

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA  
ESPECIALIZAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

PAULO CÉSAR DOS SANTOS

**COMPENSAÇÃO REATIVA EM UMA INDÚSTRIA METALÚRGICA NA  
REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2013

PAULO CÉSAR DOS SANTOS

**COMPENSAÇÃO REATIVA EM UMA INDÚSTRIA METALÚRGICA NA  
REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA**

Monografia de Especialização apresentada ao  
Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
como requisito parcial para obtenção do título  
de “Especialista em Eficiência Energética”  
Orientador: Prof. Dr. Joaquim Eloir Rocha

CURITIBA

2013

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a DEUS, pelas pessoas maravilhosas que colocou no meu caminho e pela força para superar os momentos difíceis da vida.

Aos meus familiares, a minha mãe Maria Bernardino, as minhas irmãs Silmara e Rosangela, ao meu pai Elias Alexandre (em memória) e a todos meus familiares próximos por me ensinarem desde a infância que o conhecimento é o bem mais precioso na vida.

À minha futura esposa, Flávia Alves pelo apoio, carinho, incentivo e compreensão.

Ao Prof. Dr. Joaquim Eloir Rocha, pela orientação, pelos ensinamentos e por acreditar na minha capacidade de desenvolver este trabalho.

À empresa Solfus Engenharia e Conservação de Energia Ltda., por disponibilizar os equipamentos de medição de qualidade de energia e fornecer todo suporte necessário à conclusão deste trabalho.

À Minatti Fundação Técnica por permitir o desenvolvimento do estudo de caso em suas instalações bem como fornecer todas as informações solicitadas que constam neste trabalho.

Quanto mais aprendemos, descobrimos que sabemos menos, e amadurecer é desenvolver esta percepção que vai ao sentido oposto à arrogância. (Fábio Gonçalves, 2008)

## RESUMO

DOS SANTOS Paulo César, **COMPENSAÇÃO REATIVA EM UMA INDÚSTRIA METALÚRGICA NA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA**. 2013. 83 f. Monografia (Pós-Graduação em Eficiência Energética) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Este trabalho apresenta estudos teóricos e simulações computacionais sobre a compensação reativa em indústrias com altos níveis de correntes harmônicas. Expõe o projeto de filtros harmônicas sintonizados e dessintonizados, cálculos da frequência de ressonância da instalação industrial e apresenta um estudo de caso em uma indústria de fundição localizada na região metropolitana de Curitiba – PR.

**Palavras-chave:** Compensação Reativa. Harmônicas. Ressonância Elétrica. PTW32. Fornos a Indução.

## ABSTRACT

DOS SANTOS Paulo César, **REACTIVE COMPENSATION IN METALLURGICAL INDUSTRY IN THE METROPOLITAN REGION OF CURITIBA - PR.** 2013. 83 f. Monograph (Postgraduate Diploma in Energy Efficiency) - Academic Department of Electrical Engineering, Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2013.

This paper presents theoretical and computational simulations on the reactive compensation in industries with high levels of harmonic currents. Exposes the project of tuned and detuned harmonic filters, calculations of the resonance frequency of the industrial facility and presents a case study in a foundry industry located in the metropolitan region of Curitiba - PR.

Keywords: Reactive Compensation. Harmonics. Electrical resonance. PTW32. Induction furnaces.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Triângulo de potências .....	17
Figura 2 – Visualização Espacial das potências em um sistema com harmônicas ...	18
Figura 3 – Forma de Onda Distorcida .....	20
Figura 4 – Circuito Série e Gráfico de Impedância x Frequência .....	23
Figura 5 – Circuito Paralelo e Gráfico de Impedância x Frequência .....	24
Figura 6 – Capacitor com Tecnologia PPM.....	30
Figura 7 – Capacitor com Tecnologia Não-PPM .....	31
Figura 8 – Exemplo de Forno a Indução .....	33
Figura 9 – Forma de onda e espectro harmônico de corrente de um forno de indução .....	34
Figura 10 – Diagrama Unifilar geral simplificado .....	40
Figura 11 – Diagrama Unifilar geral simplificado com banco de capacitores .....	41
Figura 12 – Equipamento utilizado na medição.....	42
Figura 13 – Diagrama de Impedâncias da Instalação .....	57
Figura 14 – Diagrama da Instalação desenhado no PTW32.....	63
Figura 15 – Configuração da Barra de Entrada.....	64
Figura 16 – Configuração do Transformador 01.....	64
Figura 17 – Configuração harmônicas do Forno de Indução .....	65
Figura 18 – Configuração harmônicas das cargas do Transformador 01 .....	65
Figura 19 – Configuração do Banco de Capacitores.....	66
Figura 20 – Ferramenta Harmonic Analysis (HIWAVE).....	67
Figura 21 – Ferramenta Harmonic Analysis (HIWAVE).....	67
Figura 22 – Executando Harmonic Analysis (HIWAVE) .....	68
Figura 23 – Frequência de Ressonância com banco de capacitores de 140 kvar ....	68
Figura 24 – Forma de onda da tensão .....	69
Figura 25 – Espectro Harmônico com banco de capacitores de 140 kvar .....	69
Figura 26 – Frequência de Ressonância com banco de capacitores de 200 kvar ....	70
Figura 27 – Espectro Harmônico com banco de capacitores de 200 kvar .....	70
Figura 28 – Frequência de Ressonância com filtro de dessintonia .....	71
Figura 29 – Espectro Harmônico com filtro de dessintonia .....	71

Figura 30 – Frequência de Ressonância com filtro passivo .....	72
Figura 31 – Espectro Harmônico com filtro passivo .....	72
Figura 32 – Frequência de Ressonância sem compensação reativa .....	73
Figura 33 – Espectro Harmônico sem compensação reativa .....	73



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais .....	35
Tabela 2 – Valores de referência globais das distorções harmônicas individuais .....	35
Tabela 3 – Limites de distorção total de tensão .....	36
Tabela 4 – Limites de Distorção de Corrente para Sistemas de Distribuição (120 V até 69.000 V).....	37
Tabela 5 – Limites de Distorção de Corrente para Sistemas de Sub-transmissão (69.001 V até 161.000 V) .....	37
Tabela 6 – Limites de Distorção de Corrente para Sistemas de Transmissão (acima de 161.000 V), desprezando Geração e Cogeração .....	38
Tabela 7 – Análise da Distorção Harmônica Total (P95%) .....	50
Tabela 8 – Análise da Distorção Harmônica Total (P99%) .....	50
Tabela 9 –Distorção Harmônica Individual de Tensão – Fase A – Transf. 01.....	51
Tabela 10 – Distorção Harmônica Individual de Tensão – Fase B– Transf. 01.....	51
Tabela 11 – Distorção Harmônica Individual de Tensão – Fase C– Transf. 01.....	52
Tabela 12 –Distorção Harmônica Individual de Tensão – Fase A – Transf. 02.....	53
Tabela 13 – Distorção Harmônica Individual de Tensão – Fase B – Transf. 02.....	54
Tabela 14 – Distorção Harmônica Individual de Tensão – Fase C – Transf. 02.....	54
Tabela 15 – Frequência de Ressonância .....	58
Tabela 16 – Multas Por Excedente Reativo - 2013 .....	59
Tabela 17 – Distorção Harmônica Total de Tensão Simulação <i>PTW32</i> .....	74
Tabela 18 – Custos dos sistemas de compensação reativa .....	75
Tabela 19 – Payback descontado dos sistemas de compensação reativa .....	76

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	TEMA.....	13
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	13
1.3	PROBLEMA.....	14
1.4	OBJETIVOS.....	14
1.4.1	Objetivo Geral.....	14
1.4.2	Objetivos Específicos.....	14
1.5	JUSTIFICATIVA.....	15
1.6	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	15
1.7	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	COMPENSAÇÃO REATIVA.....	17
2.2	HARMÔNICAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS.....	19
2.2.1	Causas e Efeitos.....	20
2.3	RESSONÂNCIA.....	22
2.4	REATOR ANTI-RESSONANTE OU FILTRO DE DESSINTONIA.....	25
2.5	FILTRO PASSIVO SINTONIZADO E AMORTECIDO.....	27
2.6	CAPACITORES PPM E NÃO-PPM.....	29
2.7	CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS FORNOS A INDUÇÃO.....	33
2.8	LIMITES DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS.....	34
3	ESTUDO DE CASO: COMPENSAÇÃO REATIVA EM UMA INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO.....	39
3.1	SISTEMA ELÉTRICO.....	39
3.2	EQUIPAMENTO UTILIZADO NA MEDIÇÃO.....	41
3.3	ANÁLISE DOS DADOS DA MEDIÇÃO.....	43
3.3.1	Análise dos Níveis de Distorção Harmônica.....	49
3.4	CÁLCULO DA FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA DA INSTALAÇÃO.....	57
3.5	COMPENSAÇÃO REATIVA.....	59
3.6	DIMENSIONAMENTO DO REATOR DE DESSINTONIA.....	61
3.7	DIMENSIONAMENTO DO FILTRO SINTONIZADO NA 5ª HARMÔNICA.....	62
3.8	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.....	63

3.8.1	Frequência de Ressonância.....	66
3.8.2	Inserção do Reator de dessintonia.....	70
3.8.3	Inserção do Filtro Passivo de 5ª ordem.....	71
3.8.4	Sem compensação reativa.....	72
3.9	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO.....	73
3.10	CUSTOS DOS SISTEMAS APRESENTADOS.....	75
3.11	ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA.....	75
4	CONCLUSÃO.....	78
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80

## 1 INTRODUÇÃO

A compensação reativa em indústrias é necessária para limitar o consumo excedente reativo e evitar o pagamento de multas à concessionária, conforme estabelece a resolução normativa nº 414/2010 o limite mínimo do fator de potência de referência, indutivo ou capacitivo, deve ficar igual ou acima 0,92. Para realizar a compensação reativa normalmente são instalados capacitores na indústria, porém esta solução básica é aplicada sem o cuidado necessário com a qualidade de energia. É comum a compensação reativa com a finalidade única de elevar o fator de potência aos níveis de referência com a instalação de bancos de capacitores puros, ou seja, sem filtros harmônicas ou dessintonizados e sem um estudo do ponto de ressonância do sistema. Entretanto, com o advento da eletrônica de potência, que incluiu nas instalações cargas e equipamentos com características não lineares (que geram elevados níveis de distorção harmônica na corrente) como, por exemplo, os conversores de frequência, fontes chaveadas e sistemas de partida de motores suaves (soft-starter) a compensação reativa simples vem ocasionando problemas operacionais às indústrias relacionados a uma má qualidade de energia.

Segundo Dias (1998, p. 14), “qualquer distúrbio ou ocorrência manifestada nos níveis de tensão, nas formas de onda de tensão ou corrente que possam resultar em insuficiência, má operação, falha ou defeito permanente em equipamentos de um sistema elétrico é considerado um problema de qualidade de energia”. Fenômenos como a queima prematura de capacitores, disparo intempestivos de proteções e perda de programação de controladores lógicos programáveis (CLP's) são alguns casos práticos que podem ser resultado de uma qualidade de energia deficiente.

Assim vários trabalhos acadêmicos têm sido desenvolvidos com a finalidade de difundir o conhecimento da compensação reativa visando, além da elevação do fator de potência, uma melhora na qualidade de energia.

Além disso, grupos de estudos no Brasil e no exterior vêm desenvolvendo normas e recomendações para estabelecer um limite máximo de injeção de correntes harmônicas em sistemas elétricos industriais. No Brasil destaca-se o módulo oito dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST que trata exclusivamente de qualidade de energia elétrica, o qual tem como principal objetivo estabelecer os procedimentos relativos à qualidade de ener-

gia elétrica – QEE, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado (PRODIST, 2010). No exterior destaca-se a norma IEEE-519 de 1992, que estabelece os limites máximos de distorção harmônica de tensão e corrente de acordo com os níveis de tensão e de curto circuito da instalação industrial.

Tendo em vista o exposto acima, observa-se que a correta forma de fazer a compensação reativa é através do estudo dos níveis de distorções harmônicas presentes na instalação e suas interações com os capacitores e demais equipamentos elétricos da indústria, caso esta instalação esteja em fase de projeto, sendo possível modelar as principais cargas geradoras de harmônicas e estudar seus efeitos. Neste trabalho buscou-se, além da contextualização teórica, um estudo de caso de compensação reativa em uma indústria de fundição que possui um forno a indução que injeta uma grande quantidade de corrente harmônica no sistema elétrico, devido a sua característica de acionamento.

## **1.1 TEMA**

Estudo da compensação reativa em sistemas elétricos industriais na presença de harmônicas.

## **1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA**

Este trabalho tem como foco principal a compensação reativa em indústrias atendidas em 13,8 kV e 34,5 kV e que possuem em suas instalações equipamentos que injetam no sistema alto conteúdo harmônico de corrente, em especial indústrias metalúrgicas com fornos de indução.

### **1.3 PROBLEMA**

O problema a ser abordado relaciona-se a como projetar a compensação reativa em indústrias com forno de indução e alto conteúdo harmônico evitando a ressonância elétrica e danos aos demais equipamentos da instalação.

### **1.4 OBJETIVOS**

#### **1.4.1 Objetivo Geral**

Elaboração de estudo teórico, projeto e simulação computacional da compensação reativa em indústria com forno de indução e alto conteúdo harmônico.

#### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Estudar a compensação reativa.
- Estudar os harmônicas em sistemas elétricos industriais e o fenômeno da ressonância elétrica.
- Estudar a modelagem teórica de sistemas elétricos industriais, calcular as frequências de ressonância e projetos de compensação reativa.
- Desenvolver o estudo de caso em uma indústria metalúrgica com forno de indução e alto conteúdo harmônico.
- Elaborar o projeto de compensação reativa com filtros sintonizados e dessintonizados para a indústria em estudo.
- Simular a instalação em questão com auxílio de ferramenta computacional.
- Discutir a aplicabilidade prática, a viabilidade econômica e os benefícios para a instalação estudada.

## 1.5 JUSTIFICATIVA

A compensação reativa em sistemas elétricos industriais tornou-se complexa com o advento da eletrônica de potência e da automação industrial, as quais introduziram nas instalações equipamentos que geram altos níveis de distorções harmônicas de corrente que ao circularem na instalação causam alterações nos níveis de distorções harmônicas na tensão. A compensação reativa realizada com a simples introdução de capacitores ao sistema elétrico industrial tornou-se inadequada devido aos problemas causados com as interações entre as correntes harmônicas e os capacitores. O principal problema é a ocorrência da ressonância elétrica que causa perda da vida útil total ou parcial dos capacitores, disparos intempestivos das proteções de sobrecorrente, aumento das perdas elétricas em alimentadores e transformadores e redução nos indicadores de qualidade de energia na instalação industrial. Estes fatos justificam a necessidade de desenvolver um estudo mais aprofundado da compensação reativa quando a instalação possui altos níveis de distorção harmônica que é fato em indústrias de fundição com fornos a indução.

## 1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho será desenvolvido em duas etapas. Em um primeiro momento será feita uma abordagem teórica a respeito da compensação reativa, harmônicas em sistemas elétricos industriais, normas e conceitos, ocorrência e efeitos da ressonância elétrica, características elétricas dos fornos a indução, modelagem teórica de sistemas industriais e dimensionamento de filtros sintonizados e dessintonizados com embasamento em livros, dissertações, teses, normas, artigos técnicos *on-line* e publicações científicas em revistas especializadas.

No segundo momento será abordado o estudo de caso em uma indústria de fundição da região metropolitana de Curitiba – PR com levantamentos de dados, medições com analisador de energia, simulações em programa computacional (PTW32), escolha da melhor solução e análise da viabilidade técnica e econômica da solução apresentada.

## 1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho será constituído por quatro capítulos:

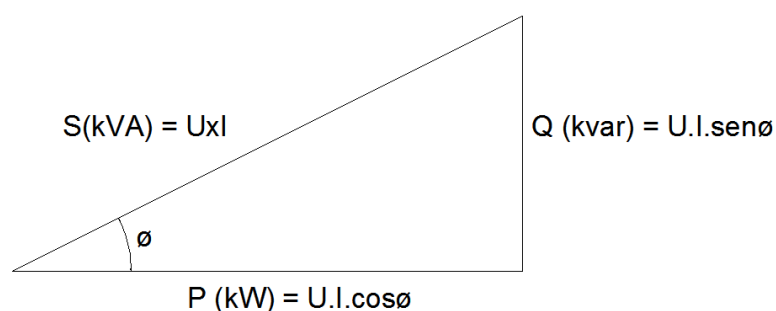
1. Introdução: apresentação da proposta definição do tema, objetivos e a estruturação de como o trabalho será desenvolvido.
2. Revisão bibliográfica: sobre compensação reativa, harmônicas em sistemas industriais, ressonância série e paralela, características elétricas dos fornos a indução e especificação de filtros sintonizados e dessintonizados.
3. Apresenta o estudo de caso em uma fundição com forno de indução e altos níveis de distorção harmônica.
4. Conclusão: discute os resultados do estudo prático.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 COMPENSAÇÃO REATIVA

Segundo Dias (1998, p. 35) “o fator de potência em um sistema senoidal puro (sem harmônicas) é a expressão do cosseno do ângulo formado entre os fatores que representam a potência aparente fornecida a uma carga, e a parcela desta potência que é efetivamente transformada em trabalho (também chamada de potência ativa)”. O triângulo das potências, representado na figura 1, mostra os principais elementos relacionados ao fator de potência.



**Figura 1 – Triângulo de potências**

**Fonte: Dias, (1998, p.35).**

Tendo em vista este conceito fundamental, para realizar a compensação reativa é necessário diminuir o ângulo “ $\phi$ ”, pois, quando este ângulo tende à zero o resultado do cosseno tende a unidade. Como a potência reativa indutiva tem sinal oposto a potência reativa capacitiva, quando capacitores são adicionados ao sistema fornecem potência reativa capacitiva que somada à potência reativa indutiva reduz o ângulo “ $\phi$ ” elevando o fator de potência. A equação fundamental para cálculo da necessidade capacitiva é dada por:

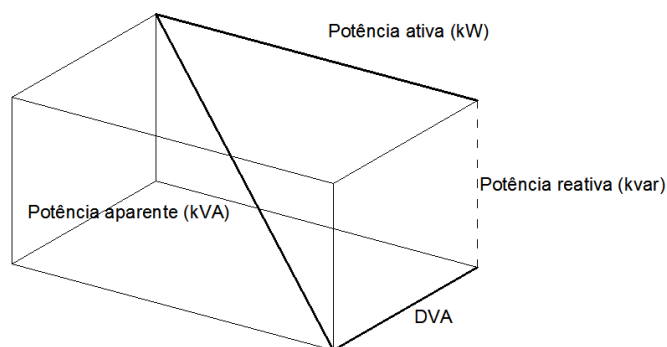
$$Q = P * \{tg(a \cos \phi_1) - tg(a \cos \phi_2)\} \quad (1)$$

Onde:

Q – Potência Reativa (kvar)

P – Potência ativa (kW)

Assim banco de capacitores, usados para compensação reativa fundamental, são essenciais para a operação econômica dos sistemas industriais que incluem cargas predominantemente indutivas e resistivas, além da função de elevar o fator de potência acima dos limites referenciados na legislação também trazem benefícios para instalação com a liberação de carga nos transformadores e diminuição da queda de tensão nas cargas. Porém com a introdução de cargas não lineares no sistema (cargas geradoras de harmônicas) o triângulo das potências sofre uma alteração, pois, para sustentar a distorção do sinal, cada harmônica necessita de certa quantidade de potência aparente. A figura 2 representa esta situação.



**Figura 2 – Visualização Espacial das potências em um sistema com harmônicas**

Fonte: Dias, (1998, p.38).

Assim, segundo Dias (1998 p. 39), “o fator de potência é o cosseno do ângulo “φ” somente para sistemas sem distorção harmônica”. Em um sistema com cargas não lineares, podem-se descrever dois tipos de fator de potência, o fator de potência

real e o fator de potência de deslocamento. O fator de potência real leva em consideração os ângulos de fase de cada harmônica e a potência reativa necessária para produzi-las. Já o fator de potência de deslocamento considera apenas a defasagem para a frequência fundamental (60 Hz).

