

ANÁLISE DE HARMÔNICOS DE CORRENTE EM REDE SECUNDÁRIA DE TENSÃO EM UMA FÁBRICA DE FARINHAS E ÓLEOS

Uéslei Kelvin Ebeling¹
Fabiano Faller²
Bruno Turmina Guedes³

RESUMO

Este artigo tem por objetivo analisar as componentes harmônicas de um ramal de energia elétrica que alimenta uma fábrica de farinhas e óleo de uma agroindústria localizada na cidade de Seara, Santa Catarina. Durante o desenvolvimento do projeto realizou-se as medições dos níveis de harmônicos de corrente nas fases A, B e C, conforme PRODIST módulo 8. Após as medições, efetuou-se a análise dos índices harmônicos no ramal e calculou-se os níveis de distorções de correntes harmônicas geradas por dispositivos não lineares. Por último, com base nas normas internacionais, a recomendação da utilização de filtro de harmônicos passivo nos equipamentos, de modo a atenuar as distorções, melhorando a qualidade de energia.

Palavras-chave: Distorções Harmônicas. Qualidade de Energia. Filtro de harmônicos.

1 INTRODUÇÃO

A qualidade de energia pode afetar inúmeros sistemas elétricos e eletrônicos de modo a comprometer a qualidade de desempenho dos equipamentos, acarretando em perdas diversas, principalmente em equipamentos eletrônicos mais sensíveis a distorções de energia elétrica. Na legislação brasileira o órgão que rege as normativas é a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL – ditando normativas e fiscalizando os órgãos e entidades de modo a garantir a qualidade de energia para os consumidores, tanto de alta, média e baixa tensão.

De acordo com Paulilo (2013), a perda da qualidade da energia é considerada, pelos especialistas no assunto, como qualquer desvio que possa ocorrer na magnitude, forma de onda, na amplitude e na frequência da tensão ou da corrente elétrica, podendo ocasionar falhas em equipamentos.

Conforme menciona Souza (2008), no passado, a questão da qualidade de energia (QE) não era importante por dois motivos: a maioria dos usuários não necessitava de um fornecimento de energia de alta qualidade e as concessionárias de energia operavam em regimes monopolistas com tarifas baseadas nos custos de serviço, deste modo, as movimentações do custo não implicava nos lucros.

¹ UCEFF Faculdades. Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica. E-mail: uesleikelvin@gmail.com.

² UCEFF Faculdades. Esp. MBA em Gestão de Projetos. E-mail: fabiano.faller@uceff.edu.br.

³ Docente do curso de Eng. Mecânica. E-mail: brunoguedes@uceff.edu.br.

Devido ao aumento considerável das demandas de volume de produção, houve a necessidade de melhorias de desempenho e qualidade, implementando o uso de equipamentos mais sofisticados e com maior nível de controle. O aumento expressivo de dispositivos não lineares influenciou drasticamente para a criação das distorções harmônicas.

Este projeto tem por objetivo efetuar uma análise da distorção harmônica de corrente em uma fábrica de farinhas e óleos, comparando com as normas internacionais e sugerindo melhorias no sistema.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 UM POUCO DA HISTÓRIA

Durante o século XIX grandes nomes revolucionaram o modo de pensar e resolver problemas lógicos complexos e matemáticos da humanidade, desenvolvendo equações e teoremas algébricos para o desenvolvimento da sociedade.

Um dos renomados nomes existentes na época foi o matemático e físico Jean-Baptiste Joseph Fourier, francês, nascido em 21 de março de 1768, desenvolvedor da Série de Fourier, publicada em seu livro Teoria Analítica do Calor (Em inglês The analytical theory of heat).

Conforme Pifer e Aurani (2014) o problema abordado por Fourier consistia em obter uma lei matemática que pudesse mostrar como as temperaturas eram distribuídas, em função do tempo, em um corpo sólido inicialmente aquecido em uma determinada região. Um problema complexo e de imensa dificuldade de resolução. Fourier baseou-se na teoria das cordas vibrantes, que consistia em considerar um modelo contendo “N” corpos discretos e então obter sua solução correspondente a um corpo contínuo, fazendo o número “N” de corpos tender ao infinito.

Um dos conceitos utilizados por Fourier é o do fluxo de calor, utilizando equações diferenciais como a da propagação de calor em corpos sólidos, que mais tarde serviram como base para a transformada de Fourier (equação 2) e o algoritmo da transformada rápida de Fourier FFT (Fast Fourier Transformer).

A Equação 1 representa a equação da propagação de calor em corpos sólidos.

Equação 1 - Equação de Propagação de calor em corpos sólidos

$$\frac{dv}{dt} = \frac{K}{c\rho} * \left(\frac{d^2v}{dx^2} + \frac{d^2v}{dy^2} + \frac{d^2v}{dz^2} \right)$$

Fonte: A teoria analítica do calor de Joseph Fourier (2015).

Onde:

v é a temperatura;

t é o tempo;

x, y e z são as dimensões do corpo;

K é a condutividade da substancia;

c é o calor específico da substancia;

ρ é a densidade da substância.

Equação 2 – Transformada de Fourier

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt$$

Fonte: Signals and Systems (1996).

Onde:

$X(\omega)$ é Função no domínio tempo;

ω é a frequência angular;

t é o tempo.

Conforme Garcia (2013) uma componente de mesma frequência que a onda resultante distorcida é chamada de “onda fundamental” e em outras ondas senoidais de frequências múltiplas da fundamental que, como em acústica, receberam a denominação de “harmônicas”.

A ferramenta computacional utilizada no cálculo desses índices de amplitude e ângulo das harmônicas é denominada de FFT ou transformada rápida de Fourier, que é o processo da conversão de formas de ondas não senoidais no domínio do tempo para o domínio da frequência. A FFT é decorrente da Transformada de Fourier.

Conforme Garcia (2013) a palavra “harmônico” foi originalmente definida em acústica, significando a vibração de um fio ou uma coluna de ar, com frequência múltipla e diferente da fundamental, provocando uma distorção na qualidade do som resultante.

Fenômenos semelhantes ao da teoria das cordas vibrantes ocorrem na engenharia elétrica, onde deformações das tensões e correntes elétricas também têm sido registradas. Neste

caso, os fundamentos físicos e matemáticos utilizados naquela área da física podem ser imediatamente aplicados às questões elétricas.

2.2 CAUSAS DOS HARMÔNICOS

Para Kagan, Robba e Schmidt (2009), a distorção harmônica em uma rede elétrica se refere ao surgimento de correntes e tensões não-senoidais provocadas por cargas não-lineares conectadas à rede.

