



MELHORIA DA QUALIDADE DE ENERGIA EM MOTOR TRIFÁSICO ACIONADO POR INVERSOR DE FREQUÊNCIA.

Alessander Rodrigues De Souza ¹

Anderson Duarte Betiol ²

Resumo: A qualidade da energia elétrica ocorre quando o sinal elétrico de tensão e corrente permite que equipamentos e máquinas industriais funcionem de forma satisfatória. Os motores elétricos de indução foram projetados para terem o seu melhor rendimento quando a forma da onda é puramente senoidal, porém, com a presença de inversores de frequência em máquinas industriais, a qualidade da energia elétrica deixou de ser a mesma da qual foi originada. Esta nova forma de onda que passou a surgir na rede elétrica é o que chamamos de harmônicos. Esses distúrbios comprometem a qualidade da energia elétrica trazendo muitos malefícios a uma planta industrial. O artigo visa a abordar a melhoria da qualidade da energia em uma máquina de fabricação de cigarros, no qual possui um motor de indução trifásico acionado por um inversor de frequência. O ensaio de campo foi realizado em uma indústria localizada no município de Araraquara-SP, e buscou-se a melhoria da qualidade de energia através de indutores tipo choke, esse tipo de indutor faz o bloqueio parcial das frequências dos harmônicos. A medição dos componentes dos harmônicos foi feita em um analisador e multimedidor elétrico DMI-T50T. O estudo mostrou que os reatores tipo choke reduziram a distorção dos componentes dos harmônicos de corrente de 7^a ordem, porém não foi suficiente para atenuar de forma satisfatória os componentes dos harmônicos de corrente de 5^a ordem.

Palavras-chave: Máquinas Industriais. Qualidade de energia. Harmônicos.

⁰ ¹ Graduando do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Araraquara-UNIARA, Araraquara-SP. E-mail : alexrseletrica@gmail.com

² Orientador, Docente do Curso de Engenharia Elétrica da UNIARA. Email: adbetiol@yahoo.com

IMPROVEMENT OF ENERGY QUALITY IN THREE-PHASE MOTOR DRIVEN BY FREQUENCY INVERTER.

Abstract: the quality of the electric energy occurs when the electrical signal of voltage and current allows industrial equipment and machines to function satisfactorily. Electric induction motors are designed to have their best performance when the waveform is purely sinusoidal, but, with the presence of frequency inverters in industrial machines, the quality of the electric power is no longer the same from which it originated. this new waveform that came to appear in the electric grid is what we call harmonics. these disturbances compromise the quality of electric power bringing many curses to an industrial plant. the article aims to address the improvement of the quality of electric power in a cigarette making machine, in which it has a three-phase motor driven by a frequency inverter. The field test was performed in an industry located in the municipality of Araraquara-SP, and sought to improve the quality of energy through choke inductors, this type of inductor makes partial blocking of harmonic frequencies. the measurement of the components of the harmonics was done on a DMI-T50T energy analyzer and electric multimeter. The study showed that the choke-type reactors reduced the current components harmonics distortion of 7^a, but it was not sufficient to satisfactorily attenuate components harmonics currents of 5^a.

Keyword: Industrial machinery. Power quality. Harmonics.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o órgão responsável por regulamentar e fiscalizar a distribuição no sistema elétrico é a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e ela o faz através dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) que determinam quais os parâmetros a serem seguidos. O PRODIST é dividido em módulos e o que faz referência a qualidade da energia elétrica é o módulo 8. De acordo com o Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional (PRODIST, 2018, p.13) distorção harmônicas são fenômenos associados a deformações na forma de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental.

Com os avanços tecnológicos da eletrônica de potência, os inversores de frequência foram se tornando algo comum dentro das indústrias. Atualmente a maioria das máquinas industriais possuem inversor de frequência para ajuste de velocidade. Estes aparelhos trazem muitos benefícios à máquina, como, rampa de partida e parada mais suave, melhoria do fator de potência e facilidade na partida com vários tipos de velocidades. O problema é que o chaveamento eletrônico nesses aparelhos produz uma distorção na forma da onda trazendo malefícios a rede elétrica. Um desses malefícios são os harmônicos de tensão e corrente.

O estudo visa a pesquisar o grau de intensidade dos distúrbios harmônicos que são gerados em um equipamento do ambiente industrial, e se é possível fazer a melhoria da qualidade da energia através de um filtro tipo choke.

Com a realização de estudos foi feita uma análise das vantagens e desvantagens em se por na máquina um filtro tipo choke, pois dependendo da carga em que o filtro for instalado, o custo pode sobressair-se em relação a outros tipos de filtros mais eficientes, como os filtros ativos e os filtros híbridos. Foram realizadas medições via software do analisador de energia, em

que buscou-se mostrar os harmônicos e as demais grandezas elétricas, como tensão, corrente, potência ativa e com isso tirar uma conclusão se o filtro tipo choke é satisfatório para atenuar os harmônicos conforme normas internacionais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A eletrônica de potência tem disponibilizado uma vasta gama de equipamentos, porém, segundo Magalhães(2010), os inversores de frequência são cargas não lineares cada vez mais relevante na indústria. A eficiência desses aparelhos são inegáveis para a otimização dos processos industriais e faz com que o investimento em inversores seja comprovado. Entretanto por ser uma carga não linear, os inversores possui a desvantagem de contribuir para a injeção de harmônicos na rede elétrica.