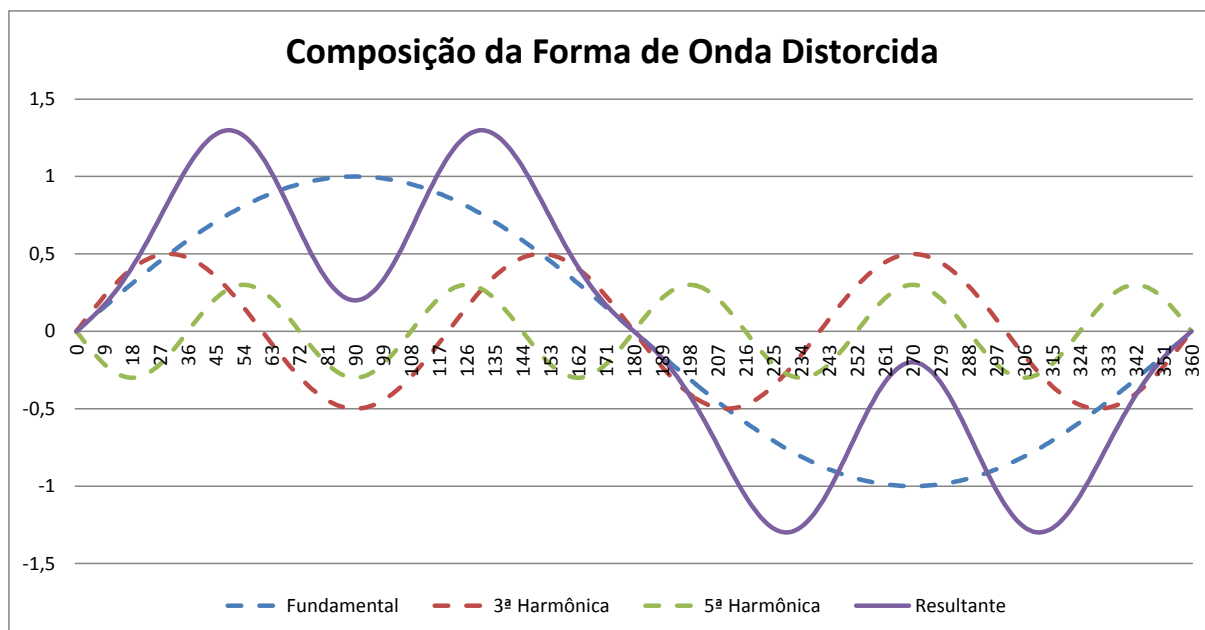
Segundo Sandoval (2007) a equação (2) traz a definição matemática do fator de potência real, onde são levados em consideração os ângulos de fase de cada harmônica.

$$fp = \frac{\sum_{n=1}^N V_n I_n \cos(\varphi_n)}{VI} \quad (2)$$

A compensação reativa através da aplicação da equação (1) é capaz de eliminar a multa por excedente reativo, pois irá elevar o fator de potência da instalação acima dos níveis de referência ( $fr \geq 0,92$ ), porém quanto mais significativa for a presença de harmônicas no sinal, maior será a diferença entre o fator de potência real (equação 2) e o fator de potência de deslocamento (equação 1).

## 2.2 HARMÔNICAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS

Cargas geradoras de harmônicas são equipamentos que possuem a característica de drenar da rede uma corrente distorcida, ou seja, não linear. Segundo Galhardo (2003, p.2), “a distorção é um efeito que ocorre na forma de onda de resposta, quando seu formato é modificado em relação à excitação”. A distorção de corrente é analisada matematicamente, através dos estudos das ondas não senoidais periódicas conhecida como análise de Fourier (LEMES, 2010).



**Figura 3 – Forma de Onda Distorcida**

Fonte: Adaptado de Chapman, (2002, p.2).

A figura 3 mostra uma forma de onda distorcida, que para este exemplo, é o resultado da soma da frequência fundamental com a terceira harmônica (amplitude 50%) e a quinta harmônica (amplitude 30%). As frequências harmônicas são múltiplos inteiros da frequência fundamental da fonte de alimentação. Na prática a forma de onda é bem mais complexa, já que conterà mais harmônica e uma relação de fase mais complexa.

### 2.2.1 Causas e Efeitos

Segundo Chapman (2002, p.3) "todas as cargas não lineares geram correntes harmônicas". Essas cargas podem ser monofásicas ou trifásicas. Os equipamentos como fontes chaveadas, reatores eletrônicos para iluminação fluorescente e pequenas unidades de alimentação ininterrupta são exemplos de cargas monofásicas não lineares. Equipamentos como conversores trifásicos de potência, acionamentos CC e CA, retificadores de grande potência e dispositivos a arco, são exemplos de cargas trifásicas não lineares.

O conhecimento do espectro harmônico é uma das mais importantes ferramentas quando se estuda e analisa um sistema elétrico que contem cargas não lineares, pois a partir do espectro harmônico se pode definir quais são os equipamentos que geram a maior quantidade de harmônicas e estabelecer uma análise mais aprofundada em busca de soluções para mitigação dos efeitos das correntes harmônicas na instalação. A seguir serão apresentados exemplos de cargas geradoras de harmônicas, monofásicas e trifásicas, e seu respectivo espectro harmônico característico.

Segundo Chapman (2002, p.4), “fontes chaveadas monofásicas, utilizadas em uma grande quantidade de equipamentos elétricos modernos (computadores pessoais, televisores etc) geram uma grande quantidade de harmônicas de ordem 3 e superiores”. Reatores para iluminação fluorescente também geram uma grande quantidade de harmônicas na corrente de alimentação, onde são comuns os harmônicas de ordem 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 e 17. Outras cargas monofásicas encontradas em instalações comerciais são os controladores de velocidade utilizados em equipamentos de ventilação e climatização de ambientes.

Em se tratando de instalações indústrias existe a predominância de cargas trifásicas geradoras de harmônicas. Conforme Lemes (2010) a incorporação da eletrônica de potência nas instalações industriais acarretou em uma injeção significativa de cargas não lineares principalmente com a finalidade de acionar e controlar motores de indução trifásicos e controlar processos de fundição de metais. Uma característica comum destes equipamentos é possuir na entrada conversores de corrente que, de forma geral, são normalmente alimentados por pontes trifásicas de 6 pulsos. Segundo Chapman (2002, p.5) “uma ponte trifásica de 6 pulsos produz harmônicas de ordem  $6n \pm 1$ ” e em teoria a amplitude de cada harmônica é proporcional à sua ordem, sendo a amplitude das harmônicas é significativamente reduzida utilizando ponte de 12 pulsos, onde as harmônicas características são de ordem  $12n \pm 1$ . Assim as harmônicas características de pontes trifásicas podem ser calculadas, segundo IEEE 519 (1992), utilizando a equação (3).

$$h = k_n \pm 1 \tag{3}$$

Onde:

h é a ordem harmônica (2,3,4,...)

$n$  é qualquer inteiro positivo

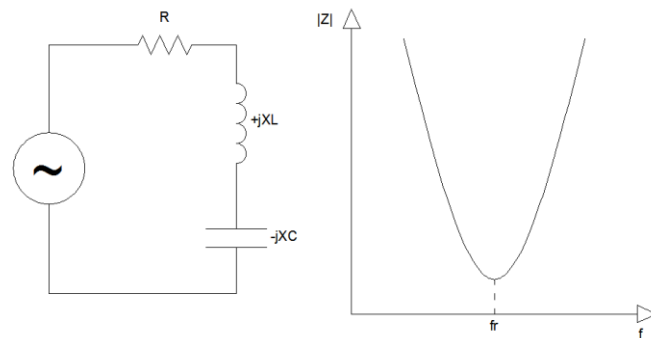
$k$  é o número de pulsos do retificador ou conversor

Estas cargas citadas anteriormente, normalmente possuem um baixo fator de potência e necessitam de compensação reativa para evitar a cobrança de multas por parte da concessionária, porém os bancos de capacitores puros podem potencialmente amplificar as correntes harmônicas através do efeito conhecido como ressonância entre o banco de capacitores e sistema elétrico industrial.

### 2.3 RESSONÂNCIA

Uma definição clássica de ressonância é que, para componentes ideais dos circuitos, a reatância indutiva ( $X_L$ ) aumenta diretamente com o aumento da frequência e a reatância capacitiva ( $X_C$ ) diminui diretamente com o aumento da frequência, na frequência de ressonância de um circuito LC (indutivo-capacitivo)  $X_L$  se iguala a  $X_C$ . Segundo (COTRIM, 2009, p.430) “se a frequência de ressonância ficar próxima da frequência de uma das correntes encontrados no espectro harmônico da carga haverá ressonância e como consequência a circulação de altas correntes nos capacitores e sobretensões”.

Segundo Dias (1998, p.45) “existem duas formas de ressonância, sendo elas denominadas ressonância série e ressonância paralela”. No caso da ressonância série, figura 4, a impedância total na frequência de ressonância se reduz a somente a resistência do circuito e nos casos onde estas componentes são pequenas, as correntes a frequência de excitação são grandes.



**Figura 4 – Circuito Série e Gráfico de Impedância x Frequência**

Fonte: Adaptado de Dias, (1998, p.46).

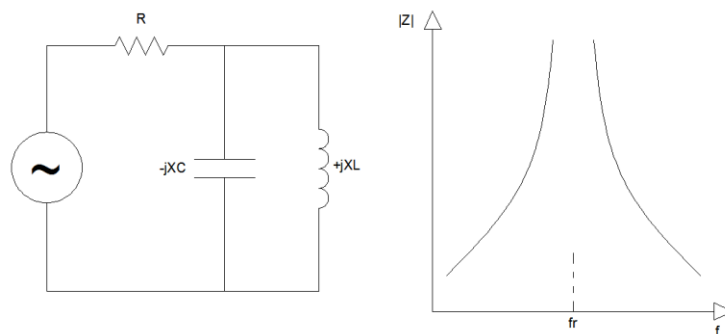
Na prática as condições de ressonância são limitadas pela fonte e se a capacidade de potência da fonte (MVA) não for muito grande comparada à capacidade do banco de capacitores (Mvar) a corrente harmônica fica dentro de limites toleráveis. Segundo Lemes (2010) a equação (4) indica qual é a frequência de ressonância série.

$$f_s = f_1 \sqrt{\frac{X_c}{X_t}} \quad (4)$$

Onde:

- fs – frequência de ressonância série
- f1 – frequência fundamental
- Xc – reatância do banco de capacitores
- Xt – reatância do transformador

Já na ressonância paralela a impedância na frequência de ressonância é muito grande, conforme pode ser observado na figura 5.



**Figura 5 – Circuito Paralelo e Gráfico de Impedância x Frequência**

**Fonte: Adaptado de Dias, (1998, p.46).**

A impedância equivalente do circuito LC paralelo é dada pela equação (5).

$$Z(h)_{eq} = \frac{jX(h)_L * (-jX(h)_C)}{jX(h)_L + (-jX(h)_C)} \quad (5)$$

Assim quando o resultado da soma das impedâncias do denominador da equação (5) são muito pequenas a impedância equivalente é muito grande. Nessa frequência harmônica poderá ocorrer a ressonância se no sistema elétrico existir uma fonte harmônica desta ordem mesmo que com amplitude pequena.

No sistema industrial quando são empregados bancos de capacitores puros para compensação reativa pode ocorrer tanto à ressonância série quanto paralela, ou até mesmo uma combinação das duas. E conforme Dias (1998, p.48) o resultado pode ser uma quantidade excessiva de fluxo de corrente harmônica e/ou aparecimento de sobretensões perigosas no sistema.

Segundo Cotrim (2009, p.430) encontramos a equação (6) e (7) que trazem as fórmulas para o calculo da frequência de ressonância, onde só é necessário conhecer a potência de curto circuito no ponto de instalação dos capacitores (Pcc) e a potência do banco de capacitores (Q).



$$h_r = \sqrt{\frac{P_{cc}}{Q}} \quad (6)$$

$$f_r = f_0 * h_r \quad (7)$$

Onde:

$P_{cc}$  – Potência de Curto-Circuito no ponto de instalação dos capacitores (kVA)

$Q$  – Potência reativa do banco de capacitores (kvar)

$f_r$  – frequência de ressonância (Hertz)

$f_0$  – frequência fundamental (Hertz)

A seguir serão apresentadas duas técnicas para minimizar e eliminar os efeitos maléficos da ressonância, são elas a inserção de um reator anti-ressonante, também conhecido como filtro de dessintonia, e a utilização de filtros passivos sintonizados.

## 2.4 REATOR ANTI-RESSONANTE OU FILTRO DE DESSINTONIA

Segundo Dias (1998, p.185) “um reator anti-ressonante ou filtro de dessintonia é um reator que é inserido em série com o capacitor e tem a finalidade de deslocar o ponto de ressonância do sistema para qualquer outra frequência não produzida pelas cargas não lineares”. Segundo Pereta (2009) com a inserção deste reator obtém-se um circuito ressonante com uma frequência de ressonância para qual o sistema oferece um caminho de baixa impedância e sintonizada abaixo da primeira harmônica existente.

Conforme Lemes (2010) o estudo prévio para projeto do filtro de dessintonia envolve medição e simulação quando temos um nível de distorção total de tensão elevado. Segundo a norma internacional IEEE 519 (1992) é tolerada uma distorção total de demanda (TDD) de até 5 %.

Tendo em vista que a maioria das cargas possui um espectro harmônico conhecido, os fabricantes de filtros de dessintonia buscaram padronizar a impedância dos reatores.

A convenção adotada para o dimensionamento do reator é relacionar a impedância do reator a do capacitor na frequência fundamental. A relação das duas impedâncias definirá a especificação do reator (COTRIM, 2009, p.431).

As equações (8) e (9) trazem o método para o cálculo do fator de dessintonia (FD). Segundo Lemes (2010, p.85) “quanto menor o fator de dessintonia maior a frequência de ressonância entre o indutor e o capacitor, isso mostra que estamos mais próximo da harmônica característica do sistema”.

$$FD = \frac{Z_L}{Z_C} \quad (8)$$

$$FD = \frac{2\pi f L}{\frac{1}{2\pi f C}} = 4\pi^2 f^2 * LC \quad (9)$$

Onde:

L – Indutância (Henry)

C – Capacitância (Faraday)

f – frequência fundamental (Hertz)

ZL – Impedância Indutiva (Ohms)

ZC – Impedância Capacitiva (Ohms)

Conforme Lemes (2010, p.86) os fatores de dessintonia mais utilizados são FD=0,07 (227 Hz) e FD=0,14 (160 Hz). Porém existem outras duas frequências que são possíveis de encontrar com alguns fabricantes, são elas FD=0,06 (245 Hz) e FD=5,67 (252 Hz). Caso nenhuma dessas frequências se enquadre no projeto é possível construir sob encomenda reatores para esta aplicação, porém o custo será mais elevado.

Com a instalação de um reator em série com o capacitor existe uma elevação de tensão permanente no capacitor, ou seja, os capacitores aplicados sem filtro de dessintonia e dimensionados para a tensão nominal da rede não poderão ser utilizados em sistemas anti-ressonantes para a mesma instalação. A equação (10) traz a tensão nos terminais do capacitor do filtro de dessintonia.

$$U_{CAP} = \frac{U_{REDE}}{1 - FD} \quad (10)$$

Onde:

$U_{cap}$  – Tensão no capacitor (Volts)

$U_{rede}$  – Tensão da Rede (Volts)

## 2.5 FILTRO PASSIVO SINTONIZADO E AMORTECIDO

Filtros sintonizados são circuitos RLC ressoantes série que, na frequência de sintonia ou ressonância apresentam baixa impedância resistiva (LEMES, 2010). Segundo Rubens (2003) para frequências menores que a frequência de ressonância esses filtros são capacitivos e para frequência maiores que a frequência de ressonância são indutivos. Ainda segundo Rubens (2003) os filtros amortecidos são circuitos formados por capacitores, indutores e resistores em diferentes combinações que oferecem baixa impedância em uma larga faixa de frequência. Neste trabalho será apresentado o equacionamento para dimensionamento do filtro passivo sintonizado, por ser mais utilizado na prática.

Segundo Dias (1998) e Cotrim (2009) a frequência de ressonância série do filtro de harmônicas deve ser selecionada ligeiramente inferior à harmônica que se deseja filtrar, ou seja, um filtro de 5ª harmônica deve ser sintonizado em 4,7 (282 Hz) ou 4,8 (288 Hz). Isto garante que boa parte das correntes harmônicas circule pelo filtro e também permite uma pequena margem de erro dentro do modelo do sistema e tolerância na fabricação dos componentes do filtro.

Conforme Lemes (2010, p.75) “a frequência angular de ressonância do circuito RLC depende apenas dos parâmetros L e C do circuito e pode ser obtida pela equação (11)”.

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (11)$$

Onde:

$\omega_o$  - Frequência angular de ressonância do circuito RLC

Outro conceito abordado quando são estudados filtros passivos é o fator de qualidade que pode ser definido como a relação entre a máxima energia armazenada nos componentes (reator e capacitor) e a energia total dissipada (resistor) por período, tal parâmetro é geralmente expresso pela letra Q e pode ser calculado pela equação abaixo (LEMES, 2010). Segundo Tavares (2011) o fator de qualidade (Q) de um filtro sintonizado é alto, o que representa que os mesmos possuem uma sintonia bem definida, os valores típicos dos fatores de qualidade desses filtros situam-se na faixa de 30 a 60.

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R} \quad (12)$$

Onde:

Q – Fator de qualidade do filtro

Para o dimensionamento do filtro sintonizado é necessário, primeiramente, definir a potência reativa ( $Q_C$ ) necessária para elevar o fator de potência da instalação aos níveis de referência na frequência fundamental ( $f_0$ ), a partir da potência reativa e utilizando a equação (13) calcula-se a capacitância do filtro (C) (RUBENS et al, 2003, p.220).

Conhecendo o espectro harmônico da instalação e qual frequência harmônica é predominante no sistema define-se qual a frequência se deseja filtrar, por

exemplo, para um filtro de 5ª harmônica a frequência de sintonia selecionada pode ser 282 Hz ou 288 Hz, a partir da equação (14) calcula-se o valor da indutância do reator do filtro passivo sintonizado.

$$C = \frac{Q_c}{2\pi f_0 V^2} \quad (13)$$

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_s^2 C} \quad (14)$$

Onde:

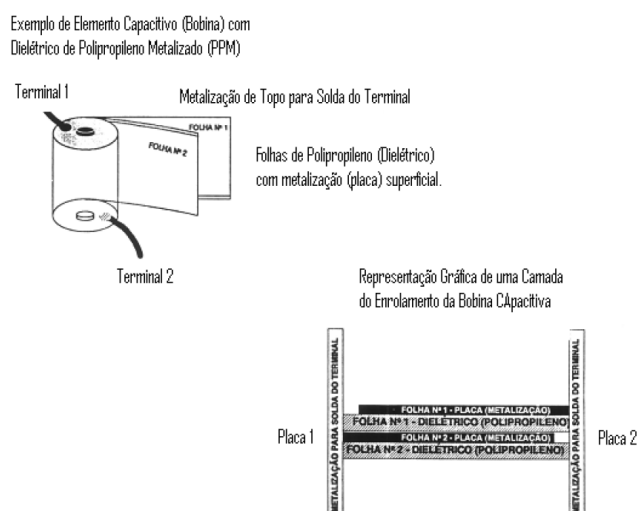
$f_s$  – frequência de sintonia do filtro de harmônicas

Deve-se considerar ainda que o capacitor do filtro sintonizado estará todo o tempo submetido a uma sobrecorrente a qual é resultado da soma vetorial da corrente fundamental com a corrente da harmônica de sintonia, portanto é necessário um estudo sobre qual o tipo de material deverá ser utilizado na construção do capacitor. A seguir serão mostrados dois tipos de capacitor: com tecnologia de dielétrico de polipropileno metalizado (PPM) e os Não-PPM.

## 2.6 CAPACITORES PPM E NÃO-PPM

Segundo IESA (2013) os capacitores PPM utilizam na composição do dielétrico um filme de polipropileno metalizado este tipo de capacitor é comumente encontrado em baixas tensões e também utilizado em larga escala. Na construção deste tipo de capacitor cada filme de polipropileno possui em uma das suas superfícies uma fina película de metalização com liga de alumínio-zinco, conforme pode ser observado na figura 6. Os capacitores PPM podem ser fabricados a seco (elemento

envolto em resina epóxi) ou imerso em óleo onde os elementos ficam com as superfícies externas imersas em óleo.



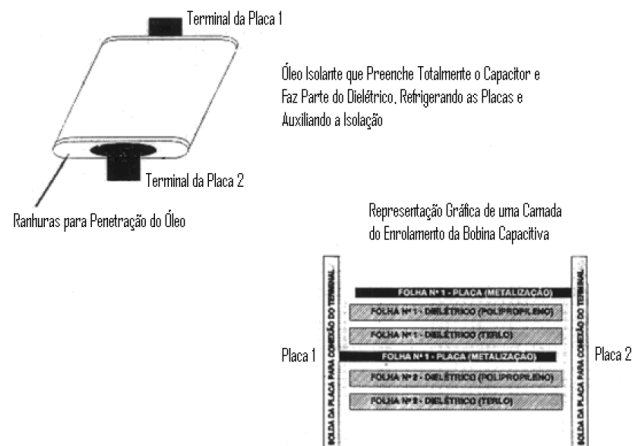
**Figura 6 – Capacitor com Tecnologia PPM**

Fonte: IESA, (2013, p.3).

Conforme Lemes (2010, p.68) tanto os capacitores a seco quanto os imersos em óleo quando submetidos a condições adversas como: sistema com alta circulação de correntes harmônicas, surtos de tensão, sobretensões de regime, alta temperatura ambiente etc., os pontos de conexão elétrica do capacitor e suas placas tendem a apresentar um ou mais pontos de auto-regeneração, ou seja, transição de estado do material da placa do condutor para o isolante, o que acarreta em uma diminuição da capacidade de potência do capacitor e crítica diminuição na vida útil do equipamento.

Segundo IESA (2013) os capacitores com tecnologia Não-PPM são fabricados utilizando dielétrico com duas folhas de polipropileno imersos em óleo biodegradável e duas placas de alumínio como condutoras, conforme pode ser observado na figura 7.

