

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Matheus Eimael Rolim

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA:
DISTRORÇÕES HARMÔNICAS EM UMA PLANTA
INDUSTRIAL**

Porto Alegre
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA:
DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM UMA PLANTA
INDUSTRIAL**

Estudo de caso em uma indústria de biodiesel

Projeto de Diplomação apresentado ao
Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne

Porto Alegre

2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MATHEUS EIMAE L ROLIM

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA:
DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM UMA PLANTA
INDUSTRIAL**

Estudo de caso em uma indústria de biodiesel

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de Projeto de Diplomação, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr, Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS

Doutor pela Chalmers University of Technology – Gotemburgo, Suécia

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS

Doutor pela Chalmers University of Technology – Gotemburgo, Suécia

Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho, UFRGS

Doutor pela Universidade de Cardiff – Cardiff , País de Gales

Prof. Dr. Bardo Ernst Josef Bodmann, UFRGS

Doutor pela Friedrich Alexander Universität Erlangen Nürnberg – Nuremberg, Alemanha

AGRADECIMENTOS

Sou profundamente grato a todos os professores que indireta e diretamente contribuíram para a minha formação. Não poderia deixar de mencionar o contribuinte brasileiro por sustentar e permitir o ensino público, ao qual eu ingressei e construí diariamente a minha formação como Engenheiro Eletricista.

Aos meus familiares: mãe, pai e irmã pelo suporte emocional em momentos desgastantes da graduação. À minha namorada e companheira pelo equilíbrio e observação positiva das agruras acadêmicas.

Por fim, agradeço a receptividade e a confiança da diretoria da Bianchini S.A em disponibilizar as suas instalações para a realização do estudo de caso deste projeto de diplomação. Aos engenheiros e aos técnicos de manutenção, pelo compartilhamento do conhecimento e genuíno interesse em ensinar e contribuir durante as minhas visitas à companhia.

“Sorte é o que acontece quando a preparação encontra a oportunidade.”

Sêneca

RESUMO

Realizou-se um estudo de caso na empresa Bianchini S.A com a intenção de medir e quantificar a distorção harmônica no barramento de 22kV do sistema industrial da companhia. Este trabalho apresenta a origem e os problemas associados à distorção harmônica, assim como algumas formas de mitigá-las. A metodologia utilizada para a medição e análise se fundamenta no oitavo módulo dos procedimentos regulamentados pela ANEEL para se inferir a qualidade da energia elétrica. Foi instalado um analisador de energia produzido pela Embrasul Indústria Eletrônica. De posse das informações geradas pelo instrumento, selecionou-se um intervalo válido de interesse para se realizar o estudo da distorção harmônica nas amostras coletadas pelo analisador. A máxima Distorção Harmônica Total identificada para a tensão AB e CB respectivamente são: 1,54% e 1,49%. Estes valores estão em conformidade com o limite regulamentado, isto é, com Distorção Harmônica Total inferior à 6%. A frequência de operação da tensão no barramento analisado demonstra um sistema equilibrado no quesito geração-demanda, isso significa que durante todo o período analisado a frequência manteve-se dentro do intervalo regulamentado pela ANEEL; sendo o máximo valor encontrado de 60,26Hz e o mínimo valor encontrado de 59,33Hz. O fator de potência da indústria operou entre 0,94 e 0,96 indutivo, ou seja, acima do limite obrigatório de 0,92.

Palavras-chaves: Qualidade de Energia Elétrica. Medição. Distorção Harmônica.

ABSTRACT

A case study was made at Bianchini S.A company to analyze and quantify harmonic distortion at the 22kV industrial system voltage bus. This work presents the origin and problems associated with harmonic distortion and how it can be mitigated. The methodology used to measure and analyze is based in the eighth module for power quality released by the National Agency of Electrical Energy. An energy analyzer built by Embrasul Electronics Industry was installed. After all the information was collected by the instrument and properly downloaded, a valid period was selected to start the study of harmonic distortion. The maximum Total Harmonic Distortion identified for voltage AB and CB were respectively 1,54% and 1,49%. These values are below 6%. It means they are in compliance with the limits established by the National Agency of Electrical Energy. The operational frequency of the voltage bus indicated a balanced system for energy generation and demand. Within all the period studied the operational frequency kept in conformity with the limits; the maximum value found was 60,26Hz and the minimum valued found was 59,33Hz. The power factor of the industry operated inductive between 0,94 and 0,96. It is above the mandatory limit of 0,92.

Keywords: Power Quality. Measurement. Harmonic Distortion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: representação das variáveis de entrada e de saída de um sistema linear.....	16
Figura 2: sinal resultante da superposição das harmônicas de ordem ímpares (h).....	16
Figura 3: comparativo entre a fundamental e uma tensão com DHT igual a 57,28%	17
Figura 4: fonte de alimentação chaveada monofásica com entrada VAC e saída DC.....	18
Figura 5: topologia de um retificador trifásico utilizado para o acionamento de máquinas de alimentação contínua e o gráfico da tensão de saída $v(t)$	19
Figura 6: representação do sinal PWM em três momentos distintos. Em (a) $DC = 20\%$, em (b) $DC = 50\%$ e (c) $DC = 90\%$	20
Figura 7: topologia de acionamento CA com a técnica PWM e a tensão de saída $v(t)$	21
Figura 8: topologias de acionamento CA com a técnica VSI em (a) e CSI em (b) e as respectivas tensões de saída $v(t)$	21
Figura 9: efeito na distorção harmônica devido à variação da velocidade de um motor acionado pela técnica PWM	22
Figura 10: triângulo de potências para tensões puramente senoidais, sem harmônicas	23
Figura 11: triângulo de potência tridimensional para instalações com distorção harmônica... 24	
Figura 12: representação da soma de harmônicas de terceira ordem no condutor neutro	26
Figura 13: curva de magnetização de um transformador com a região linear e a região de saturação, representada pelas setas à esquerda e à direita respectivamente	27
Figura 14: topologia da instalação de filtros passivos para mitigação de harmônicas de $5^{\circ}(300\text{Hz})$, $7^{\circ}(420\text{Hz})$, $11^{\circ}(660\text{Hz})$ e $13^{\circ}(780\text{Hz})$ ordem.....	30
Figura 15: esquemático de atuação do filtro ativo	31
Figura 16: configuração de aterramento com o sistema TN-S. Condutor neutro (N) e condutor de proteção elétrica (PE) separados ao longo de toda a instalação	32
Figura 17: visualização do painel frontal e inferior do analisador de energia RE7000.....	34
Figura 18: carregamento do arquivo (.emb) para o software ANL7000.....	36
Figura 19: visualização da tela principal do software ANL7000	36
Figura 20: comparativo de uma tensão sem harmônica ($DHT = 0\%$) e uma tensão com harmônica ($DHT = 7,81\%$), isto é, dentro do limite regulado pela ANEEL	40
Figura 21: comparativo de uma tensão sem harmônica ($DHT = 0\%$) e uma tensão com harmônica ($DHT = 8,53\%$), isto é, fora do limite regulado pela ANEEL.....	40
Figura 22: fluxograma do processo de produção do biodiesel	42
Figura 23: diagrama de conexão do analisador de energia	44

Figura 24: linha de transmissão conectada à subestação da companhia	45
Figura 25: analisador de energia instalado no barramento de 22kV.....	45
Figura 26: seleção do intervalo de registro para análise	46
Figura 27: distorção total de tensão na fase AB	49
Figura 28: distorção total de tensão na fase CB	49
Figura 29: distorção total de corrente na fase A.....	50
Figura 30: distorção total de corrente na fase C	50
Figura 31: frequência da tensão no barramento de 22kV	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: variação na resistência com a frequência para condutores de cobre 300 MCM	25
Tabela 2: resumo dos efeitos associados à distorção harmônica	29
Tabela 3: resumo dos sintomas, causa e mitigação para as distorções harmônicas	32
Tabela 4: especificações técnicas do analisador de energia	35
Tabela 5: terminologia	37
Tabela 6: valores de referência das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental)	38
Tabela 7: níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental)	39
Tabela 8: comparação da máxima distorção harmônica de tensão em cada fase com o limite regulamentado pela ANEEL	48
Tabela 9: registro de ocorrência e a máxima distorção harmônica na grandeza	51
Tabela 10: total de registros que ultrapassaram o limite regulamentado pela ANEEL	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

QEE – Qualidade de Energia Elétrica

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

RMS – Root Mean Square

DHT - Distorção Harmônica Total

DHI - Distorção Harmônica Individual

VSI - Voltage Source Inverters

CSI - Current Source Inverter

PWM – Pulse Width Modulation

IEC - International Electrotechnical Commission

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

CENELEC - Comitê Europeu de Normalização Eletrotécnica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 - Justificativa.....	13
1.2 - Objetivo.....	13
1.3 - Contextualização.....	13
2. DISTORÇÃO HARMÔNICA	15
2.1 – Conceito e Definições	15
2.1.1 - Linearidade e Superposição.....	15
2.1.2 – Distorção Harmônica Total (DHT)	17
2.2 – Origem das Harmônicas	18
2.2.1 - Fonte de Alimentação Chaveada	18
2.2.2 - Acionamentos CC.....	19
2.2.3 - Acionamentos CA.....	19
2.3 – Problemas Associados à Distorção Harmônica	22
2.3.1 – Banco de Capacitores	23
2.3.2 – Correção do Fator de Potência	23
2.3.3 – Condutores	25
2.3.4 – Transformadores.....	26
2.3.5 – Máquinas Rotativas	27
2.3.6 – Relés de Proteção	28
2.3.7 - Medidores de Energia	28
2.4 – Técnicas de Mitigação.....	29
2.4.1 – Filtros Passivos.....	30
2.4.2 – Filtros Ativos.....	31
2.4.3 – Aterramento do tipo TN-S	31
3. INSTRUMENTO E MÉTODO	34
3.1 – Instrumento	34
3.2 – Software.....	35
3.3 - Método	37
3.3.1 Terminologia.....	37
3.3.2 Metodologia de medição	37
3.3.3 Instrumentação	38
3.3.4 Valores de referência.....	38
4. ESTUDO DE CASO.....	41
4.1 – Bianchini S.A.....	41
4.1.1- Apresentação	41
4.1.2 – Biodiesel	41
4.2 - Instalação do Analisador de Energia.....	43
4.3 - Leitura das Amostras	46
4.4 - Análise.....	46
5. RESULTADOS	48
6. MELHORIAS PARA TRABALHOS FUTUROS	54
7. CONCLUSÃO.....	55
REFERÊNCIAS.....	56
ANEXO A.....	57

1. Introdução

1.1 - Justificativa

De acordo com informações obtidas junto à empresa, a Bianchini S.A tem o interesse em realizar a expansão da planta industrial. A presença de cargas que demandam energia elétrica considerável, tais como motores de indução, inversores de frequência e fornos a altas temperaturas; justificam a necessidade de realizar uma análise prévia da qualidade de energia elétrica do local antes da conexão de novas cargas ao barramento de alimentação da indústria, no presente caso, os inversores de frequência.

1.2 - Objetivo

O foco principal deste estudo será medir e analisar as harmônicas de tensão e corrente no sistema industrial Bianchini S.A. Todavia, outros aspectos da qualidade de energia possíveis de ser avaliados com a amostra das medições realizadas também serão abordados. Com a conclusão deste estudo serão apresentados os resultados obtidos com a intenção de motivar a modelagem e o planejamento dos filtros a serem instalados para a efetiva conexão dos inversores de frequência ao barramento de projeto.

1.3 - Contextualização

A demanda por energia elétrica cresce substancialmente a cada ano. Novas cargas são diariamente conectadas ao sistema elétrico de potência. O termo carga é genérico; porém, o sentido em que aqui se aplica é relacionado a equipamentos eletro-eletrônicos que ocupam cada vez mais espaço em nossa sociedade, como exemplo no âmbito residencial, o ar-condicionado. E, no âmbito industrial, os inversores de frequência. A infra-estrutura de distribuição de energia elétrica, na grande maioria, não foi projetada para sustentar e entregar um serviço de qualidade neste cenário de demanda crescente por energia. Dessa forma, o termo Qualidade de Energia Elétrica, QEE, insere-se no contexto nacional com mais intensidade na medida em que há uma necessidade de garantir padrões e níveis de tensão e corrente adequados para suprir os mais diversos setores da economia. A indústria, por exemplo, a maior consumidora de energia, necessita de um serviço de qualidade e com garantias de atendimento estipulados via contrato. Isso se deve ao fato de que existem

processos de fabricação e beneficiamento de produtos cuja interrupção acarreta em perdas tanto financeiras quanto humanas; já que a disponibilidade de energia é mandatória durante toda a cadeia de produção e beneficiamento do produto tanto para a finalização da produção quanto para a segurança dos operadores e técnicos. Paradas de produção são sinônimos de perdas de matéria prima e, na grande maioria dos casos, essas perdas são irreversíveis e a matéria é descartada. É neste cenário e contexto que surgiu a necessidade de regulamentar a QEE. A Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, órgão regulador do funcionamento do setor elétrico no Brasil, criou para fins de fiscalização e regulação os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, PRODIST. O PRODIST é composto por nove módulos, sendo que o módulo oito referente à QEE é de fundamental importância para este estudo. A área de QEE é bastante ampla e interdisciplinar. Os principais distúrbios englobados pela QEE são: afundamento de tensão, elevação de tensão, flicker, interrupções temporárias e sustentadas, distorção harmônica. A oscilação da frequência em torno do valor fundamental (60Hz) também é classificada como um distúrbio, porém, a frequência é um indicativo de geração e demanda. Isto é, se a demanda por potência é alta, a frequência tende a cair abaixo do valor fundamental, mas com uma demanda baixa, a frequência tende a subir acima do valor fundamental. Neste projeto de diplomação - para fins de apreciação de estudo de caso - limita-se somente a um distúrbio da qualidade da energia, conhecido como harmônicas de tensão e corrente.

2. Distorção Harmônica

2.1 – Conceito e Definições

As harmônicas são sinais periódicos e senoidais que se associam a um sinal de tensão também senoidal de amplitude maior e com uma frequência fundamental. O resultado desta associação provoca a distorção do sinal de tensão. Este sinal de tensão, portador da frequência fundamental (que no Brasil é 60Hz), por definição, é o que os sistemas elétricos de potência desejam receber, isto é, sem a presença de nenhuma harmônica. A frequência das harmônicas são múltiplas inteiras do valor da frequência fundamental [1]. Por exemplo: quando se emprega o termo *terceira harmônica* se refere a um sinal com frequência três vezes maior do que a frequência fundamental, resultando, portanto, em um sinal na frequência de 180Hz. No item 2.1.1 será abordado, brevemente, um conceito matemático importante para compreender o fenômeno da distorção harmônica.

