

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ANACLETO DE ANGELI CÓSER

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA ELÉTRICO
INDUSTRIAL COM FOCO EM ANÁLISE DE DISTORÇÕES
HARMÔNICAS**

VIÇOSA
2015

ANACLETO DE ANGELI CÓSER

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA ELÉTRICO
INDUSTRIAL COM FOCO EM ANÁLISE DE DISTORÇÕES
HARMÔNICAS**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Mauro de Oliveira Prates.

VIÇOSA
2015

ANACLETO DE ANGELI CÓSER

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA ELÉTRICO
INDUSTRIAL COM FOCO EM ANÁLISE DE DISTORÇÕES
HARMÔNICAS**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 26 de junho de 2015.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Mauro de Oliveira Prates - Orientador
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. José Tarcísio de Resende - Membro
Universidade Federal de Viçosa

Engenheiro Eletricista Michael de Oliveira Resende - Membro
Universidade Federal de Viçosa

“Somos tão jovens ...”

(Renato Russo)

*Dedico este trabalho aos meus queridos familiares, principalmente aos meus pais
Atílio e Lucieni, sempre me dando muita força e apoio em minha jornada.*

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela luz, onipresença e minha capacidade. Aos meus pais Atílio e Lucieni por estarem sempre ao meu lado me apoiando, acreditando, dando força, carinho e educação. Ao meu querido irmão Daniel, meu grande amigo e parceiro para qualquer hora e ocasião. À Marcela pelo apoio nas horas difíceis e pela compreensão, e à Ludimila pelas orações.

Também agradeço ao professor Mauro Prates pela orientação deste trabalho, que auxiliou, de forma muito prestativa e com muita boa vontade, para que este trabalho fosse realizado e concluído.

Resumo

A Qualidade de Energia Elétrica (QEE) é um assunto de fundamental importância na engenharia elétrica. O crescente interesse pelo assunto se dá devido ao aumento da utilização de equipamentos baseados na eletrônica de potência. Além dos benefícios que esses equipamentos podem trazer, como um eficiente controle de fluxo de potência, eles também podem servir como fontes de distorções harmônicas em um sistema elétrico, comprometendo assim a qualidade de energia do mesmo. Sendo assim, para melhor compreender a influência dessas distorções harmônicas e como elas são inseridas na rede elétrica, o presente trabalho constitui-se de duas etapas complementares, a de simulação e a de medição. A primeira propõe a modelagem e simulação de um sistema elétrico industrial para análise de influência das distorções harmônicas. Para complementar esta primeira etapa, a segunda propõe a verificação, por meio de medições em laboratório, da injeção de correntes harmônicas causadas por uma das principais cargas não-lineares largamente utilizadas nas indústrias, os inversores de frequência. Por fim, este trabalho contempla de bons resultados tanto na etapa experimental quanto na etapa de simulação, considerando as limitações da modelagem que se baseia em um modelo simplificado da planta elétrica industrial em questão.

Sumário

1	Introdução.....	12
1.1	Harmônicos em um sistema elétrico.....	13
1.1.1	Distorção Harmônica Total	14
1.1.2	Geradores de harmônicos	15
1.1.2.1	Conversores eletrônicos.....	16
1.1.2.2	Transformadores.....	17
1.1.2.3	Fornos a arco elétrico	18
1.1.3	Efeitos dos harmônicos.....	18
1.2	Modelagem de cargas não lineares.....	20
1.3	Objetivos gerais	21
2	Materiais e Métodos	23
2.1	Base de dados	23
2.1.1	O sistema elétrico industrial	23
2.1.1.1	Dados dos harmônicos de corrente do sistema elétrico industrial.....	24
2.2	Modelagem e simulação	26
2.2.1	Subestação do SEP em estudo (Cotegipe).....	27
2.2.2	Linhas de transmissão e cabos de distribuição	28
2.2.3	Transformadores.....	29
2.2.4	Cargas lineares.....	31
2.2.5	Injeção de harmônicos (cargas não-lineares).....	31
2.2.6	Blocos de medição.....	33
2.3	Parte prática	34
2.3.1	Materiais utilizados	34
2.3.2	Medições.....	36
3	Resultados e Discussões.....	38
3.1	Simulação da planta industrial.....	38
3.2	Etapa experimental	43
4	Conclusões.....	46
	Referências Bibliográficas	47

Lista de Figuras

Figura 1 – Sinal senoidal e sua 3ª harmônica	14
Figura 2 – Conversor retificador trifásico de 6 pulsos de onda completa	17
Figura 3 – Forma de ligação das fontes de corrente [5]	21
Figura 4 – Diagrama unifilar simplificado [1].....	24
Figura 5a – Modelo completo do SEP em estudo (cargas Forno Panela e Forno EBT)	26
Figura 5b – Modelo completo do SEP em estudo (cargas Laminação, Usina e Redução Direta)	26
Figura 6 – Forma de ligação das fontes de correntes representando as cargas não-lineares	32
Figura 7 – Representação das correntes harmônicas	32
Figura 8 – Construção básica do sistema de medição de cada carga	33
Figura 9 – Construção do sistema de medição no barramento de entrada de 230 kV.....	34
Figura 10 – Inversor de frequência.....	35
Figura 11 – Motor de indução trifásico	35
Figura 12 – Osciloscópio digital.....	36
Figura 13 – Sinal de corrente de entrada do inversor de frequência	36
Figura 14 – Sinal de corrente de saída do inversor de frequência.....	37
Figura 15 – Sinal de tensão trifásica de entrada no barramento de 230kV	41
Figura 16 – Sinal de corrente trifásica de entrada no barramento de 230kV	41
Figura 17 – Sinal de tensão trifásica de entrada sem influência de cargas não lineares	42
Figura 18 – Sinal de corrente trifásica de entrada sem influência de cargas não lineares.....	42
Figura 19 – Forma de onda do sinal de entrada no inversor de frequência.....	43
Figura 20 – Espectro de frequência do sinal de entrada no inversor de frequência	44
Figura 21 – Forma de onda do sinal de saída no inversor de frequência	45
Figura 22 – Espectro de frequência do sinal de saída no inversor de frequência.....	45