Exemplo de Elemento Capacitivo (Bobina) com  
Dieletrico Duplo - Placa de Folha de Alumínio - Impregnado à óleo



**Figura 7 – Capacitor com Tecnologia Não-PPM**

**Fonte: IESA, (2013, p.4).**

Essa diferença construtiva torna o capacitor Não-PPM robusto e com capacidade de suportar as condições adversas do sistema elétrico citadas anteriormente. Abaixo no quadro 1 pode-se observar um comparativo técnico entre os capacitores PPM e os Não-PPM bem como as vantagens do Não-PPM.

CARACTERÍSTICA	CAPACITOR PPM	CAPACITOR NÃO PPM	VANTAGEM NÃO PPM
Dielétrico (Tensão Suportável)	01 camada de isolamento sem participação do óleo isolante na composição	02 camadas de folhas com participação do óleo isolante na composição	Dupla isolamento, maior tensão suportável, eliminação de descargas parciais pontuais
PLACAS (Capacidade de Condução de Corrente)	Placa (condutor) de espessura média igual a 0,02 $\mu\text{m}$	Placa (condutor) de espessura média igual a 5,0 $\mu\text{m}$	Capacidade de condução de corrente extremamente maior
ÓLEO (Dissipação de calor e eliminação de pontos de alto aquecimento)	Tem contato somente com as superfícies externas (não tem contato com placas e dielétrico)	Penetra totalmente nas placas e dielétrico	Melhor refrigeração do dielétrico e placas, eliminação de pontos quentes localizados

**Quadro 1 – Comparativo técnico capacitores PPM e Não-PPM.**

Fonte: IESA (2013, p.6)



## 2.7 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS FORNOS A INDUÇÃO

O forno a indução é utilizado em larga escala na indústria metalúrgica principalmente para fusão de metais e tratamento térmico. Segundo Omori e Ortega (2006) o número de fornos a indução conectados ao sistema de distribuição da COPEL tem crescido devido ao aumento da reciclagem do lixo metálico e também pelo custo benefício de sua utilização. O funcionamento deste equipamento é baseado na Lei de *Faraday* de indução eletromagnética e conforme Dias et al (2005) o aquecimento nos fornos a indução ocorre quando a tem-se uma fonte aplicando corrente alternada a uma bobina de cobre, sendo o fluxo de corrente criador do campo eletromagnético, se um material condutor é colocado no centro desta bobina uma corrente elétrica será induzida no material causando o aquecimento. A figura 8 traz o exemplo de um forno de indução.



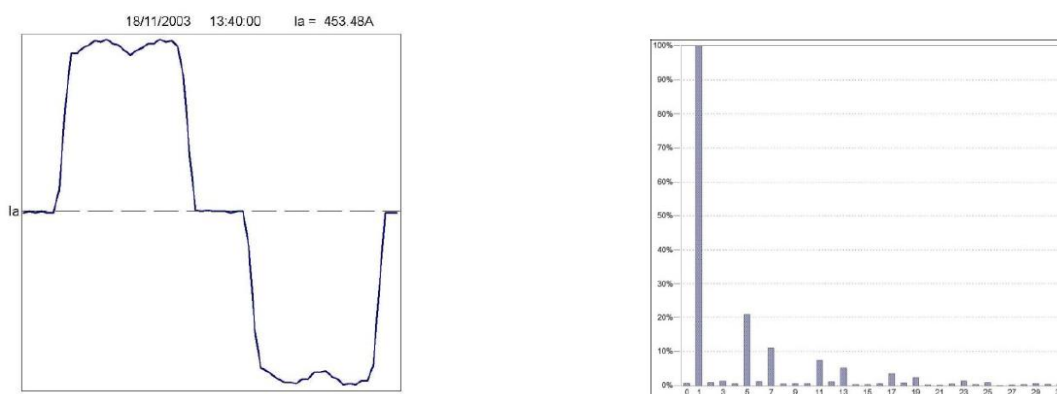
**Figura 8 – Exemplo de Forno a Indução**

**Fonte: Arquivo da Empresa Minatti e Fundição Ltda**

Ainda segundo Dias et al, (2005) a frequência de oscilações da corrente afeta a profundidade na qual a corrente flui, portanto a frequência de operação do forno

a indução depende da finalidade do processo. Para derretimento e forja a frequência escolhida é 5 kHz, e para endurecimento e solda oscila entre 400 e 500 kHz.

Assim é necessário controlar a potência injetada e a frequência do forno de indução. Para tanto se utiliza um acionamento elétrico através de um conversor estático controlado (retificador) que pode ser de 6 pulsos, 12 pulsos e 24 pulsos. Segundo Tavares (2011, p.28) “além das harmônicas características presentes no retificador de 6 pulsos e 12 pulsos também pode-se observar o aparecimento de harmônicas de ordem par, pois a simetria de meia onda não ocorre perfeitamente nos dois semi-ciclos (positivo e negativo)”. A figura 9 apresenta a forma de onda da corrente de entrada e o espectro harmônico da corrente de um forno de indução de 6 pulsos, totalmente controlado com potência de 400 kW ligado em 460 V.



**Figura 9 – Forma de onda e espectro harmônico de corrente de um forno de indução**  
**Fonte: Tavares (2011, p.29)**

## 2.8 LIMITES DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Atualmente não existem normas nacionais que estabelecem limites de distorção harmônica nas instalações industriais. No Brasil utiliza-se o Prodist - Módulo 8 que traz na tabela 1 os valores de referência para as distorções harmônicas totais de tensão (DTT) que devem ser adotadas pela rede de distribuição, estes valores servem para referência do planejamento elétrico em termos de qualidade de energia

elétrica (QEE). Já a tabela 2 traz os valores de referência para distorções harmônicas individuais de tensão.

**Tabela 1 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais**  
(em percentagem da tensão fundamental)

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

Fonte: Prodinst – Módulo 8 (PRODIST, 2010)

**Tabela 2 – Valores de referência globais das distorções harmônicas individuais**  
(em percentagem da tensão fundamental)

(continua)

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

4	1,5	1	1,5	0,5
6	1	0,5	1	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
>12	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: Prodinst – Módulo 8 (PRODIST, 2010)

Como referência normativa internacional o *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* apresenta a norma IEEE-519 publicada em 1992 onde são descritos os requisitos e práticas recomendadas para controle de harmônicas em sistemas elétricos de potência. Nesta norma a interface entre alimentação e carga é descrita como *point of common coupling (PCC)* ou ponto de acoplamento comum (PAC) e os limites são estabelecidos para este ponto em regime permanente, ou seja, condições em regimes transitórios podem exceder os limites estabelecidos pela norma, outro conceito importante desta norma é no que a mesma trata da distorção total de demanda, ou seja, o valor de distorção harmônica total está sempre referenciado a corrente de carga (TDD) e não a corrente nominal. A tabela 3 traz os limites para distorção total de tensão.

**Tabela 3 – Limites de distorção total de tensão**

Tensão do Barramento (PAC)	Distorção Individual de Tensão (%)	Distorção Total de Tensão (%)
69 kV e abaixo	3	5
69,001 kV até 161 kV	1,5	2,5
161,001 kV e acima	1	1,5

Fonte: IEEE-519 (1992)

As tabelas 4,5 e 6 trazem os limites de distorção harmônica total de corrente. Esses limites são baseados na relação entre a fundamental da corrente de carga e a corrente de curto circuito no PAC e variam de acordo com o nível de tensão e o nível de corrente de curto circuito.

**Tabela 4 – Limites de Distorção de Corrente para Sistemas de Distribuição (120 V até 69.000 V)**

Máxima Distorção da Corrente Harmônica em Percentual da Corrente de Carga (IL)						
Icc / IL	Harmônica Individual					TDD
	< 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	
< 20*	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20 < 50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50 < 100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100 < 1000	12	5,5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Harmônicas pares são limitadas a 25 % do nível definido acima para harmônicas ímpares

Distorções de corrente que resultam em um deslocamento CC, por exemplo, conversor de meia onda, não são definidas.

\* Todo equipamento de geração de energia é limitado a estes valores de distorção de corrente, independentemente do efetivo Icc / IL.

Fonte: IEEE-519 (1992)

**Tabela 5 – Limites de Distorção de Corrente para Sistemas de Sub-transmissão (69.001 V até 161.000 V)**

Máxima Distorção da Corrente Harmônica em Percentual da Corrente de Carga (IL)						
Icc / IL	Harmônica Individual					TDD
	< 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	
< 20*	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
20 < 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4
50 < 100	5	2,25	2	0,75	0,35	6
100 < 1000	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5
> 1000	7,5	3,5	3	1,25	0,7	10

Harmônicas pares são limitadas a 25 % do nível definido acima para harmônicas ímpares

Distorções de corrente que resultam em um deslocamento CC, por exemplo, conversor de meia onda, não são definidas.

\* Todo equipamento de geração de energia é limitado a estes valores de distorção de corrente, independentemente do efetivo Icc / IL.

Onde

Icc	Máxima corrente de curto circuito no PAC
IL	Corrente de carga de demanda máxima (componente da frequência fundamental) no PAC

Fonte: IEEE-519 (1992)

**Tabela 6 – Limites de Distorção de Corrente para Sistemas de Transmissão (acima de 161.000 V), desprezando Geração e Cogeração**

Máxima Distorção da Corrente Harmônica em Percentual da Corrente de Carga (IL)						
lcc / IL	Harmônica Individual					TDD
	< 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	
< 50	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
≥ 50	3	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75
Harmônicas pares são limitadas a 25 % do nível definido acima para harmônicas ímpares						
Distorções de corrente que resultam em um deslocamento CC, por exemplo, conversor de meia onda, não são definidas.						
* Todo equipamento de geração de energia é limitado a estes valores de distorção de corrente, independentemente do efetivo lcc / IL.						
Onde						
	lcc	Máxima corrente de curto circuito no PAC				
	IL	Corrente de carga de demanda máxima (componente da frequência fundamental) no PAC				

**Fonte: IEEE-519 (1992)**

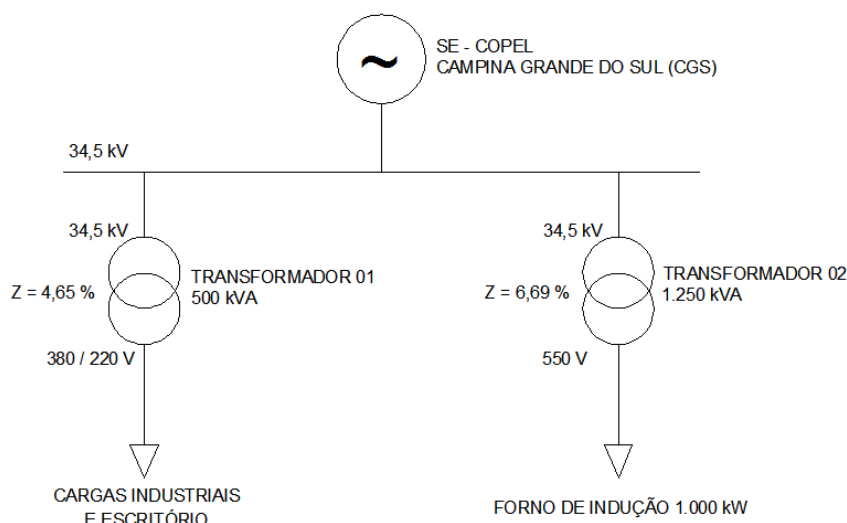
Nota-se que os limites de distorção total de tensão variam muito do Prodinst- módulo 8 para a IEEE-519, por exemplo, para sistema alimentados em baixa tensão a recomendação Brasileira estabelece o limite de até 10 % e a internacional até 5 %. Assim as recomendações devem ser utilizadas para avaliar o sistema industrial de maneira prévia e caso identificado algum nível de tensão ou corrente harmônica acima dos valores estabelecidos o correto é realizar um levantamento minucioso para verificar se tais níveis de distorção estão prejudicando o funcionamento de algum equipamento da empresa ou causando transtornos relacionados à má qualidade de energia.

### **3 ESTUDO DE CASO: COMPENSAÇÃO REATIVA EM UMA INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO**

A instalação em análise trata-se de uma indústria de fundição de peças em ferro cinzento e nodular que está localizada no município de Campina Grande do Sul Estado do Paraná e possui 25 anos de operação. A unidade fabril possui uma área de 12.000 m<sup>2</sup>, sendo 3.500 m<sup>2</sup> de área construída, e capacidade para produzir 400 toneladas mensais. Para atender as necessidades de expansão, em 2004 foram realizados grandes investimentos inclusive com a aquisição de um forno de indução de potência de 1.000 kW.

#### **3.1 SISTEMA ELÉTRICO**

A indústria possui alimentação em média tensão através do sistema da concessionária em 34,5 kV (estrela) oriundo da Subestação de Campina Grande do Sul (SE-CGS). Internamente a planta possui dois transformadores, o primeiro com potência de 500 kVA e relação 34,5 kV (estrela) para 380/220 V (estrela aterrado) com impedância percentual de 4,65 % que atende as cargas minoritárias da fábrica/escritório e o segundo com potência de 1.250 kVA e relação 34,5 kV (estrela aterrado) para 550 V (delta) com impedância percentual de 6,69 % que atende exclusivamente o forno de indução, conforme ilustra a figura 10.



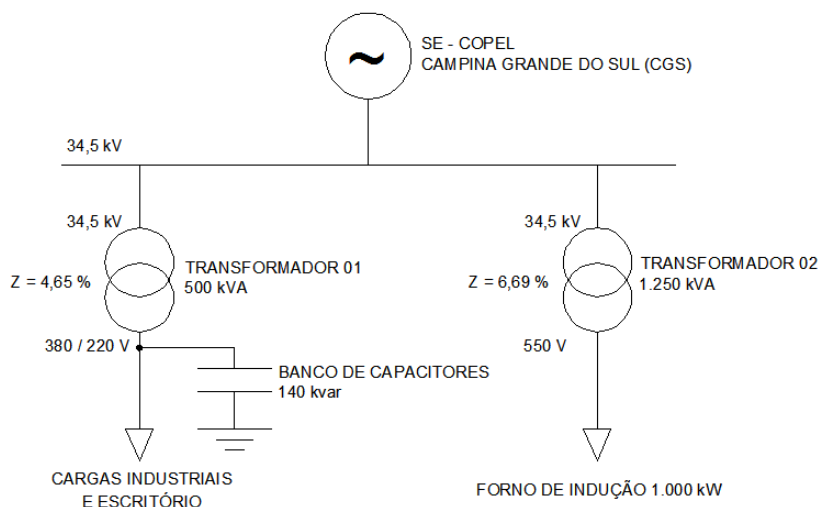
**Figura 10 – Diagrama Unifilar geral simplificado**

**Fonte: Autoria própria**

O forno de indução é trifásico, tem potência nominal de 1.000 kW, é alimentado através de um retificador controlado de 6 pulsos, tensão nominal de 550 V e é utilizado para derretimento de ferro.

Com a finalidade de elevar o fator de potência aos níveis de referência estabelecidos pela Resolução Homologatória 414/2010 (RN 414, 2010), foi instalado na unidade fabril em 2009 um banco de capacitores de 140 kvar/380 V na baixa tensão do transformador 01. Sendo que os capacitores não possuem nenhum tipo de filtro harmônico. Para montagem do banco de capacitores foram utilizados cinco células capacitivas trifásicas de 25 kvar / 380 V, uma célula de 10 kvar / 380 V, e uma célula de 5 kvar / 380 V, onde a tecnologia construtiva dos capacitores é PPM e a ligação interna é trifásico delta. A figura 11 ilustra o sistema elétrico com o banco de capacitores instalado.





**Figura 11 – Diagrama Unifilar geral simplificado com banco de capacitores**

**Fonte: Autoria própria**

Em visita realizada à unidade foi constatado junto à equipe de manutenção que as células capacitivas apresentam uma vida útil média de 180 dias e ainda o pagamento de excedente reativo a concessionária. Tendo em vista este fato, decidiu-se realizar medições dos parâmetros elétricos (tensão, corrente, fator de potência, distorção harmônica de tensão e corrente) na baixa tensão dos transformadores 01 e 02, para verificar qual a melhor forma de se fazer a compensação reativa da instalação.

### 3.2 EQUIPAMENTO UTILIZADO NA MEDIÇÃO

As medições efetuadas no sistema elétrico compreenderam registros de tensão (fase e neutro), corrente por fase e trifásica em regime permanente, potência ativa por fase e trifásica, fator de potência (deslocamento entre tensão e corrente) e distorção harmônica até a 50ª ordem, simultaneamente na baixa tensão de ambos transformadores. O equipamento utilizado foi o analisador de redes modelo: AR5-L, fabricante: Circuitor – Espanha, conforme ilustra a figura 12. As características técnicas encontram-se no Quadro 2. Este equipamento foi cedido pela empresa de con-

sultoria Solfus Engenharia e Conservação de Energia Ltda, com sede em Curitiba-PR.



**Figura 12 – Equipamento utilizado na medição**

**Fonte: Autoria própria**

#### **Quadro 2 – Características Técnicas:**

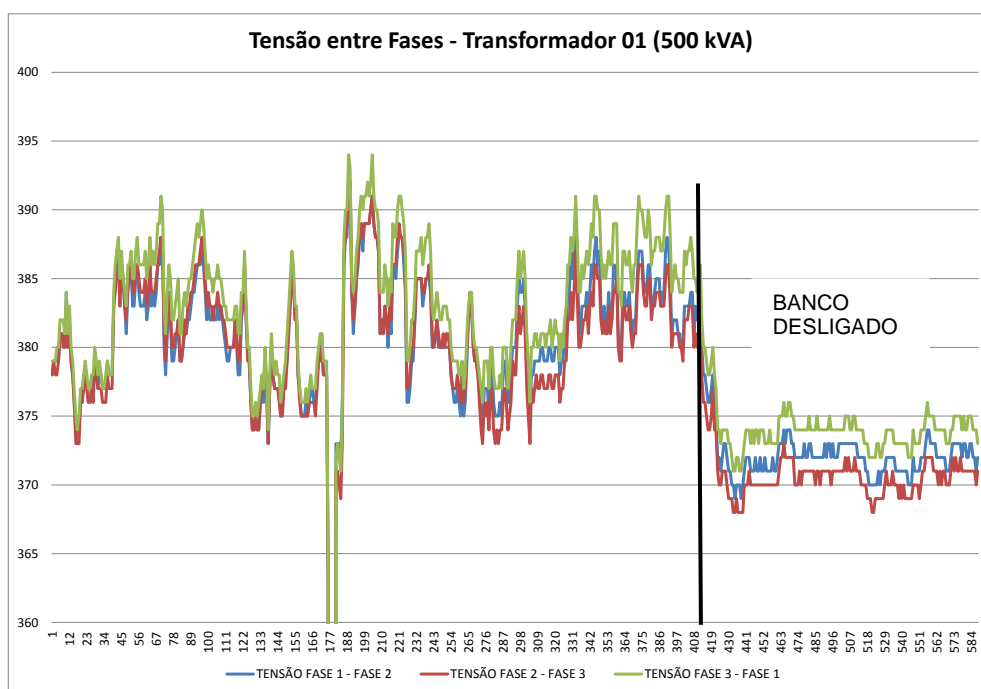
Tensão de Alimentação:	100-240 Vca
Frequência:	45-65 Hz
Faixa de Medida de Tensão:	20 - 500 Vca fase-neutro
Faixa de Medida de Corrente:	1 – 20.000 A
Consumo:	15 VA
Temperatura de trabalho:	0 – 40 ° C
Precisão (Corrente e Tensão)	0,5 % da leitura (+/- 2 dígitos)
Segurança:	CAT III – 600 V

**Fonte: Manual do Fabricante**

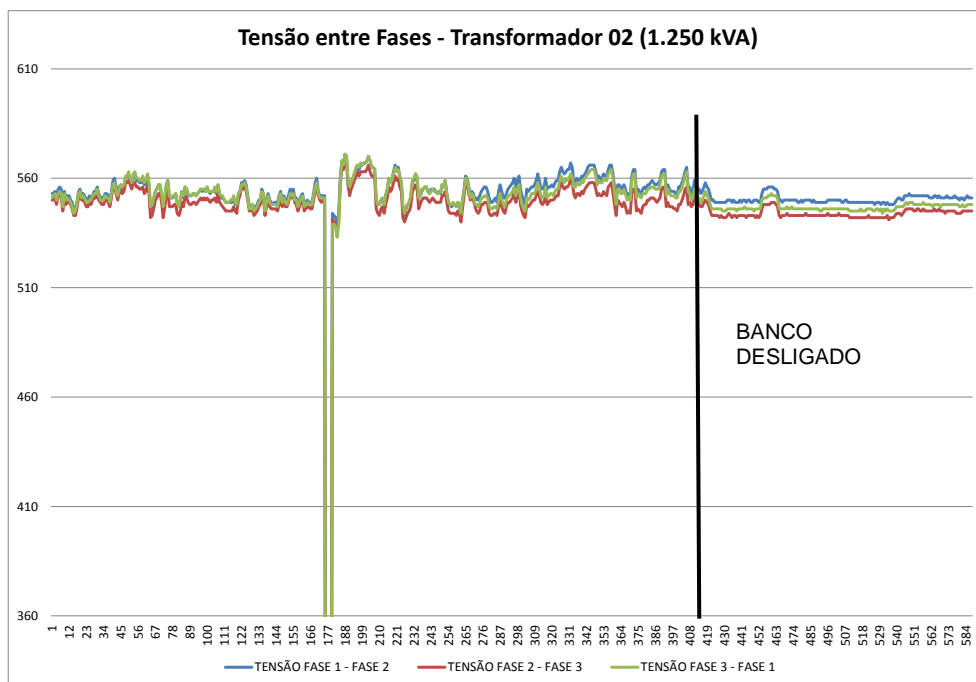
### 3.3 ANÁLISE DOS DADOS DA MEDIÇÃO

Foram realizadas medições totalizando 584 intervalos entre os dias 02/04/2013 e 05/04/2013 sendo 417 intervalos com o banco de capacitores ligados e 167 intervalos com o banco de capacitores desligado, durante o período de medição a fábrica funcionou normalmente.