Segundo Alexander e Sadiku(2013) Fourier descobriu que uma função periódica não senoidal podia ser descrita como a soma infinita de funções senoidais. Uma função periódica pode ser descrita por.

$$f(t) = f(t + nT)$$

onde n é um número inteiro e T , o período da função.

Conforme descrito por Alexandre e Sadiku(2013) de acordo com o teorema de Fourier, qualquer função periódica contendo a frequência ω_0 pode ser definida na forma de uma soma infinita de funções seno ou cosseno que são múltiplos inteiros de ω_0 . Então, $f(t)$ pode ser descrito conforme a fórmula abaixo.

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos \omega_0 t + b_1 \sin \omega_0 t + a_2 \cos 2\omega_0 t + b_2 \sin 2\omega_0 t + a_3 \cos 3\omega_0 t + b_3 \sin 3\omega_0 t + \dots \quad (1)$$

onde $\omega_0 = 2\pi/T$ é chamada de frequência fundamental, medida em radianos por segundo. A senoide $\sin \omega_0 t$ ou $\cos \omega_0 t$ é designada como a n -ésima harmônica de $f(t)$. A harmônica pode ser ímpar se n for ímpar, ou, par se n for par. A equação acima é chamada de série de Fourier trigonométrica de $f(t)$.

O sinal senoidal mantém suas características de frequência única para tensão e corrente quando observada por meio de componentes passivos, como resistores, capacitores e indutores(KLUMPER,2012). O tipo de onda senoidal é invariável em relação à derivação e à integração, porém, uma forma de onda desse tipo é algo perfeito e, na prática algo geralmente não encontrado(LEÃO, SAMPAIO e ANTUNES,2014).

No Brasil, segundo Oliveira, Macedo Junior, Delaiba(2014) a regulamentação da qualidade do produto pode ser dividida em duas partes, uma mostrando os indicadores de desempenho da rede básica e outro relacionado ao sistema de distribuição de energia elétrica. A regulamentação da rede básica existentes no país refere-se aos submódulos 2.8 e 3.6 da ONS(Operador Nacional do Sistema Elétrico). Já em relação ao segmento de distribuição de energia elétrica, a regulamentação existente esta disponível nos módulos 3 e 8 dos procedimentos de distribuição da ANEEL(Agência Nacional de Energia Elétrical).

Conforme Oliveira, Macedo Junior, Delaiba(2014) nos procedimentos de distribuição, não existem limites publicados para os diversos indicadores associados com a qualidade da energia. O quadro 1 apresenta uma síntese do procedimento de distribuição.

Quadro 1 - Procedimentos de Distribuição

Documento	Indicador	Valores	Limites	Penalidades
Distribuição	Distorção Harmônicas	Sim	Não	Não
	Desequilíbrio Tensão	Sim	Não	Não
	Flutuações de Tensão	Sim	Não	Não
	Variações de Tensão	Não	Não	Não

Fonte: OLIVEIRA, MACEDO JUNIOR e DELAIBA (2014, p.9)

Diferente dos procedimentos de distribuição que não possuem limites, os procedimentos de rede declaram os limites estabelecidos, porém sem penalidades diretas, são estabelecidos apenas obrigações para a correção das divergências encontradas em relação aos diversos indicadores. O quadro 2 apresenta uma síntese do procedimento de rede.

Quadro 2 - Procedimentos de Rede

Documento	Indicador	Valores	Limites	Penalidades
Rede	Distorção Harmônicas	Sim	Não	Indiretas
	Desequilíbrio Tensão	Sim	Não	Indiretas
	Flutuações de Tensão	Sim	Não	Indiretas
	Variações de Tensão	Não	Não	Indiretas

Fonte: OLIVEIRA, MACEDO JUNIOR e DELAIBA (2014, p.9)

A IEC(*International Electrotechnical Commission*)segundo Oliveira, Macedo Junior, Delaiba(2014) é uma organização mundial de normatização, cujo objetivo é colocar em evidência as questões relativas a normas, recomendações e orientações no contexto elétrico e eletrônico. Com este propósito, a IEC publica documentos para uso internacional, os quais se encontram no formato de normas, relatórios técnicos e manuais. No que diz respeito a aspectos relacionados à qualidade de energia elétrica, esta entidade disponibiliza uma série de documentos que discute a definição dos fenômenos e seus respectivos indicadores, proposição de valores limites e apresentação de procedimentos e protocolos para a medição e avaliação de desempenho.

Conforme a norma IEC 61000-3-2 de 2009 - *Limits for harmonics current emissions (equipment input current $\leq 16 A$ per phase)* esta parte da norma trata da limitação de correntes harmônicas injetadas na rede pública do sistema de abastecimento, como também especifica limites de componentes harmônicos da corrente de entrada. Esta norma é aplicável a equipamentos elétricos e eletrônicos com corrente de entrada de até 16A por fase e destina-se a ser ligado ao sistema de distribuição de baixa tensão.