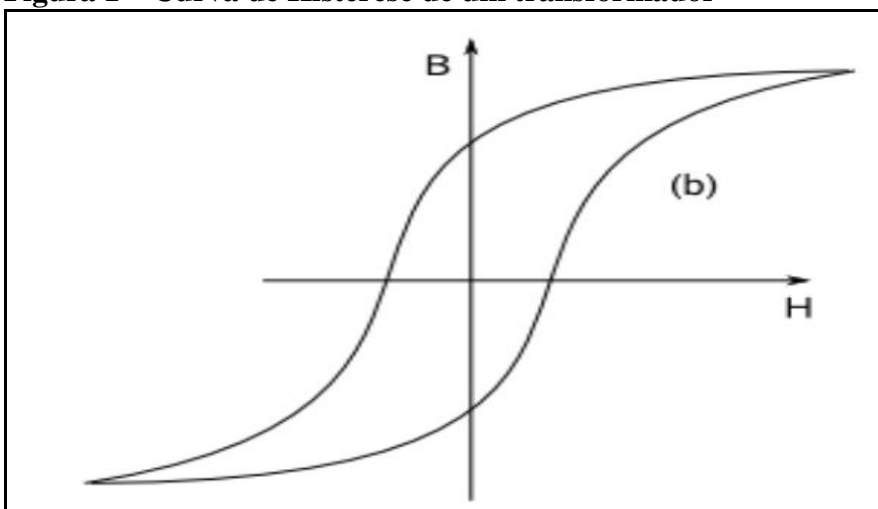
Para Garcia (2013) se constituem em uma das formas de distorção para tensões e correntes elétricas, caracterizadas por sinais senoidais com frequências múltiplas e inteiras da frequência fundamental.

Conforme Miyasaka (2017) transformadores são equipamentos feitos de cobre e ferro, sendo que esse ferro na maioria das vezes são chapas de aço silício. O silício é um material que possui histerese, sendo assim é saturado e não linear.

Quando ocorre a exposição de um campo magnético (H) ao núcleo de um transformador, ocorre a indução do campo magnético no núcleo (B). À medida que o nível de corrente aumenta, o campo magnético aumenta até entrar em uma região de saturação, conhecida como saturação magnética. No momento da mudança da polaridade ocorre a reordenação dos elétrons e como o ferro ainda está magnetizado é necessária a alteração do sentido, tirando os elétrons da inércia, gerando perdas por efeito joule.

Na Figura 1 pode-se observar a curva de histerese de um transformador.

Figura 1 – Curva de Histerese de um transformador



Fonte: Análise Perdas Técnicas (2017).

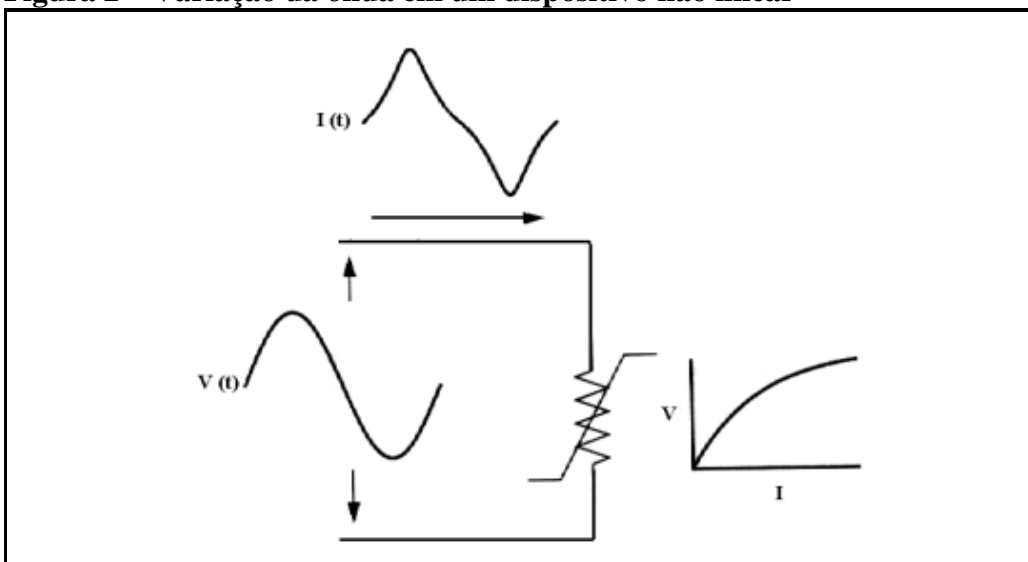
Dispositivos eletrônicos são os maiores causadores de harmônicos. Dentre eles pode-se citar alguns exemplos como pontes retificadoras, conversores estáticos (compostos de tiristores, transistores, IGBTs, Mosfets, dentre outros), inversores e conversores de frequência, reguladores de frequência com links DC⁴, fontes chaveadas, dentre muitos outros, que fazem a modulação da potência recebida da rede de modo a estabiliza-la conforme a necessidade do circuito na qual estão inseridos.

Conforme Garcia (2013), equipamentos apresentam uma geração harmônica característica quando submetidos a condições ideais de alimentação. Por condições ideais de alimentação entende-se:

- Alimentação equilibrada em magnitude e ângulo de fase;
- Alimentação livre de distorções;
- Frequência da rede de suprimento constante;
- Sistema de disparo com pulsos igualmente espaçados em 60 graus;
- Reator de alisamento com características infinitas.

A Figura 2 faz a analogia de inserção de uma onda senoidal aplicada a um resistor não-linear no qual pode-se observar a taxa de variação da relação tensão x corrente, bem como a alteração que é obtida entre a onda senoidal pura e resultante após passar pelo resistor.

Figura 2 – Variação da onda em um dispositivo não linear



Fonte: Uma nova abordagem a filtragem de harmônicos através de dispositivos eletromagnéticos (2006).

⁴ Alisamento/regulação da tensão retificada com armazenamento de energia por meio de um banco de capacitores.

A Tabela 1 demonstra como são classificados os harmônicos e o seu sequenciamento até a 15ª ordem.

Tabela 1 – Ordem, frequência e sequencia de harmônicas

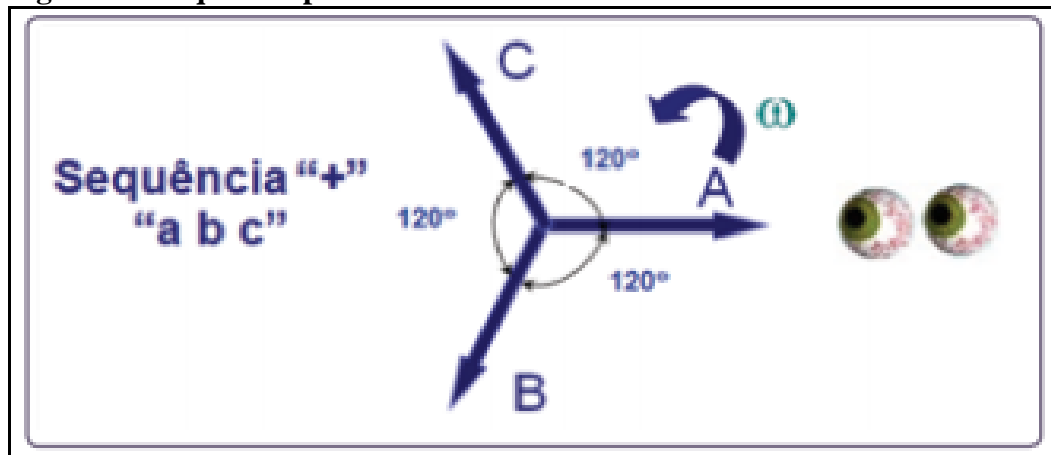
Ordem	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Frequência (Hz)	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600	660	720	780	840	900
Sequencia	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Fonte: O Autor (2020).