Os gráficos 1 e 2 mostram a tensão entre fases, os gráficos 3 e 4 mostram a potência trifásica, os gráficos 5 e 6 mostram a distorção harmônica total de tensão, os gráficos 7 e 8 mostram a distorção harmônica total de corrente, os gráficos 9 e 10 mostram o fator de potência (deslocamento entre corrente e tensão) e os gráficos 11 e 12 mostram a corrente por fase.

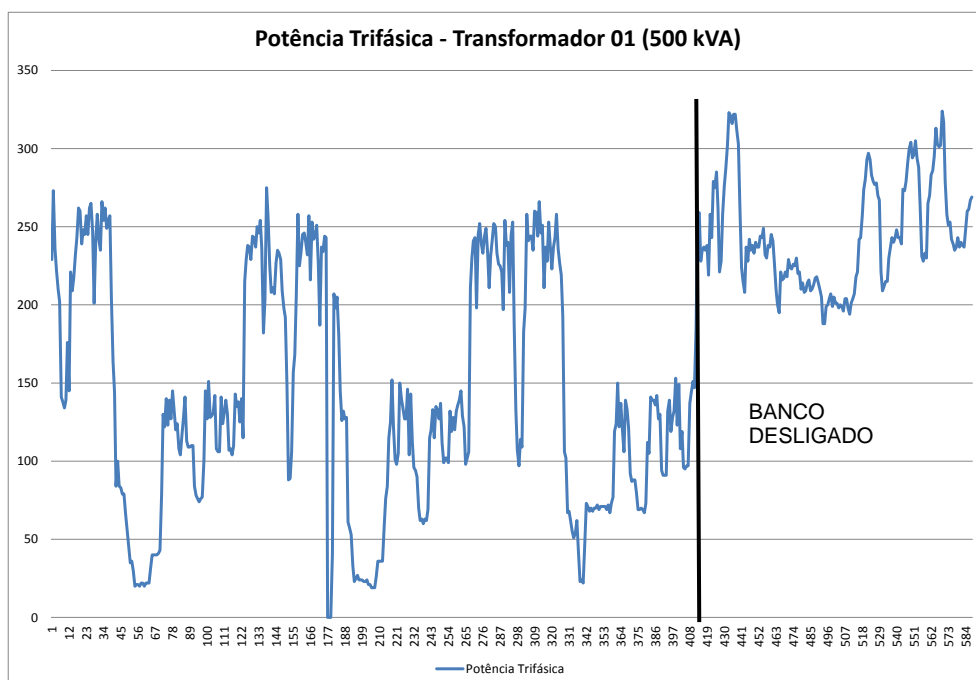


**Gráfico 01 – Tensão entre Fases Transformador 01**



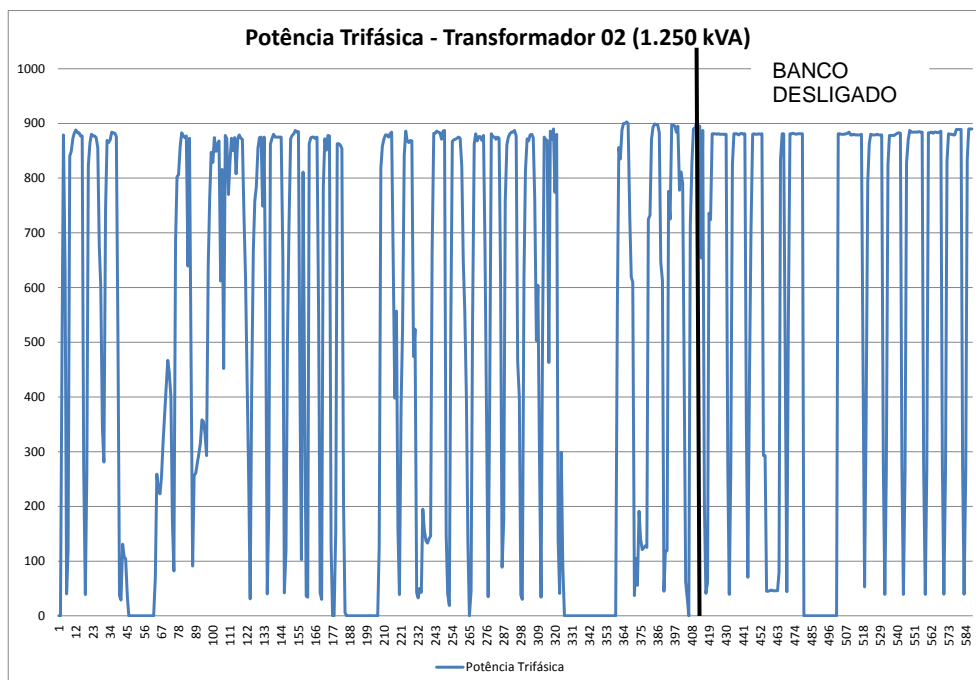
**Gráfico 02 – Tensão entre Fases Transformador 02**

O gráfico 03 apresenta a potência trifásica na baixa tensão do transformador 01. Pode-se notar que houve queda de tensão no intervalo 177.

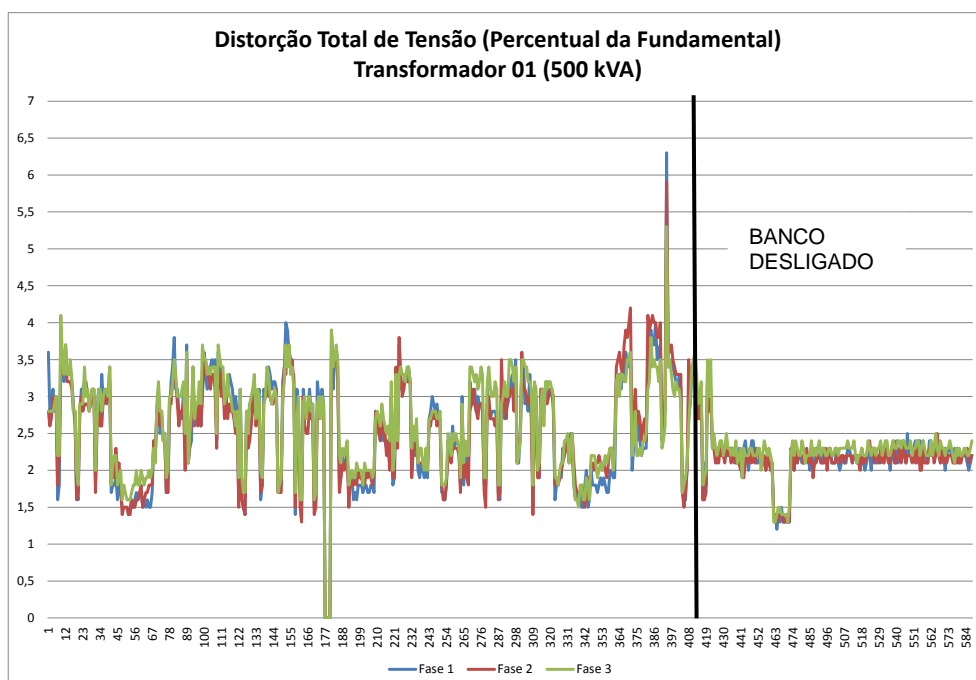


**Gráfico 03 – Potência Trifásica Transformador 01**

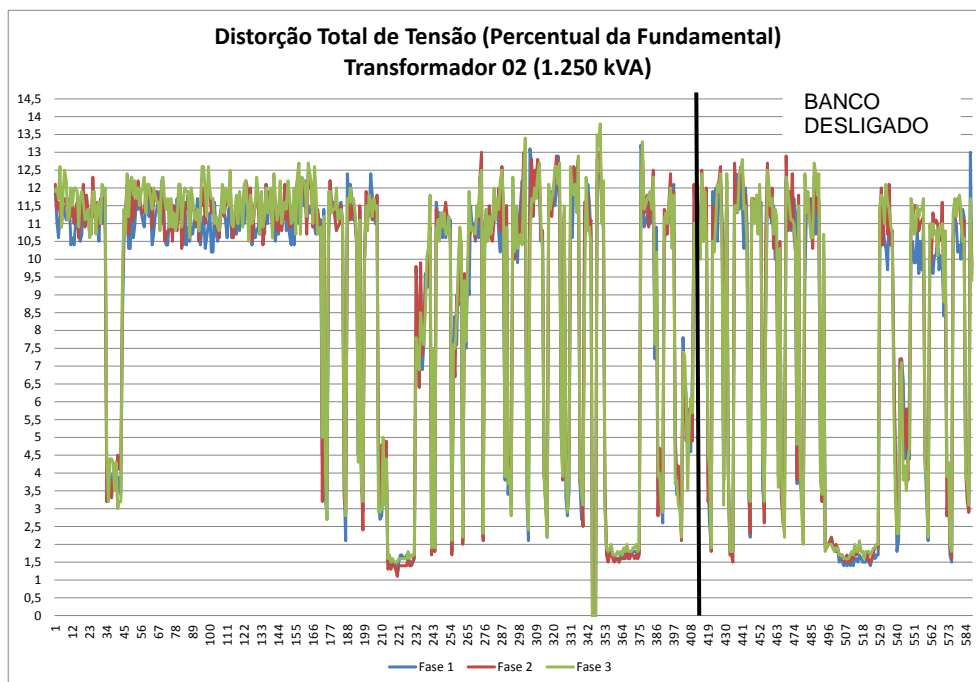
O gráfico 04 apresenta a potência trifásica na baixa tensão do transformador 02. Percebe-se que existe uma variação periódica na potência do forno, isto se deve a troca de material e carregamento do forno, os intervalos onde o forno é totalmente desligado correspondem ao horário de ponta, entre 18 horas e 21 horas.



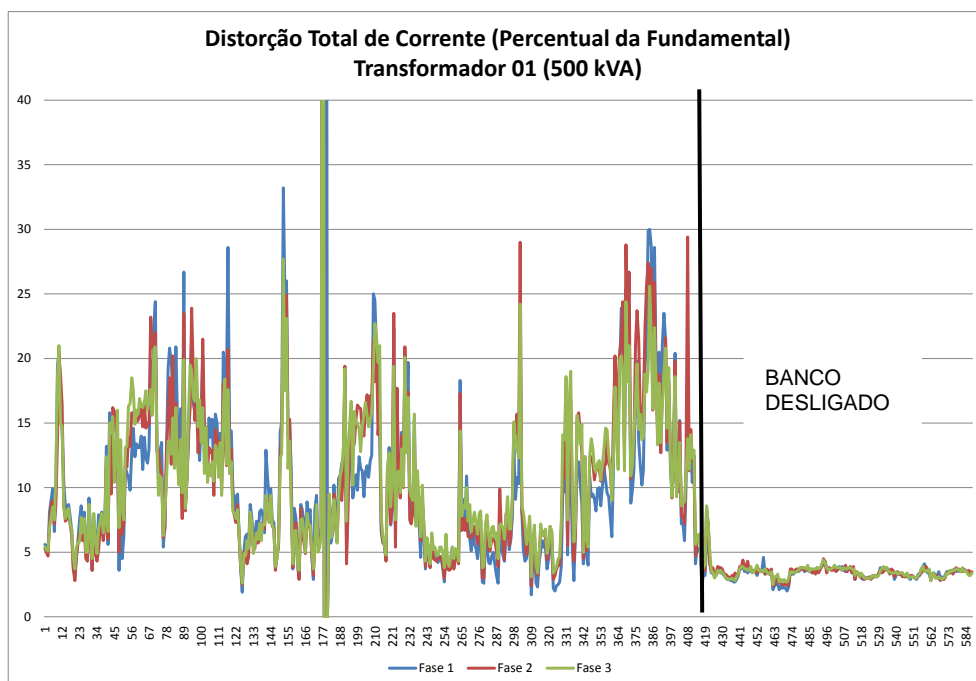
**Gráfico 04 – Potência Trifásica Transformador 02**



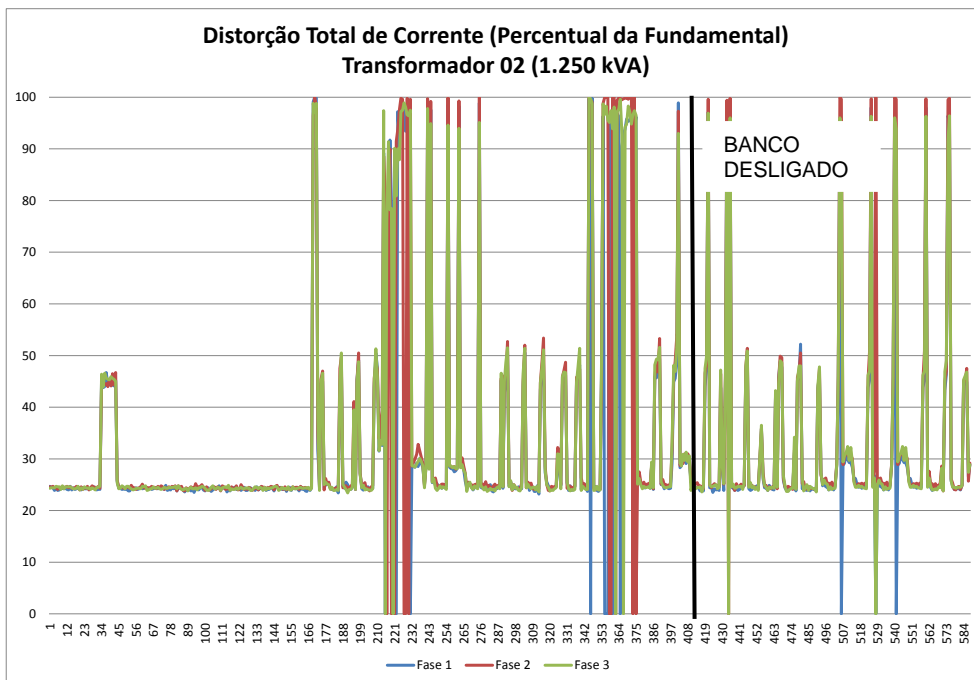
**Gráfico 05 – Distorção Harmônica Total de Tensão Transformador 01**



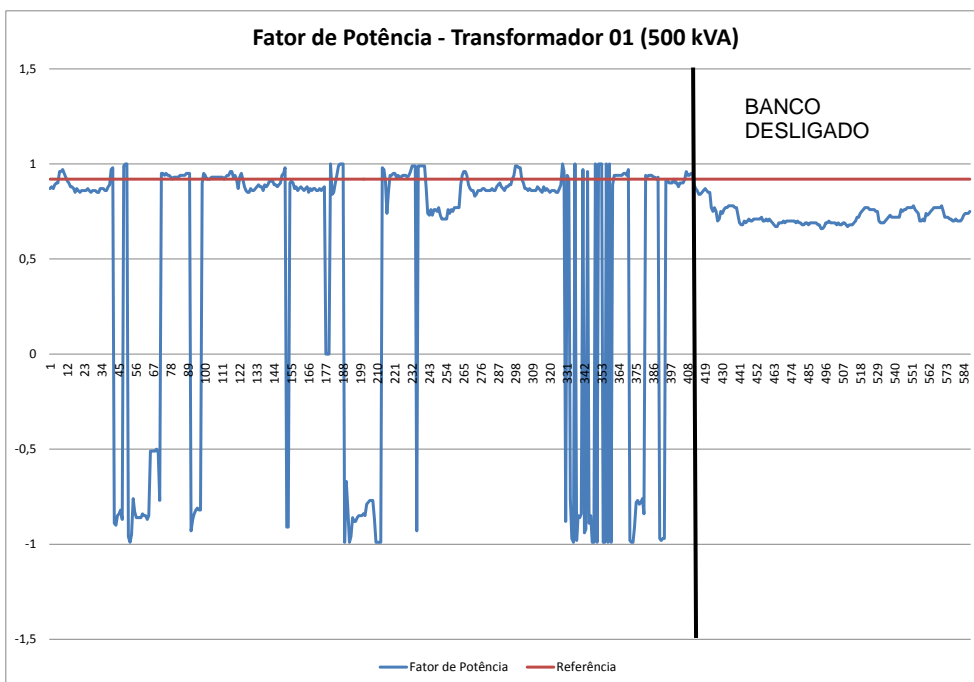
**Gráfico 06 – Distorção Harmônica Total de Tensão Transformador 02**



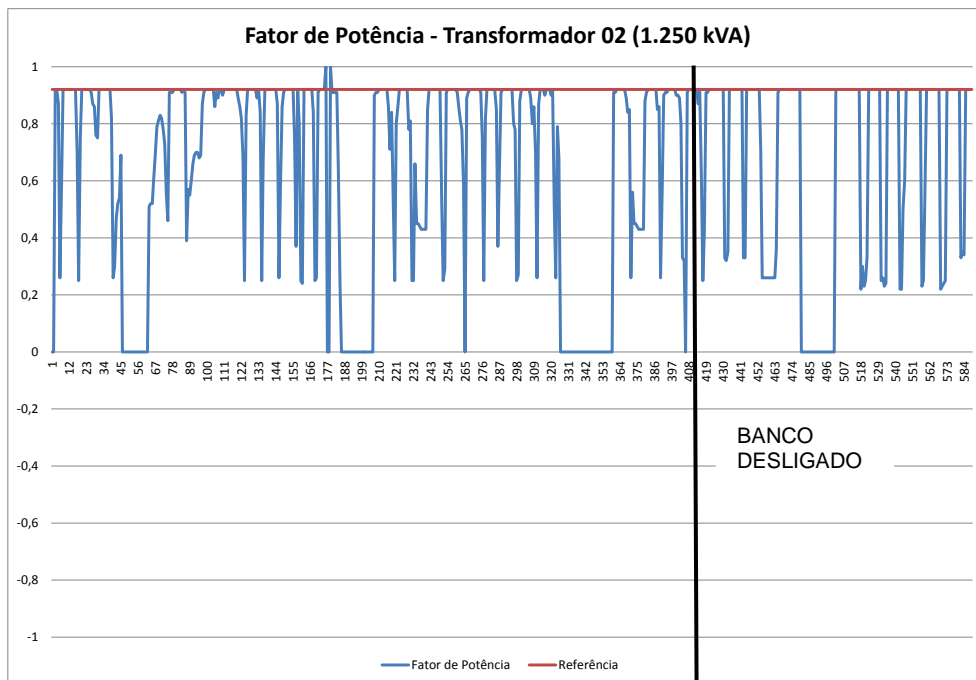
**Gráfico 07 – Distorção Harmônica Total de Corrente Transformador 01**



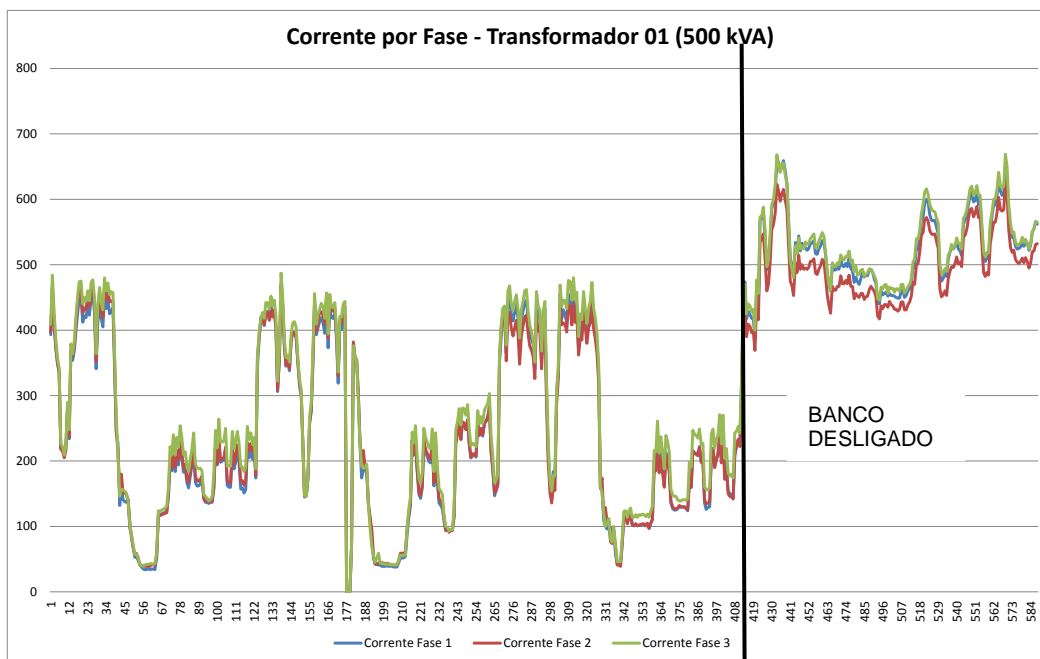
**Gráfico 08 – Distorção Harmônica Total de Corrente Transformador 02**



**Gráfico 09 – Fator de Potência Transformador 01**

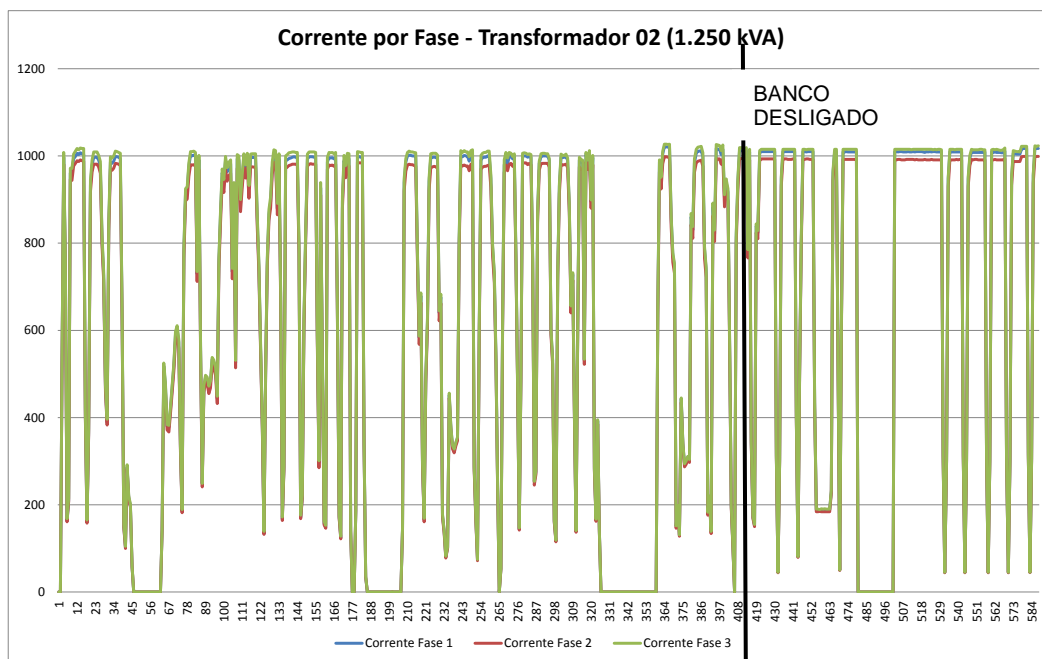


**Gráfico 10 – Fator de Potência Transformador 02**



**Gráfico 11 – Corrente por Fase Transformador 01**





**Gráfico 12 – Corrente por Fase Transformador 02**

### 3.3.1 Análise dos Níveis de Distorção Harmônica

Com a finalidade de avaliar os índices registrados de distorção harmônica total de corrente e tensão harmônica foram realizadas duas análises, a primeira consiste em desprezar 5 % das amostras piores e utilizar o valor máximo dos 95 % restantes (P95%) e a segunda consiste em desprezar 1 % das amostras piores e utilizar o valor máximo dos 99 % restantes (P99%), conforme Teixeira (2010), além desse critério para analisar a distorção total de corrente foram desprezados os momentos em que o forno foi desligado, os valores obtidos para P95 % e P99 % se encontram na tabela 7 e 8 respectivamente.

