

# ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA EM UMA CALDEIRA DE BIOMASSA ÁGUA-TUBULAR

<DIEGO ZORZI><sup>1</sup>

<VICENTE DE LIMA GONGORA><sup>2</sup>

<LAERCIO BERGAMIN><sup>3</sup>

<EDGARD J. C. MENEZES><sup>4</sup>

## Resumo

Este trabalho aborda a qualidade de energia em um sistema elétrico trifásico industrial, analisando os distúrbios gerados através da utilização de um inversor de frequência funcionando para controlar a velocidade de um motor de indução de 300kW. Para tanto executou-se um levantamento aprofundado durante o funcionamento em regime permanente e investigado os diversos distúrbios harmônicos causados na rede elétrica trifásica. Para a realização desta pesquisa obtivemos os dados de tensão eficaz, corrente eficaz, potência aparente, potência ativa e potência reativa e fator de potência sem interrupção de funcionamento do conjunto motor caldeira. Optou-se pela utilização de um analisador de qualidade energética da marca *Embrasul* modelo RE6000. Foi realizado a comparação com os parâmetros normalizados para a qualidade de energia do ponto de vista da rede elétrica local adequando às exigências normativas relacionadas neste trabalho.

**Palavra Chave:** Qualidade de energia. Modulação PWM senoidal.

---

<sup>1</sup> Graduação – Tecnologia em Manutenção Industrial da Faculdade de Tecnologia Senai Londrina. E-mail: [zorzi\\_diego@hotmail.com.br](mailto:zorzi_diego@hotmail.com.br)

<sup>2</sup>Doutor – Faculdade de Tecnologia Senai Londrina. E-mail: [vicente.gongora@pr.senai.br](mailto:vicente.gongora@pr.senai.br)

<sup>3</sup> Especialista – Faculdade de Tecnologia Senai Londrina. E-mail: [laercio.bergamin@pr.senai.br](mailto:laercio.bergamin@pr.senai.br)

<sup>4</sup> Doutor – Faculdade de Tecnologia Senai Londrina. E-mail: [edgard.menezes@pr.senai.br](mailto:edgard.menezes@pr.senai.br)

## 1. INTRODUÇÃO

Este trabalho aborda a qualidade de energia em um sistema trifásico industrial, apresentando os distúrbios gerados através da utilização de inversor de frequência para o acionamento e controle de um motor de indução. Estes distúrbios são gerados através do chaveamento em alta frequência de dispositivos semicondutores conforme referências do funcionamento do Inversor de Frequência na seção 2 deste estudo.

De acordo com a norma NBR 16035 (2012), os equipamentos devem operar de forma segura, confiável e eficiente. Para que possa ser analisado a real situação dos equipamentos estudados, foi realizada uma análise da qualidade da energia elétrica no funcionamento de um dos principais equipamentos de uma caldeira, o exaustor de tiragem de ar forçado.

A análise seguiu de forma rigorosa as normas vigentes e que regulamentam o funcionamento de equipamentos em redes elétricas, sendo elas NBR 5410 (2004), IEEE 519 (2014), NBR 7094 (2003), NBR 16035 (2012) e NBR 15014 (2003).

Este trabalho está organizado em seções da seguinte forma: 1 Introdução, 2 Referencial Teórico, este subdividido nos seguintes itens, Caldeira, Motor de Indução, Inversor de Frequência, Analisador da Qualidade de Energia Elétrica, Qualidade da Energia Elétrica, Distúrbio da Harmônica, Fator de Potência, 3 Metodologias de Pesquisa, 4 Análises de Caso e Discussões dos Resultados, subdividido nos seguintes itens, Distorções Harmônicas da Corrente, Distorções Harmônicas da Tensão, Potências Aparente, Ativa e Reativa, Fator de Potência, Frequência de Operação do Motor durante período de análise, 5 Conclusões.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Caldeira

Segundo Perdoná (2012), as Caldeiras são equipamentos utilizados para a finalidade de produzir vapor que vem através do aquecimento da água que é bombeada de forma pressurizada por serpentinas que estão em contato com a fornalha da caldeira, assim aquecendo a água transformando-a em vapor.

A água sobre pressão tem seu ponto de ebulição alterado, de 100°C a pressão atmosférica para 225°C a 26 Kf/cm<sup>2</sup>, melhorando o aproveitamento do fluido. (NBR 16035, 2012)

Para produzir este calor necessário para o aquecimento da água, as caldeiras utilizam vários produtos como combustíveis: fósseis ou renováveis. Segundo informativo da própria fabricante da caldeira Burntech (2016), os combustíveis fósseis tais como carvão mineral, gasolina, diesel, óleo BPF e derivados, possuem um alto nível de poluentes derivados de sua queima e cada vez mais se encontram em escassez na natureza.

Segundo Burntech (2016), para substituir estas formas de combustíveis fósseis, adotou-se a queima de resíduos minerais renováveis processados na indústria, tais como milho, soja, café, bagaço da cana de açúcar, restos de madeiras utilizados pelas indústrias moveleiras que eram descartados por não serem possíveis transformá-los em subprodutos.

Segundo Perdoná (2013), as caldeiras possuem três derivações de classes de queima de combustível: caldeiras de queima mineral, combustíveis fósseis; caldeiras de queima mista, onde há a queima de combustíveis fósseis

e resíduos orgânicos sendo renováveis e caldeiras de biomassa, que adotam apenas a queima de resíduos renováveis.

A queima destes resíduos na fornalha da caldeira além de fornecer energia para ser utilizado na troca térmica para a produção de vapor, gera uma pressão interna na fornalha através de gases gerados durante a queima do combustível, estes gases devem ser retirados evitando o colapso estrutural da caldeira (NBR 16035, 2012).

Existem dois tipos construtivos: caldeiras água-tubular e caldeiras fogo-tubular. A caldeira relacionada a este estudo é do modelo água-tubular, com PMTA (pressão máxima de trabalho admissível) de 30 Kf/cm<sup>2</sup> de capacidade máxima de produção de vapor hora de 40Ton/h, conforme dados do fabricante da caldeira (BURNTECH, 2016).

Nestas condições a válvula de segurança deve ser ajustada com pressão de abertura igual ou inferior a pressão máxima de trabalho admissível (NR 13, 2008), sendo os valores da PMTA considerados os requisitos do código de projeto relativos a aberturas escalonadas e tolerâncias de calibração.

Figura1 - Caldeira água-tubular marca Burntech modelo Biocal 40 ton/h



Fonte: Burntech caldeiras - 2016

### 2.1.1. Exaustor de tiragem

O equipamento responsável pela retirada do excesso de pressão e gases derivados das queimas dos combustíveis utilizados no interior da fornalha da caldeira é o exaustor de tiragem de ar forçado, que através do controle de automação pré-determina-se a pressão necessária para operação, normalmente sendo ela negativa ou vácuo, conforme dados de projeto.

Este controle pode ser executado através da abertura e fechamento de portinholas denominadas *dumper* de saída de gases para o exaustor que opera de forma constante sem variação de velocidade, ou como neste estudo, a variação de velocidade do exaustor através da utilização de inversor de frequência no controle do motor, sem a abertura de *dumper*, neste caso o mesmo abre ao iniciar o *start-up* da caldeira permanecendo aberto durante todo o tempo em que a caldeira esteja em operação (BURNTECH, 2016).

## 2.2. Motor de Indução

Segundo manual WEG (2014), os motores de indução trifásicos são do tipo construtivo mais utilizados pela indústria, estes possuem uma grande versatilidade de modos de operação e aplicações. Possuem diferentes características construtivas sendo elas dedicadas as mais inúmeras aplicações, devendo todas elas estarem em conformidade com a norma (NBR 17094, 2003).

Segundo Santos (2006), uma de suas características são os números de polos sendo sempre em quantidade pares, estes estão diretamente ligados e são responsáveis pela variação de velocidade e torque do motor, sendo quanto menor o número de polos, maior a velocidade e menor torque em baixas rotações ou quanto maior o número de polos menor sua velocidade, e maior seu torque em baixas rotações.

O motor utilizado nesta caldeira e equipamento a ser estudado e analisado é um motor da marca Weg modelo W22 *Premium* de 300KW. Através do controle de automação implementado na planta da caldeira o exaustor deverá executar a tarefa de manter a caldeira com pressão interna negativa, conforme valor de *set point* (SP) de operação, o motor será utilizado com o controle de velocidade sendo executado com o auxílio de um inversor de frequência, sendo estas variações permitida pelo projeto e programação determinadas de 0hz a 75hz conforme a necessidade operacional da planta da caldeira seguindo os parâmetros e normas regulamentadoras (NR 13, 2008) e dados do fabricante da caldeira (BURNTECH, 2016).