Conforme menciona Mardegan (2017), harmônicos de sequência positiva produzem um campo girante direto (anti-horário), ocasionando o aquecimento de condutores e o aumento da rotação de motores. Sua defasagem de fase é de 120° e gira a uma frequência angular ω obtendo o sequencial de fases A-B-C, B-C-A ou C-A-B.

Na Figura 3 pode-se analisar o diagrama fasorial de sequência positiva. Note o sentido de rotação.

Figura 3 – Sequencia positiva

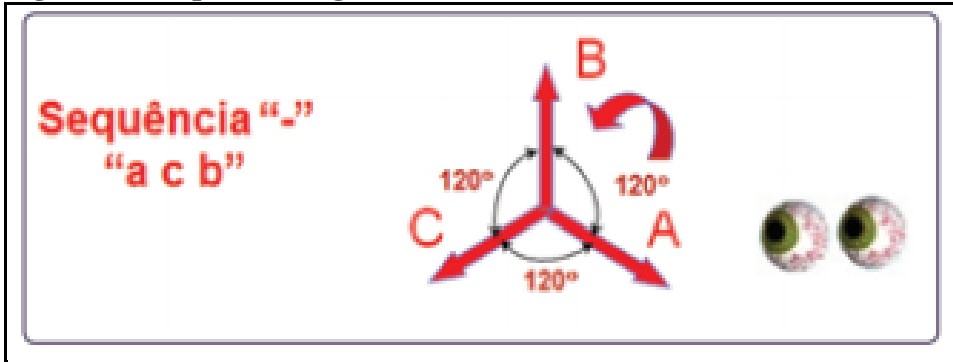


Fonte: O Setor Elétrico (2017).

Harmônicos de sequência negativa possuem defasagem de 120° e produzem um campo girante oposto ao campo girante fundamental. Sua rotação é anti-horária e observa-se na figura 4 que a sequência de fases é A-C-B, C-B-A ou B-A-C, conforme Mardegan (2017).

Devido ao campo girante ser oposto ao dos motores, acaba ocasionando aquecimentos no motor, bem como aquecimento nos condutores e interruptores, aumentando as perdas por efeito joule.

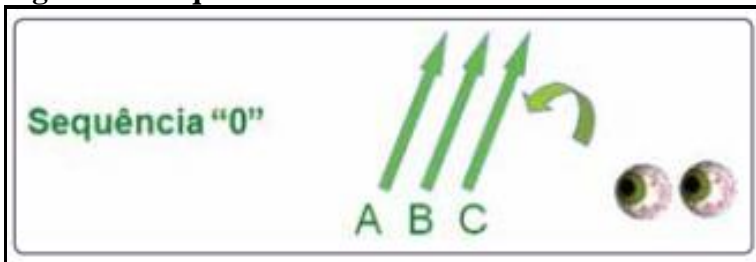
Figura 4 – Sequencia negativa



Fonte: O Setor Elétrico (2017).

Ainda conforme Mardegan (2017), harmônicos de sequência zero possuem uma defasagem fasorial de 0° , giram em uma frequência angular definida por ω , em sentido anti-horário e ocasionam o aumento do dimensionamento do neutro em sistemas ligados em estrela (Y). Pode-se observar os três “passando” juntos, conforme Figura 5.

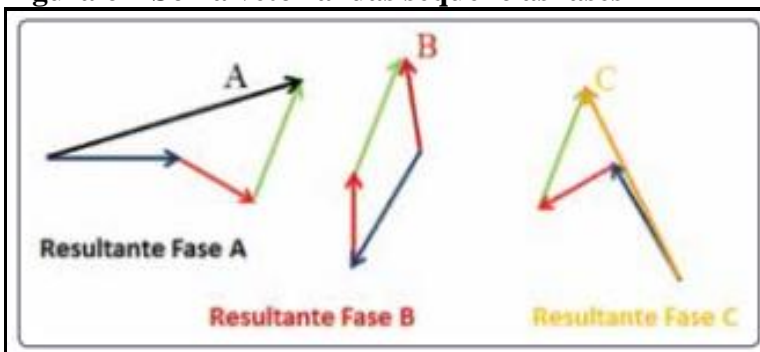
Figura 5 – Sequencia zero



Fonte: O Setor Elétrico (2017).

Caso sejam somadas vetorialmente as três sequências de fases obtêm-se as componentes resultantes, conforme Figura 6.

Figura 6 – Soma vetorial das sequencias fases



Fonte: O Setor Elétrico (2017).

Em sistemas ligados em Y, harmônicos ímpares de sequência zero e múltiplos do 3º harmônicos (3º, 9º, 15º, 21º...) são conhecidos como “Triplens” e não se anulam, mas se adicionam ao neutro, podendo ocasionar aquecimento excessivo e gerando uma tensão diferente da esperada em sistema fase-neutro. Em muitos sistemas não existe um disjuntor para o neutro como se tem para as fases, podendo ocorrer aumento de tensão, corrente e temperatura sem ter o devido monitoramento (FLUKE, 2000).

2.3 LEGISLAÇÃO HARMÔNICOS

Segundo Cogo e Siqueira Filho (2018), os problemas relacionados a cargas não lineares nos sistemas elétricos de potência fez com que órgãos responsáveis pelas legislações em cada país adotassem medidas para limitar as distorções harmônicas de tensão e de corrente.

Documento criado pela Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL, o PRODIST (Procedimentos de Distribuição) estabelece equações, níveis e parâmetros para controles. O módulo 8 retrata sobre índices e limites de parâmetros de Qualidade de Energia Elétrica - QEE (ANEEL, 2018).

Existem diversos meios de análise levados em consideração prescritos no PRODIST, como os cálculos de harmônicos ímpares, pares, ímpares múltiplos de 3, harmônicos total, dentre outros. Conforme definido no PRODIST, na equação 3 tem se as equações para cálculo da distorção individual e total dos harmônicos, na qual é a relação entre a amplitude da corrente harmonica e a fundamental (ANEEL, 2018).

Equação 3 – Equações de cálculo de distorção harmônica individual (DHI) e total (DHT)

$$DHI_I(\%) = \frac{I_h}{I_1} * 100$$

$$DHT_I(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{máx}} I_h^2}}{I_1} * 100$$

Fonte: ANEEL – PRODIST – Módulo 8 (2017).

Onde:

$DHI_I(\%)$ é o nível de distorsão harmônica em relação a fundamental;

I_h é a corrente (A) na harmônica de ordem h;

I_l é a corrente (A) na onda fundamental.

