



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GUILHERME ALBINO BAÍA

**ESTUDO DO RENDIMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS
OPERANDO COM TENSÕES DESEQUILIBRADAS E DISTORCIDAS**

UBERLÂNDIA/MG

2020

GUILHERME ALBINO BAÍA

**ESTUDO DO RENDIMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS
OPERANDO COM TENSÕES DESEQUILIBRADAS E DISTORCIDAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Professor Orientador: Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes

UBERLÂNDIA/MG

2020

GUILHERME ALBINO BAÍA

**ESTUDO DO RENDIMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS
OPERANDO COM TENSÕES DESEQUILIBRADAS E DISTORCIDAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Uberlândia, ____ de _____ de _____.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes (UFU)

Orientador

Prof. Dr. Augusto W. F. Veloso da Silveira

Instituição: UFU

Prof. Dr. Carlos Eduardo Tavares

Instituição: UFU

Prof. Me. Cássio Alves de Oliveira

Instituição: UFU

*Dedico este trabalho aos meus pais Mária
Lúcia e Milton Afonso que não mediram
esforços para que eu pudesse concluir o
curso.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me dado sabedoria e ter iluminado meu caminho durante essa jornada.

Agradeço aos meus pais Mária Lúcia e Milton Afonso pelo apoio, confiança e incentivo durante todo o curso.

Agradeço também aos demais familiares e amigos pelo apoio e ajuda durante esses anos.

E por fim, agradeço todos os professores, coordenadores e supervisores pela contribuição em minha formação acadêmica, especialmente o professor Luciano Coutinho que me orientou durante todo este trabalho de conclusão de curso.

“Nunca tenha certeza de nada, porque a sabedoria começa com a dúvida.”

(Sigmund Freud)

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo realizar o estudo do rendimento de motores de indução trifásicos operando em condições de alimentação desequilibradas e/ou distorcidas. Para isso, inicialmente foi necessário comentar um pouco sobre as normas de qualidade de energia vigentes no Brasil, mostrando como o fator de desequilíbrio e a distorção harmônica total são calculados. Posteriormente, foi apresentada a metodologia para a realização do estudo de casos. Tal metodologia, por ser complexa, foi aplicada com o auxílio do software MATLAB. E, por fim, o trabalho simula e analisa a influência das condições não ideais de alimentação no rendimento de um motor catalogado.

Palavras-chave: Distorção. Harmônica. Desequilíbrio. Rendimento. Motor. Indução.

ABSTRACT

This work aims to study the performance of three-phase induction motors operating under unbalanced and / or distorted power conditions. For this, it was initially necessary to comment a little on the current energy quality standards in Brazil, showing how the unbalance factor and the total harmonic distortion are calculated. Subsequently, the methodology for carrying out the case study was presented. This methodology, being complex, was applied with the aid of the MATLAB software. Finally, the work simulates and analyzes the influence of non-ideal feeding conditions on the performance of a cataloged motor.

Keywords: Distortion. Harmonic. Umbalance. Efficiency. Motor. Induction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes simétricas das tensões de linha.....	19
Figura 2 – Exemplo de composição de uma onda a partir do somatório das suas componentes harmônicas.....	23
Figura 3 – Limites de distorção individual.....	25
Figura 4 – Limites de distorção total.....	25
Figura 5 – Circuito equivalente nominal.....	34
Figura 6 – Circuito equivalente de sequência positiva para o harmônico h.....	49
Figura 7 – Circuito equivalente de sequência negativa para o harmônico h.....	40
Figura 8 – Ajuste do escorregamento de operação.....	43
Figura 9 – Interface do software desenvolvido.....	55
Figura 10 – Gráfico de tensão e seu espectro harmônico para a simulação com alimentação ideal.....	57
Figura 11 – Gráfico de corrente e seu espectro harmônico para a simulação de 100% de carregamento e alimentação ideal.....	58
Figura 12 – Gráfico de corrente e seu espectro harmônico para a simulação de 75% de carregamento e alimentação ideal.....	58
Figura 13 – Gráfico de corrente e seu espectro harmônico para a simulação de 50% de carregamento e alimentação ideal.....	59
Figura 14 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para a simulação com alimentação da componente fundamental e 5ª harmônica.....	60
Figura 15 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 100% de carregamento e alimentação da componente fundamental e 5ª harmônica.....	61
Figura 16 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 75% de carregamento e alimentação da componente fundamental e 5ª harmônica...62	62
Figura 17 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 50% de carregamento e alimentação da componente fundamental e 5ª harmônica...62	62
Figura 18 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para a simulação com alimentação da componente fundamental e 7ª harmônica.....	65
Figura 19 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 100% de carregamento e alimentação da componente fundamental e 7ª harmônica.....	66
Figura 20 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 75% de carregamento e alimentação da componente fundamental e 7ª harmônica...66	66
Figura 21 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 50% de carregamento e alimentação da componente fundamental e 7ª harmônica...67	67
Figura 22 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para a simulação com alimentação da componente fundamental e 11ª harmônica.....	69
Figura 23 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 100% de carregamento e alimentação da componente fundamental e 11ª harmônica.....	70
Figura 24 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 75% de carregamento e alimentação da componente fundamental e 11ª harmônica.....	70
Figura 25 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 50% de carregamento e alimentação da componente fundamental e 11ª harmônica.....	71

Figura 26 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para a simulação com alimentação da componente fundamental e 13ª harmônica.....	73
Figura 27 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 100% de carregamento e alimentação da componente fundamental e 13ª harmônica.....	74
Figura 28 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 75% de carregamento e alimentação da componente fundamental e 13ª harmônica.....	74
Figura 29 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 50% de carregamento e alimentação da componente fundamental e 13ª harmônica.....	75
Figura 30 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para a simulação com alimentação da componente fundamental e as harmônicas ímpares.....	77
Figura 31 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 100% de carregamento e alimentação da componente fundamental e as harmônicas ímpares.....	78
Figura 32 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 75% de carregamento e alimentação da componente fundamental e as harmônicas ímpares.....	79
Figura 33 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 50% de carregamento e alimentação da componente fundamental e as harmônicas ímpares.....	79
Figura 34 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para a simulação com alimentação desequilibrada em módulo.....	81
Figura 35 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 100% de carregamento e alimentação desequilibrada em módulo.....	82
Figura 36 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 75% de carregamento e alimentação desequilibrada em módulo.....	82
Figura 37 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 50% de carregamento e alimentação desequilibrada em módulo.....	83
Figura 38 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para a simulação com alimentação desequilibrada em módulo.....	85
Figura 39 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 100% de carregamento e alimentação desequilibrada em ângulo.....	86
Figura 40 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 75% de carregamento e alimentação desequilibrada em ângulo.....	86
Figura 41 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 50% de carregamento e alimentação desequilibrada em ângulo.....	89
Figura 42 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para a simulação com alimentação desequilibrada e distorcida.....	89
Figura 43 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 100% de carregamento e alimentação desequilibrada e distorcida.	90
Figura 44 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 75% de carregamento e alimentação desequilibrada e distorcida.....	90
Figura 45 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 50% de carregamento e alimentação desequilibrada e distorcida.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tensões de alimentação em módulo e defasagem para a simulação 1.....	57
Tabela 2 – Conteúdo harmônico individual em porcentagem da simulação 1.....	58
Tabela 3 – Parâmetros do circuito equivalente para a simulação 1.....	58
Tabela 4 – Parâmetros obtidos na simulação 1.....	60
Tabela 5 – Tensões de alimentação em módulo e defasagem para a simulação 2.....	61
Tabela 6 – Conteúdo harmônico individual em porcentagem da simulação 2.....	61
Tabela 7 – Parâmetros dos circuitos equivalentes para a simulação 2.....	62
Tabela 8 – Parâmetros obtidos na simulação 2.....	64
Tabela 9 – Variação dos parâmetros obtidos na simulação 2 em relação à simulação 1.....	65
Tabela 10 – Tensões de alimentação em módulo e defasagem para a simulação 3.....	65
Tabela 11 – Conteúdo harmônico individual em porcentagem da simulação 3.....	65
Tabela 12 – Parâmetros dos circuitos equivalentes para a simulação 3.....	66
Tabela 13 – Parâmetros obtidos na simulação 3.....	68
Tabela 14 – Variação dos parâmetros obtidos na simulação 3 em relação à simulação 1.....	69
Tabela 15 – Tensões de alimentação em módulo e defasagem para a simulação 4.....	69
Tabela 16 – Conteúdo harmônico individual em porcentagem da simulação 4.....	70
Tabela 17 – Parâmetros dos circuitos equivalentes para a simulação 4.....	70
Tabela 18 – Parâmetros obtidos na simulação 4.....	72
Tabela 19 – Variação dos parâmetros obtidos na simulação 4 em relação à simulação 1.....	73
Tabela 20 – Tensões de alimentação em módulo e defasagem para a simulação 5.....	73
Tabela 21 – Conteúdo harmônico individual em porcentagem da simulação 5.....	74
Tabela 22 – Parâmetros dos circuitos equivalentes para a simulação 5.....	74
Tabela 23 – Parâmetros obtidos na simulação 5.....	76
Tabela 24 – Variação dos parâmetros obtidos na simulação 5 em relação à simulação 1.....	77
Tabela 25 – Tensões de alimentação em módulo e defasagem para a simulação 6.....	77
Tabela 26 – Conteúdo harmônico individual em porcentagem da simulação 6.....	78
Tabela 27 – Parâmetros dos circuitos equivalentes para a simulação 6.....	79
Tabela 28 – Parâmetros obtidos na simulação 6.....	81
Tabela 29 – Variação dos parâmetros obtidos na simulação 6 em relação à simulação 1.....	81
Tabela 30 – Tensões de alimentação em módulo e defasagem para a simulação 7.....	82
Tabela 31 – Parâmetros dos circuitos equivalentes para a simulação 7.....	82
Tabela 32 – Parâmetros obtidos na simulação 7.....	84
Tabela 33 – Variação dos parâmetros obtidos na simulação 7 em relação à simulação 1.....	85
Tabela 34 – Tensões de alimentação em módulo e defasagem para a simulação 8.....	85
Tabela 35 – Parâmetros dos circuitos equivalentes para a simulação 8.....	86
Tabela 36 – Parâmetros obtidos na simulação 8.....	88

Tabela 37 – Variação dos parâmetros obtidos na simulação 8 em relação à simulação 1.....	89
Tabela 38 – Tensões de alimentação em módulo e defasagem para a simulação 9.	89
Tabela 39 – Conteúdo harmônico individual em porcentagem da simulação 9.....	89
Tabela 40 – Parâmetros dos circuitos equivalentes para a simulação 9.....	90
Tabela 41 – Parâmetros obtidos na simulação 9.....	92
Tabela 42 – Variação dos parâmetros obtidos na simulação 9 em relação à simulação 1.....	93

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Sequência de fase das componentes harmônicas.....	29
Quadro 2 – Dados do motor comumente encontrados em catálogo e/ou placa.....	33
Quadro 3 – Categoria dos motores.....	33
Quadro 4 – Sentido de rotação do campo girante.....	43
Quadro 5 – Escorregamento para cada harmônico.....	44
Quadro 6 – Velocidade relativa harmônica.....	45
Quadro 7 – Resistência para cada harmônico.....	46
Quadro 8 – Dados de placa do MIT.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Engenharia Elétrica

MIT – Motor de Indução Trifásico

BEN – Balanço energético Nacional

PRODIST – Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional

NEMA – Associação Nacional de Industrias Elétricas

CIGRÉ – Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica

IEEE – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

IEC – Comissão Eletrotécnica Internacional

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVO	18
2 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA.....	18
2.1 SOBRE O DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	18
2.1.1 Componentes simétricas	18
2.1.2 Método de NEMA	20
2.1.3 O método de Cigré	21
2.1.4 Método do IEEE.....	21
2.1.5 Normas relacionadas ao desequilíbrio de tensão	21
2.1.6 Efeitos do desequilíbrio em motores de indução trifásico	22
2.2 A RESPEITO DA DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO	22
2.2.1 Definição dos indicadores de distorção harmônica.....	23
2.2.2 Normas relacionadas à distorção harmônica	25
2.2.3 Efeitos da distorção harmônica em motores de indução trifásicos	26
2.2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	26
3 METODOLOGIA	26
3.1 OBTENDO TENSÕES DE FASE DA REDE PARA AS CONDIÇÕES DESEQUILIBRADAS E DISTORCIDAS	27
3.1.1 Cálculo do módulo da componente harmônica fundamental para cada fase.....	28
3.1.2 Cálculo do módulo da componente harmônica de ordem h para cada fase	28
3.1.3 Fasores de cada fase da componente harmônica fundamental	29
3.1.4 Fasores das componentes harmônicas de ordens h para cada fase.....	29
3.1.5 Tensões de fase de seqüências zero, positiva e negativa para a componente harmônica fundamental.....	30
3.1.6 Tensões de fase de seqüências zero, positiva e negativa para as componentes harmônicas de seqüência positiva	31
3.1.7 Tensões de fase de seqüências zero, positiva e negativa para as componentes harmônicas de seqüência negativa	31
3.1.8 Componentes das tensões determinantes para esse estudo	32
3.2 CIRCUITO EQUIVALENTE NOMINAL	33
3.2.1 Determinando a resistência nominal no rotor $R2N$	34
3.2.2 Determinando a corrente nominal do rotor $I2N$	35
3.2.3 Determinando a resistência de rotor bloqueado $R2P$	35
3.2.4 Determinando a resistência equivalente do estator $R1$	36
3.2.5 Determinando a reatância equivalente do estator $X1$	36
3.2.6 Determinando a reatância de dispersão nominal para o rotor $X2NP$	36
3.2.7 Determinando a reatância de magnetização XM	36
3.2.8 Determinando a resistência de magnetização RM	37
3.2.9 Correção dos parâmetros $R2N X2NP$	37
3.3 AJUSTES DOS PARÂMETROS PARA CADA HARMÔNICO	38
3.3.1 Circuito equivalente de seqüência positiva para a harmônica de ordem h	39
3.3.2 Circuito equivalente do motor de seqüência negativa para os harmônicos de ordem h	40
3.3.3 Ajuste da resistência equivalente do estator.....	41
3.3.4 Ajuste da reatância do estator	41
3.3.5 Ajuste da resistência correspondente ao ramo magnetizante	41
3.3.6 Ajuste da reatância do ramo magnetizante.....	42
3.3.7 Ajuste da reatância de dispersão para a condição de rotor bloqueado	42

3.3.8 <i>Ajuste da resistência do rotor</i>	42
3.4 CORRENTES DO CIRCUITO EQUIVALENTE DE SEQUÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA PARA CADA HARMÔNICO SEQUÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA	47
3.4.1 <i>Correntes de sequência positiva para a componente fundamental</i>	47
3.4.2 <i>Correntes de sequência negativa para a componente fundamental</i>	47
3.4.3 <i>Correntes de sequência positiva para os harmônicos de ordem h</i>	48
3.4.4 <i>Correntes de sequência negativa para os harmônicos de ordem h</i>	49
3.5 CÁLCULO DAS PERDAS TOTAIS	49
3.6 CÁLCULO DO CONJUGADO ELETROMAGNÉTICO	50
3.7 CÁLCULO DA POTÊNCIA MECÂNICA	51
3.8 CÁLCULO DO RENDIMENTO	52
3.9 REPRESENTAÇÃO DA TENSÃO E CORRENTE NO DOMÍNIO DO TEMPO	52
3.9.1 <i>Tensões no domínio do tempo</i>	53
3.9.2 <i>Correntes no domínio do tempo</i>	53
3.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
4 ESTUDO DE CASOS	54
4.1 APRESENTAÇÃO DO SOFTWARE	54
4.2 MOTOR UTILIZADO NA SIMULAÇÃO	55
4.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	56
4.3.1 <i>Simulação 1: MIT operando em condições ideais de alimentação</i>	56
4.3.2 <i>Simulação 2: MIT operando com a componente fundamental e 5ª harmônica</i>	60
4.3.3 <i>Simulação 3: MIT operando com a componente fundamental e 7ª harmônica</i>	64
4.3.4 <i>Simulação 4: MIT operando com a componente fundamental e 11ª harmônica</i>	68
4.3.5 <i>Simulação 5: MIT operando com a componente fundamental e 13ª harmônica</i>	72
4.3.6 <i>Simulação 6: MIT operando com a fundamental e harmônicas ímpares</i>	76
4.3.7 <i>Simulação 7: MIT operando com rede desequilibrada em módulo</i>	81
4.3.8 <i>Simulação 8: MIT operando com rede desequilibrada em ângulo</i>	84
4.3.9 <i>Simulação 9: MIT operando com rede desequilibrada e distorcida</i>	88
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	92
CONCLUSÃO	93
REFERÊNCIAS	94

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o consumo de energia elétrica no setor industrial corresponde a cerca de 37% de toda energia elétrica consumida no país, segundo o Balanço Energético Nacional (EPE, 2019). Dessa porcentagem, cerca de 68% da energia é direcionada para motores de indução trifásicos (MIT), que se tornam protagonistas quando o assunto é consumo de energia nas indústrias. Dos motores de indução que existem, os que possuem o rotor com gaiola de esquilo são os principais utilizados, devido a sua robustez, eficiência e rendimento.

Além disso, é sabido que as redes de distribuição de energia elétrica contêm impurezas, isto é, estão sujeitas a fenômenos que comprometem o pleno funcionamento de dispositivos conectados a elas. Dois importantes fenômenos associados à qualidade da energia elétrica são a distorção harmônica e o desequilíbrio de tensão.

Como já foi dito, os MIT consomem uma parte significativa da energia gerada no Brasil. Assim, o estudo dos efeitos da distorção harmônica e desequilíbrio de tensão provocados em motores é de extrema relevância.

O desequilíbrio de tensão deve receber atenção devida, pois, mesmo que em pequenas intensidades, provocam nas correntes um alto desequilíbrio, e, como consequências disso, tem-se a redução da vida útil, do rendimento e do conjugado médio do MIT. A distorção harmônica também merece um cuidado especial, por promover a distorção das formas de ondas das correntes presentes no MIT, provocando, também, a redução do rendimento e vida útil, além do surgimento de vibrações e ruídos nos motores (Severo 2020).

Dessa forma, é de extrema relevância existir indicadores e normas que regulamentam a qualidade do serviço de distribuição de energia elétrica, a fim de que os equipamentos conectados à rede, como, por exemplo, os motores de indução nas indústrias, não sofram tanta deterioração e forneçam um bom rendimento de acordo com a sua finalidade. No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é o órgão responsável pela regulamentação e fiscalização desses serviços.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é estudar e aplicar uma metodologia que realize o cálculo do rendimento de motores de indução trifásicos operando sob condições de alimentação não ideais, isto é, alimentados por tensões com distorção harmônica e em desequilíbrio.

2 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Assim como em qualquer área de atuação da engenharia elétrica, a qualidade da energia é regida por indicadores e normas. Este capítulo tem por objetivo apresentar os indicadores e normas atualmente utilizados para estudos de casos de redes de alimentação operando com desequilíbrio e distorções harmônicas de tensões. Como já foi dito, no Brasil, o principal órgão regulamentador e fiscalizador a respeito da geração, transmissão, distribuição e comercialização da energia elétrica é a ANEEL.

2.1 Sobre o desequilíbrio de tensão

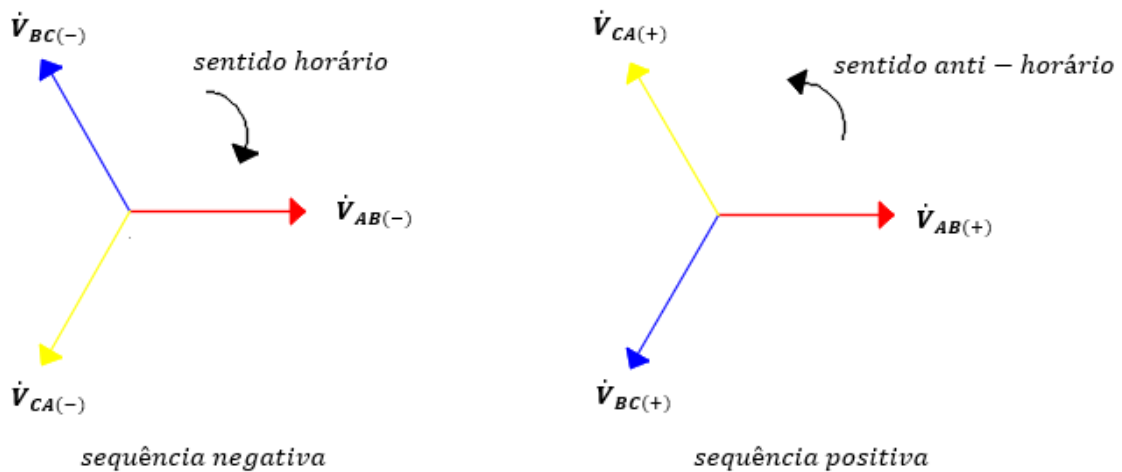
O desequilíbrio de tensão acontece quando em um sistema trifásico as tensões possuem módulos diferentes e/ou quando a defasagem angular entre essas grandezas é diferente de 120° . O desequilíbrio é causado principalmente pela má distribuição das cargas monofásicas entre as fases da rede de distribuição elétrica, mas também pode ser originado pela má distribuição das cargas individuais das unidades consumidoras, em ambos os casos, é gerado componente de sequência negativa. A principal ferramenta para estudar esse fenômeno é o método das componentes simétricas.

2.1.1 Componentes simétricas

Conforme Lima (2016), a metodologia mais eficiente para a análise do desequilíbrio de uma rede elétrica é o método das componentes simétricas de tensões, que consiste em representar uma rede desequilibrada em um conjunto de

três redes equilibradas: componente de sequência zero, componente de sequência positiva e componente de sequência negativa. O resultado do desequilíbrio pode ser observado pela superposição de efeitos de tais componentes, de acordo com o que se deseja analisar.

Figura 1 – Componentes simétricas das tensões de linha.



Fonte: O autor.

É importante frisar que as componentes simétricas são apenas estratégias matemáticas para o estudo de desequilíbrios, porém elas não existem fisicamente. Para as tensões de linha, a componente simétrica de sequência zero vale zero.

Para o cálculo do desequilíbrio a partir das componentes simétricas de tensão de linha, o PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), criado pela Aneel (2018) para normatizar as atividades técnicas relacionadas à distribuição de energia elétrica, indica:

$$a = 1 \angle 120^\circ \quad (2.1)$$

$$V_{AB(+)} = \frac{V_{AB} + V_{BC} \cdot a + V_{CA} \cdot a^2}{3} \quad (2.2)$$

$$V_{AB(-)} = \frac{V_{AB} + V_{BC} \cdot a^2 + V_{CA} \cdot a}{3} \quad (2.3)$$

Sendo:

a – Constante de operação;

\dot{V}_{AB} – Tensão de linha Vab;

\dot{V}_{BC} – Tensão de linha Vbc;

\dot{V}_{CA} – Tensão de linha Vca.

$\dot{V}_{AB(+)}$ – Componente simétrica de sequência positiva da tensão Vab;

$\dot{V}_{AB(-)}$ – Componente simétrica de sequência negativa da tensão de Vab;

$\dot{V}_{AB(0)}$ – Componente simétrica de sequência zero da tensão de Vab.

Dessa forma, a partir das componentes simétricas é possível determinar o fator de desequilíbrio:

$$FD\% = \frac{V_{AB(-)}}{V_{AB(+)}} \cdot 100 \quad (2.4)$$

Em que:

$FD\%$ - Fator de desequilíbrio em porcentagem.

Por envolver operações com números complexos, foram criados outros métodos que permitem aproximações ao método das componentes simétricas, porém como o objetivo deste trabalho é uma representação mais fiel possível da realidade para o estudo de casos e o software utilizado permite a realização com facilidade de operações envolvendo números complexos, o procedimento adotado para calcular o desequilíbrio foi o descrito pela equação (2.4). A seguir, serão listados alguns outros métodos alternativos, conforme Lima (2016).

2.1.2 Método de NEMA

O NEMA (Associação Nacional de Indústrias Elétricas) define o desequilíbrio de tensões como:

$$FD = \frac{\Delta V}{V_m} * 100 \quad (2.5)$$

ΔV – Máximo desvio das tensões de linha em relação à média aritmética.

V_m – Média aritmética das tensões de linha.

2.1.3 O método de Cigré

O método de Cigré (Comitê nacional brasileiro de produção e transmissão de energia elétrica) calcula o desequilíbrio com base nos valores eficazes das tensões de linha de um sistema elétrico.

$$\beta = \frac{|V_{AB}|^4 + |V_{BC}|^4 + |V_{CA}|^4}{(|V_{AB}|^2 + |V_{BC}|^2 + |V_{CA}|^2)^2} \quad (2.6)$$

$$FD = \frac{\sqrt{1 - (3 - \beta * 6)}}{\sqrt{1 + (3 - \beta * 6)}} \quad (2.7)$$

Sendo,

V_{AB} – Módulo da tensão Vab.

V_{BC} – Módulo da tensão Vbc.

V_{CA} – Módulo da tensão Vca.

2.1.4 Método do IEEE

A IEEE define o desequilíbrio da seguinte forma:

$$FD = 3 * \frac{V_{Máx} - V_{Mín}}{V_{AB} + V_{BC} + V_{CA}} * 100 \quad (2.8)$$

$V_{máx}$ – Módulo da tensão de maior valor eficaz;

$V_{mín}$ – Módulo da tensão de menor valor eficaz;

2.1.5 Normas relacionadas ao desequilíbrio de tensão

A respeito das normas de regulamentação sobre desequilíbrio de tensões, existem recomendações da NEMA (Associação Nacional de Industrias Eléctricas), IEC (Comissão Eletrotécnica Internacional), CENELEC (Comité Europeu de Normalização Eletrotécnica), entre outras (SILVA, 2012). Neste trabalho será utilizado como referência as recomendações do PRODIST: o fator de desequilíbrio deve ser igual ou inferior a 3% para baixas tensões (menor que 1kV), e 2% para médias e altas tensões (acima de 1kV), para estar dentro da faixa aceita.

Uma consideração importante de se fazer a respeito das regulamentações desse tópico é que ainda não existe norma que fiscaliza o limite para o desequilíbrio das correntes no sistema trifásico.