### 2.2.1. Características de identificação do motor analisado no estudo

A Tabela 1 apresenta as características e dados técnicos da placa de identificação do motor WEG W22, dados estudados para realização do trabalho.

Tabela 1- Características e dados técnicos da placa de identificação do motor WEG W22 estudado

POTÊNCIA	300KW(400CV)
TENSÃO OPERAÇÃO	380/660V
CORRENTE NOMINAL	602/346 <sup>a</sup>
FATOR DE SERVIÇO	1.0
FREQUÊNCIA NOMINAL	60Hz
ROTAÇÃO	895rpm
REGIME DE SERVIÇO	S1
RENDIMENTO	95,90%
FATOR DE POTÊNCIA	0,79

Fonte: WEG - 2016

### 2.2.2. Placa de identificação do motor segundo WEG (2014)

O descritivo das características contida na placa de identificação do motor, segundo WEG (2014) são:

- O regime de operação deste motor conforme dados e tabela “S1” refere-se a modo de operação contínuo, funcionamento à carga constante de duração suficiente para que se alcance o equilíbrio térmico.

- Rendimento do motor em operação refere-se a quantos por cento da energia drenada da rede é transformada em trabalho para operação, neste caso 95,9% da energia total.
- Rotação do motor é dada conforme características construtivas, determinada pelos números de polos do enrolamento do motor, neste caso 8 polos e rotação de 895rpm.
- Fator de potência, é o valor angular dado a defasagem das fases do motor em relação a rede ideal, fator de potência igual a 1, neste caso é de 0,79 indutivo.
- Fator de serviço (FS) é a relação de tolerância do motor com relação a corrente nominal do motor, esta relação é dada para indicar se o enrolamento do motor tem condições de absorver correntes maiores que a nominal do motor quando exigido por uma pequena duração, neste caso “FS=1”, o motor não suporta correntes acima da especificada em placa.

### 2.2.3. Princípio de funcionamento do motor de indução

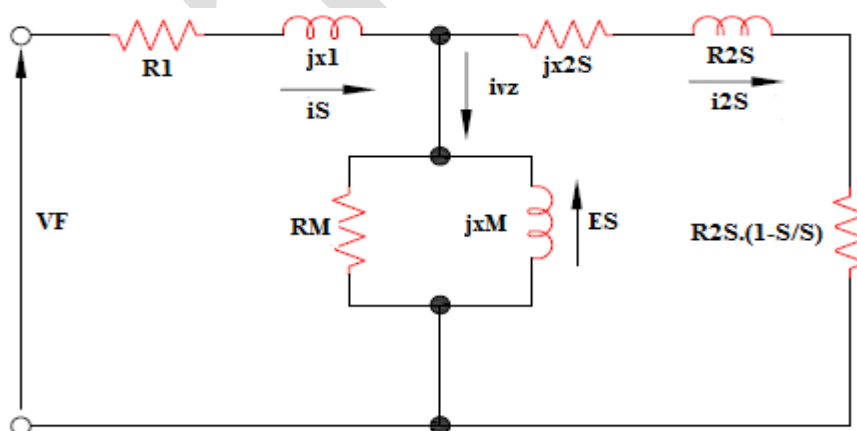
O princípio de funcionamento de um motor de indução baseia-se na ligação entre o estator e à rede elétrica trifásicas através do seu circuito, já o rotor não possui ligação alguma eletricamente com nenhuma fonte de alimentação. Quando o enrolamento do estator é energizado através de seu circuito, gera-se um campo magnético girante em suas bobinas, estas por sua vez à medida que o campo varre os condutores do rotor, cria-se uma indução elétrica denominada de FEM (força eletro motriz) nos condutores ocasionando o surgimento de uma corrente elétrica nestes condutores.

Quando estes condutores do rotor percorridos pela corrente elétrica resultante interagem com o campo magnético girante do estator surge uma grandeza eletromagnética denominada torque, esta que atua sobre os condutores do rotor fazendo-o girar, sendo este denominado velocidade do campo girante.

#### 2.2.4. Modelagem matemática do motor de indução

Através do circuito elétrico equivalente do motor de indução, visto de forma individual apenas para uma fase do motor elétrico, semelhante para as demais fases do motor, mostrado na Fig.2, gerando a modelagem matemática segundo Dutra (2013).

Figura 2 - Circuito elétrico equivalente ao motor de indução, 1 fase



Fonte: Arango - 2007

Segundo Arango (2007), e conforme abreviaturas descritas na Fig. 2, “VF” sendo a tensão de alimentação da rede elétrica dada em “V”, “iS” sendo a corrente que circula pelo estator dada em “A”, “ivz” sendo a corrente a

vazio dada em “ $A$ ”, “ $i_{2S}$ ” sendo a corrente que circula pelo rotor referenciada ao estator dada em “ $A$ ”, “ $ES$ ” a tensão induzida no enrolamento do rotor para rotor bloqueado, referenciada ao estator dada em “ $V$ ”, “ $R1$ ” sendo a resistência do enrolamento do estator, visto uma fase dada em “ $\Omega$ ”, “ $R2S$ ” sendo a resistência do enrolamento do rotor variável com o valor de escorregamento referenciada ao estator dada em “ $\Omega$ ”, “ $jx1$ ” sendo a reatância para representação do fluxo magnético de dispersão do enrolamento do estator dada em “ $\Omega$ ”, “ $jx2S$ ” sendo a reatância para a representação do fluxo magnético de dispersão do enrolamento a rotor bloqueado, com indutância variando com o valor do escorregamento referenciado ao estator dado em “ $\Omega$ ”, “ $RM$ ” sendo a resistência para representação das perdas no ferro dada em “ $\Omega$ ”, “ $XM$ ” sendo a reatância para representação do fluxo magnético principal dada em “ $\Omega$ ” e “ $S$ ” valor de escorregamento.

Segundo Camacho (2003), a modelagem matemática que se segue representa o motor de indução de forma dinâmica, demonstrado em coordenadas de fase ( $A, B$  e  $C$ ), demonstrado na equação 1 de tensão dada em “ $V$ ” do estator e rotor.

$$V_i = R_i \cdot I_i + \frac{d\lambda_i}{dt} \quad (1)$$

Na equação 1 onde “ $i$ ” representa-se as fases ( $a, b, c$ ) do estator e ( $A, B, C$ ) do rotor, o termo “ $\lambda$ ” representa o fluxo total concatenado sendo esse uma soma do fluxo de dispersão mais fluxo mútuo, os algarismos “ $R$ ” e “ $I$ ” são as matrizes de resistência e corrente do estator e rotor.

A resultante da energia considerando os fluxos concatenados e as correntes do estator e rotor é dada pela equação 2.

$$W = \int_0^{Ia} \lambda a . dIa + \int_0^{Ib} \lambda b . dIb + \int_0^{Ic} \lambda c . dIc + \int_0^{IA} \lambda A . dIA + \int_0^{IC} \lambda C . dIC \quad (2)$$

O conjugado eletromagnético do motor de indução relacionado em “*Te*” que é dado em “*Nm*” pode ser obtido através da variação da energia magnética em relação ao fator de “*θmec*” dado em “*rad/seg*” que é o deslocamento angular mecânico do rotor com relação a uma referência fixa, dada pela equação 3.

$$Te = \frac{\partial W}{\partial \theta_{mec}} \quad (3)$$

A equação de oscilação que relaciona “*Te*” dado em “*Nm*” com o conjugado de carga “*Tc*” dado em “*Nm*”, o algarismo do momento de inércia “*J*” dado em “*Kg.m2*” e a posição angular dado pelo algarismo “*θmec*” dado em “*rad/seg*” é o coeficiente de atrito viscoso “*B*” dado pela equação 4 e equação 5.

$$Te = Tc + J \frac{d\omega_{mec}}{dt} + B\omega_{mec} \quad (4)$$

$$\omega_{mec} = \frac{d\theta_{mec}}{dt} \quad (5)$$

## 2.3. Inversor de Frequência

Segundo Braga (2014), os inversores de frequência foram desenvolvidos não apenas para serem utilizados como método de partida para motores de indução, mas também para controlar a velocidade e o torque aplicado ao motor.