Conforme especifica a IEEE 519 (2014), a Tabela 2 define os limites de distorções harmônicas em relação a corrente de curto circuito e da componente fundamental.

Tabela 2 – Níveis máximos de Distorções harmônicas

Máxima corrente harmônica em % da corrente de carga (I_o - valor da componente fundamental)						
Harmônica ímpares:						
I_a^n/I_o	<11	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 < n$	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: IEEE 519 (2014).

Conforme define a IEEE 519 (2014) a corrente máxima de harmônicos é instituída pela equação 4.

Equação 4 – Máxima Corrente Harmônica

$$MCH = \frac{I_a^n}{I_o}$$

Fonte: IEEE 519 (2014).

Onde:

MCH: Máxima Corrente harmônica correlacionada na tabela 02.

I_a^n : Corrente de Curto Circuito Trifásico;

I_o : Corrente Nominal.

2.4 EFEITOS DOS HARMÔNICOS NA REDE ELÉTRICA

Conforme Pomilio (1998), o grau com que harmônicas podem ser toleradas em um sistema de alimentação depende da susceptibilidade da carga (ou da fonte de potência).

Os equipamentos com menor sensibilidade são, em sua maioria, dispositivos destinados a aquecimentos como as resistências, compostas por cargas resistivas. Dispositivos micro processados são comumente mais susceptíveis a incidências dos harmônicos.

Dentre os efeitos ocasionados pelos harmônicos, podemos citar:

- Efeito joule (Aquecimento);
- Harmônicos no fluxo magnéticos;
- Oscilações mecânicas;
- Perdas no ferro e cobre em transformadores;
- Indução de correntes dispersas;
- Capacitâncias parasitas;
- Efeito de proximidade;
- Ressonâncias.

Segundo Pomilio (1998), o maior efeito dos harmônicos em máquinas rotativas (indução e síncrona) é o aumento do aquecimento devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre. Afeta-se, assim, sua eficiência e o torque disponível. Além disso, tem-se um possível aumento do ruído audível, quando comparado com alimentação senoidal, podendo causar a redução da vida útil do equipamento e a diminuição da eficiência.

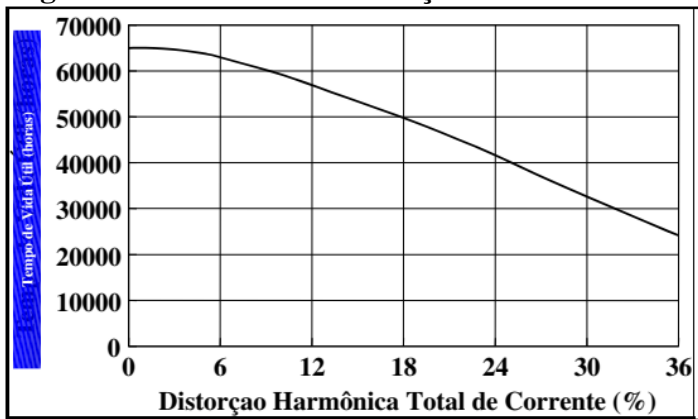
Segundo Magalhães *et. al.* (2008), harmônicos de segunda, quinta, oitava e décima primeira ordem que são de sequência negativa, produzem uma força magnetomotriz e fluxo magnético sobre o rotor contrários ao fluxo da componente fundamental.

Conforme Pomilio (1998), algumas componentes harmônicas, ou pares de componentes (por exemplo, quinta e sétima, produzindo uma resultante de sexta harmônica) podem estimular oscilações mecânicas em sistemas turbina-gerador ou motor-carga, devido a uma potencial excitação de ressonâncias mecânicas.

Em transformadores têm-se perdas no ferro e no cobre, induzidos pelos harmônicos de tensão no ferro e harmônicos de corrente no cobre.

A Figura 7 representa a análise comparativa da vida útil (em horas) de um transformador em relação percentual de distorção harmônica incidente sobre ele.

Figura 7 – Estimativa de redução de vida útil de acordo com a incidência de harmônicos



Fonte: Flávio Resende Garcia (2013)

Além disso, em casos onde ocorram harmônicos de altas frequências e amplitudes elevadas, podem gerar fenômenos conhecidos como ressonâncias, havendo dois tipos de ressonâncias: série e paralela.

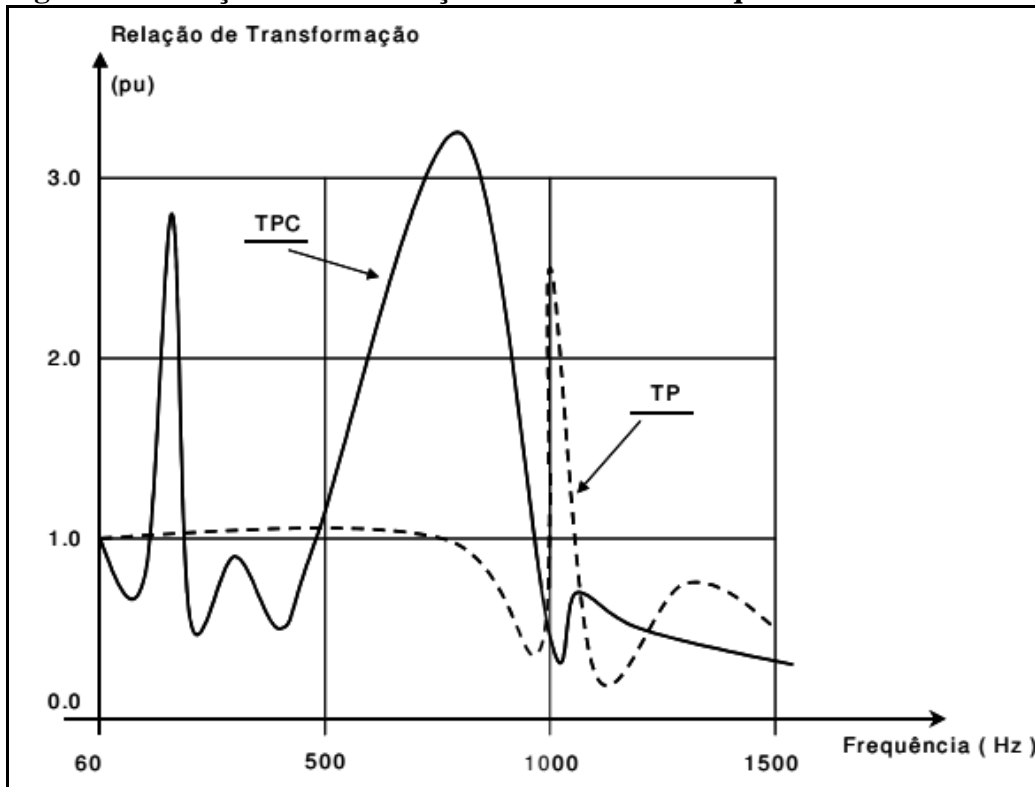
A ressonância em série é a condição na qual um circuito indutivo capacitivo (LC) se anula, resultando em uma resistência praticamente zero entre o transformador e o banco de capacitores, deste modo ocorre o aumento nos níveis de corrente podendo ocasionar danos, como a queima e superaquecimento de equipamentos.