**Tabela 7 – Análise da Distorção Harmônica Total (P95%)**

	Dist. Total de Tensão			Dist. Total de Corrente			Situação dos Capacitores
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	
Transformador 01 (500 kVA / 380 V)	3,60%	3,60%	3,50%	21,40%	21,50%	19,50%	Ligados
	2,40%	2,30%	2,40%	3,90%	3,90%	3,90%	Desligados
Transformador 02 (1.250 kVA / 550 V)	12,20%	12,50%	12,40%	46,50%	47,50%	51,60%	Ligados
	11,90%	12,10%	12,50%	44,00%	44,10%	45,00%	Desligados

Fonte: Autoria própria

**Tabela 8 – Análise da Distorção Harmônica Total (P99%)**

	Dist. Total de Tensão			Dist. Total de Corrente			Situação dos Capacitores
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	
Transformador 01 (500 kVA / 380 V)	3,90%	4,00%	3,70%	28,60%	26,70%	22,70%	Ligados
	2,40%	2,40%	2,50%	4,20%	4,30%	4,10%	Desligados
Transformador 02 (1.250 kVA / 550 V)	12,90%	13,00%	13,20%	50,60%	52,00%	51,60%	Ligados
	12,10%	12,20%	12,60%	45,50%	45,40%	45,90%	Desligados

Fonte: Autoria própria

Após análise dos dados de distorção harmônica total de tensão, verificou-se uma diminuição da mesma na baixa tensão do transformador 01 (500 kVA) quando os capacitores são desligados, o que indica uma possível interação entre o banco de capacitores e o transformador.

Com a finalidade de verificar quais as frequências harmônicas predominantes na instalação foi realizada a análise dos dados da distorção harmônica individual de tensão até a 25<sup>o</sup> ordem, as tabelas 09, 10 e 11 apresentam os dados para o transformador 01 (500 kVA) com o banco de capacitores ligado e o gráfico 11 apresenta o espectro de harmônicas para P95%.

**Tabela 9 –Distorção Harmônica Individual de Tensão – Fase A – Transf. 01**

Distorção Harmônica Individual de Tensão - Fase A				
Ordem Harmônica	Máximo (%)	Mínimo (%)	Médio (%)	P95 (%)
3	7,56	0,01	1,15	0,98
5	17,66	0,39	2,55	2,49
7	8,75	0,01	1,81	1,82
9	4,70	0,01	0,51	0,51
11	29,37	0,01	3,64	3,72
13	9,72	0,06	1,76	1,69
15	2,10	0,00	0,34	0,32
17	8,32	0,00	0,60	0,54
19	19,77	0,00	0,75	0,63
21	8,74	0,00	0,30	0,23
23	7,92	0,01	0,41	0,36
25	3,12	0,00	0,26	0,24

Fonte: Autoria própria

**Tabela 10 – Distorção Harmônica Individual de Tensão – Fase B– Transf. 01**

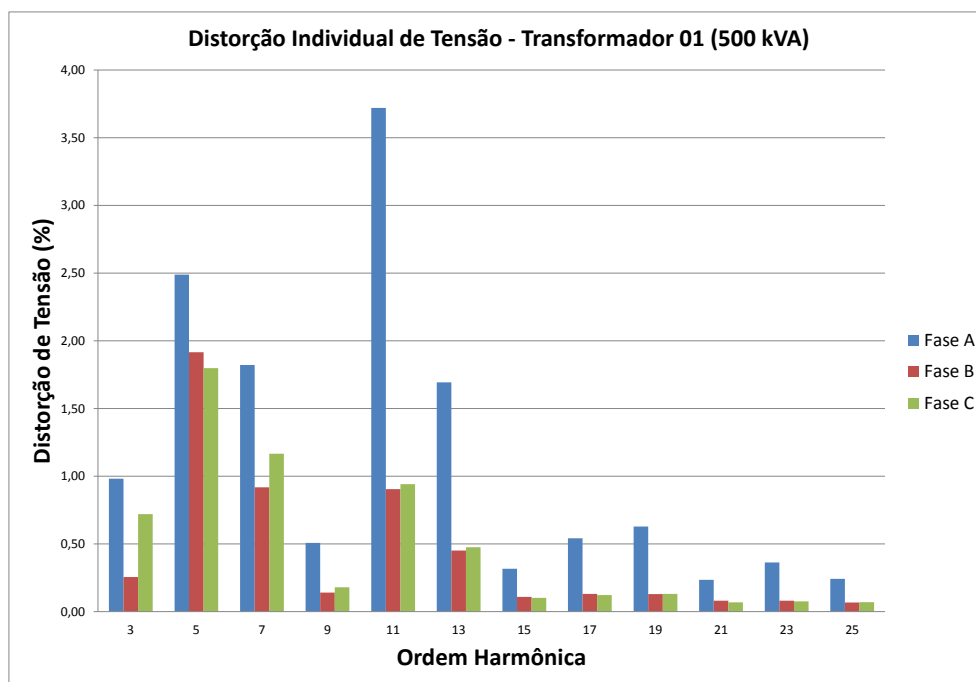
Distorção Harmônica Individual de Tensão - Fase B				
Ordem Harmônica	Máximo (%)	Mínimo (%)	Médio (%)	P95 (%)
3	0,78	0,01	0,27	0,26
5	4,56	0,89	1,93	1,92
7	1,88	0,10	0,92	0,92
9	0,70	0,01	0,14	0,14
11	2,57	0,01	0,90	0,90
13	2,32	0,02	0,45	0,45
15	0,37	0,00	0,11	0,11
17	0,58	0,01	0,13	0,13
19	0,97	0,00	0,13	0,13
21	0,30	0,00	0,08	0,08
23	0,46	0,00	0,08	0,08
25	0,32	0,00	0,07	0,07

Fonte: Autoria própria

**Tabela 11 – Distorção Harmônica Individual de Tensão – Fase C– Transf. 01**

Distorção Harmônica Individual de Tensão - Fase C				
Ordem Harmônica	Máximo (%)	Mínimo (%)	Médio (%)	P95 (%)
3	1,27	0,19	0,73	0,72
5	3,71	0,78	1,79	1,80
7	2,44	0,20	1,15	1,17
9	0,62	0,01	0,18	0,18
11	2,67	0,02	0,92	0,94
13	2,13	0,05	0,47	0,48
15	0,52	0,00	0,10	0,10
17	0,78	0,01	0,12	0,12
19	0,72	0,01	0,13	0,13
21	0,44	0,01	0,07	0,07
23	0,35	0,00	0,08	0,08
25	0,35	0,00	0,07	0,07

Fonte: Autoria própria

**Gráfico 11 – Espectro de Frequência dos valores P95% da tensão no transformador 01**

Nota-se no gráfico 11 a presença da 11ª harmônica com um percentual superior das demais, o que indica uma possível ressonância entre o banco de capacitores e o transformador de 500 kVA.

As tabelas 12, 13 e 14 apresentam os dados para o transformador 02 (1.250 kVA) e o gráfico 12 apresenta o espectro de harmônicas para P95%.

**Tabela 12 –Distorção Harmônica Individual de Tensão – Fase A – Transf. 02**

Distorção Harmônica Individual de Tensão - Fase A				
Ordem Harmônica	Máximo (%)	Mínimo (%)	Médio (%)	P95 (%)
3	1,90	0,07	0,69	0,70
5	8,32	0,22	3,96	4,10
7	7,68	0,10	2,83	2,94
9	3,41	0,01	0,50	0,52
11	7,11	0,01	2,52	2,64
13	6,32	0,02	2,15	2,25
15	2,46	0,01	0,50	0,52
17	3,43	0,01	1,54	1,61
19	3,01	0,01	1,36	1,42
21	1,55	0,00	0,37	0,38
23	2,54	0,01	0,84	0,88
25	2,81	0,01	0,83	0,87

Fonte: Autoria própria

**Tabela 13 – Distorção Harmônica Individual de Tensão – Fase B – Transf. 02**

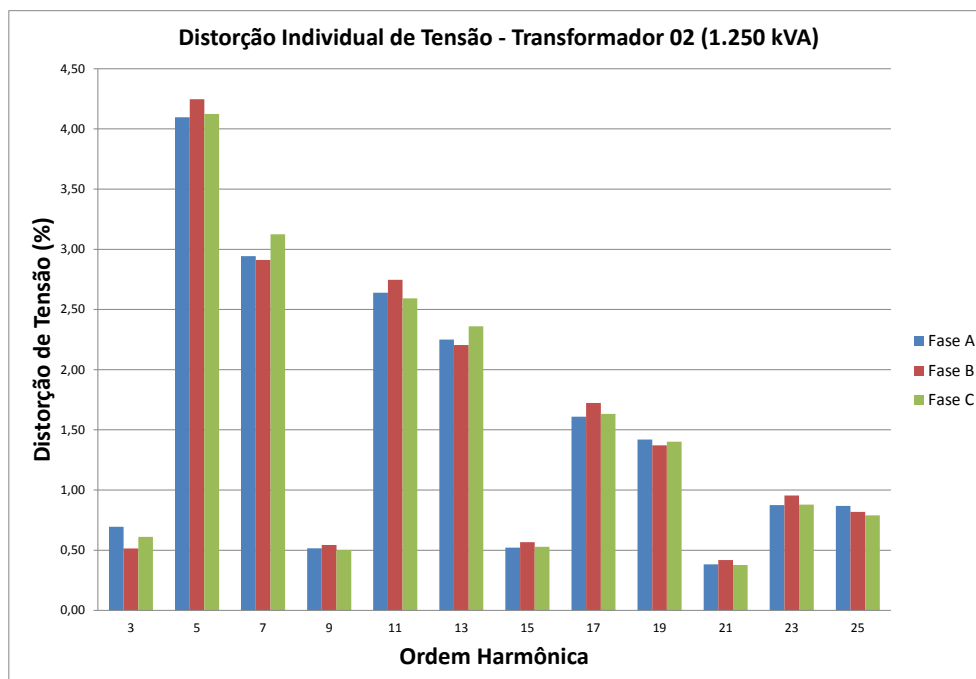
Distorção Harmônica Individual de Tensão - Fase B				
Ordem Harmônica	Máximo (%)	Mínimo (%)	Médio (%)	P95 (%)
3	1,55	0,01	0,50	0,52
5	8,78	0,20	4,11	4,25
7	7,76	0,09	2,79	2,91
9	3,54	0,01	0,52	0,54
11	7,50	0,01	2,62	2,75
13	6,30	0,01	2,10	2,20
15	2,40	0,01	0,54	0,57
17	3,36	0,01	1,64	1,72
19	2,85	0,01	1,31	1,37
21	1,41	0,01	0,40	0,42
23	2,87	0,00	0,91	0,96
25	2,13	0,00	0,78	0,82

Fonte: Autoria própria

**Tabela 14 – Distorção Harmônica Individual de Tensão – Fase C – Transf. 02**

Distorção Harmônica Individual de Tensão - Fase C				
Ordem Harmônica	Máximo (%)	Mínimo (%)	Médio (%)	P95 (%)
3	1,71	0,00	0,62	0,61
5	8,19	0,21	3,99	4,12
7	7,89	0,05	3,00	3,12
9	3,03	0,01	0,48	0,50
11	7,67	0,01	2,47	2,59
13	6,69	0,05	2,26	2,36
15	2,54	0,00	0,51	0,53
17	3,30	0,00	1,56	1,63
19	3,27	0,02	1,34	1,40
21	1,97	0,01	0,36	0,38
23	2,90	0,01	0,84	0,88
25	3,10	0,00	0,76	0,79

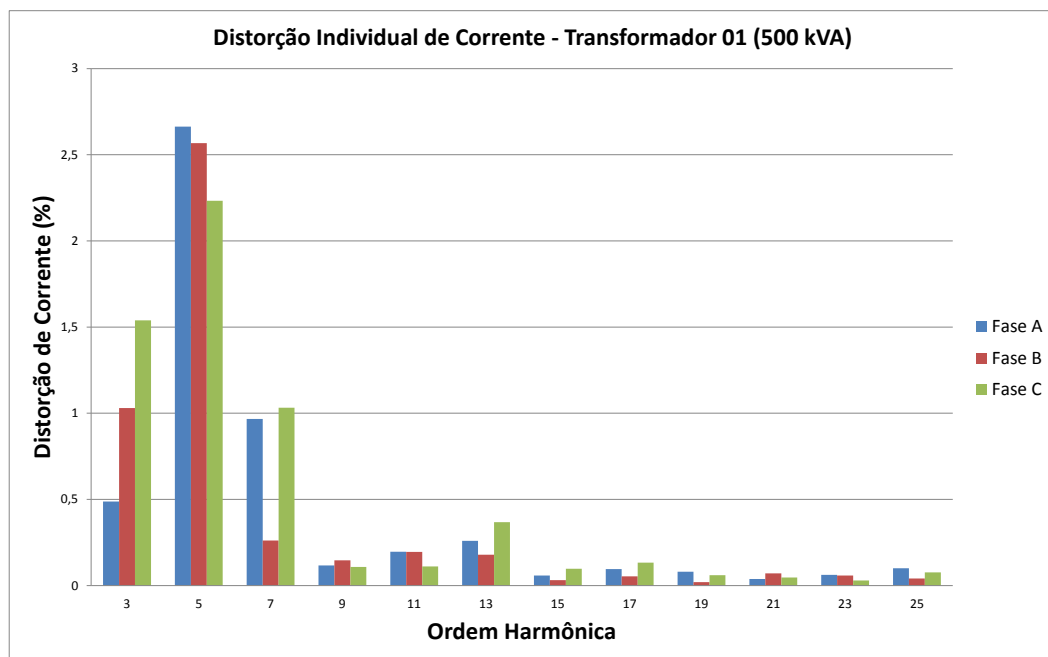
Fonte: Autoria própria



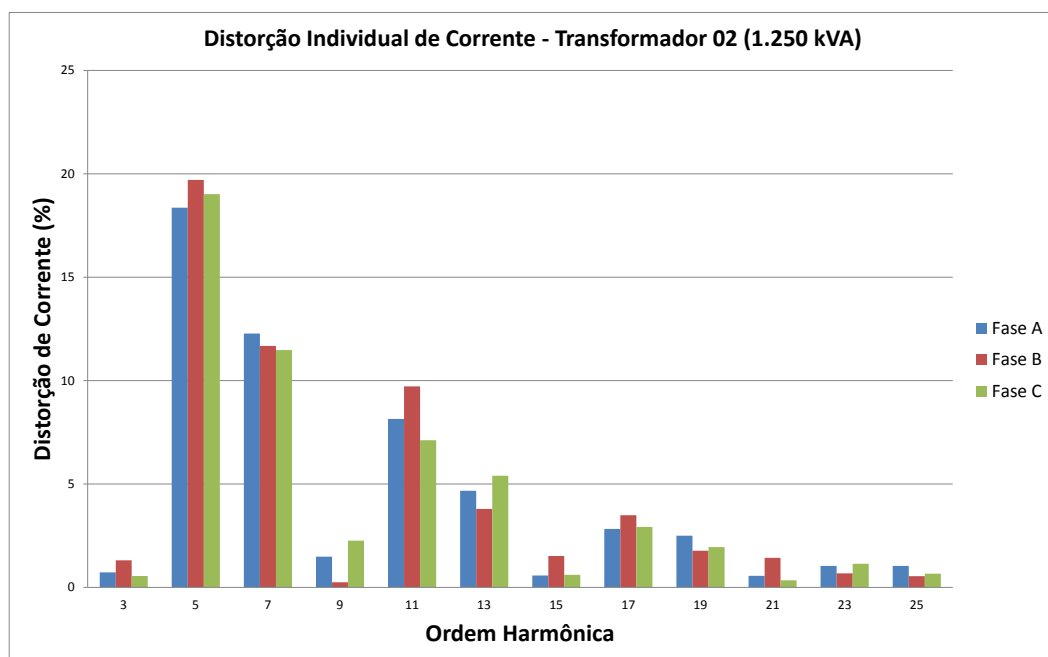
**Gráfico 12 – Espectro de Frequência dos valores P95% da tensão no transformador 02**

Como o transformador de 1.250 kVA atende exclusivamente o forno de indução e o mesmo possui na entrada um retificador de 6 pulsos, o gráfico 12 apresenta a predominância dos harmônicos que obedecem a equação (3) onde a variável “k” é substituída por 6.

Realizando o mesmo tratamento para os dados de distorção harmônica individual de corrente, com o banco de capacitores desligado, obtiveram-se os dados apresentados nos gráficos 13 e 14.



**Gráfico 13 – Espectro de Frequência dos valores P95% da corrente no transformador 01**

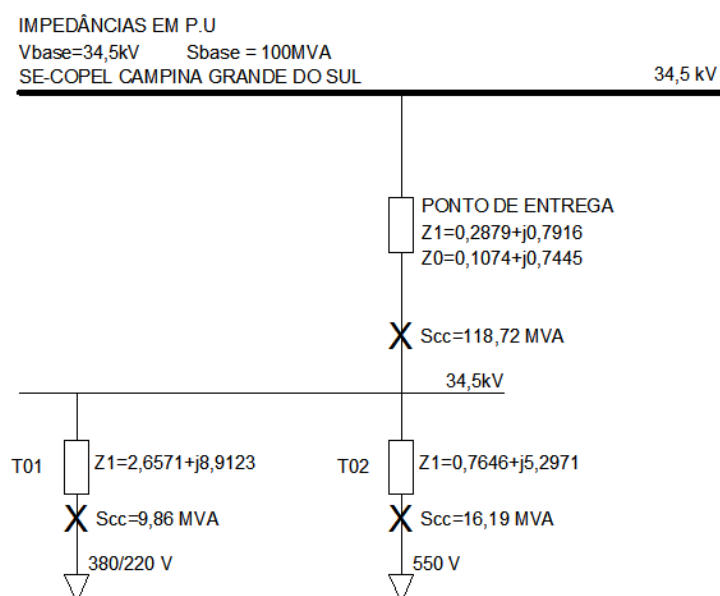


**Gráfico 14 – Espectro de Frequência dos valores P95% da corrente no transformador 02**



### 3.4 CÁLCULO DA FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA DA INSTALAÇÃO

Com a finalidade de verificar qual a frequência de ressonância na baixa tensão do transformador 01 (ponto de instalação dos capacitores) foi utilizado a equação (06). A figura 13 apresenta o diagrama de impedâncias da instalação.



