



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica

VÍTOR HENRIQUE PEREIRA DE MELO

ANÁLISE DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM UMA PLANTA INDUSTRIAL

**Uberlândia-MG
2019**

VÍTOR HENRIQUE PEREIRA DE MELO

ANÁLISE DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM UMA PLANTA INDUSTRIAL

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes

Uberlândia-MG

2019

VÍTOR HENRIQUE PEREIRA DE MELO

ANÁLISE DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM UMA PLANTA INDUSTRIAL

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Uberlândia, 11 de Novembro de 2019.

Banca

Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes

Prof. Dr. Augusto W. Fleury Veloso da Silveira

Prof. Dr. Hélder de Paula Júnior

Prof. Me. Cássio Alves de Oliveira

Uberlândia

2019

Dedico esse trabalho a minha família, que sempre esteve do meu lado me dando forças.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe Aurélia de Cássia Pereira e meu pai Rafael Simião de Melo por todo apoio, dedicação e carinho oferecidos a mim durante toda a graduação.

A meus familiares por sempre me darem bons conselhos e abrigo nos momentos difíceis.

Ao professor Luciano Coutinho Gomes pela oportunidade de ser seu orientado, dispor de seus conselhos e ensinamentos.

Ao professor Hélder de Paula pela prontidão em resolver minhas dúvidas sobre o trabalho.

Aos amigos Cássio Alves de Oliveira, Vinicius Marcos Pinheiro e aos demais companheiros do Laboratório de Acionamentos Elétricos (LAcE) pelo por estarem sempre do meu lado, me fornecendo apoio e conhecimento.

Agradeço também a todos meus amigos dentro e fora da faculdade que estiveram comigo esse tempo todo.

*“São precisamente as perguntas para as
quais não existem respostas que marcam os
limites das possibilidades humanas e traçam
as fronteiras da nossa existência.”*

(Milan Kundera)

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo de caso sobre harmônicos em uma planta industrial. Uma explicação sobre o tema é fornecida, ressaltando sua importância para o panorama atual, considerando as principais cargas na modernidade e o impacto desse problema para cenário da indústria em questão. A metodologia proposta baseia-se em medições realizadas por um analisador de energia, que em conjunto com as informações técnicas disponíveis sobre a instalação elétrica, permitirá que se gere um diagnóstico do problema. Por meio de simulações foi possível mensurar o efeito de uma alimentação como a encontrada na instalação em motores elétricos semelhantes aos encontrados no sistema industrial em estudo.

Palavras-chave: Harmônicos, Planta industrial, Motores elétricos

ABSTRACT

This paper presents a case study about harmonics in an industrial facility. An explanation about the theme is made, emphasizing its importance to the current panorama, considering the main loads in a modern net and the impact of this problem for the industrial consumer. The methodology applied consists of harmonic measurements by an energy analyzer combined with the existing technical information about the power system to generate a diagnostic regarding the problem. Through computer simulations, the effect of a voltage source with similar harmonic distortion characteristics its measured in electrical motors similar to those found in the industrial facility studied.

Keywords: Harmonics, Industrial facility, Electric motors.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2-1 Onda distorcida	21
Figura 2-2 Espectro harmônico	23
Figura 2-3 Componentes simétricas.....	25
Figura 2-4- Propagação de harmônicos em sistemas elétricos.....	28
Figura 2-5-Resposta em frequência do sistema.....	29
Figura 2-6 Diagrama unifilar	30
Figura 2-7 Circuito equivalente Ressonância paralelo	30
Figura 2-8 Sistema Ressonância Série	31
Figura 2-9 Circuito Ressonância Série.....	31
Figura 2-10 Curva característica de magnetização.....	32
Figura 2-11 Espectro harmônico lâmpada fluorescente	33
Figura 2-12 Espectro Harmônico LED.....	34
Figura 2-13 Retificador trifásico 6 pulsos	35
Figura 2-14 Forno a arco elétrico	36
Figura 2-15 Aumento de resistência devido ao efeito Skin	39
Figura 2-16 Filtro ativo série.....	44
Figura 2-17 Filtro Ativo Paralelo	44
Figura 2-18 Filtro Ativo UPQC.....	45
Figura 2-19 Filtros Sintonizados.....	46
Figura 2-20 Filtro Amortecido	46
Figura 3-1 Diagrama Unifilar Simplificado	48
Figura 3-2 Perfil de tensões em M1	50
Figura 3-3 Distorções totais em M1.....	51
Figura 3-4 Espectro Harmônico de tensões P95 em M1	52
Figura 3-5 Perfil das tensões em M2.....	53
Figura 3-6 Perfil das Distorções Harmônicas totais em M2.....	54
Figura 3-7 Espectro harmônico de tensões P95 em M2	55
Figura 3-8 Perfil das correntes em M2	56
Figura 3-9 Espectro harmônico de correntes P95 em M2	58
Figura 3-10 Perfil de tensões quadro de distribuição	60
Figura 3-11 Perfil das distorções de tensão quadro de distribuição	61
Figura 3-12 Espectro harmônico de tensões P95 em M3	62

Figura 3-13 Perfil das correntes no ponto M3	63
Figura 3-14 Espectro harmônicos de corrente P95 em M3	64
Figura 4-1 Motor com alimentação puramente senoidal	69
Figura 4-2 - Parâmetros da Máquina.....	70
Figura 4-3 Simulação com o perfil de distorção encontrado em M1.....	70
Figura 4-4 Tensão aplicada na simulação 2.....	71
Figura 4-5 Rotação e conjugado no eixo do motor.....	72
Figura 4-6 Oscilações de conjugado simulação 2	72
Figura 4-7 Tensão aplicada na simulação 3.....	73
Figura 4-8 Rotação e conjugado no eixo do motor simulação 3.....	74
Figura 4-9 Oscilação de conjugado simulação 3.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 Indicadores de Harmônicos de Tensão	23
Tabela 2-2 Indicadores de correntes harmônicas	24
Tabela 2-3 Sequência de fase ordens harmônicas	27
Tabela 2-4 Lei de formação sequência de fase harmônicas	27
Tabela 2-5 Limites de Distorção Harmônica PRODIST	41
Tabela 2-6 Limites de distorção de corrente para sistemas entre 120V a 69kV	42
Tabela 2-7 Limites de distorção de tensão	42
Tabela 3-1 Características dos Transformadores	49
Tabela 3-2 Características dos bancos de capacitores	49
Tabela 3-3 Tensões Gerais em M1	50
Tabela 3-4 Fator de desequilíbrio em M1	50
Tabela 3-5 Distorções totais de tensão em M1	51
Tabela 3-6 Distorções Harmônicas individuais fase A em M1	52
Tabela 3-7 Valores gerais de tensão em M2	53
Tabela 3-8 Fator de desequilíbrio em M2	54
Tabela 3-9 Distorções totais de tensão em M2	54
Tabela 3-10 Distorções individuais de tensão em M2 na fase A	55
Tabela 3-11 Dados gerais das correntes em M2	56
Tabela 3-12 Distorções gerais de corrente em M2	57
Tabela 3-13 Distorções individuais de corrente da fase A em M2	57
Tabela 3-14 Distorção total de demanda em M2	58
Tabela 3-15 Fator K do transformador 4	58
Tabela 3-16 Distorção de demanda individual em M2	59
Tabela 3-17 Tensões gerais quadro de distribuição	60
Tabela 3-18 Fator de desequilíbrio no ponto M3	60
Tabela 3-19 Distorções totais de tensão em M3	61
Tabela 3-20 Distorções individuais de tensão ponto M3	61
Tabela 3-21 Dados gerais de corrente ponto M3	63
Tabela 3-22 Distorções totais de corrente ponto M3	63
Tabela 3-23 Distorções individuais de corrente ponto M3	64
Tabela 3-24 Distorção total de demanda no Ponto M3	65
Tabela 3-25 Distorções individuais de demanda ponto M3	65

Tabela 4-1 Resumo dos dados da simulação 1	69
Tabela 4-2 Valores da Simulação 2	71
Tabela 4-3 Valores da simulação 3	73
Tabela A-1 Dados de catálogo do motor	80
Tabela A-2 Dados do motor	80
Tabela A-3 Indutâncias do motor	80

LISTA DE EQUAÇÕES

(2-1) Equação geral do indutor	21
(2-2) Equação geral do capacitor	21
(2-3) Distorção individual de tensão	24
(2-4) Distorção total de tensão	24
(2-5) Distorção individual de corrente.....	24
(2-6) Distorção total de corrente.....	24
(2-7) Distorção total de demanda	25
(2-8) Tensão distorcida na fase A	26
(2-9) Tensão distorcida na fase B	26
(2-10) Tensão distorcida na fase C	26
(2-11) Tensão distorcida simplificada na fase A.....	26
(2-12) Tensão distorcida simplificada na fase B.....	26
(2-13) Tensão distorcida simplificada na fase C.....	26
(2-14) Condição de ressonância	29
(2-15) Condição de ressonância expandida	29
(2-16) Frequência de ressonância.....	29
(2-17) Impedância equivalente ressonância paralelo	30
(2-18) Impedância equivalente ressonância série	32
(2-19) Harmônicos característicos retificadores trifásicos	35
(2-20) Fator K	38

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

V_L	Tensão no indutor [V]
L	Indutância [H]
$\frac{di}{dt}$	Derivada da corrente em relação ao tempo [A/s]
I_c	Corrente no capacitor [A]
C	Capacitância [F]
$\frac{dv}{dt}$	Derivada da tensão em relação ao tempo [V/s]
h	Ordem harmônica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
DIT	Distorção individual de tensão
DTT	Distorção total de tensão
DTTp	Distorção total de tensão para as componentes pares
DTTi	Distorção total de tensão para as componentes ímpares.
DTT ₃	Distorção total de tensão para as componentes múltiplas de 3.
V _h	Tensão de ordem harmônica h [V].
h _{máx}	Ordem harmônica máxima
h _{mín}	Ordem harmônica mínima
V ₁	Tensão fundamental [V]
DII	Distorção individual de corrente
DTI	Distorção harmônica total de corrente
DTIp	Distorção total de corrente para as componentes pares
DTIi	Distorção total de corrente para as componentes ímpares
DTI ₃	Distorção total de corrente para as componentes múltiplas de 3
I _h	Corrente harmônica de ordem h[A]
I ₁	Corrente fundamental[A]
TDD	Taxa de distorção de demanda
I _n	Corrente nominal [A]
V _a	Tensão na fase A [V]
V _b	Tensão na fase B [V]
V _c	Tensão na fase C [V]
wh	Frequência angular de ordem h [rad/s]

ω_1	Frequência angular da fundamental [rad/s]
φ_1	Defasamento angular da fundamental
φ_h	Defasamento angular de ordem h
t	Tempo [s]
z	Impedância [Ω]
ΔV	Queda de tensão [V]
PCC	Ponto comum de conexão
MIT	Motor de indução trifásico
f_0	Frequência de ressonância
X_c	Reatância Capacitiva
X_L	Reatância Indutiva
Z_{eq}	Impedância equivalente
V	Tensão [V]
I	Corrente [A]
LED	Light-emitting diode
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor
p	Número de pulsos
K	Fator k
I_L	Corrente média de demanda máxima da carga [A]
Dc	Direct current
UPQC	Unified Power Quality Conditioner
V_c	Tensão injetada[V]
V_s	Tensão da fonte [V]
V_L	Tensão da carga [V]
I_c	Corrente injetada [A]
I_L	Corrente na carga [A]
I_s	Corrente na fonte [A]
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
Δ/Y	Delta-estrela
RMS	Root Mean Square
P95	Percentil 95
P _{in}	Potência de entrada [W]
P _{out}	Potência de saída [W]

T _{carga}	Conjugado da carga [W]
T _{emag}	Conjugado eletromagnético no eixo [W]
n	Rendimento [W]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Justificativa.....	19
1.2	Objetivo	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	Distorções Harmônicas	21
2.1.1	Ordem Harmônica e espectro harmônico	22
2.1.2	Indicadores de harmônicos.....	23
2.1.3	Sequência de fase dos Harmônicos	25
2.1.4	Surgimento e propagação de harmônicos	27
2.1.5	Ressonância	29
2.1.5.1	Ressonância Paralelo	29
2.1.5.2	Ressonância série.....	31
2.2	Fontes de harmônicos em sistemas industriais.....	32
2.2.1	Elementos saturáveis	32
2.2.2	Sistemas de iluminação	33
2.2.3	Conversores eletrônicos	34
2.2.4	Fornos a arco elétrico	36
2.3	Impactos dos harmônicos na indústrias	36
2.3.1	Impactos em motores de Indução.....	36
2.3.2	Transformadores	38
2.3.3	Bancos de Capacitores.....	38
2.3.4	Cabos	39
2.3.5	Telecomunicações.....	40
2.4	Normas relacionas a harmônicos	40
2.4.1	PRODIST Módulo 8	40
2.4.2	Norma IEEE 519.....	41
2.5	Mitigação de harmônicos	43
2.5.1	Filtros Ativos	43
2.5.2	Filtros Passivos.....	45
3	ESTUDO DE CASO	47
3.1	Diagrama unifilar simplificado	48

3.2	Características da instalação	48
3.3	Principais cargas não lineares	49
3.4	Medição 1.....	49
3.5	Medição 2.....	53
3.5.1	Análise das tensões em M2.....	53
3.5.2	Análise das correntes em M2	56
3.6	Medição 3.....	59
3.6.1	Análise das tensões.....	59
3.6.2	Análise das correntes	62
3.7	Análise de resultados	65
4	SIMULAÇÕES.....	68
4.1	Simulação 1 - Motor com alimentação puramente senoidal.....	69
4.2	Simulação 2 – Perfil de distorção encontradas em M1	70
4.3	Simulação 3 – Perfil de distorções encontradas em M2.....	72
4.4	Análise de resultados	74
5	CONCLUSÃO	76
6	Bibliografia	78
	ANEXO A	80

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

No meio industrial, grande parte da energia consumida no processo produtivo é elétrica. Tal energia é utilizada para alimentar diversos tipos de cargas que transformam a matéria prima no produto final. Quando essa energia não está dentro de um certo padrão de qualidade, diversos equipamentos e até mesmo o processo industrial como um todo são comprometidos.

Existem vários motivos que podem fazer com que a energia perca suas características ideais. Nas últimas décadas, houve a popularização de equipamentos que utilizam chaves eletrônicas, como o conversor de frequências, utilizado vastamente na indústria para o controle de velocidade de motores elétricos [12] [16]. Esses equipamentos, são conhecidos por serem não lineares e causam a “injeção” de harmônicos na instalação elétrica.

Quando equipamentos elétricos são alimentados por uma fonte onde há a presença de harmônicos, eles podem apresentar redução da vida útil esperada, redução no seu rendimento, funcionamento indevido e até mesmo queima [5] [9] [15]. Esses fatores em conjunto são prejudiciais para a gestão da empresa como um todo.

Muitos desses equipamentos são de elevado custo, e é preciso que sua vida útil esperada seja cumprida para que o investimento seja compensado. Além disso, muitos deles tem uma grande demanda de energia, por isso para viabilizar o processo é necessário que seu rendimento se mantenha em condições aceitáveis.

Uma energia “ruim” pode resultar na operação indevida do maquinário utilizado no processo, interferindo na qualidade do produto final. A queima de equipamentos em uma planta industrial pode até mesmo significar uma parada do processo produtivo. Por vezes essas paradas podem causar um prejuízo maior do que o custo do equipamento danificado.

Levando-se em consideração todos esses fatores, é possível concluir que é necessário sempre monitorar a qualidade da energia em uma instalação industrial. Caso as características desejáveis não sejam alcançadas é preciso que se tome medidas para corrigir o problema.

1.2 Objetivo

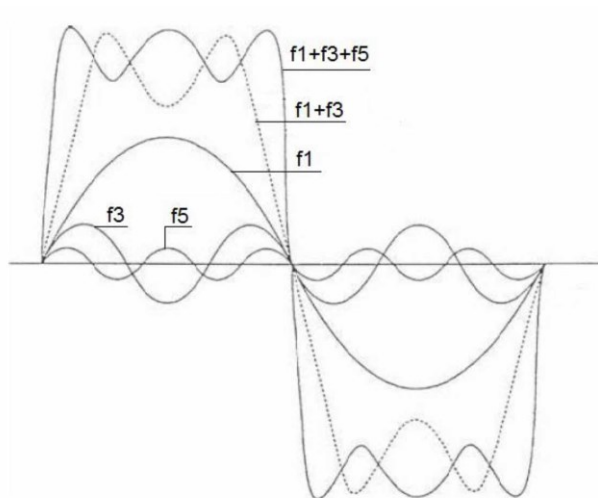
O objetivo deste trabalho é realizar a medição dos harmônicos em uma dada planta industrial utilizando um analisador de energia. De acordo com os dados coletados e com as características do sistema elétrico, tentar descobrir as causas e os efeitos das distorções, simulando em computador o que uma alimentação com as características encontradas poderia provocar em um motor ligado nessa instalação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Distorções Harmônicas

Todas as instalações elétricas industriais foram projetadas para serem alimentadas por um sinal com uma forma de onda senoidal, com frequência fixa (60hz no Brasil). Quando um sinal tem uma forma de onda diferente, porém periódica, dizemos que ele está distorcido, ou é um sinal não-senoidal.

Figura 2-1 Onda distorcida



Fonte: Retirada de [5]

Ondas não senoidais, quando aplicadas aos componentes passivos do circuito elétrico tendem a não conservar sua forma de onda, tornando a análise dos circuitos mais complexa. O fato fica mais claro quando observamos mais de perto as equações genéricas de tensão do indutor e de corrente do capacitor a seguir [2]:

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2-1)$$

$$I_C = C \frac{dV_C}{dt} \quad (2-2)$$

Onde,

V_L é a tensão no indutor

L é a indutância

i_L é a corrente no indutor

I_C é a corrente no capacitor

C é a capacitância

V_C é a tensão no capacitor

É notável em ambas as equações que tensão e corrente se relacionam por meio de equações diferenciais. Dessa maneira, utilizar uma forma de onda senoidal é o ideal, pois ela é inerente tanto à integração quanto à derivação, mantendo seu formato e variando apenas outros parâmetros como ângulo de fase e amplitude.