2.1.6 Efeitos do desequilíbrio em motores de indução trifásico

De acordo com Lima (2016) e Severo (2020), as pequenas porcentagens de desequilíbrio geram grandes efeitos nas correntes eléctricas dos motores. Assim, o desequilíbrio eleva a corrente eficaz nos enrolamentos do estator e rotor, aumentando as perdas e conseqüentemente diminuindo o rendimento do motor. Outra conseqüência do desequilíbrio no MIT é a presença de um conjugado no sentido oposto da componente simétrica positiva, que provoca uma redução do conjugado médio e, conseqüentemente, o surgimento de vibrações indesejadas e redução da vida útil.

2.2 A respeito da distorção harmônica de tensão

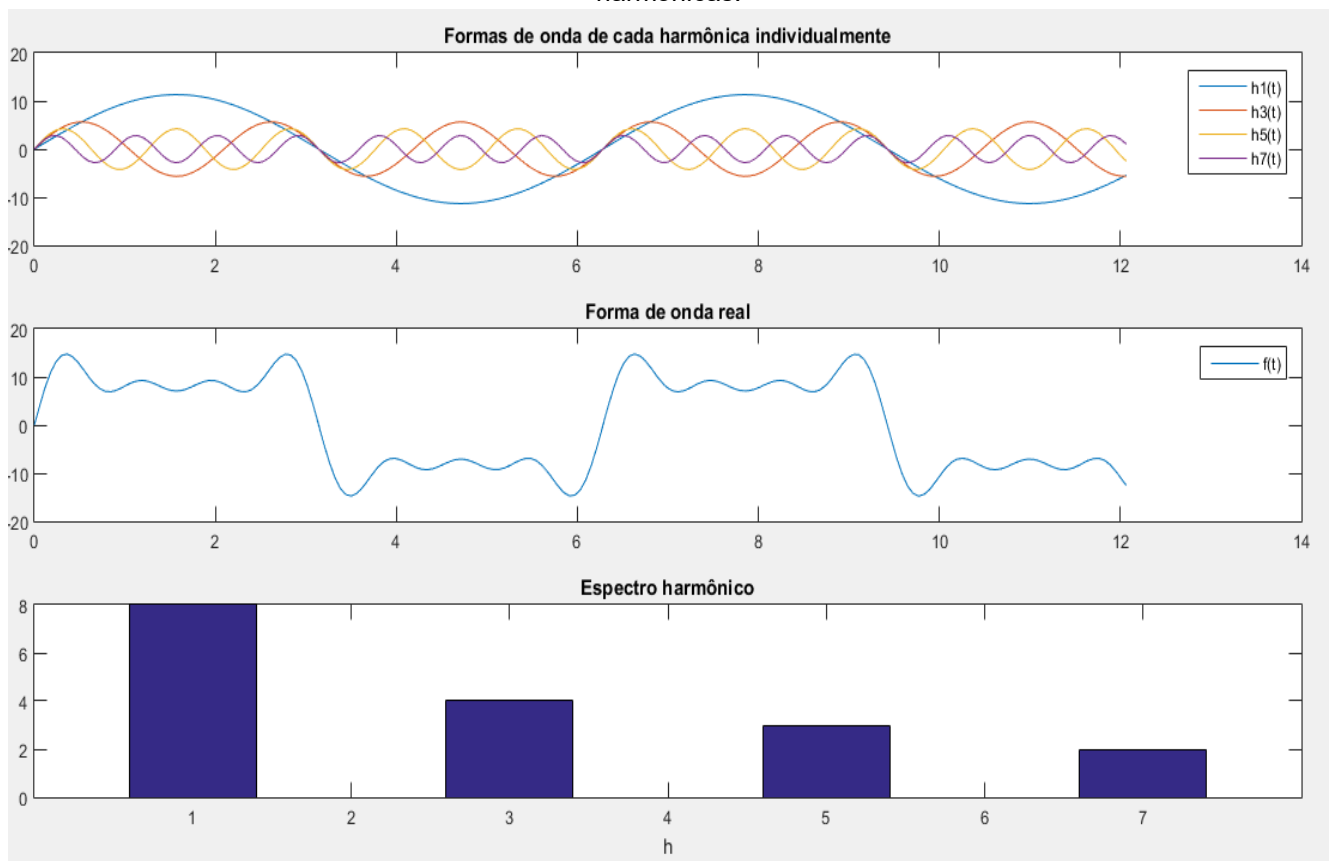
A distorção harmônica, segundo Severo (2020) é por definição a distorção na forma de onda original da rede, que idealmente deve ser puramente senoidal. Esse fenômeno é causado principalmente devido às cargas não lineares conectadas à rede. Alguns exemplos de cargas não lineares são:

- Transformadores: Os transformadores possuem em seu núcleo uma magnetização não linear.
- Conversores estáticos: Retificadores, inversores de frequência e outros dispositivos relacionados à eletrônica de potência.

- Fornos de arco e equipamentos de solda.

Para o estudo da distorção harmônica, utiliza-se o Teorema de Fourier que afirma que toda função periódica não senoidal pode ser decomposta em um somatório de funções senoidais, sendo o primeiro termo uma senoide de frequência fundamental, seguida da soma de senoides de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental. A Figura 2 ilustra a composição de uma forma de onda, com base no somatório das componentes harmônicas.

Figura 2 – Exemplo de composição de uma onda a partir do somatório das suas componentes harmônicas.



Fonte: O autor.

Nesse exemplo, $h_1(t)$, $h_3(t)$, $h_5(t)$, $h_7(t)$ representam as componentes harmônicas fundamental, de terceira, de quinta e de sétima ordem, respectivamente, e $f(t)$ representa a forma de onda real, composta pelo somatório das componentes, ou seja, $f(t) = h_1(t) + h_3(t) + h_5(t) + h_7(t)$.

2.2.1 Definição dos indicadores de distorção harmônica

As porcentagens de distorções de tensão podem ser determinadas da seguinte forma:

$$K_{(h)} = \frac{V_h}{V_1} \quad (2.9)$$

$$K_{(h)\%} = K_{(h)} * 100 \quad (2.10)$$

$$THD = \sqrt{(\sum_{h>1}^{+\infty} K_{(h)\%}^2)} \quad (2.11)$$

V_h - Valor da tensão distorcida de ordem h;

V_1 - Valor da tensão eficaz;

$K_{(h)}$ - Valor eficaz da componente harmônica de tensão de ordem h em p.u da tensão eficaz total;

$K_{(h)\%}$ - Porcentagem individual da distorção de tensão de ordem h;

THD - Distorção harmônica total em porcentagem.

É válido afirmar, de acordo com Silva (2012), que as componentes harmônicas possuem sequências de fase, de acordo com a sua ordem, análogo às componentes simétricas.

$h = 3 * k + 1 \rightarrow$ sequência positiva

$h = 3 * k + 2 \rightarrow$ sequência negativa

$h = 3 * k + 3 \rightarrow$ sequência 0

Em que:

h – Ordem harmônica

$k = 1,2,3,4,6,7 \dots$

Para o estudo de casos deste trabalho, de acordo com Lima (2016), serão analisadas as componentes harmônicas de 5^a, 7^a, 11^a, 13^a, 17^a, 19^a, 23^a e 25^a ordens, pois nas plantas industriais os equipamentos eletrônicos utilizados para o

acionamento dos MIT (inversores de frequências, *soft-starter* e outros conversores que possuem o comportamento de carga não linear) apresentam em suas composições, predominantemente, componentes harmônicas das ordens descritas.

É importante salientar que as componentes de terceira ordem e suas múltiplas harmônicas não serão consideradas neste estudo, devido a estas circularem pelo condutor neutro, e, como já foi dito neste trabalho, usualmente nas indústrias, os motores são ligados em delta ou em estrela sem neutro.

2.2.2 Normas relacionadas à distorção harmônica

Existem algumas recomendações que regulamentam os limites de distorção harmônica individuais e totais. Os valores estabelecidos pelo PRODIST, IEEE STD, IEC e EN50160 estão listados nas Figuras 3 e 4, que foram extraídas de Lima (2020).

Figura 3 – Limites de distorção individual.

h	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%] PRODIST				IEC 61 000-2-12 e 61000-3-6			IEEE STD 519-2014				EN50160
	Até 1kV	1kV a 13,8kV	13,8kV a 69kV	69kV a 230kV	Até 1kV	1kV a 35kV	35kV a 230kV e >230	Até 1kV	1kV a 69kV	69kV a 161kV	≥161kV	Até 35kV
5	7,5	6,0	4,5	2,5	6,0	5,0	2,0	5,0	3,0	1,5	1,0	6,0
7	6,5	5,0	4,0	2,0	5,0	4,0	2,0					5,0
11	4,5	3,5	3,0	1,5	3,5	3,0	1,5					3,5
13	4,0	3,0	2,5	1,5	3,0	2,5	1,5					3,0
17	2,5	2,0	1,5	1,0	2,0	1,6	1,0					2,0
19	2,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,2	1,0					1,5
23	2,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,2	0,7					1,5
25	2,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,2	0,7					1,5
>25	1,5	1,0	1,0	0,5	0,2+0,5x25/h							-----

Fonte: Lima (2016).

Figura 4 – Limites de distorção total.

Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]							
NÍVEL DE TENSÃO	PRODIST	NÍVEL DE TENSÃO	IEC 61000-3-6	NÍVEL DE TENSÃO	IEEE STD 519-2014	NÍVEL DE TENSÃO	EN50160
$V_N \leq 1 \text{ kV}$	10,0%	BT	8,0%	$\leq 1 \text{ kV}$	8,0%	$V_N \leq 1 \text{ kV}$	8,0%
$1 \text{ kV} < V_N \leq 13,8 \text{ kV}$	8,0%	MT	6,5%	1kV a 69kV	5,0%		
$13,8 \text{ kV} < V_N \leq 69 \text{ kV}$	6,0%	AT	3,0%	69kV a 161kV	2,5%		
$69 \text{ kV} < V_N \leq 230 \text{ kV}$	3,0%	EAT	3,0%	$\geq 161 \text{ kV}$	1,5%		

Fonte: Lima (2016).

2.2.3 Efeitos da distorção harmônica em motores de indução trifásicos

Conforme Severo (2020), a circulação de harmônicas compromete a qualidade de energia elétrica além de provocar nos MIT efeitos como: redução do fator de potência, redução da velocidade, aumento das perdas e conseqüentemente a redução do rendimento, deformação das formas de onda de tensão e corrente, entre outros.

2.2.4 Considerações finais

Neste capítulo foi comentado um pouco sobre as normas e indicadores referentes à distorção harmônica e ao desequilíbrio de tensão, assim como os efeitos desses fenômenos em motores de indução trifásicos. A seguir será discorrido sobre a metodologia utilizada para esse estudo.

3 METODOLOGIA

A metodologia de Lima (2016), estudada neste trabalho, considera que o motor é alimentado por várias fontes de tensões senoidais individuais, referentes a cada componente harmônica estudada, sempre associada ao desequilíbrio, se ele existir.

Sendo assim, o primeiro passo consiste em obter as tensões de fase de sequência positiva e negativa para cada harmônico, levando em consideração os dados da rede (desequilíbrio e distorção). Posteriormente, serão calculados os parâmetros do circuito equivalente de sequência positiva e negativa, para cada componente harmônica analisada (5^a, 7^a, 11^a, 13^a, 17^a, 19^a, 23^a e 25^a ordem), lembrando que os parâmetros desses circuitos variam de acordo com a frequência e o efeito *skin* (pelicular), que será abordado mais adiante neste trabalho. Para determinar esses circuitos, primeiramente serão calculados os parâmetros do circuito

equivalente nominal, e baseando-se nele, serão feitos os ajustes de parâmetros, se necessário.

Tendo esses elementos em mãos, é possível fazer vários tipos de análises sobre o motor que será analisado, sob diversas condições de desequilíbrio e distorções harmônicas da rede, como por exemplo: análise sobre o conjugado resultante, perdas, e principalmente sobre o rendimento que é o objeto de estudo desse trabalho.

3.1 Obtendo tensões de fase da rede para as condições desequilibradas e distorcidas

Para analisar cada circuito equivalente correspondente a cada harmônico em desequilíbrio, primeiro é necessário obter os fasores de tensão de fase da rede de sequência positiva e negativa para cada harmônico descrito. Para isso, será utilizada uma adaptação da metodologia descrita em Lima (2016).

O método implica na obtenção desses fasores com base nos módulos e argumentos das tensões de cada fase da rede, e a porcentagem de distorção individual harmônica, ou seja, os dados de entrada são:

$$\dot{V}_A = V_A \angle \alpha_A \quad (3.1)$$

$$\dot{V}_B = V_B \angle \alpha_B \quad (3.2)$$

$$\dot{V}_C = V_C \angle \alpha_C \quad (3.3)$$

$$K_{(h)} \quad (3.3)$$

Sendo:

\dot{V}_A – Fator da tensão Va;

\dot{V}_B – Fator da tensão Vb;

\dot{V}_C – Fator da tensão Vc;

V_A – Módulo da tensão Va;

V_B – Módulo da tensão Vb;

V_C – Módulo da tensão Vc;

α_A – Argumento da tensão Va;

α_B – Argumento da tensão Vb;
 α_C – Argumento da tensão Vc;
 $K_{(h)}$ – Distorção harmônica individual.

3.1.1 Cálculo do módulo da componente harmônica fundamental para cada fase

$$V_{A(1)} = \frac{V_A}{\sqrt{1 + \sum_{h>1}^{\infty} K_{(h)}^2}} \quad (3.4)$$

$$V_{B(1)} = \frac{V_B}{\sqrt{1 + \sum_{h>1}^{\infty} K_{(h)}^2}} \quad (3.5)$$

$$V_{C(1)} = \frac{V_C}{\sqrt{1 + \sum_{h>1}^{\infty} K_{(h)}^2}} \quad (3.6)$$

$V_{A(1)}$ – Módulo da componente harmônica fundamental da tensão Va;

$V_{B(1)}$ – Módulo da componente harmônica fundamental da tensão Vb;

$V_{C(1)}$ – Módulo da componente harmônica fundamental da tensão Vc.

3.1.2 Cálculo do módulo da componente harmônica de ordem h para cada fase

$$V_{A(h)} = K_{(h)} * V_A \quad (3.7)$$

$$V_{B(h)} = K_{(h)} * V_B \quad (3.8)$$

$$V_{C(h)} = K_{(h)} * V_C \quad (3.9)$$

$V_{A(h)}$ – Módulo da componente harmônica de ordem h da tensão Va;

$V_{B(h)}$ – Módulo da componente harmônica de ordem h da tensão Vb;

$V_{C(h)}$ – Módulo da componente harmônica de ordem h da tensão Vc.

3.1.3 Fasores de cada fase da componente harmônica fundamental

$$V_{A(1)} \dot{=} V_{A(1)} \angle \alpha_A \quad (3.10)$$

$$V_{B(1)} \dot{=} V_{A(1)} \angle \alpha_B \quad (3.11)$$

$$V_{C(1)} \dot{=} V_{A(1)} \angle \alpha_C \quad (3.12)$$

$V_{A(1)} \dot{}$ – Fasor da componente harmônica fundamental da tensão Va;

$V_{B(1)} \dot{}$ – Fasor da componente harmônica fundamental da tensão Vb;

$V_{C(1)} \dot{}$ – Fasor da componente harmônica fundamental da tensão Vc.

3.1.4 Fasores das componentes harmônicas de ordem h para cada fase

Para este estudo, os argumentos dos fasores das componentes harmônicas vão ser considerados iguais aos fasores da componente fundamental. A sequência de fase vai depender da ordem harmônica em questão.

Quadro 1 – Sequência de fase das componentes harmônicas.

h	1	5	7	11	13	17	19	23	25
Sequência de fase	+	-	+	-	+	-	+	-	+

Fonte: Silva (2012).

Para as harmônicas de sequência positiva:

$$V_{A(h+)} \dot{=} V_{A(h+)} \angle \alpha_A \quad (3.13)$$

$$V_{B(h+)} \dot{=} V_{B(h+)} \angle \alpha_B \quad (3.14)$$

$$V_{C(h+)} \dot{=} V_{C(h+)} \angle \alpha_C \quad (3.15)$$

Nota: O índice “h+” refere-se às componentes harmônicas de sequência de fase positiva.

Sendo:

$V_{A(h+)} \dot{}$ – Fator da componente harmônica de sequência positiva da tensão Va;

$V_{B(h+)} \dot{}$ – Fator da componente harmônica de sequência positiva da tensão Vb;

$V_{C(h+)} \dot{}$ – Fator da componente harmônica de sequência positiva da tensão Vc.

Para as harmônicas de sequência negativa:

$$V_{A(h-)} \dot{} = V_{A(h-)} \angle \alpha_A \quad (3.16)$$

$$V_{B(h-)} \dot{} = V_{B(h-)} \angle -\alpha_B \quad (3.17)$$

$$V_{C(h-)} \dot{} = V_{C(h-)} \angle -\alpha_C \quad (3.18)$$

Nota: O índice “h-“ refere-se às componentes harmônicas de sequência de fase negativa.

Sendo:

$V_{A(h-)} \dot{}$ – Fator da componente harmônica de sequência negativa da tensão Va;

$V_{B(h-)} \dot{}$ – Fator da componente harmônica de sequência negativa da tensão Vb;

$V_{C(h-)} \dot{}$ – Fator da componente harmônica de sequência negativa da tensão Vc.

3.1.5 Tensões de fase de sequências zero, positiva e negativa para a componente harmônica fundamental

$$V_{A(1)(0)} \dot{} = \frac{V_{A(1)} \dot{} + V_{B(1)} \dot{} + V_{C(1)} \dot{}}{3} \quad (3.19)$$

$$V_{A(1)(+)} \dot{} = \frac{V_{A(1)} \dot{} + V_{B(1)} \dot{} \cdot a + V_{C(1)} \dot{} \cdot a^2}{3} \quad (3.20)$$

$$V_{A(1)(-)} \dot{} = \frac{V_{A(1)} \dot{} + V_{B(1)} \dot{} \cdot a^2 + V_{C(1)} \dot{} \cdot a}{3} \quad (3.21)$$

Sendo:

$V_{A(1)(0)}$ – Componente de sequência 0 da componente harmônica fundamental da tensão Va;

$V_{B(1)(+)}$ – Componente de sequência positiva da componente harmônica fundamental da tensão Vb;

$V_{C(1)(-)}$ – Componente de sequência negativa da componente harmônica fundamental da tensão Vc.

3.1.6 Tensões de fase de sequências zero, positiva e negativa para as componentes harmônicas de sequência positiva

$$V_{A(h+)(0)} = \frac{V_{A(h+)} + V_{B(h+)} + V_{C(h+)}}{3} \quad (3.22)$$

$$V_{A(h+)(+)} = \frac{V_{A(h+)} + V_{B(h+)} \cdot a + V_{C(h+)} \cdot a^2}{3} \quad (3.23)$$

$$V_{A(h+)(-)} = \frac{V_{A(h+)} + V_{B(h+)} \cdot a^2 + V_{C(h+)} \cdot a}{3} \quad (3.24)$$

Sendo:

$V_{A(h+)(0)}$ – Componente de sequência 0 da componente harmônica de sequência positiva da tensão Va;

$V_{B(h+)(+)}$ – Componente de sequência positiva da componente harmônica de sequência positiva da tensão Vb;

$V_{C(h+)(-)}$ – Componente de sequência negativa da componente harmônica de sequência positiva da tensão Vc.

3.1.7 Tensões de fase de sequências zero, positiva e negativa para as componentes harmônicas de sequência negativa

$$V_{A(h-)(0)} = \frac{V_{A(h-)} + V_{B(h-)} + V_{C(h-)}}{3} \quad (3.25)$$

$$V_{A(h-)(+)} = \frac{V_{A(h-)} + V_{B(h-)} \cdot a^2 + V_{C(h-)} \cdot a}{3} \quad (3.26)$$

$$V_{A(h-)(-)} = \frac{V_{A(h-)} + V_{B(h-)} \cdot a + V_{C(h-)} \cdot a^2}{3} \quad (3.27)$$

Sendo:

$V_{A(h-)(0)}$ – Componente de sequência 0 da componente harmônica de sequência negativa da tensão Va;

$V_{B(h-)(+)}$ – Componente de sequência positiva da componente harmônica de sequência negativa da tensão Vb;

$V_{C(h-)(-)}$ – Componente de sequência negativa da componente harmônica de sequência negativa da tensão Vc.

3.1.8 Componentes das tensões determinantes para esse estudo

Com base na metodologia estudada, serão analisadas as seguintes componentes: $V_{A(1)(+)}$, $V_{A(1)(-)}$, $V_{A(1)(0)}$, $V_{A(5)(+)}$, $V_{A(5)(-)}$, $V_{A(5)(0)}$, $V_{A(7)(+)}$, $V_{A(7)(-)}$, $V_{A(7)(0)}$, $V_{A(11)(+)}$, $V_{A(11)(-)}$, $V_{A(11)(0)}$, $V_{A(13)(+)}$, $V_{A(13)(-)}$, $V_{A(13)(0)}$, $V_{A(17)(+)}$, $V_{A(17)(-)}$, $V_{A(17)(0)}$, $V_{A(19)(+)}$, $V_{A(19)(-)}$, $V_{A(19)(0)}$, $V_{A(23)(+)}$, $V_{A(23)(-)}$, $V_{A(23)(0)}$, $V_{A(25)(+)}$, $V_{A(25)(-)}$, $V_{A(25)(0)}$.

É importante observar que foram obtidas apenas as componentes de tensões referentes à fase A, porque como o método leva em consideração as componentes simétricas, as análises feitas para a fase A podem ser replicadas para as outras fases B e C sem qualquer dificuldade. Outro ponto importante é que foram obtidas as componentes de tensões de sequência 0, que serão utilizadas apenas para a construção das formas de ondas das tensões no domínio do tempo.

Tendo as tensões da rede de sequência positiva e negativa para cada harmônico de sequência positiva e negativa, falta apenas calcular os parâmetros dos circuitos equivalentes correspondentes a essas tensões. No total, serão 18 circuitos a serem determinados.

3.2 Circuito equivalente nominal

As literaturas convencionais utilizam os ensaios a vazio e em curto-circuito para a determinação dos parâmetros do circuito equivalente nominal, o que já foi provado ser uma metodologia muito eficiente. Porém, muitas vezes os motores não possuem os parâmetros tabelados e a sua retirada de operação para realização dos ensaios não é uma opção viável. Como alternativa para essas adversidades encontradas, a metodologia descrita em Sa (1989), que calcula os parâmetros do circuito equivalente do motor utilizando apenas os valores de placa, mostrou-se bastante convincente. Os dados de placa do motor geralmente são:

Quadro 2 – Dados do motor comumente encontrados em catálogo e/ou placa.

Dados	Abreviações	Unidade
Potência nominal	P_n	W
Tensão nominal	U_n	V
Corrente nominal	I_n	A
Corrente de partida	I_p	em p.u. de I_n
Corrente de magnetização	I_o	A
Conjugado nominal	M_n	N.m
conjugado máximo	M_k	em p.u. de M_n
Conjugado de partida	M_p	em p.u. de M_n
Velocidade nominal	n_N	rpm
Velocidade síncrona	n_{1N}	rpm
Fator de potência	f_p	-
Rendimento	η	-
Classe de Isolação	k	-

Fonte: O autor.

A constante k dos motores de indução varia de acordo com as características construtivas deste. O quadro 3, extraída de Rodrigues (2019), mostra os valores atribuídos a essa constante de acordo com a categoria dos motores.

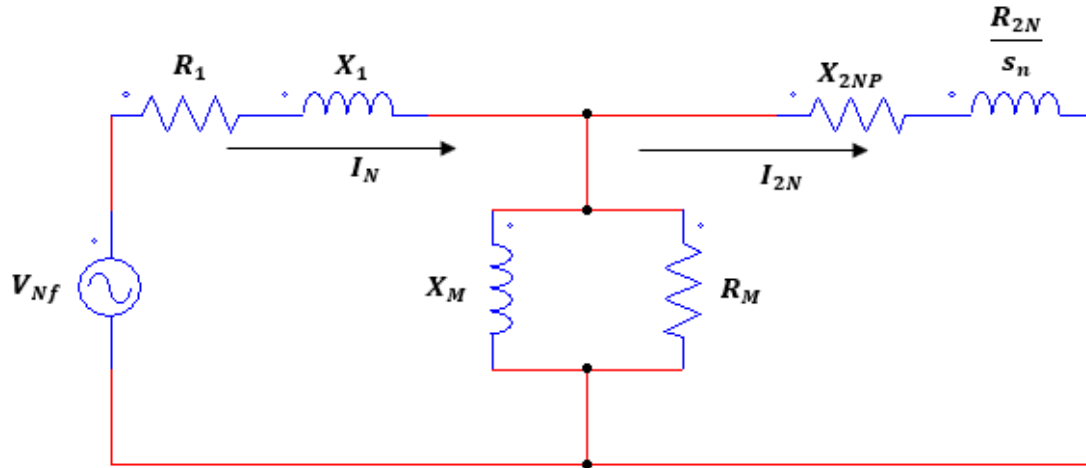
Quadro 3 – Categoria dos motores.

Categoria do motor	k
Classe N	0.78
Classe D	0.68
Classe H	0.58

Fonte: Rodrigues (2019).

O circuito equivalente nominal para cada fase, levando em consideração a alimentação puramente senoidal e equilibrada, é representado pela Figura 5.

Figura 5 – Circuito equivalente nominal.



Fonte: O autor.

Sendo:

V_{nf} - Tensão nominal em Volts por fase do motor;

I_N - Corrente nominal no estator do motor em Amperes;

I_{2N} - Corrente nominal no rotor do motor em Amperes;

R_1 - Resistência nominal do estator do motor em Ω ;

R_{2N} - Resistência nominal do rotor em Ω ;

X_1 - Reatância equivalente do estator do motor em Ω ;

X_{2NP} - Reatância de dispersão de rotor bloqueado em Ω ;

R_M - Resistência de perdas no núcleo em Ω ;

X_M - Reatância de magnetização do motor em Ω ;

s_n - Escorregamento nominal do motor.

As equações para a determinação dos parâmetros do circuito equivalente nominal foram extraídas de Sa (1989). A tese apresenta todas as deduções referentes a elas.