2.1.1 - Linearidade e Superposição

Uma função $f(x)$ é dita sistêmica se satisfazer as seguintes condições:

$$f(\alpha * x) = \alpha * f(x) \quad (1)$$

$$f(x1 + x2) = f(x1) + f(x2) \quad (2)$$

Esta propriedade aplica-se aos sistemas, caracterizando-os como lineares. Sendo assim, a resposta de um sistema linear a uma soma ponderada de sinais de entrada é igual a mesma soma ponderada dos sinais de saída associados a cada um dos respectivos sinais de entrada. Na figura 1 está representado esquematicamente o conceito da linearidade. A variável de saída $Y(t)$ será a soma da resposta do sistema à variável de entrada $X1(t)$ com a resposta do sistema à variável $X2(t)$.

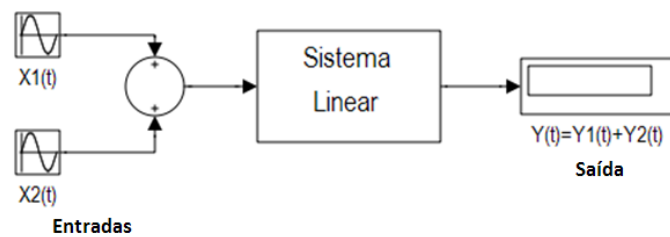


Figura 1: representação das variáveis de entrada e de saída de um sistema linear

A superposição é decorrência direta do conceito de linearidade. Na figura 1, também está representado a superposição, ou seja, o que está amostrado pela saída é uma superposição da resposta do sistema ao comportamento das duas variáveis de entrada. Estes conceitos são amplamente utilizados para a análise de diversas situações na Engenharia Elétrica. No caso das harmônicas, imagina-se que há uma contribuição de diversas fontes de tensão, não apenas $X_1(t)$ e $X_2(t)$, mas $X_n(t)$, sendo n um número inteiro, multiplicador da frequência fundamental. A superposição dessas n fontes de tensão resulta em um sinal distorcido, totalmente indesejado nos sistemas de potência.

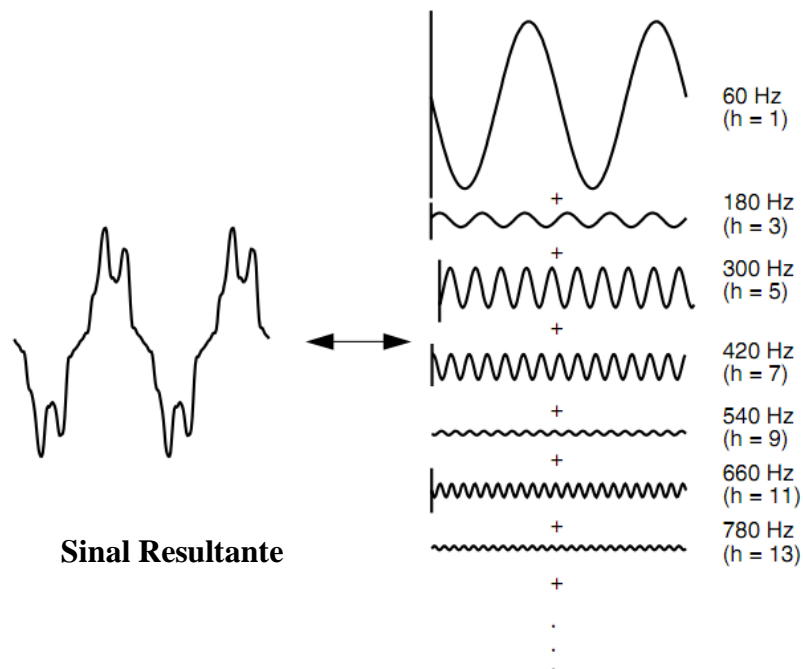


Figura 2: sinal resultante da superposição das harmônicas de ordem ímpares (h) [1]

2.1.2 – Distorção Harmônica Total (DHT)

Quantificar o quanto um sinal de tensão ou corrente é distorcido é de extrema importância, pois a partir do cálculo do valor da DHT é possível comparar com os valores regulamentados pela ANEEL e inferir desvios em relação à QEE. Este indicador é expresso em porcentagem. Também se infere a Distorção Harmônica Individual (DHI), onde se quantifica a magnitude harmônica em relação ao sinal fundamental. As equações para o cálculo das grandezas DHT e DHI, conforme seção 4.3.2 do PRODIST módulo 8, são apresentadas em (3) e (4).

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\text{máx}}} V_h^2}}{V_1} * 100 \quad (3)$$

$$DHIh \% = \frac{V_h}{V_1} * 100 \quad (4)$$

Onde

h = ordem da harmônica,

V_h = amplitude da harmônica de ordem h, e

V₁ = amplitude da tensão portadora da frequência fundamental.

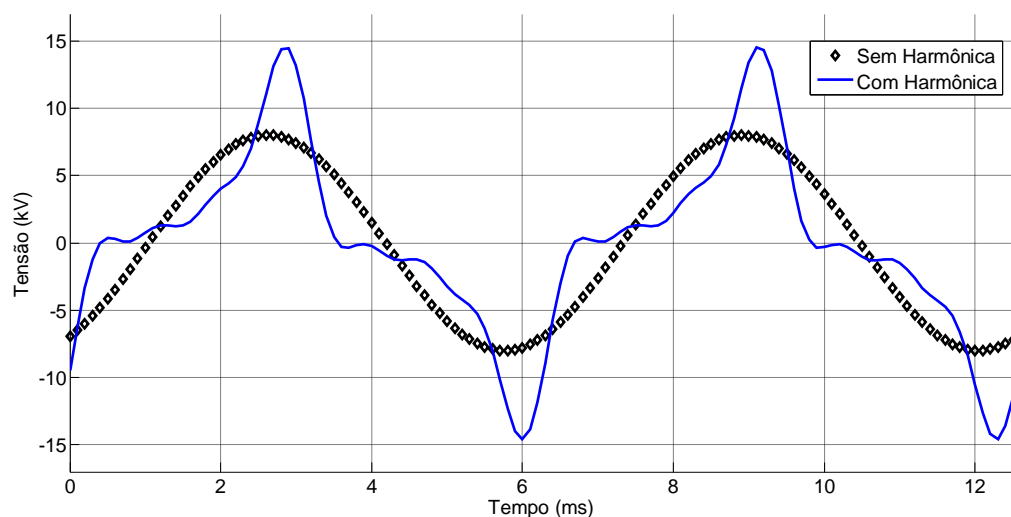


Figura 3: comparativo entre a fundamental e uma tensão com DHT igual a 57,28%

2.2 – Origem das Harmônicas

A origem das harmônicas está relacionada com a conexão de cargas não lineares ao sistema de potência. Entenda-se por cargas não lineares as fontes de alimentação chaveada presentes em carregadores de bateria, computadores, impressoras, fotocopiadoras, digitalizadores de imagem entre outros. No espectro industrial, cita-se os dispositivos eletroeletrônicos destinados ao acionamento de velocidade variável de máquinas rotativas, tanto em corrente contínua (CC) quanto em corrente alternada (CA) e os transformadores.

2.2.1 - Fonte de Alimentação Chaveada

Para diversas aplicações adequadas da eletricidade é necessário realizar a conversão entre dois regimes de operação: alternado-contínuo ou contínuo-alternado. Para se realizar a conversão de uma tensão alternada para tensão contínua, emprega-se componentes eletrônicos como diodos, capacitores, indutores, transformadores, transistores, resistores entre outros. A finalidade da fonte de alimentação é interromper a tensão alternada durante o ciclo negativo permitindo somente a passagem do ciclo positivo. Esse procedimento ocorre várias vezes durante um curto espaço de tempo, isto é, há um chaveamento da tensão em alta frequência. Esse primeiro estágio, conforme figura 4, é conhecido como retificação da tensão. No próximo estágio da conversão, realiza-se o ajuste do valor RMS entre o primário e o secundário do transformador, resultando em uma tensão de saída contínua e com valor de amplitude ajustado conforme necessidade da carga.

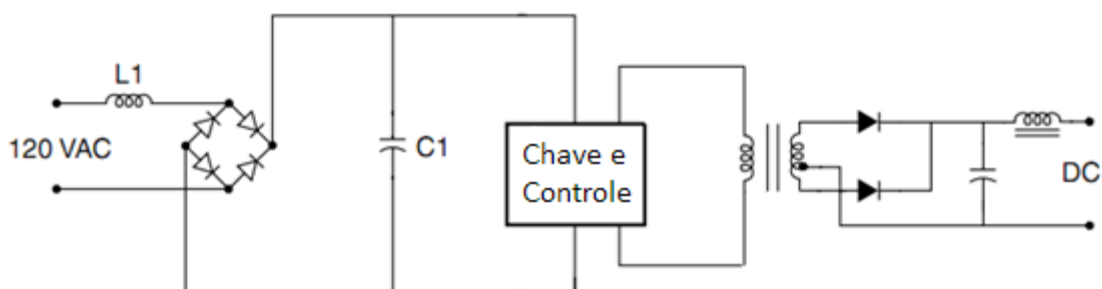


Figura 4: fonte de alimentação chaveada monofásica com entrada VAC e saída DC [1]

Durante esse processo de conversão da tensão alternada, em contínua, inevitavelmente há a produção de harmônicas, especialmente e em elevado conteúdo, as harmônicas de

terceira ordem (180 Hz) [1]. O crescimento acelerado de dispositivos que necessitam da utilização de fontes chaveadas é um desafio para os engenheiros, visto que as harmônicas produzidas e as distorções por elas resultantes no sistema de potência são indesejadas.

2.2.2 - Acionamentos CC

Motores de corrente contínua, embora tenham custo de aquisição e manutenção elevado, estão presentes nas indústrias. Em situações específicas durante o processo produtivo é necessária uma faixa maior de velocidade e conjugado de partida do motor que, em comparação com as máquinas rotativas de alimentação alternada, as máquinas CC estão em vantagem [2].

A retificação da tensão para o devido acionamento é mandatória; para esta finalidade, normalmente, emprega-se retificadores tiristorizados de 6 pulsos.

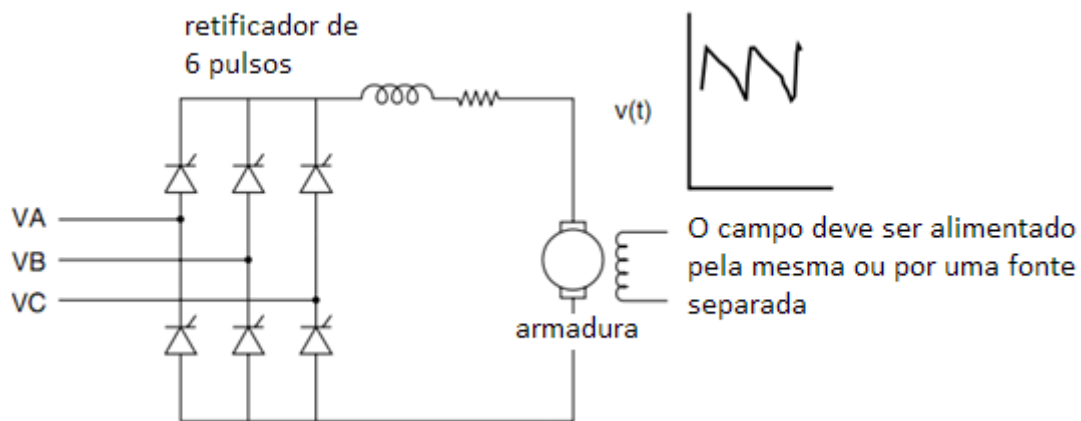


Figura 5: topologia de um retificador trifásico utilizado para o acionamento de máquinas de alimentação contínua e o gráfico da tensão de saída $v(t)$ [1]

Durante o processo de acionamento por seis pulsos há a produção de harmônicas, principalmente as harmônicas de quinta (300 Hz) e sétima ordem (420 Hz) [2].

2.2.3 - Acionamentos CA

Motores de indução e motores síncronos exigem o acionamento CA. A tensão de saída do retificador também possui característica alternada, porém, com frequência variável. As máquinas rotativas não operam sempre sob o mesmo regime. A velocidade e o conjugado variam conforme a etapa de produção. É fundamental, portanto, existir um dispositivo de

controle em que possa ajustar essas duas grandezas, alterando o regime de operação das máquinas para satisfazer as especificações e as necessidades da etapa de produção e beneficiamento do produto. Esses ajustes necessitam ser precisos e confiáveis, pois qualquer variação não especificada de velocidade e conjugado podem alterar significativamente a qualidade do produto. Para essa finalidade são empregados os inversores de frequência que são classificados em dois tipos: Fonte de Tensão Inversora (VSI) ou Fonte de Corrente Inversora (CSI) [3].

Uma configuração amplamente reconhecida na indústria para se realizar o acionamento CA com controle de velocidade, utiliza a técnica de modulação por largura de pulso (PWM). A técnica PWM, de maneira objetiva, é constituída por um ciclo de trabalho, do inglês *Duty Cycle* (DC). Este ciclo é definido por uma porcentagem do período em que a tensão estará em nível alto. Na figura 6 são apresentados três sinais PWM com diferentes valores.