Já a ressonância em paralelo ocorre com um circuito indutivo capacitivo (LC) em paralelo a uma fonte de tensão. Em ressonância obtém-se alto nível de impedância, bem como, ocorrendo qualquer circulação de corrente, ocorrerá aumento elevado de tensão, podendo provocar queima em dispositivos.

Outro problema existente quando se trata de harmônicos está nas leituras em TP (transformador de potencial) e TC (transformador de corrente) influenciando na relação de transformação e na resultante dos níveis de tensão e/ou corrente, conforme menciona Garcia (2013) que, para algumas frequências, podem ser de até três vezes o valor da relação nominal à frequência fundamental.

Na Figura 8, pode-se observar a relação de transformação de TP's indutivos e capacitivos e em uma relação PU (valores por unidade) x frequência.

Figura 8 – Relação Transformação TP's em PU x frequência



Fonte: Flávio Resende Garcia (2013).

Ainda conforme Garcia (2013), a relação de transformação (RT) fica bastante alterada após o 750 Hz, podendo inserir erros no sistema de proteção ou monitoração que trabalha com sinais deste TP, pois pode amplificar ou reduzir os harmônicos depois da transformação.

Quanto aos TCs, devido a sua forma construtiva simples, não apresenta grandes variações na medição.

Segundo Miyasaka (2017) esses harmônicos ao passarem em cabos também dissipam energia e essa energia não é contabilizada pelas concessionárias no cálculo de perdas técnicas.

Conforme Pomilio (1998), o chamado "efeito de proximidade", o qual relaciona um aumento na resistência do condutor em função do efeito dos campos magnéticos produzidos pelos demais condutores colocados nas adjacências.

Outro efeito que os harmônicos podem agravar nos condutores é o efeito pelicular, ou efeito skin, conforme menciona Robert (1999), a resistência elétrica efetiva do condutor aumenta em relação da resistência medida em corrente constante. Conseqüentemente haverá maior perda sob forma de calor (efeito joule). Ainda conforme Robert (1999), este pode ser contornado usando condutores ocas e cabos entrelaçados.

2.5 FILTROS DE HARMÔNICOS

Um dos meios mais eficientes de conseguir uma energia sem ruídos e a redução da demanda total em kVA de uma instalação é filtrar os harmônicos utilizando filtros ativos ou passivos.

Segundo Teixeira (2009), os filtros passivos estão sendo largamente usados ao longo dos últimos anos devido a fatores tecnológicos e econômicos, tornando-se o meio mais tradicional. Os filtros passivos são compostos basicamente de elementos resistivos (R), capacitivos (C) e indutivos (L). Têm seu princípio de funcionamento baseado no efeito da ressonância, a qual deve ocorrer para uma ou mais frequências harmônicas a serem eliminadas, apresentando uma baixa impedância resistiva.

Segundo Ribeiro (2013), filtros passivos apresentam algumas desvantagens como grande tamanho, características de compensação fixas e a possibilidade de entrar em ressonância com a rede de alimentação.

Ainda segundo Ribeiro (2013), os filtros ativos são estruturas mais complexas utilizando de circuitos eletrônicos, semicondutores de potência, indutores, capacitores, de modo a compensar as cargas não lineares, apresentando uma compensação muito mais precisa e eficiente que os filtros passivos.

Segundo Teixeira (2009), os filtros ativos atuam através de um processo de detecção, sintetização e aplicação de correntes harmônicas contrárias àquelas produzidas pela carga não-linear, podendo ainda atuar sobre a corrente na frequência fundamental, promovendo a compensação reativa. A instalação pode ser efetuada em serie ou em paralelo com o transformador ou carga, dependendo das especificações do projeto.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 EQUIPAMENTO

Para análise dos índices harmônicos utilizou-se um analisador de energia modelo Embrasul RE7000, conforme Figura 9.

Figura 9 – Analisador de energia Embrasul RE7000



Fonte: Embrasul (2020).

Este dispositivo tem diversos modos de análise de energia, dentre eles, análises de tensão, corrente, transientes, flutuação de tensão (flicker), fator de potência, variações de frequência, desequilíbrios de tensão e harmônicos.

3.2 PROCEDIMENTO DE INSTALAÇÃO

Para a instalação utilizou-se de sensores de corrente flexíveis do tipo TI SLIM 120mm e cabos de tensão, conforme Figura 10.

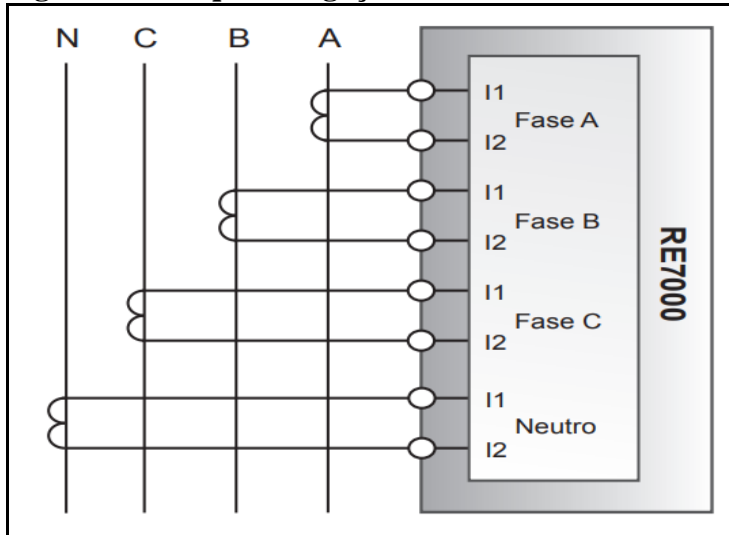
Figura 10 – Sensores e cabos utilizados na análise



Fonte: Embrasul (2020).

A instalação do equipamento ocorreu no barramento de tensão secundária do transformador, junto ao disjuntor de baixa tensão, com o sensor de corrente circundando cada um dos barramentos (3 fases e neutro) e os cabos de tensão acoplados no barramento.

Figura 11 – Esquema ligação Analisador RE7000.



Fonte: Embrasul (2020).