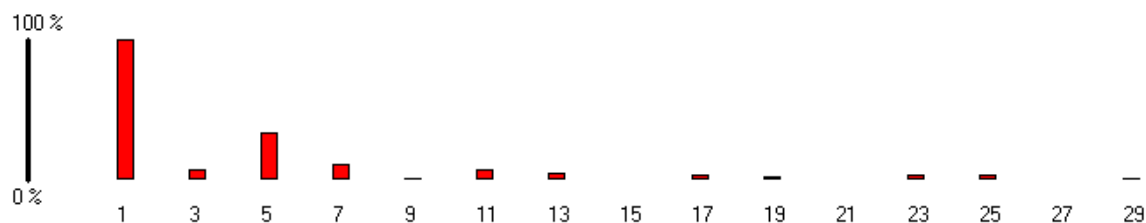
Assim, a prática mais usual ao se analisar um sinal distorcido é utilizar a série de Fourier, que permite decompor um sinal não-senoidal periódico em uma somatória de diversas componentes senoidais, analisar a influência de cada componente separadamente e por meio de uma sobreposição de efeitos ter uma ideia do contexto geral. A conceituação da transformada de Fourier pode ser encontrada em [2], [5] e [9].

2.1.1 Ordem Harmônica e espectro harmônico

Ao realizar o estudo de determinado sinal, é comum que se faça referência à ordem harmônica. Esse termo, comumente representado por “h” é a relação entre uma frequência e a fundamental do sinal analisado [9]. Por exemplo, quando se trata do sistema elétrico brasileiro a frequência fundamental é 60Hz, a 2ª ordem harmônica é 120Hz e a 3ª é 180Hz.

O espectro harmônico é utilizado para analisar a participação efetiva de cada frequência para a composição do sinal distorcido. O espectro harmônico é um gráfico discreto que apresenta no eixo vertical a amplitude correspondente e no eixo horizontal a ordem harmônica, ou até mesmo cada frequência. O espectro harmônico é o dado que normalmente um equipamento analisador de energia fornece sobre o sistema, como é o caso da Figura 2-2, retirada do Software ANL6000 do analisador de energia RE4000 da EMBRASUL:

Figura 2-2 Espectro harmônico



Fonte: Software ANL6000

2.1.2 Indicadores de harmônicos

Ao se observar apenas as informações abstratas sobre harmônicos não é possível ter uma ideia do quanto uma deformação específica pode ser prejudicial. Por isso foram desenvolvidos indicadores que traduzem melhor qual é a situação encontrada. Existem diversos termos para esses indicadores, entretanto a forma de calculá-los pouco se altera e seu significado também. Abaixo segue uma tabela com as terminologias adotadas nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (PRO-DIST) [1] para a análise de harmônicos.

Tabela 2-1 Indicadores de Harmônicos de Tensão

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DIT_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	$DTT\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	$DTT_p\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	$DTT_i\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	$DTT_3\%$
Tensão harmônica de ordem h	V_h
Ordem harmônica	h
Ordem harmônica máxima	$h_{m\acute{a}x}$
Ordem harmônica mínima	$h_{m\acute{i}n}$
Tensão fundamental medida	V_1

Fonte: Retirada de [1]

Devido ao fato de o PRODIST tratar apenas das distorções de tensão a Tabela 2-2 traz a nomenclatura que diz respeito aos indicadores de corrente.

Tabela 2-2 Indicadores de correntes harmônicas

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de corrente de ordem h	$DII_h\%$
Distorção harmônica total de Corrente	$DTI\%$
Distorção harmônica total de corrente para as componentes pares não múltiplas de 3	$DTI_p\%$
Distorção harmônica total de corrente para as componentes ímpares não múltiplas de 3	$DTI_i\%$
Distorção harmônica total de corrente para as componentes múltiplas de 3	$DTI_3\%$
Corrente harmônica de ordem h	I_h

Fonte: Elaborada pelo Autor

A terminologia que será adotada nesse trabalho obedecerá ao PRODIST, portanto os mais importantes indicadores a serem utilizados são definidos pelas seguintes equações:

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100\% \quad (2-3)$$

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \quad (2-4)$$

$$DII_h\% = \frac{I_h}{I_1} \cdot 100\% \quad (2-5)$$

$$DTI\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_1} \quad (2-6)$$

O indicador distorção total de tensão percentual (DTT%) é com certeza o mais útil. A partir dele pode-se ter uma ideia do desvio total que a onda tem de uma puramente senoidal. A distorção total de corrente percentual (DTI%) tem significado semelhante, porém como dá o percentual de harmônicos em relação a fundamental, seu significado é pouco relevante, dado ao fato de a corrente variar muito com o carregamento do circuito.

A taxa de distorção de demanda (TDD) é o indicador que devemos nos atentar ao tratar uma corrente distorcida, pois ela leva em consideração a corrente nominal do barramento [5] e pode ser calculada segundo a equação a seguir:

$$TDD\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\text{máx}}} I_h^2}}{I_n} \cdot 100 \quad (2-7)$$

Onde,

TDD% é a taxa de distorção de demanda

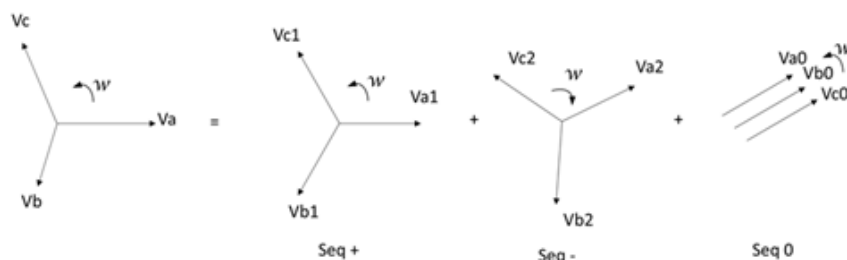
I_n é a amplitude da corrente nominal

2.1.3 Sequência de fase dos Harmônicos

A teoria de circuitos elétricos utiliza a decomposição em componentes simétricas, que avalia que: *“qualquer sistema polifásico com N fasores desequilibrados poderia ser expresso como a soma de três conjuntos simétricos de N fasores equilibrados, denominados componentes simétricas.”*[9].

Para analisar os sistemas trifásicos desequilibrados, é preciso efetuar a decomposição em três componentes equilibradas, uma dita de “sequência-positiva”, que seria a mesma do sistema, caso esteja equilibrado, a “sequência-negativa” que é a sequência de fases oposta a primeira, e a “sequência-zero” em que os três fasores que a compõe estão em fase.

Figura 2-3 Componentes simétricas



Fonte: Elaborada pelo autor

Como é descrito em [11] e [9], quando se trata de sistemas trifásicos com distorções harmônicas existe uma condição análoga ao desequilíbrio de tensões. Decompondo-se as tensões ou correntes de cada fase em série de Fourier, cada ordem harmônica tem uma sequência de fases característica. Para um sistema trifásico as formas de onda distorcidas podem ser descritas como:

$$v_a(t) = v_1 \cdot \text{sen}(w_1 + \varphi_1) + v_2 \cdot \text{sen}(2w_1 + \varphi_2) + v_3 \cdot \text{sen}(3w_1 + \varphi_3) + v_4 \cdot \text{sen}(4w_1 + \varphi_4) \dots \quad (2-8)$$

$$v_b(t) = v_1 \cdot \text{sen}(w_1 + \varphi_1 + 120^\circ) + v_2 \cdot \text{sen}(2w_1 + \varphi_2 + 2 \cdot 120^\circ) + v_3 \cdot \text{sen}(3w_1 + \varphi_3 + 3 \cdot 120^\circ) + v_4 \cdot \text{sen}(4w_1 + \varphi_4 - 4 \cdot 120^\circ) \dots \quad (2-9)$$

$$v_c(t) = v_1 \cdot \text{sen}(w_1 + \varphi_1 - 120^\circ) + v_2 \cdot \text{sen}(2w_1 + \varphi_2 - 2 \cdot 120^\circ) + v_3 \cdot \text{sen}(3w_1 + \varphi_3 - 3 \cdot 120^\circ) + v_4 \cdot \text{sen}(4w_1 + \varphi_4 - 4 \cdot 120^\circ) \dots \quad (2-10)$$

Se multiplicamos 120° por 2, temos 240° , que é idêntico a -120° , ao multiplicarmos por 3, obtemos 360° , que é análogo a 0 e ao multiplicarmos por 4 obtemos 480° que equivale a 120° . Portanto, pode-se constatar que a componente de segunda ordem tem a sequência de fases invertida em relação à fundamental, caracterizando sequência negativa. Na terceira ordem todos os fasores estão em fase, caracterizando sequência zero, e na quarta ordem a sequência de fases permanece idêntica à fundamental, caracterizando sequência positiva. Resolvendo-se as multiplicações dos ângulos e fazendo as simplificações trigonométricas em (2-8), (2-9) e (2-10) obtemos:

$$v_a(t) = v_1 \cdot \text{sen}(w_1 + \varphi_1) + v_2 \cdot \text{sen}(w_2 + \varphi_2) + v_3 \cdot \text{sen}(w_3 + \varphi_3) + v_4 \cdot \text{sen}(4w_1 + \varphi_4) \dots \quad (2-11)$$

$$v_b(t) = v_1 \cdot \text{sen}(w_1 + \varphi_1 + 120^\circ) + v_2 \cdot \text{sen}(2w_1 + \varphi_2 - 120^\circ) + v_3 \cdot \text{sen}(3w_1 + \varphi_3) + v_4 \cdot \text{sen}(4w_1 + \varphi_4 + 120^\circ) \dots \quad (2-12)$$

$$v_c(t) = v_1 \cdot \text{sen}(w_1 + \varphi_1 - 120^\circ) + v_2 \cdot \text{sen}(2w_1 + \varphi_2 + 120^\circ) + v_3 \cdot \text{sen}(3w_1 + \varphi_3) + v_4 \cdot \text{sen}(4w_1 + \varphi_4 - 120^\circ) \dots \quad (2-13)$$

Continuando as relações, é possível notar que existe um padrão, o mesmo pode ser observado na Tabela 2-3:

Tabela 2-3 Sequência de fase ordens harmônicas

Ordem	Sequência
1ª	+
2ª	-
3ª	0
4ª	+
5ª	-
6ª	0
7ª	+
8ª	-
9ª	0
10ª	+

Fonte: Elaborada pelo autor

O padrão é descrito pelas equações na Tabela 2-4:

Tabela 2-4 Lei de formação sequência de fase harmônicas

Tabela Sequência	Harmônicas Presentes
0	$h=3k$
+	$h=3k+1$
-	$h=3k-1$

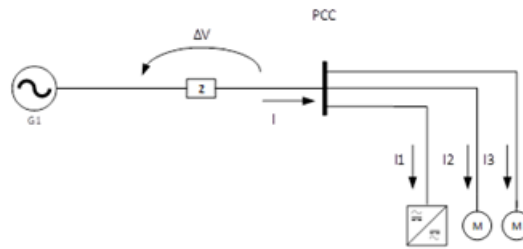
Fonte: Elaborada pelo autor

O conhecimento de tal relação se faz necessário para entender a propagação dos harmônicos e o efeito causado por eles em motores elétricos, que são geralmente o tipo mais relevante de carga na maioria das instalações industriais.

2.1.4 Surgimento e propagação de harmônicos

O aparecimento de harmônicos em sistemas elétricos está normalmente associado com as cargas conectadas a ele. Cargas não-lineares, diferentemente dos elementos passivos do circuito elétrico, mesmo ao serem alimentados por tensões perfeitamente senoidais, produzem correntes distorcidas. Como explicado em [5] e [9] essa corrente circula pelo sistema, nos cabos, conexões, transformadores e causa quedas de tensão, que distorcem a forma de onda nos barramentos. Tal fato pode ser observado na Figura 2-4:

Figura 2-4- Propagação de harmônicos em sistemas elétricos



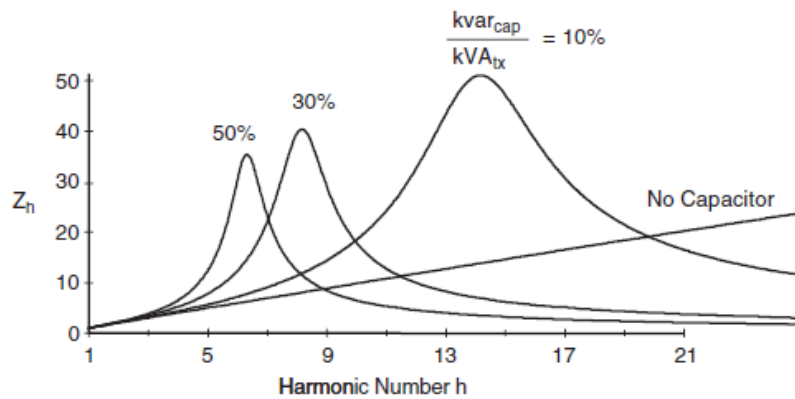
Fonte: Elaborada pelo autor.

Apesar do gerador “G1” proporcionar tensão perfeitamente senoidal, devido à circulação da corrente “I” que tem em sua composição a corrente distorcida “I1”, a queda de tensão sobre as impedâncias do sistema, representadas na figura por “ ΔV ” também é distorcida e faz com que a tensão no ponto comum de conexão (PCC), “ $V_{PCC} = V_{G1} - \Delta V$ ”, seja também distorcida. Os elementos lineares como “M1” e “M2”, que na figura representam motores de indução trifásicos (MIT), ao serem alimentados por uma tensão distorcida, também produzem correntes distorcidas, contribuindo ainda mais para a distorção da tensão no PCC.

Assim, pode-se constatar que a propagação de harmônicos não está apenas relacionada com as cargas, mas com as próprias características do circuito de alimentação. Geralmente um circuito forte, ou seja, com baixa impedância e alta corrente de curto circuito, não está propício a ser impactado por harmônicos, já que a queda de tensão em seus elementos é baixa [5]. A grande exceção é quando há a presença de bancos de capacitores para correção de fator de potência.

Na análise do circuito de uma planta industrial, considera-se a impedância dos transformadores e dos cabos, que é predominantemente indutiva e apresentam um aumento linear com a frequência. Quando é adicionado um banco de capacitores para correção do fator de potência o quadro se altera bastante. Variações bruscas em determinadas frequências são notadas, devido ao fato de esses elementos capacitivos inserirem no circuito a ressonância, nos levando à conclusão que: apesar de capacitores não gerarem harmônicos, eles intensificam seus efeitos [5]. A figura abaixo ilustra a impedância do sistema de acordo com a frequência, com e sem banco de capacitores.

Figura 2-5-Resposta em frequência do sistema



Fonte: Retirada de [5]

2.1.5 Ressonância

O conceito de ressonância se aplica a várias áreas da ciência e engenharia. Conforme [5] e [9], em sistemas elétricos de potência a ressonância ocorre quando há a presença de elementos capacitivos e indutivos no mesmo circuito e suas reatâncias se equivalem, a ressonância pode ocorrer tanto para ramos em paralelo, quanto para os que estão em série, tendo características distintas para ambos os casos.

A frequência de ressonância pode ser encontrada por:

$$f_0 \rightarrow X_c = X_L \quad (2-14)$$

$$\frac{1}{2 \cdot \pi f_0 C} = 2 \cdot \pi f_0 L \quad (2-15)$$

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (2-16)$$

Onde,

X_c é a reatância capacitiva

X_L é a reatância indutiva

f_0 é a frequência de ressonância

L é a indutância

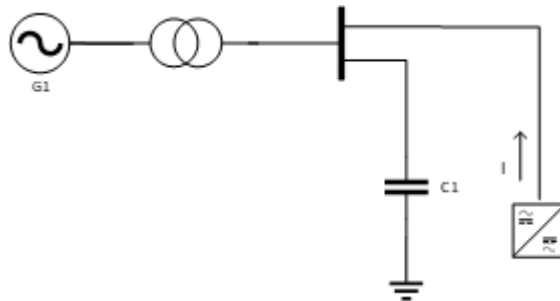
C é a capacitância

2.1.5.1 Ressonância Paralelo

Em sistemas elétricos de potência, quando há a presença de um banco de capacitores, do ponto de vista da carga que gera os harmônicos, esse banco está em paralelo com o sistema a montante, o qual tem características predominantemente

indutivas [15]. A Figura 2-6 ilustra um circuito genérico de um sistema com uma carga não linear, um transformador e um capacitor:

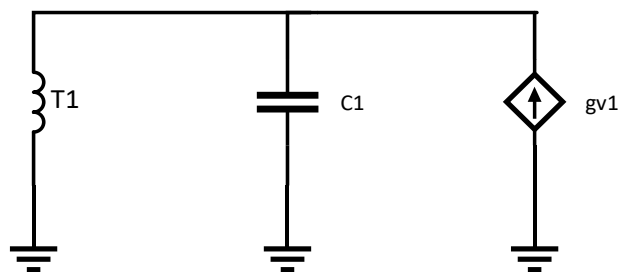
Figura 2-6 Diagrama unifilar



Fonte: elaborada pelo autor

A carga funciona como uma fonte de corrente “I” não senoidal que se propaga pelo sistema, aos “olhos” dessa fonte o circuito se resume ao transformador e ao capacitor em paralelo, como no circuito da figura Figura 2-7:

Figura 2-7 Circuito equivalente Ressonância paralelo



Fonte: Elaborada pelo autor

A impedância equivalente vista pela fonte de corrente pode ser obtida com a seguinte equação:

$$Z_{eq} = \frac{X_c \cdot X_l}{X_l - X_c} \quad (2-17)$$

Onde,

Z_{eq} é a impedância equivalente

X_c é a reatância capacitiva

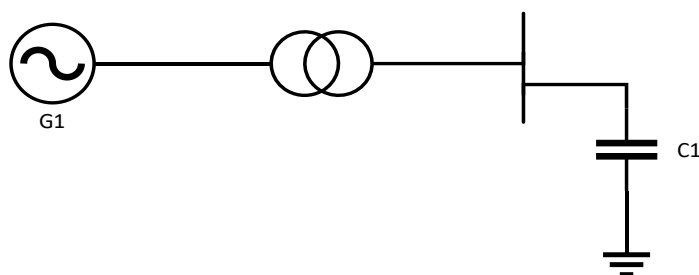
X_l é a reatância indutiva

Na ressonância (2-17), as reatâncias capacitivas e indutivas se anulam e o denominador da equação tende a zero, logo a impedância tende a infinito. Na prática isso não ocorre devido a presença de elementos resistivos no circuito que atenuam o efeito da ressonância, porém o resultado ainda é uma alta impedância. A circulação de uma corrente distorcida provoca queda de tensão elevada nas ordens harmônicas mais próximas da frequência ressonante e subsequente maior distorção da tensão no ponto de acoplamento comum (PCC), é importante ressaltar que neste caso a ressonância e a poluição por harmônicos ocorre da carga para o sistema [5].