Segundo Furtado, Saraiva e Antunes(2014) a IEC 61000-3-4 de 1998 - *Limitation of emission of harmonics currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16A*: É uma recomendação técnica direcionada a equipamentos elétricos

e eletrônicos que se caracterizam por ter uma corrente nominal superior a 16 A por fase e são alimentados por sistemas de distribuição em corrente alternada com as seguintes características: tensão nominal de até 240 V, monofásica, dois ou três fios; tensão nominal de até 600 V, trifásico, a três ou quatro fios: frequência nominal de 50 HZ ou 60 HZ.

A norma IEC 61000 -3-4 de 1998 (Tabela 1) foi substituída pela norma IEC 61000 -3-12 de 2011, porém a parte referente a porcentagem do máximo de harmônicos em circuitos trifásicos balanceados com corrente passante entre 16A até 75A, continuam a mesma. Esta norma será utilizada como referência na parte prática do projeto.

Tabela 1 – Norma IEC 61000-3-4

Harmônicas	Máxima Porcentagem
3 ^o	21,6%
5 ^o	10,7%
7 ^o	7,2%
9 ^o	3,8%
11 ^o	3,1%
13 ^o	2%
15 ^o	0,7 %

Fonte: NASCIMENTO (2014, p.27)

Os harmônicos são injetados na rede por dispositivos eletrônicos chamados de não lineares e dependendo do nível destes distúrbios podem aparecer problemas, como fator de potência baixo, ruídos na rede elétrica. Por isso a importância de estudar e avaliar o filtro tipo choke, pois cada projeto será único e cada planta industrial possui um determinado tipo de intensidade dos harmônicos.

Deste modo, podemos considerar que todos os fenômenos que deformam a onda senoidal fazem parte do objeto de estudo sobre qualidade de energia. "A qualidade de energia elétrica é um conceito guarda-chuva, que abrange uma variedade de fenômenos eletromagnéticos que levam ao desvio na forma de onda da tensão e corrente"(LEÃO, SAMPAIO e ANTUNES, 2014,p.1).

Segundo Ribeiro(2017)os harmônicos não são distúrbios exclusivos só da indústria, mas também das residenciais e dos estabelecimentos comerciais, pois os distúrbios harmônicos são o resultado da interação entre a carga e a fonte. Foi visto anteriormente que independente do setor em que se trabalhe, os distúrbios harmônicos resultam em custos aos consumidores, pois estes alteram o valor do fator de potência.

O conceito de filtros tem tido um parte fundamental na evolução da engenharia elétrica, pois várias realizações tecnológicas não seriam possíveis sem a existência dos filtros elétricos. Um circuito é um filtro passivo se for formado apenas por elementos passivos R, L e C, e diz-se que um filtro é ativo se ele for formado por elementos ativos como transistores e amplificadores operacionais, além dos elementos passivos R, L e C (ALEXANDER, SADIKU,2013).

O primeiro tipo a ser analisado são os filtros passivos que podem ser classificados quanto ao modo de ser ligado a rede elétrica, pois podem ser ligados em série ou paralelo. O filtro série

atua como um circuito de bloqueio para uma determinada frequência, cujo o maior desejo é de impedir que certas frequências possam passar para o equipamento ou rede elétrica.

Conforme Leão, Sampaio e Antunes (2014) o filtro paralelo ou shunt pode ter um dos seus terminais aterrado, com o objetivo de orientar parte da corrente de harmônico da carga para o filtro e assim reduzir a corrente de harmônico que circula pela rede elétrica. Ou seja, neste tipo de filtro já não há a preocupação com a corrente passante, pois as correntes de harmônicos são desviadas para terra e se tornam algo bem mais atrativo para qualquer tipo planta industrial.

Segundo (Leão, Sampaio e Antunes, 2014,p.290) "O filtro é formado por uma indutância e capacitância em paralelo, com ação semelhante a uma bobina de bloqueio. Essa é uma solução cara e raramente utilizada, tendo como principal fator negativo o fato de o filtro transportar toda a corrente passante no ponto do sistema em que é instalado ."

O indutor é uma bobina de fio que permite que um campo magnético se forme ao redor da bobina quando a corrente flui por meio dela. Quando energizado, é um ímã elétrico com a força do campo sendo proporcional ao fluxo de corrente e ao número de espiras. Um determinado valor de indutância terá uma impedância maior em frequências mais elevadas. Assim, podemos relatar que os reatores limitam a taxa de aumento da corrente (ROCKWEEL AUTOMOTION, 2018).

Segundo Ortamnn(2008), uma forma de limitar os elevados picos de corrente e a consequente distorção dos harmônicos é a inserção de um indutor após o conversor. Este procedimento diminui consideravelmente os picos de corrente e, assim, diminui a taxa de distorção das correntes e aumenta o fator de potência. As principais desvantagens desta técnica são, grande volume do indutor, em função da componente que circula pelo mesmo, objeção ou impossibilidade de instalação e possibilidade de ressonância entre o indutor e o banco de capacitores.