3.2.1 Determinando a resistência nominal no rotor R_{2N}

Para calcular R_{2N} primeiramente é necessário determinar o escorregamento s_k , correspondente ao conjugado máximo do MIT. É possível chegar na expressão 3.29 simplesmente interpretando a equação de Kloss (CASTRO, 2020), para a condição nominal.

$$s_n = \frac{n_{1N} - n_N}{n_{1N}} \quad (3.28)$$

$$s_k = s_n \cdot (Mk - \sqrt{Mk - 1}) \quad (3.29)$$

Sendo:

s_n - Escorregamento nominal;

s_k - Escorregamento correspondente ao conjugado máximo.

A partir do escorregamento nominal e escorregamento máximo tem-se:

$$R_{2N} = \frac{s_n}{1 - s_n} \cdot \frac{P_n}{3} \cdot \frac{1}{I_N^2 \cdot fp^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{s_n}{s_k}\right)^2\right]} \quad (3.30)$$

3.2.2 Determinando a corrente nominal do rotor I_{2N}

$$I_{2N} = I_N \cdot fp^2 \cdot \sqrt{\left(1 + \left(\frac{s_n}{s_k}\right)^2\right)} \quad (3.31)$$

3.2.3 Determinando a resistência de rotor bloqueado R_{2P}

É importante a determinação desse parâmetro para o cálculo de X_1 posteriormente.

$$R_{2P} = \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{Mn \cdot Mp \cdot n_{1N}}{3 \cdot I_{2N}^2 \cdot \left(\frac{Ip}{I_N}\right)^2} \quad (3.32)$$

Sendo:

R_{2p} – Resistência de rotor bloqueado.

3.2.4 Determinando a resistência equivalente do estator R_1

$$R_1 = \sqrt{\frac{180 \cdot R_{2N} \cdot U_n^2}{2 \cdot \Pi \cdot s_k \cdot n_{1N} \cdot M_k \cdot M_n} - \left(\frac{R_{2N}}{s_k}\right)^2} - \frac{R_{2N}}{s_k} \quad (3.33)$$

3.2.5 Determinando a reatância equivalente do estator X_1

$$X_1 = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_n}{I_p}\right)^2 - (R_{2p} - R_1)^2}}{1 + k} \quad (3.34)$$

Vale lembrar que X_1 depende da constante k , que por sua vez depende da categoria do motor, como já foi analisado anteriormente.

3.2.6 Determinando a reatância de dispersão nominal para o rotor X_{2NP}

$$X_{2NP} = \frac{R_{2N}}{s_k} - X_1 \quad (3.35)$$

3.2.7 Determinando a reatância de magnetização X_M

A determinação de X_M , foi realizada de acordo com (Sa 1989). O autor desconsidera a resistência R_M e admite $R = \frac{R_{2N}}{s_n}$.

$$R = \frac{(-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac})}{2a} \quad (3.36)$$

$$a = R_1 - \frac{U_n}{I_n} \cdot fp \quad (3.37)$$

$$b = \left(R_1 - \frac{U_n}{I_n} \cdot fp \right)^2 + \left(X_1 - \frac{U_n}{I_n} \cdot \text{sen}(\text{arcos}(fp)) \right)^2 \quad (3.38)$$

$$c = X_{2NP}^2 \cdot \left(R_1 - \frac{U_n}{I_n} \cdot fp \right) \quad (3.39)$$

Após a determinação de R , por meio das equações 3.36 até 3.39, é calculada a reatância de dispersão X_M por meio da equação 3.40.

$$X_M = \frac{R \cdot \left(R_1 - \frac{U_n}{I_n} \cdot fp \right) - X_1 \cdot X_{2NP} + X_{2NP} \cdot \frac{U_n}{I_n} \cdot \text{sen}(\text{arcos}(fp))}{X_1 + X_{2NP} - \frac{U_n}{I_n} \cdot \text{sen}(\text{arcos}(fp))} \quad (3.40)$$

3.2.8 Determinando a resistência de magnetização R_M

$$R_M = 3 \cdot \frac{\left[U_n^2 + I_n^2 \cdot (R_1^2 + X_1^2) - 2 \cdot U_n \cdot I_n \cdot (R_1 \cdot fp + X_1 \cdot \text{sen}(\text{arcos}(fp))) \right]}{(1 - K) \cdot \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \cdot P_n} \quad (3.41)$$

3.2.9 Correção dos parâmetros R_{2N} e X_{2NP}

Com a adição da resistência de magnetização R_M , os parâmetros R_{2N} e X_{2NP} necessitam ser corrigidos por meio das equações 3.43 até 3.45.

$$G_M = \frac{1}{R_M} \quad (3.43)$$

$$R'_{2N} = s_n \cdot \frac{(R - G_M \cdot (R^2 + X_{2NP}^2))}{(1 - 2 \cdot G_M \cdot R + G_M^2 \cdot (R^2 + X_{2NP}^2))} \quad (3.44)$$

$$X'_{2NP} = \frac{X_{2NP}}{(1 - 2 \cdot G_M \cdot R + G_M^2 \cdot (R^2 + X_{2NP}^2))} \quad (3.45)$$

Sendo:

R'_{2N} - Resistência equivalente do rotor corrigida;

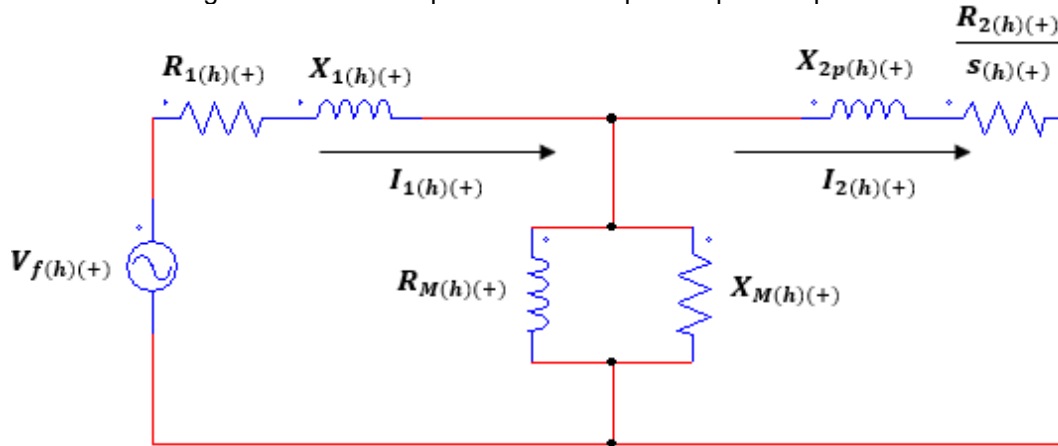
X'_{2NP} - Reatância equivalente do rotor corrigida.

3.3 Ajustes dos parâmetros para cada harmônico

Como já afirmado, alguns parâmetros do motor variam de acordo com a frequência e o efeito pelicular. Levando em consideração que cada harmônica possui uma frequência múltipla da fundamental e que os parâmetros do rotor variam com a frequência e a velocidade relativa harmônica, é necessário fazer a correção para cada uma das harmônicas (5^a, 7^a, 11^a, 13^a, 17^a, 19^a, 23^a e 25^a). É importante lembrar que como se trata de uma análise de sistemas desequilibrados, a fundamental e cada harmônica terão dois circuitos equivalentes correspondentes às componentes simétricas de sequências positivas e negativas, totalizando assim 18 circuitos a serem determinados. O método estudado para a correção desses parâmetros está descrito em Lima (2016).

3.3.1 Circuito equivalente de sequência positiva para a harmônica de ordem h

Figura 6 – Circuito equivalente de sequência positiva para o harmônico h.



Fonte: O autor.

Sendo:

$R_{1(h)(+)}$ – Resistência do estator de sequência positiva para o harmônico de ordem h;

$X_{1(h)(+)}$ – Reatância do estator de sequência positiva para o harmônico de ordem h;

$R_{M(h)(+)}$ – Resistência de perdas no núcleo de sequência positiva para o harmônico de ordem h;

$X_{M(h)(+)}$ – Reatância de magnetização de sequência positiva para o harmônico de ordem h;

$R_{2(h)(+)}$ – Resistência do rotor de sequência positiva para o harmônico de ordem h;

$X_{2p(h)(+)}$ – Reatância de dispersão do rotor bloqueado de sequência positiva para o harmônico de ordem h;

$I_{1(h)(+)}$ – Corrente do estator de sequência positiva para o harmônico de ordem h;

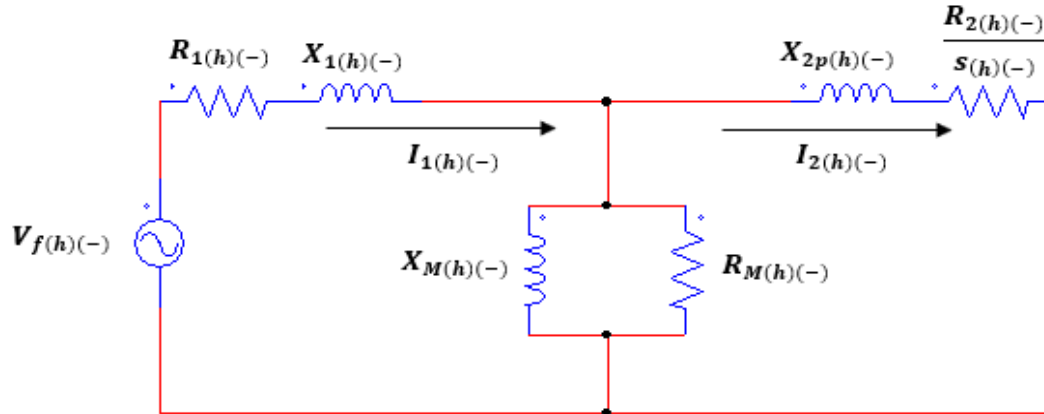
$I_{2(h)(+)}$ – Corrente do rotor de sequência positiva para o harmônico de ordem h;

$V_{f(h)(+)}$ – Tensão de fase de sequência positiva para o harmônico de ordem h;

$s(h)(+)$ – Escorregamento de sequência positiva para o harmônico de ordem h.

3.3.2 Circuito equivalente do motor de seqüência negativa para os harmônicos de ordem h

Figura 7 – Circuito equivalente de seqüência negativa para o harmônico h.



Fonte: O autor.

Sendo:

$R_{1(h)(-)}$ – Resistência do estator de seqüência negativa para o harmônico de ordem h;

$X_{1(h)(-)}$ – Reatância do estator de seqüência negativa para o harmônico de ordem h;

$R_{M(h)(-)}$ – Resistência de perdas no núcleo de seqüência negativa para o harmônico de ordem h;

$X_{M(h)(-)}$ – Reatância de magnetização de seqüência negativa para o harmônico de ordem h;

$R_{2(h)(-)}$ – Resistência do rotor de seqüência negativa para o harmônico de ordem h;

$X_{2p(h)(-)}$ – Reatância de dispersão do rotor bloqueado de seqüência negativa para o harmônico de ordem h;

$I_{1(h)(-)}$ – Corrente do estator de seqüência negativa para o harmônico de ordem h;

$I_{2(h)(-)}$ – Corrente do rotor de seqüência negativa para o harmônico de ordem h;

$V_{f(h)(-)}$ – Tensão de fase de seqüência negativa para o harmônico de ordem h;

$s(h)(-)$ – Escorregamento de seqüência negativa para o harmônico de ordem h.

As principais equações e observações a respeito da correção dos parâmetros, conforme (Lima 2016) estão listadas a seguir.

3.3.3 Ajuste da resistência equivalente do estator

$$R_{1(h)(+)} = R_{1(h)(-)} = R_1 \quad (3.46)$$

Sendo:

R_1 – Resistência do estator nominal para condições equilibradas e não distorcidas.

3.3.4 Ajuste da reatância do estator

$$X_{1(h)(+)} = X_{1(h)(-)} = h \cdot X_1 \quad (3.47)$$

Sendo:

X_1 – Reatância do estator nominal para condições equilibradas e não distorcidas;

h – Ordem harmônica analisada.

3.3.5 Ajuste da resistência correspondente ao ramo magnetizante

$$R_{M(1)(+)} = R_{M(1)(-)} = R_{M(h)(+)} = R_{M(h)(-)} = R_M \quad (3.48)$$

Sendo:

$R_{M(1)(+)}$ – Resistência do ramo magnetizante de sequência positiva para a componente fundamental;

$R_{M(1)(-)}$ – Resistência do ramo magnetizante de sequência negativa para a componente fundamental;

R_M – Resistência do ramo magnetizante para as condições nominais.

3.3.6 Ajuste da reatância do ramo magnetizante

$$X_{M(h)(+)} = X_{M(h)(-)} = h * X_M \quad (3.48)$$

Sendo:

X_M – Reatância do ramo magnetizante do circuito equivalente nominal.

3.3.7 Ajuste da reatância de dispersão para a condição de rotor bloqueado

$$X_{2P(h)(+)} = X_{2P(h)(-)} = h * X_{2NP} \quad (3.49)$$

Sendo:

X_{2NP} – Reatância de dispersão para a condição de rotor bloqueado nominal.

3.3.8 Ajuste da resistência do rotor

Os ajustes referentes à resistência do rotor merecem um cuidado especial, por estes variarem com o efeito *skin* (pelicular). A resistência para cada componente de sequência positiva e negativa dos harmônicos de ordem h serão determinados com base na velocidade relativa entre o campo girante do estator e o rotor e o escorregamento relativo.

Conforme Lima (2016), as harmônicas possuem sequência de fase positiva ou negativa de acordo com a sua ordem e quando associadas às componentes simétricas, podem produzir conjugado no mesmo sentido ou sentido contrário ao de rotação do rotor. O Quadro 4 mostra o sentido do campo girante em relação ao sentido de rotação do rotor, para cada combinação possível.

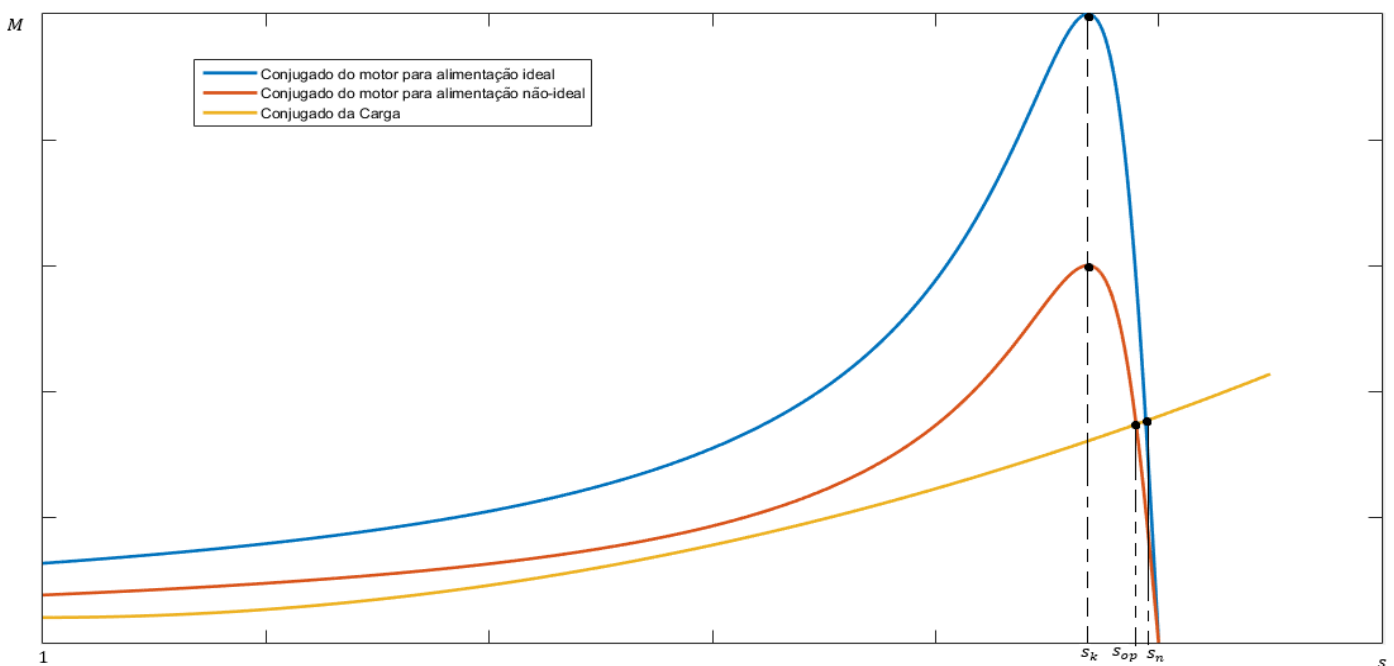
Quadro 4 – Sentido de rotação do campo girante.

Harmônica de ordem	sequência da harmônica	componente de sequência	Sentido do campo girante em relação ao sentido de rotação do rotor
1	+	+	Mesmo
1	+	-	Contrário
5	-	+	Contrário
5	-	-	Mesmo
7	+	+	Mesmo
7	+	-	Contrário
11	-	+	Contrário
11	-	-	Mesmo
13	+	+	Mesmo
13	+	-	Contrário
17	-	+	Contrário
17	-	-	Mesmo
19	+	+	Mesmo
19	+	-	Contrário
23	-	+	Contrário
23	+	-	Mesmo
25	+	+	Mesmo
25	+	-	Contrário

Fonte: Severo (2020).

Segundo Lima (2016), o escorregamento harmônico pode ser determinado da seguinte forma:

Figura 8 – Ajuste do escorregamento de operação.



Fonte: O autor.

$$s_{op} = s_k \cdot \left(\frac{M_k}{M_c} \cdot \left(\frac{V_{A(1)(+)}}{V_{Nf}} \right)^2 - \sqrt{\left(\frac{M_k}{M_c} \right)^2 \cdot \left(\frac{V_{f(1)(+)}}{V_{Nf}} \right)^4 - 1} \right) \quad (3.50)$$

$$n = n_{1N} \cdot (1 - s_{op}) \quad (3.51)$$

$$s_h = \frac{h \cdot n_{1N} \pm n}{h \cdot n_{1N}} \quad (3.52)$$

Sendo:

s_{op} – Escorregamento de operação;

M_c – Conjugado da carga em p.u. do conjugado nominal;

$V_{A(1)(+)}$ – Tensão de fase de sequência positiva da harmônica fundamental;

V_{Nf} – Tensão de fase nominal do motor;

n – Velocidade operacional do motor;

s_h – Escorregamento de harmônico h.

Dessa forma, fazendo a análise para as possibilidades de combinação dos harmônicos e as componentes simétricas, tem-se:

Quadro 5 – Escorregamento para cada harmônico.

Harmônico de sequência	Componente de sequência	Escorregamento	Equação
+	+	$S_{(h+)(+)}$	$\frac{h \cdot n_{1N} - n}{h \cdot n_{1N}}$ (3.53)
-	-	$S_{(h-)(-)}$	
+	-	$S_{(h+)(-)}$	$\frac{h \cdot n_{1N} + n}{h \cdot n_{1N}}$ (3.54)
-	+	$S_{(h-)(+)}$	

Fonte: O autor.

Sendo:

$s_{(h+)(+)}$ – Escorregamento de sequência positiva do harmônico de sequência positiva;

$s_{(h-)(-)}$ – Escorregamento de sequência negativa do harmônico de sequência negativa;

$s_{(h+)(-)}$ – Escorregamento de sequência negativa do harmônico de sequência positiva;

$s_{(h-)(+)}$ – Escorregamento de sequência positiva do harmônico de sequência negativa.

Já as resistências são corrigidas levando em consideração as velocidades relativas harmônicas:

Quadro 6 – Velocidade relativa harmônica.

Harmônico de sequência	Componente de sequência	Velocidade relativa	Equação
+	+	$n_{2(h+)(+)}$	$h \cdot n_{1N} - n_N$ (3.55)
-	-	$n_{2(h-)(-)}$	
+	-	$n_{2(h+)(-)}$	$h \cdot n_{1N} + n_N$ (3.56)
-	+	$n_{2(h-)(+)}$	

Fonte: O autor.

Sendo:

$n_{2(h+)(+)}$ – Velocidade relativa harmônica de componente de sequência positiva para o harmônico de sequência positiva;

$n_{2(h-)(-)}$ – Velocidade relativa harmônica de componente de sequência negativa para o harmônico de sequência negativa;

$n_{2(h+)(-)}$ – Velocidade relativa harmônica de componente de sequência negativa para o harmônico de sequência positiva;

$n_{2(h-)(+)}$ – Velocidade relativa harmônica de componente de sequência positiva para o harmônico de sequência negativa.

Com base nas velocidades relativas harmônicas, é possível obter as resistências de sequência positiva e negativa dos harmônicos de sequência positiva e negativa, para o rotor:

$$R_{2(h)(\pm)} = K_1 \cdot e^{K_2 \cdot \sqrt{n_{2(h)(\pm)}}} \quad (3.57)$$

Sendo:

$R_{2(h)(\pm)}$ – Resistência do rotor de sequência positiva ou negativa para cada harmônico de sequência positiva ou negativa;

$n_{2(h)(\pm)}$ – Velocidade relativa de sequência positiva ou negativa para cada harmônico de sequência positiva ou negativa.

Quadro 7 – Resistência para cada harmônico.

Harmônico de sequência	Componente de sequência	Resistencia	Equação
+	+	$R_{2(h+)(+)}$	$K_1 \cdot e^{K_2 \cdot \sqrt{n_{2(h+)(+)}}} \quad (3.58)$
+	-	$R_{2(h+)(-)}$	$K_1 \cdot e^{K_2 \cdot \sqrt{n_{2(h+)(-)}}} \quad (3.59)$
-	+	$R_{2(h-)(+)}$	$K_1 \cdot e^{K_2 \cdot \sqrt{n_{2(h-)(+)}}} \quad (3.60)$
-	-	$R_{2(h-)(-)}$	$K_1 \cdot e^{K_2 \cdot \sqrt{n_{2(h-)(-)}}} \quad (3.61)$

Fonte: O autor.

As constantes K1 e K2 podem ser obtidas pela relação entre as condições de rotor bloqueado e rotor em funcionamento nominal:

$$K_1 = \frac{R_{2P}}{e^{K_2 \cdot \sqrt{n_{1N}}}} \quad (3.62)$$

$$K_2 = \frac{\ln\left(\frac{R_{2N}}{R_{2P}}\right)}{\sqrt{n_{2N}} - \sqrt{n_{1N}}} \quad (3.63)$$

Sendo:

$R_{2(h+)(+)}$ – Resistência do rotor de componente positiva do harmônico de sequência positiva;

$R_{2(h+)(-)}$ – Resistência do rotor de componente negativa do harmônico de sequência positiva;

$R_{2(h-)(+)}$ – Resistência do rotor de componente positiva do harmônico de sequência negativa;

$R_{2(h-)(-)}$ – Resistência do rotor de componente negativa do harmônico de sequência negativa;

K_1 – constante 1;

K_2 – constante 2.

3.4 Correntes do circuito equivalente de seqüência positiva e negativa para cada harmônico seqüência positiva e negativa

Portanto, com as tensões e os parâmetros estabelecidos, é possível determinar as correntes no estator e no rotor, apenas resolvendo os circuitos das Figuras 6 e 7 conforme Lima (2016).

3.4.1 Correntes de seqüência positiva para a componente fundamental

$$I_{1(1)(+)} = \frac{V_{A(1)(+)}}{R_{1(1)(+)} + j \cdot X_{1(1)(+)} + \frac{\left(\frac{R_{2(1)(+)}}{s_{(1)(+)}} + j \cdot X_{2P(1)(+)} \right) \cdot \frac{j \cdot X_{M(1)(+)} \cdot R_{M(h1)(+)}}{R_{M(1)(+)} + j \cdot X_{M(1)(+)}}}{\frac{R_{2(1)(+)}}{s_{(1)(+)}} + j \cdot X_{2P(1)(+)} + \frac{j \cdot X_{M(1)(+)} \cdot R_{M(1)(+)}}{R_{M(1)(+)} + j \cdot X_{M(1)(+)}}} \quad (3.64)$$

$$E_{2(1)(+)} = V_{A(1)(+)} - I_{1(1)(+)} \cdot (R_{1(1)(+)} + j \cdot X_{1(1)(+)}) \quad (3.65)$$

$$I_{2(1)(+)} = \frac{E_{2(1)(+)}}{\frac{R_{2(1)(+)}}{s_{(1)(+)}} + j \cdot X_{2P(1)(+)}} \quad (3.66)$$

Sendo:

$I_{1(1)(+)}$ – Corrente no estator de seqüência positiva para a componente fundamental;

$I_{2(1)(+)}$ – Corrente no rotor de seqüência positiva para a componente fundamental;

$E_{2(1)(+)}$ – Tensão no rotor de seqüência positiva para a componente fundamental.

3.4.2 Correntes de seqüência negativa para a componente fundamental

$$I_{1(1)(-)} = \frac{V_{A(1)(-)}}{R_{1(1)(-)} + j \cdot X_{1(1)(-)} + \frac{\left(\frac{R_{2(1)(-)}}{s_{(1)(-)}} + j \cdot X_{2P(1)(-)} \right) \cdot \frac{j \cdot X_{M(1)(-)} \cdot R_{M(h1)(-)}}{R_{M(1)(-)} + j \cdot X_{M(1)(-)}}}{\frac{R_{2(1)(-)}}{s_{(1)(-)}} + j \cdot X_{2P(1)(-)} + \frac{j \cdot X_{M(1)(-)} \cdot R_{M(1)(-)}}{R_{M(1)(-)} + j \cdot X_{M(1)(-)}}} \quad (3.67)$$

$$E_{2(1)(-)} = V_{A(1)(-)} - I_{1(1)(-)} \cdot (R_{1(1)(-)} + j \cdot X_{1(1)(-)}) \quad (3.68)$$

$$I_{2(1)(+)} = \frac{E_{2(1)(-)}}{\frac{R_{2(1)(-)}}{s(1)(-)} + j \cdot X_{2P(1)(-)}} \quad (3.69)$$

Sendo:

$I_{1(1)(-)}$ – Corrente no estator de seqüência negativa para a componente fundamental;

$I_{2(1)(-)}$ – Corrente no rotor de seqüência negativa para a componente fundamental;

$E_{2(1)(-)}$ – Tensão no rotor de seqüência negativa para a componente fundamental.