2.1.5.2 Ressonância série

O diagrama unifilar da Figura 2-8 representa um exemplo:

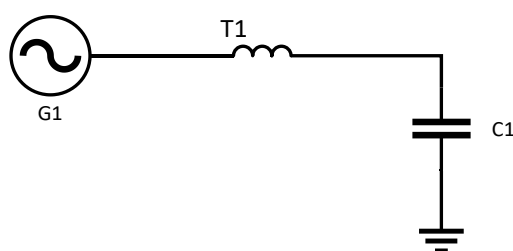
Figura 2-8 Sistema Ressonância Série



Fonte: Elaborada pelo autor

Se a fonte G1 apresentar uma forma de onda distorcida, com uma frequência que provoque ressonância na associação série entre transformador (predominantemente indutivo) e o capacitor, a corrente provocada por essa harmônica tende a ter valores elevados. A Figura 2-9 ilustra o circuito que a fonte do sistema enxerga:

Figura 2-9 Circuito Ressonância Série



Fonte: Elaborada pelo autor

A partir do circuito é possível concluir que:

$$Z_{eq} = X_L - X_C \quad (2-18)$$

Se o circuito está em ressonância, a impedância do circuito tende a zero, não atingido esse valor devido à presença de componentes resistivos no sistema. Mesmo assim o seu baixo valor faz com que a fonte “G1” apresente uma corrente com alta componente harmônica na ordem mais próxima da ressonância. Essa alta corrente tende a sobrecarregar, principalmente, o banco de capacitores e pode ocasionar problemas catastróficos.

É importante ressaltar que nesse tipo de ressonância, o efeito danoso se dá em função da tensão a montante já poluída [5].

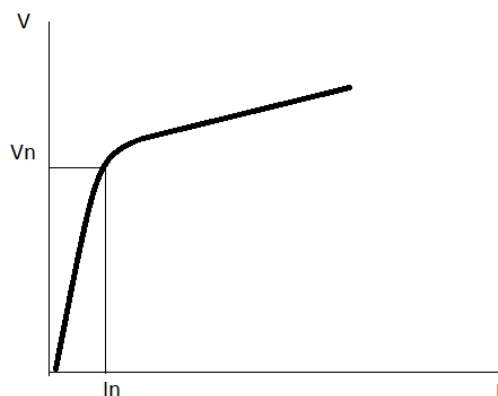
2.2 Fontes de harmônicos em sistemas industriais

2.2.1 Elementos saturáveis

Certos equipamentos que fazem a transformação de corrente elétrica em campo magnético e utilizam materiais ferromagnéticos em seu núcleo trabalham na região de saturação magnética. Quando estão operando a partir de certo nível de tensão, a relação entre “VxI” deixa de ser linear, esse fenômeno é chamado de saturação magnética [15].

Por motivos econômicos, alguns desses equipamentos são confeccionados para trabalhar exatamente nessa região da curva, conhecida como “joelho”. A figura abaixo mostra um exemplo genérico de curva de um elemento saturável:

Figura 2-10 Curva característica de magnetização



Fonte: Elaborada pelo autor

A saturação magnética é mais notada na corrente de magnetização de transformadores, porém apesar de ela apresentar uma forma bastante distorcida, não é uma fonte tão relevante de poluição de harmônica, pois representa apenas cerca de 1% da corrente nominal do equipamento [9].

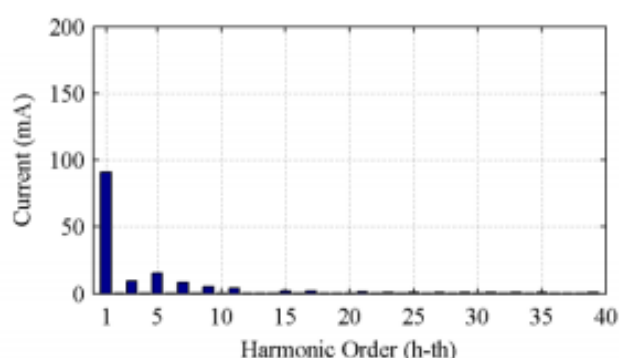
Motores elétricos também apresentam essas características quando sobrecarregados e alguns motores monofásicos de potência fracionária costumam ter uma corrente quase triangular, porém não causam muitos impactos aos sistemas elétricos industriais [9].

2.2.2 Sistemas de iluminação

Os sistemas de iluminação sofreram grande evolução, fazendo com que as lâmpadas incandescentes (elementos lineares) fossem substituídas por outros tipos mais eficientes, porém não lineares, como as fluorescentes e mais recentemente as lâmpadas LED [4].

As lâmpadas fluorescentes são lâmpadas de descarga que dependem de um reator para funcionar. O reator garante a maior tensão inicial necessária para a descarga elétrica inicial. Depois que o arco é estabelecido e a tensão decresce, os reatores limitam a corrente que circula pela lâmpada, tais dispositivos são não lineares e apresentam uma forma de onda distorcida de sua corrente [5], como mostra o espectro de frequências na Figura 2-11:

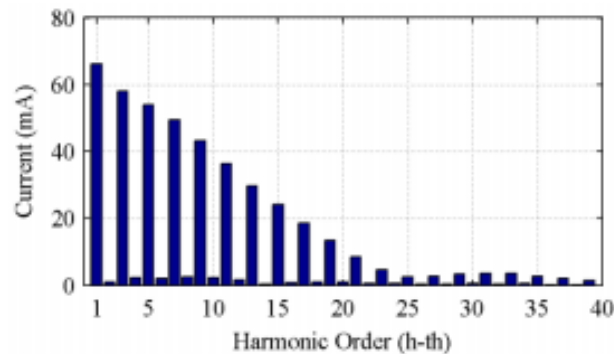
Figura 2-11 Espectro harmônico lâmpada fluorescente



Fonte: Retirada de [4]

As lâmpadas LED, mais recentes e mais eficientes, também dependem de dispositivos não lineares para funcionar, já que são acionadas por corrente contínua necessitam de retificadores. A Figura 2-12 mostra o espectro harmônico de uma lâmpada LED.

Figura 2-12 Espectro Harmônico LED



Fonte: Retirada de [4]

2.2.3 Conversores eletrônicos

Os conversores eletrônicos de potência, atualmente, são a causa de poluição harmônica mais relevante nos sistemas elétricos industriais [12]. Esses equipamentos que se difundiram nas últimas décadas com a evolução dos semicondutores e da eletrônica de potência, utilizam de chaves estáticas (Diodos, IGBTs, MOSFETs, Tiristores, por exemplo) que funcionam como interruptores, bloqueando ou permitindo o fluxo de corrente para manipular a energia entregue a carga. Seja para converter de corrente alternada para corrente contínua, como acontece nos retificadores ou apenas para reduzir a “tensão média” aplicada a um motor e suavizar sua partida, como ocorre nos “soft starters”. Tal comportamento é não linear e a forma de onda de sua corrente é não senoidal.

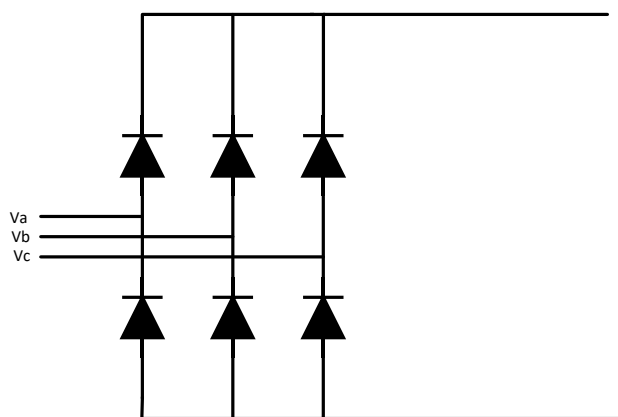
No meio industrial o mais popular desses dispositivos é o conversor de frequência, utilizado para controle de velocidade em motores. Eles são compostos de uma parte de retificação, que transforma a corrente alternada vinda da rede em corrente contínua e outra parte que transforma novamente em corrente alternada, porém com a frequência da forma de onda gerada variável, permitindo então o controle da velocidade do motor.

Os retificadores são classificados quanto à alimentação (monofásicos e trifásicos) e pelo seu número de pulsos. Os trifásicos se diferenciam dos monofásicos principalmente pelo fato de não poluírem a rede com harmônicos de terceira ordem e serem cargas equilibradas. Quanto ao número de pulsos, os monofásicos existem na forma de 1 e 2 pulsos, já os trifásicos existem em uma maior variedade, de 3, 6, 12, 18 e 24 pulsos. Quanto maior o número de pulsos menos distorcida é a forma de onda

da corrente e mais alta é a ordem dos harmônicos predominantes [9]. Retificadores de 12, 18 e 24 pulsos utilizam de arranjos mais complexos com transformadores e são utilizados em cargas muito grandes, com alta demanda de corrente.

Dessa forma, o tipo de retificador mais popular, utilizado na grande maioria dos conversores trifásicos industriais é o de 6 pulsos cujo o arranjo é mostrado na figura a seguir:

Figura 2-13 Retificador trifásico 6 pulsos



Fonte: Elaborada pelo autor

Os harmônicos predominantes de cada tipo de retificador são definidos pelo número de pulsos que eles possuem. A equação a seguir, presente em [9], permite descobrir quais ordens determinado retificador trifásico produz em alimentações ideais:

$$h = k \cdot p \pm 1 \quad (2-19)$$

Onde,

k é um número inteiro

p é o número de pulsos

h é a ordem harmônica

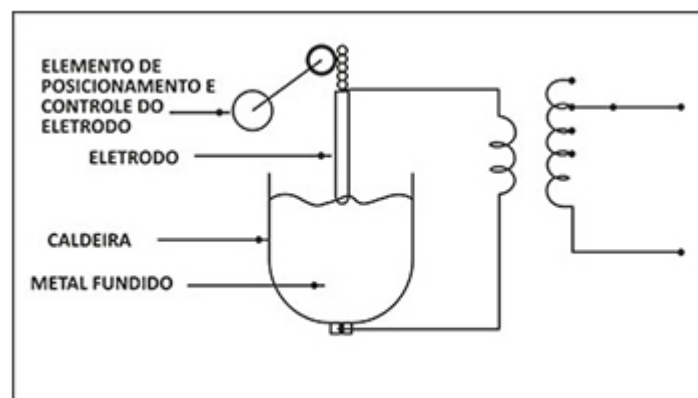
É importante observar que no caso dos retificadores trifásicos de 6 pulsos, os principais harmônicos estão na 5ª e 7ª ordens. Já no caso de um retificador de 24 pulsos por exemplo, os seus harmônicos característicos estão na 23ª e 25ª ordens, que tem no sistema de 60hz: 1380hz e 1500hz. Tais frequências são muito elevadas e de difícil propagação pelo sistema, causando menos problemas.

2.2.4 Fornos a arco elétrico

O forno a arco elétrico é utilizado na indústria para fundição de metais. Ele é constituído de três eletrodos que formam arcos elétricos no metal a ser fundido. São equipamentos altamente perturbadores, causando diversos tipos de problemas relacionados a qualidade de energia [9].

No processo de fundição, a impedância do arco elétrico varia de forma brusca e aleatória durante suas várias fases de operação. Fazendo com que o comportamento de sua corrente seja imprevisível e contenha diversas ordens harmônicas diferentes, incluindo ordens pares e inter-harmônicas [15]. O forno a arco também é um equipamento de altíssima demanda de corrente já que, em alguns momentos, é um curto trifásico praticamente sólido. A figura abaixo mostra a representação dos elementos de um forno a arco:

Figura 2-14 Forno a arco elétrico



Fonte: Retirada de [9]

2.3 Impactos dos harmônicos na indústria

2.3.1 Impactos em motores de Indução

Um dos elementos cujo impacto das distorções harmônicas é muito relevante no meio industrial é motor de indução [14]. Ele é o tipo mais comum de carga e com uma das maiores demandas dentro de um sistema industrial. Isso aliado a seu custo e sua criticidade no processo, torna necessário levar em conta a qualidade da

energia de sua alimentação para que os processos industriais sejam geridos de maneira eficiente e correta.

As máquinas de indução trifásicas funcionam a partir de um campo magnético girante, que é produzido por uma alimentação trifásica, equilibrada e senoidal. Sendo que o seu sentido de rotação depende exclusivamente da sequência de fases.

Quando são alimentadas por tensões distorcidas, sujeitas a diversas ordens harmônicas diferentes, motores de indução tendem a ter o seu conjugado prejudicado [11]. Isso se deve ao fato de as ordens harmônicas terem diferentes sequências de fase. As positivas giram no mesmo sentido do campo gerado pela fundamental. As negativas como a 5ª harmônica por exemplo, geram um campo girante no sentido oposto ao que a fundamental produz, induzindo correntes no rotor e instabilizando o conjugado da máquina. Ordens múltiplas de 3 não proporcionam campo girante, fazendo com que o motor apenas se aqueça mais.

O efeito final dos harmônicos no conjugado efetivo da máquina é de torná-lo oscilante, gerando vibrações, que ocasionam a falha prematura dos rolamentos e também colaboram para o sobreaquecimento da máquina [9].

As distorções harmônicas afetam também o aquecimento dos condutores do motor. A presença das harmônicas no estator e no rotor da máquina ocasiona maiores perdas por efeito joulico [14] o que aumenta por consequência a temperatura final do motor. É sabido que nas máquinas elétricas seu isolamento é deteriorado pelo sobreaquecimento e consequentemente sua vida útil é reduzida significativamente [13]. *“Estudos indicam que uma distorção harmônica de apenas 5% pode ocasionar uma redução na vida útil de um motor de aproximadamente 9%”* [14].

Levando-se em conta a redução do rendimento causada pela alimentação de um motor com tensões distorcidas em conjunto com a maior probabilidade de se ter de lidar com manutenções corretivas devido à quebra prematura, podendo ocasionar paradas extremamente danosas do ponto de vista operacional de um processo industrial, é essencial que se controle o conteúdo harmônico na alimentação de motores.

2.3.2 Transformadores

Os transformadores, como todos os dispositivos encontrados nos sistemas elétricos de potência, são projetados para trabalhar com tensões perfeitamente senoidais. Quando isso não ocorre o transformador acaba sujeito a maiores perdas e consequentemente um maior aquecimento. Em alguns casos a presença dos harmônicos pode ocasionar ainda um aumento do ruído audível produzido por esses equipamentos.

Os harmônicos aumentam as perdas em um transformador, tanto nos enrolamentos pelo efeito *skin*, quanto no ferro devido ao aumento das correntes parasitas e da histerese magnética [6].

Da mesma forma que ocorre para motores elétricos, a vida útil de um transformador pode ser deteriorada quando ele está sobreaquecido devido a uma alimentação distorcida. Por isso, é usual diminuir o carregamento desses equipamentos quando há a presença de harmônicos. Segundo a norma IEEE Std C57.110-2008 [7], transformadores com correntes nominais e com DTI maior do que 5% já apresentam considerável redução da vida útil.

É usual calcular o “fator k” [6] [7] [9], que leva em conta a ordem de cada harmônica e sua amplitude em relação à nominal do equipamento, nos dando noção do sobreaquecimento que o transformador está sujeito devido aos harmônicos presentes e se ele deve ser subcarregado. Transformadores que são utilizados especificamente para cargas não lineares são projetados para tal e possuem um fator “k” como dado de placa, indicando essa característica.

$$K = \sum_{h=0}^{hmax} \left(\frac{I_h}{I_n} \right)^2 \cdot h^2 \quad (2-20)$$

Onde

I_h é a corrente em cada harmônico

h é a ordem harmônica

I_n é a corrente nominal.

2.3.3 Bancos de Capacitores

Como foi visto anteriormente nesse trabalho, capacitores não geram harmônicos, porém intensificam seus efeitos e são altamente sensíveis à sua presença.

Assim os bancos de capacitores utilizados para correção de fator de potência são um dos equipamentos com maior suscetibilidade a sofrer com harmônicos.

Os bancos de capacitores sempre terão ao menos uma frequência na qual estarão em ressonância com o sistema. Como é dito em [5] caso ela seja paralelo, o capacitor poderá estar sujeito a grandes sobretensões que tem a tendência de danificar o seu dielétrico, podendo causar a queima desses equipamentos. No caso da ressonância série, ele estará sujeito a correntes maiores. É interessante lembrar que a reatância capacitiva é inversamente proporcional à frequência, fazendo com que esses componentes tenham a tendência a “absorver” correntes harmônicas. Essa sobrecarga de corrente tende a levar os capacitores a uma queima prematura.

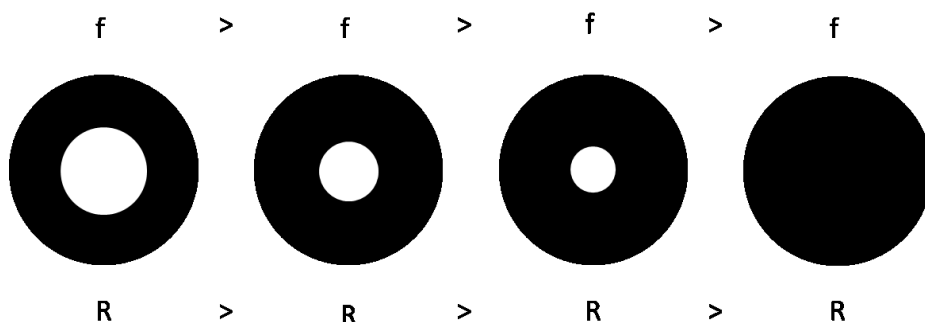
2.3.4 Cabos

É conhecido que a resistência de um condutor varia com a frequência, devido ao efeito *skin* [5], que ocorre quando um condutor é percorrido por uma corrente alternada. Essa corrente induz potenciais elétricos no seu interior no sentido perpendicular ao fluxo de corrente. Esses potenciais induzidos por sua vez são responsáveis pelo aparecimento de corrente elétrica perpendicular ao fluxo principal.