Uma outra alternativa, de acordo com Ortmann(2008), é a colocação de indutores na entrada do conversor, um indutor em cada fase da ligação. Os picos da corrente passante são igualmente diminuídos e também reduz a distorção das correntes dos harmônicos, sendo que há perdas em função deste tipo de ligação, como valores elevados de indutância que podem defasar bastante as correntes das tensões específicas e ao mesmo tempo provocam a diminuição do fator de potência.

Como descrito anteriormente o filtro com ligação em série possui algumas vantagens e desvantagens, mas como o projeto em questão refere-se a um motor de baixa potência, a viabilidade e a facilidade em executar este tipo de projeto pode ser um atrativo a parte. Pressupõe-se que em um sistema mais complexo este filtro não seria o mais adequado, em função da corrente passante ser elevada.

Segundo Furtado, Saraiva e Antunes(2014,p.261)"Distorção harmônica está presente, em maior ou menor proporção, em todos os sistemas de potência. Em geral, os harmônicos de

tensão e corrente devem ser mitigados somente quando ultrapassam os limites normatizados e se tornam um problema."

A medição de grandezas elétricas é de grande valor para as concessionárias e consumidores, a partir dela indicadores são apurados para permitir o acompanhamento do desempenho e da conformidade das funções dos equipamentos elétricos. As harmônicas são caracterizadas como fenômenos de estado permanente à semelhança do desequilíbrio de tensão e da flutuação de tensão, já que estão presentes enquanto o equipamento que gera as harmônicas esta em operação.

A questão da geração, propagação e efeitos de harmônicas nas redes elétricas de potência, tem na atualidade se firmado como um dos mais expressivos fatores responsáveis pela perda de qualidade da energia elétrica. O assunto cresce em importância à medida que os dispositivos não lineares ocupam cada vez mais espaços no setor elétrico. Neste contexto, a preservação da qualidade de energia se faz necessário (APOLÔNIO, et al, 2003).

3 METODOLOGIA

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica e um estudo pautado na leitura das grandezas elétricas e dos distúrbios harmônicos a fim de escolher a potência e a indutância do transformador tipo choke correto. A medição foi feita em um analisador e multimedidor elétrico DMI-T50T, desenvolvido e fabricado pela ISSO telecom LTDA. O aparelho constitui de uma plataforma completa de telemetria elétrica e informações de consumo. Este DMI-T50T possui uma web embarcada, ou seja, um supervisor integrado via conexão ethernet nativa. Basta ligar os medidores e ter acesso a internet para que seja feita à análise da máquina. Na Figura 1 são apresentados os valores das grandezas elétricas, como, tensão, corrente, potência ativa, potência reativa e os valores do fator de potência de cada fase. Estas grandezas elétricas são importantes, pois determinam qual a condição real de consumo da máquina.

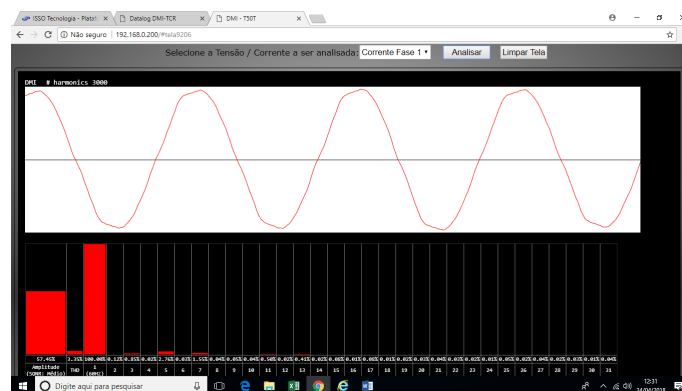
Figura 1 - Valores das grandezas elétricas.



Fonte: própria, 2018

A Figura 2 visa mostrar como é a forma de onda feita pelo analisador de energia DMI-T50T. A telemetria do gráfico abaixo mostra como deve ser a forma de onda de um motor ou de uma rede elétrica sem a presença de distúrbios harmônicos. Este formato de onda senoidal é o tipo ideal para uma rede elétrica e para um motor de indução.

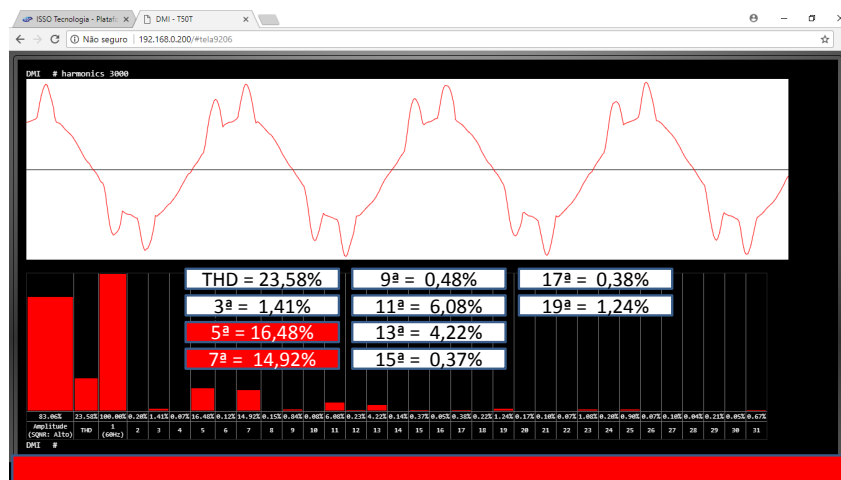
Figura 2 - Gráfico da corrente da fase sem harmônicos.