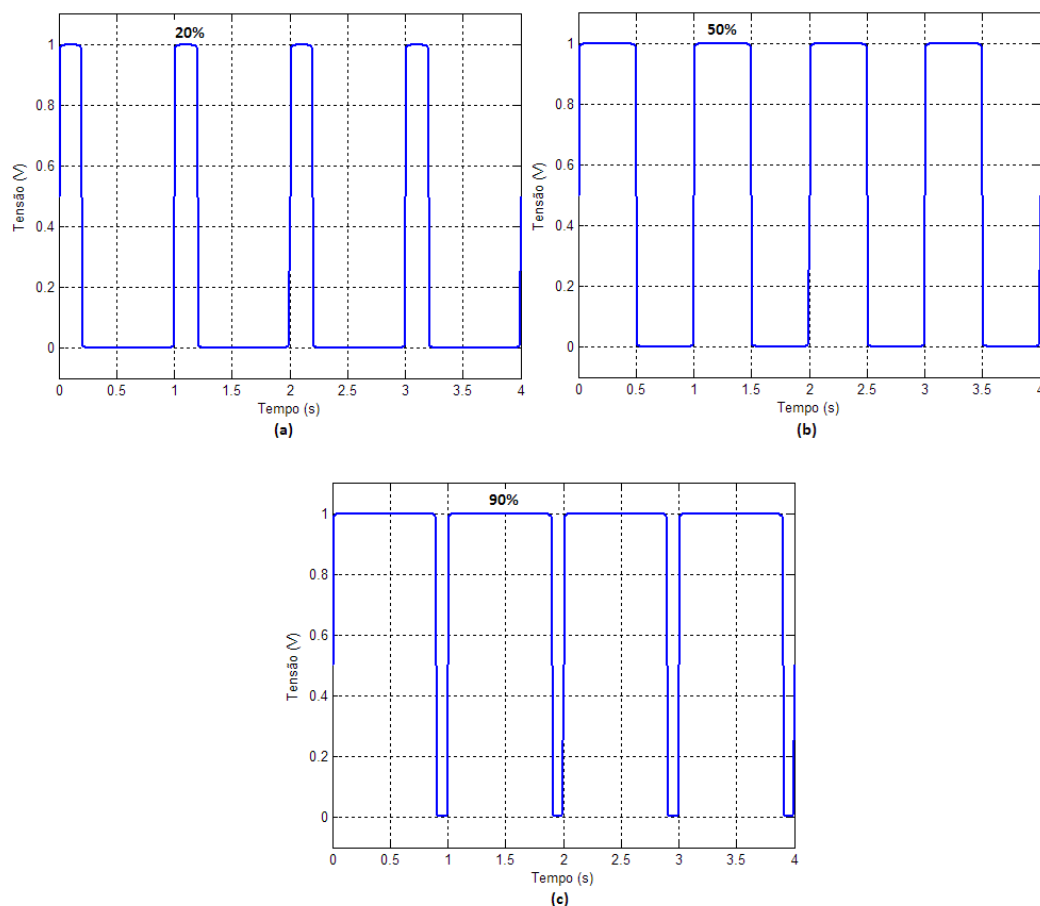


Figura 6: representação do sinal PWM em três momentos distintos. Em (a) DC = 20%, em (b) DC = 50% e (c) DC = 90%

A variação do valor DC influi no acionamento e consequente ajuste de velocidade das máquinas rotativas em regime alternado. A vantagem do método PWM é a não necessidade de variar a tensão de saída do retificador para controlar a velocidade da máquina rotativa [2].

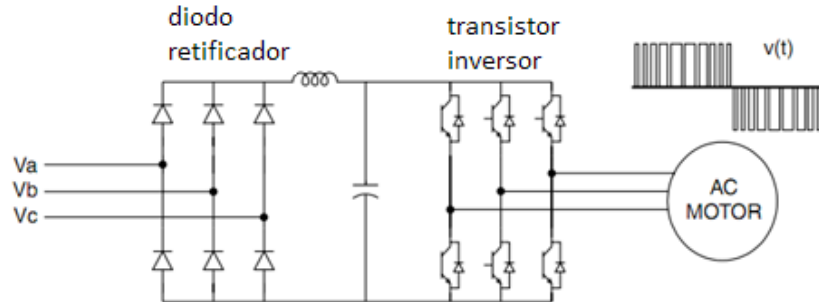


Figura 7: topologia de acionamento CA com a técnica PWM e a tensão de saída $v(t)$ [1]

O acionamento CA que utiliza a técnica PWM está limitado a motores com potência da ordem de 500 HP [2]. Existem outras duas formas de acionamento CA indicadas para acionamentos com máquinas de maior potência. Os acionamentos VSI, por exemplo, são indicados para aplicações em que não requerem variações rápidas de velocidade. Os acionamentos CSI são indicados para motores específicos (síncrono ou de indução com capacitores) que necessitam de boas características de aceleração e desaceleração.

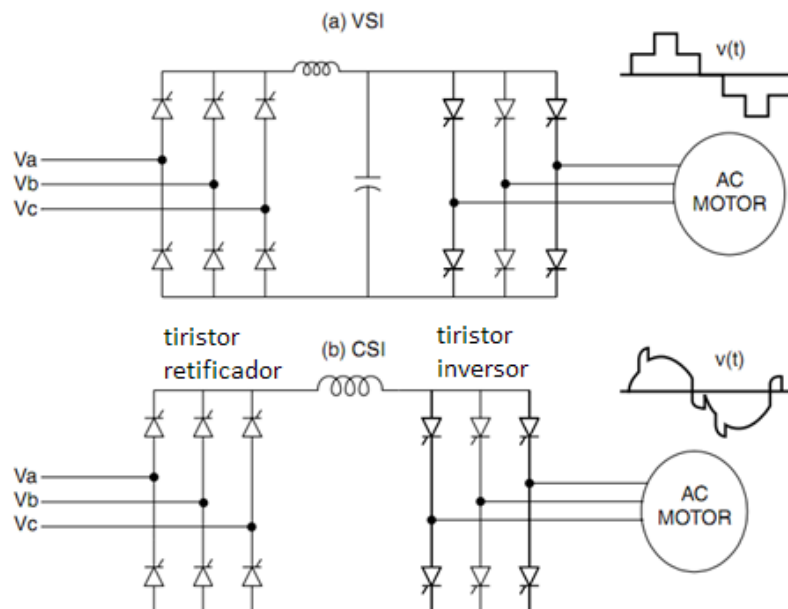


Figura 8: topologias de acionamento CA com a técnica VSI em (a) e CSI em (b) e as respectivas tensões de saída $v(t)$ [1]

As técnicas de acionamento CA apresentadas produzem harmônicas durante a operação. Muitos detalhes técnicos que envolvem os componentes de eletrônica de potência aplicados ao acionamento de máquinas elétricas podem ser encontrados em [3-7]. Porém, é importante salientar que são componentes com comportamento não linear, da família dos semicondutores, diodos, diodos tiristorizados, transistores entre outros. E por estes componentes apresentarem características não lineares, durante a operação em conjunto, produzem as indesejadas harmônicas. Como consequência, além da produção de harmônicas, temos uma distorção harmônica que não é constante. Isto é, a forma de onda muda significativamente para diferentes valores de conjugado e velocidade [2].

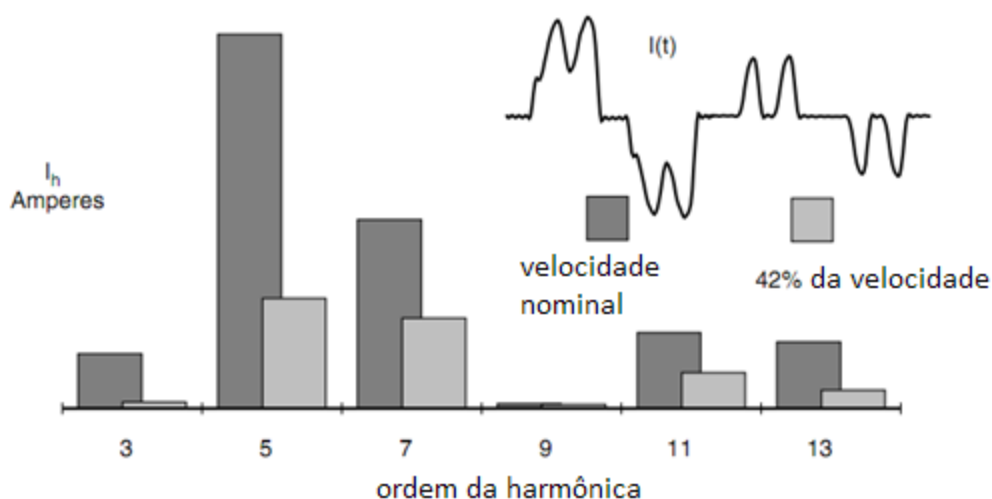


Figura 9: efeito na distorção harmônica devido à variação da velocidade de um motor acionado pela técnica PWM [1]

Percebe-se, pela proporcionalidade de magnitude das barras em cada ordem das harmônicas ímpares variando de 3 a 13, que o motor operando em velocidade nominal injeta harmônicas de maior amplitude do que operando a 42% da velocidade. Porém, para efeitos da distorção harmônica, acontece ao contrário; o motor operando a 42% da velocidade, conforme representação de $I(t)$, apresenta uma distorção harmônica mais acentuada do que operando em regime nominal.

2.3 – Problemas Associados à Distorção Harmônica

A distorção harmônica é responsável por diversas situações indesejadas nas instalações elétricas. Os problemas que serão aqui apresentados não esgotam todas as

situações. Os itens a seguir abordarão assuntos de maior proximidade e relevância para a instalação elétrica de uma planta industrial.

2.3.1 – Banco de Capacitores

Os bancos de capacitores estão presentes nas instalações industriais para a compensação da potência reativa da rede. Eles são prejudicados direta e indiretamente pelas harmônicas. O fenômeno da ressonância acontece quando a indutância da fonte ressona com o banco de capacitores na frequência de excitação das fontes produtoras de harmônicas. Nessa situação estas harmônicas são amplificadas [2]. A amplificação das harmônicas na frequência de ressonância da instalação é totalmente indesejada, visto que há o aumento da distorção do sinal e, como consequência, o DHT. Além da questão de ressonância, o efeito das harmônicas sobre os capacitores é o aumento de perdas e conseqüente aquecimento adicional das conexões e dispositivos constituintes do banco de capacitores.

2.3.2 – Correção do Fator de Potência

O fator de potência (FP), índice que mensura o quanto uma instalação está consumindo de potência ativa e o quanto de potência reativa é necessária para o atendimento desse consumo, é regulamentado pela ANEEL. Instalações industriais devem obedecer ao nível mínimo de 92% de FP. Valores de FP abaixo desse índice regulamentado implicam em multas por parte da concessionária; e devem ser imediatamente corrigidos.

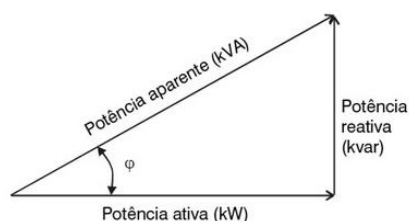


Figura 10: triângulo de potências para tensões puramente senoidais, sem harmônicas

O FP é calculado através da equação (5):

$$FP = \frac{\text{Potência Ativa (kW)}}{\text{Potência Aparente (kVA)}} = \cos(\varphi) \quad (5)$$

A solução para a correção do FP é a compensação da potência reativa presente na rede. É necessário, portanto, a instalação de banco de capacitores.

Para instalações industriais em que as harmônicas estão presentes, isto é, a grande maioria dos casos, a correção do fator de potência é mais complexa. A simples instalação de capacitores ao sistema se torna insuficiente, pois o baixo fator de potência passa a ser originado pela potência necessária para sustentar a distorção do sinal, e não mais somente pela presença de cargas indutivas na instalação. As harmônicas inserem um fator de distorção (DVA) no triângulo de potências resultando em um triângulo tridimensional.

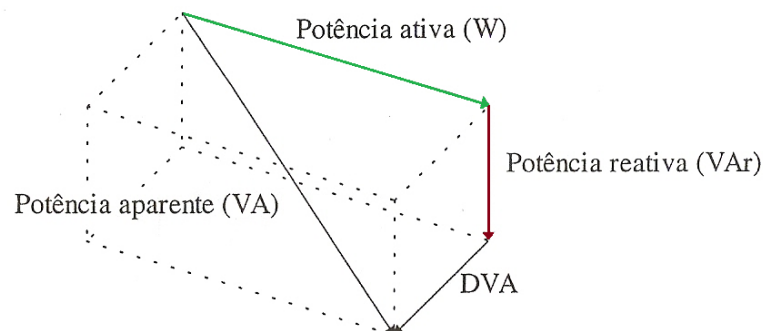


Figura 11: triângulo de potência tridimensional para instalações com distorção harmônica [2]

O cálculo do FP levando em consideração as harmônicas presentes na instalação é realizado através da equação (6) [2]:

$$FP = \frac{V1 * I1 * \cos(\theta1) + V2 * I2 * \cos(\theta2) + V3 * I3 * \cos(\theta3) + \dots + Vn * In * \cos(\theta n)}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V(t)^2 dt} * \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I(t)^2 dt}} \quad (6)$$

Onde

$V1$ = amplitude da tensão fundamental,

$I1$ = amplitude da corrente fundamental,

$\theta1$ = ângulo entre a tensão fundamental e a corrente fundamental,

Vn = amplitude da harmônica de tensão ordem n ,

In = amplitude da harmônica de corrente ordem n ,

θ_n = ângulo entre a harmônica de tensão de ordem n e a harmônica de corrente de ordem n,

T = período fundamental da função que descreve o comportamento da grandeza no tempo,

t = tempo,

$V(t)$ = função matemática que descreve o comportamento da tensão no tempo, e

$I(t)$ = função matemática que descreve o comportamento da corrente no tempo.

Há, portanto, uma modificação no cálculo para inferir o valor do fator de potência da instalação industrial, assim como executar a correção. Indústrias grandes consumidoras de energia elétrica necessitam estar atentas a esse fato, visto que este é um índice regulamentado pela ANEEL e com viés taxativo de multas.

2.3.3 – Condutores

A resistência dos condutores se modifica com a frequência. Este fato está relacionado com o efeito peculiar, que considera que a corrente alternada se distribuiu superficialmente aos condutores. Como consequência, há uma maior dificuldade da condução da corrente. Devido ao grande espectro de frequências que compõem um sinal com harmônicas – normalmente até 3kHz no sistema 60Hz – haverá o aumento da resistência para a condução das harmônicas que compõem o sinal fundamental. Na figura 2, está representada a composição de um sinal distorcido. É como se para cada harmônica de ordem h o condutor se comportasse com uma resistência diferente. Isso implica em perdas por efeito Joule e da potência transmitida.

Tabela 1: variação na resistência com a frequência para condutores de cobre 300 MCM [2]

Frequência (Hz)	Ordem Harmônica	Resistência CA/CC
60	1	1,01
300	5	1,21
420	7	1,35
660	11	1,65

Para sinais com frequência a 660 Hz, no condutor de cobre, percebe-se um aumento de 65% da resistência em relação à operação em corrente contínua.

Em condutores neutros, as harmônicas também possuem uma contribuição negativa, principalmente devido àquelas de ordem múltipla de três. Correntes demandadas por cargas balanceadas no sistema trifásico ao se somarem no ponto neutro se anulam. Isso, porém,

somente é verdade para correntes perfeitamente senoidais em que as harmônicas não estão presentes.