3.4.3 Correntes de seqüência positiva para os harmônicos de ordem h

$$I_{1(h)(+)} = \frac{V_{A(h)(+)}}{R_{1(h)(+)} + j \cdot X_{1(h)(+)} + \frac{\left(\frac{R_{2(h)(+)}}{s(h)(+)} + j \cdot X_{2P(h)(+)} \right) \cdot \frac{j \cdot X_{M(h)(+)} \cdot R_{M(h)(+)}}{R_{M(h)(+)} + j \cdot X_{M(h)(+)}}}{\frac{R_{2(h)(+)}}{s(h)(+)} + j \cdot X_{2P(h)(+)} + \frac{j \cdot X_{M(h)(+)} \cdot R_{M(h)(+)}}{R_{M(h)(+)} + j \cdot X_{M(h)(+)}}} \quad (3.70)$$

$$E_{2(h)(+)} = V_{A(h)(+)} - I_{1(h)(+)} \cdot (R_{1(h)(+)} + j \cdot X_{1(h)(+)}) \quad (3.71)$$

$$I_{2(h)(+)} = \frac{E_{2(h)(+)}}{\frac{R_{2(h)(+)}}{s(h)(+)} + j \cdot X_{2P(h)(+)}} \quad (3.72)$$

Sendo:

$I_{1(h)(+)}$ – Corrente no estator de seqüência positiva para os harmônicos de ordem h;

$I_{2(h)(+)}$ – Corrente no rotor de seqüência positiva para os harmônicos de ordem h.

$E_{2(h)(+)}$ – Tensão no rotor de seqüência positiva para os harmônicos de ordem h.

3.4.4 Correntes de sequência negativa para os harmônicos de ordem h

$$I_{1(h)(-)} = \frac{V_{A(h)(-)}}{R_{1(h)(-)} + j \cdot X_{1(h)(-)} + \frac{\left(\frac{R_{2(h)(-)}}{s(h)(-)} + j \cdot X_{2P(h)(-)} \right) \cdot \frac{j \cdot X_{M(h)(-)} \cdot R_{M(h)(-)}}{R_{M(h)(-)} + j \cdot X_{M(h)(-)}}}{\frac{R_{2(h)(-)}}{s(h)(-)} + j \cdot X_{2P(h)(-)} + \frac{j \cdot X_{M(h)(-)} \cdot R_{M(h)(-)}}{R_{M(h)(-)} + j \cdot X_{M(h)(-)}}} \quad (3.73)$$

$$E_{2(h)(-)} = V_{A(h)(-)} - I_{1(h)(-)} \cdot (R_{1(h)(-)} + j \cdot X_{1(h)(-)}) \quad (3.74)$$

$$I_{2(h)(-)} = \frac{E_{2(h)(-)}}{\frac{R_{2(h)(-)}}{s(h)(-)} + j \cdot X_{2P(h)(-)}} \quad (3.75)$$

Sendo:

$I_{1(h)(-)}$ – Corrente no estator de sequência negativa para os harmônicos de ordem h;

$I_{2(h)(-)}$ – Corrente no rotor de sequência negativa para os harmônicos de ordem h;

$E_{2(h)(-)}$ – Tensão no rotor de sequência negativa para os harmônicos de ordem h.

3.5 Cálculo das perdas totais

Conhecidas as correntes e as resistências dos circuitos equivalentes, é possível calcular as perdas da seguinte forma, segundo Lima (2016):

$$\begin{aligned} \text{Perdas}_{\text{Estator}} &= 3 * I_{1(1)(+)}^2 * R_{1(1)(+)} + 3 * I_{1(1)(-)}^2 * R_{1(1)(-)} \\ &+ \sum_{h>1}^{h=\infty} 3 * I_{1(h)(+)}^2 * R_{1(h)(+)} + \sum_{h>1}^{h=\infty} 3 * I_{1(h)(-)}^2 * R_{1(h)(-)} \end{aligned} \quad (3.76)$$

$$\begin{aligned} \text{Perdas}_{\text{Rotor}} &= 3 * I_{2(1)(+)}^2 * R_{2(1)(+)} + 3 * I_{2(1)(-)}^2 * R_{2(1)(-)} \\ &+ \sum_{h>1}^{h=\infty} 3 * I_{2(h)(+)}^2 * R_{2(h)(+)} + \sum_{h>1}^{h=\infty} 3 * I_{2(h)(-)}^2 * R_{2(h)(-)} \end{aligned} \quad (3.77)$$

$$\begin{aligned} \text{Perdas}_{\text{Ferro}} &= 3 * \frac{E_{2(1)(+)}^2}{R_{m(1)(+)}} + 3 * \frac{E_{2(1)(-)}^2}{R_{m(1)(-)}} + \sum_{h>1}^{h=\infty} 3 * \frac{E_{2(h)(+)}^2}{R_{m(h)(+)}} \\ &+ \sum_{h>1}^{h=\infty} 3 * \frac{E_{2(h)(-)}^2}{R_{m(h)(-)}} \end{aligned} \quad (3.78)$$

$$Perdas_{Totais} = Perdas_{Estator} + Perdas_{Rotor} + Perdas_{Ferro} \quad (3.79)$$

Sendo:

$Perdas_{Estator}$ – Perdas no estator do MIT;

$Perdas_{Rotor}$ – Perdas no rotor do MIT;

$Perdas_{Ferro}$ – Perdas no ferro do MIT;

$Perdas_{Totais}$ – Perdas totais do MIT.

3.6 Cálculo do conjugado eletromagnético

$$C_{(1)(+)} = \frac{180 * R_{2(1)(+)} * I_{2(1)(+)}^2}{2 * \Pi * n_{1N}} * \frac{1}{s_{(1)(+)}} \quad (3.80)$$

$$C_{(1)(-)} = \frac{180 * R_{2(1)(-)} * I_{2(1)(-)}^2}{2 * \Pi * n_{1N}} * \frac{1}{s_{(1)(-)}} \quad (3.81)$$

$$C_{(h)(+)} = \frac{180 * R_{2(h)(+)} * I_{2(h)(+)}^2}{2 * \Pi * h * n_{1N}} * \frac{1}{s_{(h)(+)}} \quad (3.82)$$

$$C_{(h)(-)} = \frac{180 * R_{2(h)(-)} * I_{2(h)(-)}^2}{2 * \Pi * h * n_{1N}} * \frac{1}{s_{(h)(-)}} \quad (3.83)$$

$$C_{total} = C_{(1)(+)} - C_{(1)(-)} \pm \sum_h C_{(h)(+)} \pm \sum_h C_{(h)(-)} \quad (3.84)$$

Sendo:

$C_{(1)(+)}$ – Conjugado eletromagnético produzido pela componente de sequência positiva da componente harmônica fundamental;

$C_{(1)(-)}$ – Conjugado eletromagnético produzido pela componente de sequência negativa da componente harmônica fundamental;

$C_{(h)(+)}$ – Conjugado eletromagnético produzido pela componente de sequência positiva da componente harmônica de ordem h;

$C_{(h)(-)}$ – Conjugado eletromagnético produzido pela componente de sequência negativa da componente harmônica de ordem h;

C_{total} – Conjugado eletromagnético total.

Nota: O sinal “ \pm ” da equação 3.84 dependerá do Quadro 4. Se o sentido do campo for o mesmo do sentido de rotação do rotor, o sinal será “+”, se o sentido do campo girante for o contrário do sentido de rotação do rotor, o sinal será “-”.

3.7 Cálculo da Potência Mecânica

$$Pot_{(1)(+)} = 3 * R_{2(1)(+)} * I_{2(1)(+)}^2 * \frac{1 - s_{(1)(+)}}{s_{(1)(+)}} \quad (3.85)$$

$$Pot_{(1)(-)} = 3 * R_{2(1)(-)} * I_{2(1)(-)}^2 * \frac{1 - s_{(1)(-)}}{s_{(1)(-)}} \quad (3.86)$$

$$Pot_{(h)(+)} = 3 * R_{2(h)(+)} * I_{2(h)(+)}^2 * \frac{1 - s_{(h)(+)}}{s_{(h)(+)}} \quad (3.87)$$

$$Pot_{(h)(-)} = 3 * R_{2(h)(-)} * I_{2(h)(-)}^2 * \frac{1 - s_{(h)(-)}}{s_{(h)(-)}} \quad (3.88)$$

$$Pot_{mec} = Pot_{(1)(+)} + Pot_{(1)(-)} + \sum_h^{\infty} Pot_{(h)(+)} + \sum_h^{\infty} Pot_{(h)(-)} \quad (3.89)$$

Sendo:

$Pot_{(1)(+)}$ – Potência mecânica produzida pela componente de sequência positiva da componente harmônica fundamental;

$Pot_{(1)(-)}$ – Potência mecânica produzida pela componente de sequência negativa da componente harmônica fundamental;

$Pot_{(h)(+)}$ – Potência mecânica produzida pela componente de sequência positiva da componente harmônica de ordem h;

$Pot_{(h)(-)}$ – Potência mecânica produzida pela componente de sequência negativa da componente harmônica de ordem h;

Pot_{mec} – Potência mecânica total.

3.8 Cálculo do Rendimento

$$\eta_{motor} = \frac{Pot_{Mec}}{Pot_{Mec} + Perdas_{Totais}} \quad (3.90)$$

Sendo:

η_{motor} – Rendimento do motor.

3.9 Representação da tensão e corrente no domínio do tempo

Até essa parte do trabalho, as tensões e correntes foram tratadas como grandezas fasoriais. O objetivo deste tópico é fazer a representação desses elementos no domínio do tempo. É importante fazer essas representações para melhor visualização do desequilíbrio e distorção harmônica.

Uma vez conhecendo os módulos e os argumentos das tensões e correntes para a fase A, de sequência positiva e negativa para cada harmônico, pode-se representar fasorialmente as outras fases (B e C) em função da fase A. Para este estudo em específico, as componentes de sequência 0 das correntes podem ser desconsideradas.

$$\dot{V}_{A(h)} = \dot{V}_{A(h)(0)} + \dot{V}_{A(h)(+)} + \dot{V}_{A(h)(-)} \quad (3.91)$$

$$\dot{V}_{B(h)} = \dot{V}_{A(h)(0)} + \dot{V}_{A(h)(+)} * a^2 + \dot{V}_{A(h)(-)} * a \quad (3.92)$$

$$\dot{V}_{C(h)} = \dot{V}_{A(h)(0)} + \dot{V}_{A(h)(+)} * a + \dot{V}_{A(h)(-)} * a^2 \quad (3.93)$$

$$\dot{I}_{A(h)} = \dot{I}_{A(h)(+)} + \dot{I}_{A(h)(-)} \quad (3.94)$$

$$\dot{I}_{B(h)} = \dot{I}_{A(h)(+)} * a^2 + \dot{I}_{A(h)(-)} * a \quad (3.95)$$

$$\dot{I}_{C(h)} = \dot{I}_{A(h)(+)} * a + \dot{I}_{A(h)(-)} * a^2 \quad (3.96)$$

Desse modo, é possível obter as tensões e correntes de cada fase no domínio do tempo, utilizando a série de Fourier, para compor a forma de onda original, conforme já explicado e conforme Alves (2010).

3.9.1 Tensões no domínio do tempo

$$V_{A(t)} = \sqrt{2} * |\dot{V}_{A(1)}| * \sin(w * t + \alpha_{A(1)}) + \sum_{h>1}^{\infty} \sqrt{2} * |\dot{V}_{A(h)}| * \sin(h * w * t + \alpha_{A(h)}) \quad (3.97)$$

$$V_{B(t)} = \sqrt{2} * |\dot{V}_{B(1)}| * \sin(w * t + \alpha_{A(1)}) + \sum_{h>1}^{\infty} \sqrt{2} * |\dot{V}_{B(h)}| * \sin(h * w * t + \alpha_{B(h)}) \quad (3.98)$$

$$V_{C(t)} = \sqrt{2} * |\dot{V}_{C(1)}| * \sin(w * t + \alpha_{A(1)}) + \sum_{h>1}^{\infty} \sqrt{2} * |\dot{V}_{C(h)}| * \sin(h * w * t + \alpha_{C(h)}) \quad (3.99)$$

$$w = 2 * \Pi * f \quad (3.100)$$

3.9.2 Correntes no domínio do tempo

$$I_{A(t)} = \sqrt{2} * |\dot{I}_{A(1)}| * \sin(w * t + \alpha_{A(1)}) + \sum_{h>1}^{\infty} \sqrt{2} * |\dot{I}_{A(h)}| * \sin(h * w * t + \beta_{A(h)}) \quad (3.101)$$

$$I_{B(t)} = \sqrt{2} * |\dot{I}_{B(1)}| * \sin(w * t + \alpha_{A(1)}) + \sum_{h>1}^{\infty} \sqrt{2} * |\dot{I}_{B(h)}| * \sin(h * w * t + \beta_{B(h)}) \quad (3.102)$$

$$I_{C(t)} = \sqrt{2} * |I_{C(1)}| * \sin(w * t + \alpha_{A(1)}) + \sum_{h>1}^{\infty} \sqrt{2} * |I_{C(h)}| * \sin(h * w * t + \beta_{C(h)}) \quad (3.103)$$

3.10 Considerações finais

Foi dissertado sobre a metodologia utilizada para a análise de motores operando sob alimentação não ideal. É importante destacar que o principal objeto de análise deste trabalho é o rendimento do MIT. A seguir será feito o estudo de casos com base na aplicação da metodologia estudada.

4 ESTUDO DE CASOS

Após definir o desequilíbrio, a distorção harmônica e estudar a metodologia que analisa o impacto dessas condições em motores de indução trifásicos, este capítulo tem o objetivo realizar o estudo do rendimento de um motor real operando sob condições não ideais de alimentação. Para isso, o MATLAB foi utilizado para desenvolver o software que realiza as simulações.

4.1 Apresentação do software

O software desenvolvido baseia-se completamente na metodologia apresentada. A interface foi criada com base em Becker, *et al.* (2010) utilizando a plataforma GUIDE do MATLAB, com o objetivo de facilitar as simulações.

Figura 9 – Interface do software desenvolvido.

software_novo

DADOS DE ENTRADA

Un 380
Pn 2200
lp 6.7

Mk 3
Mp 3
nN 3450
n1N 3600
fp 0.84
n 0.819
Categoria 0.68

MODULO FASE
Va 219.3931 0
Vb 219.3931 -120
Vc 219.3931 -240

K5 0
K7 0
K11 0
K13 0
K17 0
K19 0
K23 0
K25 0

MC% 100

CALCULAR

TENSÕES POR FASE

V1p	219.393	0.00
V1n	0	0.00
V5p	0	0.00
V5n	0	0.00
V7p	0	0.00
V7n	0	0.00
V11p	0	0.00
V11n	0	0.00
V13p	0	0.00
V13n	0	0.00
V17p	0	0.00
V17n	0	0.00
V19p	0	0.00
V19n	0	0.00
V23p	0	0.00
V23n	0	0.00
V25p	0	0.00
V25n	0	0.00

CORRENTES NO ESTATOR

I1_1p	4.85865	-32.86
I1_1n	0	0.00
I1_5p	0	0.00
I1_5n	0	0.00
I1_7p	0	0.00
I1_7n	0	0.00
I1_11p	0	0.00
I1_11n	0	0.00
I1_13p	0	0.00
I1_13n	0	0.00
I1_17p	0	0.00
I1_17n	0	0.00
I1_19p	0	0.00
I1_19n	0	0.00
I1_23p	0	0.00
I1_23n	0	0.00
I1_25p	0	0.00
I1_25n	0	0.00

CORRENTES NO ROTOR

I2_1p	3.7925	
I2_1n	0	
I2_5p	0	
I2_5n	0	
I2_7p	0	
I2_7n	0	
I2_11p	0	
I2_11n	0	
I2_13p	0	
I2_13n	0	
I2_17p	0	
I2_17n	0	
I2_19p	0	
I2_19n	0	
I2_23p	0	
I2_23n	0	
I2_25p	0	
I2_25n	0	

RESISTÊNCIAS DO ESTATOR

R1_1p	2.43852
R1_1n	0
R1_5p	0
R1_5n	0
R1_7p	0
R1_7n	0
R1_11p	0
R1_11n	0
R1_13p	0
R1_13n	0
R1_17p	0
R1_17n	0
R1_19p	0
R1_19n	0
R1_23p	0
R1_23n	0
R1_25p	0
R1_25n	0

RESISTÊNCIAS DO ROTOR

R2_1p	2.21678
R2_1n	0
R2_5p	0
R2_5n	0
R2_7p	0
R2_7n	0
R2_11p	0
R2_11n	0
R2_13p	0
R2_13n	0
R2_17p	0
R2_17n	0
R2_19p	0
R2_19n	0
R2_23p	0
R2_23n	0
R2_25p	0
R2_25n	0

PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE NOMINAL

R1	2.4385	I1N	4.8586
R2	2.2168	I2N	3.7925
RM	568.5005	sn	0.0417
X1	2.3836	sk	0.2429
X2	6.3070	s	4.1687
XM	95.6992		
FD(100%)	0.0000		
THD(100)	0.0000		
fp2N	0.9910	k1	2.05436
fi2N	7.6911	k2	0.0062126
FIN	32.8599		

DADOS DE SAÍDA

TENSÕES EFIC.

Va	219.3931
Vb	219.3931
Vc	219.3931
V	219.3931

CORRENTES EFIC.

Ia	4.8586
Ib	4.8586
Ic	4.8586
I	4.8586

CONJUGADO NOMINAL

MN	6.0894	N.m
----	--------	-----

PERDAS NOMINAIS NO ROTOR

PJ2N	95.6522	W
------	---------	---

PERDAS NOMINAIS NO ESTATOR

PJ1N	172.6947	W
------	----------	---

CONJUGADO DESENVOLVIDO

MD	6.0894	N.m
----	--------	-----

PERDAS ROTOR COM CARGA

PJ2	95.6522	W
-----	---------	---

PERDAS ESTATOR COM CARGA

PJ1	172.6947	W
-----	----------	---

VELOCIDADE CARGA

nc	3450.000	rpm
----	----------	-----

RELAÇÃO ENTRE POTÊNCIAS

PC/PN	1.0000
-------	--------

POTÊNCIA DE ENTRADA NOMINAL

PentN	2686.2027	W
-------	-----------	---

POTÊNCIA DE ENTRADA COM CARGA

PentC	2686.2027	W
-------	-----------	---

FATOR DE POTÊNCIA EFICAZ

fp_e	0.8400
------	--------

PERDAS A VAZIO CTE

PJ0	217.8558	W
-----	----------	---

PERDAS NOMINAIS A VAZIO

PJ0N	217.8558	W
------	----------	---

PERDAS TOTAIS

PTC	486.2027	W
-----	----------	---

POTÊNCIA DESENVOLVIDA

PD	2200.000	W
----	----------	---

RENDIMENTO DESENVOLVIDO

renaim carga	0.8190	%
--------------	--------	---

PERDAS TOTAIS NOMINAIS

PTN	486.2027	W
-----	----------	---

POTÊNCIA NOMINAL

PN	2200.000	W
----	----------	---

RENDIMENTO NOMINAL

rendim. nom.	0.8190	%
--------------	--------	---

Fonte: O autor.

4.2 Motor utilizado na simulação

O motor utilizado na simulação foi um MIT da WEG, disponibilizado no laboratório de acionamentos elétricos da Universidade Federal de Uberlândia. Os dados de placa do motor estão listados abaixo, extraídos de Oliveira (2018). Todas as simulações foram efetuadas com a ligação do motor para a tensão de linha de 380V.

Quadro 8 – Dados de placa do MIT.

MOTOR DE INDUÇÃO - ROTOR EM GAIOLA - CATEGORIA N		
Fabricante: WEG	Fabricação: 07/11/2018	Nº série: 1003425323
Carcaça: 90S	Nº Fases: 3	kW(cv): 2,2(3,0)
rpm: 3450	Regime de Serviço: S1	Fator de serviço: 1,15
Temperatura ambiente máxima : 40°C	Classe de isolamento: F	Frequência: 60Hz
Tensão: 220/380V	Corrente: 8,39/4,86A	Ip/In: 6,7
Cmax/Cn: 3	Cp/Cn: 3	Rendimento(100%): 81,9%
Fator de Potência: 0,84		

Fonte: O autor.

4.3 Resultados das simulações

Como o objetivo é analisar o comportamento da potência mecânica, perdas totais e conseqüentemente o rendimento do motor operando em condições de alimentação não ideal, foram realizadas nove simulações, sendo a primeira delas o motor operando sob condições ideais de alimentação, que foi utilizado como base de comparação para as demais simulações. O motor foi simulado para os carregamentos de 100%, 75% e 50% em relação ao conjugado nominal, a fim de observar o impacto das condições de alimentação para diferentes carregamentos.

4.3.1 Simulação 1: MIT operando em condições ideais de alimentação

Para a simulação do MIT operando em condições da rede ideais, os parâmetros de alimentação são:

Tabela 1 – Tensões de alimentação em módulo e defasagem para a simulação 1.

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensão (Vrms)	219,3931	219,3931	219,3931
Defasagem (graus)	0	-120	-240

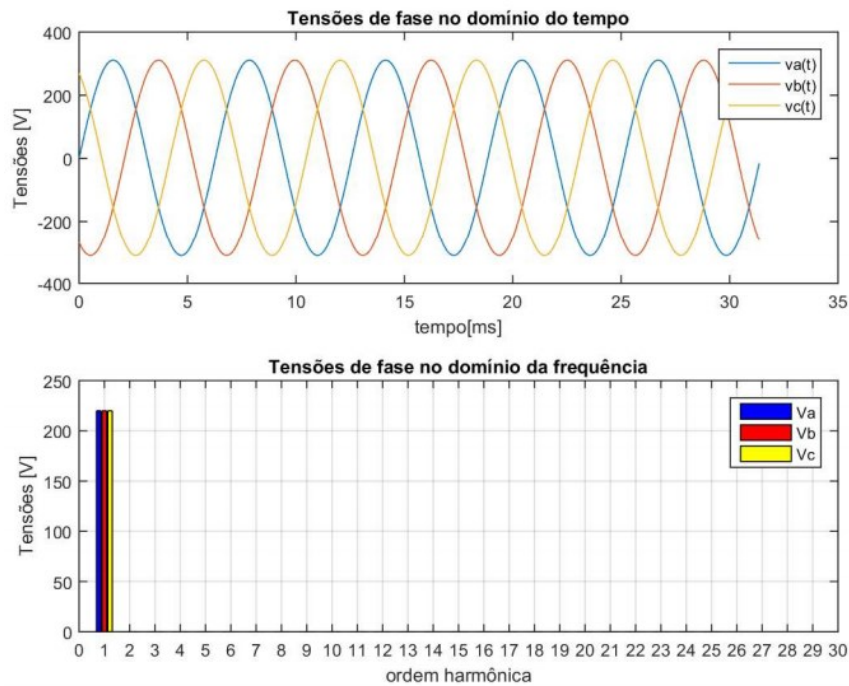
Fonte: O autor.

Tabela 2 – Conteúdo harmônico individual em porcentagem da simulação 1.

Ordem harmônica	Porcentagem da tensão harmônica
5ª ordem	0
7ª ordem	0
11ª ordem	0
13ª ordem	0
17ª ordem	0
19ª ordem	0
23ª ordem	0
25ª ordem	0

Fonte: O autor.

Figura 10 – Gráfico de tensão e seu espectro harmônico para a simulação com alimentação ideal.



Fonte: O autor.

Os parâmetros do circuito equivalente nominal obtidos na simulação foram:

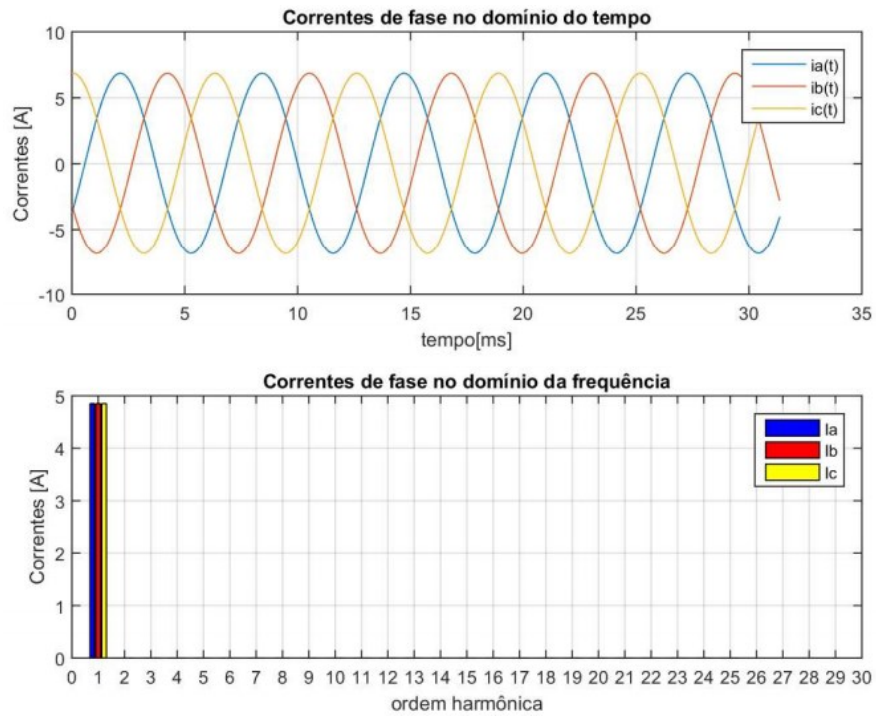
Tabela 3 – Parâmetros do circuito equivalente para a simulação 1.

$R_1(\Omega)$	$X_1(\Omega)$	$R_M(\Omega)$	$X_M(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$X_2(\Omega)$
2,4385	2,5344	566,3386	95,6125	2,2099	6,272

Fonte: O autor.