Fonte: própria, 2018.

A Figura 3 visa mostrar que o analisador de energia faz uma telemetria totalmente diferente da figura acima. A nova aparência de onda é formada quando o inversor de frequência da máquina aciona o motor principal. A presença de distúrbios na forma de onda faz com que o formato de onda não seja mais senoidal, podendo prejudicar a planta industrial.

Figura 3 - Gráfico da corrente de fase 1 com harmônicos.



Fonte: própria, 2018

O analisador DMI-T50T registrou o valor dos harmônicos de 5ª e 7ª acima do permitido pela norma IEC 61000-3-12 de 2011, e são esses harmônicos que devem ser atenuados, pois possuem a maior intensidade de corrente elétrica. A Tabela 2 demonstra a intensidade dos harmônicos de corrente e a porcentagem de cada harmônico do gráfico acima. O estudo visa a atenuar as intensidades dos harmônicos registrados em vermelho (5º e 7º harmônicos), pois a corrente desses harmônicos são maiores que as demais correntes e estão acima do que determina a norma IEC-61000-3-12 de 2011.

Tabela 2 – Valores dos harmônicos do gráfico acima

Harmônicas	Valor Porcentagem	Valor da Corrente
1º	100%	32,42A
3º	1,41%	0,303A
5º	16,48%	5,354A
7º	14,92%	4,847A
9º	0,84%	0,272A
11º	6,08%	1,975A
13º	4,22%	1,371A
15º	0,37%	0,120A
17º	0,38%	0,123A
19º	1,24%	0,402A

Fonte: própria, 2018.

A pesquisa visa demonstrar a tentativa de atenuação desses harmônicos conforme os índices de porcentagem da norma IEC 61000 3-12 de 2011, esta norma faz referência a equipamentos que possuem uma corrente passante entre 16A e 75A. A Distorção Harmônica Total (DHT) é a

medida do grau de distorção de uma onda em relação a uma senoide pura, sendo seu valor nulo quando o sinal não apresenta componentes harmônicos.

O cálculo da distorção total para tensão em % é obtido através da equação (2).

$$DHT_v = \frac{\sqrt{\sum_{i \neq 1}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (2)$$

DHT_v = Distorção Harmônica Total da Tensão

V_h = amplitude dos componentes harmônicos individuais (Valores eficazes)[V]

h = ordem harmônica

V_1 = Valor eficaz da tensão fundamental[V]

Uma vez que esses dados são analisados é possível obter outros valores, como, o valor eficaz verdadeiro da corrente da fase 1, a corrente residual e a distorção harmônica total da corrente de fase 1. Os cálculos abaixo foram reescritos segundo a norma IEEE. Std. 1459, 2010 e visa a demonstrar como os dados da figura 2 foram obtidos pelo analisador de energia.

Utilizando os dados da Tabela 3 é possível calcular a distorção harmônica total da corrente através da equação(3):

$$DHT_i = \frac{1}{I_{rms,1}} \times \sqrt{+I_{rms,5}^2 + I_{rms,7}^2 + \sum_{3,9,13,15,17,19} I_{rms}^2} \quad (3)$$

Onde,

DHT_i = Distorção Harmônica Total da Corrente

$I_{rms,1}$ = Valor da corrente eficaz ou fundamental

$I_{rms,5}$ = Valor da corrente eficaz do harmônico de 5^a

$I_{rms,7}$ = Valor da corrente eficaz do harmônico de 7^a

$\sum_h I_{rms}^2$ = Somatório das correntes eficazes dos harmônicos

Com os dados da Tabela 2, o valor do DHT_i é dado em porcentagem

$$DHT_i = 26,29\%$$

Uma vez calculado o valor da distorção total harmônica de corrente. Pode-se calcular o valor da corrente verdadeira em função da distorção total harmônica. Este valor é necessário para que se possa ter uma ideia da corrente total do circuito. O analisador de energia não efetua este tipo de cálculo. Abaixo é apresentada a equação segundo a norma IEEE Std. 1459, 2010.

Valor da corrente total em função do DHT_i é definida de acordo com a equação (4):

$$I_{rms} = \sqrt{I_{rms,1}^2 \times (1 + DHT_1^2)} \quad (4)$$

$$I_{rms} = \sqrt{32,49_{rms,1}^2 \times (1 + 0,2629^2)}$$

Sendo $I_{rms,1}$ a corrente eficaz obtida pelo analisador e DHT_i o valor da distorção total da harmônica de corrente.

$$I_{rms} = 33,59A$$

Uma vez que o valor verdadeiro da corrente do circuito é obtido, pode-se calcular o valor da corrente residual. Com este valor também pode-se calcular o valor da Distorção Total da Harmônica de Corrente(DHTi). abaixo é apresentada a equação segundo a norma IEEE Std. 1459, 2010.

