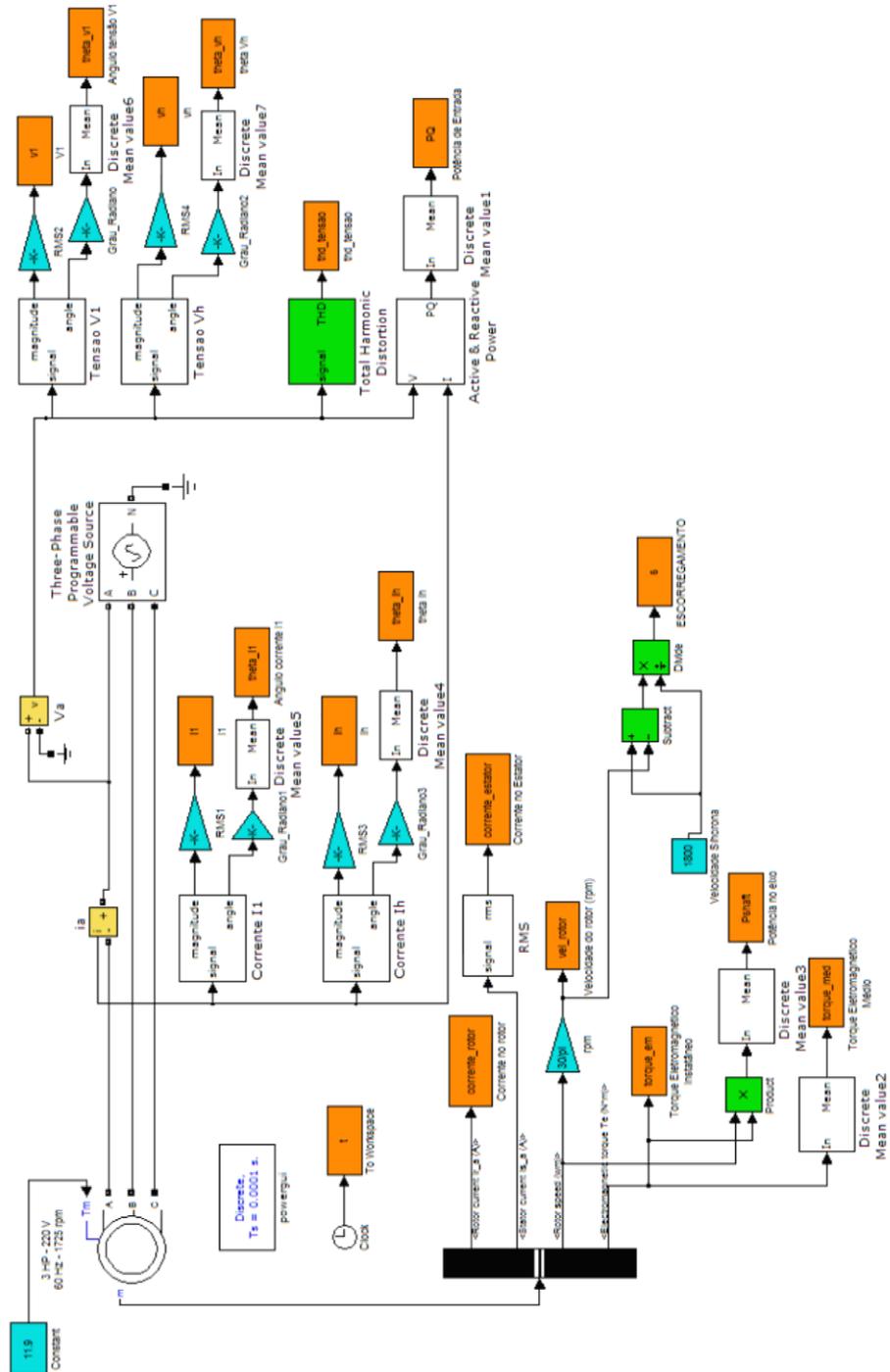
[08] CORREIA, P. F. *O impacto dos problemas de qualidade de energia nas instalações elétricas- O caso particular das perturbações harmônicas.* FCTUC, Coimbra, 2007.

[09] RIBEIRO, C. *Influência dos harmônicos na qualidade da energia elétrica.* UFOP, 2007

[10] DIAS, G. A. D. *Harmônicas em Sistemas Industriais.* 2ª edição, Porto Alegre, editora Edipucrs, 2002.