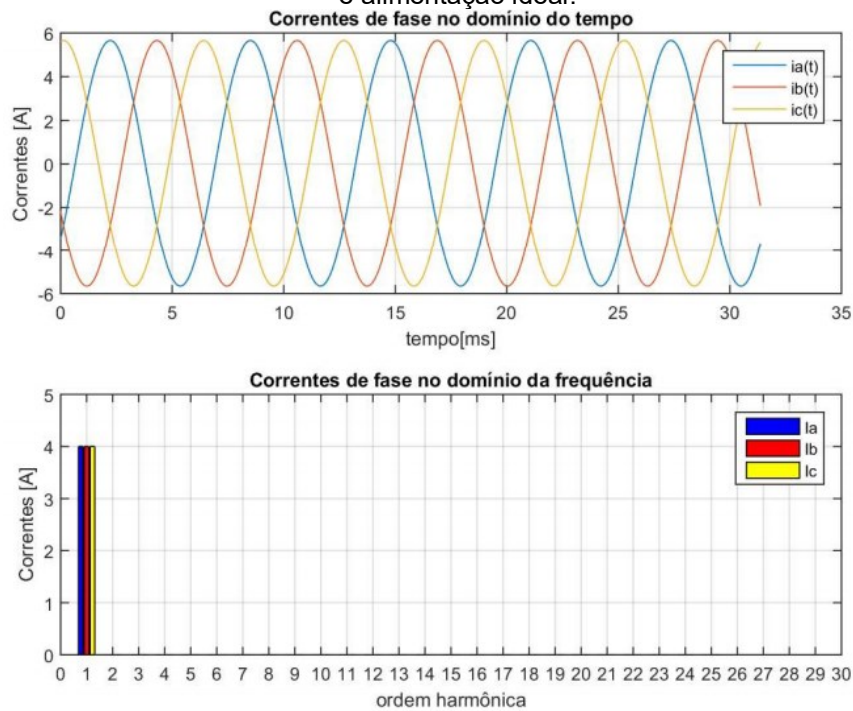
Os resultados das simulações para os diferentes carregamentos foram:

Figura 11 – Gráfico de corrente e seu espectro harmônico para a simulação de 100% de carregamento e alimentação ideal.



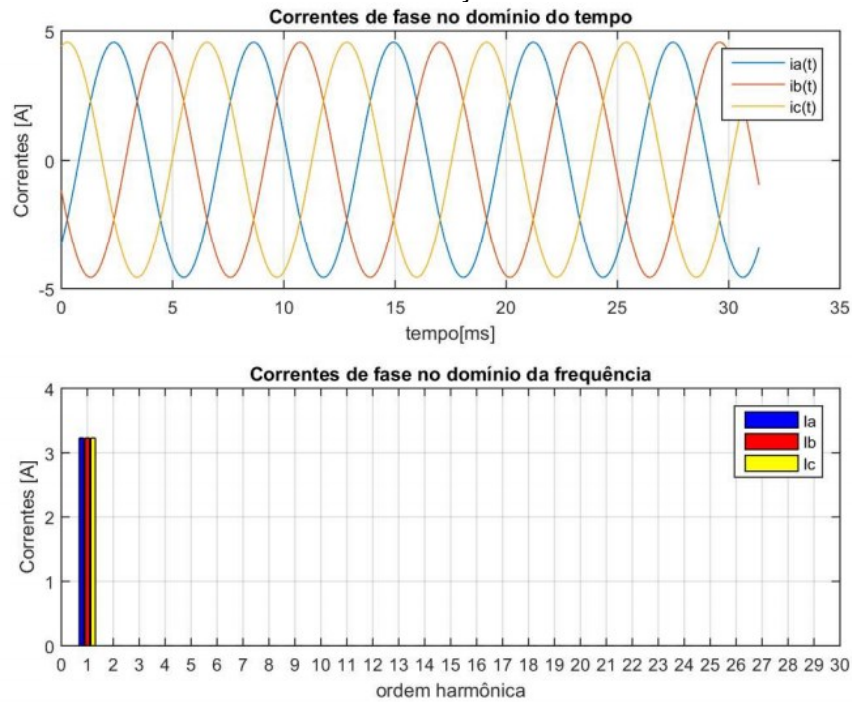
Fonte: O autor.

Figura 12 – Gráfico de corrente e seu espectro harmônico para a simulação de 75% de carregamento e alimentação ideal.



Fonte: O autor.

Figura 13 – Gráfico de corrente e seu espectro harmônico para a simulação de 50% de carregamento e alimentação ideal.



Fonte: O autor.

Tabela 4 – Parâmetros obtidos na simulação 1.

	Carregamento		
	100%	75%	50%
Conjugado [N.m]	6,0893	4,6561	3,1663
Velocidade [rpm]	3449,9616	3488,9190	3526,6090
Tensão [V]	219,3931	219,3931	219,4040
Corrente [A]	4,8586	4,0039	3,2221
Escorregamento [%]	4,1680	3,0856	2,0386
Perdas Estator [W]	172,7185	117,2834	76,1854
Perdas Ferro [W]	217,7824	223,6033	229,2031
Perdas Rotor [W]	95,6809	54,1617	24,3346
Perdas Totais [W]	486,1819	395,0484	329,7232
Potência Mecânica [W]	2199,9181	1701,1501	1169,3288
Potência de Entrada [W]	2686,0999	2096,1985	1499,0520
Rendimento [%]	81,9000	81,1500	78,0000
Fator de Potência	0,8408	0,7964	0,7068
THD[%]	0,0000	0,0000	0,0000
FD [%]	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: O autor.

4.3.2 Simulação 2: MIT operando com a componente fundamental e 5ª harmônica

Para essa simulação, o motor foi submetido a tensão fundamental e 10% de tensão de 5ª ordem harmônica. É importante salientar que a 5ª harmônica possui sequência de fase contrária à componente fundamental, em outras palavras, produz conjugado no sentido contrário ao conjugado produzido pela componente fundamental. As condições da rede de alimentação utilizados na simulação foram estas:

Tabela 5 – Tensões de alimentação em módulo e defasagem para a simulação 2.

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensão (Vrms)	219,3931	219,3931	219,3931
Defasagem (graus)	0	-120	-240

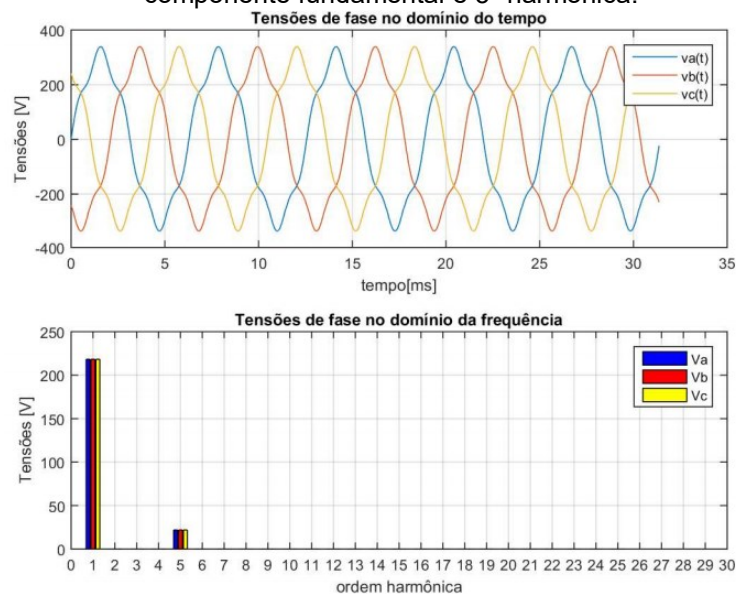
Fonte: O autor.

Tabela 6 – Conteúdo harmônico individual em porcentagem da simulação 2.

Ordem harmônica	Porcentagem da tensão harmônica
5ª ordem	10
7ª ordem	0
11ª ordem	0
13ª ordem	0
17ª ordem	0
19ª ordem	0
23ª ordem	0
25ª ordem	0

Fonte: O autor.

Figura 14 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para a simulação com alimentação da componente fundamental e 5ª harmônica.



Fonte: O autor.

Os parâmetros dos circuitos equivalentes para as harmônicas envolvidas nessa simulação estão listados na Tabela 7, sendo importante destacar o aumento da resistência do rotor, devido à velocidade relativa.

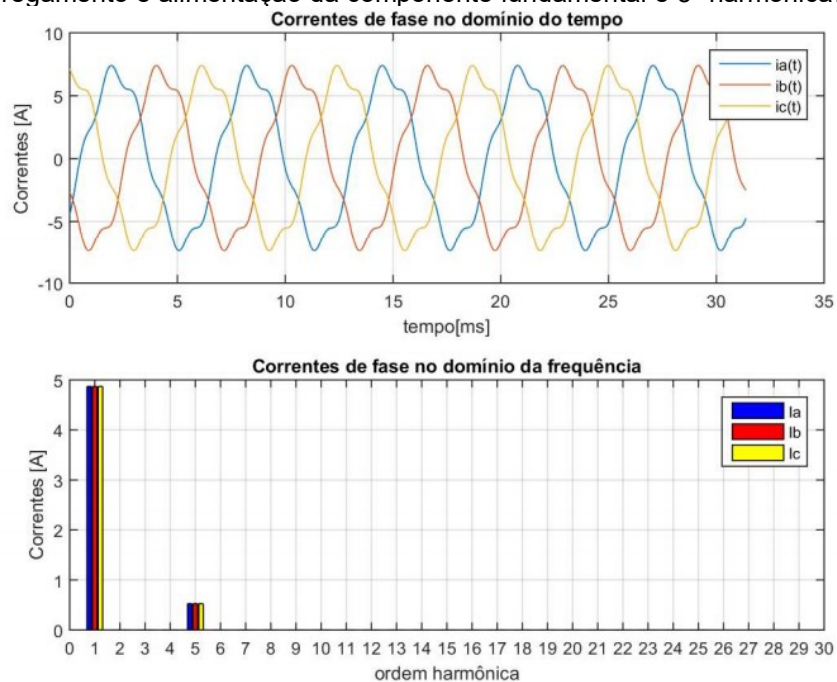
Tabela 7 – Parâmetros dos circuitos equivalentes para a simulação 2.

Ordem harmônica	$R_1(\Omega)$	$X_1(\Omega)$	$R_M(\Omega)$	$X_M(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$X_2(\Omega)$
1ª	2,4385	2,5344	566,34	95,613	2,2099	6,272
5ª	2,4385	12,672	566,34	478,06	5,1321	31,36

Fonte: O autor.

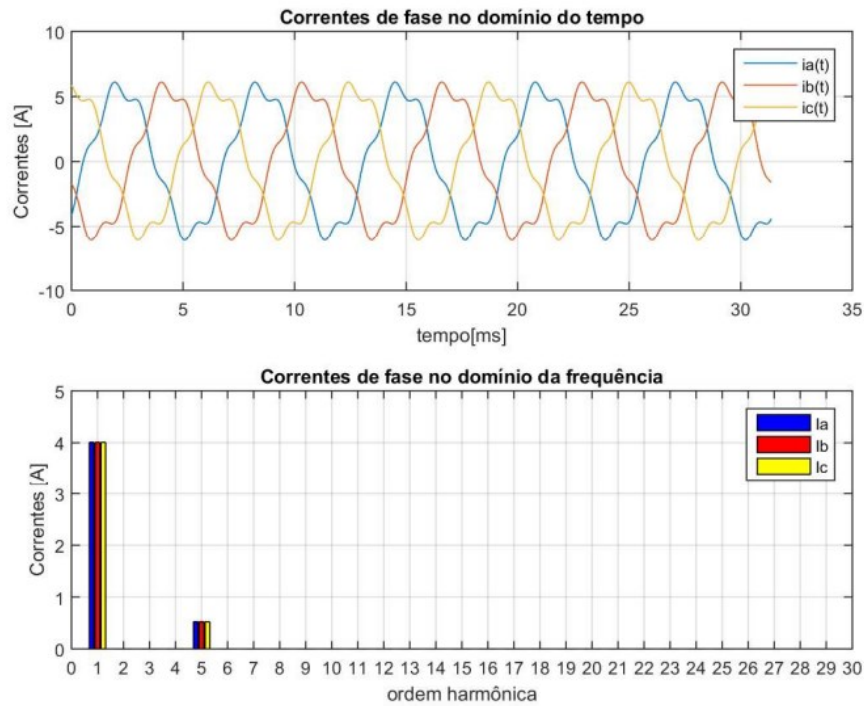
Os resultados das simulações para os diferentes carregamentos foram:

Figura 15 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 100% de carregamento e alimentação da componente fundamental e 5ª harmônica.



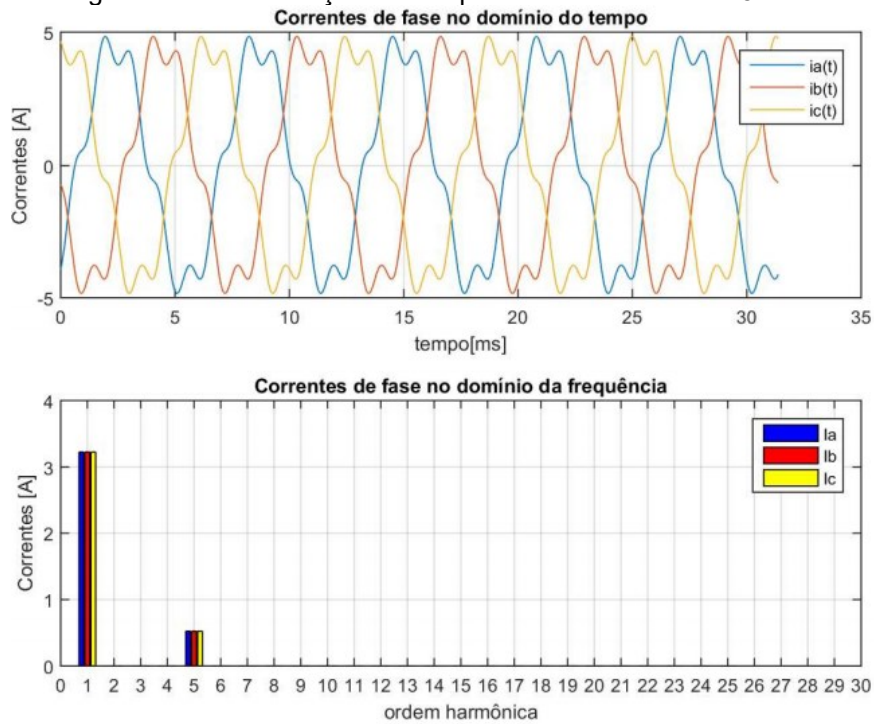
Fonte: O autor.

Figura 16 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 75% de carregamento e alimentação da componente fundamental e 5ª harmônica.



Fonte: O autor.

Figura 17 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 50% de carregamento e alimentação da componente fundamental e 5ª harmônica.



Fonte: O autor.

Tabela 8 – Parâmetros obtidos na simulação 2.

	Carregamento		
	100%	75%	50%
Conjugado [N.m]	6,0831	4,6518	3,1634
Velocidade [rpm]	3448,4075	3487,8064	3525,8873
Tensão [V]	219,4040	219,4040	219,4040
Corrente [A]	4,8980	4,0429	3,2680
Escorregamento [%]	4,2109	3,1165	2,0587
Perdas Estator [W]	175,5008	119,5727	78,1296
Perdas Ferro [W]	216,6805	222,5092	228,1142
Perdas Rotor [W]	100,2898	58,3690	28,2604
Perdas Totais [W]	492,4711	400,4509	334,5042
Potência Mecânica [W]	2196,7137	1699,0397	1168,0287
Potência de Entrada [W]	2689,1848	2099,4906	1502,5329
Rendimento [%]	81,6900	80,9300	77,7400
Fator de Potência	0,8341	0,7890	0,6985
THD[%]	10,0000	10,0000	10,0000
FD [%]	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: O autor.

Para fins de comparação e análises, é interessante representar a variação dos resultados de todas as simulações, em relação aos resultados obtidos para a simulação 1 (alimentação ideal). A Tabela 9 representa a variação em porcentagem da simulação 2 (tensão fundamental e 10% de 5ª harmônica) em relação à simulação 1.

Tabela 9 – Variação dos parâmetros obtidos na simulação 2 em relação à simulação 1.

	Carregamento		
	100%	75%	50%
Conjugado [%]	-0,1018	-0,0924	-0,0916
Velocidade [%]	-0,0450	-0,0319	-0,0205
Tensão [%]	0,0050	0,0050	0,0050
Corrente [%]	0,8109	0,9741	1,4245
Escorregamento [%]	1,0293	1,0014	0,9860
Perdas Estator [%]	1,6109	1,9519	2,5519
Perdas Ferro [%]	-0,5060	-0,4893	-0,4751
Perdas Rotor [%]	4,8169	7,7680	16,1326
Perdas Totais [%]	1,2936	1,3676	1,4500
Potência Mecânica [%]	-0,1457	-0,1241	-0,1112
Potência de Entrada [%]	0,1148	0,1571	0,2322
Rendimento [%]	-0,2564	-0,2711	-0,3333
Fator de Potência [%]	-0,7969	-0,9292	-1,1743

Fonte: O autor.

4.3.3 Simulação 3: MIT operando com a componente fundamental e 7ª harmônica

Essa simulação teve a finalidade de observar o efeito da componente de 7ª ordem harmônica no MIT. É válido lembrar que a componente de 7ª ordem possui sequência de fase positiva, isto é, produz conjugado no mesmo sentido que a componente fundamental. As condições da rede de alimentação utilizadas na simulação estão descritas na Tabela 10.

Tabela 10 – Tensões de alimentação em módulo e defasagem para a simulação 3.

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensão (Vrms)	219,3931	219,3931	219,3931
Defasagem (graus)	0	-120	-240

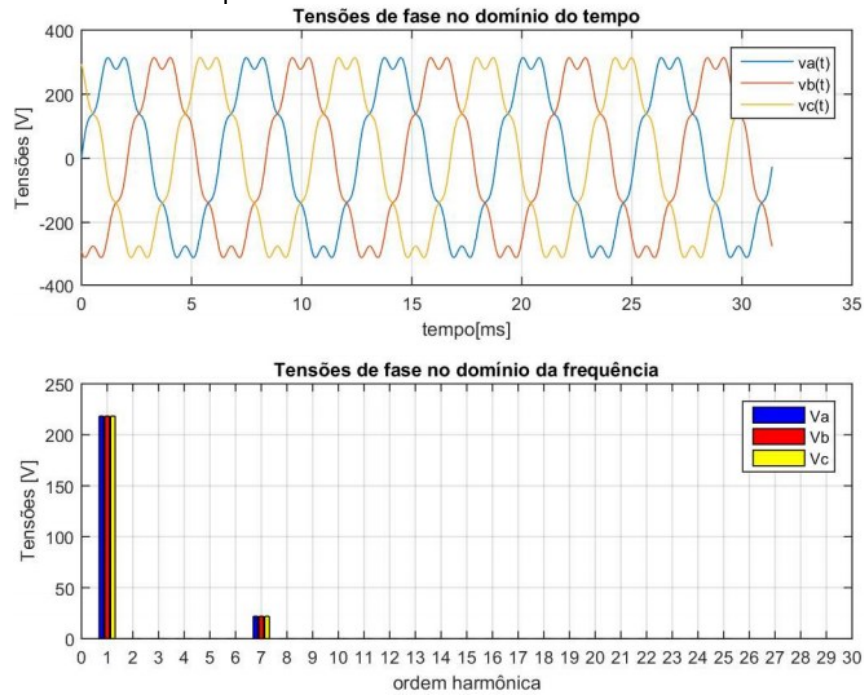
Fonte: O autor.

Tabela 11 – Conteúdo harmônico individual em porcentagem da simulação 3.

Ordem harmônica	Porcentagem da tensão harmônica
5ª ordem	0
7ª ordem	10
11ª ordem	0
13ª ordem	0
17ª ordem	0
19ª ordem	0
23ª ordem	0
25ª ordem	0

Fonte: O autor.

Figura 18 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para a simulação com alimentação da componente fundamental e 7ª harmônica.



Fonte: O autor.

Os parâmetros dos circuitos equivalentes utilizados nessa simulação estão descritos na Tabela 12, dando sempre destaque para a resistência equivalente do rotor.

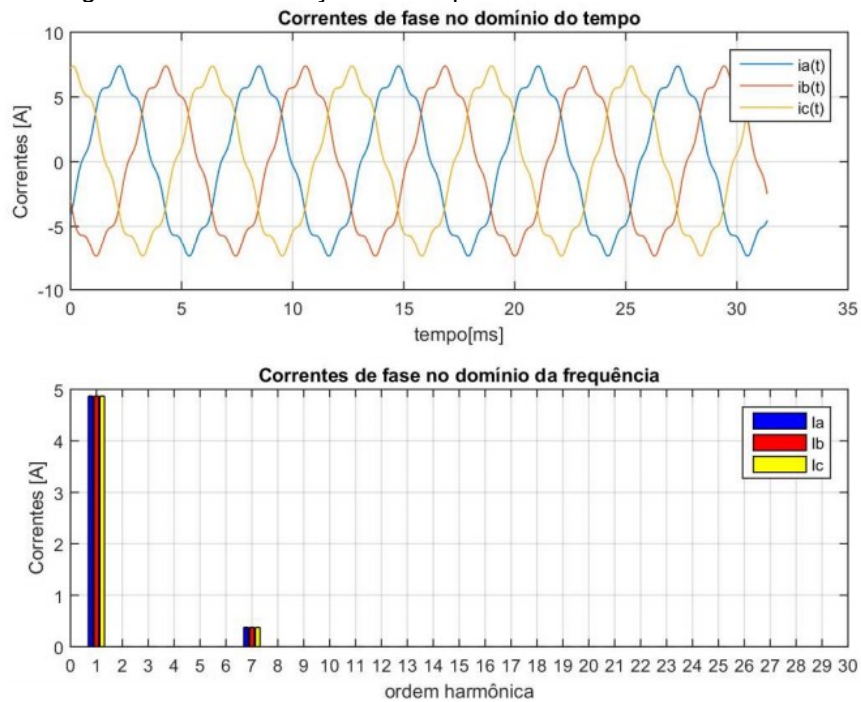
Tabela 12 – Parâmetros dos circuitos equivalentes para a simulação 3.

Ordem harmônica	$R_1(\Omega)$	$X_1(\Omega)$	$R_M(\Omega)$	$X_M(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$X_2(\Omega)$
1ª	2,4385	2,5344	566,34	95,613	2,2099	6,272
7ª	2,4385	17,741	566,34	669,29	5,1651	43,904

Fonte: O autor.

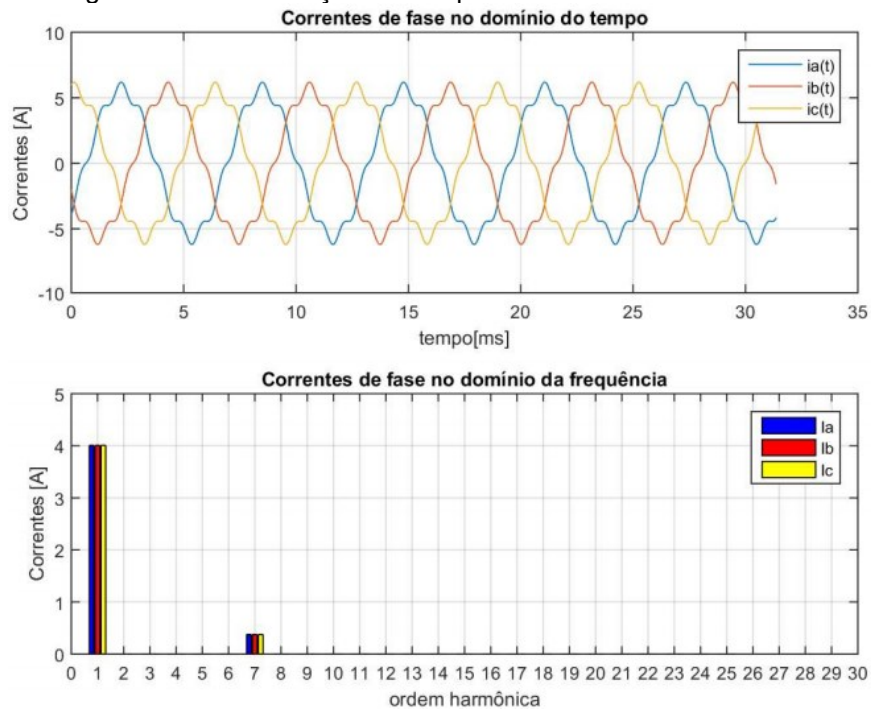
Os resultados das simulações para os diferentes carregamentos são:

Figura 19 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 100% de carregamento e alimentação da componente fundamental e 7ª harmônica.



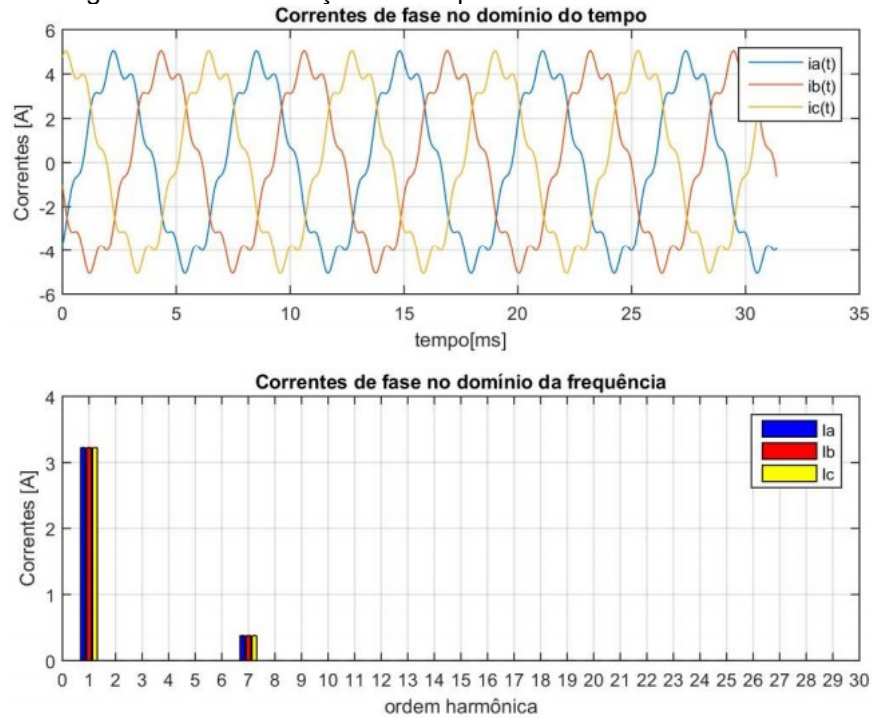
Fonte: O autor.

Figura 20 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 75% de carregamento e alimentação da componente fundamental e 7ª harmônica.



Fonte: O autor.

Figura 21 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 50% de carregamento e alimentação da componente fundamental e 7ª harmônica.



Fonte: O autor.

Tabela 13 – Parâmetros obtidos na simulação 3.