O valor da corrente residual é definida de acordo com a equação (5):

$$I_H = \sqrt{I_{rms}^2 - I_{rms,1}^2} \quad (5)$$

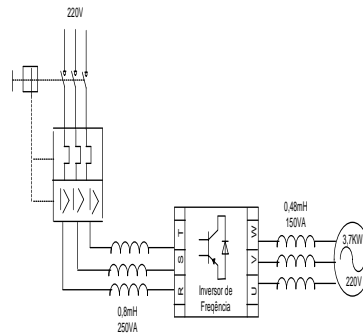
$$I_{rms} = \sqrt{33,59_{rms}^2 - 32,49_{rms,1}^2}$$

$$I_{rms,H} = 8,406A$$

Segundo a Rockwell Automation em seu artigo line Reactors and AC Drives, um reator ligado na entrada do inversor conforme o diagrama elétrica da Figura 4, reduz os picos da corrente de linha. Isso torna a forma de onda da corrente mais senoidal, diminuindo o nível harmônicos em 35% quando um reator de tamanho adequado é instalado. Este resultado é bom para os capacitores de filtro DC. Já um reator instalado na saída do inversor de frequência deve-se atentar para certas condições, pois segundo a Rockwell Automotion, um reator é às vezes instalado para evitar um pico de tensão de onda refletida quando for necessários longos cabos até a ligação do motor. Isso nem sempre é uma boa prática, pois mesmo que o reator diminua o tempo de subida da tensão, proporcionando algum benefício, não é provável que isso limite a tensão de pico do motor.

O estudo consiste em ligar os dois indutores a fim de verificar com o analisador de energia se houve uma diminuição nos harmônicos mais prejudiciais a qualidade da energia elétrica. A figura 4 representada abaixo visa mostrar como será feita a ligação entre os filtros tipo choke e o inversor de frequência.

Figura 4 - Diagrama elétrico.



Fonte: própria, 2018.

Segundo Leão, Sampaio e Antunes (2014) há várias formas para a mitigação dos harmônicos, mas nem todas são adequadas para um determinado problema. Cada segmento da indústria ou rede elétrica necessita de uma maneira para que o resultado final seja satisfatório. Uma vez analisada a intensidade da corrente dos harmônicos através do analisador de energia DMI-T50T. O objetivo é calcular a impedância do indutor tipo choke tanto da entrada quanto da saída do inversor. Para isso será verificada a corrente transitória da entrada do inversor de frequência e a corrente do motor. A Tabela 3 mostra os dados do inversor de frequência, este modelo não é mais fabricado e as informações foram retiradas da página 38 do manual do fabricante.

Tabela 3 – Dados do inversor de frequência da Telemecanique

Modelo Inversor	Corrente de linha-200V	Corrente de linha-240V	Corrente de saída (In)	Corrente Transitória	Potência do inversor
ATV18U72M2	20,4A%	18,8A	16,4A	24,6A	4KW

O cálculo da indutância dos reatores serão obtidos por meios dos dados acima e terão como referência a intensidade da corrente transitória de saída do inversor de frequência. Segundo a (Rockwell Automotion) a experiência mostra que um choke de 3% (três por cento) é normalmente suficiente para reduzir os harmônicos no motor, e o de 5% para reduzir os harmônicos no inversor de frequência. A impedância entre o inversor e o motor, é determinado pela divisão entre o quadrado da tensão de linha da máquina e a potência aparente do inversor de frequência. A parte referente a potência aparente S , é determinada pelo produto da tensão de linha pela corrente transitória do inversor de frequência, que no caso é 21A e pela raiz quadrada de três por se tratar de um sistema trifásico. O valor obtido da tensão de linha foi de 220 volts e o valor da

corrente elétrica foi determinado pelo manual do inversor de frequência.

A impedância de referência para calcular a reatância do reator do motor é definida de acordo com a equação (6):

$$Z = \frac{V^2}{S} \quad (6)$$

Onde V e S são respectivamente a tensão de linha da máquina e a potência aparente do inversor de frequência.

$$Z = \frac{220^2}{\sqrt{3} \times 220 \times 21}$$

O valor da impedância obtido foi de 6,048 ohms.

$$Z = 6,048 \Omega$$

Uma vez que esta informação é obtida, pode-se calcular a reatância do indutor que será ligado ao motor. O valor da impedância percentual é determinado pelo produto da impedância obtido anteriormente pela porcentagem de três por cento, que foi determinado pela Rockweel Automotion segundo experiências capaz de reduzir os harmônicos de corrente entre o inversor e o motor. A reatância do indutor é determinada pela divisão entre o valor da impedância percentual e frequência angular.

Reatância do indutor que será ligado ao motor é definida de acordo com a equação (7):

$$L = \frac{0,03 \times Z}{2\pi f} \quad (7)$$

Onde:

Z = impedância do reator

2π = uma constante dada em radianos

f = frequência da rede elétrica em 60Hz

$$L = \frac{0,03 \times 6,048}{2\pi \times 60}$$

O valor obtido da reatância do indutor que será ligado entre o inversor de frequência e o motor foi de 0,480 mH.