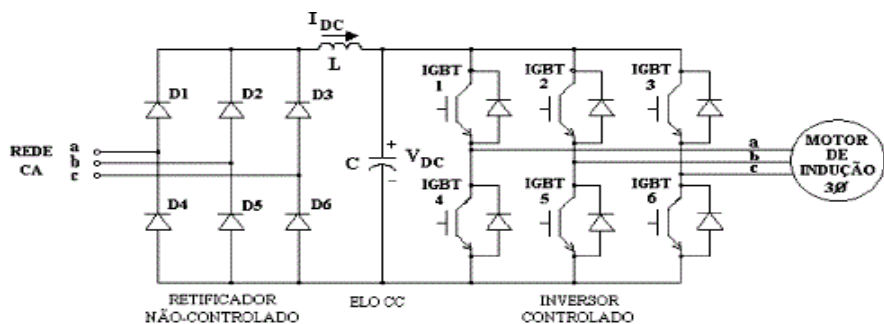
Os inversores de frequência são aplicados em sistemas de controle onde a velocidade do motor ou equipamento em que o motor está acoplado necessita de um controle na sua velocidade e ou torque. Segundo WEG (2004), para que este controle seja executado de forma eficaz o inversor de frequência conta com um software interno, que é capaz de controlar a tensão, corrente, torque, frequência aplicado ao motor, sendo possível até mesmo prever e recalcular a necessidade de ajustes internos para concluir a tarefa destinada.

Segundo WEG (2004), uma das características mais importantes do acionamento de motores com inversores de frequência, é que a corrente de partida é praticamente da ordem da corrente nominal do motor, podendo-se obter no rotor o valor de torque máximo do conjugado de partida do motor, mesmo este estando em baixas rotações.

### 2.3.1. Características de um inversor de frequência

Segundo Freire (2015), os inversores de frequência são divididos basicamente em quatro blocos, o primeiro bloco: entrada e retificação, segundo bloco: potência, terceiro bloco: controle e o quarto bloco: entradas e saídas. A figura 3 apresenta um esquema de inversor de frequência.

Figura 3 - Esquemático Inversor de Frequência



Fonte: Pinheiro - 2005

Primeiro bloco entrada e retificação: a tensão de entrada ou alimentação do inversor de frequência, passa por um conversor CA/CC (corrente alternada/corrente contínua), este bloco retifica a energia trifásica alternada para energia contínua. Sendo a configuração mais comum, uma ponte retificadora de diodos em onda completa.

Segundo bloco potência: a tensão contínua passa pelo bloco de potência e é transformada em tensão alternada de sinal *PWM* (modulação por largura de pulso) ou *PWMS* (modulação por largura de pulso senoidal). As características exclusivas dos motores atenuam a discrepância na forma de onda deixando-as parecidas com a senoidal. Esta transformação só é possível com o auxílio de transistores de alta frequência de chaveamento. Este chaveamento é que determinará a forma de onda de sinal para o motor.

Terceiro bloco controle: este atua diretamente junto aos transistores de potência, enviando pulsos que atuam como chaveamento, moldando assim o sinal de saída. Este controle é feito conforme a necessidade do instante de tempo de dados obtidos externamente ou pré-programado, podendo ser

alterada sua amplitude, frequência de chaveamento e corrente aplicada a carga.

Quarto bloco entradas e saídas: estes possuem a finalidade de receberem ou enviarem sinais de controle ou variáveis que necessitem ser alteradas com o auxílio do inversor de frequência.

### 2.3.2. Transistores de potência

Segue abaixo os modelos de transistores de potência mais utilizados pela indústria na fabricação de inversores de frequência:

- IGBT: *Insulated Gate Bipolar Transistor* (transistor bipolar da porta isolada), um dos modelos de semicondutores usualmente utilizado pelas indústrias da eletrônica de potência e frequentemente encontrados em inversores de frequência, estes alteram seu estado de condução (*on-state*) para corte (*off-state*) conforme a frequência de pulsos no (*gate*).
- IGCT: *Insulated Integrated Gate Switched Thyristor* (tiristor comutado com porta integrado isolado), faz parte da nova linha de famílias de dispositivos semicondutores a *Higt-power*.
- MOSFET: *Field Effect Transistor Metal Oxide Semiconductor* (Transistor de efeito de campo Acrônimo de Metal Oxido Semicondutor), este o mais utilizado pelas indústrias da eletrônica de potência.

### 2.3.3. Chaveamento dos inversores de frequência

Segundo Freire (2015), para que o inversor de frequência possa realizar a modulação das grandezas, tensão, frequência o mesmo opera os

transistores de potência com uma modulação de condução e não condução de forma a realizara as necessidades do equipamento, conforme configurações do equipamento.

Este chaveamento é realizado com sinais em forma de pulsos enviados ao gatilho dos transistores de potência, de acordo com a duração destes sinais, os transistores conduzem a tensão, formando o sinal de saída, contendo a frequência, amplitude e a potência que será fornecida para a carga.

#### 2.3.4. Técnicas de controle da modulação da tensão geradas através dos transistores de potência em inversores de frequência

Segundo Camacho (2003), a forma e técnica de chaveamento denominada *PWM* vem sendo utilizada desde os anos 60, mas devido aos grandes avanços da eletrônica de potência, que vem adotando uma tecnologia mais eficiente e robusta, que proporcionam o aperfeiçoamento e evolução desta técnica de forma a alcançar implementações práticas cada vez mais eficientes, confiáveis e econômicas.

##### 2.3.4.1. Técnica de modulação *PWM*

Camacho (2003), a técnica de modulação por largura de pulso denominada “*PWM*” foi considerada como forma de amostragem natural, sendo que está dividida em três partes.

- Referências senoidais,
- Referências triangulares,

- Comparadores.

Sendo essa uma técnica tradicional em que as formas de onda geradas as chamadas “*PWM*” são oriundas da comparação do sinal senoidal, sendo que para esse sinal é necessário a utilização de um sinal para controle ou referência “*V<sub>ct</sub>*” com o sinal principal denominado portadora, sendo do modelo triangular ou dente de serra “*V<sub>sw</sub>*”, para a qual será estabelecido a frequência de chaveamento “*F<sub>sw</sub>*” dos transistores de potência.

Esta frequência de chaveamento utilizada como sinal de controle irá estabelecer e determinar a frequência desejada da saída, determinando desta forma a componente de frequência fundamental do sinal de tensão que alimentará o motor.

#### 2.3.4.2. Técnica de modulação *PWMS*

Segundo Camacho (2003), a técnica de chaveamento modulação “*PWMS*” denominada modulação por largura de pulso senoidal, consiste em controlar as larguras dos pulsos, gerando sinais de pulsos com valores próximos do valor máximo para um sinal senoidal, contudo estes valores não mudam de forma significativa com a variação do índice de modulação.

Segundo Trojan (2011) para realizar a modulação do sinal “*PWMS*”, é necessário a utilização de dois sinais, sendo um de referência, denominado portadora e outro um sinal senoidal, ambos os sinais serão comparados por um circuito comparador, estes sinais iram determinar a frequência do chaveamento e modulação.

Para que o comparador conduza um sinal em sua saída é necessário aplicar o sinal da portadora na entrada inversora do comparador e o sinal senoidal a entrada não inversora do comparador, desta forma quando o valor

de tensão gerado na entrada não inversora ou sinal senoidal do comparado for maior que o valor de tensão gerado na entrada inversora ou sinal da portadora o comparado ira saturar a saída em “+VCC” (volt corrente continua), caso o sinal senoidal conectado a entrada não inversora seja menor que o sinal da entrada inversora ou portadora, o comparador ficará com nível baixo na saída.

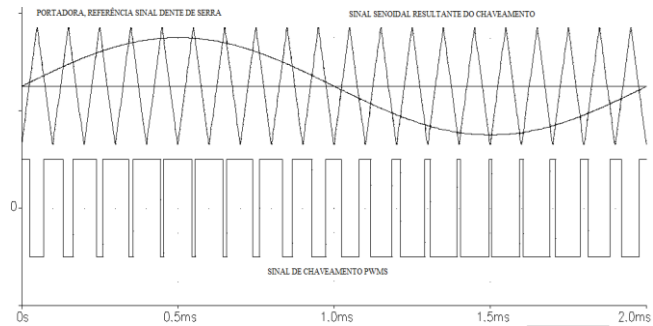
Segundo Fitzgerald (2014), outras técnicas de modulação digital podem ainda ser implementadas de forma a garantir uma melhora do sinal gerado e moldando um sinal com as características senoidais aprimoradas.

Segundo Pomílio (2003), a modulação regular simétrica e a modulação regular assimétrica que permitem uma descrição analítica do chaveamento “PWMS”, estas que permitem gerar uma forma de onda de corrente com as características senoidal aprimoradas, contendo níveis de distúrbios harmônicos com menor intensidade.

Para que seja determinado o modelo de modulação utilizado para o chaveamento dos transistores de potência este irá depender das características do acionamento.