	Carregamento		
	100%	75%	50%
Conjugado [N.m]	6,0856	4,6543	3,1659
Velocidade [rpm]	3448,4075	3487,8064	3525,8873
Tensão [V]	219,4040	219,4040	219,4040
Corrente [A]	4,8843	4,0263	3,2475
Escorregamento [%]	4,2109	3,1165	2,0587
Perdas Estator [W]	174,5234	118,5952	77,1520
Perdas Ferro [W]	216,6852	222,5140	228,1190
Perdas Rotor [W]	98,4996	56,5785	26,4697
Perdas Totais [W]	489,7082	397,6877	331,7407
Potência Mecânica [W]	2197,6100	1699,9457	1168,9441
Potência de Entrada [W]	2687,3182	2097,6334	1500,6848
Rendimento [%]	81,7800	81,0400	77,8900
Fator de Potência	0,8359	0,7915	0,7021
THD[%]	10,0000	10,0000	10,0000
FD [%]	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: O autor.

A Tabela 14 apresenta a variação percentual das grandezas analisadas nessa simulação em relação à simulação com alimentação ideal.

Tabela 14 – Variação dos parâmetros obtidos na simulação 3 em relação à simulação 1.

	Carregamento		
	100%	75%	50%
Conjugado [%]	-0,0608	-0,0387	-0,0126
Velocidade [%]	-0,0450	-0,0319	-0,0205
Tensão [%]	0,0050	0,0050	0,0050
Corrente [%]	0,5290	0,5595	0,7883
Escorregamento [%]	1,0293	1,0014	0,9860
Perdas Estator [%]	1,0450	1,1185	1,2687
Perdas Ferro [%]	-0,5038	-0,4872	-0,4730
Perdas Rotor [%]	2,9459	4,4622	8,7739
Perdas Totais [%]	0,7253	0,6681	0,6119
Potência Mecânica [%]	-0,1049	-0,0708	-0,0329
Potência de Entrada [%]	0,0454	0,0685	0,1089
Rendimento [%]	-0,1465	-0,1356	-0,1410
Fator de Potência [%]	-0,5828	-0,6153	-0,6650

Fonte: O autor.

4.3.4 Simulação 4: MIT operando com a componente fundamental e 11^a harmônica

Essa simulação mostrou a influência da componente de 11^a harmônica no funcionamento do MIT. A componente de 11^a ordem, assim como a de 5^a ordem, possui sequência de fase negativa, isto é, produz conjugado no sentido contrário da componente fundamental. As condições de alimentação para essa simulação estão contidas nas tabelas abaixo.

Tabela 15 – Tensões de alimentação em módulo e defasagem para a simulação 4.

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensão (Vrms)	219,3931	219,3931	219,3931
Defasagem (graus)	0	-120	-240

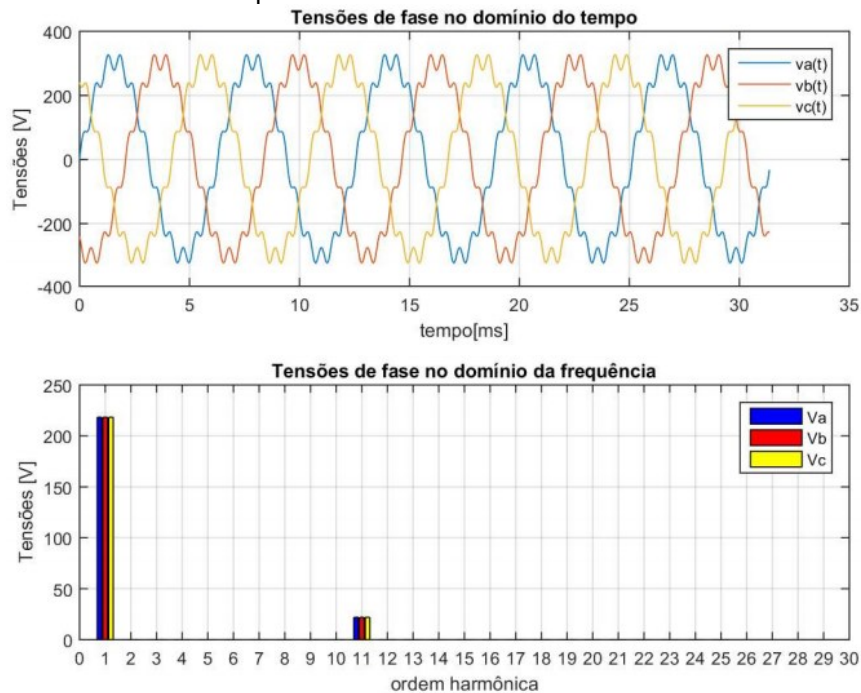
Fonte: O autor.

Tabela 16 – Conteúdo harmônico individual em porcentagem da simulação 4.

Ordem harmônica	Porcentagem da tensão harmônica
5ª ordem	0
7ª ordem	0
11ª ordem	10
13ª ordem	0
17ª ordem	0
19ª ordem	0
23ª ordem	0
25ª ordem	0

Fonte: O autor.

Figura 22 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para a simulação com alimentação da componente fundamental e 11ª harmônica.



Fonte: O autor.

Os parâmetros dos circuitos equivalentes são:

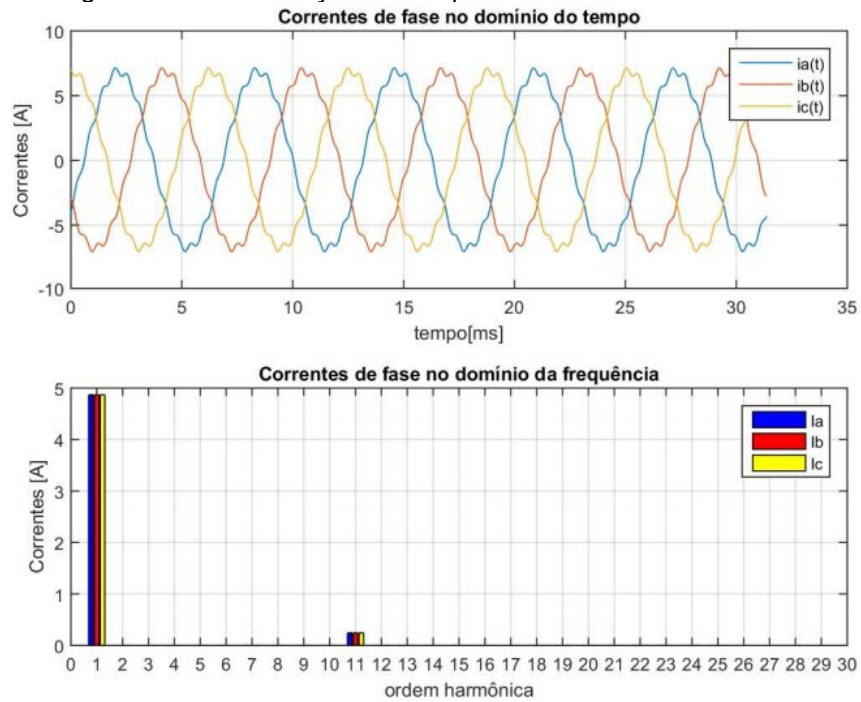
Tabela 17 – Parâmetros dos circuitos equivalentes para a simulação 4.

Ordem harmônica	$R_1(\Omega)$	$X_1(\Omega)$	$R_M(\Omega)$	$X_M(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$X_2(\Omega)$
1ª	2,4385	2,5344	566,34	95,613	2,2099	6,272
11ª	2,4385	27,878	566,34	1051,7	7,5281	68,992

Fonte: O autor.

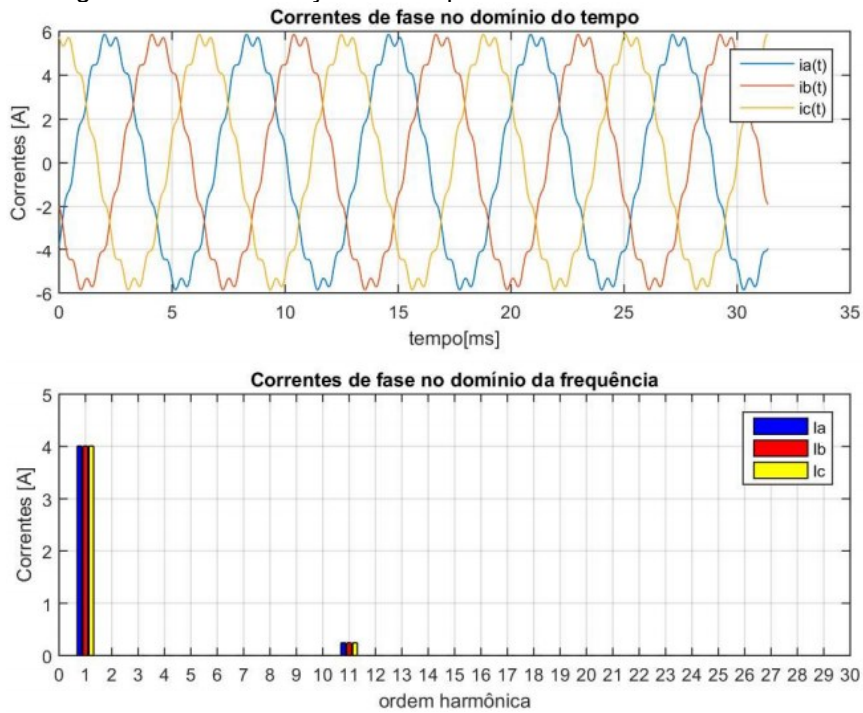
Os resultados das simulações para os diferentes carregamentos são:

Figura 23 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 100% de carregamento e alimentação da componente fundamental e 11ª harmônica.



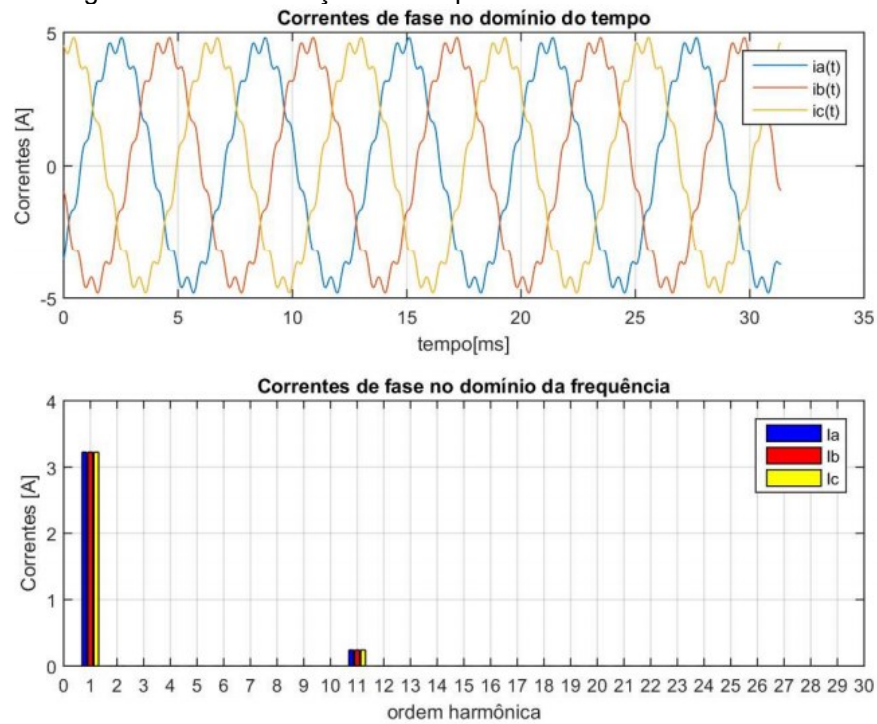
Fonte: O autor.

Figura 24 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 75% de carregamento e alimentação da componente fundamental e 11ª harmônica.



Fonte: O autor.

Figura 25 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 50% de carregamento e alimentação da componente fundamental e 11ª harmônica.



Fonte: O autor.

Tabela 18 – Parâmetros obtidos na simulação 4.

	Carregamento		
	100%	75%	50%
Conjugado [N.m]	6,0845	4,6532	3,1648
Velocidade [rpm]	3448,4075	3487,8064	3525,8873
Tensão [V]	219,4040	219,4040	219,4040
Corrente [A]	4,8757	4,0159	3,2346
Escorregamento [%]	4,2109	3,1165	2,0587
Perdas Estator [W]	173,9106	117,9825	76,5393
Perdas Ferro [W]	216,6849	222,5137	228,1187
Perdas Rotor [W]	97,7284	55,8074	25,6986
Perdas Totais [W]	488,3240	396,3036	330,3566
Potência Mecânica [W]	2197,2170	1699,5478	1168,5413
Potência de Entrada [W]	2685,5410	2095,8513	1498,8980
Rendimento [%]	81,8200	81,0900	77,9600
Fator de Potência	0,8368	0,7929	0,7040
THD[%]	10,0000	10,0000	10,0000
FD [%]	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: O autor.

Tabela 19 – Variação dos parâmetros obtidos na simulação 4 em relação à simulação 1.

	Carregamento		
	100%	75%	50%
Conjugado [%]	-0,0788	-0,0623	-0,0474
Velocidade [%]	-0,0450	-0,0319	-0,0205
Tensão [%]	0,0050	0,0050	0,0050
Corrente [%]	0,3520	0,2997	0,3879
Escorregamento [%]	1,0293	1,0014	0,9860
Perdas Estator [%]	0,6902	0,5961	0,4645
Perdas Ferro [%]	-0,5039	-0,4873	-0,4731
Perdas Rotor [%]	2,1399	3,0385	5,6052
Perdas Totais [%]	0,4406	0,3177	0,1921
Potência Mecânica [%]	-0,1228	-0,0942	-0,0673
Potência de Entrada [%]	-0,0208	-0,0166	-0,0103
Rendimento [%]	-0,0977	-0,0739	-0,0513
Fator de Potência [%]	-0,4757	-0,4395	-0,3962

Fonte: O autor.

4.3.5 Simulação 5: MIT operando com a componente fundamental e 13ª harmônica

Essa simulação mostrou a influência da componente de 13ª harmônica no funcionamento do MIT. A componente de 13ª ordem, assim como a de 7ª ordem, possui sequência de fase positiva, isto é, produz conjugado no mesmo sentido da componente fundamental. As condições de alimentação para essa simulação estão contidas nas tabelas abaixo.

Tabela 20 – Tensões de alimentação em módulo e defasagem para a simulação 5.

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensão (Vrms)	219,3931	219,3931	219,3931
Defasagem (graus)	0	-120	-240

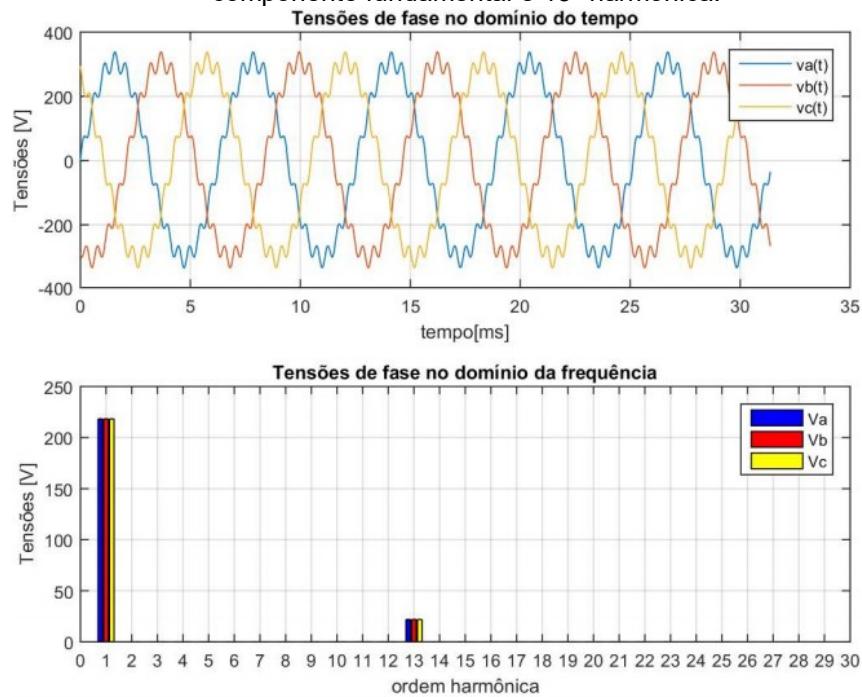
Fonte: O autor.

Tabela 21 – Conteúdo harmônico individual em porcentagem da simulação 5.

Ordem harmônica	Porcentagem da tensão harmônica
5ª ordem	0
7ª ordem	0
11ª ordem	0
13ª ordem	10
17ª ordem	0
19ª ordem	0
23ª ordem	0
25ª ordem	0

Fonte: O autor.

Figura 26 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para a simulação com alimentação da componente fundamental e 13ª harmônica.



Fonte: O autor.

Os parâmetros dos circuitos equivalentes são:

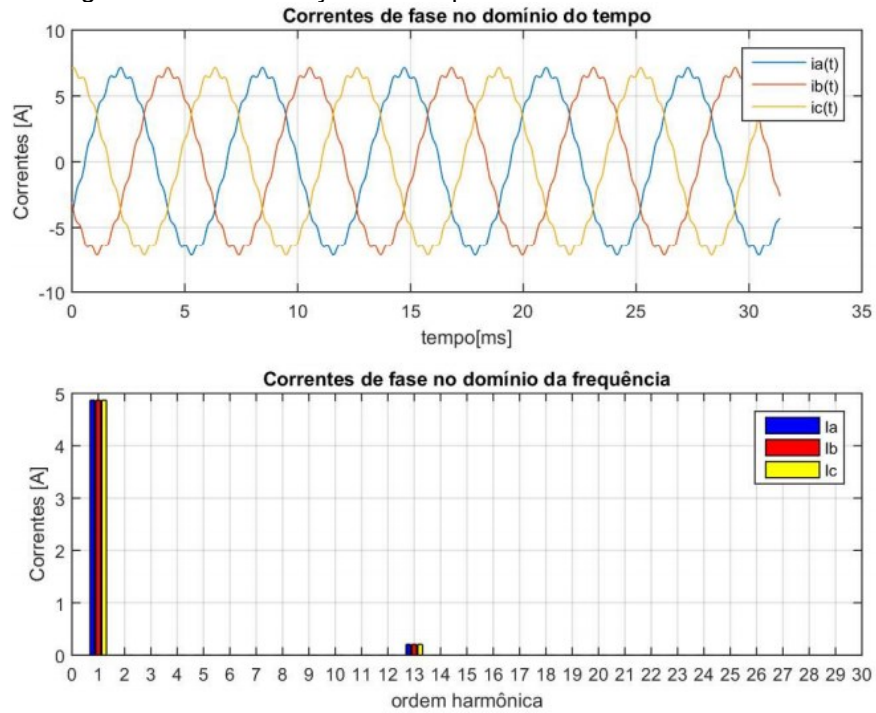
Tabela 22 – Parâmetros dos circuitos equivalentes para a simulação 5.

Ordem harmônica	$R_1(\Omega)$	$X_1(\Omega)$	$R_M(\Omega)$	$X_M(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$X_2(\Omega)$
1ª	2,4385	2,5344	566,34	95,613	2,2099	6,272
13ª	2,4385	32,947	566,34	1243	7,5622	81,536

Fonte: O autor.

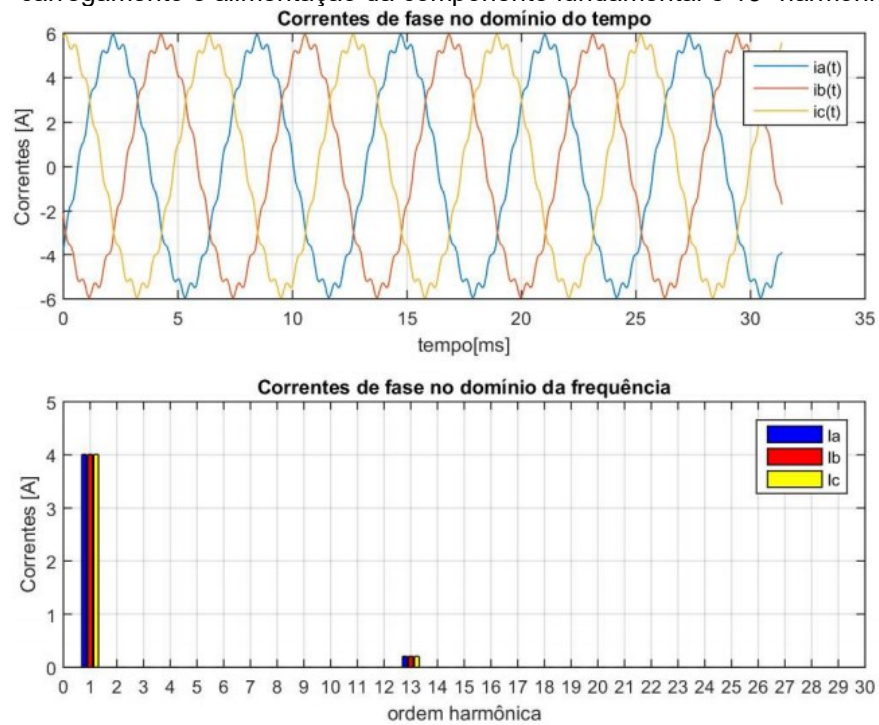
Os resultados das simulações para os diferentes carregamentos, são:

Figura 27 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 100% de carregamento e alimentação da componente fundamental e 13ª harmônica.



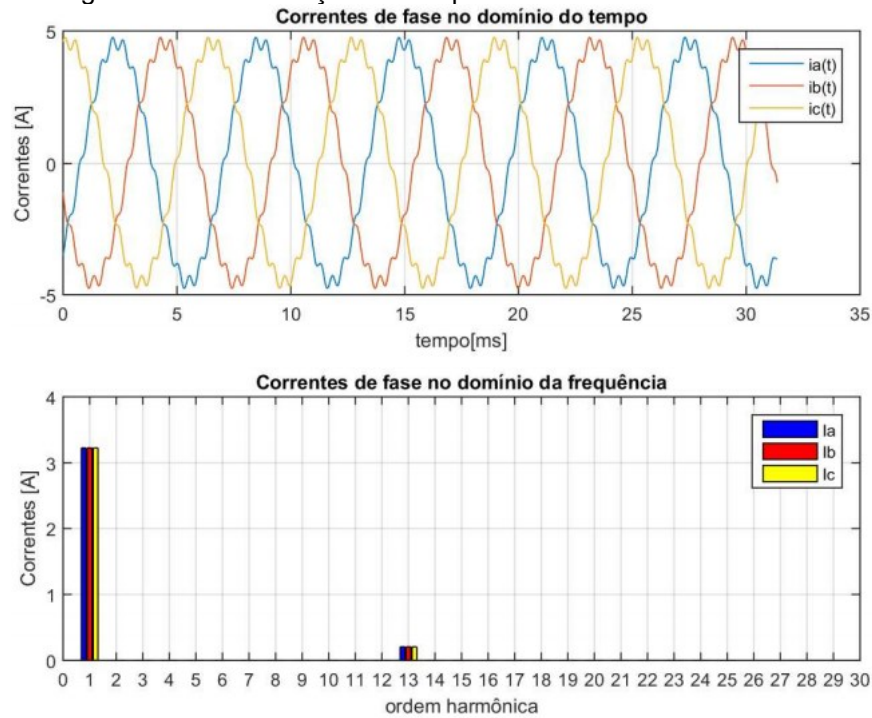
Fonte: O autor.

Figura 28 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 75% de carregamento e alimentação da componente fundamental e 13ª harmônica.



Fonte: O autor.

Figura 29 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 50% de carregamento e alimentação da componente fundamental e 13ª harmônica.



Fonte: O autor.

Tabela 23 – Parâmetros obtidos na simulação 5.

	Carregamento		
	100%	75%	50%
Conjugado [N.m]	6,0849	4,6536	3,1652
Velocidade [rpm]	3448,4075	3487,8064	3525,8873
Tensão [V]	219,4040	219,4040	219,4040
Corrente [A]	4,8740	4,0139	3,2321
Escorregamento [%]	4,2109	3,1165	2,0587
Perdas Estator [W]	173,7911	117,8629	76,4197
Perdas Ferro [W]	216,6848	222,5136	228,1186
Perdas Rotor [W]	97,4098	55,4888	25,3800
Perdas Totais [W]	487,8857	395,8653	329,9184
Potência Mecânica [W]	2197,3728	1699,7053	1168,7006
Potência de Entrada [W]	2685,2585	2095,5706	1498,6189
Rendimento [%]	81,8300	81,1100	77,9900
Fator de Potência	0,8370	0,7932	0,7044
THD[%]	10,0000	10,0000	10,0000
FD [%]	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: O autor.

Tabela 24 – Variação dos parâmetros obtidos na simulação 5 em relação à simulação 1.

	Carregamento		
	100%	75%	50%
Conjugado [%]	-0,0723	-0,0537	-0,0347
Velocidade [%]	-0,0450	-0,0319	-0,0205
Tensão [%]	0,0050	0,0050	0,0050
Corrente [%]	0,3170	0,2498	0,3104
Escorregamento [%]	1,0293	1,0014	0,9860
Perdas Estator [%]	0,6210	0,4941	0,3075
Perdas Ferro [%]	-0,5040	-0,4873	-0,4732
Perdas Rotor [%]	1,8069	2,4503	4,2959
Perdas Totais [%]	0,3504	0,2068	0,0592
Potência Mecânica [%]	-0,1157	-0,0849	-0,0537
Potência de Entrada [%]	-0,0313	-0,0300	-0,0289
Rendimento [%]	-0,0855	-0,0493	-0,0128
Fator de Potência [%]	-0,4520	-0,4018	-0,3396

Fonte: O autor.

4.3.6 Simulação 6: MIT operando com a fundamental e harmônicas ímpares

Essa simulação mostrou a influência das componentes fundamentais 5^a, 7^a, 11^a, 13^a, 17^a, 19^a, 23^a e 25^a ordens atuando todas juntas no MIT. É importante salientar que dentre essas harmônicas descritas, algumas possuem sequência de fase positiva (7^a, 13^a, 19^a e 25^a) e outras possuem sequência de fase negativa (5^a, 11^a, 17^a e 23^a). Dessa forma, a alimentação para essa simulação foi descrita nas tabelas abaixo.

Tabela 25 – Tensões de alimentação em módulo e defasagem para a simulação 6.