O resultado obtido da impedância do inversor, que foi de 6,048 ohms, será usado novamente para calcular a reatância do indutor que será ligado na entrada do inversor. A porcentagem usada para o cálculo do indutor será de 5% (cinco por cento). O valor da impedância percentual da entrada do inversor é determinado pelo produto da impedância, que foi de 6,048 ohms pela porcentagem de cinco por cento, que foi determinado pela Rockweel Automotion segundo

experiências capaz de reduzir os harmônicos de corrente na entrada do inversor de frequência. A reatância do indutor que será usada na entrada do inversor é determinada pela divisão entre o valor da impedância percentual e frequência angular, onde 2π é uma constante, e f é a frequência da rede elétrica, que no caso é de 60Hz.

Reatância do indutor que será ligado ao inversor de frequência é definida de acordo com a equação (8):

$$L = \frac{0,05 \times Z}{2\pi f} \quad (8)$$

Onde:

Z = impedância do reator

2π = uma constante dada em radianos

f = frequência da rede elétrica em 60Hz

$$L = \frac{0,05 \times 6,048}{2\pi \times 60}$$

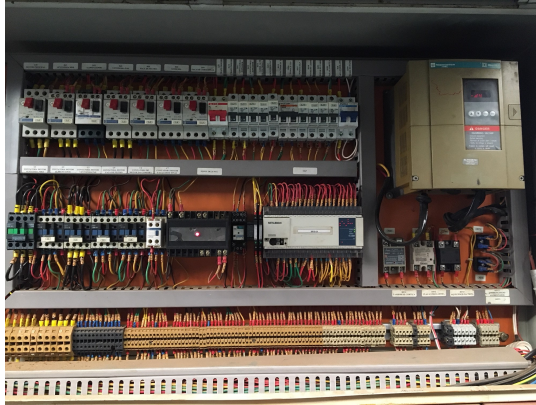
O valor obtido da reatância do indutor que será ligado na entrada do inversor de frequência foi de 0,80 mH.

Uma vez que os cálculos dos indutores foram obtidos é importante salientar que segundo a Rockwell Automotion, um reator não é projetado para resolver todos os distúrbios de harmônicos, mas pode evitar certos problemas quando aplicado de forma eficaz. Na maioria das vezes, um reator na entrada ou saída não é algo requerido. Os reatores podem ser úteis para fornecer algum buffer de linha ou adicionar impedância, especialmente para inversores sem bloqueio de barramento CC. Para unidades pequenas, elas podem ser necessárias para impedir os picos de corrente ou reduzir os harmônicos de corrente quando várias unidades pequenas estão localizadas em uma única instalação. Na saída, eles devem ser usados apenas para corrigir a baixa indutância do motor e não servir como dispositivo de proteção do motor.

4 ENSAIO DE CAMPO

O estudo foi realizado em uma indústria situada no município de Araraquara - SP, e visa contemplar se é possível a melhoria da qualidade de energia em uma máquina de fabricação de cigarros. A máquina possui alguns motores que são acionados por partida direta, sendo que o motor principal de 3,7KW/220V é acionado via inversor de frequência.

Figura 5 -Painel da máquina em estudo.



Fonte: própria, 2018.

Conforme a figura 5, devido a falta de espaço físico foi instalado um painel a parte para os reatores tanto da entrada quanto da saída do inversor de frequência.

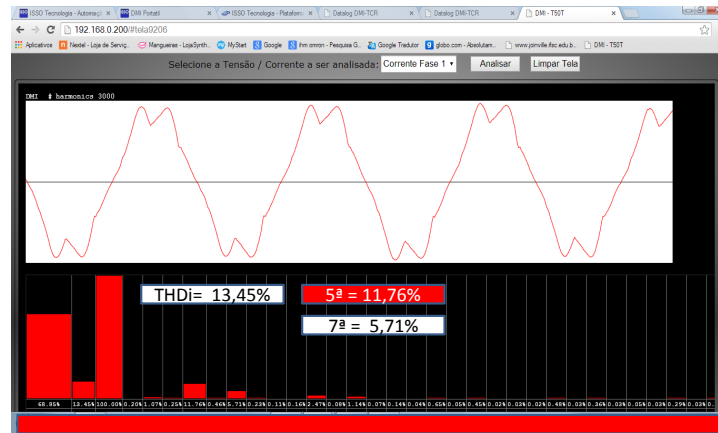
A Tabela 4 visa demonstrar que os reatores tipo choke reduziram a distorção dos harmônicos de corrente de 7^a, porém não foi suficiente para atenuar de forma satisfatória as corrente dos harmônicos de 5^a, pois como a carga da máquina é desbalanceada, a correção da distorção do harmônica de 5^a variava também, tanto para mais quanto para menos de 10%. A pesquisa visou demonstrar que é possível atenuar os harmônicos de forma que a porcentagem ficasse abaixo do permitido pela norma da IEC 61000-3-12 de 2011, que é de 10%.