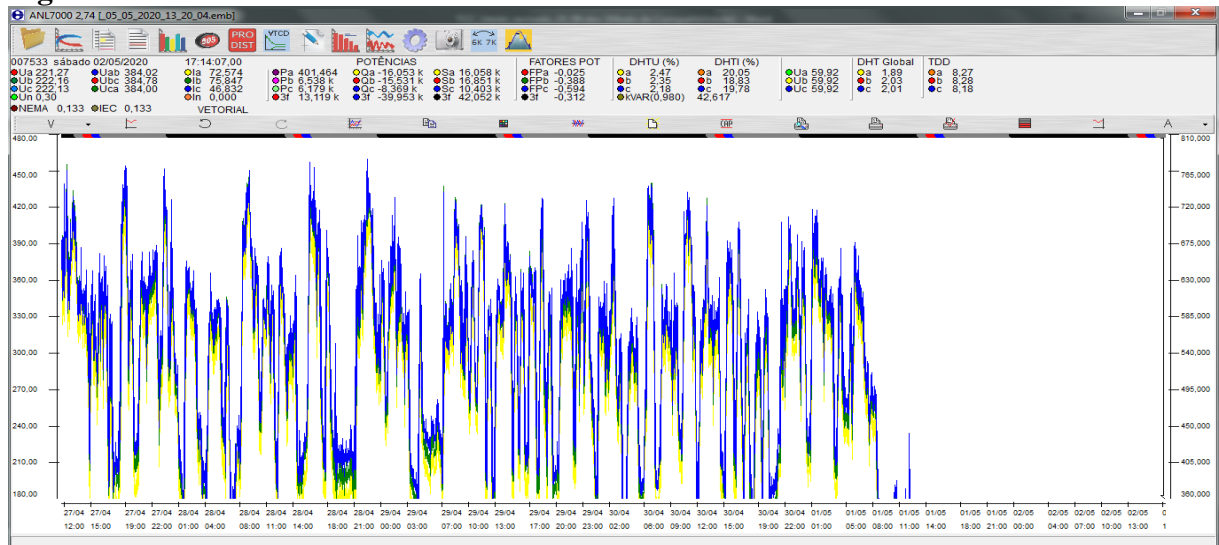
Segundo o PRODIST (ANEEL, 2018), Módulo 8, item 2.5.1.1, devem ser extraídas 1008 leituras válidas, uma a cada 10 minutos.

Para a análise dos dados obtidos, a Embrasul disponibiliza o software ANL7000. Nele é possível efetuar toda a análise e extração dos dados obtidos pelo analisador de energia.

A conexão entre o analisador e o software é via rede, atribuindo um endereço de IP (Internet Protocol) e efetuando o download do arquivo contendo os dados extraídos para o computador.

Conforme Figura 12, pode-se verificar a página inicial da aplicação, mostrando diversos parâmetros de análise.

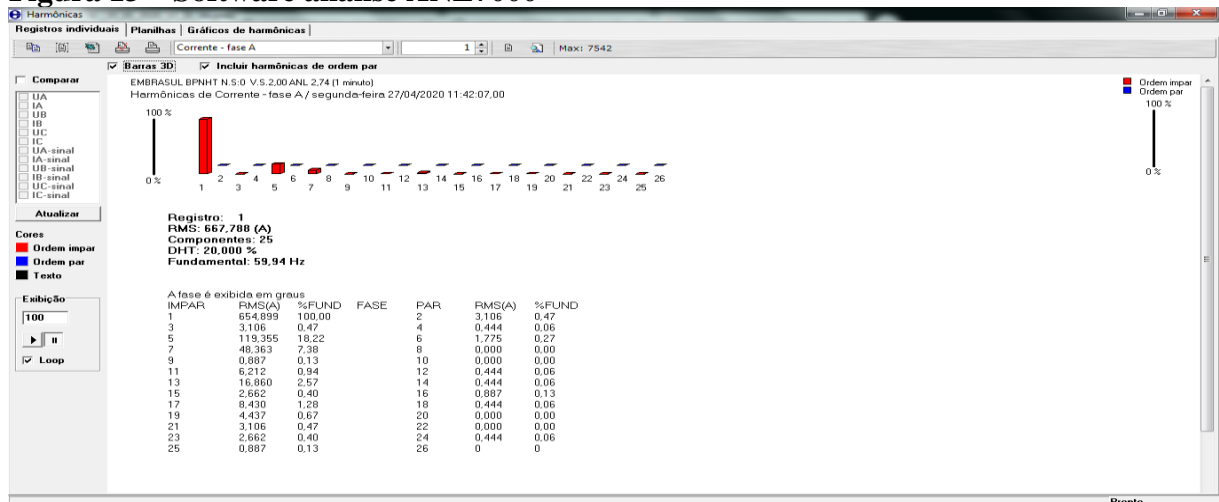
Figura 12 – Software análise ANL7000



Fonte: O Autor (2020).

No software, tem-se um modulo específico para os harmônicos conforme a Figura 13. Extrai-se 1008 leituras até harmônicos da 25ª ordem.

Figura 13 – Software análise ANL7000



Fonte: O Autor (2020).

4 RESULTADO E ANÁLISE DOS DADOS

4.1 VALORES OBTIDOS

Efeturaram-se os cálculos de distorções harmônicas utilizando os dados extraídos pelo analisador de energia, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Valores extraídos pelo analisador de energia

DATA	HORA	DHTia - %	DHTib - %	DHTic - %	FP3f	Io Harmônica - A
27/04/2020	11:47:07	16,87	21,11	16,56	0,74	367
27/04/2020	11:57:07	17,84	17,87	17,57	0,77	340
27/04/2020	12:07:07	16,78	16,93	16,54	0,75	333
27/04/2020	12:17:07	16,74	16,95	16,59	0,79	342
27/04/2020	12:27:07	16,65	16,76	16,49	0,78	338
27/04/2020	12:37:07	17,17	17,32	17,20	0,78	354
27/04/2020	12:47:07	15,89	15,98	15,83	0,77	332
27/04/2020	12:57:07	18,07	15,99	16,24	0,71	299
27/04/2020	13:07:07	14,58	14,86	14,36	0,75	268
27/04/2020	13:17:07	14,53	15,26	14,38	0,74	261
27/04/2020	13:27:07	19,19	16,64	16,51	0,78	353
27/04/2020	13:37:07	16,59	17,71	16,40	0,78	339

Fonte: O Autor (2020).