A corrente, além de fazer com que o condutor se aqueça mais, provoca também uma diminuição da seção transversal útil para a corrente “direta”, fazendo com que sua resistência aumente efetivamente. O efeito *skin* é diretamente proporcional a frequência da corrente que nele é aplicada.

Como os harmônicos tem frequências mais elevadas, eles fazem com que o efeito *skin* se intensifique. Provocando uma redução da área útil do condutor e um maior aquecimento do condutor. A figura abaixo demonstra tal característica:

Figura 2-15 Aumento de resistência devido ao efeito Skin



Fonte: Elaborada pelo autor

Há também a tendência das correntes harmônicas de ordens múltiplas de 3 de circularem pelo condutor neutro do sistema. Esse fato faz com que o neutro de um circuito possa ser sobrecarregado por harmônicos, se essa condição não for levada em conta no projeto.

Outro evento que ocorre em condutores na presença de harmônicos é uma maior solicitação de seu isolamento. Um cabo é um condutor percorrido por uma corrente elétrica e envolto por um dielétrico. Isso caracteriza uma capacitância, à medida que a frequência se eleva a reatância capacitiva se torna menor, ocasionando fuga de corrente no isolamento do cabo, o que faz com que ele se degrade com o tempo [9].

2.3.5 Telecomunicações

Os harmônicos que fluem pelos sistemas elétricos podem causar interferência magnética nos mais diversos cabos de comunicação do sistema. A capacidade de um sinal induzir corrente é crescente com a frequência. Assim quanto maior a ordem do harmônico, maior a probabilidade de ele ser um problema para o sistema de comunicação em questão, podendo afetar comunicações internas de equipamentos, atrapalhando seu funcionamento e tornando medições incorretas [5].

2.4 Normas relacionadas a harmônicos

É impossível ter um sistema sem algum nível de distorções harmônicas, por isso é necessário se estabelecer parâmetros. Esse é o papel das normas técnicas. Elas existem nacionalmente e internacionalmente definindo o que é ou não aceitável no que tange harmônicos em sistemas elétricos.

2.4.1 PRODIST Módulo 8

O PRODIST módulo 8 [1], trata exclusivamente da qualidade de Energia elétrica, estabelecendo os parâmetros de qualidade do produto, qualidade do serviço prestado e a qualidade do tratamento de reclamações, estabelece também os indicadores padrões para se tratar de qualidade de energia. Ele se encontra na décima revisão, que entrou em vigor em 01/01/2018.

A seção 8.1 aborda a qualidade do produto, onde trata dos diversos fenômenos relacionados à qualidade de energia elétrica. No item 4 dessa seção é feita a regulamentação das distorções harmônicas. O PRODIST aborda apenas os níveis de

distorções harmônicas de tensão. Na tabela abaixo pode-se observar os valores padrões:

Tabela 2-5 Limites de Distorção Harmônica PRODIST

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1\text{Kv}$	$1\text{Kv} \leq V_n \leq 69\text{Kv}$	$69\text{Kv} \leq V_n \leq 230\text{Kv}$
DTT _{95%}	10,0%	8,0%	5,0%
DTT _{p95%}	2,5%	2,0%	1,0%
DTT _{i95%}	7,5%	6,0%	4,0%
DTT _{395%}	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: PRODIST Módulo 8.1

O PRODIST utiliza o valor percentil 95 para estabelecer os seus limites. O percentil que é uma medida separatriz, consiste em ordenar as amostras em cem partes iguais e de forma crescente e então escolhe-se o k-ésimo valor. No caso do PRODIST escolhe-se o nonagésimo quinto. Significando que 95% dos dados estão abaixo daquele valor.

2.4.2 Norma IEEE 519

A norma internacional IEEE 519,1992, Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems trata dos limites de distorções harmônicas em sistemas elétricos de potência. É uma das normas mais conceituadas no assunto e citada por diversos fabricantes como é o caso da WEG [17].

A IEEE 519 se difere do PRODIST por utilizar, além da distorção de tensão, a distorção de corrente como parâmetro. A norma age em uma abordagem conjunta de clientes e distribuidores, limitando a corrente não senoidal injetada na rede pelos consumidores e definindo os níveis aceitáveis de distorção harmônica no PCC pela concessionária.

As limitações de corrente distorcida são estabelecidas de acordo com cada sistema, tendo em vista sua capacidade de curto circuito, ou indiretamente sua impedância. Além disso, varia de acordo com os diversos níveis de tensão que estão presentes nos sistemas elétricos e as ordens harmônicas de corrente individuais. Ela utiliza o índice total distorção harmônica de demanda para estabelecer seus parâmetros em relação à corrente. O indicador pode ser calculado utilizando-se a equação (2-7).

Tabela 2-6 Limites de distorção de corrente para sistemas entre 120V a 69kV

Máxima distorção de corrente em porcentagem da corrente da carga						
Icc/IL	3≤h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h≤50	TDD
<20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20<50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50<100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100<1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Fonte: Retirada de [8]

Onde,

Os harmônicos pares são limitados em 25% do limite dos harmônicos ímpares imediatamente superiores.

Icc é a corrente máxima de curto-circuito no PCC

IL é a média da corrente de demanda máxima da carga

TDD é a taxa de distorção demanda

Distorções de corrente que resultem em dc offset não serão permitidas

Todo equipamento de geração é limitado a esses valores de distorção de corrente, independente da relação Icc/IL

A norma também define quais são os níveis de distorção de tensão que podem ser encontrados no PCC.

Tabela 2-7 Limites de distorção de tensão

Tensão do barramento	Harmônica Individual	Distorção harmônica total DHT
V≤1kV	5	8
1kV < V ≤ 69Kv	3	5
69kV < V ≤ 161kV	1,5	2,5
161kV < V	1	1,5

Fonte: Retirada de [8]

A única dificuldade envolvida para a aplicação dessa norma é o conhecimento da capacidade curto circuito de cada instalação. Em alguns circuitos o seu cálculo é complexo. Geralmente utiliza-se como estimativa a impedância do transformador no qual está ligado.

2.5 Mitigação de harmônicos

Quando um sistema está excedendo os limites de harmônicos, sendo prejudicado pela presença deles, é necessário que se encontre uma maneira para eliminá-los, ou ao menos reduzir seus efeitos [9].

Muitos estudos foram realizados nesse sentido e algumas soluções foram encontradas em relação a carga, visando reduzir o seu grau de poluição, como é o caso do aumento do número de pulsos dos retificadores, altamente recomendado para quando há uma carga de alta demanda. A utilização de bobinas *choke* em retificadores e conversores de potência em geral são largamente utilizadas para reduzir a poluição de harmônicos nesses dispositivos [9].

Porém, em alguns casos, quando há uma instalação que já apresenta um certo nível de poluição harmônica, outras soluções mais específicas precisam ser pensadas para que se resolva o problema. Por exemplo, é usual, isolar cargas problemáticas, dando a elas um transformador individual.

Uma das soluções mais populares para se resolver problemas relacionados a harmônicos é a utilização de filtros. Eles se dividem em duas grandes categorias: os filtros passivos e ativos. Nos itens subsequentes é feita uma explanação maior sobre os filtros harmônicos.

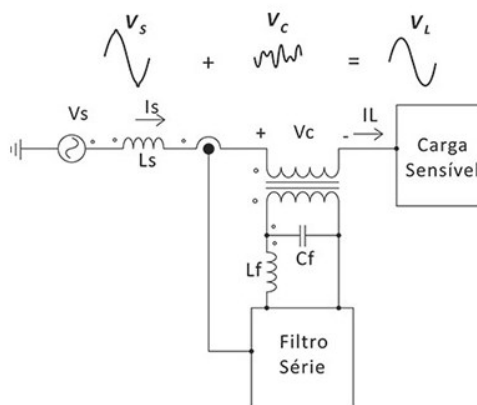
2.5.1 Filtros Ativos

Os filtros ativos apareceram com a evolução da eletrônica de potência e a utilizam para combater os harmônicos em sistemas elétricos. Geralmente são equipamentos complexos e de alto custo por isso, sua utilização ainda é restrita. Além de solucionar problemas com harmônicos os filtros ativos também possuem a característica de corrigir desequilíbrio e compensar reativo, sendo dispositivos autossintonizáveis e seletivos na filtragem [5] [9].

A utilização de chaves eletrônicas aliadas a um sistema de controle avançado, produz correntes e tensões que agem no sentido de combater a presença de harmônicos na rede elétrica. Eles existem em três topologias básicas: o filtro série, o paralelo e uma combinação dos dois, chamada de Unified Power Quality Conditioner (UPQC) [5].

O filtro série, como mostrado na figura abaixo, injeta uma tensão “ V_c ” na rede em série com a tensão “ V_s ” para que a tensão senoidal no ponto “ V_L ” não tenha a presença de harmônicos.

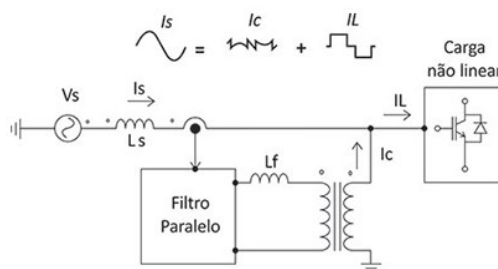
Figura 2-16 Filtro ativo série



Fonte: Retirado de [9]

O filtro ativo paralelo age de forma complementar injetando na rede uma corrente “ I_c ”, para corrigir a corrente “ I_L ” de uma carga distorcida na visão da rede. A Figura 2-17 ilustra o funcionamento desse componente.

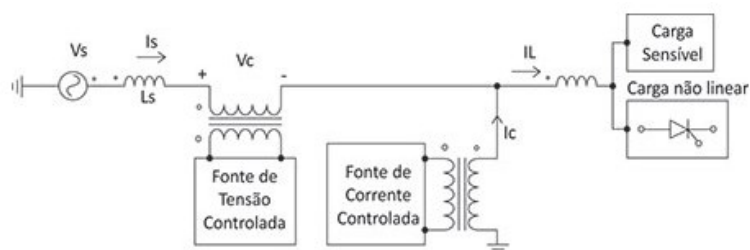
Figura 2-17 Filtro Ativo Paralelo



Fonte: Retirado de [9]

O filtro UPQC combina as características, corrigindo tanto a distorção de corrente como de tensão. Na figura a seguir podemos observar sua topologia:

Figura 2-18 Filtro Ativo UPQC



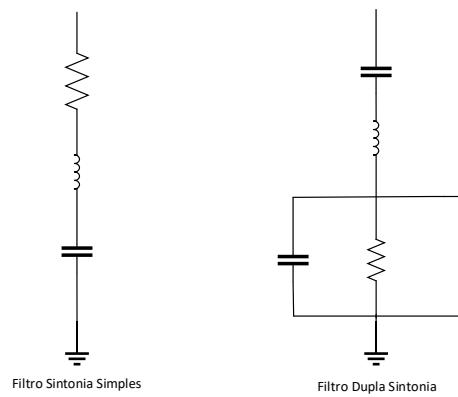
Fonte: Retirado de [9]

2.5.2 Filtros Passivos

Os filtros passivos são compostos por indutores e capacitores, em diversas topologias diferentes, classificados quanto ao modo de conexão à rede: série ou paralelo. O filtro série é pouco utilizado, pois deve ser dimensionado com tensão de isolamento para a tensão fase terra do circuito e para sua corrente nominal [9]. Além disso para alguns equipamentos poluidores funcionarem é fundamental que suas correntes harmônicas circulem na rede [9]. A solução mais comum é a utilização de filtros paralelo, que apresentam baixa impedância para correntes harmônicas problemáticas, fazendo com que elas circulem por eles e não pela impedância do sistema [15].

Os dois tipos de filtros passivos mais comuns são os sintonizados e os amortecidos. O primeiro possui topologia mais simples, tratam-se de filtros passa faixa, que tem uma baixa impedância para uma faixa estreita de frequências e se limitam a filtrar os harmônicos que estão nela. Geralmente são utilizados para eliminar harmônicas mais específicas e que estão próximas no espectro harmônico. Existem filtros com topologias mais complexas que possuem mais de uma frequência de sintonia, como os de dupla-sintonia, que apresentam uma boa relação custo benefício, sendo geralmente os mais utilizados [9]. Para a frequência fundamental os filtros sintonizados são uma carga capacitiva, ou seja, também podem ser utilizados para compensar harmônicos.

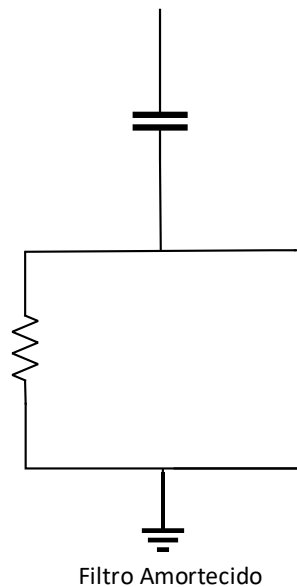
Figura 2-19 Filtros Sintonizados



Fonte: Elaborada Pelo Autor

Os filtros amortecidos apresentam baixa impedância para uma vasta faixa de frequências a partir da frequência de corte. Esses filtros são classificados de acordo com sua ordem e são utilizados, geralmente, para filtrar harmônicos de ordens mais elevadas, acima da 11^a, por exemplo.

Figura 2-20 Filtro Amortecido



Fonte: Elaborado pelo autor

Muitas vezes utiliza-se a combinação dos dois tipos de filtros para obter uma mitigação mais ampla dentro do o espectro harmônico. É comum instalar um filtro de dupla sintonia para a 5^a, 7^a, 11^a e 13^a ordens em conjunto com um amortecido sintonizado na 17^a harmônica [9].

3 ESTUDO DE CASO

Neste trabalho foram realizadas medições de harmônicos na instalação de uma indústria de bebidas localizada na cidade de Uberlândia - MG. Devido ao sigilo perante ao processo da empresa, algumas informações foram omitidas.

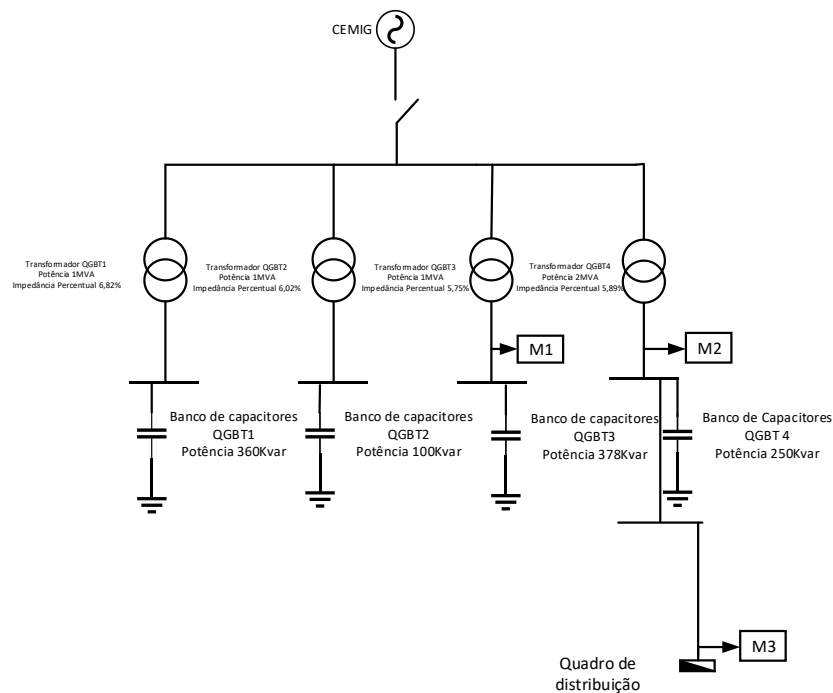
Essa instalação possui uma demanda contratada de 2500kW e é alimentada na média tensão em 13,8KV. O circuito se divide em quatro transformadores, cada um com seu banco de capacitores automático para correção de fator de potência. O maquinário da indústria é diverso, sendo em sua maioria, acionado por motores de indução trifásicos. Alguns deles são de grande potência e alimentados por conversores ou soft starters. Nessa instalação foi relatada queima de capacitores de bancos de correção de fator de potência. Alguns equipamentos eletrônicos de grande criticidade apresentam mau funcionamento.

Existem planos para a ampliação das linhas de produção e modernização do que já existe, com a inserção de mais conversores de frequência. Por isso se faz necessário o estudo do cenário atual.

As medições foram realizadas na base dos transformadores que apresentam maior concentração de equipamentos não-lineares (transformadores 3 e 4), além disso foi realizada a medição em um quadro de distribuição, que é ligado ao transformador 4. As medições foram realizadas no período entre 15/10/2019 e 06/11/2019. O medidor utilizado foi o modelo RE4000 da Embrasul.

3.1 Diagrama unifilar simplificado

Figura 3-1 Diagrama Unifilar Simplificado



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura acima apresenta o diagrama unifilar da indústria em questão e a indicação dos locais das medições que serão apresentadas a seguir. Eles foram escolhidos por representarem os pontos com maior possibilidade de níveis altos de poluição harmônica.

3.2 Características da instalação

Para que o estudo de harmônicos seja feito da melhor maneira possível é necessário obter diversas informações sobre a instalações [5]. Muitas vezes, essas informações são perdidas com o passar do tempo, ou se tornam não confiáveis com as diversas expansões do sistema. Na Tabela 3-1 e na Tabela 3-2 estão as informações sobre os transformadores e os bancos de capacitores.