Segundo Trojan (2011) a escolha do sinal utilizado como portadora ou referência é fundamental e está diretamente ligado aos níveis de distúrbios das harmônicas geradas pela modulação durante o chaveamento dos transistores de potência. Ondas triangulares são preferíveis para a utilização como sinal comparado às ondas dentes de serra devido a sua simetria, as ondas triangulares fornecem menos componentes harmônicos comparados as ondas dente de serra.

Figura 4 - Modulação *PWMS*, contendo a portadora e o sinal senoidal



Fonte: Pomilio - 2003

## 2.4. Analisador da Qualidade de Energia Elétrica

Segundo Embrasul (2007), um analisador de qualidade de energia elétrica, mostrado na Fig.5, pode ser composto de módulos opcionais específicos de medição, de uma forma que possa configurar um produto adequado para cada necessidade.

Figura 5 - Analisador da Qualidade de Energia Embrasul RE-6000



Fonte: EMBRASUL - 2007

Este instrumento possui entradas trifásicas de tensão e corrente, o equipamento permite a análise de tensões, correntes, potências ativas,

reativas e aparentes, fator de potência, desbalanceamentos de fases, frequência, distorção harmônicas, flutuação de tensão, valor total de demanda, consumos, demandas e interrupções.

Segundo Embrasul (2007), o instrumento utilizado para realização das medições e análise do caso estudado é o analisador de qualidade de energia elétrica da marca Embrasul modelo RE 6000. Este instrumento possui diversas configurações e características para realizar as mais diversas medições de grandezas, tais com tensão eficaz, corrente eficaz, frequência, potência eficaz, potência aparente, potência reativa, distúrbio de harmônicas entre outros.

Configurado com o módulo de harmônicas (H), que indica as medições das perturbações na rede, indicado para aplicação em sistemas elétricos onde se pretende medir os níveis e as características das distorções harmônicas presentes no circuito. As medições podem ser feitas até a 50ª ordem da harmônica, analisando harmônicas de ordens pares e ímpares de tensão e corrente.

## **2.5. Qualidade da Energia Elétrica**

A palavra abrangente e denominada na engenharia como dita para avaliar um sistema de fornecimento o de consumo de energia elétrica é a qualidade de energia, esta possui diversos significados, conceitos, aplicações e ramos de estudo, conforme o conceito da qualidade da energia que é adotada pelos especialistas e estudiosos da área para uma melhora na eficiência dos equipamentos conectados à rede elétrica, segundo Paulilo

(2015) e em conformidade com resolução normativa nº 414 da (ANEEL, 2010).

Segundo *Schneider Eletric* (2003), a qualidade de energia elétrica refere-se: “a qualquer desvio que possa ocorrer na magnitude, forma de onda ou frequência da tensão e/ou corrente elétrica, que resulte em falha ou operação indevida de equipamentos elétricos”.

Os valores e características e de conformidade com certos parâmetros considerados desejáveis para a operação segura em um sistema elétrico, considera-se os parâmetros:

- Distorções harmônicas;
- Baixo fator de potência;
- Flutuações de tensão;
- Variações de tensão de curta duração;
- Desequilíbrio do sistema trifásico;
- Transitórios rápidos.

Estes parâmetros considerados desejáveis devem estar de acordo com regulamentação da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, este é um órgão regulamentador do Governo brasileiro, que é responsável por todas as diretrizes e fiscalização direcionadas a geração, distribuição e consumo da energia elétrica.

Todos os parâmetros devem estar em conformidade com Resolução Normativa nº 414 (ANEEL, 2010) que trata da qualidade da energia elétrica.

## 2.6. Harmônicas

Os distúrbios denominados correntes harmônicas são gerados pelas cargas não-lineares conectadas a rede, a circulação das correntes harmônicas que são geradas por estas cargas gera tensões harmônicas através das impedâncias da rede, ocasionando a deformação da tensão elétrica, este estudo se tornou uma importante ferramenta nos projetos elétricos, conforme (IEEE 519, 2014).

Anteriormente a década de 80 quando ocorreu a difusão da utilização da eletrônica moderna, com um grande aumento na utilização de dispositivos eletrônicos para acionamento e controle de cargas elétricas, como *soft start*, inversores de frequência, reatores eletrônicos de iluminação as cargas que predominavam cargas denominadas lineares com valores de impedância fixo como exemplos de iluminação incandescente, cargas de aquecimento, motores sem controle de velocidade.

Com este surgimento de carga denominadas não-lineares considerados e sendo responsáveis pelos distúrbios na rede elétrica. Os dispositivos geradores de harmônicas são apresentados em todos os setores industriais, comerciais e domésticos. As harmônicas são resultadas de cargas não-lineares.

Segundo Garcia (1999), carga não-linear: definição uma carga é dita não-linear quando a corrente que ela absorve não tem a mesma forma da tensão que a alimenta, cargas não-lineares, as cargas utilizando a eletrônica de potência são não-lineares.

Segundo Teixeira (2009), sendo o funcionamento dos inversores de frequência fica constatado que o capacitor se carrega inicialmente, drenando

corrente e atingindo a tensão nominal. Após meio ciclo, os capacitores do barramento “**CC (corrente continua)**” ficam com o valor de pico da rede “**CA (corrente alternada)**”. Ao acionar o motor, ele drena corrente deste barramento para suprir potência de acordo com a carga mecânica. Neste momento o potencial no capacitor se reduz, fornecendo energia ao motor, antes de atingir o valor mínimo permitido, o capacitor se recarrega no próximo meio ciclo senoidal. Este processo é repetido duas vezes em cada meio ciclo carregando e descarregando o capacitor do barramento “**CC**”, com isso teremos uma corrente distorcida a qual podemos associar uma tensão distorcida nos seus terminais.

Segue alguns modelos de conversores encontrados na indústria que em operação são considerados geradores de harmônicas segundo Fraga (2013).

- Pontes Retificadoras Trifásicas,
- Conversores Estáticos de N pulso(s) a *Tiristores*,
- Inversores de Potência, IGBT, *Mosfet*,
- Reguladores de Tensão com *Links DC* (Tipo *SIPCON DVR/ DSTATCOM*),
- Fontes Chaveadas.

2.6.1. Limites adotados conforme (IEEE 519, 2014), e as equações matemáticas para as variáveis vistas segundo *Schneider Eletric* (2003) embasada na norma (IEC 1000-2-4, 2002) e equações segundo Bezerra (2008).

- Harmônicas de tensão (VH) < ou = 3%, determinada pela equação:

$$THDU = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}{U_1}} \quad (6)$$

- Harmônicas da corrente (ih), determinadas pela equação:

Tabela 2 - Limites determinados para taxa de DHI (IEEE 519, 2014)

CORRENTE ORDEM ÍMPAR	VALOR	CORRENTE ORDEM PAR	VALOR
ih < 11°	0,07	ih < 10°	0,035
11° < ou = ih > ou = 17°	0,035	10° < ou = ih > ou = 16°	0,028
17° < ou = ih > ou = 23°	0,05	16° < ou = ih > ou = 22°	0,013

Fonte: IEEE 519 – 2014

$$THDI = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}{I_1}} \quad (7)$$

- Distorção harmônica total (DHT) < ou = 5%, determinada pela equação:

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} y_h^2}{y_1}} \quad (8)$$

### 2.6.2. Impactos dos distúrbios da harmônica

Os distúrbios da rede elétrica denominados correntes harmônicas circulam nas redes elétricas ocasionando o deterioramento da qualidade da energia, dando o início a vários problemas, descrição de falhas abaixo, segundo *Schneider Eletric* (2015).

- Sobrecarga da rede de distribuição por aumento da corrente eficaz,
- Sobrecarga dos condutores de neutro em razão da soma das harmônicas de ordem 3 geradas pelas cargas monofásicas,
- Desgaste das canecões e isolações devido a aquecimentos,
- Sobrecarga, vibrações e envelhecimento dos alternadores, transformadores, motores, ruídos dos transformadores,
- Sobrecarga e envelhecimento dos capacitores de compensação de energia reativa,
- Deformação da tensão de alimentação podem perturbar receptores sensíveis,
- Perturbação das redes de comunicação ou das linhas telefônicas,
- Baixo fator de potência da rede elétrica,
- Diminuição da vida útil de componentes,
- Diminuição do rendimento do equipamento,
- Danos a motores ocasionando sua queima.

### 2.6.3. Distorção harmônicas em motores

Segundo Bezerra (2008), o maior dano e efeito causado pelas distorções harmônicas que são ocasionados em máquinas indutivas é o aumento do aquecimento devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre, diminuindo sua eficiência, e o torque disponível para carga. (WEG, 2016) e (NBR 7094, 2003).