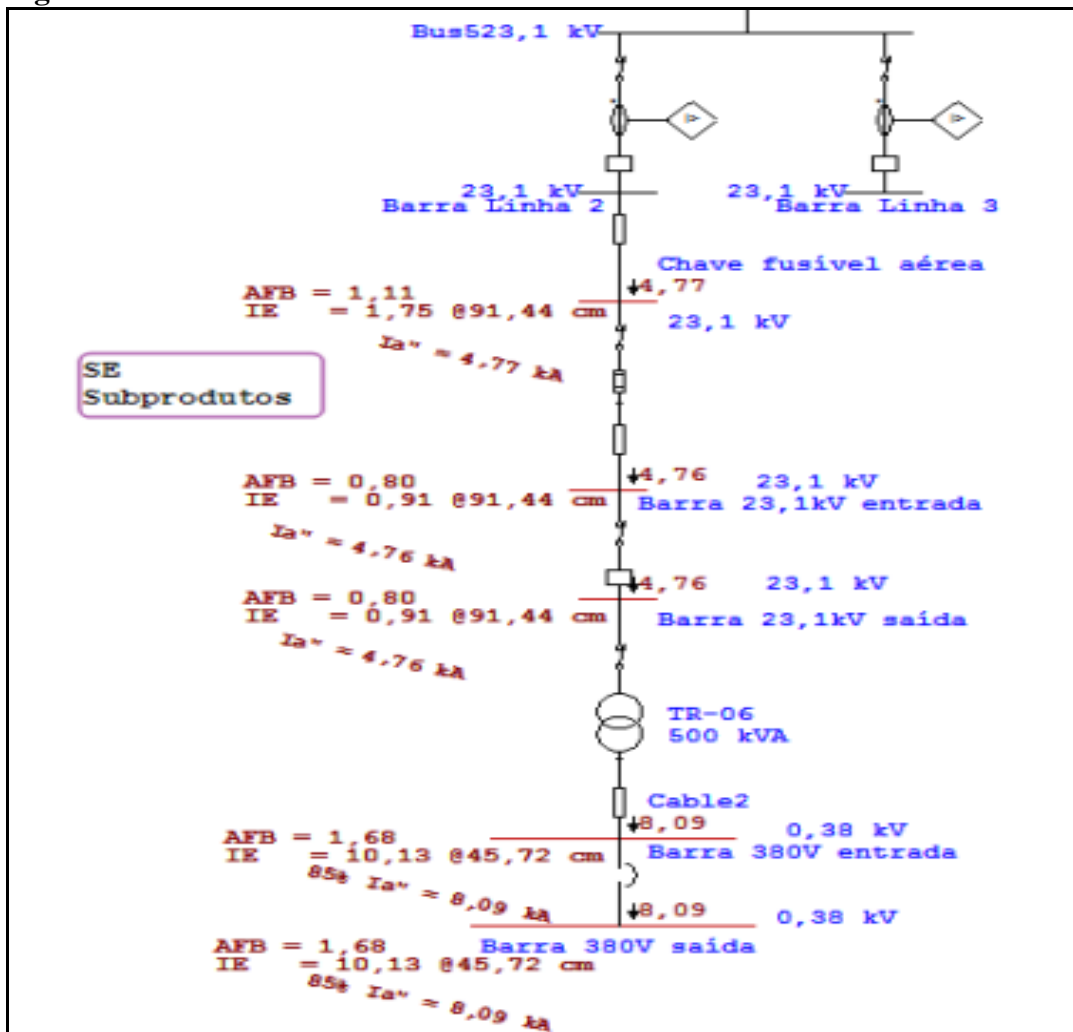
Conforme análise de curto circuito da unidade (Figura 14), a corrente de curto circuito trifásico (I_a'') é de aproximadamente 8,09kA, já a corrente nominal da carga é de aproximadamente 547A. Pela IEEE 519 (2014), demonstrado na equação 4, o cálculo é dado por:

$$MCH = \frac{8090}{547} = 14,78$$

Fonte: IEEE 519 (2014).

Dado que I_a''/I_o é 14,78, menor que 20 conforme menciona na tabela 2, a distorção harmônica total (TDD %) deve ser inferior a 5%.

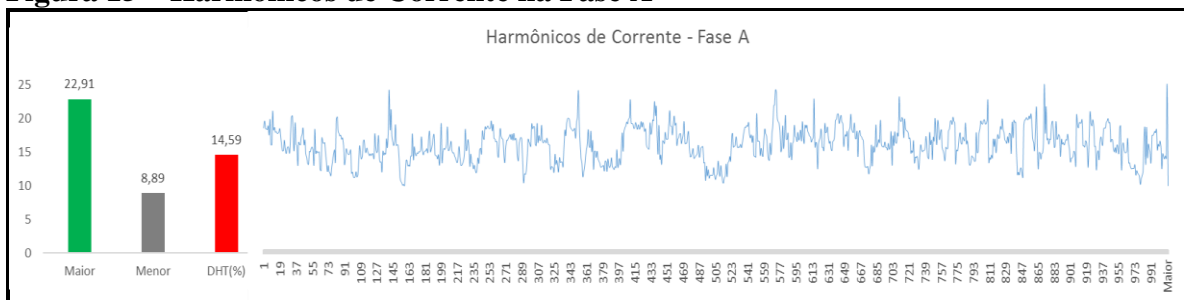
Figura 14 – Análises de Curto Circuito no barramento



Fonte: Seara Alimentos (2018).

Após análise conclui-se que os níveis de distorções harmônicas de corrente estão acima do aceitável, conforme os 5% estabelecido pela IEEE, chegando a uma DHTi de 14,59% na Fase A conforme demonstra na Figura 15.

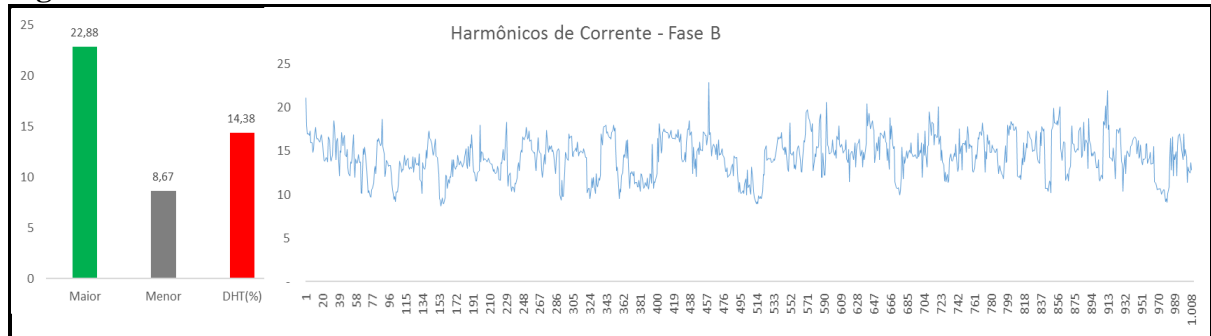
Figura 15 – Harmônicos de Corrente na Fase A



Fonte: O Autor (2020).

Na Fase B, observa-se a distorção harmônica de 14,38% conforme Figura 16.

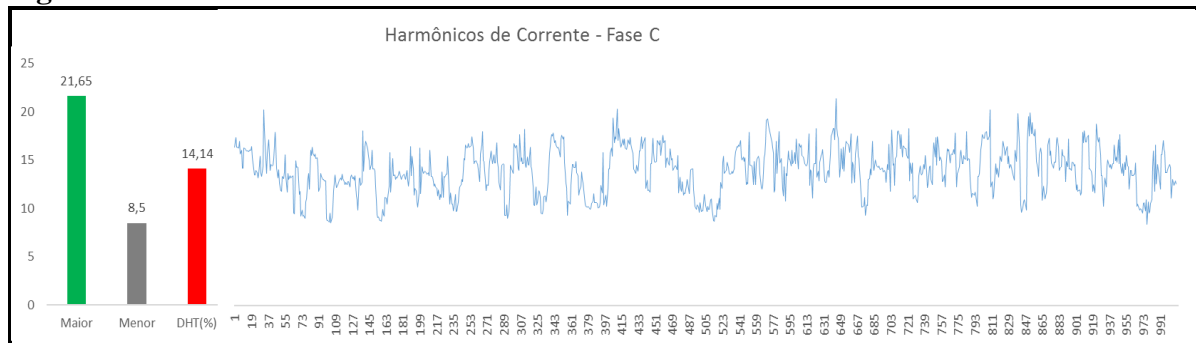
Figura 16 – Harmônicos de Corrente na Fase B



Fonte: O Autor (2020).