Apêndice A – Exemplo de Aplicação

A.1 Desenvolvimento do Modelo de Simulação



A.2 Desenvolvimento do script de Simulação de interface com Simulink

```

% MONOGRAFIA
% PROGRAMA DE INCREMENTAÇÃO DE HARMÔNICOS NA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO
% DE UM MOTOR TRIFÁSICO DE INDUÇÃO

% TESTE 1 DA SIMULAÇÃO COMPLETA

clear all
close all
clc

tic;

% INICIALIZAÇÃO DE PARÂMETROS
tempo=1.5;

amp=0:.01:.20;
ordem=[2 4 5 7 8 10 11 13];
seq=[2 1 2 1 2 1 2 1];
cor={'-k'; '--k'; '-b'; '--b'; '-r'; '--r'; '-g'; '--g'};
legenda=['2° Harmônico', '4° Harmônico', '5° Harmônico', '7° Harmônico',
...
        '8° Harmônico', '10° Harmônico', '11° Harmônico', '13°
Harmônico'];

% IMPLEMENTAÇÃO DE VARIÁVEIS INICIAIS

thd=zeros(8,size(0:.01:.2,2));

tmed=zeros(8,size(0:.01:.2,2));
sm=zeros(8,size(0:.01:.2,2));
Is=zeros(8,size(0:.01:.2,2));

Iharm=zeros(8,size(0:.01:.2,2));

fpd=zeros(8,size(0:.01:.2,2));
fpt=zeros(8,size(0:.01:.2,2));

r=zeros(8,size(0:.01:.2,2));
for k=1:8

%FONTE
h=ordem(k);
seq_a=seq(k);

for i=1:21

```

```

amp_a=amp(i);

sim('simulacao_monografia3');

thd(k,i)=round(100*(thd_tensao(end)));

% CÁLCULO DO TORQUE MÉDIO EM FUNÇÃO DO THD:

tmed(k,i)=torque_med(end)/11.9;

% OBTENÇÃO DO ESCORREGAMENTO EM FUNÇÃO DO THD:

sm(k,i)=mean(s(end-200:end));

% OBTENÇÃO DA CORRENTE DE ALIMENTAÇÃO DO ESTATOR Is (pu) X THD:

Is(k,i)=corrente_estator(end)/6.483;

% OBTENÇÃO DAS CORRENTES HARMÔNICAS EM FUNÇÃO DO THD:

Iharm(k,i)=ih(end)/(sqrt(2)*6.483);

% OBTENÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DO MIT
% EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO NO ESCORREGAMENTO:

fpt(k,i)=(v1(end)*i1(end)*abs(cos(theta_v1(end)-
theta_i1(end)))+vh(end)*ih(end)*abs(cos(theta_vh(end)-
theta_ih(end))))/sqrt(((v1(end))^2+(vh(end))^2)*((i1(end))^2+(ih(end))^2));

% fpt(k,i)=abs(fpt(k,i));

fpd(k,i)=abs(cos(theta_v1(end)-theta_i1(end)));

% OBTENÇÃO DO RENDIMENTO EM FUNÇÃO DO THD:

Pin=3*v1(end)*i1(end)*abs(cos(theta_v1(end)-
theta_i1(end)))+3*vh(end)*ih(end)*abs(cos(theta_vh(end)-theta_ih(end)));

% Pin=PQ(:,1);

% Pin=3*Pin;

Pout=Pshaft(end);

r(k,i)=100*(Pout/Pin);

end
i
k
end

% PLOTANDO RESULTADOS:

for k=1:8
figure(1)
plot(thd(k,:),tmed(k,:),char(cor(k)));
xlabel('THD (%)');

```

```

ylabel('Tmed (pu)');
hold on
grid on
end
title('GRÁFICO DO TORQUE MÉDIO DO MOTOR EM FUNÇÃO DO THD')
legend('2° Harmônico', '4° Harmônico', '5° Harmônico', '7° Harmônico', ...
       '8° Harmônico', '10° Harmônico', '11° Harmônico', '13° Harmônico')

sm=sm*100;
for k=1:8
figure(2)
plot(thd(k,:), sm(k,:), char(cor(k)));
xlabel('THD (%)');
ylabel('S (%)');
hold on
grid on
end
title('GRÁFICO DO ESCORREGAMENTO DO MOTOR EM FUNÇÃO DO THD')
legend('2° Harmônico', '4° Harmônico', '5° Harmônico', '7° Harmônico', ...
       '8° Harmônico', '10° Harmônico', '11° Harmônico', '13° Harmônico')

for k=1:8
figure(3)
plot(thd(k,:), Is(k,:), char(cor(k)));
xlabel('THD (%)');
ylabel('Is (pu)');
hold on
grid on
end
title('GRÁFICO DA CORRENTE TOTAL DE ALIMENTAÇÃO DO ESTATOR EM FUNÇÃO DO THD')
legend('2° Harmônico', '4° Harmônico', '5° Harmônico', '7° Harmônico', ...
       '8° Harmônico', '10° Harmônico', '11° Harmônico', '13° Harmônico')

for k=1:8
figure(4)
plot(thd(k,:), Iharm(k,:), char(cor(k)));
xlabel('THD (%)');
ylabel('Ih (pu)');
hold on
grid on
end
title('GRÁFICO DAS CORRENTES HARMÔNICAS CIRCULANDO NO ESTATOR EM FUNÇÃO DO THD')
legend('2° Harmônico', '4° Harmônico', '5° Harmônico', '7° Harmônico', ...
       '8° Harmônico', '10° Harmônico', '11° Harmônico', '13° Harmônico')

for k=1:8
figure(5)
plot(thd(k,:), fpd(k,:), char(cor(k)));
xlabel('THD (%)');
ylabel('FPD');
hold on
grid on
end
title('FATOR DE POTÊNCIA DE DESLOCAMENTO EM FUNÇÃO DO THD')
legend('2° Harmônico', '4° Harmônico', '5° Harmônico', '7° Harmônico', ...
       '8° Harmônico', '10° Harmônico', '11° Harmônico', '13° Harmônico')

for k=1:8