As componentes harmônicas múltiplas de três estão em fase, portanto, a soma no neutro não se anula, resultando em uma corrente com magnitude três vezes maior. O condutor, portanto, sofre maior desgaste, aquecimento e como consequência necessita ser projetado com diâmetro maior do que o usual.

correntes fundamentais possuem somatório zero,
mas as correntes de terceira harmônica coincidem

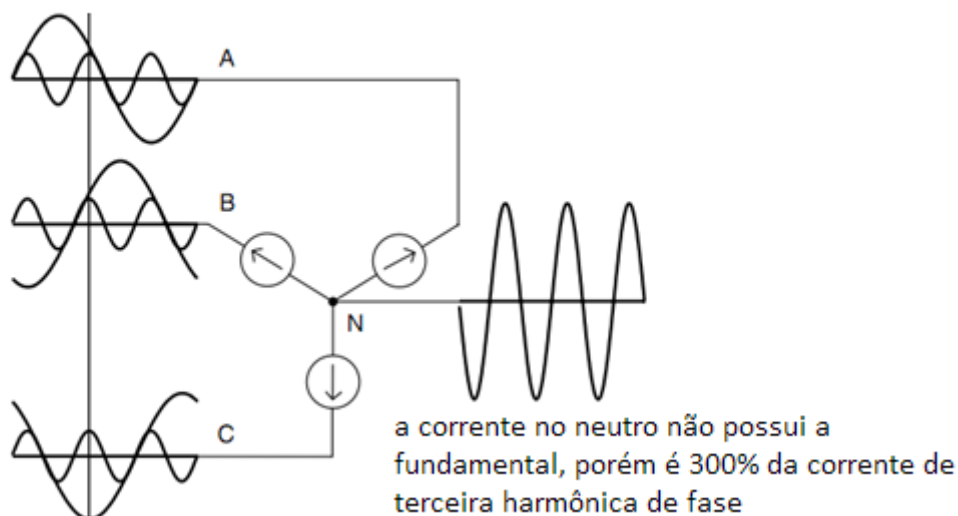


Figura 12: representação da soma de harmônicas de terceira ordem no condutor neutro [1]

2.3.4 – Transformadores

O modelo elétrico clássico que descreve o comportamento do transformador é constituído por uma impedância primária, impedância secundária e uma impedância de magnetização. A impedância de magnetização, que modela o comportamento do fluxo magnético no entreferro, sofre influência com as distorções harmônicas. O formato da grandeza transformada (tensão ou corrente) no secundário do transformador é muito similar ao formato no primário, isto é, de função senoidal. Salvo pelo valor de amplitude em RMS que é alterado pela relação de transformação. Porém, para a transformação permanecer correta, tanto em amplitude quanto em formato, o núcleo do transformador necessita estar operando dentro da região linear. Portanto, não é desejado o transformador operar na região de saturação, visto que a transformação do primário para o secundário deixa de corresponder

com o desejado; modificando significativamente, nos terminais secundários, o comportamento da grandeza alimentada nos terminais de conexão primária.

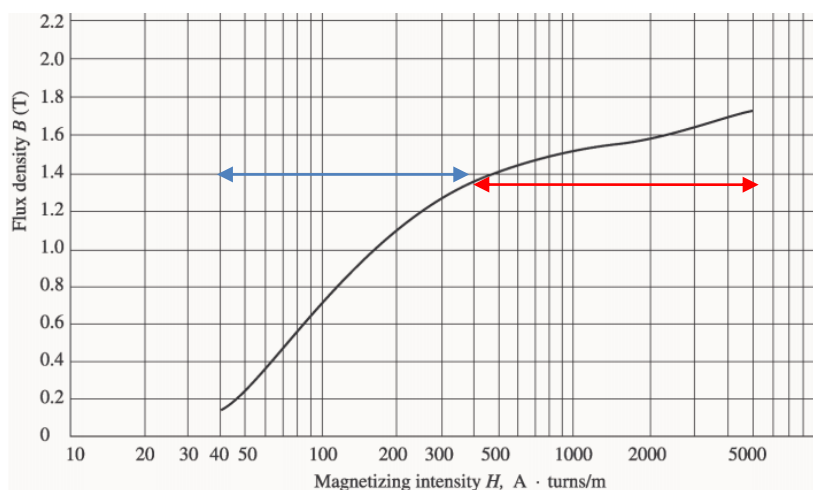


Figura 13: curva de magnetização de um transformador com a região linear e a região de saturação, representada pelas setas à esquerda e à direita respectivamente [13]

A impedância de magnetização é modelada eletricamente pelo comportamento da curva apresentada na figura 13. As distorções harmônicas contribuem para a impedância de magnetização ser modificada, contribuindo, portanto, para o transformador operar na região de saturação e comprometer a acuidade e a qualidade da grandeza transformada. Há ainda um maior aquecimento no núcleo do transformador resultando em maiores perdas por efeito Joule e magnéticas.

2.3.5 – Máquinas Rotativas

Os principais problemas que as harmônicas causam nas máquinas rotativas são perdas adicionais nos enrolamentos de cobre por efeito Joule e a alteração do conjugado. As máquinas síncronas são sensíveis à interação das correntes harmônicas com o campo magnético de frequência fundamental, o resultado dessa interação é o conjugado oscilante que causa vibrações mecânicas e ruídos indesejados no ambiente. Há um desgaste mais acentuado da máquina, afetando todos os componentes constituintes da máquina, causando folga, fadiga no metal e conseqüente menor vida útil da máquina rotativa. Nos motores de indução, as perdas por efeito Joule devido às correntes harmônicas que circulam nos enrolamentos do estator e rotor são consideráveis. A máquina de indução necessita de componentes de

refrigeração ou operar em um ambiente refrigerado, para assim evitar operar a quente. A variação do conjugado também é percebida na máquina de indução; para uma corrente harmônica com 10% do valor da corrente nominal, o conjugado oscilante terá uma amplitude de 10% do conjugado nominal também resultando em oscilações mecânicas [1].

2.3.6 – Relés de Proteção

Os relés de proteção sofrem desgaste com a presença de harmônicas. Acelerando o processo de manutenção e troca do dispositivo. Há impacto no ponto projetado de atuação do relé; as harmônicas provocam deslocamentos no ponto de acionamento ao qual o dispositivo fora parametrizado. Como consequência, há um retardo na atuação, permitindo que as instalações recebam momentaneamente valores de corrente fora dos padrões de segurança projetado. Desarmes intempestivos devido às harmônicas de alta frequência também são um problema ao qual o relé de proteção está sujeito. Porém, distorções harmônicas da ordem de até 15% não afetam significativamente o comportamento dos relés de proteção [2].

2.3.7 - Medidores de Energia

A distorção harmônica causa erros de leitura em medidores de energia. Os erros não são constantes; dependem diretamente do modelo do medidor e com forte conotação estatística. Porém, no ambiente acadêmico, houve pesquisas em diferentes modelos de medidores em que foram encontrados erros de 4,7% em ensaios de laboratório [8]. Este é um ponto crítico, pois implica em perdas financeiras diretas para o consumidor ou a concessionária. A inspeção da qualidade da energia elétrica é uma área que, em determinadas situações, se depara com impedimentos burocráticos e relutância pelas partes envolvidas para de fato se investigar e comprovar suspeitas de irregularidades. A ANEEL, neste sentido, é atuante e regulamenta o direito do consumidor de solicitar a verificação da qualidade dos medidores de energia [9].

Tabela 2: resumo dos efeitos associados à distorção harmônica [2]

Equipamento	Natureza do dano devido às tensões harmônicas	Grau de Imunidade ou Nível de Tensão Admissível
Máquinas Síncronas	* Maior nível de aquecimento, particularmente nos enrolamentos amortecedores	$\sqrt{\sum (Vh/h)^2} \leq 1,3 \text{ a } 2,4\%$ De acordo com o tamanho e impedância da máquina (cf. IEC)
Transformadores	* Maior nível de perdas * Risco de saturação na presença de harmônicas pares	$\sqrt{\sum (Vh)^2} \leq$ 5% carga plena e 10% a vazio (cf. IEEE)
Máquinas Assíncronas	* Maior nível de aquecimento, particularmente nas gaiolas duplas ou nas ranhuras profundas. * Conjugados pulsantes	$\sqrt{\sum (Vh/h)^2} \leq 1,5 \text{ a } 3,5\%$ De acordo com o tamanho e impedância inversa da máquina (cf. IEC)
Condutores	* Perdas por efeito Joule	$\sqrt{\sum (Vh)^2} \leq 10\%$
Pontes Retificadoras	* Problemas ligados à forma de onda. Ex: comutação e sincronismo	$Vh \leq 5\%$ $\sqrt{\sum (Vh)^2} \leq 10\%$ (cf. NF e VDE)
Relés de Proteção	* Desarme Intempestivo	$V3 \leq 7\%$ $V4 \leq 1,5\%$ $V5 \leq 8\%$ (cf. CENELEC)
Medidores de Energia	* Comprometimento da classe de precisão * Erro de leitura	Indeterminado. Forte conotação estatística e dependente de modelo e fabricante [8]
Capacitores de Potência	* Maior nível de aquecimento * Perda de vida útil	$\sum h * (Vh)^2 \leq 44\%$ (cf. NBR 5282)

2.4 – Técnicas de Mitigação

As soluções existentes para mitigar o problema da distorção harmônica não são únicas. Isso significa que para cada projeto de instalação elétrica há um arranjo diferente. Algumas

soluções amplamente reconhecidas e de aplicação comprovada serão abordadas, porém é importante salientar que nesta seção não se esgotam todas as possibilidades e topologias existentes para a mitigação de harmônicas.

2.4.1 – Filtros Passivos

Os filtros passivos topologia série, composto por uma resistência (R), uma indutância (L) e uma capacitância (C), são instalados em derivação paralela com a fonte de harmônicas [3]. A frequência do filtro deve ser sintonizada conforme a frequência da harmônica que se deseja filtrar. Dessa forma, o filtro é visto como um caminho de baixa impedância pela harmônica, como consequência, a harmônica será drenada, isto é, absorvida e retirada da rede elétrica.

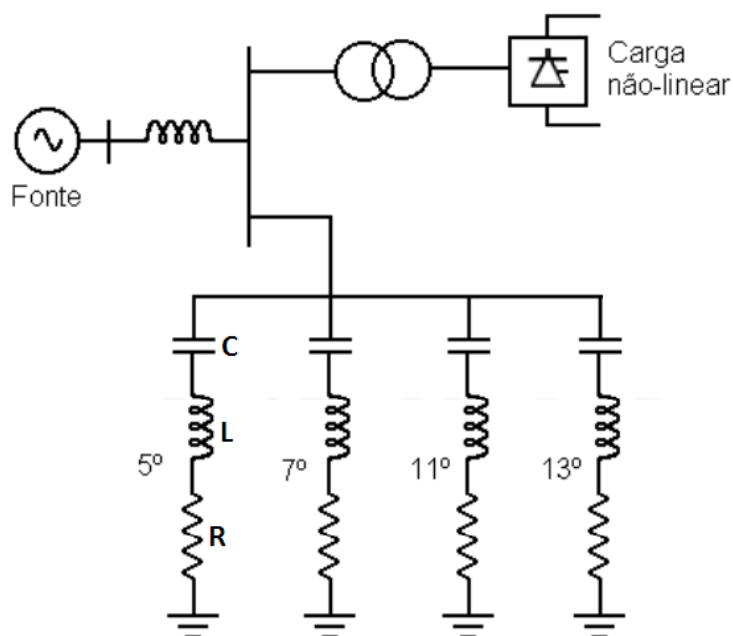


Figura 14: topologia da instalação de filtros passivos para mitigação de harmônicas de 5º(300Hz), 7º(420Hz), 11º(660Hz) e 13º(780Hz) ordem [3]

A instalação dos filtros implica na inserção de capacitores que, além de contribuir para a mitigação das harmônicas, também absorvem a potência reativa presente na rede, contribuindo para o aumento do fator de potência da instalação. Porém esta solução deve ser utilizada em casos particulares, visto que há a necessidade de instalar um filtro para cada ordem de harmônica que se deseja mitigar, implicando em custos maiores. Existe, ainda, a possibilidade da ressonância dos filtros com a impedância do sistema; fenômeno totalmente indesejado por ocasionar picos e surtos de energia que se espalham pela instalação elétrica

acionando os sistemas de proteção de forma indevida. A precisão na sintonia da frequência do filtro com a da harmônica não é trivial de se obter. As especificações dos componentes, em regime de operação, variam com a temperatura, provocando a dessintonização do filtro. O resultado é sempre uma filtragem parcial da harmônica suficiente para melhorar a qualidade da energia.

2.4.2 – Filtros Ativos

Esta solução consiste na instalação de dispositivos dotados de uma eletrônica mais sofisticada em série ou em paralelo com a carga não linear. Visa-se compensar a distorção harmônica através da reinjeção de correntes em fase com as harmônicas presentes na rede resultando em uma corrente de linha senoidal, isto é, não distorcida. [10].

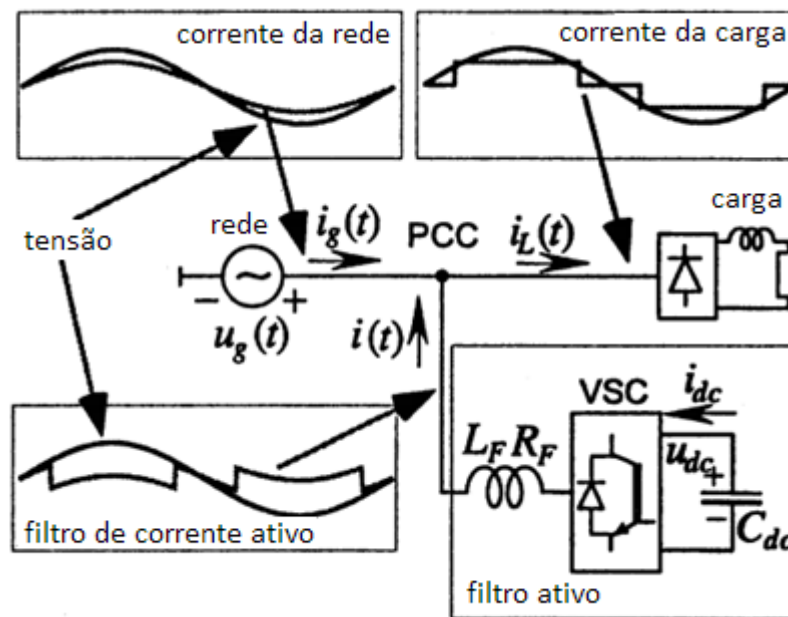


Figura 15: esquemático de atuação do filtro ativo [10]

2.4.3 – Aterramento do tipo TN-S

Uma rede elétrica segura e com qualidade de energia necessariamente precisa ter um excelente sistema de aterramento. A configuração mais recomendada, inclusive para a mitigação das harmônicas, é o aterramento do tipo TN-S em que o condutor neutro e o condutor de proteção elétrica são separados.