Segundo Evangelista (2008), o sobre aquecimento tolerado depende do tipo de rotor utilizado na construção dos motores, rotores bobinados são mais seriamente afetados do que os rotores de gaiola.

Segundo Variz (2008), os rotores de gaiola profunda, devido ao efeito pelicular, que conduz a condução da corrente para a superfície do condutor em frequências elevadas, produzem maior elevação de temperatura do que os rotores de gaiola convencional.

## 2.7. Fator de Potência

O fator de potência, é o valor angular dado a defasagem das fases de uma determinada carga em relação as fases de uma rede elétrica ideal, este valor para referência varia de “0” a “1” segundo Scopacasa (2016).

Quando calculado este valor e o mesmo for próximo de “0” é considerado reativo, nesta condição a energia elétrica é armazenada e devolvida à fonte durante cada ciclo.

Quando calculado este valor e o mesmo for próximo de “1” é considerado indutivo, nesta condição a energia elétrica fornecida pela fonte é consumida pela carga.

Como meio de identificar de que forma o fator de potência é visualização como atrasado ou adiantado para identificar o sinal do ângulo de fase entre as ondas de corrente e tensão elétricas que são geradas, valores determinados pela ANNEL, sendo no Brasil o valor mínimo permitido de “0,92”, tanto para indutivo ou capacitivo.

O fator de potência é determinado pelo tipo de carga ligada ao sistema elétrico, possuindo também suas derivações, tais como circuitos mistos, “RL”, “RC”, “LC” e “RLC”.

- Resistiva, circuitos puramente resistivos (R);
- Indutiva, circuitos puramente indutivos (L);
- Capacitiva, circuitos puramente capacitivos (C).

### 2.7.1. Módulos das potências considerando os distúrbios da harmônica

- Potência ativa é a capacidade do circuito de produzir trabalho em um determinado período de tempo, é dada pela equação:

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} U_h \cdot I_h \cdot \cos\varphi_h \quad (9)$$

- Potência aparente, que é o produto da tensão pela corrente do circuito, será igual ou maior do que a potência ativa, é dada pela equação:

$$S^2 = \left( \sum_{h=1}^{\infty} U_h^2 \right) \cdot \left( \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \right) \quad (10)$$

- Potência reativa é a medida da energia armazenada que é devolvida para a fonte durante cada ciclo de corrente alternada, é dada pela equação.

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi \quad (11)$$

- Equação da relação de Fator de Potência com Harmônicas:

$$FP = \frac{\cos\varphi}{\sqrt{1+TDH^2}} \quad (12)$$

### 3. METODOLOGIA DE PESQUISA

Para determinar a metodologia aplicada para a execução deste estudo foi necessário um levantamento teórico, através da pesquisa de artigos e trabalhos similares, normas técnicas, onde o conhecimento abordado refere-se a: motor elétrico de indução, acionamentos por inversor de frequência, qualidade de energia elétrica, distúrbios das harmônicas.

Para realização desta metodologia foram seguidos os seguintes passos:

- Passo 1. Foi instalado o analisador de qualidade de energia elétrica no barramento de saída do inversor de frequência para o motor de indução.
- Passo 2. Foi programado o analisador de qualidade de energia elétrica para gravar todos os eventos ocorridos no equipamento a ser estudado e analisado, por um período determinado de 29 dias corridos.
- Passo 3. Após o período determinado foi retirado o instrumento de análise, salvo os dados colhidos para análise em eletrônico e software dedicado fornecido pela empresa do instrumento e analisador de qualidade de energia elétrica Embrasul.
- Passo 4. Foram realizadas as análises das grandezas obtidas de forma embasada e sustentada pelas normas e referências descritas neste estudo.

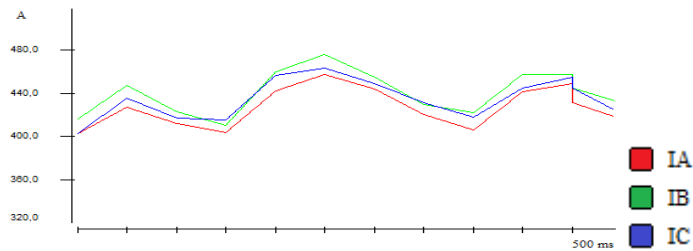
## 4. ANÁLISE DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste estudo buscou-se analisar os dados de corrente drenada pelo motor de indução, tensão fornecida ao motor pelo inversor de frequência, frequência de operação do motor durante o período de análise, taxa de distorções harmônicas da corrente, taxa de distorções harmônicas da tensão, valores instantâneos para a potência aparente, potência ativa, potência reativa, fator de potência instantâneo dos equipamentos estudados, estes valores obtidos através do analisador de qualidade de energia elétrica.

### 4.1. Distorção Harmônica da Corrente

Observa-se na figura 6 que o equipamento estudado e analisado sofreu inúmeras variações de carga durante o período determinado de análise. Durante este período de análise fica claro que este motor está operando de forma aliviada, tendo durante maior período de tempo a corrente drenada durante seu regime de trabalho entre “400A” a “480A”, sendo sua corrente nominal de trabalho “602A”, conforme dados técnicos de placa do motor visto na seção 2, Tab. 1.

Figura 6 - Gráfico da Corrente drenada pelo motor, valor médio das 3 fases



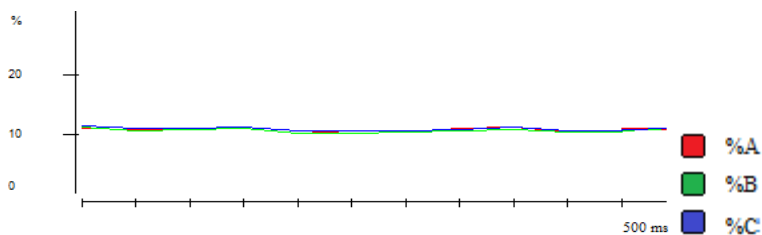
Fonte: Do Autor - 2016

O gráfico da Fig.7 demonstra os valores de distorção harmônica dada em porcentagem em cima da corrente total drenada pelo motor em cada uma das fases durante o período de análise.

Este tipo de distorção harmônica é filtrado pelo motor de indução devido a sua forma construtiva, este funciona como um indutor, realizando a filtragem destas ocorrências deixando os valores para taxa de distorção harmônica da corrente próximos de zero ou desprezíveis conforme a Tab. 3, (NASCIMENTO 2009).

Conforme descritos na Tab. 3, e visto no gráfico da Fig. 7 os valores obtidos de taxa da distorção harmônica separadas por suas respectivas ordens na corrente drenada pelo motor em cada uma das fases, valores dados em porcentagem do valor total da corrente drenada pelo, e valores dados para taxa de distorção harmônica total são visto em porcentagem e ampere.

Figura 7 - Gráfico de porcentagem de Distorções Harmônicas na Corrente, valor médio das 3 fases



Fonte: Do Autor - 2016

Ficou constatado através da análise de dados, os valores vistos na Tab. 3, que a taxa de distorção harmônica da corrente dadas em porcentagem da fase A, de 1,74 para a ordem de 3<sup>o</sup> harmônica, 4,94 para a ordem de 5<sup>o</sup> harmônica, 3,26 para a ordem de 7<sup>o</sup> harmônica, 0,40 para a ordem de 9<sup>o</sup> harmônica e 0,88 para a ordem de 11<sup>o</sup> harmônica.

A taxa de distorção harmônica da corrente dadas em porcentagem da fase B, de 0,38 para a ordem de 3<sup>o</sup> harmônica, 4,54 para a ordem de 5<sup>o</sup> harmônica, 3,12 para a ordem de 7<sup>o</sup> harmônica, 0,00 para a ordem de 9<sup>o</sup> harmônica e 0,58 para a ordem de 11<sup>o</sup> harmônica.

A taxa de distorção harmônica da corrente dadas em porcentagem da fase C, de 1,13 para a ordem de 3<sup>o</sup> harmônica, 5,10 para a ordem de 5<sup>o</sup> harmônica, 3,57 para a ordem de 7<sup>o</sup> harmônica, 0,00 para a ordem de 9<sup>o</sup> harmônica e 0,67 para a ordem de 11<sup>o</sup> harmônica.