```

```

figure(6)
plot(thd(k,:), fpt(k,:), char(cor(k)));
xlabel('THD (%)');
ylabel('FPT');
hold on
grid on
end
title('FATOR DE POTÊNCIA TOTAL EM FUNÇÃO DO THD')
legend('2° Harmônico', '4° Harmônico', '5° Harmônico', '7° Harmônico', ...
       '8° Harmônico', '10° Harmônico', '11° Harmônico', '13° Harmônico')

for k=1:8
figure(7)
plot(thd(k,:), r(k,:), char(cor(k)));
xlabel('THD (%)');
ylabel('Rendimento (%)');
hold on
grid on
end
title('GRÁFICO DO RENDIMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO EM FUNÇÃO DO THD')
legend('2° Harmônico', '4° Harmônico', '5° Harmônico', '7° Harmônico', ...
       '8° Harmônico', '10° Harmônico', '11° Harmônico', '13° Harmônico')

toc;

```

A.2.1 Desenvolvimento da segunda parte script de Simulação de interface com Simulink.

```

% MONOGRAFIA
% PROGRAMA DE INCREMENTAÇÃO DE HARMÔNICOS

% TESTE 3 - GRÁFICO DO TORQUE ELETROMAGNÉTICO (pu) X TEMPO (s)

clear all
close all
clc

% INICIALIZAÇÃO DE PARÂMETROS SEM HARMÔNICO
tempo=1.5;

%FONTE A
h=1;
amp_a=0;
seq_a=1;

%FONTE B
ordem_b=0;
amp_b=0;
seq_b=0;

sim('simulacao_monografia3');

```

```

torque_h1=torque_em/11.9;

% INICIALIZAÇÃO DE PARÂMETROS COM 2º HARMÔNICO E 20% THD
%FONTE A
h=2;
amp_a=0.2;
seq_a=2;

sim('simulacao_monografia3');
torque_h2=torque_em/11.9;

plot(t,torque_h1,'--k',t,torque_h2,'-k');

xlabel('TEMPO (s)');
ylabel('Te (pu)');
legend('Fundamental','h=2')
title('Torque Eletromagnético em função do tempo com e sem distorção
harmônica')
grid on

```

A.2.2 Desenvolvimento da terceira parte do script de Simulação usando apenas os Parâmetros do motor de Indução.

```

% MONOGRAFIA
% PROGRAMA DE INCREMENTAÇÃO DE HARMÔNICOS

% TESTE 9 - GRÁFICO DO FATOR DE POTÊNCIA DO MIT
% EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO NO ESCORREGAMENTO

clear all
close all
clc

% PARÂMETROS DO MOTOR: 3HP/220V/60hz/4Pólos

Rs=0.435;
Rr=0.816;
Lls=2*2e-3;
Lm=69.31e-3;
Llr=2e-3;

Xs=2*pi*60*Lls;
Xr=2*pi*60*Llr;
Xm=2*pi*60*Lm;

h=1;

```

```

% Calculando a impedância
s=0:.001:1;
Theta_h=zeros(1,0:.001:1);
FPD=zeros(1,0:.001:1);
for i=1:length(s);
Zmh=impedancia_mih(Rs, h, Xs, Xm, Rr, s(i), Xr);
Theta_h(i)=angle(Zmh);
FPD(i)=cos(Theta_h(i));
end
s=100*s;
figure(1)
plot(s,FPD,'k','linewidth',1.5);
xlabel('S (%)');
ylabel('FPD ');
hold on
grid on
title('GRÁFICO DO FATOR DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DO ESCORREGAMENTO')

```

A.2.3 Desenvolvimento da quarta parte do script de Simulação: Função que modela o circuito equivalente do MI usado.

```

% MONOGRAFIA
% PROGRAMA DE INCREMENTAÇÃO DE HARMÔNICOS

% FUNÇÃO QUE CALCULA IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE DO MOTOR EM FUNÇÃO DOS
% HARMÔNICOS

function [Zmh] = impedancia_mih(Rs, h, Xs, Xm, Rr, s1, Xr)

if h==4||h==7||h==10||h==13
sh=(h+(1-s1))/h;
elseif h==2||h==5||h==8||h==11
sh=(h-(1-s1))/h;

```

```
end

if h~=1
    Zmh= Rs + li*h*Xs +
    ((li*h*Xm)*(Rr/sh+li*h*Xr))/((Rr/sh)+(li*h*(Xm+Xr)));
else
    Zmh= Rs + li*Xs + ((li*Xm)*(Rr/sl+li*Xr))/((Rr/sl)+(li*(Xm+Xr)));
end

end
```