Tabela 3-1 Características dos Transformadores

Transformador	1	2	3	4
Tensões de linha	13,8kV/380V	13,8kV/380V	13,8kV/380V	13,8kV/380V
Corrente Nominal	41,84A/1519,34 A	41,84A/1519,34 A	41,84A/1519,34 A	83,67A/3038,68 A
Potência Nominal	1000KVA	1000KVA	1000KVA	2000KVA
Impedância Percentual	6,82	6,02	5,75	5,89
Ligação	Δ/Y (aterrado)	Δ/Y (aterrado)	Δ/Y (aterrado)	Δ/Y (aterrado)
Refrigeração	Óleo natural	Óleo natural	Ar Natural	Ar Natural

Fonte: Elaborada Pelo Autor

Tabela 3-2 Características dos bancos de capacitores

Banco de Capacitor	QGBT 1	QGBT 2	QGBT 3	QGBT 4
Potência nominal	360kvar	100kvar	380kvar	250kvar

Fonte: Elaborada pelo autor

3.3 Principais cargas não lineares

As principais cargas não lineares dessa indústria são conversores de potência e soft starters para alimentação de motores. Os transformadores 3 e 4 são aqueles onde há maior concentração desses equipamentos.

No transformador 3 está ligado uma soft starter que aciona um motor de 750cv de um grande compressor a pistão, responsável por fornecer ar comprimido para as linhas de produção, essa soft starter tem potência nominal de 600kW. Existem outros conversores de frequência de menor porte ligados nesse mesmo circuito totalizando aproximadamente 50kW em conversores de frequência de 6 pulsos.

No transformador 4, boa parte da potência consumida é por conversores de frequência com retificadores de 6 pulsos. Dois deles são de grande potência, um de 315kW e outro de 200kW ambos são responsáveis por acionar os motores de compressores de amônia do sistema de refrigeração. Esse transformador tem de mais de 650kW de potência instalada de componentes não lineares.

3.4 Medição 1

A medição 1 foi feita no quadro geral de baixa tensão do transformador 3 (ponto M1). Para ter acesso ao barramento seria necessário desligar o disjuntor, desenergizando as cargas conectadas ao barramento e com isso parar a fábrica. Por

A medição ocorreu entre os dias 15/10/2019 e 20/10/2019. A Figura 3-2 mostra o perfil das tensões eficazes de fase em M1 no período de medição. A Figura 3-3 mostra a distorção total das tensões de fase desse mesmo QGBT. A Tabela 3-3 e a Tabela 3-4 apresentam as características das tensões no barramento quanto a seu valor RMS e fator de desequilíbrio. A Tabela 3-5 mostra os valores de distorção total de tensão em cada fase e a Tabela 3-6 mostra os valores individuais de distorção de tensão P95% da fase A. A Figura 3-4 mostra o perfil das distorções harmônicas individuais P95% em cada fase.

[illegible]

Tabela 3-3 Tensões Gerais em M1

Fase	Média	Maior	Menor	P95
Ua	228,1	237,57	205,55	234,94
Ub	228,63	238,11	203,98	235,17
Uc	227,98	237,74	203,59	235,26

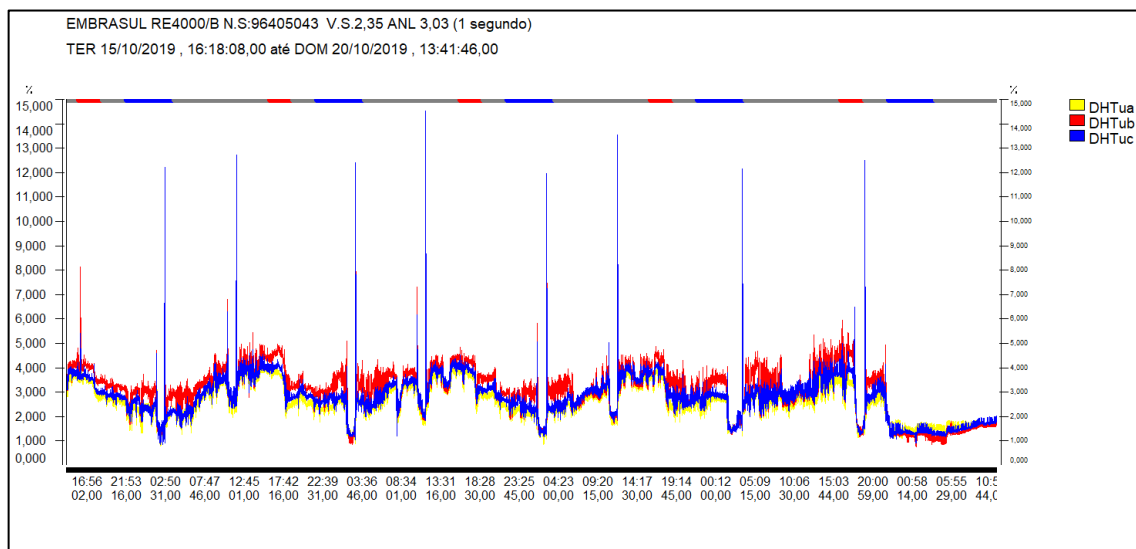
Tabela 3-4 Fator de desequilíbrio em M1

Fator de desequilíbrio	Maior	Médio	P95
	0,413	0,1	0,166

50

O valor das tensões encontradas se apresenta acima do valor crítico (233V) e precário (231V) [1] em boa parte das medidas, o que é observado nas figuras e tabelas acima. O desequilíbrio das tensões se mantém nos níveis aceitáveis pelas normas.

Figura 3-3 Distorções totais em M1



Fonte: Software ANL6000

Tabela 3-5 Distorções totais de tensão em M1

DTT% Gerias			
Fase	DTT% médio	DTT% máximo	DTT%P95
UA	2,52	11,36	3,76
UB	3,09	11,82	4,38
UC	2,77	12,12	3,96

Fonte: Elaborada pelo autor

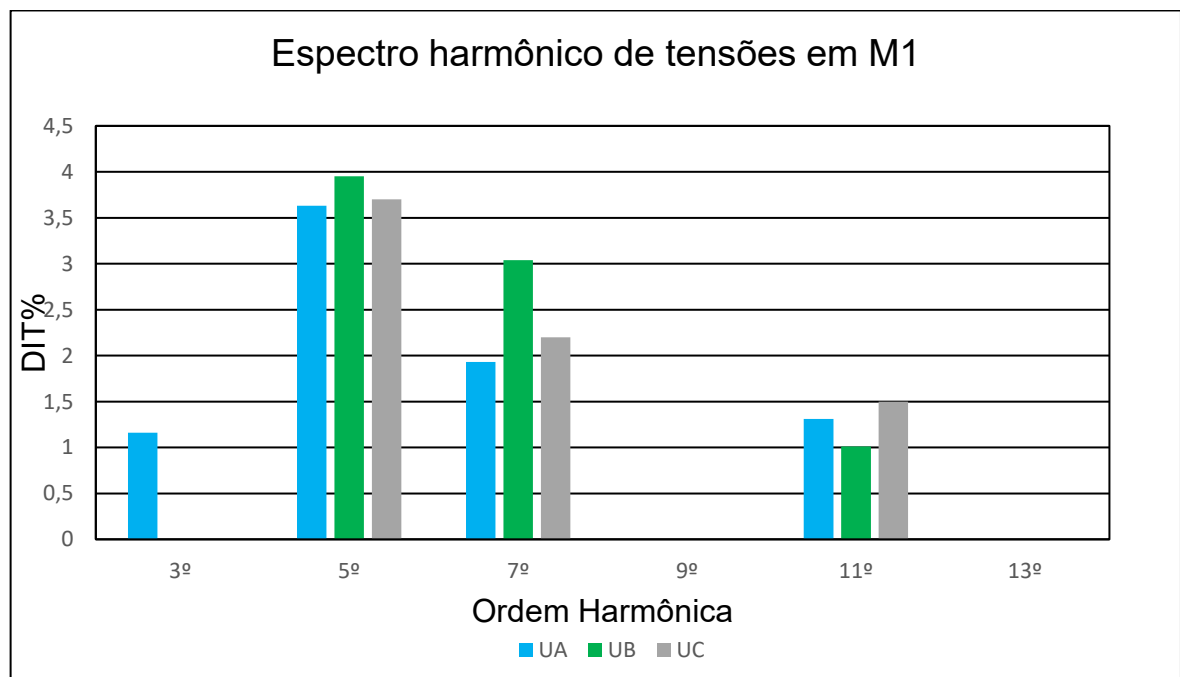
Ao se analisar a distorção total de tensão, nota-se que seu valor P95 é aceitável pelo PRODIST e pela IEEE 519, que limitam esse indicador em 10% e 8% respectivamente. Em alguns picos ela ultrapassa esses valores o que está ligado a partida do motor de grande potência realizado pela soft starter.

Tabela 3-6 Distorções Harmônicas individuais fase A em M1

Distorções individuais de tensão na Fase A			
Ordem	P95%	Maior%	Médio%
3º	1,16	1,4	0,35
5º	3,63	8,88	2,00
7º	1,93	3,76	0,92
9º	0	0,77	0,00
11º	1,31	4,87	0,22
13º	0	4,14	0,00
15º	0	0	0,00
17º	0	3,7	0,00
19º	0	4	0,03
21º	0	0	0,00
23º	0	5,46	0,00
25º	0	1,96	0,00

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 3-4 Espectro Harmônico de tensões P95 em M1



Fonte: Elaborada pelo autor

As distorções individuais de tensão apresentam maiores valores na 5ª e 7ª harmônicas, ambos ainda abaixo do recomendado na norma IEEE 519 que para baixa tensão estabelece o nível de distorção harmônica individual de tensão menor que 5%.

Com base na medição realizada, os indicadores de harmônicos apresentam-se dentro dos limites esperados no PRODIST e na IEEE 519. É importante ressaltar que os harmônicos característicos de retificadores de 6 pulsos são os mais encontrados na medição.

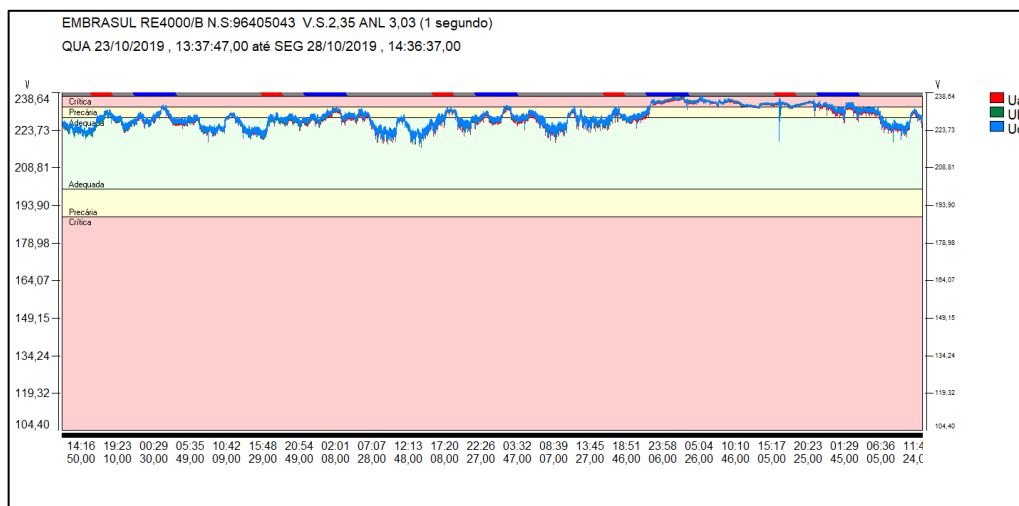
3.5 Medição 2

A medição 2 foi realizada no disjuntor geral do transformador 4 no período entre 23/10/2019 e 28/10/2019. Nessa medição as grandezas tensão e corrente foram analisadas e serão mostradas em seções diferentes.

3.5.1 Análise das tensões em M2

A Figura 3-5 e a Figura 3-6 apresentam respectivamente o perfil das tensões de fase e o perfil de distorções harmônicas totais durante o período da medição. A Tabela 3-7 apresenta os valores gerais de tensão. A Tabela 3-8 apresenta o fator de desequilíbrio encontrado no quadro em que a medição foi realizada.

Figura 3-5 Perfil das tensões em M2



Fonte: Software ANL6000

Tabela 3-7 Valores gerais de tensão em M2

Fase	Média	Maior	Menor	P95
Ua	228,85	237,26	200,88	235,14
Ub	229,22	240,11	217,26	235,49
Uc	229,36	243,64	217,72	235,42

Fonte: Elaborada pelo autor

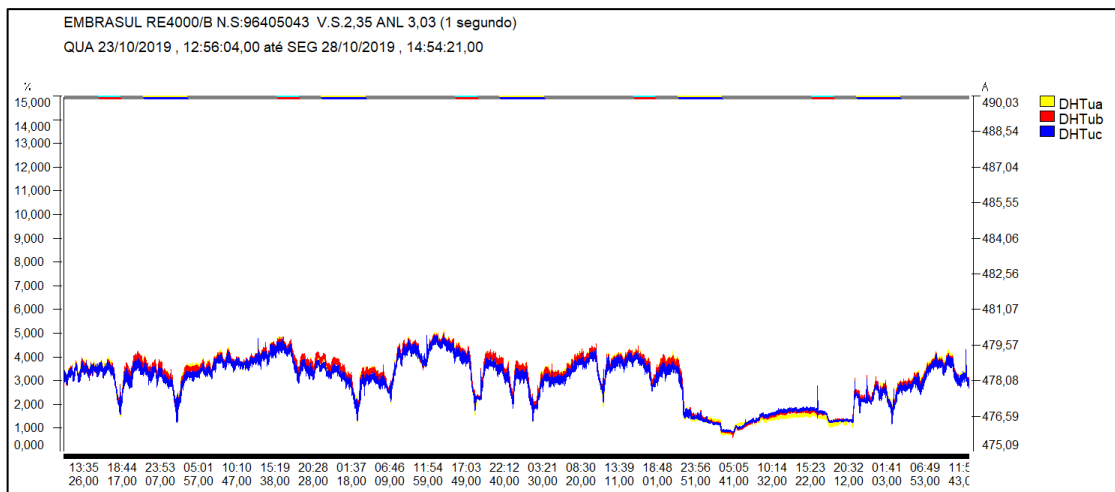
Tabela 3-8 Fator de desequilíbrio em M2

Fator de desequilíbrio	Maior	Médio	P95
	6,004	0,075	0,121

Fonte: Elaborada pelo autor

Nesse ponto de medição o valor das tensões encontra-se ainda mais elevado do que no anterior. Novamente o desequilíbrio é pequeno, apenas em algumas amostras isoladas esse indicador atingiu valores altos, acima da norma.

Figura 3-6 Perfil das Distorções Harmônicas totais em M2



Fonte: Software ANL6000

Tabela 3-9 Distorções totais de tensão em M2

DTT% Gerais			
Fase	DTT% Médio	DTT% Máximo	DTT%P95
A	3,09	5,09	4,42
B	3,10	5,05	4,42
C	2,98	4,93	4,30

Fonte: Elaborada pelo autor

O valor das distorções P95 totais se encontra abaixo da média tanto para o PRODIST quanto para a norma do IEEE e não apresenta picos como no quadro anterior, entretanto os valores médios de desequilíbrio e P95 são ligeiramente maiores, o que se deve principalmente as cargas de maior demanda ligadas no barramento

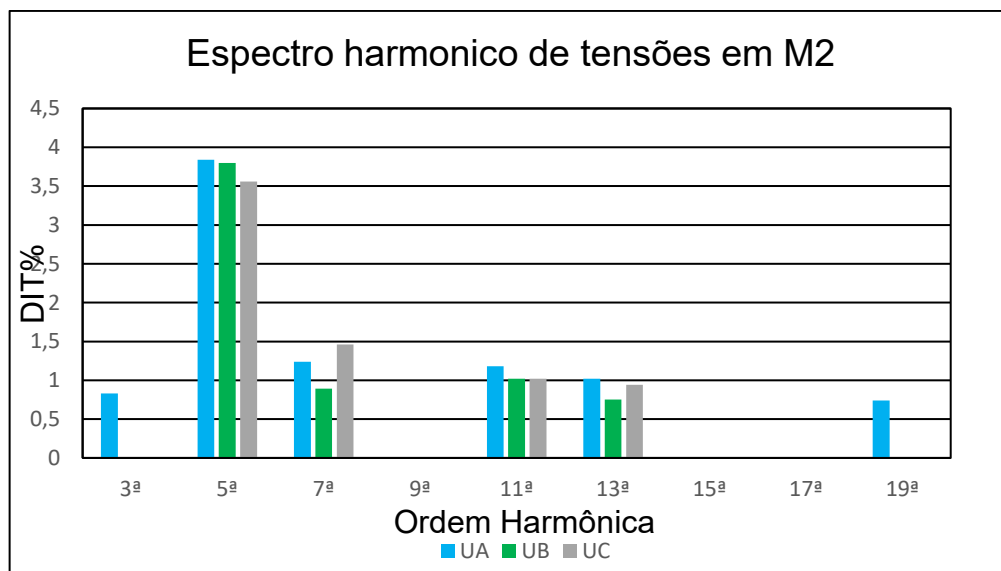
serem conversores de frequência, que diferente do soft starter apresentam distorção constante.

Tabela 3-10 Distorções individuais de tensão em M2 na fase A

Distorções individuais de tensão na fase A			
Ordem	P95%	Maior%	Médio%
3º	0,75	1	0,08
5º	4,08	4,75	2,79
7º	1,17	1,34	0,74
9º	0	1	0,00
11º	1,21	1,77	0,71
13º	0,93	1,74	0,38
15º	0	1	0,00
17º	0	1	0,00
19º	0	1,07	0,01
21º	0	1	0,00
23º	0	1,2	0,00
25º	0	1	0,02

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 3-7 Espectro harmônico de tensões P95 em M2



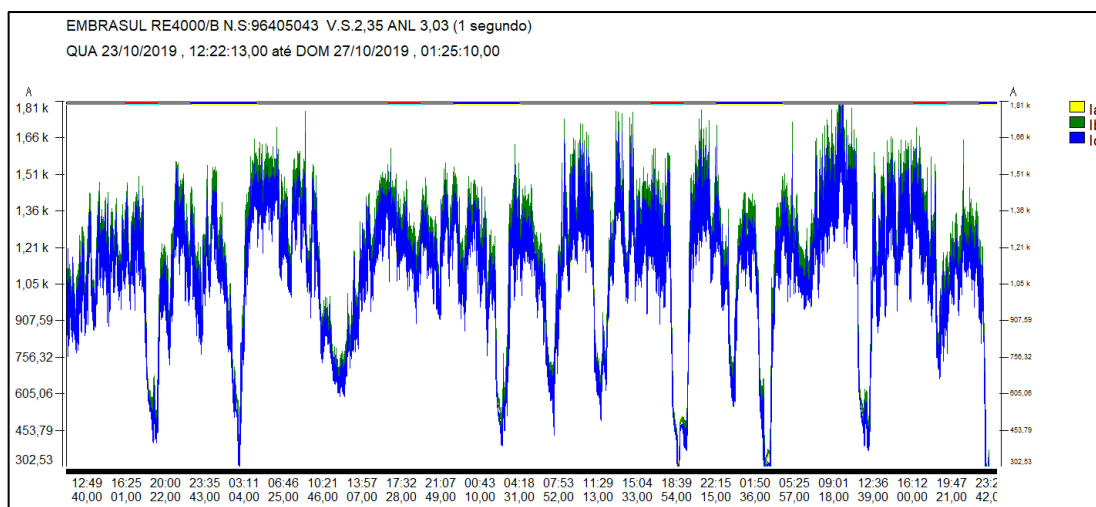
Fonte: Elaborada pelo autor

Quanto aos indicadores individuais, fica mais claro ainda os harmônicos característicos de retificadores de 6 pulsos, sendo que a ordem mais relevante é novamente a 5ª harmônica, estando ela próxima do limite estabelecido pela norma IEEE519 de 5%.