**Figura 13 – Diagrama de Impedâncias da Instalação**

**Fonte: Autoria própria**

Os dados de impedância de sequência positiva e zero no ponto de conexão ao sistema da Copel foram fornecidos pela mesma, conforme mostra a figura 14.

<b>COPEL - COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA</b>			
<i>Identificação</i>	*		
<i>Nº de Conta</i>	81476-01822-632000	<i>Chave</i>	*
<i>Cliente</i>	MINATTI FUNDIÇÃO TÉCNICA LTDA		
<i>Endereço</i>	R MANOEL M CRUZ 99		
<i>Localidade</i>	QUATRO BARRAS		
<i>Potência de Base</i>	100MVA	<i>Tensão de Base</i>	34,5kV
<b>VALORES DE IMPEDÂNCIA EM p.u. NO PONTO DE ENTREGA</b>			
Sequência Positiva		Sequência Zero	
<i>R1</i>	0,2879	<i>R0</i>	0,1074
<i>X1</i>	0,7916	<i>X0</i>	0,7445

**Figura 14 – Impedâncias no ponto de conexão com a concessionária**  
**Fonte: Copel Distribuição S.A.**

A tabela 15 apresenta a frequência de ressonância para cada estágio do banco de capacitores

**Tabela 15 – Frequência de Ressonância**

<b>Estágio (kvar)</b>	<b>Harmônica de Ressonância</b>
5	44,41
10	31,40
15	25,64
25	19,86
50	14,04
60	12,82
75	11,47
90	10,47
105	9,69
130	8,71
140	8,39

**Fonte: Autoria própria**

Verifica-se que quando são inseridos 75 kvar ou 90 kvar no sistema a frequência de ressonância se aproxima da frequência de 688 Hz, portanto existe a possibilidade de ocorrer ressonância na 11ª harmônica.

### 3.5 COMPENSAÇÃO REATIVA

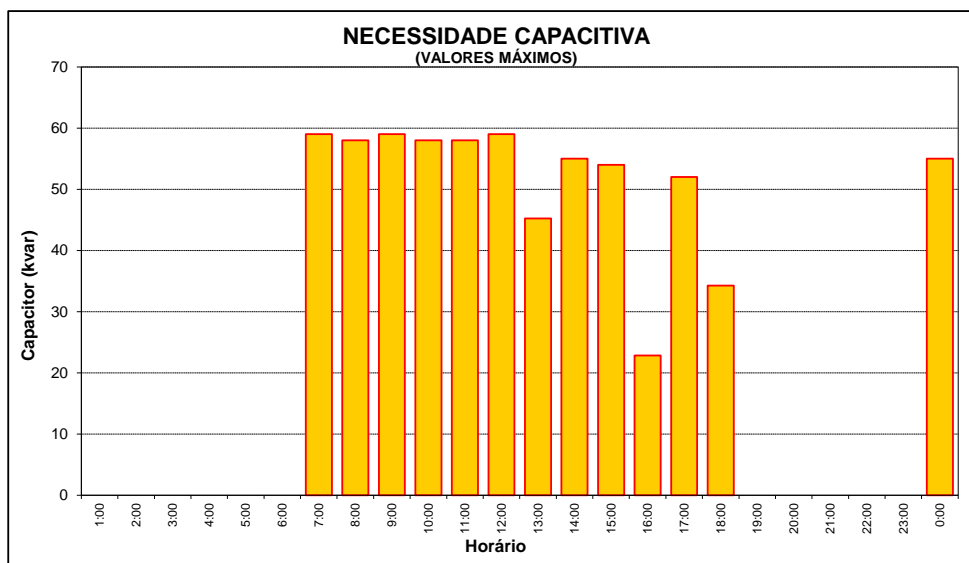
Analisando as faturas de energia elétrica do ano de 2013 verificou-se que mesmo com o banco de capacitores atual ainda existe o pagamento de multas por excedente reativo na instalação, a tabela 16 apresenta um resumo do que foi pago de multa no ano de 2013.

**Tabela 16 – Multas Por Excedente Reativo - 2013**

	Excedente Reativo (kWh)		Multa (R\$)	
	Ponta	Fora de Ponta	Ponta	Fora de Ponta
Janeiro	10	922	R\$ 2,09	R\$ 193,13
Fevereiro	0	1965	R\$ -	R\$ 378,34
Março	0	2211	R\$ -	R\$ 423,36
Abril	0	1286	R\$ -	R\$ 246,24
Maió	8	1491	R\$ 1,53	R\$ 285,50
Junho	480	1434	R\$ 91,03	R\$ 271,95
Julho	0	1406	R\$ -	R\$ 291,51
Total	498	10715	R\$ 94,65	R\$ 2.090,03
Média	71	1531	R\$ 13,52	R\$ 298,58

**Fonte: Contas de energia elétrica do consumidor**

Com a finalidade de analisar qual a real necessidade capacitiva foram solicitados a concessionária os dados de memória de massa do medidor de faturamento da instalação, de posse desses dados foi possível calcular a quantidade de reativo que a instalação precisa para eliminar as multas apresentadas na tabela 13. O gráfico 15 apresenta os valores máximos de necessidade capacitiva por hora para elevar o fator de potência a 0,95.



**Gráfico 15 – Necessidade Capacitiva**

Nota-se que a necessidade capacitiva máxima é de aproximadamente 60 kvar, ou seja, o banco de capacitores atual de 140 kvar precisa ser ampliado para 200 kvar, aplicando novamente a equação (6) e calculando a frequência de ressonância para esta nova condição verifica-se que se forem inseridos 200 kvar na baixa tensão do transformador 01 a frequência de ressonância será de 421,2 Hz o que equivale a 7ª harmônica, conforme apresentado no gráfico 11 esta frequência harmônica existe na instalação, portanto para esta condição ocorrerá uma sobrecorrente excessiva podendo causar danos graves tanto para o banco de capacitores quanto para os demais equipamentos que estão ligados a este transformador.

Tendo em vista o exposto acima não é recomendado adicionar os 60 kvar no banco de capacitores sem um filtro de harmônicas ou um reator de dessintonia. Os itens a seguir tratam do dimensionamento do reator de dessintonia e do filtro sintonizado na 5ª harmônica.

### 3.6 DIMENSIONAMENTO DO REATOR DE DESSINTONIA

É necessário verificar primeiramente a tensão que surgirá nos capacitores com a inserção do reator de dessintonia em série, abaixo é apresentado o cálculo para os fatores de dessintonia de 7 % e 14 % utilizando a equação (10).

$$U_{CAP} = \frac{380}{1 - 0,07} = 408V$$

$$U_{CAP} = \frac{380}{1 - 0,14} = 441V$$

Os resultados obtidos mostram que a tensão no banco de capacitores ficará acima dos limites tolerados pelos capacitores atuais tanto para um FD de 7 % quanto para um FD de 14%, portanto o banco de capacitores atual deverá ser eliminado e o novo banco de capacitores deve fornecer a potência de 200 kvar e suportar a tensão de 440 V. Na prática não é inserido um único reator em série com o banco de capacitores e sim um reator em série para cada estágio do banco. O novo banco de capacitores será composto por 8 estágios de 25 kvar em 440 V.

Utilizando a equação (9) pode-se calcular qual o valor da indutância a ser inserida em série com o capacitor de 25 kvar para dessintonizar o banco de capacitores. Para este cálculo é necessário conhecer a capacitância do banco de capacitores e também o fator de dessintonia desejado. Para cálculo da capacitância foi utilizada a equação (13) e para o cálculo da indutância um fator de dessintonia de 14 %.

$$C = \frac{25.000}{2 * \pi * 60 * 440^2} = 342,53 \mu F$$

$$L = \frac{0,14}{4 * \pi^2 * 60^2 * 342,53 * 10^{-6}} = 2,876mH$$

### 3.7 DIMENSIONAMENTO DO FILTRO SINTONIZADO NA 5ª HARMÔNICA

Utilizando a equação (14) pode-se calcular qual o valor da indutância do filtro de harmônica de 5ª ordem. Conforme a literatura apresenta o filtro de 5ª ordem deve ser dimensionado para uma frequência ligeiramente inferior, neste caso será utilizado a frequência de 282 Hz (4,7ª ordem). O fator de qualidade adotado será de 30 e utilizando a equação (12) é possível calcular a resistência do filtro. O banco de capacitores terá a mesma configuração 8 estágios de 25 kvar, porém sintonizados em 5ª ordem.

$$C = \frac{25.000}{2 * \pi * 60 * 380^2} = 459,24\mu F$$

$$L = \frac{1}{4 * \pi^2 * 282^2 * 459,24 * 10^{-6}} = 0,6935mH$$

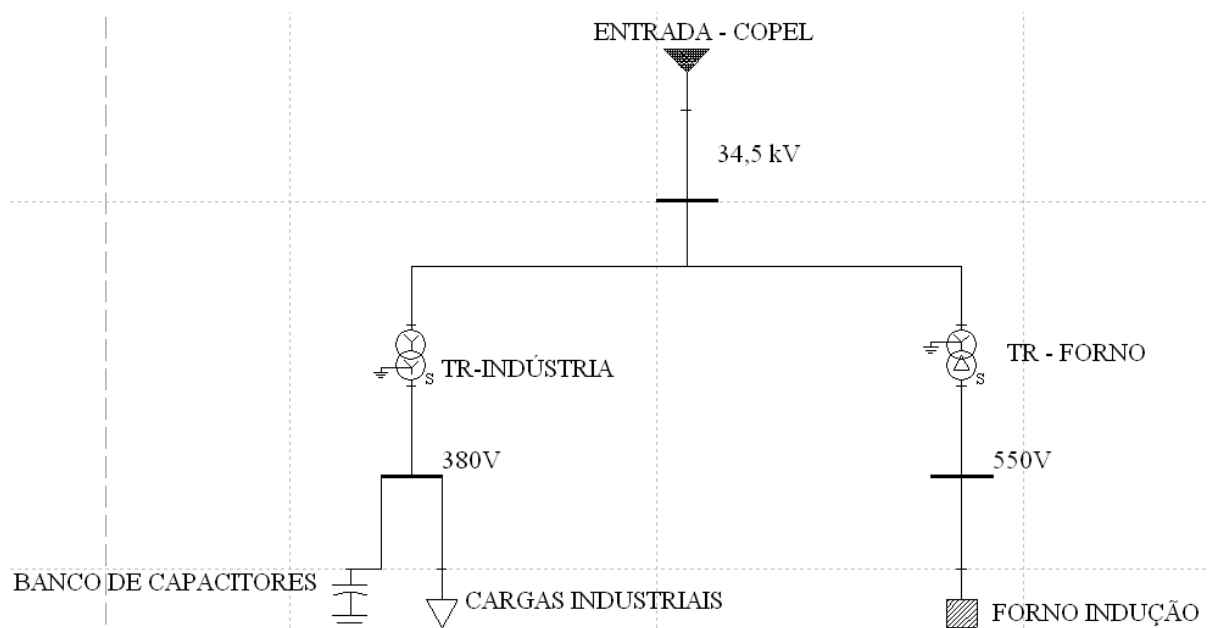
$$R = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{Q} = \frac{\sqrt{\frac{0,6935 * 10^{-3}}{459,24 * 10^{-6}}}}{30} = 0,04096ohms$$

Depois de calculados os valores para o reator de dessintonia e para o filtro sintonizado em 5ª ordem é necessário avaliar a resposta em frequência com a inserção desses elementos na instalação em questão, para tanto será utilizado o programa *PTW32* do fabricante *SKM* em sua versão de demonstração disponível para *download* em seu *website*.

### 3.8 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Com a finalidade de verificar a resposta em frequência para cada solução apresentada neste trabalho, foi utilizado o software PTW32 da SKM versão de demonstração.

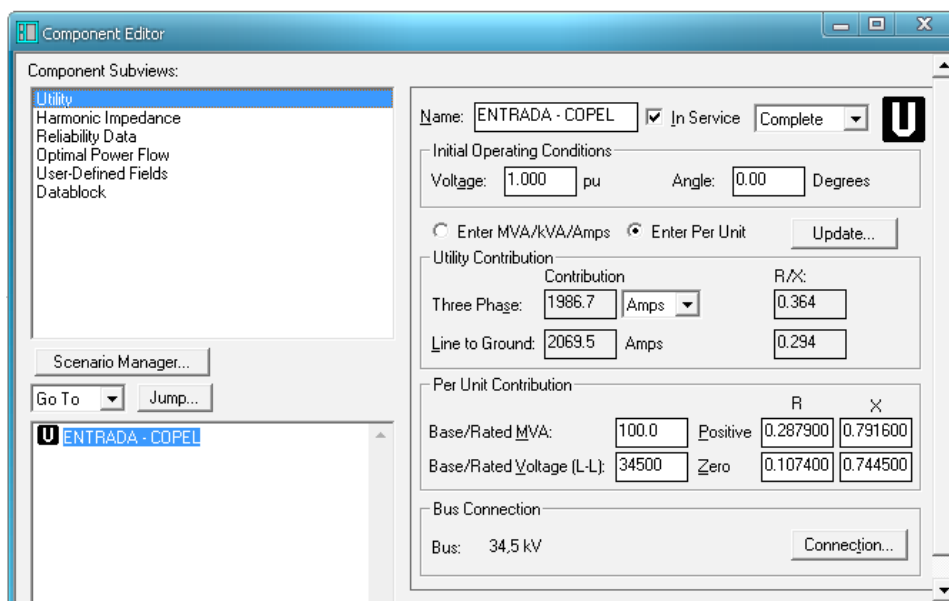
Para proceder a simulação primeiramente é necessário desenhar o diagrama da instalação utilizando os itens existentes no programa conforme mostra a figura 15. Para compreensão da simbologia adotada pelo programa foi utilizado o tutorial disponibilizado pelo fabricante, referência (SKM, 2013).



**Figura 15 – Diagrama da Instalação desenhado no PTW32**

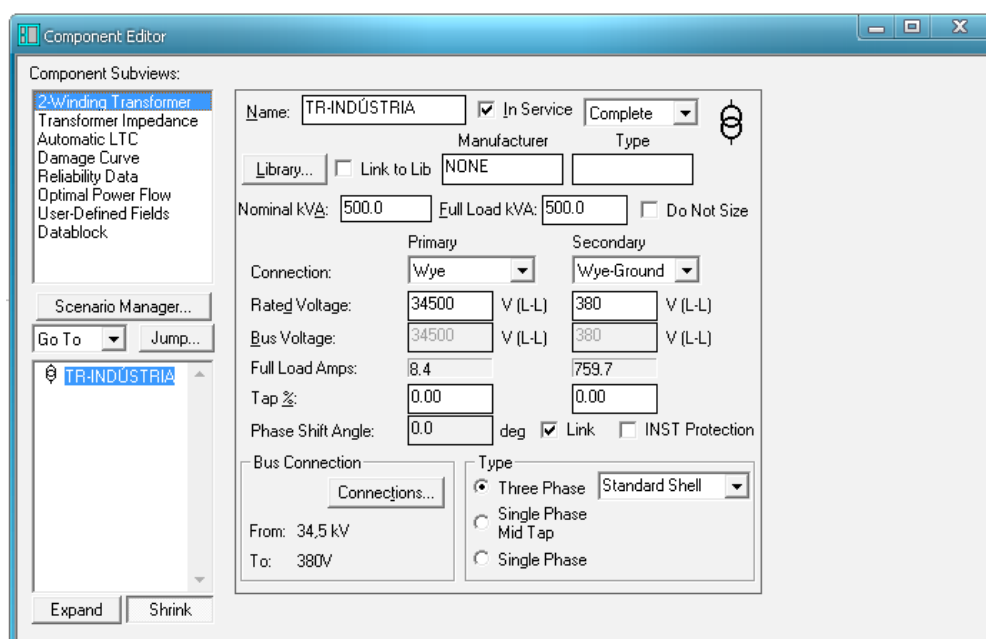
**Fonte: Autoria própria**

Depois de desenhado o diagrama é necessário configurar cada componente da instalação, as figuras 16 e 17 apresentam telas da configuração da barra de entrada da Copel e do transformador 01.



**Figura 16 – Configuração da Barra de Entrada**

Fonte: Autoria própria



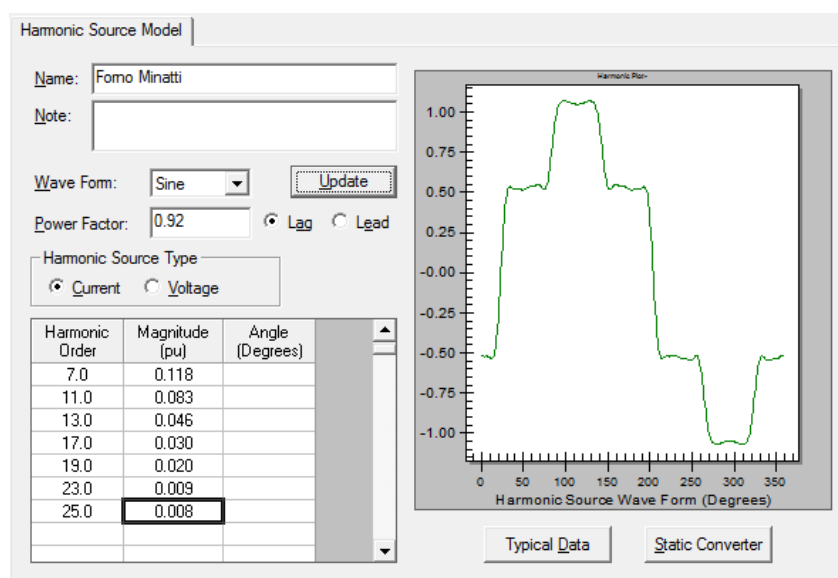
**Figura 17 – Configuração do Transformador 01**

Fonte: Autoria própria

Para configurar as cargas de cada transformador foi utilizado o resultado das medições com o banco de capacitores desligado. No programa existem bibliotecas padrões com o espectro harmônico de vários tipos de carga, porém é possível configurar o espectro harmônico de acordo com os dados obtidos das medições, neste

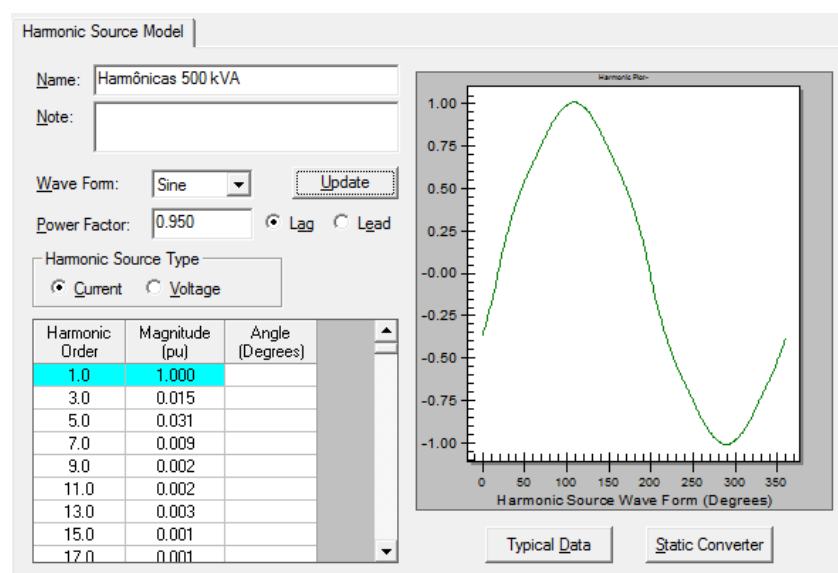


caso foram usados os valores P95% obtidos de distorção harmônica individual até a 25ª ordem. A figura 18 apresenta a configuração das harmônicas do forno de indução e a figura 19 apresenta a configuração das harmônicas do transformador de 01.



**Figura 18 – Configuração harmônicas do Forno de Indução**

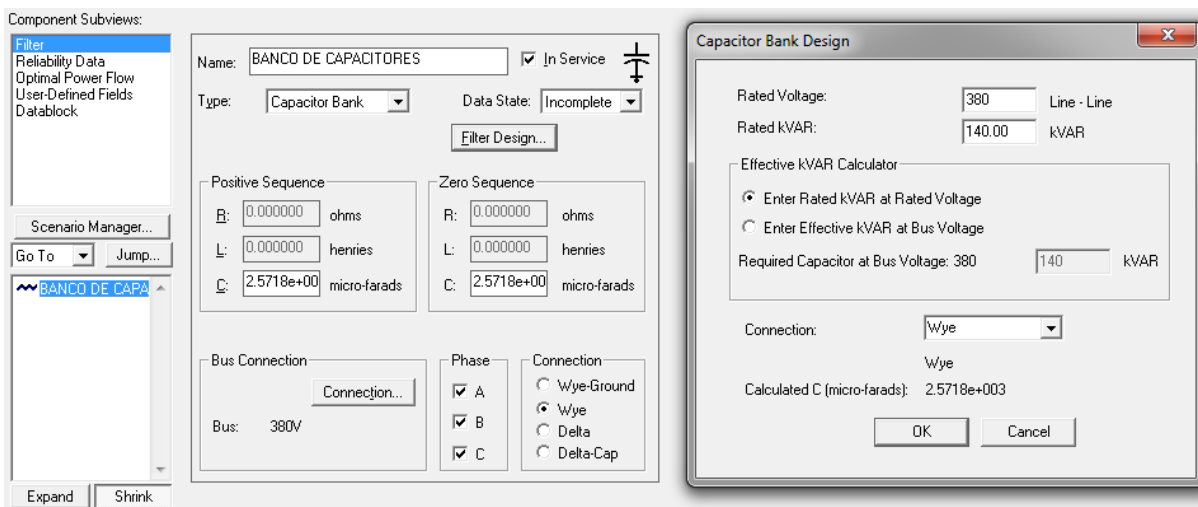
**Fonte: Autoria própria**



**Figura 19 – Configuração harmônicas das cargas do Transformador 01**

**Fonte: Autoria própria**

É necessário configurar também o banco de capacitores, a figura 20 apresenta esta configuração.