Tabela 3: Taxa de Distorção Harmônica da Corrente

CORRENTE	ORDEM	3	5	7	9	11	HDI %	HDI
402,60 A	IA (%)	1,74	4,9	3,3	0	0,9	1,22	5,17
415,81 A	IB (%)	0,38	4,5	3,1	0	0,6	,62	5,84
411,89 A	IC (%)	1,13	5,1	3,6	0	0,7	0,47	3,12

Fonte: Do Autor – 2016

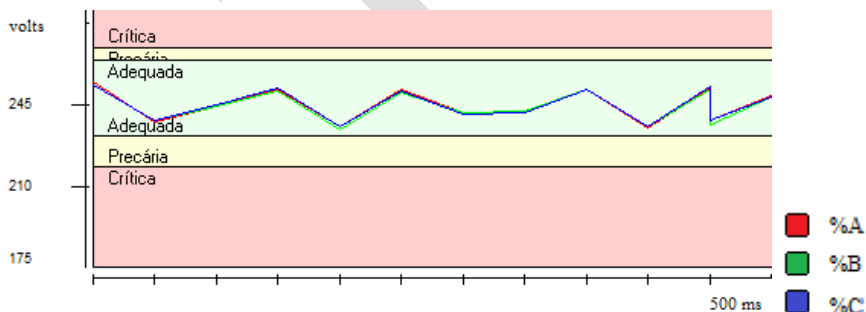
Conforme analisado os dados obtidos de forma individual podemos concluir que os valores obtidos para a taxa de distorção harmônica da corrente nas fases A, B e C, analisando as ordens harmônicas 3°, 5°, 7°, 9°, 11° de forma individual conforme Tab. 3, estes estão abaixo dos valores máximos determinados pela norma IEEE 519 (2014) vistos na seção 2, Tab. 2.

Conforme analisado os dados obtidos de forma total podemos concluir que os valores obtidos para a taxa de distorção harmônica total conforme gráfico da Fig. 7, e Tab. 3 de 11,22 % para fase A, 8,62 % para fase B e 10,47 % para a fase C, que alcançou os 11% de “*THDI*”, ficando comprovado que o circuito ultrapassa os limites determinados pela norma IEEE 519 (2014) sendo o valor máxima determinado de 7% visto na seção 2, e podendo ser comprovados pela equação 7 vistos na seção 2.

## 4.2. Distorção Harmônica da Tensão

Estes distúrbios da harmônica ocorrentes na tensão são os mais prejudiciais, tendo uma maior responsabilidade sobre os impactos anteriormente citados na seção 2. Visto no gráfico da Fig. 8, com os valores de tensões aplicados a carga pelo inversor de frequência durante o período de tempo utilizado para as análises. Observa-se no gráfico da Fig. 8, que o equipamento estudado e analisado sofreu inúmeras variações de carga durante o período determinado de análise, tendo durante maior parte a tensão eficaz aplicada ao motor durante o regime de trabalho entre os valores 230 a 250 V.

Figura 8 - Gráfico da tensão RMS das fases aplica ao motor pelo Inversor de Frequência

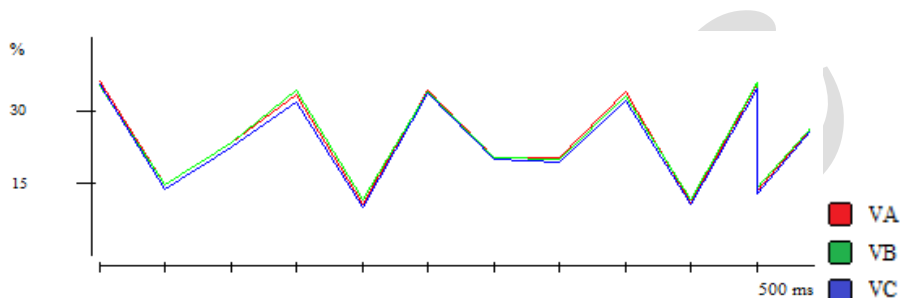


Fonte: Do Autor – 2016

O gráfico da Fig.9 demonstra os valores de distorção harmônica dada em porcentagem em cima da tensão fornecida ao motor em cada uma das fases. Conforme descritos na Tab. 4 e visto na Fig. 9, os valores obtidos de taxa da distorção harmônica separadas por suas respectivas ordens na tensão fornecida pelo inversor de frequência ao motor em cada uma das fases,

valores dados em porcentagem do valor total da tensão fornecida pelo inversor de frequência, e valores dados para taxa de distorção harmônica total são visto em porcentagem e volts.

Figura 9 - Gráfico de porcentagem de Distorções Harmônicas na Tensão, valor RMS das 3 fases



Fonte: Do Autor - 2016

Ficou constatado através da análise de dados, os valores vistos na Tab. 4, que:

- Taxa de distorção harmônica da tensão dadas em porcentagem A, de 9,27% ou 19,78V para a ordem de 3<sup>o</sup> harmônica, 3,70% ou 7,90V para a ordem de 5<sup>o</sup> harmônica, 2,08% ou 4,43V para a ordem de 7<sup>o</sup> harmônica, 3,72% ou 7,93V para a ordem de 9<sup>o</sup> harmônica e 1,45% ou 3,09V para a ordem de 11<sup>o</sup> harmônica.
- Taxa de distorção harmônica da tensão na fase B, de 10,05% ou 21,30V para a ordem de 3<sup>o</sup> harmônica, 3,14% ou 6,65V para a ordem de 5<sup>o</sup> harmônica, 1,65% ou 3,49V para a ordem de 7<sup>o</sup> harmônica, 3,88% ou 8,22V para a ordem de 9<sup>o</sup> harmônica e 1,08% ou 2,15V para a ordem de 11<sup>o</sup> harmônica.

- Taxa de distorção harmônica da tensão na fase C, de 9,94% ou 21,28V para a ordem de 3° harmônica, 3,32% ou 7,12V para a ordem de 5° harmônica, 2,14% ou 4,59V para a ordem de 7° harmônica, 3,86% ou 8,27V para a ordem de 9° harmônica e 0,91% ou 1,95V para a ordem de 11° harmônica.

Tabela 4 - Taxa de Distorção Harmônica da Tensão

FASE	TENSÃO	ORDEM	3	5	7	9	11	DHTU
UA (V)	254,97 V		19,8	7,9	4,43	7,93	3,09	43,15V
UA (%)			9,27	3,7	2,08	3,72	1,45	20,22%
UB (V)	253,41 V		21,3	6,7	3,49	8,22	2,15	41,86V
UB (%)			10,1	3,1	1,65	3,88	1,08	19,81%
UC (V)	253,56 V		21,3	7,1	4,59	8,27	1,95	43,21V
UC (%)			9,94	3,3	2,14	3,86	0,91	20,15%

Fonte: Do Autor - 2016

Conforme analisado os dados obtidos de forma individual podemos concluir que os valores obtidos para a taxa de distorção harmônica da tensão nas fases A, B e C, analisando as ordens harmônicas 7°, 11° de forma individual conforme Tab. 4, estes estão abaixo dos valores máximos determinados pela norma IEEE 519 (2014) vistos na seção 2.

Os valores obtidos para a taxa de distorção harmônica da tensão nas fases A, B e C, analisando as ordens harmônicas 3°, 5° e 9° de forma individual conforme Tab. 4, estes valores estão acima dos valores máximos determinados pela norma sendo estes estabelecidos pela IEEE 519 (2014) e vistos na seção 2.

Conforme analisado os dados obtidos de forma total podemos concluir que os valores obtidos para a taxa de distorção harmônica total, referenciando de 3° a 11° ordem conforme gráfico Fig. 9 e Tab. 4, de 20,22% para fase A, 19,81% para fase B e 20,15% para a fase C, ficando comprovado que o circuito ultrapassa os limites determinados pela norma IEEE 519 (2014) sendo o valor máximo determinado de 7% visto na seção 2, e podendo ser comprovados pela equação 6 vistos na seção 2.