3.5.2 Análise das correntes em M2

A Figura 3-8 mostra o perfil das correntes no período da medição. A Tabela 3-11 mostra os valores gerais das correntes no barramento. A Tabela 3-12 e a Tabela 3-13 mostram respectivamente as distorções totais de corrente por fase e as distorções individuais na fase A. A Figura 3-9 mostra as distorções de corrente individuais P95 em cada uma das fases. A Tabela 3-14 mostra as distorções totais de demanda médias encontradas tanto para a corrente nominal do transformador quando para corrente normal de operação. A Tabela 3-15 mostra os valores de fator K encontrados para o perfil de distorção harmônica desse transformador.

Figura 3-8 Perfil das correntes em M2



Fonte: Software ANL6000

Tabela 3-11 Dados gerais das correntes em M2

Fase	Média	Maior	Menor	P95
Ia	912,36	1954,5	54,6	1437,9
Ib	932,35	2012,4	64,2	1472,1
Ic	880,43	1909,2	57,6	1395,3

Fonte: Elaborada pelo autor

Fica evidente pela figura e pela tabela acima que o transformador está sub-carregado, as correntes de operação raramente ultrapassam a metade do valor da nominal, sendo que o valor da corrente média de operação é cerca de 30% da nominal.

Tabela 3-12 Distorções gerais de corrente em M2

DTI% Gerais			
Fase	DTI% Máximo	DTI% Média	DTI%P95
Ia	42,25	15,89	30,52
Ib	38,95	16,24	29,71
Ic	39,50	15,10	30,46

Fonte: Elaborada pelo autor

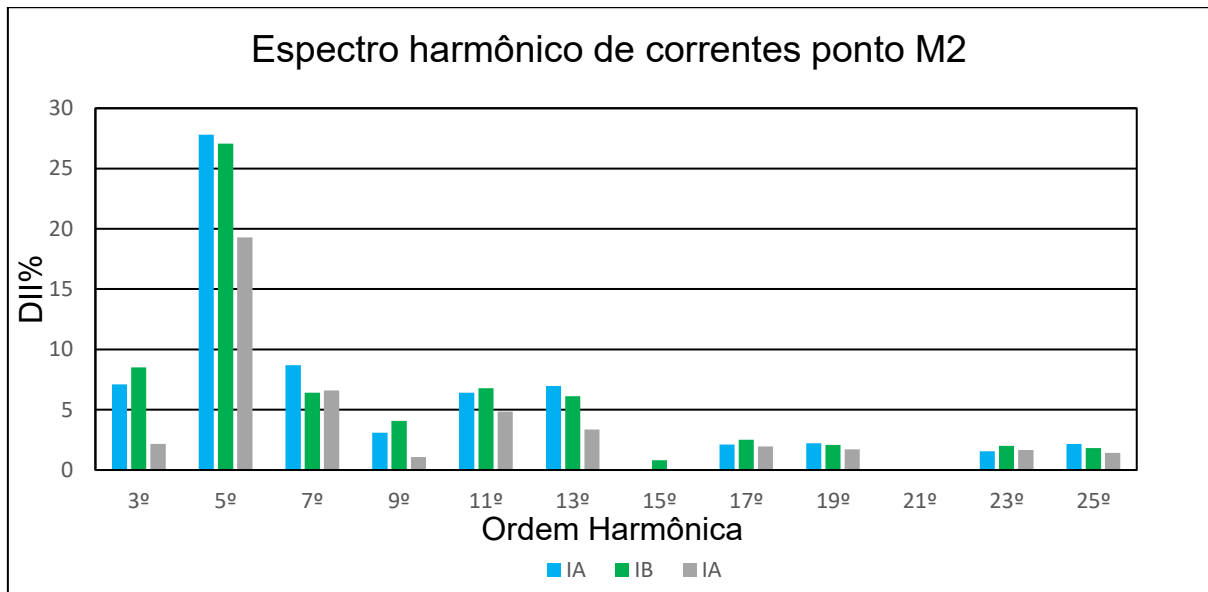
As distorções totais de corrente são grandes nesse ponto de medição. Isso se deve principalmente ao fato de as cargas desse barramento serem predominantemente não lineares.

Tabela 3-13 Distorções individuais de corrente da fase A em M2

Distorções individuais de corrente na Fase A			
Ordem	P95%	Maior%	Médio%
3º	7,10	11,92	3,58
5º	27,81	38,55	13,37
7º	8,70	14,89	4,18
9º	3,10	5,03	0,52
11º	6,40	8,96	3,46
13º	6,96	8,74	2,66
15º	0,00	2,38	0,02
17º	2,12	3,88	0,42
19º	2,21	4,14	0,43
21º	0,00	1,10	0,01
23º	1,54	4,30	0,32
25º	2,15	4,09	0,55

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 3-9 Espectro harmônico de correntes P95 em M2



Fonte: Elaborada pelo autor

As distorções individuais de corrente e tensão apresentam valores altos novamente nas harmônicas características dos retificadores de 6 pulsos. É notável também a presença de correntes de sequência zero, como a 3ª e a 9ª ordens. A corrente de 5ª ordem é novamente a mais presente no sinal de corrente.

Tabela 3-14 Distorção total de demanda em M2

Distorção total de demanda		
	TDD% nominal	TDD% operação
IA	4,34%	10,99%
IB	4,56%	11,54%
IC	4,16%	10,53%

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 3-15 Fator K do transformador 4

Fator K	
Médio	0,211
Maior	0,643
P95	0,379

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 3-16 Distorção de demanda individual em M2

Distorções individuais de demanda			
Fase	IA	IB	IC
3ª	0,81%	1,05%	0,17%
5ª	3,98%	4,17%	3,85%
7ª	1,01%	0,86%	1,06%
9ª	0,02%	0,11%	0,07%
11ª	0,83%	0,90%	0,86%
13ª	0,54%	0,53%	0,53%
15ª	0,00%	0,01%	0,00%
17ª	0,08%	0,15%	0,14%
19ª	0,09%	0,13%	0,12%
21ª	0,00%	0,00%	0,00%
23ª	0,05%	0,13%	0,12%
25ª	0,13%	0,13%	0,09%

Fonte: Elaborada pelo autor

Ao observar os valores de distorção de demanda estabelecidos na norma IEEE 519, tendo em vista que a relação I_{cc}/I_L é 16,9 (estimada pela impedância do transformador) conclui-se que o valor limite estabelecido (5%) é muito próximo dos encontrados para as distorções totais, o valor de distorção individual de demanda encontrado na fase A é superior ao estipulado pela norma IEEE 519 para a 5ª harmônica (4%).

O fator K é menor do que 1, o que indica que o transformador não está sofrendo com sobreaquecimento devido a presença de harmônicos [7].

3.6 Medição 3

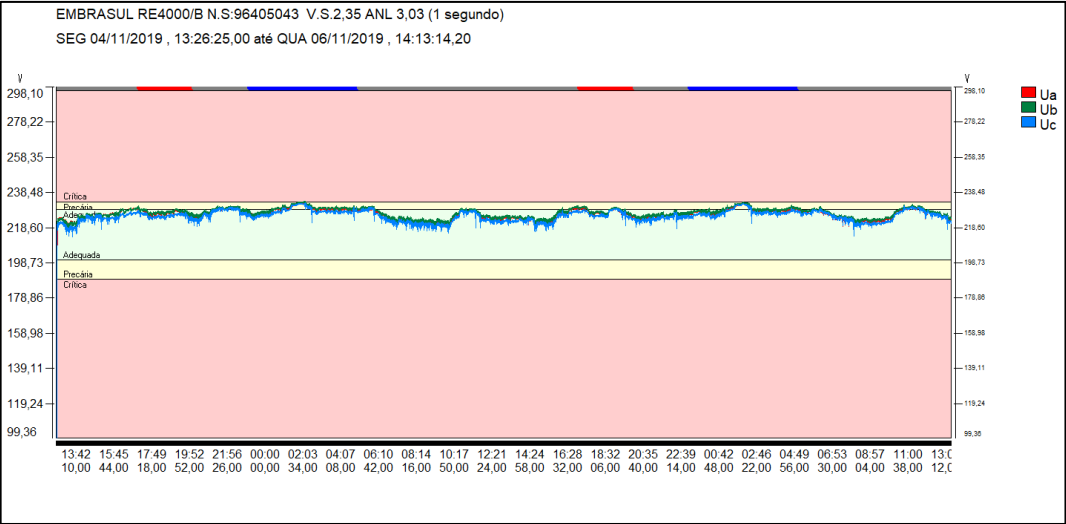
A medição foi realizada entre os dias 04/11/2019 e 06/11/2019 em um quadro de distribuição que pertence ao transformador 4. A coleta de dados foi feita apenas durante dois dias, entretanto ocorreu durante regimes de operação normais da fábrica e representam uma boa projeção do que ocorre normalmente.

3.6.1 Análise das tensões

A Figura 3-10 mostra o perfil das tensões no período de medição, a Figura 3-11 mostra o perfil das distorções totais de tensão durante o período da medição. A Tabela 3-17, a Tabela 3-18, a Tabela 3-19 e a Tabela 3-20 mostram respectivamente os valores gerais de tensão encontrados, o fator de desequilíbrio, as distorções gerais

de tensão e as distorções individuais de tensão no ponto M3. A Figura 3-12 mostra as distorções individuais de tensão encontradas nesse quadro.

Figura 3-10 Perfil de tensões quadro de distribuição



Fonte: Software ANL6000

Tabela 3-17 Tensões gerais quadro de distribuição

Fase	Média	Maior	Menor	P95
Ua	226,46	232,68	216,18	230,04
Ub	226,94	233,53	216,18	230,74
Uc	225,25	232,57	213,49	229,77

Fonte: Elaborada pelo autor

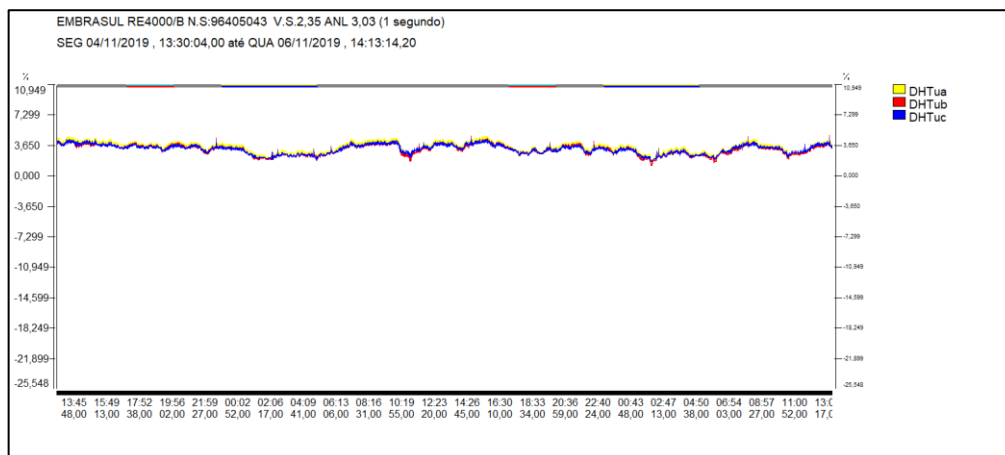
Tabela 3-18 Fator de desequilíbrio no ponto M3

Fator de desequilíbrio	Maior %	Médio %	P95%
	0,55	0,23	0,35

Fonte: Elaborada pelo autor

As tensões encontradas no ponto M3, embora mais baixas do que as medidas nos outros quadros, ainda permanecem em diversos momentos nas faixas precárias e críticas. O ponto de medição apresentou um baixo fator de desequilíbrio, estando bem abaixo do estabelecido no PRODIST.

Figura 3-11 Perfil das distorções de tensão quadro de distribuição



Fonte: Software ANL6000

Tabela 3-19 Distorções totais de tensão em M3

Fase	Médio %	Maior %	P95 %
Ua	3,44	4,73	4,28
Ub	3,15	4,43	3,96
Uc	3,20	4,34	3,99

Fonte: Elaborada pelo autor

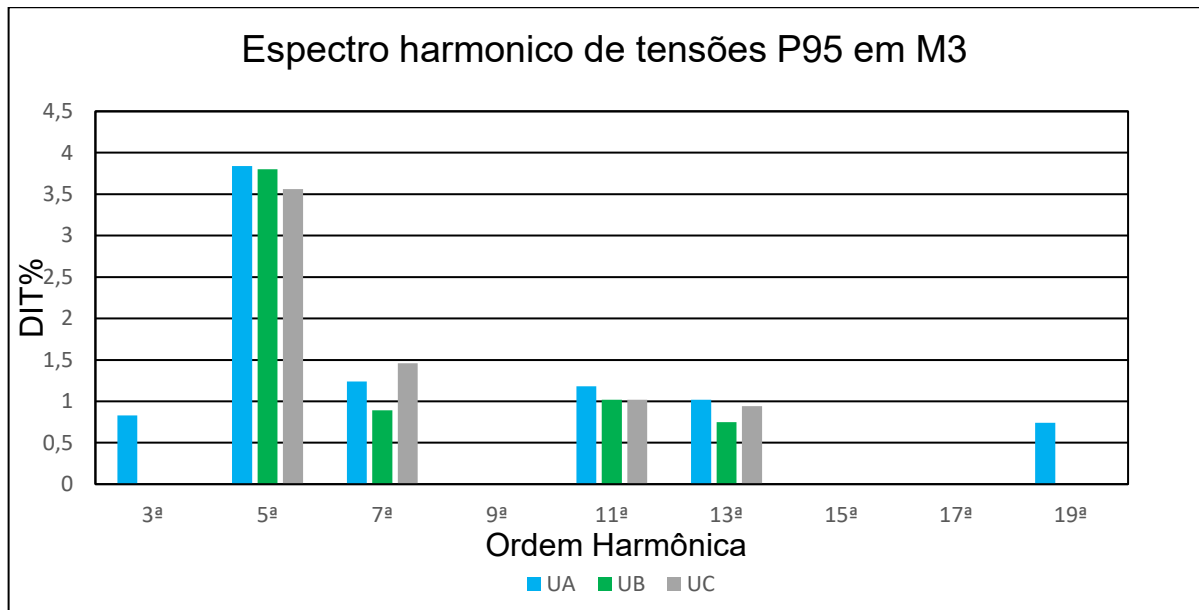
Os valores de distorção geral de tensão são similares aos encontrados na medição 4.

Tabela 3-20 Distorções individuais de tensão ponto M3

Ordem	P95%	Maior%	Médio%
3ª	0,83	1	0,40
5ª	3,84	4,27	3,01
7ª	1,24	1,36	1,05
9ª	0	0	0,00
11ª	1,18	1,57	0,68
13ª	1,02	1,42	0,68
15ª	0	0	0,00
17ª	0	0,92	0,00
19ª	0,74	1,18	0,06
21ª	0	0	0,00
23ª	0	0	0,00
25ª	0	0,73	0,00

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 3-12 Espectro harmônico de tensões P95 em M3



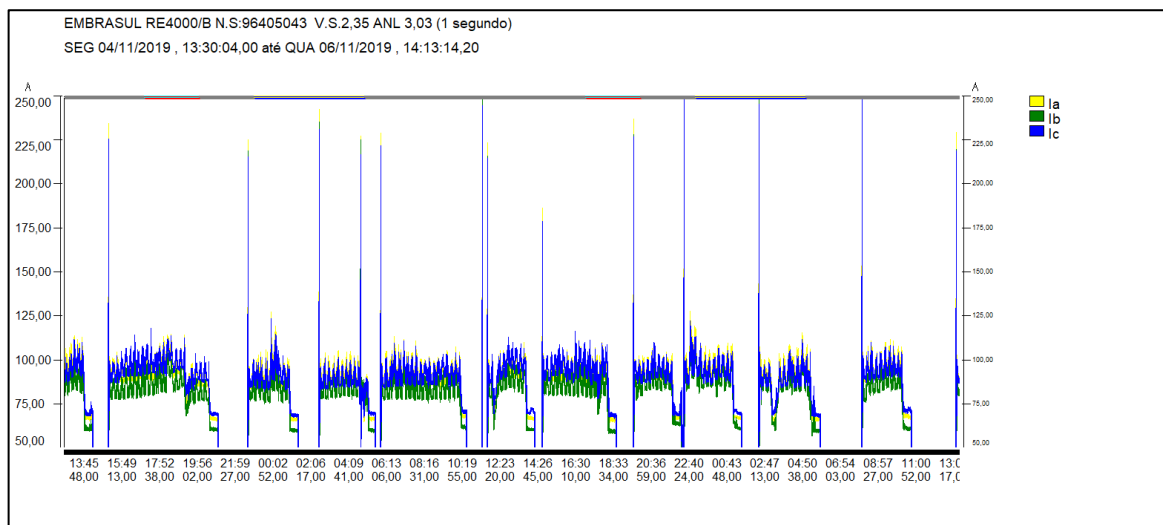
Fonte: Elaborada pelo autor

As distorções individuais de tensão se apresentam predominantemente nos harmônicos característicos dos retificadores de 6 pulsos, há também a presença da 3ª ordem, de sequência zero, e a 19ª ordem na fase A.