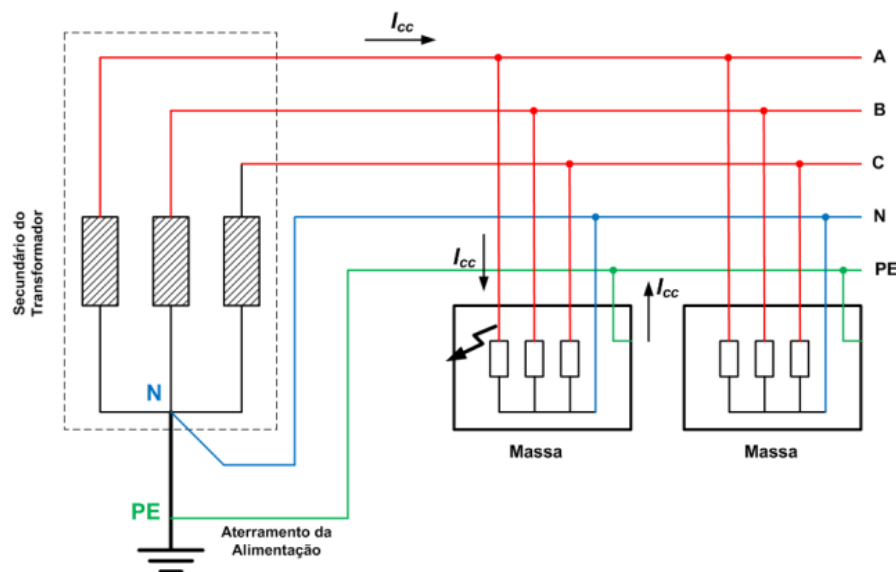


Figura 16: configuração de aterramento com o sistema TN-S. Condutor neutro (N) e condutor de proteção elétrica (PE) separados ao longo de toda a instalação [2]

Neste sistema há uma maior equalização do aterramento e conseqüente proteção para todos os equipamentos eletroeletrônicos resultando em um sistema com energia elétrica de maior qualidade.

Tabela 3: resumo dos sintomas, causa e mitigação para as distorções harmônicas [2]

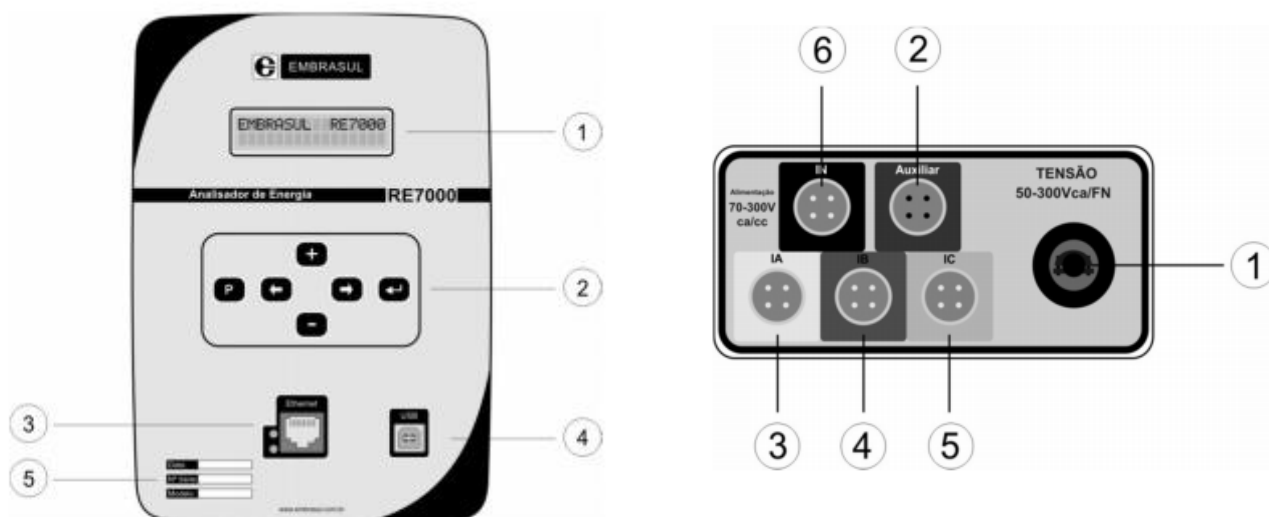
Sintoma	Causa	Mitigação
A distorção de tensão excede os limites	<ol style="list-style-type: none"> 1) Corrente das fontes harmônicas é grande demais para o sistema de potência. 2) O sistema de potência é ressonante em uma ou mais das frequências harmônicas dominantes. 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Determinar as fontes das correntes harmônicas e considerar a filtragem individual das cargas. 2) Aplicar um ou mais filtros de derivação ressonante no alimentador. 3) Realocar os bancos de capacitores ou mudar os seus portes ou sistema de chaveamento.
A distorção de tensão excede os limites, mas não existem fontes de harmônicas próximas	Um banco de capacitores próximo está em ressonância com a linha, drenando a corrente harmônica de uma fonte remota para o banco de capacitores	<ol style="list-style-type: none"> 1) Mudar a posição do banco de capacitores. 2) Converter o banco de capacitores em um filtro ressonante em derivação para dessintonizar o circuito. 3) Mudar o porte do banco de capacitores.
A distorção harmônica aparece e desaparece em horas específicas do dia	A principal causa das harmônicas é algum tipo de processo industrial ou comercial	Determinar a fonte e aplicar filtros

<p>A distorção harmônica aparece só com carga baixa</p>	<p>1) O circuito é ressonante somente para uma harmônica, mas as fontes são de pequeno porte e não conseguem superar as perdas em carga pesada. 2) A fonte de harmônicas existe somente em períodos associados com cargas leves. Por exemplo, a iluminação noturna que está ligada tarde da noite. 3) A tensão do sistema é aumentada com carga baixa, resultando no acréscimo da geração de harmônicas pelos transformadores do sistema.</p>	<p>1) Realocar o banco de capacitores ou mudar os seus portes para eliminar a ressonância. 2) Iterar os ajustes de chaveamento do banco de capacitores para reduzir a probabilidade de ressonância em carga leve. Reduzir a tensão do sistema com carga baixa através de reguladores de tensão ou pelo desligamento do banco de capacitores.</p>
<p>Os capacitores falham junto ou próximos a uma carga produtora de harmônicas</p>	<p>O sistema é quase ressonante em harmônicas baixas, como a 3ª e a 5ª ordem, fazendo com que a tensão de pico exceda os níveis de isolamento</p>	<p>1) Dessintonize o sistema pela mudança do porte do banco de capacitores ou pelo acréscimo de reatores em série. 2) Converter o banco de capacitores em um filtro sintonizado na harmônica problemática.</p>
<p>Os fusíveis dos capacitores queimam e existe presente uma elevada corrente harmônica</p>	<p>1) O sistema é ressonante para harmônicas elevadas causando correntes excessivas nos capacitores sem tensões excessivas. 2) O banco de capacitores está sendo empregado como filtro e a capacidade da fonte de harmônicas é muito grande.</p>	<p>1) Dessintonize o sistema pelo acréscimo de reatores em série com o banco de capacitores. 2) Se a harmônica for de sequência zero, considerar o bloqueio do fluxo de corrente desaterrando o neutro do banco de capacitores.</p>
<p>Os consumidores reclamam sobre operação incorreta de controles eletrônicos devido à distorção de tensão</p>	<p>A tensão é distorcida de tal forma que os cruzamentos por zero são anormais</p>	<p>1) Prover o consumidor com uma fonte de alimentação mais forte. 2) Aplicar filtros no consumidor.</p>
<p>Transformadores de força se sobreaquecem com carga abaixo da nominal</p>	<p>1) As correntes harmônicas são excessivas. 2) O transformador é ressonante com um banco de capacitores no lado de carga em uma frequência harmônica.</p>	<p>1) Aplicar uma derivação ressonante entre o transformador e a carga para manter as correntes fora do transformador. 2) Dessintonizar o banco de capacitores. 3) Alterar o porte do banco de capacitores.</p>
<p>Máquinas rotativas se sobreaquecem sem carga ou com carga baixa</p>	<p>A tensão através da máquina é excessivamente distorcida</p>	<p>Determinar a causa da distorção e mitigá-la conforme o item da <i>tensão distorcida acima do limite</i> descrita nesta tabela</p>

3. Instrumento e Método

3.1 – Instrumento

Utilizou-se o analisador de energia RE7000 da Embrasul Indústria Eletrônica. Embora existam outros modelos à disposição no mercado, optou-se por este instrumento por apresentar configurações que permitem a análise da energia de forma completa sem a necessidade de realizar medições individuais para cada distúrbio. Ganha-se eficiência durante a coleta das amostras, visto que para um mesmo conjunto de dados coletados é possível investigar a presença de diversos distúrbios ao mesmo tempo.



- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Display alfanumérico de 16 colunas x 2 linhas. 2. Teclado. 3. Porta de comunicação Ethernet. 4. Porta de comunicação USB. 5. Data de fabricação, número de série e modelo. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Entrada para medição de tensão e alimentação principal. 2. Entrada auxiliar de alimentação. 3. Entrada do sinal de corrente da fase A, amarelo. 4. Entrada do sinal de corrente da fase B, vermelho. 5. Entrada do sinal de corrente da fase C, azul. 6. Entrada do sinal de corrente de neutro, preto. |
|---|---|

Figura 17: visualização do painel frontal e inferior do analisador de energia RE7000 (cortesia EMBRASUL)

A arquitetura de comunicação do analisador de energia com o computador é através da interconexão Ethernet. Os dados gravados na memória do analisador são transmitidos ao computador através de um cabo de rede para posterior análise com o software ANL7000.

Tabela 4: especificações técnicas do analisador de energia [11]

Apresentação	Display alfanumérico tipo LCD, 16 colunas e 2 linhas
Alimentação	70 a 300Vca – Trifásica e alimentação DC de 100 a 500V
Frequência de alimentação	45 a 70Hz
Medição de tensão	Faixa: 50 a 500Vca
Exatidão	0,5% da leitura
Norma	IEC61000-4-30
Medição de corrente	Faixa: até 1000A
Sensor	Flexível TI3000
Precisão	1,5% da leitura
Escala de frequência para medição	40-5000Hz
Tensão de operação	500V IEC 1010 CAT III
Normas	Segundo IEC 1010 e CE (1997)
Temperatura de operação	-20 a 55°C
Raio mínimo de curvatura do sensor	19mm
Comunicação	Via porta Ethernet 10/100Mbps
Memória Interna	8MB à 8GB
Consumo	10VA
Umidade relativa do ar	0 a 95% sem condensação
Isolamento	2kV – 60Hz
Harmônicas	Até a 25 ^a ordem, pares e ímpares conforme IEC61000-4-7
Transitórios	Até 700V de pico e duração mínima de 130us
Dimensões	270x180x100mm
Peso	1,9Kg
Categoria de instalação	CAT III/600V
Grau de proteção	IP-65
Conversor A/D	14 bits
Taxa de amostragem	128 amostras por ciclo
Base de tempo	Cristal de quartzo – resolução de 100ms

3.2 – Software

O software de análise das amostras ANL7000 versão 1.98 (utilizada), efetua a decodificação de arquivos extraídos do analisador de energia. Ao total são gerados seis arquivos: três com extensão (.dat); um com extensão (.cfg); um com extensão (.emb2) e um com extensão (.emb). Para o software, o carregamento do arquivo (.emb) - salvo no mesmo diretório que os demais arquivos – é suficiente para se iniciar a decodificação das amostras.

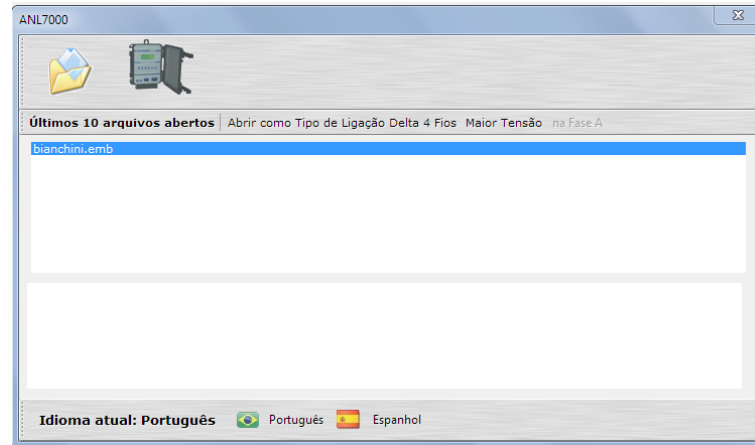


Figura 18: carregamento do arquivo (.emb) para o software ANL7000

A partir das amostras decodificadas é possível navegar entre as opções de análise que o software oferece. Entre as funcionalidades disponíveis se destaca: análise de tensão, transitórios, análise de afundamento de tensão, relatório de falta de energia, memorização de eventos, fator de potência, simulação de banco de capacitores, variação da frequência, distribuição de tensão e, com fundamental importância para o propósito deste projeto de diplomação, a análise de harmônicas.

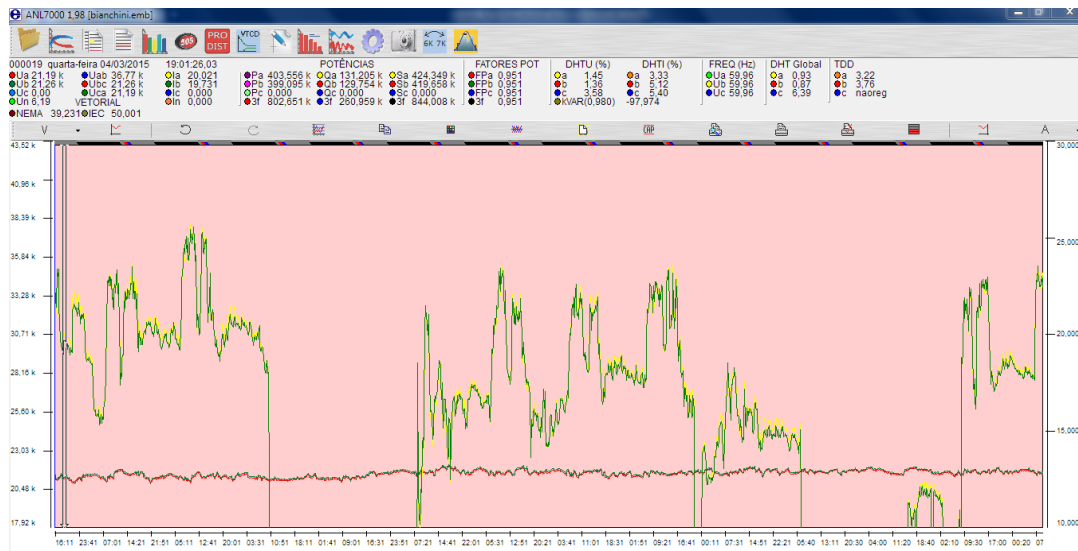


Figura 19: visualização da tela principal do software ANL7000

3.3 - Método

A metodologia de medição e análise respeita, rigorosamente, o módulo 8 do PRODIST; em especial a seção 4. Para gerar os indicadores individuais são necessárias pelo menos 1008 (mil e oito) leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos (período de integralização) de 10 minutos cada [12]. Este período compreende uma semana de medição ininterrupta no ponto de interesse ao qual se deseja verificar a QEE do sistema de energia.