Tabela 4 – Comparativo dos dados obtidos pelo analisador de energia

Referência	DHTi	Corrente dos harmônicos 5 ^a	Corrente dos harmônicos 7 ^a
Sem Reator	23,58%	16,48%	14,92%
Com Reator	13,45%	11,76%	5,71%

A figura 6 visa a demonstrar que o formato da onda de corrente da máquina melhorou, porém ainda esta longe de ser uma onda em forma mais senoidal.

Figura 6 - Gráfico da corrente de fase 1 com indutores ligados ao circuito.



Fonte: própria, 2018

5 CONCLUSÃO

O estudo revelou que o reator tipo choke atende a certos requisitos, como a diminuição dos componentes harmônicos de 7ª, e a corrente de pico do motor, porém, como a carga é desbalanceada, a mitigação com indutores tipo choke não é tão eficaz ao ponto de reduzir as componentes dos harmônicos de 5ª abaixo do que exige a norma da IEC 61000-3-12 de 2011. A correção da forma da onda da corrente dos componentes harmônicos de 5ª deixou um pouco a desejar. Diante disto, conclui-se que as análises dos componentes dos harmônicos de corrente de 5ª ordem, apresentou valores um pouco acima, justificando assim, a necessidade de implementação de filtros para que a mitigação seja mais eficiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, ANEEL, **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional-PRODIST**. Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica, Brasília, 2012. Disponível em :<www.aneel.gov.br>.

ALEXANDER, C. K.; SADIKU. M. N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. tradução: José Lucimar do Nascimento; revisão técnica: Antônio Pertence Junior. 5. Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

APOLÔNIO, R.; OLIVEIRA, J. C.; VASCONCELLOS, A. B.; OLIVEIRA, A.; SOUTO, O. C. N. **Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica**. Sergipe: Aracaju, 2003.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, IEEE 1459 *Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, Unbalanced Conditions*, 2010, p.40. Disponível em <<http://standards.ieee.org/findstds/standard/1459-2010.html>>.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, IEEE, *Recommended Practices and Requeriments for Harmonics Control in Electrical Power Systems*. IEEE Std 519-2014, New York, 1992. Disponível em <<http://standards.ieee.org/findstds/standard/519-1992>>

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, IEC 61000-3-2. *Electromagnetic compatibility(EMC)- Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions(equipament input current $\leq 16 A$ per phase).* 2009

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, IEC 61000-3-4. *Electromagnetic compatibility(EMC)- Part 3-4: Limits - Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipament with rated current greater than 16 A).* 1998.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, IEC 61000-3-12. *Electromagnetic compatibility(EMC)- Part 3-4: Limits - Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipament with rated current $\geq 16 A$ e $\leq 75 A$).* 2011.

LEÃO, R.; SAMPAIO, R.; ANTUNES, F. **Harmônicos em Sistemas Elétricos**. 1. Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

MAGALHÃES, C. M. S. **Análise do Impacto de Conversores de Frequência na Qualidade da Energia do Sistema de Distribuição de uma Indústria de Petróleo**. Trabalho de conclusão de pós-graduação em engenharia elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil, 2010. p.125

NASCIMENTO, W. J. **Projetos de Filtros Passivos para Redução de Correntes Harmônicas na Subestação 2 x 300KVA da Estação Elevatória de Água do Jequi**. Trabalho de conclusão de curso de graduação elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil, 2015. p.143

OLIVEIRA, J. C.; MACEDO JUNIOR. J. R.; DELAIBA, A. C. **Relatório Técnico 1-8 Revisão Bibliográfica** -Regulamentos e normas nacionais e internacionais e principais pesquisas

já realizadas no Brasil e no exterior, Processo: 48500.002517/2013-51, Contrato:179/2013-ANEEL,Uberlândia,UFU(Universidade Federal de Uberlândia) 2014. p.107

ORTMANN, M. S. **Filtro Ativo Trifásico com Controle Vetorial utilizando DSP:** Projetos e Implementações. Florianópolis : s.n., 2008. p.241

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, ONS. RE 2.1 057, 2008, rev.2 **Instruções Para Realização De Estudos e Medições de Qualidade da Energia Elétrica Relacionados aos Novos Acessos à Rede Básica.** 2010, p.27, Disponível em :<www.ons.com.br>.

POMILIO, J. A. **PRÉ-reguladores de Fator de Potência.** São Paulo, 1995,Revisado e atualizado em 2014, artigo- Universidade Estadual de Campinas. p.121

RIBEIRO, L. R. B. **Análise de Harmônicos em Cargas não Lineares.,** Trabalho de conclusão de curso de graduação elétrica, UNICEB(Centro Universitário de Brasília), Brasília, DF, Brasil,2017. p.152

ROCKWELL AUTOMOTION. Line Reactors and AC Drives, Disponível em: <<http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/drives-wp016-en-p.pdf>>, Acesso em: 11 set, 2018. p.6

TELEMECANIQUE. Speed controller for asynchronous motors, Disponível em: <<http://prom-electric.ru/media/atv18-ang.pdf>>, Acesso em: 17 set, 2018. p.35