3.6.2 Análise das correntes

A Figura 3-13 apresenta o perfil das correntes nesse quadro durante o momento da medição. A Tabela 3-21, a Tabela 3-22 e a Tabela 3-23 mostram respectivamente os valores gerais das correntes no alimentador, as distorções totais de corrente e as distorções individuais de corrente na fase A. A Figura 3-14 mostra o espectro de frequências P95 no ponto M3. A Tabela 3-24 e a Tabela 3-25 mostram as distorções totais e individuais de demanda média.

Figura 3-13 Perfil das correntes no ponto M3



Fonte: Software ANL6000

Tabela 3-21 Dados gerais de corrente ponto M3

Fase	Média	Maior	Menor	P95
Ia	73,08	265,20	0,00	102,90
Ib	63,98	257,40	0,00	95,10
Ic	73,80	252,90	6,60	102,30

Fonte: Elaborada pelo autor

A corrente nesse quadro apresenta-se uniforme, com picos frequentes, provavelmente ligados à partida de motores conectados diretamente, na rede nesse quadro. Os dados também mostram que a fase B é a com menor carregamento.

Tabela 3-22 Distorções totais de corrente ponto M3

DTI			
Fase	Médio %	Maior %	P95 %
A	38,29	136,25	130,48
B	6,78	39,26	10,07
C	31,17	98,20	95,45

Fonte: Elaborada pelo autor

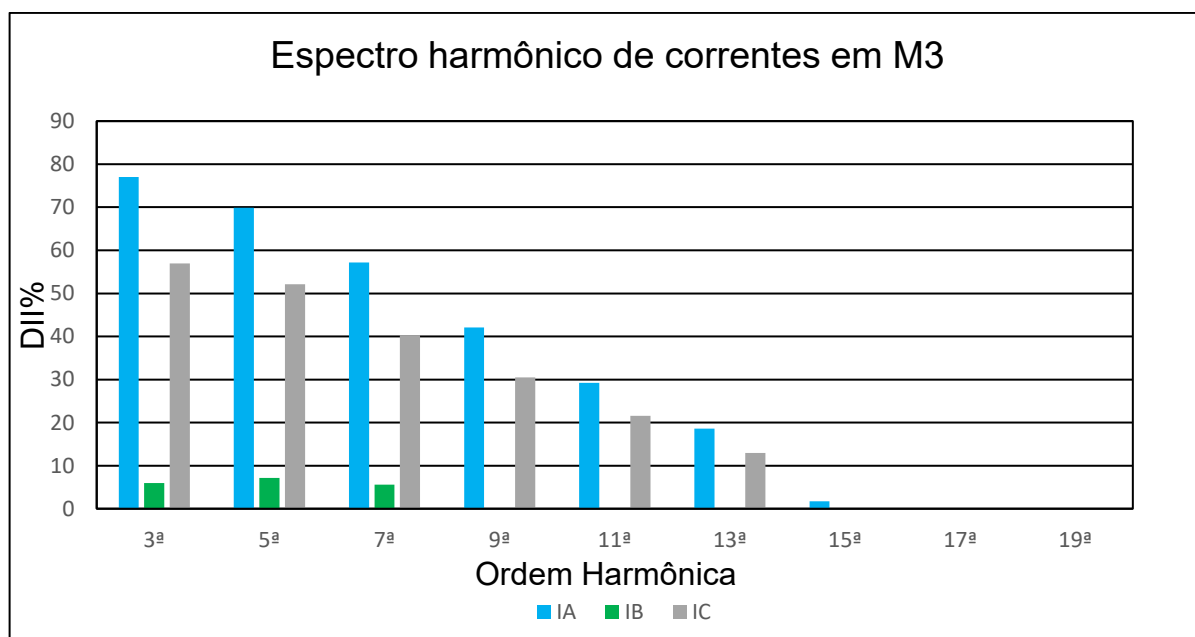
Fica claro pela Tabela 3-22 que as fases Ia e Ic estão sujeitas a correntes com maior grau de não linearidade, o que indica a presença de uma carga monofásica com essa característica no circuito.

Tabela 3-23 Distorções individuais de corrente ponto M3

Ordem	P95%	Médio%	Maior%
3ª	76,99	24,10	80,37
5ª	69,91	17,58	72,90
7ª	57,14	15,75	60,00
9ª	42,08	13,38	45,45
11ª	29,20	8,35	31,82
13ª	18,58	5,34	20,35
15ª	1,73	0,50	11,50
17ª	0,00	0,00	0,00
19ª	0,00	0,00	0,00
21ª	0,00	0,00	0,00
23ª	0,00	0,00	0,00
25ª	0,00	0,00	0,00

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 3-14 Espectro harmônicos de corrente P95 em M3



Fonte: Elaborada pelo autor

As distorções se apresentam em diversas ordens harmônicas, e de formas diferentes nas 3 fases, com amplitude decrescente de acordo com a ordem. É notável a presença de ordens zero. Provavelmente relacionadas a alguma carga monofásica não linear ligada ao barramento.

Tabela 3-24 Distorção total de demanda no Ponto M3

Fase	Médio %	Maior %	P95 %
A	13,42%	44,12%	16,40%
B	5,11%	47,73%	8,55%
C	13,33%	41,72%	16,51%

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 3-25 Distorções individuais de demanda ponto M3

Ordem	Ia	Ib	Ic
3ª	9,09%	2,61%	8,80%
5ª	4,59%	3,19%	5,41%
7ª	5,13%	2,78%	5,21%
9ª	5,27%	0,00%	5,04%
11ª	2,86%	0,00%	2,75%
13ª	2,01%	0,00%	2,18%
15ª	0,44%	0,00%	0,00%
17ª	0,00%	0,00%	0,00%
19ª	0,00%	0,00%	0,00%
21ª	0,00%	0,00%	0,00%
23ª	0,00%	0,00%	0,00%
25ª	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Elaborada pelo autor

Os valores de distorção de demanda foram calculados considerando a corrente média de operação do circuito (100 A), ela mostra que apesar de a forma de onda ser muito distorcida, seu efeito é mais ameno, pois quando essa corrente muito distorcida predomina o carregamento do circuito é baixo. Não é possível comparar com os valores estabelecidos pela norma IEEE 519 devido ausência de uma boa estimativa de curto circuito. Entretanto é possível constatar que a distorção de corrente não está interferindo nas tensões encontradas no barramento.

3.7 Análise de resultados

O fato que mais chama atenção na medição 1 é a distorção harmônica apresentar picos muito elevados, que estão relacionados com a soft starter de grande potência no circuito, sendo sua carga mais relevante. A rampa dessa soft starter está configurada para 10 segundos, por isso o medidor foi configurado com um tempo de

integração igual, assim foi possível notá-la claramente nas medições. Devido às altas demandas de corrente do motor, a corrente distorcida que sua partida proporciona é capaz de distorcer a tensão do barramento. Entretanto como a soft starter só funciona como uma carga não linear na partida, a tensão no barramento durante os outros momentos é a mais livre de distorções entre as três medições, mesmo o transformador desse circuito sendo o de menor potência e representando uma maior impedância para o sistema.

A medição 2, diferentemente da primeira apresenta uma distorção constante e na média maior, fato que se deve principalmente aos conversores de frequência, pois são cargas não lineares em todo o seu regime de operação. Quando se observa o espectro harmônico da corrente e a distorção de demanda, fica evidente o perfil característico de retificadores de 6 pulsos. A 5ª harmônica é a mais acentuada e excede as recomendações da norma IEEE519. Mesmo esse transformador estando com o carregamento muito abaixo do nominal e sua potência nominal sendo a maior da instalação ele apresenta níveis de distorção harmônica mais altos que os outros. Apesar disso, é possível notar através do cálculo do fator K que o transformador 4 ainda não está tendo sua vida útil diminuída pela presença de cargas não lineares. Entretanto, caso seu carregamento aumente e atinja níveis próximos do nominal ele apresentará sobrecarga devido a harmônicos. Vale lembrar que a norma [7] limita a distorção total de corrente para transformadores na potência nominal em 5%.

A medição 3 é de um quadro que é conectado ao transformador 4, ao observar os valores de corrente pode-se notar um perfil de distorção muito diferente das anteriores, com a presença de harmônicos com ordens diversas e diferente nas fases, assemelhando-se muito com circuitos de iluminação que são cargas monofásicas e não lineares [4].

Embora essa medição seja a que apresente as distorções mais acentuadas, em termos de corrente, elas acabam não gerando distorções de tensão relevantes. Isso indica que o seu valor não é grande o suficiente para a impedância do circuito. O espectro harmônico de tensão é muito semelhante ao da medição 2 o que permite concluir que, muito provavelmente, as quedas de tensão que são mais prejudiciais a esse barramento são devido a corrente dos conversores de frequência de grande potência do sistema de refrigeração ligadas nesse mesmo transformador.

As expansões e modernizações da fábrica ocorrerão e a instalação de mais cargas não lineares é inevitável. Futuramente será necessário que se considere a instalação de bobinas de *choke* nos conversores de maior potências, que consiste em reatores em série com a alimentação do equipamento [9] ou até mesmo o projeto de um filtro sintonizado para as harmônicas mais críticas, visando eliminá-las [15].

4 SIMULAÇÕES

Avaliando os resultados do estudo de caso, constata-se que a unidade opera dentro dos limites de distorção de tensão estipulados pelas normas [1] [8]. Apesar disso é interessante estudar o efeito dessas condições encontradas nos MIT visto que são o tipo de carga mais comuns nessa indústria.

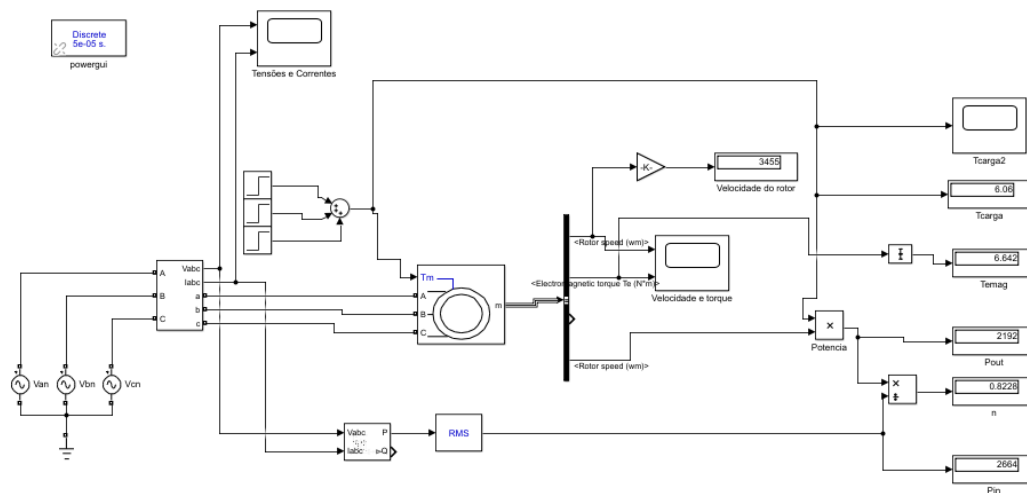
No cenário em estudo existe uma grande quantidade de motores de pequeno porte (3cv) ligados diretamente à rede elétrica, utilizados para movimentar esteiras e transportadores. Embora publicações como [14] indiquem que, dentro da norma, serão pequenos o aumento da temperatura e a consequente redução da vida útil dos MIT, causado por distorções de tensões, outros efeitos devem ser considerados. A instabilidade do conjugado, que resulta em vibrações e a redução do rendimento são exemplos disso [10]. Vale ressaltar que, conforme [13], mais de 30% dos motivos de quebra prematura de MIT estão relacionadas com falhas nos rolamentos, que são intimamente relacionadas com a vibração.

Utilizando-se os dados de ensaio de um motor de indução de 2 polos e 3cv obtidos em [11], foi efetuada a simulação de sua operação com potência nominal e alimentado por fontes com três características distintas de distorção harmônica. A simulação consistiu em aplicar no motor três degraus de carga constantes, até que se atingisse o valor nominal de conjugado de 6,06 de N.m. A simulação utiliza um passo de integração de 50 μ s que é muito menos de metade do menor período a ser analisado nessa simulação, obedecendo os critérios de Nyquist.

Na primeira simulação, para referência, o cenário é analisado com tensões senoidais puras. Na segunda e na terceira utiliza-se o perfil de tensão das medições 1 e 2 respectivamente. A medição 3 não foi utilizada por ser muito semelhante a anterior (M2). Os dados do motor inseridos na simulação, bem como os cálculos de seus parâmetros estão no ANEXO A.

4.1 Simulação 1 - Motor com alimentação puramente senoidal

Figura 4-1 Motor com alimentação puramente senoidal



Fonte: Elaborada pelo autor

O motor é alimentado com uma tensão de 220 Volts de linha puramente senoidal. Os dados obtidos estão resumidos na tabela abaixo:

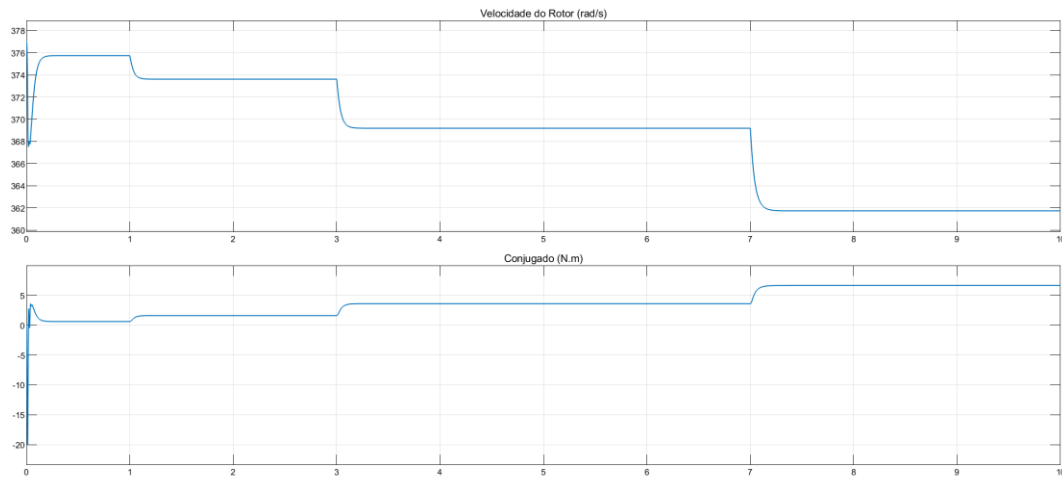
Tabela 4-1 Resumo dos dados da simulação 1

Valores da Simulação 1	
Pin	2664 W
Pout	2192 W
Tcarga	6,06 N.m
Temag	6,642 N.m
n	0,822
w	3455 RPM

Fonte: Elaborada pelo autor

A figura a seguir mostra os perfis do conjugado eletromagnético produzido e a velocidade de rotação do eixo máquina.

Figura 4-2 - Parâmetros da Máquina

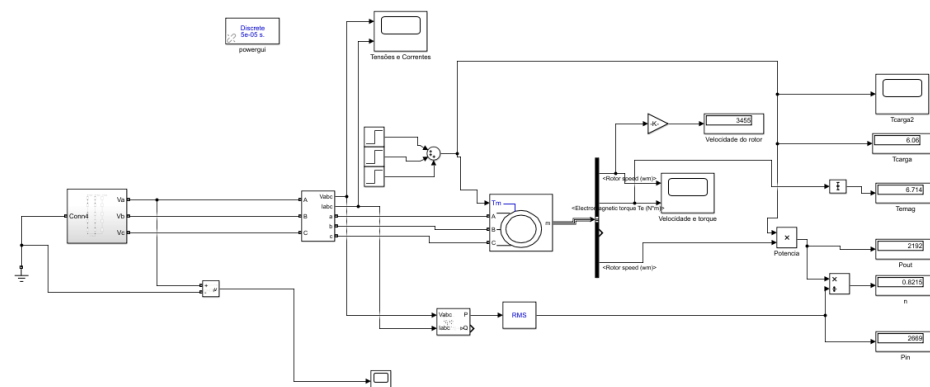


Fonte: Elaborada pelo autor

Na condição padrão podemos observar pelas figuras que o conjugado e a rotação se apresentam estáveis sem grandes oscilações e o rendimento do motor é próximo do que é encontrado em sua placa (81,9%).

4.2 Simulação 2 – Perfil de distorção encontradas em M1

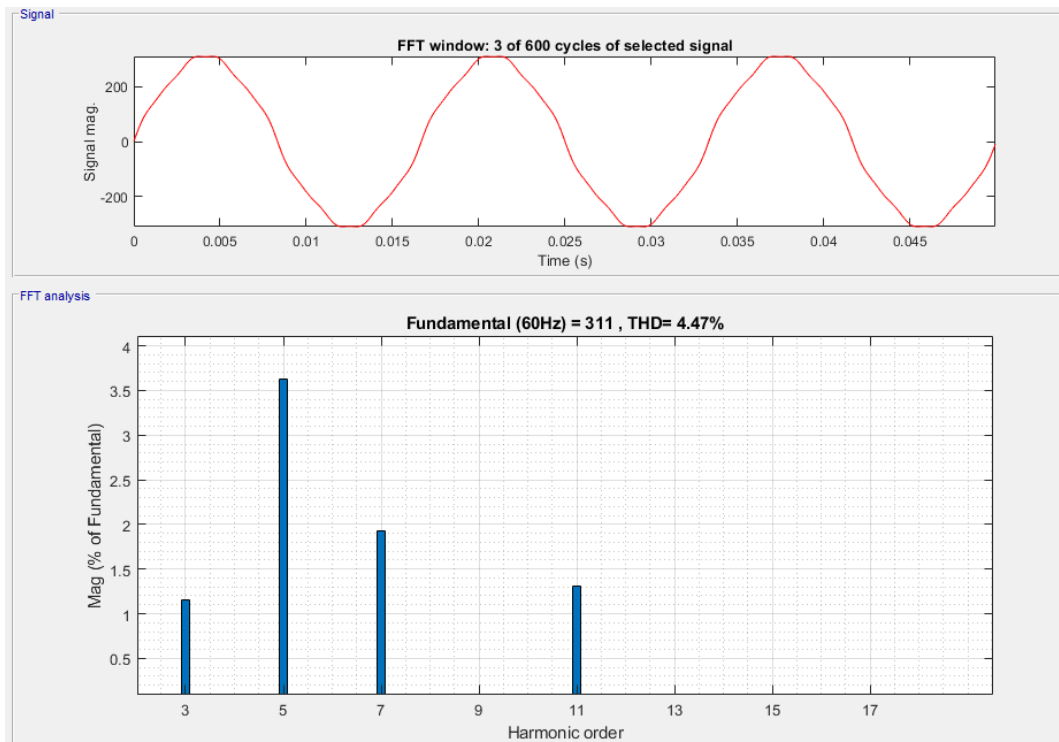
Figura 4-3 Simulação com o perfil de distorção encontrado em M1



Fonte: Elaborada pelo autor

Essa simulação se diferencia da primeira pelo fato de ter uma fonte com os perfis de distorção harmônica P95 encontrados na fase A da medição 1. A forma de onda da tensão e seu espectro harmônico podem ser vistos na Figura 4-4:

Figura 4-4 Tensão aplicada na simulação 2



Fonte: Elaborada pelo autor

A tabela abaixo resume os dados encontrados na simulação.