Devido à importância para este projeto de diplomação, será destacado, a seguir, parte da seção quatro do PRODIST módulo 8.

3.3.1 Terminologia

3.3.2.1 A tabela 5 sintetiza a terminologia aplicável às formulações do cálculo de valores de referência para as distorções harmônicas.

Tabela 5: terminologia [12]

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DIT_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	DTT %
Tensão harmônica de ordem h	V_h
Ordem harmônica	H
Ordem harmônica máxima	Hmáx
Ordem harmônica mínima	Hmin
Tensão fundamental medida	V_1

3.3.2 Metodologia de medição

3.3.3.1 Os sinais a serem monitorados devem utilizar sistemas de medição cujas informações coletadas possam ser processadas por meio de recurso computacional.

3.3.3.2 A capacidade de armazenamento dos sistemas de medição deve atender os requisitos de banco de dados do protocolo de medição a ser definido pela ANEEL.

3.3.3.3 Para os sistemas elétricos trifásicos, as medições de distorção harmônica devem ser feitas através das tensões fase-neutro para sistemas estrela aterrada e fase-fase para as demais configurações.

3.3.3 Instrumentação

3.3.4.1 Os instrumentos de medição devem observar o atendimento aos protocolos de medição e às normas técnicas vigentes.

3.3.4.2 O espectro harmônico a ser considerado para fins do cálculo da distorção total deve compreender uma faixa de frequências que considere desde a componente fundamental até, no mínimo, a 25ª ordem harmônica ($h_{min} = 25$).

3.3.4.3 Os TPs utilizados em um sistema trifásico devem ter as mesmas especificações e suas cargas devem corresponder a impedâncias semelhantes, e serem conectados em Y – Y aterrado, independentemente do tipo ou classe de tensão. Para os casos sem conexão à terra podem ser utilizados arranjos para os TPs do tipo V.

3.3.4 Valores de referência

3.3.5.1 Os valores de referência para as distorções harmônicas totais estão indicados na Tabela 3. Estes valores servem para referência do planejamento elétrico em termos de QEE e que regulatoriamente, serão estabelecidos em resolução específica, após período experimental de coleta de dados.

Tabela 6: valores de referência das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental) [12]

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
$V_N \leq 1kV$	10
$1kV < V_N \leq 13,8kV$	8
$13,8kV < V_N \leq 69kV$	6
$69kV < V_N < 230kV$	3

3.3.5.2 Devem ser obedecidos também os valores das distorções harmônicas individuais indicados na Tabela 7.

Tabela 7: níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental) [12]

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

Para efeito de comparação visual do formato de onda, apresenta-se, na figura 17 e 18, duas tensões na transição do limite estabelecido pela ANEEL para regular a DHT em barramentos cuja tensão nominal esteja compreendida entre 1kV e 13,8 kV. Conforme tabela 6, o valor regulamentado de referência da DHT é de 8%.

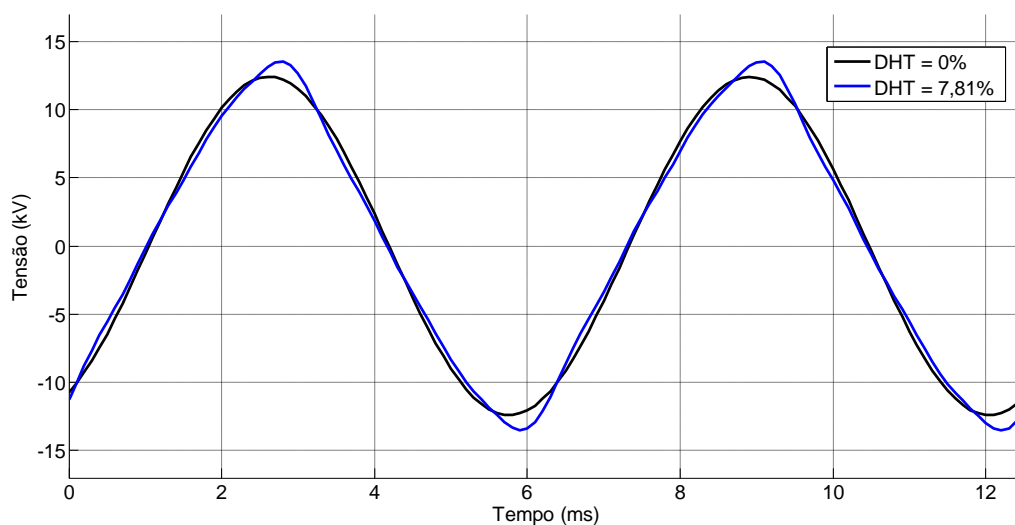


Figura 20: comparativo de uma tensão sem harmônica (DHT = 0%) e uma tensão com harmônica (DHT = 7,81%), isto é, dentro do limite regulado pela ANEEL

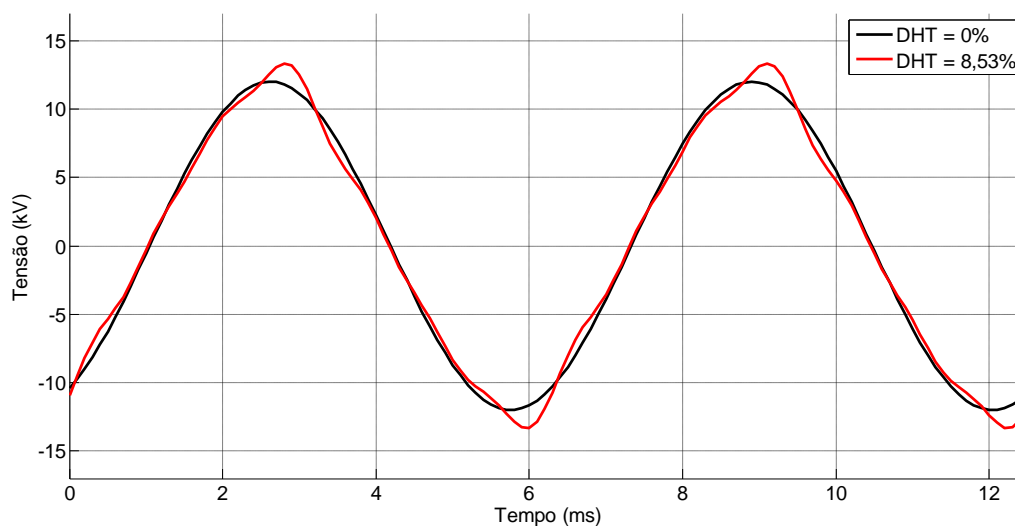


Figura 21: comparativo de uma tensão sem harmônica (DHT = 0%) e uma tensão com harmônica (DHT = 8,53%), isto é, fora do limite regulado pela ANEEL

4. Estudo de Caso

4.1 – Bianchini S.A

4.1.1- Apresentação

A Bianchini S.A, fundada em 1960, é uma típica empresa familiar, de capital fechado 100% nacional, situada no Estado do Rio Grande do Sul, com sede na cidade de Porto Alegre. Atua no ramo industrial de extração de óleos vegetais e produção de farelos, a partir do processamento da soja. Com estrutura sólida, também presta serviços de beneficiamento de grãos, de logística e armazenagens, além de embarques portuários de granéis sólidos e líquidos. Com forte presença em todas as regiões de produção de grãos no RS, atua diretamente junto às milhares de famílias de agricultores e suas cooperativas de produção e comercialização estabelecidas e, também, junto aos demais integrantes da cadeia agrícola. Anualmente, adquire, industrializa majoritariamente e/ou comercializa volumes próximos a 2 milhões de toneladas, gerando receitas de bens e serviços junto às comunidades onde se situa, garantindo, permanentemente, 900 vagas de empregos diretos, além de outros indiretos, calculados em milhares junto aos seus inúmeros fornecedores de insumos, equipamentos e prestadores de serviços.

4.1.2 – Biodiesel

Um dos produtos produzidos pela Bianchini S.A é o Biodiesel. A unidade de produção está localizada no parque industrial de Canoas. Durante a produção, a soja passa por diversos tratamentos em diversos setores. Em todos eles há algum tipo de carga elétrica: motores para inclinar caminhões e efetuar o descarregamento da matéria prima, esteiras de transporte, trituradores de soja, câmeras de aquecimento, sistemas de automação industrial para controle e inspeção de parâmetros químicos e térmicos, inversores de frequência para controle de velocidade de motores de indução, entre outros. Há, portanto, um espectro abrangente de cargas elétricas que participam diretamente da produção do Biodiesel.

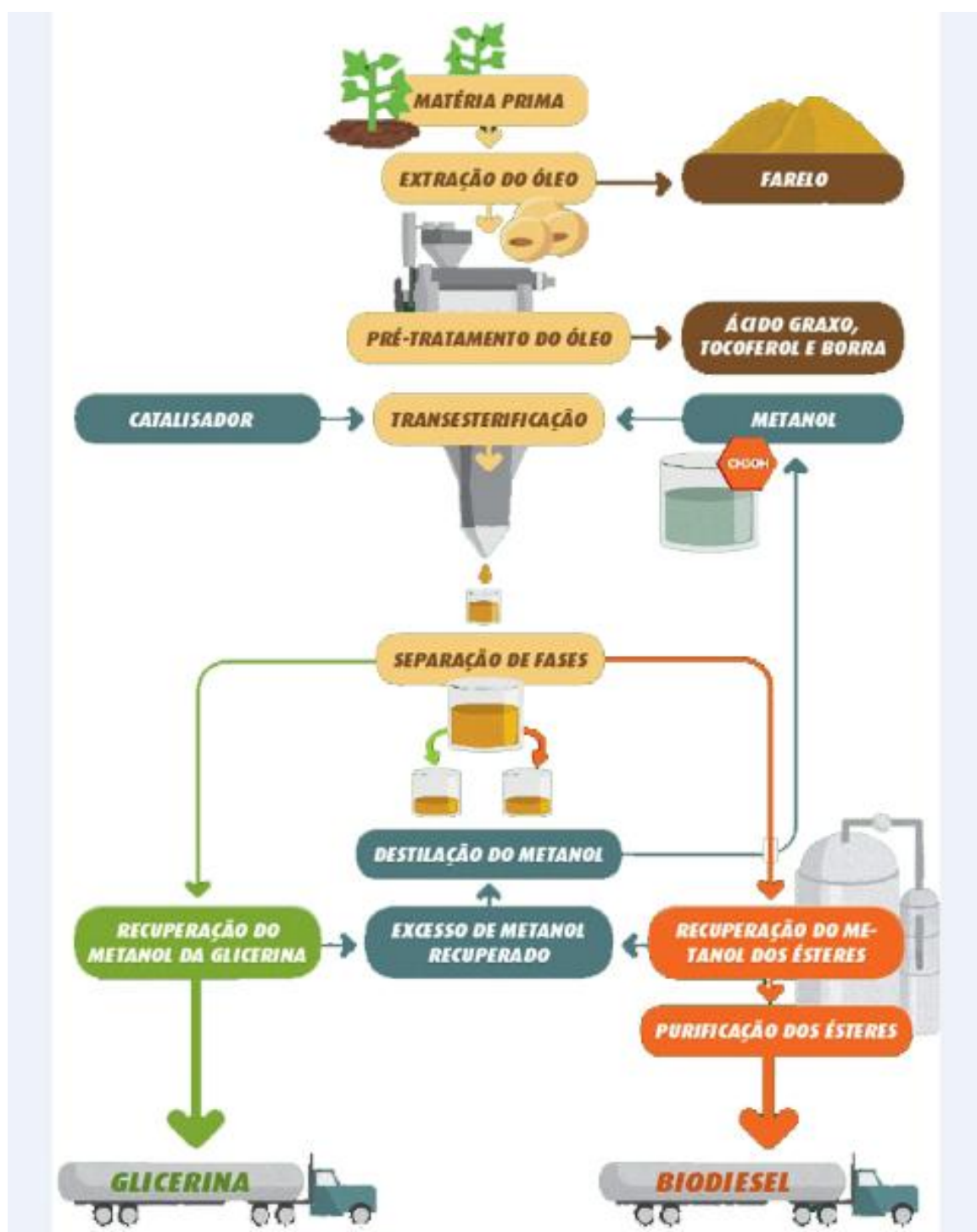


Figura 22: fluxograma do processo de produção do biodiesel
Retirado de <http://www.bianchinisa.com.br/> acesso em 28/03/2015

4.2 - Instalação do Analisador de Energia

A concessionária AES Sul alimenta a planta industrial com 69kV. Uma subestação, com dois transformadores de 3,75 MVA, conectados com o primário em delta e o secundário em estrela, realiza o rebaixamento da tensão de 69kV para 22kV. O ponto de acoplamento comum (PAC) escolhido para a instalação do analisador está localizado no barramento de 22kV, após o disjuntor de média tensão e o transformador de corrente (TC). No anexo A é apresentado o diagrama unifilar parcial do sistema industrial com a localização do instrumento instalado.

A instalação do analisador de energia foi realizada no dia 04/03/2015 às 16h00. A configuração empregada é conhecida como delta aberto. Utilizou-se o sinal dos dois transformadores de potencial (TPs) disponíveis, conectando o analisador para medir as tensões de linha AB e CB. As correntes foram medidas utilizando a saída dos TCs com conexão direta ao relé de proteção. Utilizou-se o canal A e o canal B do analisador de energia. Não foi possível monitorar a tensão nas três fases individualmente, pois no ponto de acoplamento comum, no lado de alta tensão (22kV), conexão delta, não existe na subestação da companhia o terceiro TP. Esta configuração é amplamente empregada e reconhecida pelas concessionárias para se realizar a medição de faturamento. A figura 23 apresenta o esquemático completo da conexão. O tempo de integração das amostras foi configurado em 10 minutos, conforme regulamentação em [12].