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensão (Vrms)	219,3931	219,3931	219,3931
Defasagem (graus)	0	-120	-240

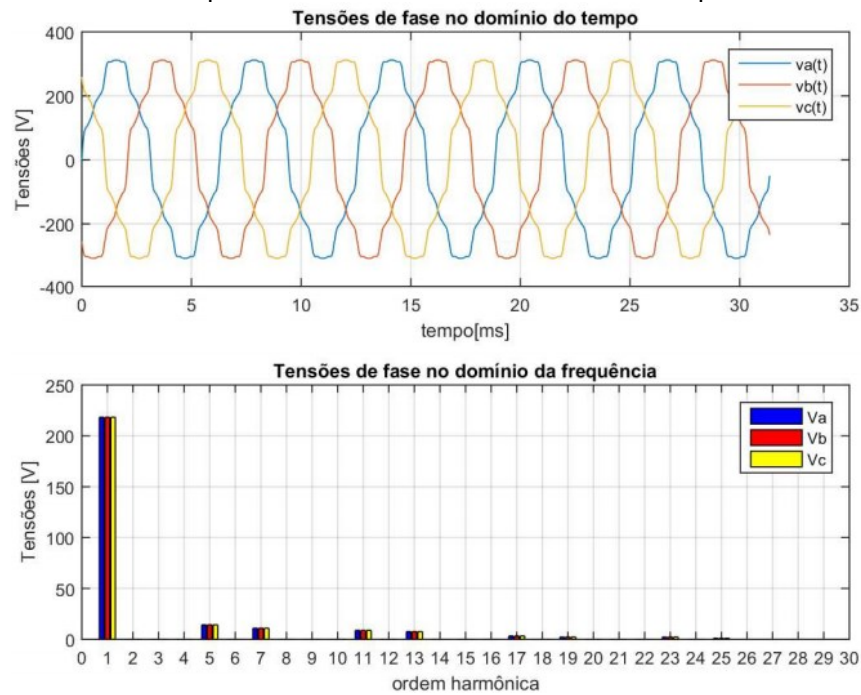
Fonte: O autor.

Tabela 26 – Conteúdo harmônico individual em porcentagem da simulação 6.

Ordem harmônica	Porcentagem da tensão harmônica
5ª ordem	6,5
7ª ordem	5,0
11ª ordem	4,0
13ª ordem	3,5
17ª ordem	1,5
19ª ordem	1,0
23ª ordem	1,0
25ª ordem	0,5

Fonte: O autor.

Figura 30 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para a simulação com alimentação da componente fundamental e as harmônicas ímpares.



Fonte: O autor.

Os parâmetros dos circuitos equivalentes envolvidos são:

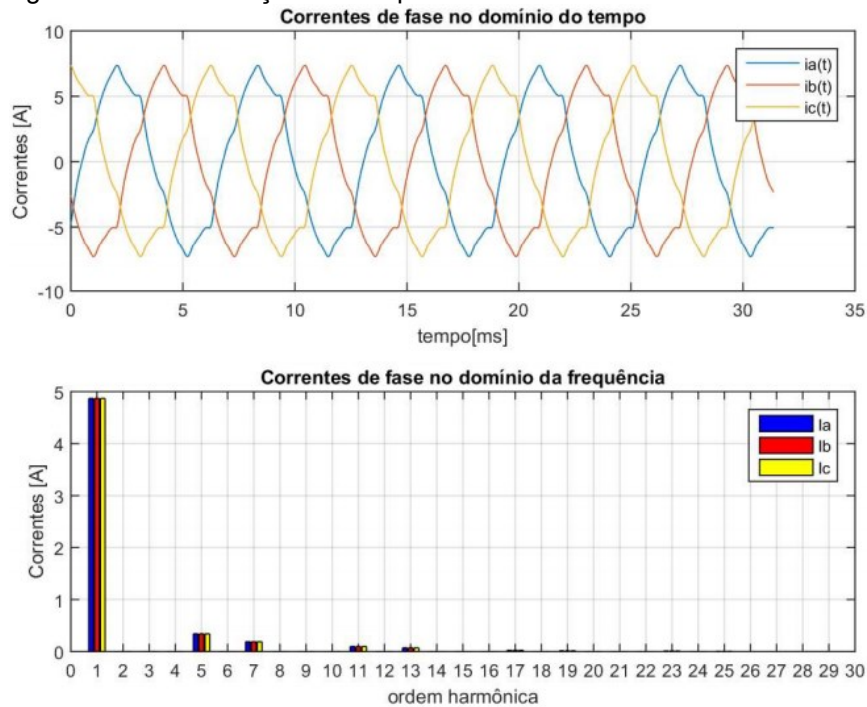
Tabela 27 – Parâmetros dos circuitos equivalentes para a simulação 6.

Ordem harmônica	$R_1(\Omega)$	$X_1(\Omega)$	$R_M(\Omega)$	$X_M(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$X_2(\Omega)$
1ª	2,4385	2,5344	566,34	95,613	2,2099	6,272
5ª	2,4385	12,672	566,34	478,06	5,1321	31,36
7ª	2,4385	17,741	566,34	669,29	5,1651	43,904
11ª	2,4385	27,878	566,34	1051,7	7,5281	68,992
13ª	2,4385	32,947	566,34	1243	7,5622	81,536
17ª	2,4385	43,085	566,34	1625,4	10,098	106,62
19ª	2,4385	48,154	566,34	1816,6	10,135	119,17
23ª	2,4385	58,291	566,34	2199,1	12,933	144,26
25ª	2,4385	63,36	566,34	2390,3	12,975	156,8

Fonte: O autor.

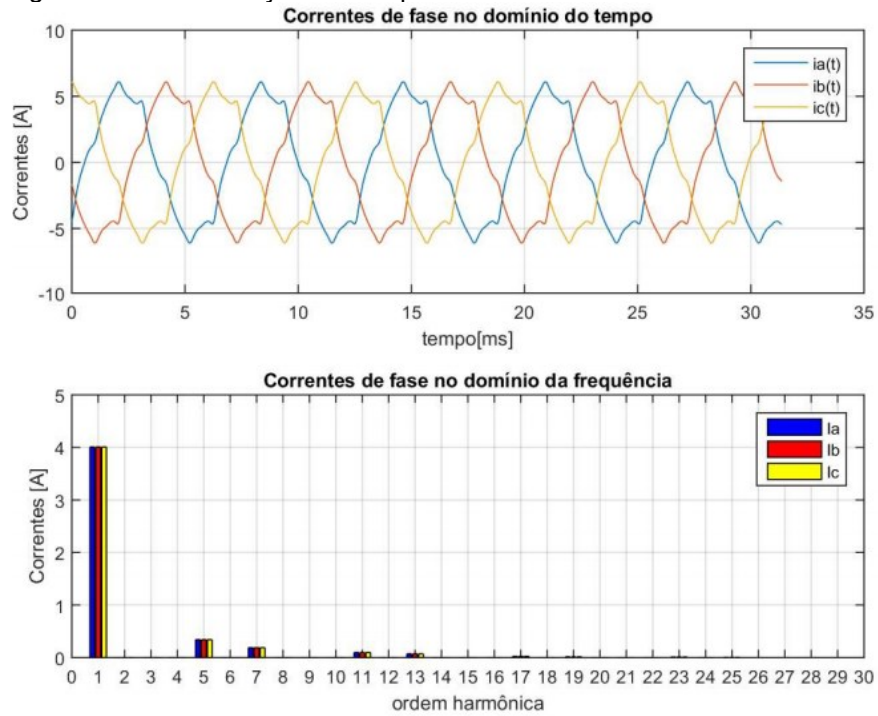
Os resultados das simulações para os diferentes carregamentos são:

Figura 31 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 100% de carregamento e alimentação da componente fundamental e as harmônicas ímpares.



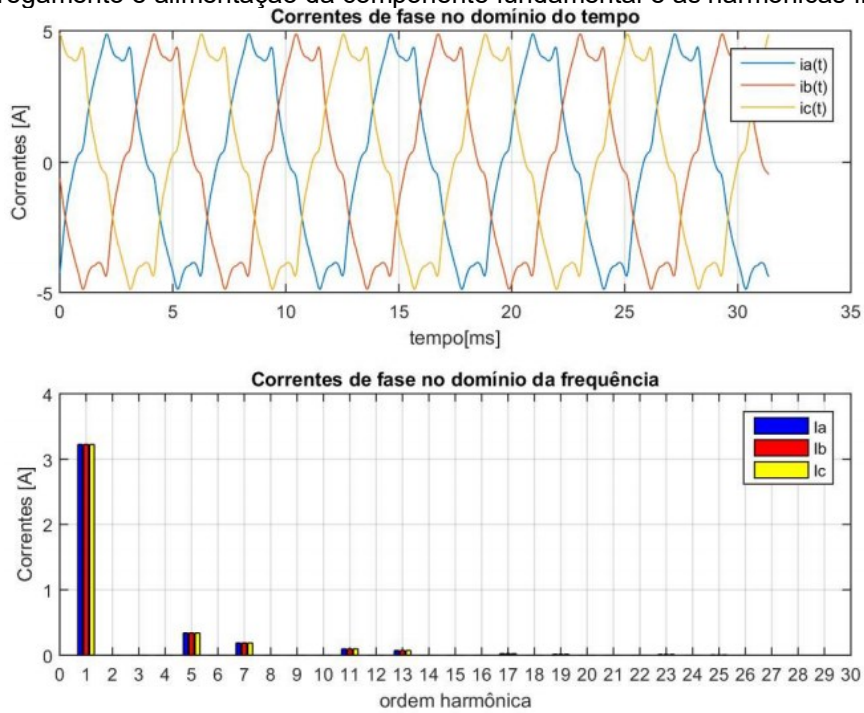
Fonte: O autor.

Figura 32 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 75% de carregamento e alimentação da componente fundamental e as harmônicas ímpares.



Fonte: O autor.

Figura 33 – Gráfico da corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 50% de carregamento e alimentação da componente fundamental e as harmônicas ímpares.



Fonte: O autor.

Tabela 28 – Parâmetros obtidos na simulação 6.

	Carregamento		
	100%	75%	50%
Conjugado [N.m]	6,0843	4,6530	3,1646
Velocidade [rpm]	3448,4075	3487,8064	3525,8873
Tensão [V]	219,4040	219,4040	219,4040
Corrente [A]	4,8869	4,0295	3,2514
Escorregamento [%]	4,2109	3,1165	2,0587
Perdas Estator [W]	174,7085	118,7805	77,3372
Perdas Ferro [W]	216,6830	222,5117	228,1168
Perdas Rotor [W]	98,9382	57,0172	26,9085
Perdas Totais [W]	490,3297	398,3094	332,3625
Potência Mecânica [W]	2197,1252	1699,4554	1168,4485
Potência de Entrada [W]	2687,4549	2097,7648	1500,8110
Rendimento [%]	81,7500	81,0100	77,8500
Fator de Potência	0,8355	0,7909	0,7013
THD[%]	10,0000	10,0000	10,0000
FD [%]	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: O autor.

Tabela 29 – Variação dos parâmetros obtidos na simulação 6 em relação à simulação 1.

	Carregamento		
	100%	75%	50%
Conjugado [%]	-0,0821	-0,0666	-0,0537
Velocidade [%]	-0,0450	-0,0319	-0,0205
Tensão [%]	0,0050	0,0050	0,0050
Corrente [%]	0,5825	0,6394	0,9093
Escorregamento [%]	1,0293	1,0014	0,9860
Perdas Estator [%]	1,1522	1,2765	1,5118
Perdas Ferro [%]	-0,5048	-0,4882	-0,4739
Perdas Rotor [%]	3,4043	5,2722	10,5771
Perdas Totais [%]	0,8531	0,8255	0,8005
Potência Mecânica [%]	-0,1270	-0,0996	-0,0753
Potência de Entrada [%]	0,0504	0,0747	0,1173
Rendimento [%]	-0,1832	-0,1725	-0,1923
Fator de Potência [%]	-0,6304	-0,6906	-0,7782

Fonte: O autor.

4.3.7 Simulação 7: MIT operando com rede desequilibrada em módulo

O desequilíbrio de tensão pode ser provocado de duas formas diferentes: em módulo ou em defasagem angular. Essa simulação teve por objetivo apresentar os efeitos no MIT, em uma rede operando com desequilíbrio em módulo, assim, o conteúdo harmônico foi desconsiderado. Os dados da rede para essa simulação estão descritos nas tabelas abaixo.

Tabela 30 - Tensões de alimentação em módulo e defasagem para a simulação 7.

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensão (Vrms)	220,0000	235,0000	244,0000
Defasagem (graus)	0	-120	-240

Fonte: O autor.

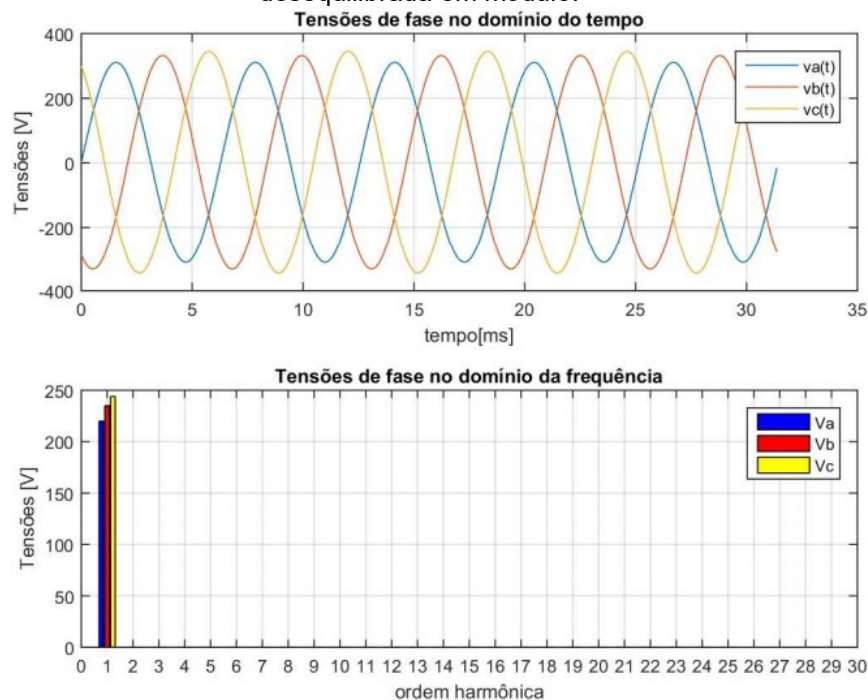
Os parâmetros do circuito equivalente para essa simulação, são:

Tabela 31 – Parâmetros dos circuitos equivalentes para a simulação 7.

Ordem harmônica	$R_1(\Omega)$	$X_1(\Omega)$	$R_M(\Omega)$	$X_M(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$X_2(\Omega)$
1ª (+)	2,4385	2,5344	566,34	95,613	2,2099	6,272
1ª (-)	2,4385	2,5344	566,34	95,613	3,4666	6,272

Fonte: O autor.

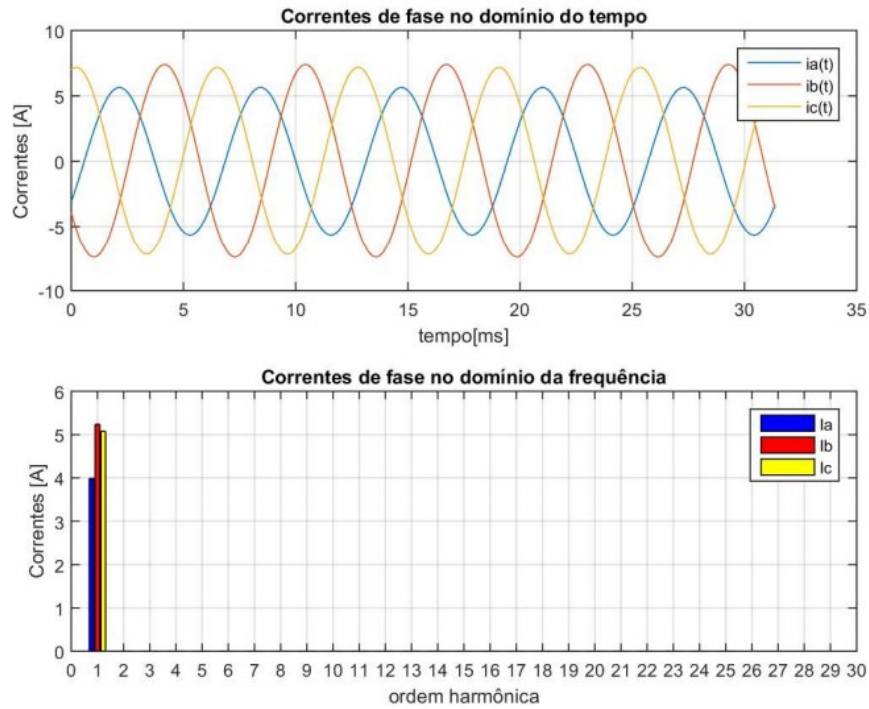
Figura 34 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para a simulação com alimentação desequilibrada em módulo.



Fonte: Autor.

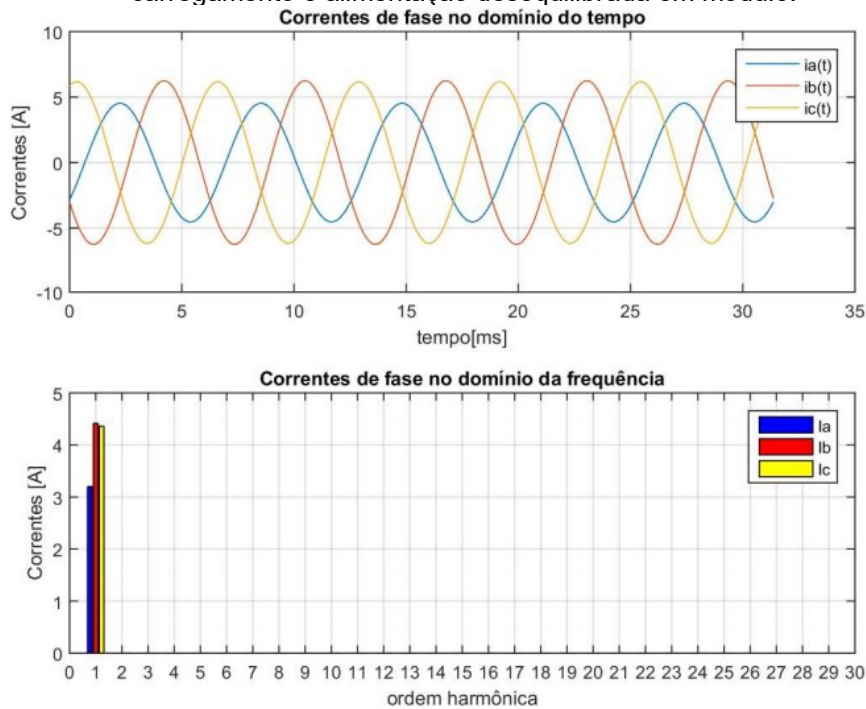
Os resultados para os diferentes carregamentos foram:

Figura 35 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 100% de carregamento e alimentação desequilibrada em módulo.



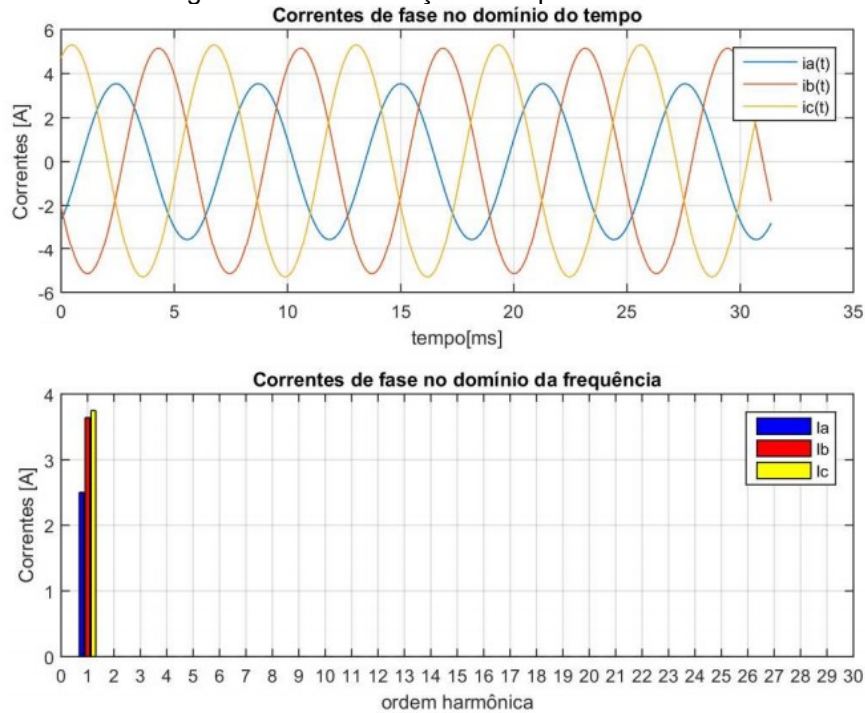
Fonte: O autor.

Figura 36 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 75% de carregamento e alimentação desequilibrada em módulo.



Fonte: O autor.

Figura 37 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 50% de carregamento e alimentação desequilibrada em módulo.



Fonte: O autor.

Tabela 32 – Parâmetros obtidos na simulação 7.

	Carregamento		
	100%	75%	50%
Conjugado [N.m]	6,1355	4,6894	3,1738
Velocidade [rpm]	3467,8597	3501,8880	3535,0490
Tensão [V]	233,0000	233,0000	233,0000
Corrente [A]	4,7688	3,9928	3,2976
Escorregamento [%]	3,6706	2,7253	1,8042
Perdas Estator [W]	168,6156	118,9232	81,8749
Perdas Ferro [W]	248,7268	254,4573	259,9972
Perdas Rotor [W]	90,2576	53,4217	26,9004
Perdas Totais [W]	507,6001	426,8021	368,7724
Potência Mecânica [W]	2228,1420	1716,3725	1174,9040
Potência de Entrada [W]	2735,7421	2143,1747	1543,6764
Rendimento [%]	81,4500	80,0900	76,1100
Fator de Potência	0,7774	0,7191	0,6185
THD[%]	0,0000	0,0000	0,0000
FD [%]	3,0043	3,0043	3,0043

Fonte: O autor.

Tabela 33 – Variação dos parâmetros obtidos na simulação 7 em relação à simulação 1.

	Carregamento		
	100%	75%	50%
Conjugado [%]	0,7587	0,7152	0,2369
Velocidade [%]	0,5188	0,3717	0,2393
Tensão [%]	6,2021	6,2021	6,2021
Corrente [%]	-1,8483	-0,2772	2,3432
Escorregamento [%]	-11,9338	-11,6768	-11,4981
Perdas Estator [%]	-2,3755	1,3982	7,4680
Perdas Ferro [%]	14,2089	13,7985	13,4353
Perdas Rotor [%]	-5,6681	-1,3663	10,5438
Perdas Totais [%]	4,4054	8,0379	11,8430
Potência Mecânica [%]	1,2830	0,8948	0,4768
Potência de Entrada [%]	1,8481	2,2410	2,9768
Rendimento [%]	-0,5495	-1,3062	-2,4231
Fator de Potência [%]	-7,5404	-9,7062	-12,4929

Fonte: O autor.

4.3.8 Simulação 8: MIT operando com rede desequilibrada em ângulo

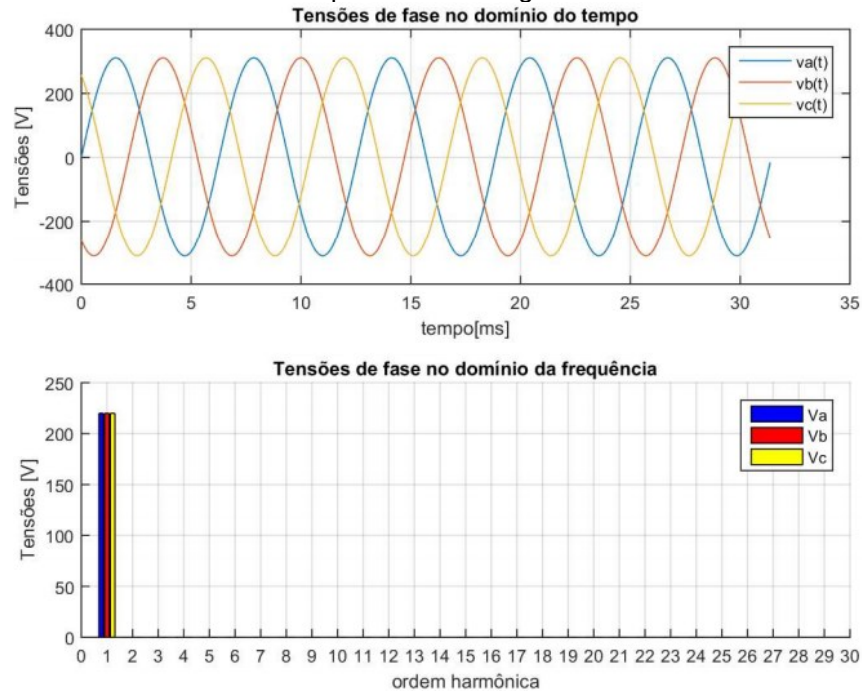
Essa simulação teve por objetivo observar os efeitos no MIT operando sob rede de alimentação com desequilíbrio angular. Nesse contexto, o conteúdo harmônico também foi desconsiderado para efeito de análises. Os dados da rede de alimentação estão descritos nas tabelas abaixo.

Tabela 34 – Tensões de alimentação em módulo e defasagem para a simulação 8.

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensão (Vrms)	219,3931	219,3931	219,3931
Defasagem (graus)	0,0000	-122,9000	-235,7000

Fonte: O autor.

Figura 38 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para a simulação com alimentação desequilibrada em ângulo.



Fonte: O autor.