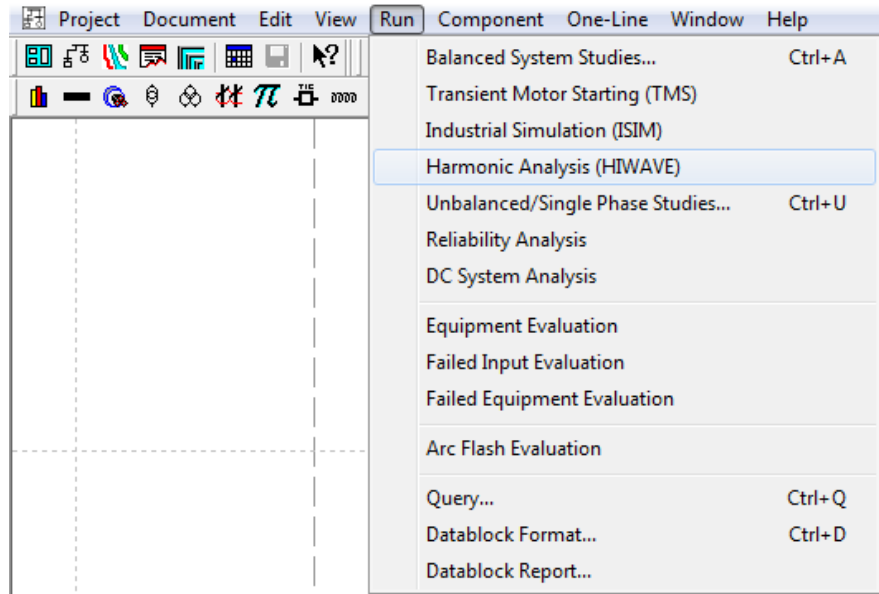
**Figura 20 – Configuração do Banco de Capacitores**

**Fonte: Autoria própria**

Depois de realizadas configurações do sistema industrial a ser analisado é possível simular e obter a frequência de ressonância nas barras de 380 V e 550 V, forma de onda da tensão e espectro harmônico.

### 3.8.1 Frequência de Ressonância

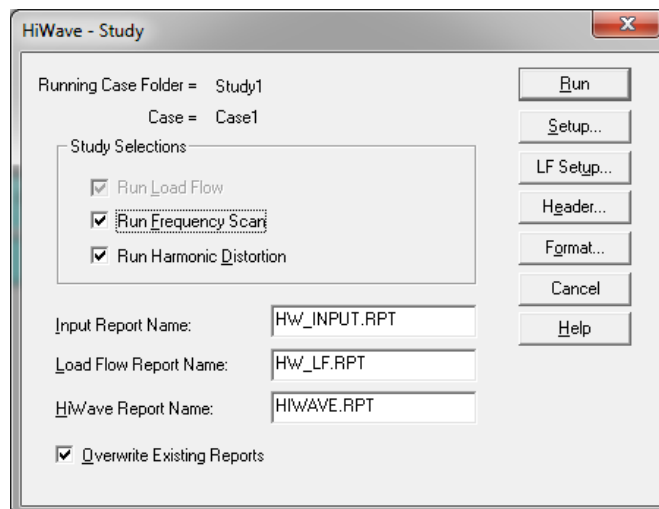
A ferramenta *Harmonics Analysis* (HIWAVE), figura 21, permite simular como se comportará a distorção Harmônica no sistema industrial estudado.



**Figura 21 – Ferramenta Harmonic Analysis (HIWAVE)**

**Fonte: Autoria própria**

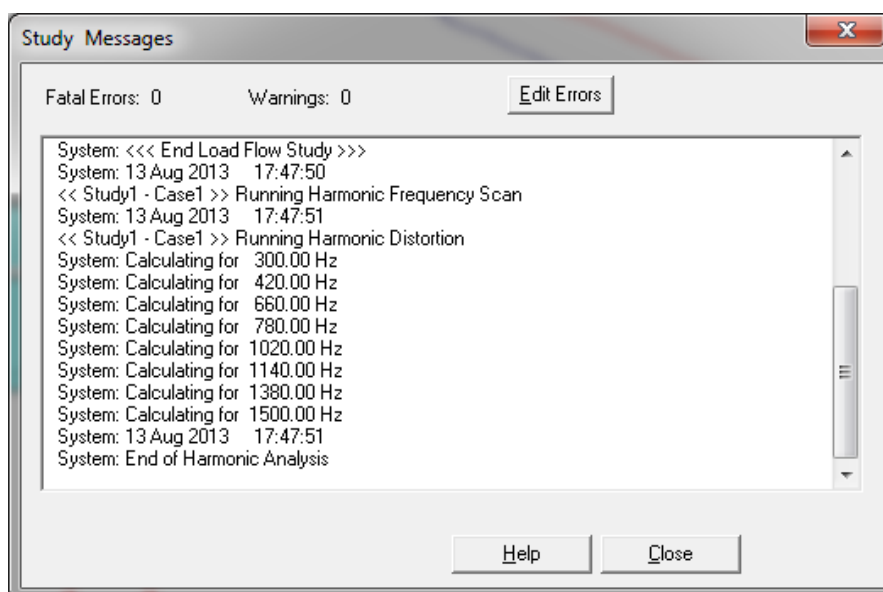
Ao clicar sobre a ferramenta a seguinte tela é apresentada pelo programa, figura 22.



**Figura 22 – Ferramenta Harmonic Analysis (HIWAVE)**

**Fonte: Autoria própria**

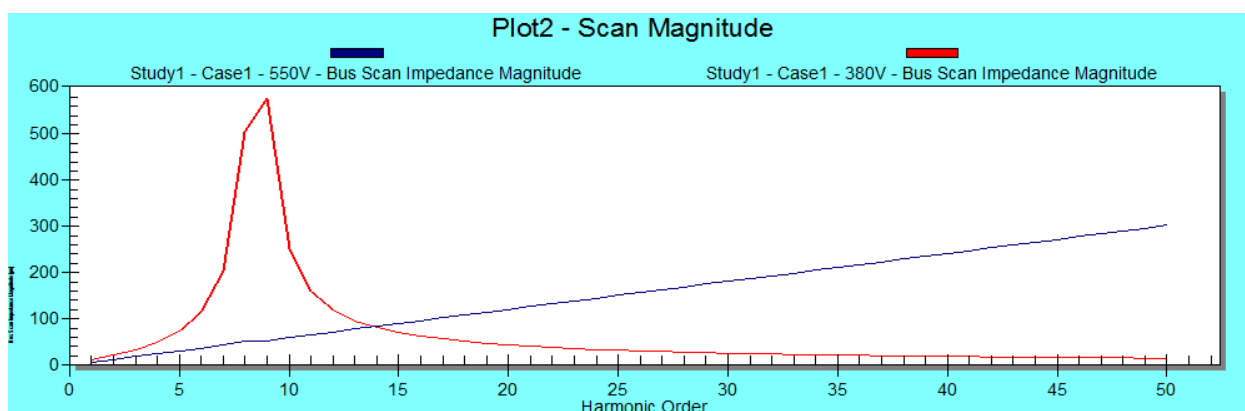
Ao clicar sobre o botão *run* o programa calcula o sistema apresentado para cada frequência harmônica, o programa deve retornar a mensagem sem erros ou avisos.



**Figura 23 – Executando Harmonic Analysis (HIWAVE)**

**Fonte: Autoria própria**

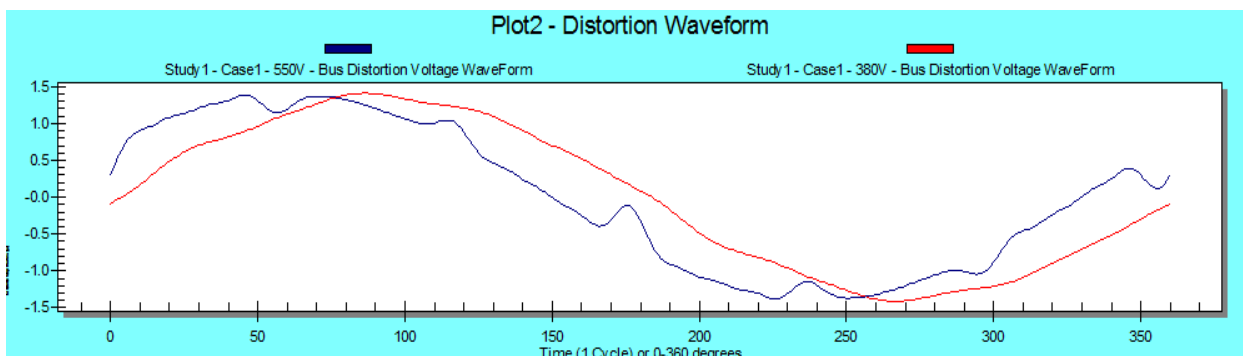
A figura 24 apresenta a impedância para cada harmônica presente no sistema, nota-se que para a barra de 380 V com o banco de 140 kvar conectado o ponto de ressonância esta na frequência de 540 Hz, na tabela 15 o cálculo resultou em uma frequência de ressonância de 503,4 Hz um erro 7,2 %.



**Figura 24 – Frequência de Ressonância com banco de capacitores de 140 kvar**

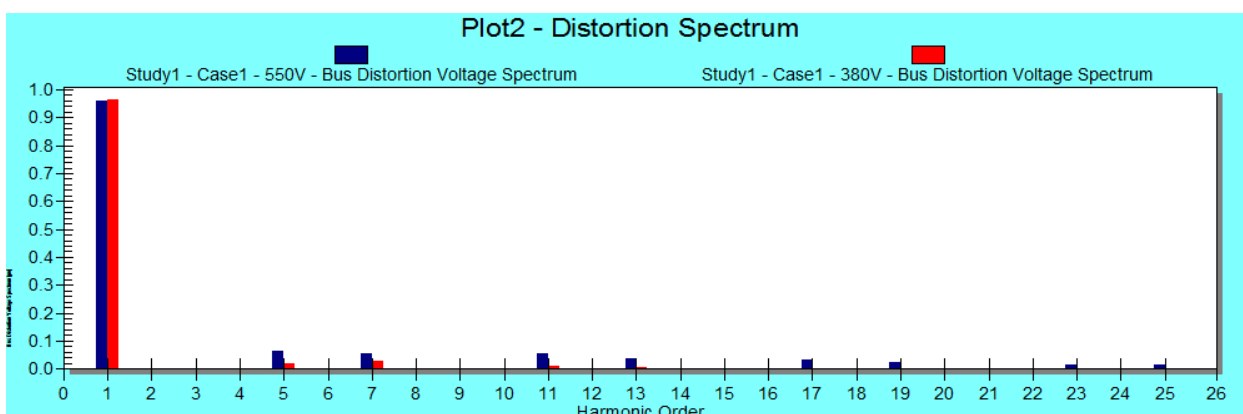
**Fonte: Autoria própria**

A figura 25 mostra a forma de onda na tensão, já a figura 25 apresenta o espectro de harmônicas.



**Figura 25 – Forma de onda da tensão**

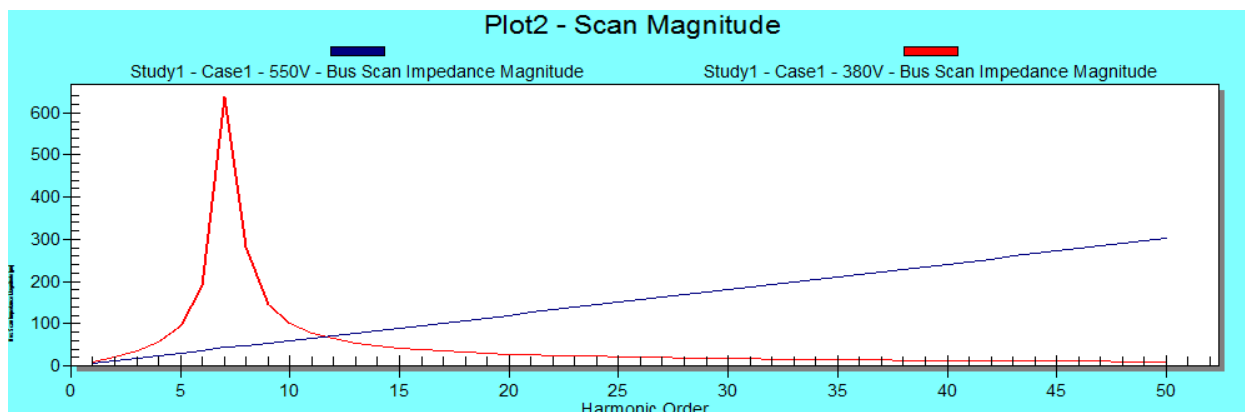
Fonte: Autoria própria



**Figura 26 – Espectro Harmônico com banco de capacitores de 140 kvar**

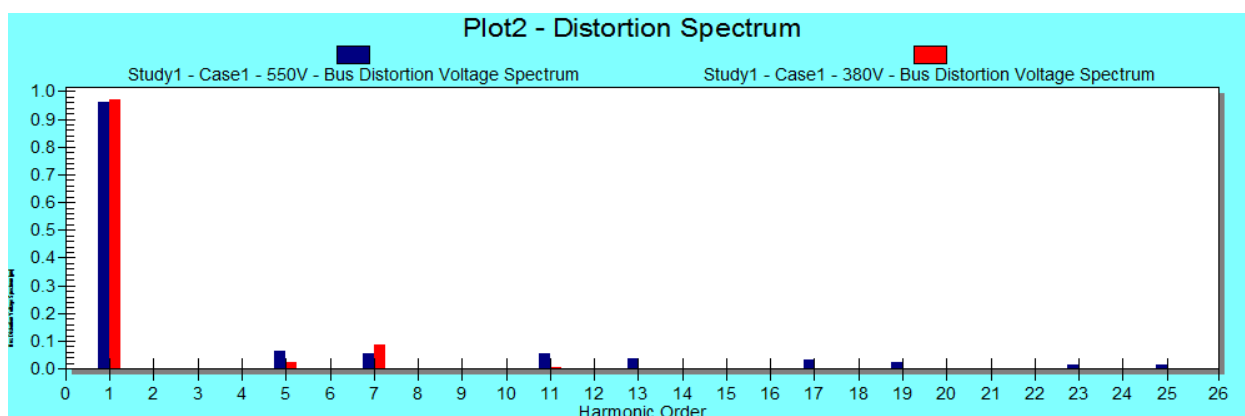
Fonte: Autoria própria

De acordo com o que foi apresentado no item 3.5 mesmo com o banco de capacitores atual o fator de potência não atinge os limites estabelecidos sendo necessário a potencia total de 200 kvar, que segundo cálculos manuais alteraria a frequência de ressonância para 421,2 Hz, alterando o banco de capacitores para 200 kvar e executando a ferramenta HIWAVE novamente obtém-se o resultado apresentado nas figura 27 e 28.



**Figura 27 – Frequência de Ressonância com banco de capacitores de 200 kvar**

Fonte: Autoria própria



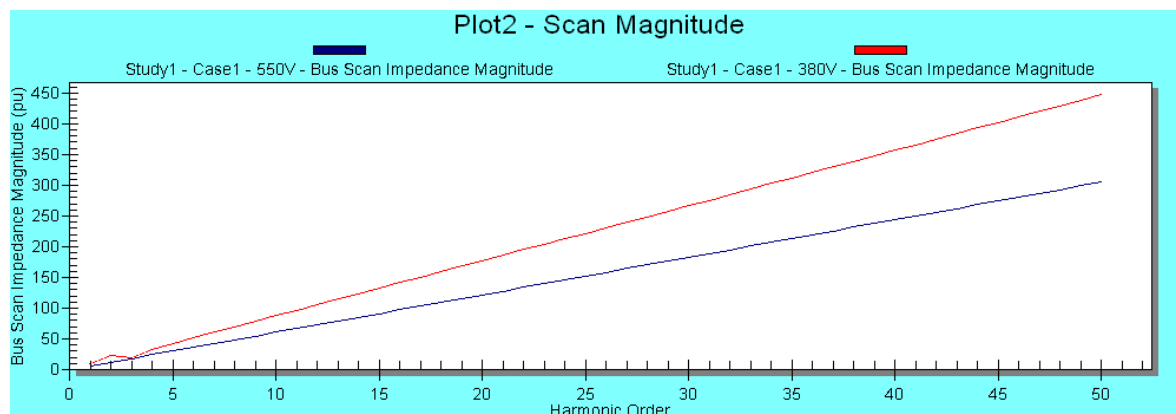
**Figura 28 – Espectro Harmônico com banco de capacitores de 200 kvar**

Fonte: Autoria própria

Nota-se que a frequência de ressonância esta agora em 420 Hz, ou seja, exatamente na 7<sup>a</sup> harmônica que possui percentuais relevantes na instalação.

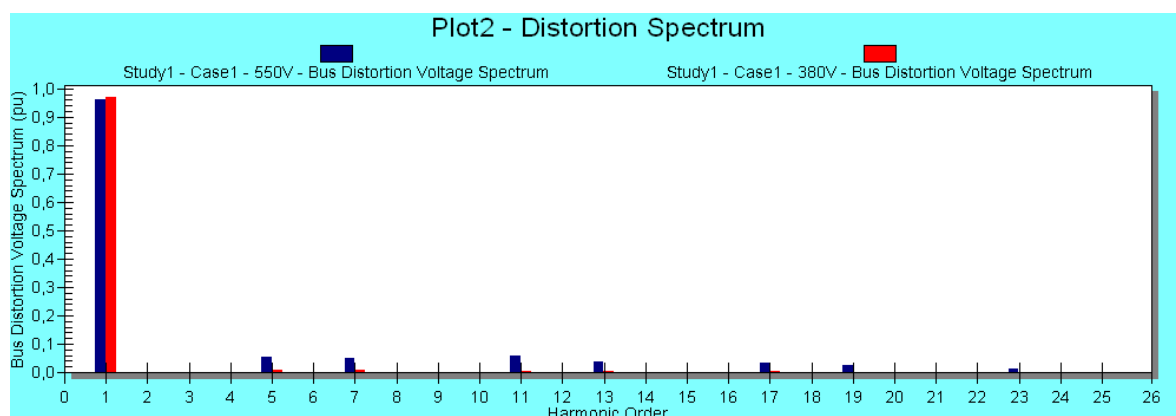
### 3.8.2 Inserção do Reator de dessintonia

Inserindo o reator de dessintonia na barra de 380 V, conforme dimensionado no item 3.6, obteve-se o seguinte resultado.



**Figura 29 – Frequência de Ressonância com filtro de dessintonia**

Fonte: Autoria própria

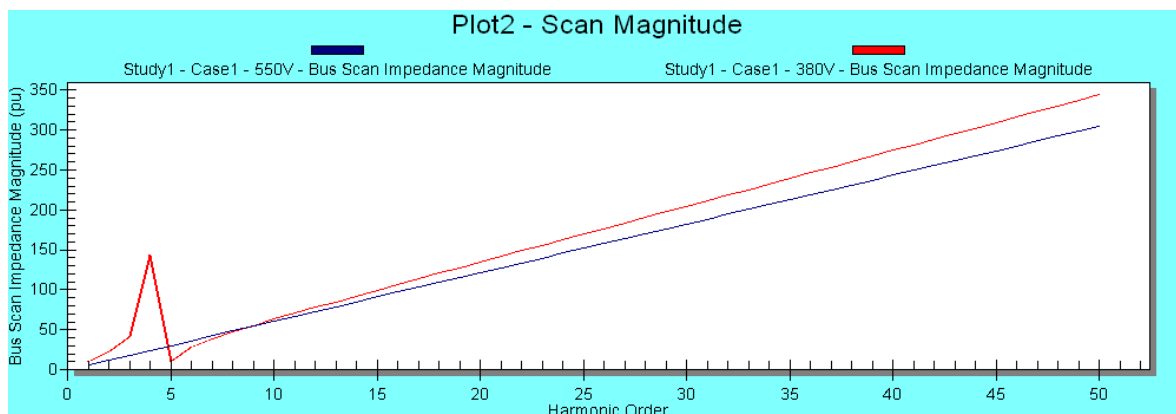


**Figura 30 – Espectro Harmônico com filtro de dessintonia**

Fonte: Autoria própria

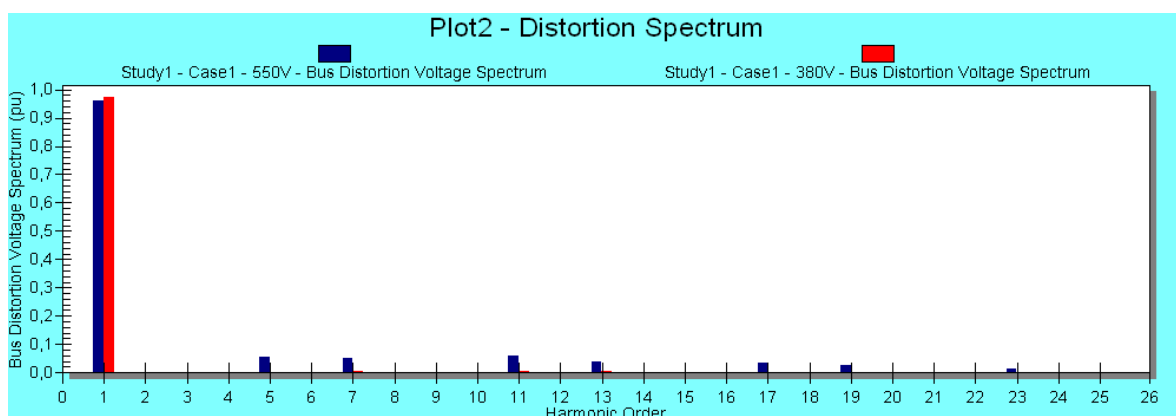
### 3.8.3 Inserção do Filtro Passivo de 5ª ordem

Inserindo o filtro passivo de 5ª ordem, na barra de 380 V, conforme dimensionado no item 3.7, obteve-se o seguinte resultado.