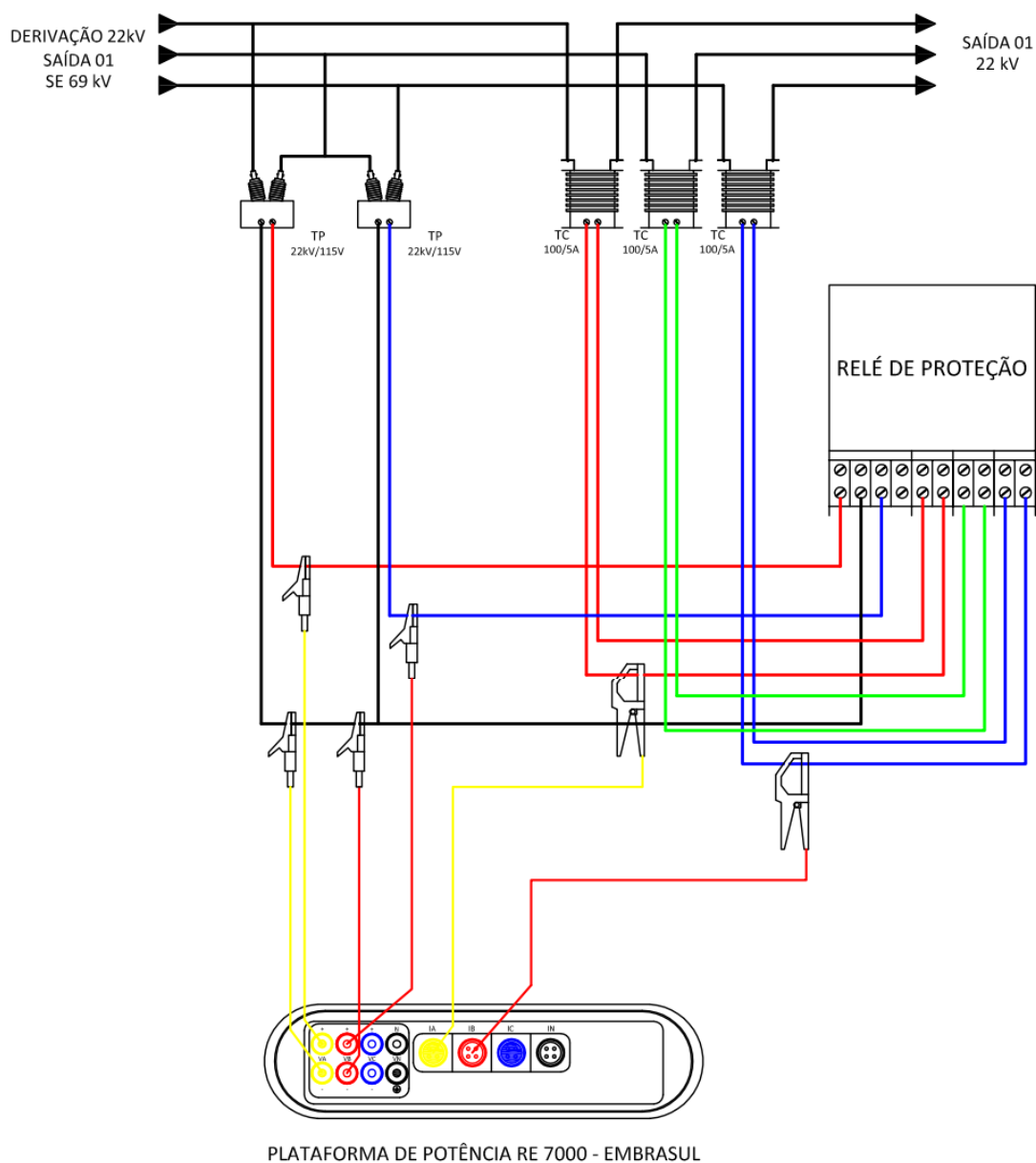


Figura 23: diagrama de conexão do analisador de energia (Efisul Energia)

Panel inferior com posicionamento das conexões apenas para ilustração. Não representa fisicamente o panel inferior do analisador de energia.



Figura 24: linha de transmissão conectada à subestação da companhia

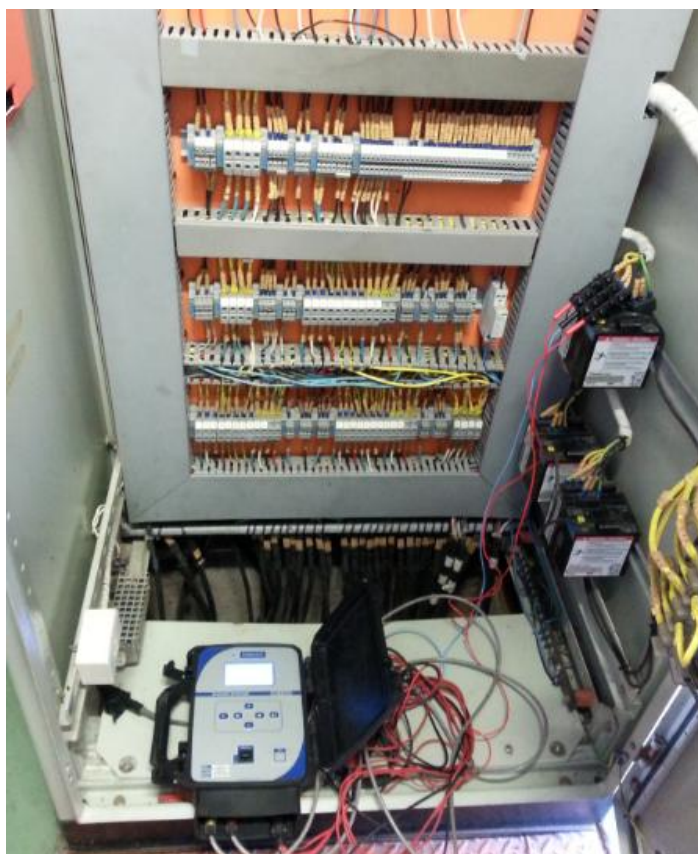


Figura 25: analisador de energia instalado no barramento de 22kV

4.3 - Leitura das Amostras

O download das amostras via cabo Ethernet ocorreu no dia 17/03/15 às 10h00. Porém, para fins de análise, selecionou-se o intervalo que compreende entre 04/03/15 às 16:01 e 11/03/15 às 15:51. Totalizando 1008 amostras válidas. O critério de seleção do intervalo da amostra se baseou no ritmo da indústria. O período selecionado abrange duas situações de operação da planta industrial: a plena carga e em período de manutenção preventiva. A manutenção preventiva é periódica e incorporada ao processo interno da Bianchini S.A. O analisador de energia, portanto, esteve instalado antes, durante e depois do período de manutenção, identificando, por conseguinte, diferentes perfis de carga para o sistema industrial.



Figura 26: seleção do intervalo de registro para análise

4.4 - Análise

Segundo informações do engenheiro da companhia responsável pela gerência e controle da área Elétrica da Bianchini S.A planta Canoas, a manutenção programada se iniciou no dia 9/03/15. Os registros a partir desta data, até o final do intervalo selecionado, serão tratados como de demanda não usual, isto é, sobre a perspectiva de baixa demanda por energia.

Para a análise dos registros serão levados em consideração a distorção harmônica total, a distorção harmônica individual, os valores máximos de distorção nas grandezas e a quantidade de registros para cada ordem harmônica que ultrapassou os limites estipulados pela ANEEL.

É importante ressaltar que o PRODIST não regula a carga; as correntes, dessa forma, não são gerenciadas pela concessionária. A interpretação dos resultados será apoiada nas tabelas 6 e 7 com a faixa de tensão nominal do barramento compreendida entre 13,8kV e 69kV.

5. Resultados

A análise dos valores máximos indica que as tensões AB e CB estão operando em conformidade com os valores regulamentados pelo PRODIST. A tabela 8 apresenta os valores máximos da distorção total e individual para as duas fases.

Tabela 8: comparação da máxima distorção harmônica de tensão em cada fase com o limite regulamentado pela ANEEL

Ordem Harmônica	Fase AB	Fase CB	Limite ANEEL
	DDT (%)	DDT (%)	DTT (%)
	1,54	1,49	6
	DIT (%)	DIT (%)	DIT (%)
2°	0,15	0,16	1,5
3°	0,18	0,17	4
4°	0,21	0,23	1
5°	1,48	1,45	4,5
6°	0,04	0,04	0,5
7°	0,59	0,76	4
8°	0,11	0,12	0,5
9°	0,06	0,04	1,5
10°	0,06	0,06	0,5
11°	0,86	0,79	3
12°	0,02	0,02	0,5
13°	0,34	0,3	2,5
14°	0,02	0,02	0,5
15°	0,04	0,04	0,5
16°	0,02	0,02	0,5
17°	0,13	0,11	1,5
18°	0,02	0,02	0,5
19°	0,11	0,11	1,5
20°	0,02	0,03	0,5
21°	0,04	0,04	0,5
22°	0,04	0,04	0,5
23°	0,02	0,03	0,5
24°	0,16	0,15	0,5
25°	0,02	0,02	0,5

Nos gráficos das figuras 27 e 28, infere-se que a DTT oscila entre valores dentro do limite regulamentado pela ANEEL. Em relação à distorção harmônica nas correntes de cada fase, cuja legislação ainda não as regulamenta, percebe-se com maior nitidez a atenuação brusca da distorção harmônica, figuras 29 e 30, ao ingressar no regime de manutenção programada (segunda-feira 09/03/2015), em que a demanda por energia é reduzida.

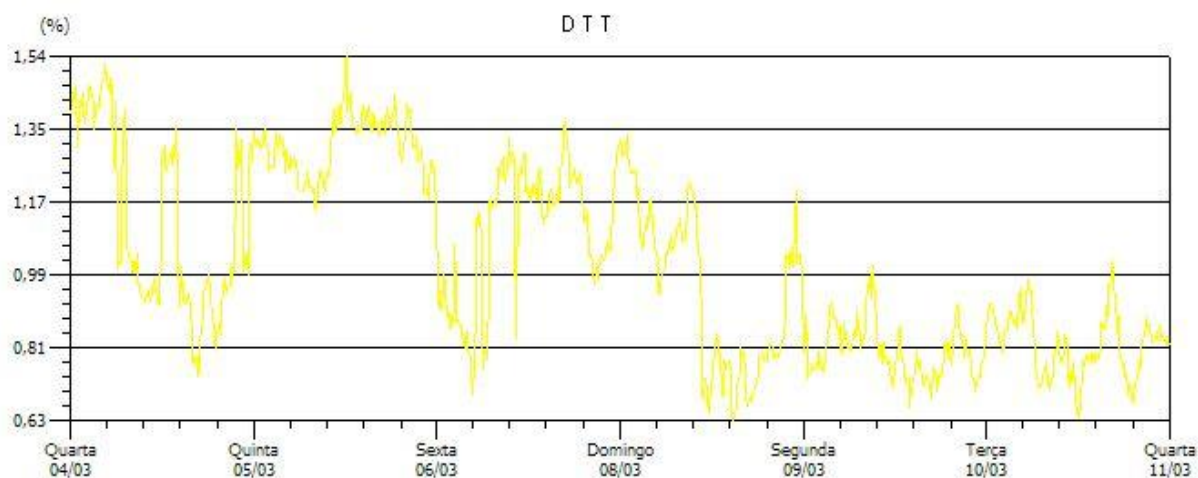


Figura 27: distorção total de tensão na fase AB

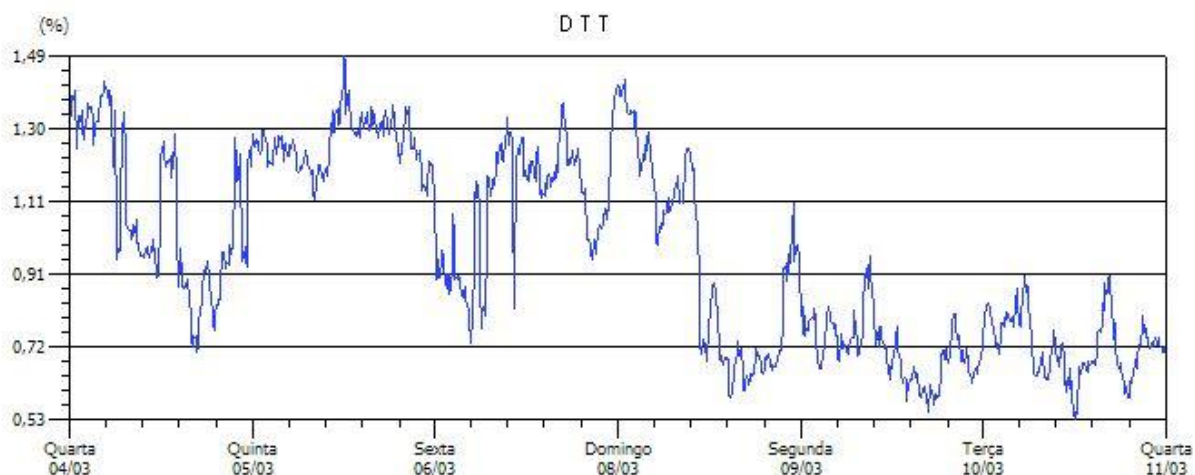


Figura 28: distorção total de tensão na fase CB

Os registros em que ocorreram os valores máximos de distorção harmônica nas grandezas monitoradas são apresentados na tabela 9. Percebe-se que a máxima distorção para a corrente na fase A e C ocorreu com trinta minutos de diferença; durante o final de semana, indicando o alto valor relativo da distorção como consequência da baixa corrente de frequência fundamental neste período, visto que após estes registros as distorções se atenuaram significativamente, conforme figura 29 e 30.