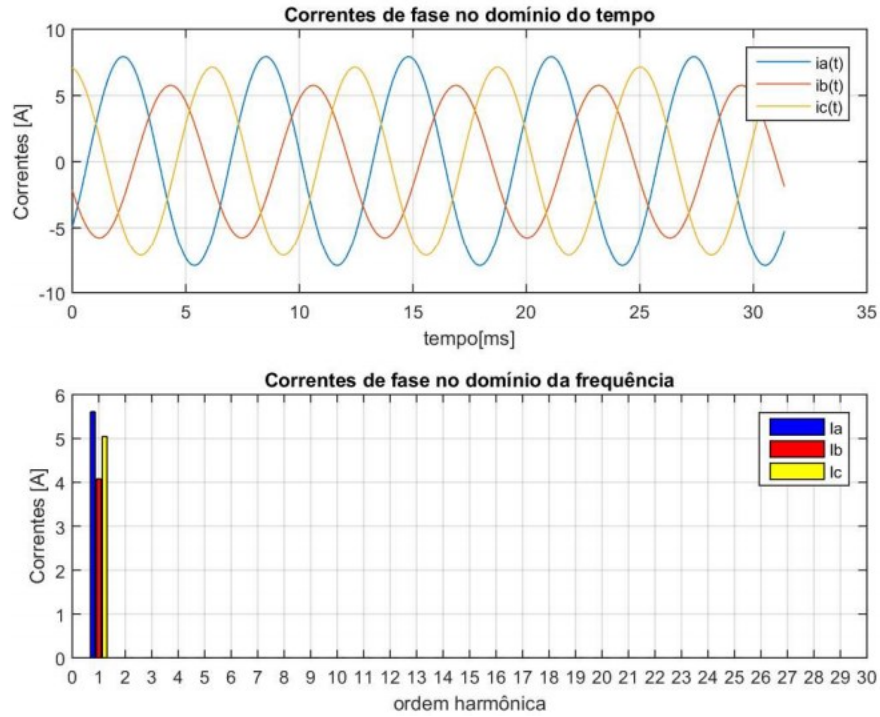
Os parâmetros dos circuitos equivalentes para essa simulação são:

Tabela 35 – Parâmetros dos circuitos equivalentes para a simulação 8.

Ordem harmônica	$R_1(\Omega)$	$X_1(\Omega)$	$R_M(\Omega)$	$X_M(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$X_2(\Omega)$
1 ^a (+)	2,4385	2,5344	566,34	95,613	2,2099	6,272
1 ^a (-)	2,4385	2,5344	566,34	95,613	3,4666	6,272

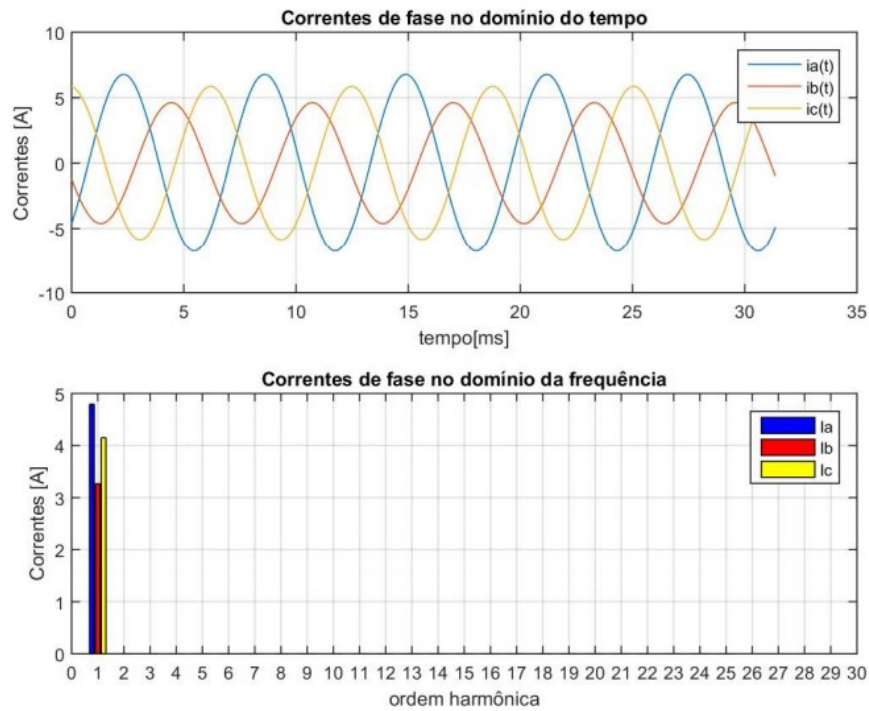
Fonte: O autor.

Figura 39 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 100% de carregamento e alimentação desequilibrada em ângulo.



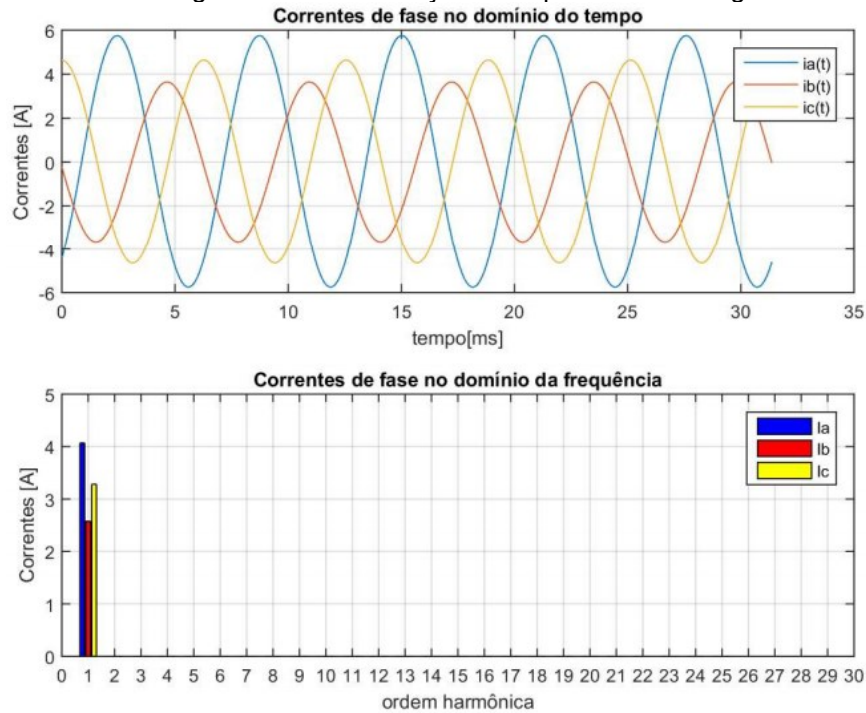
Fonte: O autor.

Figura 40 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 75% de carregamento e alimentação desequilibrada em ângulo.



Fonte: O autor.

Figura 41 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 50% de carregamento e alimentação desequilibrada em ângulo.



Fonte: O autor.

Tabela 36 – Parâmetros obtidos na simulação 8.

	Carregamento		
	100%	75%	50%
Conjugado [N.m]	6,0470	4,6278	3,1481
Velocidade [rpm]	3449,6003	3488,6645	3526,4432
Tensão [V]	219,3931	219,3931	219,3931
Corrente [A]	4,9182	4,0728	3,3078
Escorregamento [%]	4,1778	3,0927	2,0432
Perdas Estator [W]	179,8704	124,2058	82,7483
Perdas Ferro [W]	217,1243	222,9851	228,6376
Perdas Rotor [W]	102,5295	61,1985	31,4511
Perdas Totais [W]	499,5242	408,3894	342,8371
Potência Mecânica [W]	2184,3998	1690,6599	1162,5463
Potência de Entrada [W]	2683,9240	2099,0493	1505,3833
Rendimento [%]	81,3900	80,5500	77,2300
Fator de Potência	0,8702	0,8323	0,7486
THD[%]	0,0000	0,0000	0,0000
FD [%]	3,7159	3,7159	3,7159

Fonte: O autor.

Tabela 37 – Variação dos parâmetros obtidos na simulação 8 em relação à simulação 1.

	Carregamento		
	100%	75%	50%
Conjugado [%]	-0,6947	-0,6078	-0,5748
Velocidade [%]	-0,0105	-0,0073	-0,0047
Tensão [%]	0,0000	0,0000	0,0000
Corrente [%]	1,2267	1,7208	2,6598
Escorregamento [%]	0,2351	0,2301	0,2256
Perdas Estator [%]	4,1408	5,9023	8,6144
Perdas Ferro [%]	-0,3022	-0,2765	-0,2467
Perdas Rotor [%]	7,1578	12,9922	29,2444
Perdas Totais [%]	2,7443	3,3771	3,9772
Potência Mecânica [%]	-0,7054	-0,6167	-0,5800
Potência de Entrada [%]	-0,0810	0,1360	0,4224
Rendimento [%]	-0,6227	-0,7394	-0,9872
Fator de Potência [%]	3,4967	4,5078	5,9140

Fonte: O autor.

4.3.9 Simulação 9: MIT operando com rede desequilibrada e distorcida

Essa simulação teve por objetivo observar os efeitos do MIT operando sob rede de alimentação desequilibrada e distorcida. Para isso, foi aplicado um desequilíbrio em módulo com $FD[\%]$ de 3% e um $THD[\%]$ de 10%. Os dados da rede de alimentação estão descritos abaixo.

Tabela 38 – Tensões de alimentação em módulo e defasagem para a simulação 9.

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensão (Vrms)	220,0000	235,0000	244,0000
Defasagem (graus)	0	-120	-240

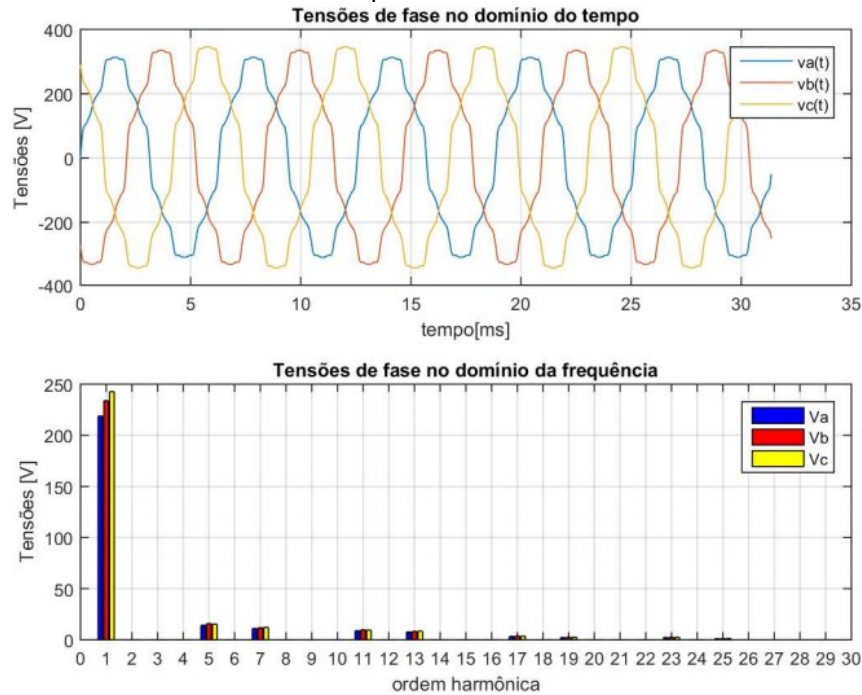
Fonte: O autor.

Tabela 39 – Conteúdo harmônico individual em porcentagem da simulação 9.

Ordem harmônica	Porcentagem da tensão harmônica
5ª ordem	6,5
7ª ordem	5,0
11ª ordem	4,0
13ª ordem	3,5
17ª ordem	1,5
19ª ordem	1,0
23ª ordem	1,0
25ª ordem	0,5

Fonte: O autor.

Figura 42 – Gráfico de tensão e do seu espectro harmônico para a simulação com alimentação desequilibrada e distorcida.



Fonte: O autor

Os parâmetros dos circuitos equivalentes envolvidos na simulação são:

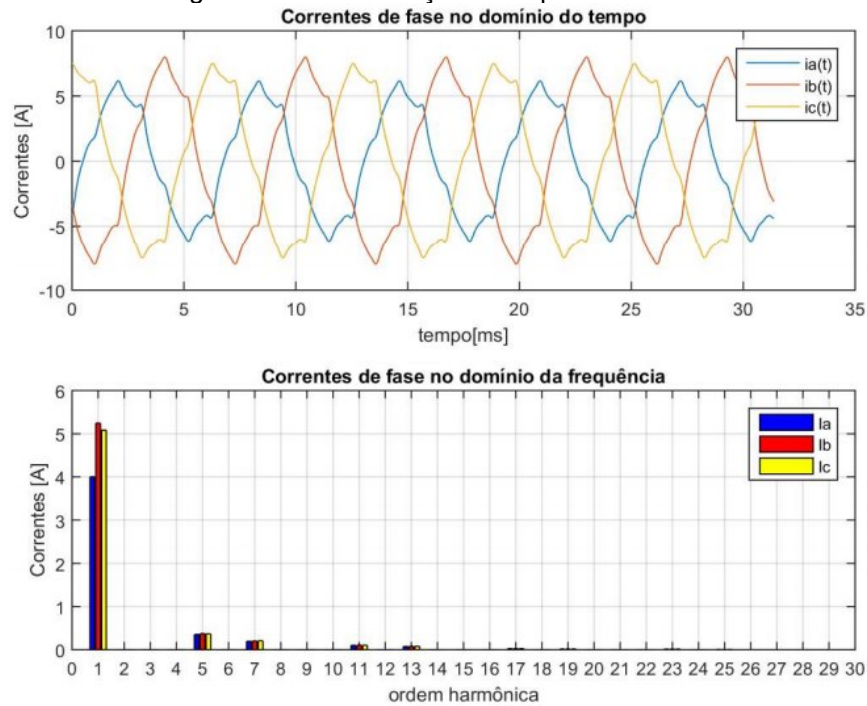
Tabela 40 – Parâmetros dos circuitos equivalentes para a simulação 9.

Ordem harmônica	$R_1(\Omega)$	$X_1(\Omega)$	$R_M(\Omega)$	$X_M(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$X_2(\Omega)$
1 ^a (+)	2,4385	2,5344	566,34	95,613	2,2099	6,272
1 ^a (-)	2,4385	2,5344	566,34	95,613	3,4666	6,272
5 ^a (+)	2,4385	12,672	566,34	478,06	5,1321	31,36
5 ^a (-)	2,4385	12,672	566,34	478,06	4,3637	31,36
7 ^a (+)	2,4385	17,741	566,34	669,29	5,1651	43,904
7 ^a (-)	2,4385	17,741	566,34	669,29	5,922	43,904
11 ^a (+)	2,4385	27,878	566,34	1051,7	7,5281	68,992
11 ^a (-)	2,4385	27,878	566,34	1051,7	6,751	68,992
13 ^a (+)	2,4385	32,947	566,34	1243	7,5622	81,536
13 ^a (-)	2,4385	32,947	566,34	1243	8,3591	81,536
17 ^a (+)	2,4385	43,085	566,34	1625,4	10,098	106,62
17 ^a (-)	2,4385	43,085	566,34	1625,4	9,251	106,62
19 ^a (+)	2,4385	48,154	566,34	1816,6	10,135	119,17
19 ^a (-)	2,4385	48,154	566,34	1816,6	11,011	119,17
23 ^a (+)	2,4385	58,291	566,34	2199,1	12,933	144,26
23 ^a (-)	2,4385	58,291	566,34	2199,1	11,995	144,26
25 ^a (+)	2,4385	63,36	566,34	2390,3	12,975	156,8
25 ^a (-)	2,4385	63,36	566,34	2390,3	13,946	156,8

Fonte: O autor.

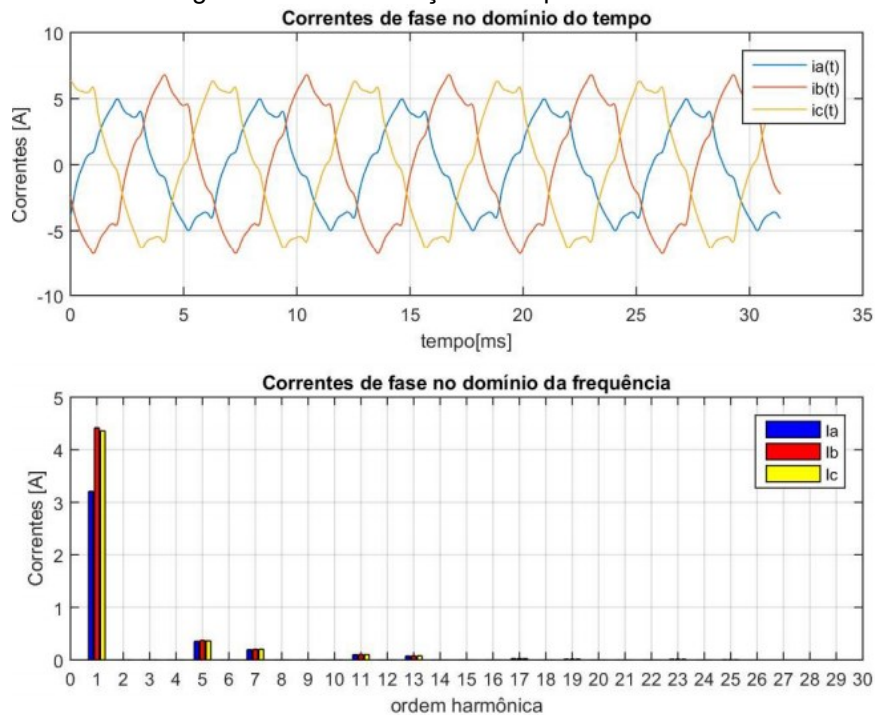
Os resultados para os diferentes carregamentos foram:

Figura 43 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 100% de carregamento e alimentação desequilibrada e distorcida.



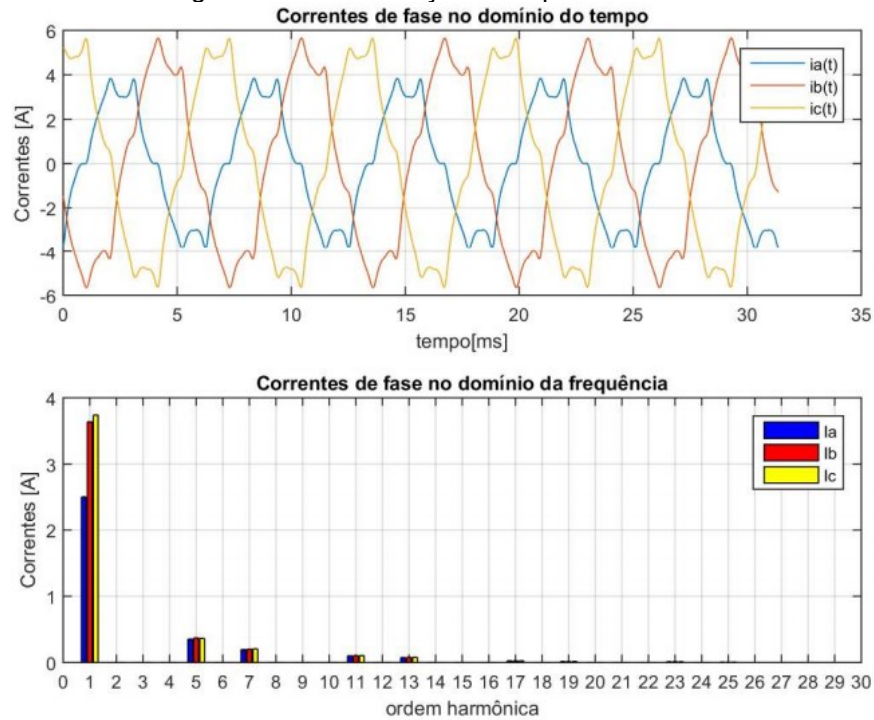
Fonte: Autor.

Figura 44 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 75% de carregamento e alimentação desequilibrada e distorcida.



Fonte: Autor.

Figura 45 – Gráfico de corrente e do seu espectro harmônico para a simulação com 50% de carregamento e alimentação desequilibrada e distorcida.



Fonte: Autor.

Tabela 41 – Parâmetros obtidos na simulação 9.

	Carregamento		
	100%	75%	50%
Conjugado [N.m]	6,1308	4,6774	3,1722
Velocidade [rpm]	3466,4756	3500,8815	3534,3922
Tensão [V]	233,0122	233,0122	233,0122
Corrente [A]	4,7971	4,0192	3,3233
Escorregamento [%]	3,7090	2,7533	1,8224
Perdas Estator [W]	170,5635	120,4258	83,0618
Perdas Ferro [W]	247,4086	253,1460	258,6905
Perdas Rotor [W]	93,6833	56,4843	29,7055
Perdas Totais [W]	511,6554	430,0560	371,4558
Potência Mecânica [W]	2225,5457	1714,7940	1174,0799
Potência de Entrada [W]	2737,2010	2144,8500	1545,5378
Rendimento [%]	81,3100	79,9500	75,9700
Fator de Potência	0,7737	0,7157	0,6154
THD[%]	10,0000	10,0000	10,0000
FD [%]	3,0000	3,0000	3,0000

Fonte: O autor.

Tabela 42 – Variação dos parâmetros obtidos na simulação 9 em relação à simulação 1.

	Carregamento		
	100%	75%	50%
Conjugado [%]	0,6815	0,4575	0,1863
Velocidade [%]	0,4787	0,3429	0,2207
Tensão [%]	6,2076	6,2076	6,2076
Corrente [%]	-1,2658	0,3821	3,1408
Escorregamento [%]	-11,0125	-10,7694	-10,6053
Perdas Estator [%]	-1,2477	2,6793	9,0259
Perdas Ferro [%]	13,6036	13,2121	12,8652
Perdas Rotor [%]	-2,0878	4,2883	22,0710
Perdas Totais [%]	5,2395	8,8616	12,6569
Potência Mecânica [%]	1,1649	0,8020	0,4063
Potência de Entrada [%]	1,9024	2,3209	3,1010
Rendimento [%]	-0,7204	-1,4787	-2,6026
Fator de Potência [%]	-7,9805	-10,1331	-12,9315

Fonte: O autor.

4.4 Considerações finais

Foram apresentados aqui a aplicação da metodologia estudada. Para a realização das simulações, foi utilizado um MIT catalogado, submetido a várias condições da rede de alimentação. A interface do software utilizado mostrou-se bastante eficaz na agilidade do processo das simulações. Dessa forma, algumas análises dos resultados podem ser feitas.

Quanto aos diferentes carregamentos simulados, é possível observar que quanto menor o carregamento maior é a redução do rendimento do motor.

Em relação à distorção harmônica, as componentes de 5^a e 7^a ordem provocaram maior influência no rendimento do motor.

Em relação ao desequilíbrio, é difícil obter uma conclusão generalizada sobre os resultados, pois estes dependem da forma como o desequilíbrio é aplicado, independentemente do fator de desequilíbrio. Todavia, para os casos simulados, o desequilíbrio angular provocou uma maior redução do rendimento do que o desequilíbrio em módulo para carregamento de nominal, porém para os carregamentos de 75% e 50% o desequilíbrio em módulo foi mais acentuado.

Analisando a distorção harmônica e o desequilíbrio de tensão separadamente, o desequilíbrio provocou maior redução no rendimento do motor.

Por fim, a simulação 9 (MIT operando com rede de alimentação desequilibrada e distorcida), dentre todas as outras simulações, foi a que provocou maior redução do rendimento.

CONCLUSÃO

A qualidade da energia elétrica é um fator muito importante para que os dispositivos conectados à rede não sofram deterioração e aproveitem a energia da melhor forma possível.

Como foi apresentado neste trabalho, as condições de alimentação promovem alteração nos aspectos de motores de indução trifásicos, como, por exemplo, a redução do rendimento e da vida útil. Assim, é essencial o estudo da distorção harmônica e desequilíbrio de tensão associados aos MIT.

Neste trabalho foi comentado a respeito das normas e indicadores de desequilíbrio de tensão e distorção harmônica, sendo que as recomendações do PRODIST são as mais utilizadas no Brasil para estudar esses fenômenos.

Foi discorrido, também, a respeito da metodologia utilizada para realizar os estudos de casos. E, por fim, tal metodologia foi aplicada utilizando um software criado no MATLAB, com o objetivo de facilitar o estudo.

Desse modo, esse trabalho atingiu seu objetivo e permitiu o cálculo do rendimento, entre outras grandezas, de um motor catalogado, operando sob alimentação não ideal.

Como sugestão para pesquisas futuras que podem dar continuação a esse estudo e comprovar a metodologia em questão, são sugeridos os seguintes trabalhos:

- Montagem em bancada do motor em questão, com carga em seu eixo, sob condições de desequilíbrio e distorção harmônica, para comparar os resultados experimentais com os resultados obtidos nas simulações propostas neste trabalho.
- Verificar se o comportamento do rendimento é o mesmo para diferentes motores de indução trifásico, tanto em baixa quanto em média tensão.

REFERÊNCIAS

- ALVES, A. C. B.; SANTOS, E. B. **Cálculo de potências aparente, ativa, não ativa e indicadores de distorção e desbalanço, e fator de potência segundo Buchholz-Goodhue e IEEE Standard 1459-2010.** 2010.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica.** 2018. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8Revis%C3%A3o_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9. Acesso em: 10 jan. 2019.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica,** 2010.
- BECKER, A. J., *et al.* **Noções Básicas de Programação em MATLAB.** Universidade Federal de Santa Maria, 2010.
- CASTRO, C. A. **Motor de Indução Trifásico (MIT).** Disponível em <http://www.ifba.edu.br/PROFESSORES/castro/MIT.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2020.
- EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2019 – Ano base 2018.** Ministério de Minas e Energia. 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico494/BEN%202019%20Comp%20leto%20WEB.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2019
- LIMA, E. C. **Diagnóstico de Motores de Indução Trifásicos Operando em Redes Desequilibradas e Distorcidas.** 2016. Doutorado (Tese em Ciências em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.
- OLIVEIRA, C. A. **Plataforma para ensaios de motores de indução trifásicos e simulação de cargas mecânicas: acionamento, operação e monitoramento com auxílio de fonte programável.** 2018. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.
- SA, J. S. **Contribuição a análise do comportamento térmico de motores de indução trifásicos com rotor do tipo gaiola.** 1989. Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica, Campinas, SP. 1989. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/260584>. Acesso em: 15 jul. 2018.
- SEVERO, D. S. M. **Estudo da máquina de indução trifásica operando com tensões desequilibradas e distorcidas.** 2020. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.
- SILVA, V. P.. **Análise comparativa do desempenho do motor de indução trifásico de alto rendimento e linha padrão em condições de alimentação ideal**

e não ideal. 2012. 199 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

RODRIGUES, Yuri Von Cosmy Bottoli. **Análise de um modelo equivalente para um grupo de motores de indução trifásicos utilizados em simulações eletromecânicas**. 2019. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.1271>.