Na Fase C, observa-se distorção harmônica de 14,14%.

Figura 17 – Harmônicos de Corrente na Fase C



Fonte: O Autor (2020).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após efetuadas as análises das distorções harmônicas existentes e a constatação de alto índice de harmônicos, excedendo a tolerância de 5% da Norma IEEE 519 de 2014 e no Módulo 8 do PRODIST, recomenda-se efetuar a instalação de um filtro passivo para controle dos índices harmônicos. Como consequência haverá a melhoria da qualidade de energia da empresa, aumentando a vida útil de equipamentos, componentes eletrônicos e eletromagnéticos, também evitando a circulação das componentes harmônicas na rede, diminuindo a necessidade de condutores maiores e otimizando as perdas.

Uma segunda recomendação visando trabalhos futuros é efetuar a análise das cargas instaladas e identificar os principais geradores das componentes harmônicas, dimensionando

um filtro passivo específico para a carga geradora, por ser mais barato se comparado a um filtro ativo, tornando o projeto mais eficiente e rentável.

REFERÊNCIAS

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional – PRODIST**. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Revisão 10.2018.

AVANÇADA, Rede Tecnologia (org.). **Filtro Ativo de Harmônicas**. 2020. Disponível em: <https://www.rta.com.br/produtos/filtro-ativo-de-harmonicas/>. Acesso em: 05 out. 2020.

BELCHIOR, Fernando Nunes. **Uma nova abordagem a filtragem de harmônicos através de dispositivos eletromagnéticos**. 2006. Disponível em: <http://clyde.dr.ufu.br/bitstream/123456789/14325/1/FNBelchior1TESPRT.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2020

BRAGA, Pedro Henrique Müller. **Problemas de harmônicas na conexão de aerogeradores à rede elétrica com o uso de filtros**. 2019. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10030223.pdf>. Acesso em: 06 set. 2020.

GARCIA, Flávio Resende. **Harmônicos em sistemas elétricos de potência**. 2013. Disponível em: http://www.iesa.com.br/institucional/pdf/pdf_reativa/ap_harmonicosSEPCap.pdf. Acesso em: 10 ago. 2020.

GARCIA, Flávio Resende. **Cálculo da perda de vida útil de capacitores em função da distorção harmônica existente nas redes de distribuição de energia elétrica**. 2001. Disponível em: http://www.iesa.com.br/institucional/pdf/pdf_reativa/art_harmPerda.pdf. Acesso em: 10 ago. 2020.

HELERBROCK, Rafael. **Potência e Rendimento**; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/potencia.htm>. Acesso em 07 de novembro de 2020.

KAGAN, Nelson, ROBBA, João Ernesto, SCHMIDT, Hérmán Prieto. **Estimação de Indicadores de Qualidade de Energia Elétrica**. São Paulo. Blucher. 2009.

MAGALHÃES, Christiane M. Sousa de *et al.* **Análise da Influência das Distorções Harmônicas em Motores de Indução Acionando Correias Transportadoras**. 2008. Disponível em: <http://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20081212090954-31611.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2020.

MARDEGAN, Cláudio. **Curto-circuito para a seletividade**: componentes simétricas. Componentes simétricas. 2016. Disponível em: http://www.osestoreletrico.com.br/wp-content/uploads/documentos/fasciculos/ed-123_Fasciculo_Cap-IV-Curto-circuito-para-a-seletividade.pdf. Acesso em: 05 set. 2020.

- MIYASAKA, Gabriel. **Análise de perdas técnicas em circuitos secundários de distribuição**. 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/21125/3/An%C3%A1lisePerdasT%C3%A9cnicas.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2020.
- OPPENHEIM, Alan V.; WILLISKY, Alan S. **Signals and Systems**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1996. 957 p.
- PAULILO, Gilson (ed.). Conceitos Gerais sobre a qualidade da Energia. **O Setor Elétrico**, São Paulo, v. 1, n. 84, p. 30-37, jan. 2013. Mensal. Disponível em: <https://pdf.magtab.com/leitor/193/edicao/3526>. Acesso em: 15 ago. 2020.
- PIFER, Anderson; AURANI, Katya Margareth. **A teoria analítica do calor de Joseph Fourier: Uma análise das bases conceituais e epistemológicas**. 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbef/v37n1/0102-4744-rbef-37-01-1603.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2020.
- POMILIO, José Antenor. **Efeitos e causas de harmônicas no sistema de energia elétrica: efeitos de harmônicas em componentes do sistema elétrico**. Efeitos de harmônicas em componentes do sistema elétrico. 1998. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/htmlfile/harmo/fpcap4/cap4.html>. Acesso em: 25 ago. 2020.
- RIBEIRO, Enio Roberto. **Filtros Ativos Série para a compensação de harmônicos de tensão**. 2003. 213 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/85123/194129.pdf>. Acesso em: 05 out. 2020.
- SEARA ALIMENTOS 2018, **Memorial de Cálculo de Energia Incidente - SE Subprodutos**, Seara, 2020.
- SILVA, Lucas Rodrigues da. **Avaliação de perdas na presença de cargas não lineares na rede elétrica utilizando o software opendss**. 2017. 101 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade de Brasília, Brasília, 2017. Disponível em: http://fga.unb.br/articles/0001/9502/Avaliacao_de_perdas_na_presenca_de_cargas_nao_lineares_na_rede_eletrica_utilizando_o_software_opendss.pdf. Acesso em: 10 nov. 2020.
- SOUZA, Silvio Aparecido de. **Algoritmo genética aplicado a proteção e estimação de harmônicos em sistema elétrico de potência**. 2008. 259 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-17032009-150821/publico/Silvio.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2020.
- TAVARES, Paulo Henrique. **Estudo, Projeto e Implantação de Filtros Harmônicos Sintonizados para a Expansão Industrial**. 2011. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/259305/1/Tavares_PauloHenrique_M.pdf. Acesso em: 10 ago. 2020.

TEIXEIRA, Douglas Ângelo. **Análise das distorções harmônicas**: estudo de caso de um sistema industrial. 2009. 127 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-8CJHGU>. Acesso em: 05 out. 2020.

THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC. **IEEE STD 519**: IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. 1 ed. New York, 2014. 29 p. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1589263/mod_resource/content/1/IEE%20Std%20519-2014.pdf. Acesso em: 05 nov. 2020.

VARIZ, Abílio Manuel *et al.* **Cálculo do fluxo de harmônicos em sistemas de potência trifásicos utilizando o método de injeção de correntes com solução iterativa**. 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/ca/v19n2/a07v19n2.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2020.