Os valores obtidos para a taxa de distorção harmônica total da tensão conforme gráfico da Fig. 9, e Tab. 4, analisando os valores obtidos para a taxa de distorção harmônica referenciando os valores de 3° a 11° ordem, com relação aos valores medidos pelo analisador de qualidade de energia elétrica, que alcançou os 20% “*THDU*”, estes ficam comprovados que o circuito ultrapassa os limites determinados pela norma IEEE 519 (2014) sendo o valor máximo determinado de 3% podendo ser comprovados pela equação 6 vistos na seção 2

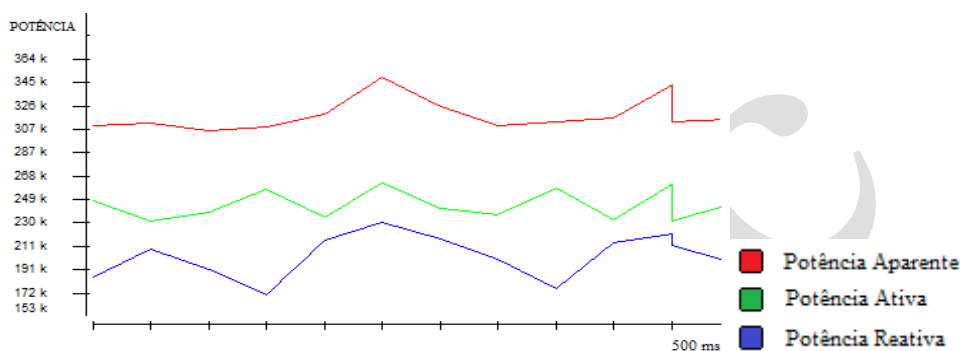
### **4.3. Potências Aparente, Ativa e Reativa**

No gráfico da Fig. 10 pode ser visto as potências aparente, potência ativa e potência reativa resultantes durante o funcionamento dos equipamentos quando submetidos a diversos esforços conforme a necessidade da planta.

Através da análise do gráfico da Fig. 10, juntamente com a Tab. 5, é possível concluir e diagnosticar o alto índice de potência reativa neste circuito, valor médio de 78 KVAR, esta potência reativa oriunda e gerada

peelo simples funcionamento do inversor de frequência segundo Braga (2014). Descrito na tabela 5 os valores detalhados das potência aparente, potência ativa, potência reativa e fator de potência do equipamento.

Figura 10 - Gráfico das potências resultantes



Fonte: Do Autor – 2016

Ficou constatado através da análise de dados, os seguintes valores para as potências ativa, aparente e reativa neste circuito.

- Potências aparentes nas fases A 98 KVA, fase B 101 KVA, fase C 100 KVA, potência ativa total somatória das fases 299 KVA.
- Potências reativas nas fases A 78 KVAR, fase B 79 KVAR, fase C 79 KVAR, potência ativa total somatória das fases 237 KVAR.
- Potências ativas nas fases A 58 KW, fase B 62 KW, fase C 61 KW, potência ativa total somatória das fases 182 KW.

Tabela 5 - Tabela das Potências e Fator de Potência geradas pelo motor

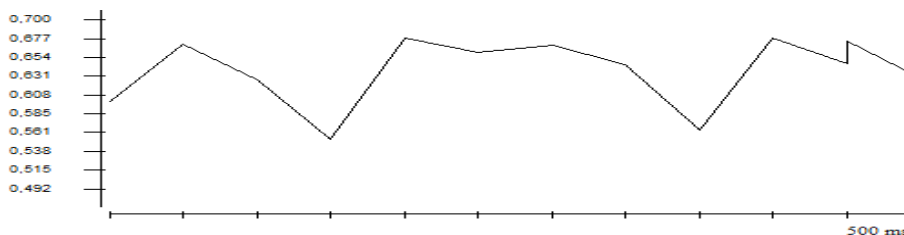
FASE	POTÊNCIAS	P. VALOR	P. TOTAL	FPT
A	AS	98 KVA	299 KVA	0,596
	PA	58 KW	182 KW	
	QA	78 KVAR	237 KVAR	
B	SB	101 KVA		0,622
	PB	62KW		
	QB	79 KVAR		
C	SC	100 KVA		0,61
	PB	61 KW		
	QB	79 KVAR		

Fonte: Do Autor – 2016

#### 4.4. Fator de Potência

A figura 11 apresenta o gráfico que contém fator de potência total FP 0,609 medido durante operação no motor, e o fator de potência em cada uma das fases, fase FPA 0,596, fase FPB 0,622, fase FPC 0,610. Diagnosticando neste circuito um fator de potência baixo na ordem de 0,60 ou ângulo 30.96 de defasagem da tensão em relação à corrente do circuito, conforme determinação da ANEEL, que determina um valor mínimo para o fator de potência de 0,92, fica comprovado o baixo fator de potência deste equipamento.

Figura 11 - Gráfico do Fator de Potência geradas pelo motor

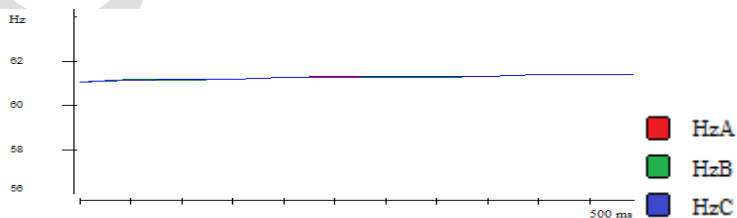


Fonte: Do Autor - 2016

#### 4.5. Frequência de operação do motor durante o período analisado

Visto no gráfico da Fig. 12 que demonstra a frequência de operação do conjunto estudado, motor de indução e inversor de frequência. Fica comprovado que o inversor de frequência está mantendo a velocidade de motor estável durante o período de análise, sendo esta com o valor em aproximado de 61Hz, sendo o valor nominal do motor 60Hz e o máximo permitido pela programação do CLP (controlador lógico programável) da caldeira de 75Hz.

Figura 12 - Gráfico da frequência de operação do motor durante período de analisado



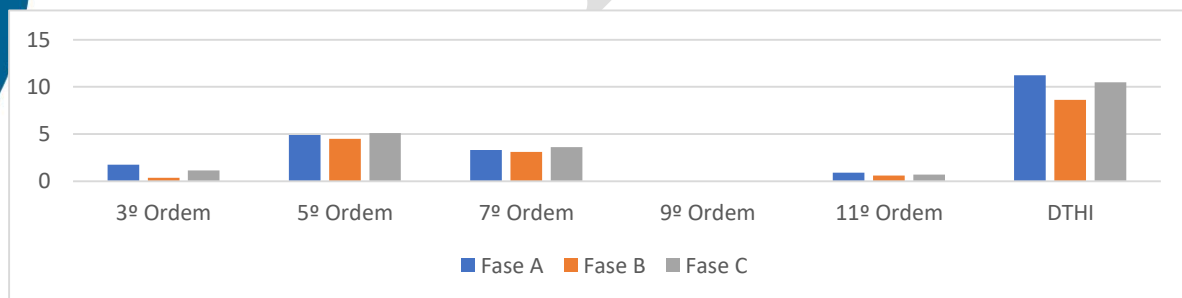
Fonte: Do Autor - 2016

## 5. CONCLUSÃO

Em conformidade com o levantamento bibliográfico utilizado para referenciar e para auxiliar a execução deste estudo, com todas as análises que foram executadas após o recolhimento de dados práticos nos equipamentos da caldeira, motor de indução e inversor de frequência, de forma a garantir a qualidade e confiabilidade dos dados levantados buscando um resultado final satisfatório.

Ficou comprovado que o equipamento o motor de indução está operando de forma prejudicial ao seu funcionamento ideal, podendo comprometer a integridade deste, da rede elétrica trifásica local e a funcionalidade correta da caldeira.

Figura 13 – Histograma – Espectro harmônico da corrente durante período de analisado

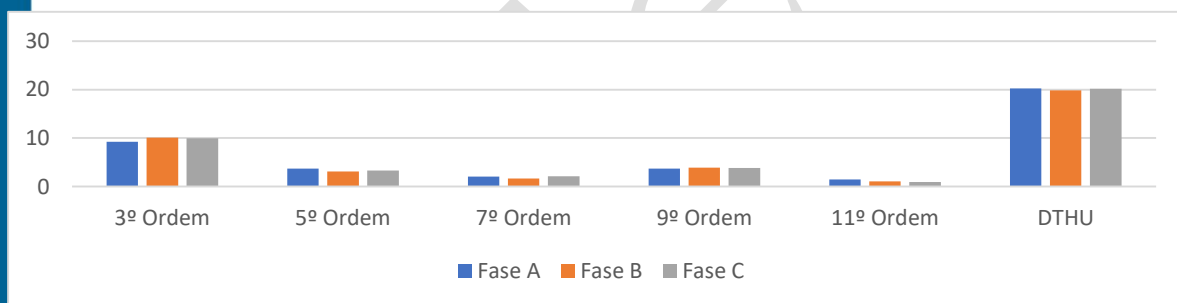


Fonte: Do Autor - 2016

Com base em todas as análises realizadas e comparadas com as normas referenciadas neste estudo, fica comprovado os altos níveis dos distúrbios da harmônica na corrente.