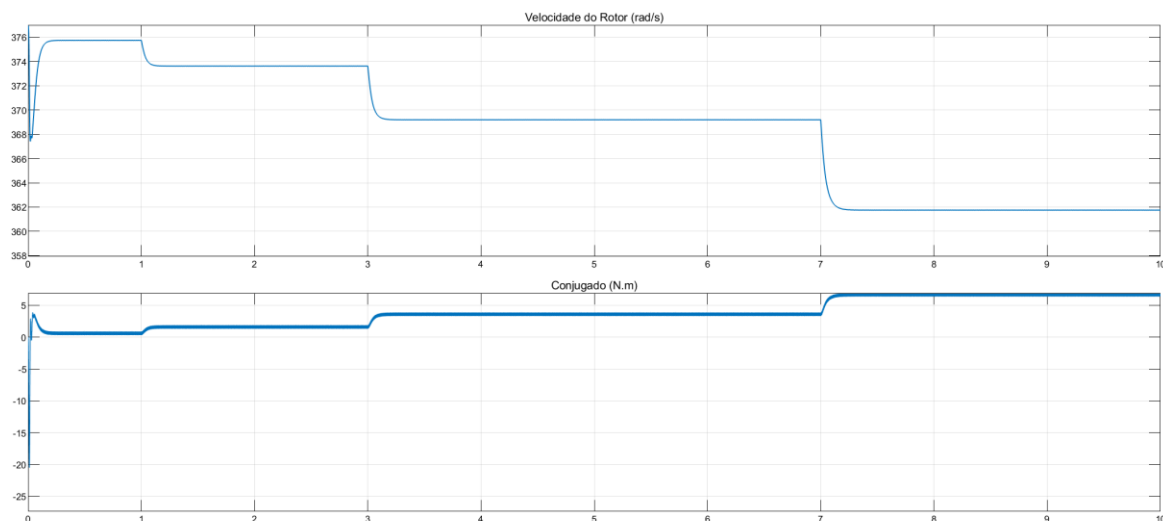
Tabela 4-2 Valores da Simulação 2

Valores da Simulação 2	
Pin	2669 W
Pout	2192 W
Tcarga	6,06 N.m
Temag	6,714 N.m
n	0,8215
w	3455 RPM

Fonte: Elaborada pelo autor

A figura a seguir nos mostra o perfil do conjugado e da rotação do motor.

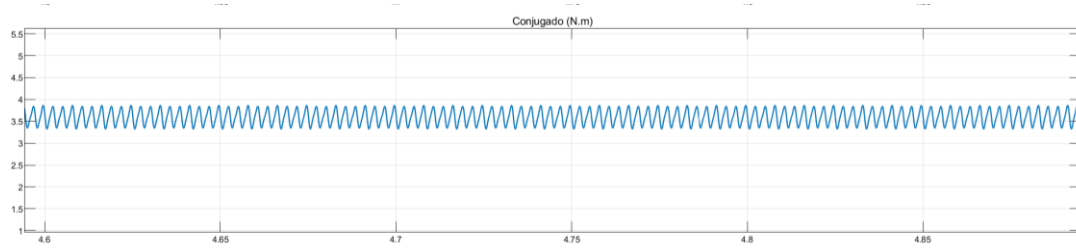
Figura 4-5 Rotação e conjugado no eixo do motor



Fonte: Elaborada pelo autor

A partir dos dados obtidos é possível observar uma pequena queda no rendimento e um conjugado oscilante. A Figura 4-6 evidencia as oscilações no conjugado:

Figura 4-6 Oscilações de conjugado simulação 2

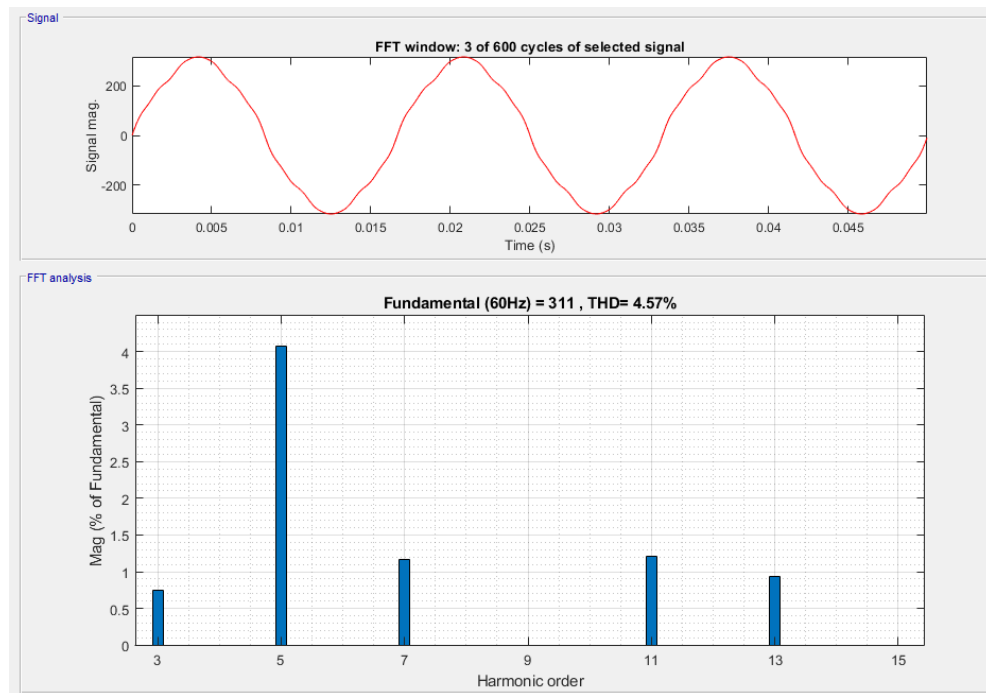


Fonte: Elaborada pelo autor

4.3 Simulação 3 – Perfil de distorções encontradas em M2

O circuito da Figura 4-3 foi alterado com as tensões distorcidas com perfil P95 encontrados na fase A de M2. A tensão obtida pode ser vista na Figura 4-7:

Figura 4-7 Tensão aplicada na simulação 3



Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 4-3 apresenta os resultados obtidos:

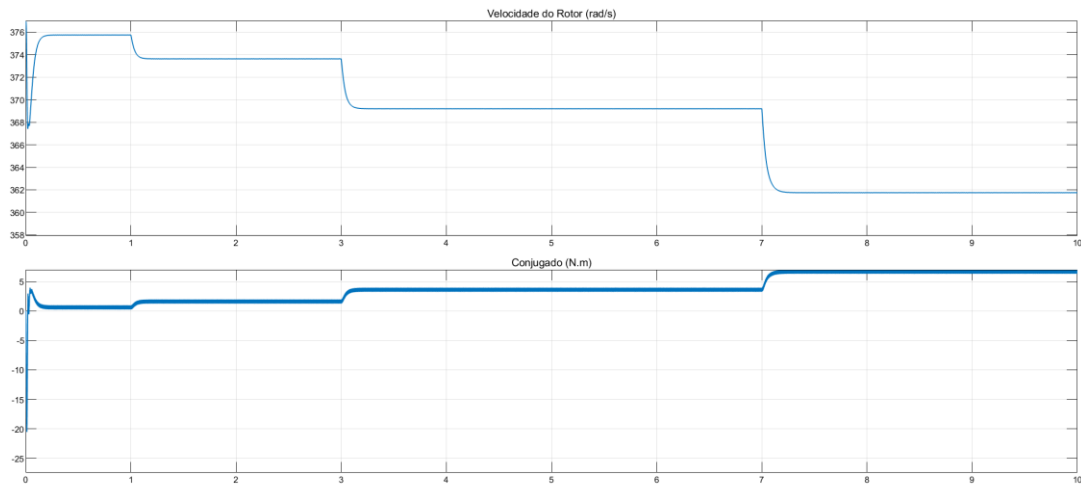
Tabela 4-3 Valores da simulação 3

Valores da Simulação 3	
Pin	2672 W
Pout	2192 W
Tcarga	6,06 N.m
Temag	6,724 N.m
n	0,8203
w	3455 RPM

Fonte: Elaborada pelo autor

A partir da simulação também foram obtidos os gráficos de conjugado e velocidade presentes na Figura 4-8.

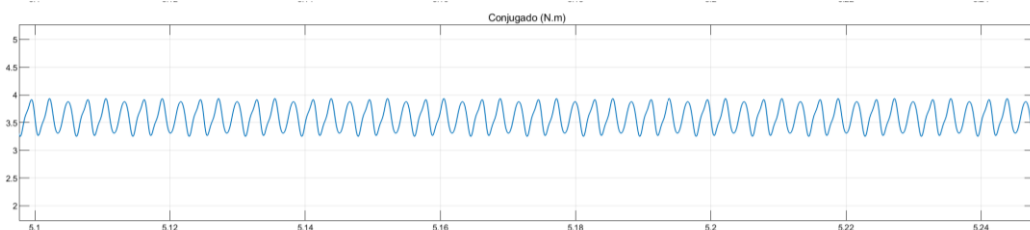
Figura 4-8 Rotação e conjugado no eixo do motor simulação 3



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 4-9 mostra com realce a oscilação no conjugado da máquina devido a presença de harmônicos na tensão.

Figura 4-9 Oscilação de conjugado simulação 3



Fonte: Elaborada pelo autor

4.4 Análise de resultados

As simulações comprovam os efeitos dos harmônicos nos motores de indução trifásicos. Embora os casos estudados mostrem que os efeitos são pequenos para o rendimento, eles devem ser levados em conta, visto que esses equipamentos ficam ligados por várias horas durante o ano consumindo a maior parte da energia da fábrica. Em casos de motores maiores, se esse comportamento se repetir a energia desperdiçada é ainda maior.

O fato que deve chamar mais atenção nessas simulações é a instabilização do conjugado eletromagnético. Esse efeito está relacionado com vibrações anormais

na máquina, podendo causar uma quebra prematura dos rolamentos e a necessidade de manutenção corretiva que pode ser dispendiosa para o processo.

É importante estar atento para o fato de que existem outras grandezas além da temperatura que são afetadas por alimentações não puramente senoidal de um MIT e que podem contribuir para a redução de sua vida útil [13], tornando necessário mais estudos a respeito do assunto.

5 CONCLUSÃO

O tema harmônicos em sistemas elétricos tem ganhando cada vez maior relevância no meio industrial. São crescentes as aplicações ofertadas por fornecedores que utilizam conversores de frequência ou drivers de potência e que proporcionam melhorias no processo. Entretanto o uso indiscriminado desses equipamentos pode causar graves problemas [12] [16]. Assim, vários fabricantes têm ofertado soluções e trazido esse debate para dentro da indústria. Muitas vezes, pela falta de conhecimento do tema pelos gestores da fábrica, é comum a aquisição de produtos dispendiosos e que não são necessários para o cenário da indústria.

Esse trabalho buscou abordar em uma explicação teórica simples e didática o tema, evidenciando os pontos mais relevantes para a indústria. Foram mostradas as principais causas de distorções harmônicas no meio industrial, bem como os fatores que intensificam seus efeitos. Os reflexos do problema foram discutidos e os pontos que geram os maiores problemas dentro desse contexto foram destacados.

No estudo de caso ficou claro que devido ao fato de a indústria operar com seus transformadores abaixo do carregamento nominal, em especial o transformador 4, as distorções harmônicas de tensão se apresentam abaixo dos valores recomendados pela norma. No entanto, o perfil de sua corrente é muito distorcido. No futuro com expansões de carga é muito possível que se ultrapasse a norma e soluções precisem ser buscadas.

Como as principais cargas não lineares dessa indústria são conversores de frequência com retificadores de 6 pulsos, as distorções harmônicas acompanham o padrão característico desses equipamentos. Assim, caso as distorções venham a ser problema em futuras expansões, filtros passivos podem ser aplicados para eliminar as harmônicas mais prejudiciais, já que o padrão da distorção é, do ponto de vista das ordens presentes, estático [9]. Filtros ativos também poderiam ser aplicados, porém seu custo é ainda muito alto e a primeira solução indicada atenderia bem o cenário em questão.

A simulação dos perfis de distorção encontrados em um MIT deixa claro que, apesar de os padrões atenderem as normas, as distorções harmônicas geram impactos no sistema. Mesmo a queda de rendimento sendo baixa, ao longo do ano e somando-se a quantidade de motores sujeitos a essa alimentação, pode-se dizer que

há um desperdício de energia. É interessante observar a oscilação no conjugado causada pelos harmônicos e seria de grande valor fazer uma análise vibracional para entender melhor o reflexo dessas oscilações em vibrações mecânicas.

- [1] AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica**. [S.I.]. 2017.
- [2] ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de circuitos elétricos**. 5. ed. [S.I.]: McGraw-Hill, 2013.
- [3] BACH, J.; PINTO, L. S. **AVALIAÇÃO DA DISTORÇÃO HARMÔNICA EM UMA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA**. TCC-UTFPR. Pato Branco. 2014.
- [4] DOLARA, A.; LEVA, S. Power Quality and Harmonic Analysis of End User Devices. **energies**, maio 2012.
- [5] DUNGAN, R. C. et al. **Power Systems Quality**. 2. ed. [S.I.]: McGraw-Hill, 2003.
- [6] GOUDA, O. E.; AMER, G. M.; SALEM, W. A. A Study of K-Factor Power Transformer Characteristics by Modeling Simulation. **ETASR - Engineering, Technology & Applied Science Research**, 2011.
- [7] IEEE. **IEEE Std C57.110-2008**. IEEE. [S.I.]. 2018.
- [8] IEEE Standard 519 - 1992. IEEE. [S.I.]. 2014.
- [9] LEÃO, R. P. S.; ANTUNES, F.; SAMPAIO, R. **Harmônicos Em Sistemas Elétricos**. 1. ed. [S.I.]: GEN LTC, 2013.
- [10] NEVES, A. B. F. **DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO NO CONJUGADO E NO RENDIMENTO DE UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO**. Dissertação (Mestrado) - UNB. [S.I.]. 2014.
- [11] OLIVEIRA, C. A. D. **PLATAFORMA PARA ENSAIOS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS E SIMULAÇÃO DE CARGAS MECÂNICAS: ACIONAMENTO, OPERAÇÃO E MONITORAMENTO COM AUXÍLIO DE FONTE PROGRAMÁVEL**. Dissertação (Mestrado)-UFU. Uberlândia-MG. 2018.
- [12] ROBERT G. ELLIS. **Harmonic: Analysis of Industrial Power Systems**. IEEE. [S.I.]. 1996.
- [13] SILVA, M. A.; GONZALEZ, M. L. Y. INFLUÊNCIA DE FATORES DA MANUTENÇÃO QUE AFETAM A VIDA ÚTIL DOS MOTORES DE INDUÇÃO. **Induscon**, 2008.
- [14] SOUTO, O. C. N.; OLIVEIRA, J. C. D.; MARTINS,. Induction Motors Thermal Behaviour and Life Expectancy. **IEEE**, 2000.

- [15] TEIXEIRA, D. Â. **ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS – ESTUDO DE CASO DE UM SISTEMA INDUSTRIAL**. Dissertação (Mestrado)-UFMG. Belo Horizonte, p. 128. 2009.
- [16] TROVÃO, J. P. et al. A Systematic Approach to Analyse the Harmonic. **IEEE**, 2011.
- [17] WEG. **GUIA DE ESPECIFICAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS**. Jaraguá do Sul, p. 67. 2019.

ANEXO A

Dados de placa e catalogo do motor utilizado na simulação:

Tabela A-1 Dados de catálogo do motor

Motor de indução - Rotor em gaiola - Categoria N		
Fabricante: WEG	Fabricação: 07/11/2008	Nº série: 1003425323
Carcaça: 90S	nº de fases: 3	Potência: 2,2kW/3cv
rpm: 3450	Regime de serviço: S1	Fator de serviço: 1,15
Temperatura ambiente (máx): 40°C	Classe de isolamento: F	Frequência: 60hz
Tensão: 220/380V	Corrente: 8,39/4,86A	Ip/In: 6,7
Rendimento plena carga: 81,9%	Fator de Potência plena carga: 0,84	Cmax/Cn = 3,0

Fonte: Elaborada pelo autor

Dados de ensaio utilizados na simulação:

Tabela A-2 Dados do motor

Grandeza	Valor
Resistência do estator	2,175Ω
Resistência do rotor	1,963Ω
Reatância de dispersão do estator	3,106Ω
Reatância de dispersão do rotor	4,568Ω
Reatância do ramo magnetizante	84.504Ω

Fonte: Elaborada pelo autor

Os valores da tabela, como são referidos ao estator, quando divididos por 377 nos dão os valores das indutâncias do circuito.

Tabela A-3 Indutâncias do motor

Grandeza	Valor
Indutância de dispersão do estator	8,24mH
Indutância de dispersão do rotor	12,12mH
Indutância do ramo magnetizante	224,15mH

Fonte: Elaborada pelo autor