**Figura 31 – Frequência de Ressonância com filtro passivo**

Fonte: Autoria própria



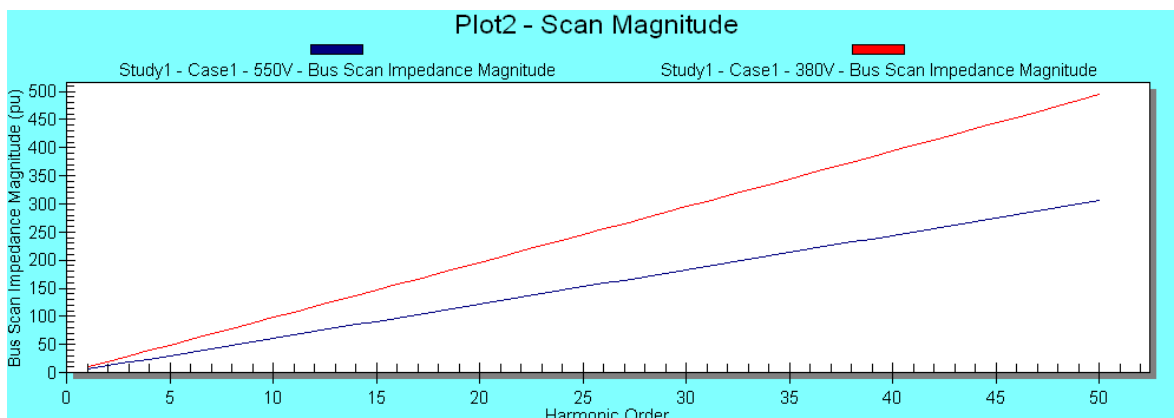
**Figura 32 – Espectro Harmônico com filtro passivo**

Fonte: Autoria própria

### 3.8.4 Sem compensação reativa

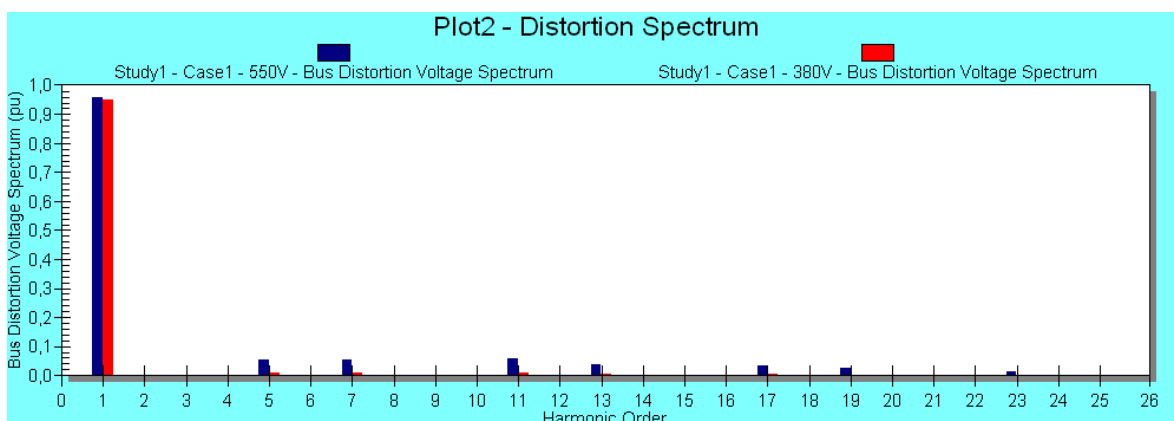
A título de base para comparação a instalação industrial foi simulada sem nenhuma forma de compensação reativa. As figuras 33 e 34 apresentam o resultado obtido.





**Figura 33 – Frequência de Ressonância sem compensação reativa**

Fonte: Autoria própria



**Figura 34 – Espectro Harmônico sem compensação reativa**

Fonte: Autoria própria

### 3.9 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

O programa disponibiliza um relatório com os valores de distorção harmônica total de tensão calculado em cada barra, a tabela 17 apresenta o resumo dos resultados apresentados no relatório do programa. A tabela 18 apresenta o fator de potência para cada situação.

**Tabela 17 – Distorção Harmônica Total de Tensão Simulação PTW32**

Situação	Banco de 140 kvar	Banco de 200 kvar	Reator de Dessintonia	Filtro Passivo	Sem Compensação
Barra	DTT	DTT	DTT	DTT	DTT
34,5 kV	1,46%	1,72%	1,44%	1,39%	1,46%
380 V	3,47%	9,10%	1,57%	0,88%	1,80%
550 V	11,51%	11,67%	11,50%	11,45%	11,55%

Fonte: Autoria própria

**Tabela 18 – Fator de Potência Simulação PTW32**

Situação	Banco de 140 kvar	Banco de 200 kvar	Reator de Dessintonia	Filtro Passivo	Sem Compensação
Barra	FP	FP	FP	FP	FP
34,5 kV	90%	93%	93%	94%	88%
380 V	88%	95%	95%	96%	72%
550 V	92%	92%	92%	92%	92%

Fonte: Autoria própria

Nota-se que sem compensação reativa o sistema apresenta baixa DTT na barra de 380 V, quando é inserido o banco de capacitores de 140 kvar a DTT praticamente dobra de valor, devido a interação entre o banco de capacitores e a impedância do transformador de 500 kVA e o ponto de ressonância situar-se próximo as harmônicas existentes. Com a inserção do banco de capacitores de 200 kvar puro o valor da DTT aumenta cinco vezes com relação ao sistema sem compensação, isto se deve ao fato de que nesta condição existe a ressonância na 7ª harmônica, que está presente na instalação, assim o sistema fica sujeito a apresentar problemas relacionados a queima de capacitores por sobrecorrente. O resultado apresentado quando são inseridos reatores de dessintonia é satisfatório, pois além de elevar o fator de potência aos níveis de referência ele reduz a DTT para níveis abaixo dos obtidos mesmo quando o sistema não possui compensação. Já o filtro passivo de 5ª harmônica apresenta o melhor resultado de DTT.

### 3.10 CUSTOS DOS SISTEMAS APRESENTADOS

Com a finalidade de avaliar a viabilidade econômica dos sistemas apresentados foi solicitado um orçamento a um fabricante de painéis elétricos dos três sistemas apresentados no estudo, banco de capacitores puro com células PPM e potência total de 200 kvar, banco de capacitores dessintonizados com células PPM e potência de 200 kvar e banco de capacitores com filtro passivo de 5ª ordem com capacitores Não-PPM, ou seja, impregnados à óleo. Os valores apresentados tem base econômica no ano de 2013 e não contemplam custos de material e mão de obra para instalação do sistema na indústria. A tabela 19 apresenta os custos obtidos com um fabricante de painéis elétricos.

**Tabela 19 – Custos dos sistemas de compensação reativa**

Sistema	Potência (kvar)	Preço (R\$)
Banco de Capacitores Puro	200	R\$ 19.750,00
Banco de Capacitores Dessintonizados	200	R\$ 23.315,00
Banco de Capacitores com Filtro Passivo	200	R\$ 38.818,00

**Fonte: Autoria própria**

### 3.11 ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA

Avaliando as contas de energia do ano de 2013 verificou-se que o consumo excedente reativo médio foi de 2.551 kWh no posto horário fora de ponta e 119 kWh no posto horário da ponta, totalizando 2.670 kWh. De acordo com o Art. 96 da Resolução 414 de 2010 a tarifa a ser aplicada para a cobrança de excedente reativo é a tarifa de energia (TE) aplicável ao subgrupo “B1” em R\$/MWh das tarifas vigentes para a concessionária. A tarifa vigente da concessionária Copel, a qual o cliente está conectado, é a constante na Resolução Homologatória número 1.565 de 09 de Julho de 2013 e a TE aplicável ao subgrupo “B1” é de R\$ 139,87 por MWh sem impostos. Os impostos aplicáveis ao faturamento de energia elétrica somam um total de 34,5 % e correspondem a PIS, COFINS e ICMS. Assim a tarifa de excedente reativo com

impostos inclusos é de R\$ 213,54 por MWh. Ou seja, atualmente o consumidor paga em média R\$ 570,15 por mês de excedente reativo o que por ano representa um custo adicional de R\$ 6.841,80 nas faturas de energia elétrica.

Existem vários métodos para análise de investimentos dentre os quais se destacam: payback, payback descontado, valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR) e taxa interna de retorno modificada. O payback é normalmente descartado para tomada de decisões, pois não considera o valor do dinheiro no tempo. Os três métodos mais utilizados são payback descontado, VPL e TIR. (SAMANEZ, 2002)

Neste trabalho serão utilizados o payback descontado, VPL e TIR para avaliar a viabilidade econômica deste projeto.

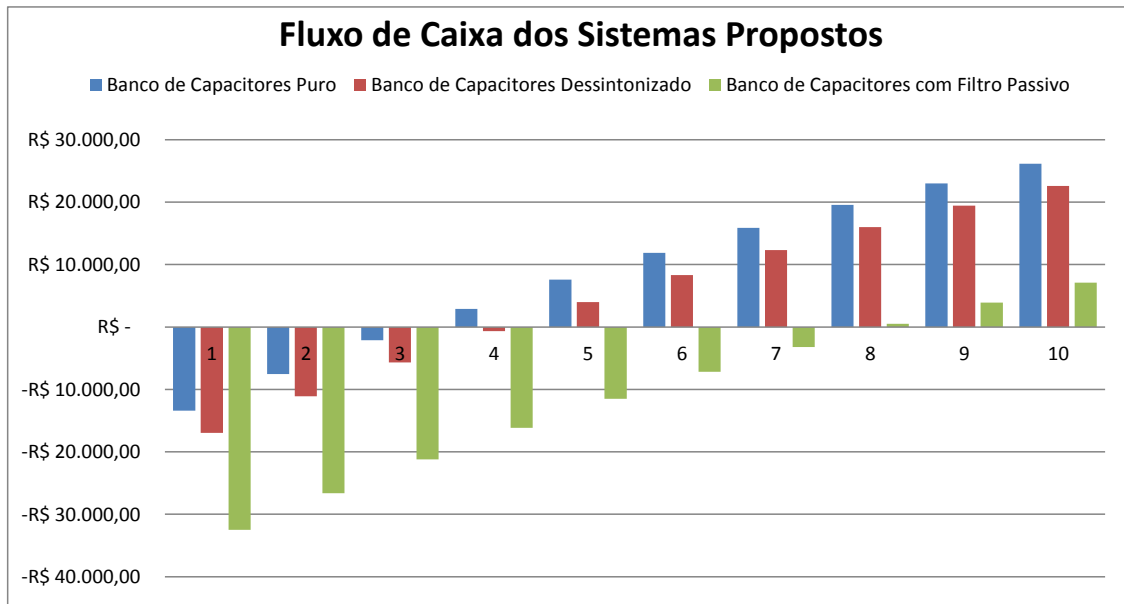
Payback descontado considera quanto tempo o projeto leva para se pagar levando em consideração a variação do dinheiro no tempo através de uma taxa de desconto. O VPL é o somatório do valor presente das saídas de caixa e o valor presente das entradas de caixa. A TIR é a taxa de juros que iguala os fluxos de entrada e de saída, em uma mesma data. (SAMANEZ, 2002)

Sendo assim, a tabela 20 apresenta o payback descontado, VPL e TIR para os três sistemas estudados e o gráfico 14 o fluxo de caixa de cada sistema.

**Tabela 20 – Payback descontado, VPL e TIR dos sistemas de compensação reativa**

Sistema	Preço (R\$)	Payback Descontado (anos)	VPL	TIR
Banco de Capacitores Puro	R\$ 19.750,00	3,4	R\$ 37.650,12	28%
Banco de Capacitores Dessintonizado	R\$ 23.315,00	4,2	R\$ 13.728,68	15%
Banco de Capacitores com Filtro Passivo	R\$ 38.818,00	7,4	(R\$ 90.297,71)	-31%

Fonte: Autoria própria



**Gráfico 14 – Fluxo de Caixa dos Sistemas Propostos**

## 4 CONCLUSÃO

O projeto de sistemas de compensação reativa para indústrias exige atenção especial quando no sistema se faz presente uma ou mais fontes de injeção de corrente harmônica. Neste trabalho foram apresentadas duas técnicas que são largamente utilizadas para compensação reativa em indústrias com altos índices de correntes harmônicas (filtros sintonizados e dessintonizados). Além disso, foram apresentados procedimentos para dimensionar estes equipamentos manualmente e é possível concluir que, para sistemas com poucas barras, os cálculos manuais possuem uma boa aproximação, em comparação com o resultado de simulações computacionais utilizando programas sofisticados.

Considerando os resultados obtidos no estudo de caso, nota-se que dentre os sistemas apresentados, o que apresenta a melhor relação custo-benefício é o filtro de dessintonia, pois com a sua aplicação é possível deslocar o ponto de ressonância da instalação para uma ordem harmônica inexistente e assim diminuir a distorção harmônica total de tensão para 1,57 % na barra de 380 V (a recomendação do IEE – 519 traz como referência o valor para DTT de 5 %). Além de elevar o fator de potência de 78 % para 95 % e garantir a vida útil do sistema de compensação reativa. Este sistema apresentou um payback descontado de 4,2 anos, VPL de R\$ 13.728,68 durante a vida útil de 10 anos e TIR de 15 %, ou seja, financeiramente o projeto é viável.

O banco de capacitores puro (sem filtros) se mostrou a opção economicamente mais viável, pois apresentou um payback descontado de 3,4 anos, VPL de R\$ 37.650,12 e TIR de 28%, porém é tecnicamente inviável, devido ao fato do ponto de ressonância neste caso ser exatamente na 7ª harmônica e, se caso esta opção fosse escolhida, o sistema apresentaria uma alta distorção total de tensão na barra de 380 V de 9,10 % e provavelmente problemas relacionados à má qualidade de energia seriam observados na indústria, tais como queima precoce do sistema de compensação reativa e disparo intempestivo de equipamentos de proteção.

O melhor resultado técnico foi obtido com o filtro passivo sintonizado, neste caso a distorção total de tensão ficou em 0,88 %, porém este sistema é o economicamente inviável, pois apresentou VPL e TIR negativos.

Espera-se que o conteúdo deste trabalho sirva de incentivo e de fonte de informação para que os profissionais e as empresas que atuam na área de engenharia elétrica analisem de uma maneira mais profunda a compensação reativa levando em consideração a interação entre os capacitores e as cargas não lineares presentes na instalação.

Sugerem-se como trabalhos futuros o dimensionamento de filtros de harmônicas em outras configurações, alocação de filtros na média tensão e utilização de filtros ativos para compensação reativa, bem como estudar a viabilidade técnica destes sistemas.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHAPMAN, David. **Harmônicas Causas e Efeitos**. Copper Development Association. Julho de 2002.

COTRIM Ademaro A.M.B., 1939 – **Instalações Elétricas**, revisão e adaptação técnica José Aquiles Baesso Gromoni e Hilton Moreno. 5. Edição – São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

DIAS, Guilherme A. D. **Harmônicas em sistemas industriais** – Porto Alegre: EDIPURS, 1998.

DIAS, G.A.D.; SONALIO F.V.; TELLÓ, M.; BEHLE, F.K.; SANTANA, B.; CASA, D. **Interação entre Forno de Indução e Banco de Capacitores – Estudo de Caso**. VI Seminário Brasileiro Sobre Qualidade de Energia Elétrica - SBQEE. Belém – PA, 2005. Disponível em: <  
<http://www.labplan.ufsc.br/congressos/SBQEE/Anaispdf/7794.pdf> >. Acesso em 22 de julho de 2013.

GALHARDO, Marcos A.B. e PINHO, João T. **Conceitos de distorção e não-linearidades**. V Seminário Brasileiro Sobre Qualidade de Energia Elétrica - SBQEE. Aracajú – SE, 2003. Disponível em: <  
[http://www.ufpa.br/gedae/SBQEE2003\\_01.PDF](http://www.ufpa.br/gedae/SBQEE2003_01.PDF)>. Acesso em 5 de Maio de 2013.

GODOI, Adelino A. **Alocação de Banco de Capacitores em Rede Primária e Secundária de Energia Elétrica**. Curitiba – PR. 2009. 145 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR, 2009.



\_\_\_\_\_. IESA Projetos, Equipamentos e Montagens S.A. **Capacitores impregnados x Capacitores Imersos (PPM) em BT**. Artigo. Disponível em: <[http://www.iesa.com.br/web/pdf/pdf\\_reativa/it\\_capMpPpm.pdf](http://www.iesa.com.br/web/pdf/pdf_reativa/it_capMpPpm.pdf)>. Acesso em 20 de Junho de 2013.

\_\_\_\_\_. IEEE Standard 519-1992. **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System**. 12 de abril de 1993.

LEMES, Marcelo Inácio. **Comparação técnico-econômica entre equipamentos mitigadores de harmônicas e compensadores de energia reativa**. Uberlândia – MG. 2010. 199 f. Tese (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2010.

MINATTI Fundação Técnica Ltda. Arquivo de fotos do forno de indução.

OMORI, Julio S.; ORTEGA, Mauricio R. **Estudo dos Impactos da Conexão de um Forno de Indução no Sistema de Distribuição**. XVII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – SENDI. Belo Horizonte – MG, 2006. Disponível em: <<http://www.labplan.ufsc.br/congressos/SENDI/pdf/QEE08-1088.pdf>>. Acesso em 20 de Junho de 2013.

PERETA, Henrique A.; LANDIM, Jorge P.; NOGUEIRA, LUIZ R. **Filtro de dessintonia para Banco de Capacitores**. XI Encontro Latino Americano de Iniciação Científica

\_\_\_\_\_. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica. - Brasília: ANEEL, 2010. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8\\_Revisao\\_1\\_Retificacao\\_1.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8_Revisao_1_Retificacao_1.pdf)>. Acesso em 10 de maio de 2013.

\_\_\_\_\_. Resolução Normativa 414/2010: atualizada até a REN 499/2012 / Agência Nacional de Energia Elétrica. - Brasília: ANEEL, 2012. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/REN\\_414\\_2010\\_atual\\_REN\\_499\\_2012.pdf](http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/REN_414_2010_atual_REN_499_2012.pdf)>. Acesso em 20 de abril de 2013.

RUBENS, José M.; RESENDE, José W.; SAMESIMA, Milton I.; GOMÊS, Davi B. **Desenvolvimento e Aplicação De Filtros Harmônicas Passivos Em Circuitos Secundários De Distribuição – Parte 2.** V Seminário Brasileiro Sobre Qualidade de Energia Elétrica - SBQEE. Aracajú – SE, 2003. Disponível em: <[http://www.sbqee.com.br/cbqee\\_2003\\_pdfs/065.pdf](http://www.sbqee.com.br/cbqee_2003_pdfs/065.pdf)>. Acesso em 15 de junho de 2013.

SKM, Systems Analysis. **Power Tools for Windows Tutorial.** Electrical Engineering Analysis Software for Windows. Disponível em: <<http://www.skm.com/>>. Acesso em 10 de Abril de 2013.

SAMANEZ, Carlos P. - **Matemática Financeira – Aplicações à Análise de Investimentos.** 3. Edição - São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2002.

SANDOVAL, Gonzalo. **Power Factor in Electrical Power Systems with Non-Linear Loads**. ARTECHE / INELAP S.A. DE C.V., 2007. Disponível em: <[http://www.artechepq.com/assets/files/PF\\_nonlinearloads.pdf](http://www.artechepq.com/assets/files/PF_nonlinearloads.pdf)>. Acesso em 18 de Agosto de 2013.

TAVARES, Paulo H. **Estudo, Projeto e Implantação de Filtros Harmônicas Sintonizados para a Expansão Industrial**. Campinas – SP. 2011. 142 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2011.

TEIXEIRA, Douglas A. **Análise das distorções harmônicas: estudo de caso de um sistema industrial**. Belo Horizonte – MG. 2009. 128 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2010.