Vistos na Fig. 13, histograma do espectro harmônico da corrente, e apresentados os valores de “*THI*” vistos em porcentagem sendo 1,08% para 3º ordem, 4,83% para 5º ordem, 3,34% para 7º ordem, 0% para 9º, 0,73% para 11º ordem e 10,1% para “*THDI*”, sendo estes valores acima do valor máximo determinado pela IEEE 519 (2014) de 7%, tendo como prováveis consequências os impactos mencionados na seção 2, comprometendo a integridade do motor de indução e prejudicando a rede elétrica trifásica local.

Figura 14 – Histograma – Espectro harmônico da tensão durante período de analisado



Fonte: Do Autor - 2016

Vistos na Fig. 14, histograma do espectro harmônico da corrente, e apresentados os valores de “*THU*” vistos em porcentagem sendo 9,77% para 3º ordem, 3,36% para 5º ordem, 1,96 % para 7º ordem, 3,82% para 9º, 1,15% para 11º ordem e 20,06% para “*THDI*”, sendo estes valores acima do valor máximo determinado pela IEEE 519 (2014) de 3%, tendo como prováveis consequências os impactos mencionados na seção 2, comprometendo a integridade do motor de indução e prejudicando a rede elétrica trifásica local.

Comprovado o alto nível de potência reativa no circuito, como mostrado na Fig. 10 e Tab. 5, valor medido de 79KVAR, comprovada pelas

análises, e visto na Fig. 11 e Tab. 5 o baixo valor para fator de potência 0,6 valor medido, sendo este determinado pela ANEEL como valor mínimo permitido de 0,92, comprovado um sobre dimensionamento do motor de indução para a aplicação mencionada no estudo, sendo este um fator determinante para o baixo fator de potência constatado durante o período de análise deste equipamento.

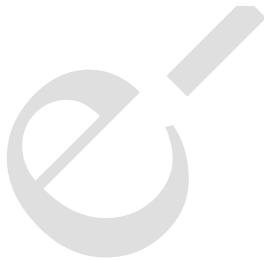
5.1. Sugestões para futuras análise como indicação para estudos posteriores.

- Correção do baixo fator de potência;
- Dimensionamento de filtro para tratar os distúrbios da harmônica;
- Técnicas de modulação e controle de inversores de frequência.

# **QUALITY ANALYSIS OF ELECTRICITY ON A BOILER BIOMASS TUBULAR WATER**

## **Abstract**

This work addresses power quality in an industrial three-phase electrical system by analyzing the disturbances generated by using a frequency inverter running to control the speed of a 300kW induction motor. For this purpose, an in-depth survey was carried out during continuous operation and the various harmonic disturbances caused in the three-phase electric network were investigated. For the realization of this research and data collection, such as effective voltage, current efficient, active and reactive power without interruption of operation of the boiler motor assembly. It was decided to use an Embrasul brand RE6000 energy quality analyzer. In addition to the analysis, the comparison with the normalized parameters and the calculation of the sizing of the appropriate filter to be inserted in the studied set were carried out, thus improving the quality of energy from the point of view of the local power grid, in line with the normative requirements related in this work.



## REFERÊNCIAS

Artigos, livros e normas:

ARANGO 2007, **Determinação do Circuito Equivalente de Motores de Indução Trifásicos a partir de dados de listas técnicas de fabricantes e considerando-se o efeito da saturação.**

BEZERRA, Abner 2008, **Distorções Harmônicas em Redes Elétricas**, arquivado no curso de Engenharia Elétrica na UPFA.

CAMACHO 2003, **Controle de Velocidade do Motor de Indução Trifásico utilizando Micro controladores para Aplicações em Baixa Potência.**

EMBRASUL 2007, **Manual de Instruções e operação do Analisador de Energia ER 6000.**

FITZGERALD 2014, **Máquinas Elétricas**, 7º Edição.

IEC 1000-2-4 2002, **Níveis de compatibilidade em instalações industriais para distúrbios de baixa frequência.**

IEEE 519 2014, **Prática e Requisitos Recomendados para o Controle Harmônico em Sistemas de Energia Elétrica.**

b

NBR 5410 2004, **Instalações elétricas de baixa tensão.**

NBR 15014 2003, **Conversor a semicondutor - Sistema de alimentação de potência ininterrupta, com saída em corrente alternada.**

NBR 16035 2012, **OS REQUISITOS OBRIGATÓRIOS PARA AS CALDEIRAS E VASOS DE PRESSÃO.**

NBR 17094 2003, **Máquinas elétricas girantes - Motores de indução – Especificação.**

NR 13 2008, **Caldeiras e Vasos de Pressão.**

SCOPACASA 2016, **Gerenciamento Elétrico**, edição 127.

VARIZ 2008, **Cálculo do fluxo de harmônicos em sistemas de potência trifásicos utilizando o método de injeção de correntes com solução iterativa.** Arquivado no Curso de Engenharia de Controle e Automação na Faculdade CEFET-MG.

SCHNEIDER ELETRIC 2003, **Qualidade de Energia Harmônicas.**

TROJAN 2011, **Modulação Senoidal Bipolar PWM Aplicada em Inversores de Frequência**, Arquivado no Curso de Engenharia Elétrica na Faculdade UEL-PR.

ANNEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, **Pesquisa e Desenvolvimento da Energia Elétrica – Eficiência Energética**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>

Acesso em: Novembro de 2016.

Artigos em sites:

BRAGA 2014, **Os Inversores de Frequência**. Disponível em: <<http://www.newtonbraga.com.br/index.php/automacao-industrial/5443mec125>>

Acesso em: Maio de 2016.

BURNTECH 2016, **Caldeiras**. Disponível em: <<http://www.burntech.ind.br/br/caldeiras>> Acesso em: Agosto de 2016.

DUTRA 2013, **MIT Equações**, Arquivado no curso de engenharia Elétrica na UFJF. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfqfwAK/mit-equacoes>>

Acesso em: Novembro de 2016.

EVANGELISTA 2008, **Efeitos das Distorções Harmônicas (Tensões e Correntes) e Desequilíbrios (Tensões) em Medidores Eletrônicos Trifásicos de Energia Elétrica Ativa**. Disponível em: <[http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaelettrica/pos-graduacao/232-dissertacao\\_luiz\\_evangelista.pdf](http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaelettrica/pos-graduacao/232-dissertacao_luiz_evangelista.pdf)> Acesso em: Outubro 2016.

FRAGA 2013, **Harmônicas em Inversores de Frequência**.  
Arquivado no Curso de Engenharia de Controle e Automação na  
CEFET/MG, Disponível em:  
<<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAsIAI/harmonicas-inversores-frequencia>> Acesso: Outubro de 2016.

FREIRE 2015, **Escola da Vida - Inversores de Frequência**.  
Disponível em:  
<[http://www.escoladavida.eng.br/mecfluquimica/planejamento\\_12009/Inversores\\_de\\_Frequencia.pdf](http://www.escoladavida.eng.br/mecfluquimica/planejamento_12009/Inversores_de_Frequencia.pdf)> Acesso em: Março de 2016.

GARCIA 1999, **Harmônicas em Sistemas Elétricos de Potência**.  
Disponível em:  
<[http://www.iesa.com.br/institucional/pdf/pdf\\_reativa/ap\\_harmonicosSEPCa\\_p.pdf](http://www.iesa.com.br/institucional/pdf/pdf_reativa/ap_harmonicosSEPCa_p.pdf)>  
Acesso em: Setembro de 2016.

NASCIMENTO 2009, **Análise de Sinais no Tempo Contínuo: A Série de Fourier**, Disponível em:  
<[http://www.univasf.edu.br/~edmar.nascimento/analise/analise\\_aula08.pdf](http://www.univasf.edu.br/~edmar.nascimento/analise/analise_aula08.pdf)>,  
Acesso em: Outubro de 2016.

POMILIO 2003, **Modulação por Largura de Pulso – MLP**.  
Disponível em:  
<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/htmlfile/harmo/fpCAP7/cap7.html>  
Acesso em: Novembro de 2016.

SANTOS, R. C. 2006, **Motores Trifásicos**. Arquivado no curso de tecnologia em Automação Industrial na TORRICELLI. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAA0jkAK/motores-trifasicos?part=2>>

Acesso em: Fevereiro de 2016.

TEIXEIRA 2009, **Análise das distorções harmônicas – estudo de caso de um sistema industrial**. Disponível em: <<http://www.ppgee.ufmg.br/defesas/308M.PDF>>

Acesso em: Agosto de 2016.

WEG 2014, **Manual geral de instalação, operação e manutenção de motores elétricos**. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-iom-general-manual-of-electric-motors-manual-general-de-iom-de-motores-electricos-manual-geral-de-iom-de-motores electricos-50033244-manual-english.pdf>> Acesso em: Setembro

de 2016.