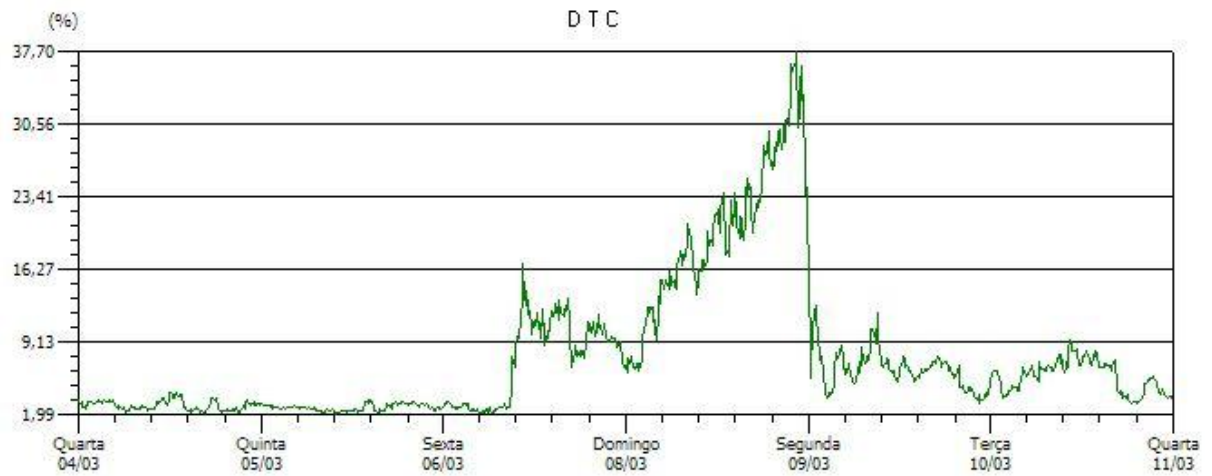


Figura 29: distorção total de corrente na fase A

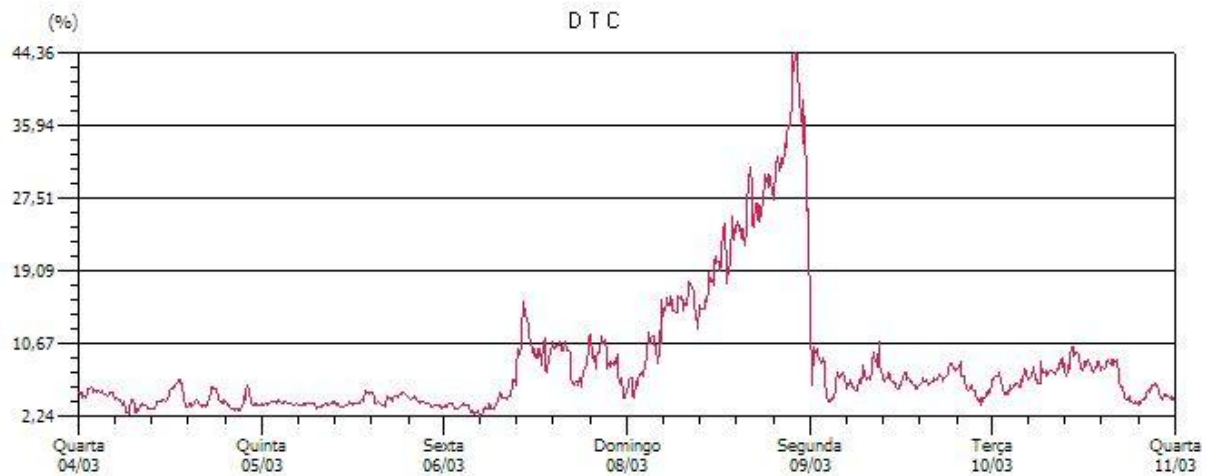


Figura 30: distorção total de corrente na fase C

Tabela 9: registro de ocorrência e a máxima distorção harmônica na grandeza

Registro	Tensão		Corrente	
	Fase AB	Fase CB	Fase A	Fase C
06/03/2015 - 10:11:26	1,54%	-	-	-
06/03/2015 - 10:01:26	-	1,49%	-	-
09/03/2015 - 06:11:14	-	-	37,70%	-
09/03/2015 - 05:41:13	-	-	-	44,36%

Para os registros de extremo da corrente, além do valor em porcentagem, apresenta-se o valor RMS para cada ordem harmônica.

Corrente na fase A

Registro: 662
 RMS: 2,683 (A)
 Componentes: 25
 DHT: 37,700 %
 Fundamental: 59,94 Hz

IMPAR	RMS(A)	%FUND	PAR	RMS(A)	%FUND
1	0,519	100,00	2	0,000	0,00
3	0,869	167,55	4	0,000	0,00
5	1,587	305,91	6	0,000	0,00
7	0,869	167,55	8	0,000	0,00
9	0,000	0,00	10	0,000	0,00
11	1,547	298,16	12	0,000	0,00
13	0,710	136,80	14	0,000	0,00
15	0,000	0,00	16	0,000	0,00
17	0,000	0,00	18	0,000	0,00
19	0,000	0,00	20	0,000	0,00
21	0,000	0,00	22	0,000	0,00
23	0,000	0,00	24	0,000	0,00
25	0,000	0,00			

Corrente na fase C

Registro: 659
 RMS: 2,450 (A)
 Componentes: 25
 DHT: 44,360 %
 Fundamental: 60,00 Hz

IMPAR	RMS(A)	%FUND	FASE	PAR	RMS(A)	%FUND
1	1,804	100,00		2	0,000	0,00
3	0,000	0,00		4	0,000	0,00
5	1,162	64,42		6	0,000	0,00
7	0,561	31,12		8	0,000	0,00
9	0,000	0,00		10	0,000	0,00
11	1,040	57,62		12	0,000	0,00
13	0,000	0,00		14	0,000	0,00
15	0,000	0,00		16	0,000	0,00
17	0,000	0,00		18	0,000	0,00
19	0,000	0,00		20	0,000	0,00
21	0,000	0,00		22	0,000	0,00
23	0,000	0,00		24	0,000	0,00
25	0,000	0,00				

Com esta perspectiva, percebe-se que, embora a distorção harmônica total seja elevada, o valor RMS das correntes na fase A e C são baixos. Logo, a análise de harmônicas por porcentagem apresenta outro referencial que pode induzir a interpretações errôneas.

A quantidade de registros que foram classificados acima do limite regulamentado também é um resultado de análise significativo. Entretanto, durante o período em que o estudo foi realizado, não foi encontrado nenhum registro acima dos limites apresentados na tabela 7. A tabela 10 apresenta esta informação.

Tabela 10: total de registros que ultrapassaram o limite regulamentado pela ANEEL

Ordem Harmônica	Fase AB	Fase CB	Ordem Harmônica	Fase AB	Fase CB
2°	0	0	14°	0	0
3°	0	0	15°	0	0
4°	0	0	16°	0	0
5°	0	0	17°	0	0
6°	0	0	18°	0	0
7°	0	0	19°	0	0
8°	0	0	20°	0	0
9°	0	0	21°	0	0
10°	0	0	22°	0	0
11°	0	0	23°	0	0
12°	0	0	24°	0	0
13°	0	0	25°	0	0

O analisador de energia quantifica, além das harmônicas, outras informações importantes para a Qualidade de Energia Elétrica. A variação da frequência, por exemplo, é um indicativo de geração e demanda que, caso não estiver operando em torno do limite regulamentado (59,5 Hz e 60,5 Hz), demonstra não sincronismo e conseqüente deficiência do sistema elétrico de potência. Na figura 31 se apresenta a frequência no barramento de 22kV. O menor registro encontrado foi de 59,53 Hz no dia 10/03/2015 às 8:31 e o maior registro encontrado foi de 60,26 Hz no dia 09/03/2015 às 22:51. Durante todo o período semanal que este estudo de caso se propõe avaliar, a variação da frequência da tensão no barramento operou em conformidade com os limites regulamentados [12].

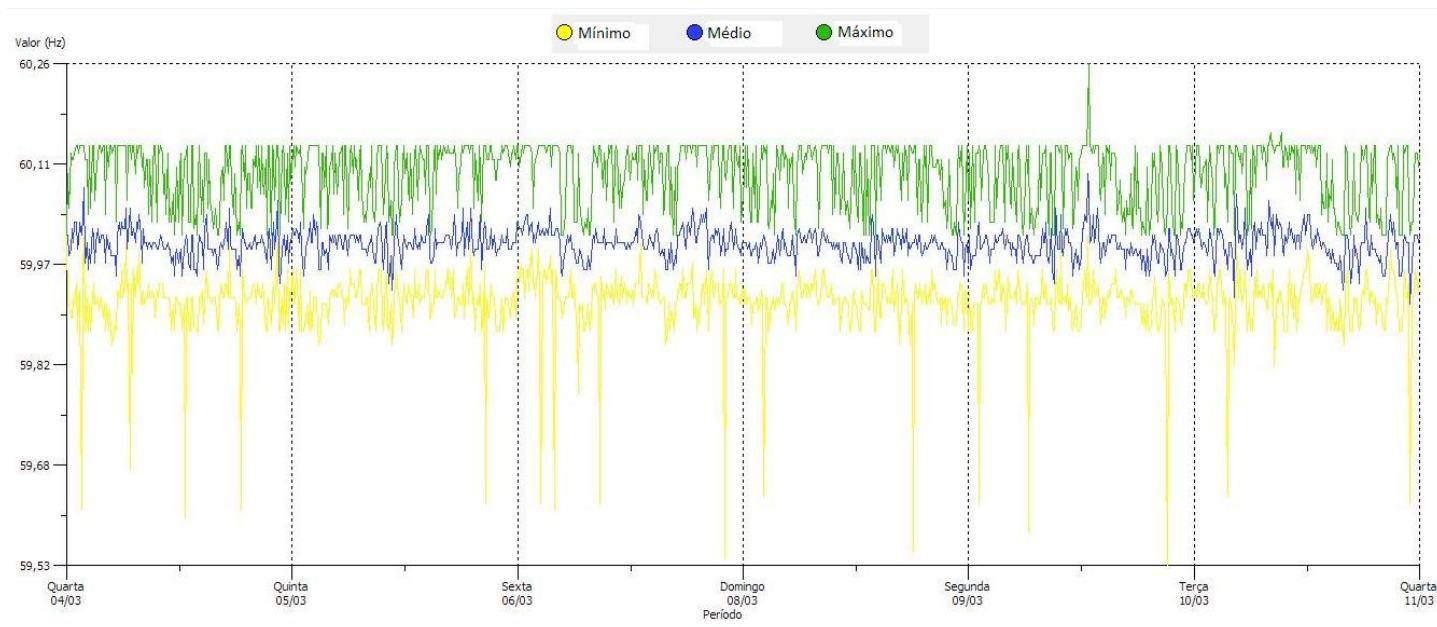


Figura 31: frequência da tensão no barramento de 22kV

O relatório de consumo semanal também é apresentado. O fator de potência médio durante o período de medição foi maior do que 0,92. A Bianchini S.A, portanto, possui um grau adequado de eficiência do uso do sistema elétrico de potência.

RELATÓRIO SEMANAL (Integração = 10 minutos)

Intervalo considerado:

quarta-feira 04/03/2015 15:51:27 até quarta-feira 11/03/2015 15:51:17

Faixas de horário estabelecidas:

Intervalo - Fora de ponta: 00:00 - 17:00 20:00 - 24:00

Intervalo - Ponta: 17:00 - 20:00

Semana: QUA 04/03/2015 a SAB 07/03/2015

Horário	Consumo [kWh]	Reativa [kVArh]	FP
Ponta	7,284	2,552	0,944 ind
Fora de ponta	50,046	17,160	0,946 ind
Total	57,330	19,712	0,946 ind

Semana: DOM 08/03/2015 a QUA 11/03/2015

Horário	Consumo [kWh]	Reativa [kVArh]	FP
Ponta	4,097	1,138	0,963 ind
Fora de ponta	41,522	11,575	0,963 ind
Total	45,619	12,712	0,963 ind

6. Melhorias para Trabalhos Futuros

É recomendável identificar a origem das distorções harmônicas identificadas. A instalação de um detector direcional de fluxo de harmônicas em pontos estratégicos permite inferir se a planta industrial produz ou recebe harmônicas da concessionária de energia. A instalação do detector de fluxo na entrada da alimentação da planta – antes da conexão com a subestação da companhia – representa uma alternativa eficiente.

A quantificação da qualidade da energia elétrica está associada com o comportamento da carga da planta industrial. É fundamental existir o acompanhamento, durante o período de coleta das amostras pelo analisador de energia, de todas as cargas acionadas e o horário de funcionamento de cada uma delas assim como a devida localização no diagrama unifilar da indústria. Este trabalho de controle e registro dos horários das cargas em operação deve ser realizado por técnicos familiarizados com os processos de produção da companhia. Recomenda-se que os registros sejam os mais fiéis possíveis da realidade de operação da indústria; visto que estas informações em conjunto com os dados coletados pelo analisador irão auxiliar diretamente o engenheiro responsável pela qualidade de energia a formalizar um diagnóstico do barramento analisado. Além do controle e registro das cargas em operação, sugere-se a conexão de mais de um analisador de energia em diferentes pontos da planta industrial a fim de correlacionar dados de qualidade medidos em setores distintos do sistema elétrico da companhia.

7. Conclusão

Identificou-se distorção harmônica total nas tensões AB e CB de 1,54% e 1,49% respectivamente; isto é, em conformidade com o PRODIST. Tratando-se de distorções harmônicas individuais não foram identificados nenhum registro que excedesse os limites individuais. É recomendada, portanto, neste atual cenário, a instalação de novos inversores de frequência ao barramento analisado.

Deixa-se a ressalva, entretanto, de que é importante mitigar as distorções existentes, pois com a conexão de novas cargas é possível que se acentue as distorções identificadas. Este efeito pode vir a propagar-se para o sistema da companhia como um todo, visto que os inversores de frequência são conhecidos pela sua capacidade de originar harmônicas na rede em que estão instalados. Portanto, para um melhor aproveitamento energético das futuras instalações da companhia, é recomendado monitorar as distorções após a instalação dos inversores para inferir se os indicadores de qualidade de energia permanecessem em conformidade com a regulamentação da ANEEL.

REFERÊNCIAS

- [1] R.C. Dugan, M.F McGranaghan, H.W. Beaty, Electric Power Systems Quality, McGraw-Hill, New York, 1996.
- [2] DIAS, Guilherme A.D. Harmônicas em sistemas industriais – 2ed. EDIPUCRS, 2002.
- [3] I. Barbi, Eletrônica de Potência, editora da UFSC, Florianópolis, SC, 2006.
- [4] An introduction to Power Electronics, B.M.Bird ET al, John Wiley & Sons, 1983.
- [5] Power Electronics: Converters, Applications and Design; Ned Mohan et. Al, John Wiley & Sons, 1995.
- [6] Eletrônica Industrial: Teoria e Aplicações, Cyril W. Lander, Makron Books, 1988.
- [7] SPICE for Power Electronics and Electric Power, Muhammad H. Rashid, Prentice Hall, 2004.
- [8] DA SILVA, Luiz Carlos. Dissertação de mestrado: “Efeitos das distorções harmônicas (tensões e correntes) e Desequilíbrios (Tensões) em Medidores Eletrônicos Trifásicos de Energia Elétrica Ativa”. UNESP, Ilha Solteira, São Paulo, 2008.
- [9] ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 5 – Sistemas de Medição. Resolução Normativa nº 424/2010.
- [10] A. Sannino, J. Svensson, T. Larsson, Review, Power-electronic solutions to power quality problems, 2003.
- [11] Analisador de Energia RE7000, Manual de Instalação e Operação, 2012.
- [12] ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 641/2014.
- [13] S.J. Champan, Electric Machinery Fundamentals, Fourth Edition, McGraw-Hill, New York, 2004.

ANEXO A

Diagrama unifilar parcial da planta industrial elétrica Bianchini S.A