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Potências ativa e reativa das cargas	24
Tabela 2 – Dados de distorção harmônica individual de corrente.....	25
Tabela 3 – Condutores nus para redes de transporte e distribuição (220kV e 400kV)	28
Tabela 4 – Resistência e indutância nos enrolamentos dos transformadores	30
Tabela 5 – Valores simulados e medidos no Forno Panela	38
Tabela 6 – Valores simulados e medidos no Forno EBT	38
Tabela 7 – Valores simulados e medidos na Laminação.....	39
Tabela 8 – Valores simulados e medidos na Usina	39
Tabela 9 – Valores simulados e medidos na Redução Direta.....	39
Tabela 10 – Valores simulados e medidos no barramento de entrada (230kV)	40
Tabela 11 – Novos valores de DHT sem a influência das cargas não lineares	42

1 Introdução

A utilização da energia elétrica com índices satisfatórios de qualidade, demanda rotineiramente um fornecimento de potência constante, níveis de tensão controlados e frequência inflexível. Estas grandezas devem ser mantidas em valores regulares independente das unidades consumidoras ligadas ao sistema elétrico [8]. Por esta razão existe um grande interesse no assunto Qualidade de Energia Elétrica (QEE), pois sem uma alimentação adequada e um certo padrão de qualidade, a carga pode operar de forma inadequada ou incorreta, vindo a falhar prematuramente ou simplesmente não funcionar [9].

Além disso, a crescente utilização de equipamentos baseados na eletrônica de potência, faz despertar um interesse ainda maior por esse assunto qualidade de energia elétrica. Esses equipamentos eletrônicos, apesar de proporcionarem um eficiente controle no fluxo de energia, produzem correntes e tensões harmônicas que prejudicam o sistema elétrico e resultam em uma piora na qualidade de energia elétrica [10].

No sistema de fornecimento de energia elétrica, o desejável é que se tenha uma forma de onda perfeitamente senoidal. Entretanto, sabe-se que toda condição ideal na prática não existe, portanto o que se deseja é chegar o mais próximo dela possível. A QEE é um conceito que abrange uma variedade de fenômenos eletromagnéticos que levam ao desvio da forma de onda, comprometendo assim o desempenho e a vida útil de equipamentos. As perturbações elétricas que causam esse desvio na forma de onda, podem ser divididas em duas categorias de distúrbios: eventos e sustentados [6]. Os distúrbios que se enquadram na categoria de eventos são os fenômenos de curta duração que ocorrem ocasionalmente. Já os distúrbios sustentados são aqueles que variam a forma de onda permanentemente, como por exemplo os harmônicos, que são o principal foco deste trabalho.

As tensões e correntes harmônicas possuem frequências múltiplas da fundamental do sistema elétrico. A ordem “N” que define a harmônica é então o valor diretamente multiplicado pela frequência fundamental. Desta forma, se o fornecimento de energia for a 60Hz, a harmônica de 2ª ordem possui frequência de 120Hz, a de 3ª ordem 180Hz, a de 4ª ordem 240Hz, e assim por diante [11].

As distorções harmônicas são geradas principalmente por cargas não lineares. Dentre essas cargas incluem-se os retificadores, as fontes de tensão chaveadas, os inversores de frequência, os dispositivos saturáveis (máquinas de corrente alternada em geral), os fornos a arco elétrico, os laminadores, conversores estáticos de potência, iluminação fluorescente, dentre outros. Esse tipo de carga produz correntes distorcidas mesmo quando energizadas por uma fonte não distorcida e injetam essas correntes de volta ao sistema elétrico causando variações de tensão. Desta forma, o efeito direto das cargas não lineares sobre o sistema é a distorção de corrente, e o indireto, a distorção de tensão [12].

A circulação das correntes harmônicas nos sistemas elétricos advém principalmente de cargas não lineares de sistemas industriais, os quais utilizam cada vez mais equipamentos estáticos e influentes na geração de harmônicos que se mostram danosos à concessionária e a outros consumidores [13]. Neste contexto surgiu a grande motivação para a escolha deste tema, que se baseia no estudo das distorções harmônicas em um sistema elétrico industrial, contando com o auxílio de ferramentas de simulação para a realização de várias análises do sistema.

1.1 Harmônicos em um sistema elétrico

A palavra “harmônico” se originou na área acústica e de instrumentos musicais, que significa múltiplo inteiro ou componente de um tom. Na engenharia o conceito não muda. Harmônico em eletricidade significa um sinal que possui frequência múltipla da fundamental, e o fator “N” (multiplicado pela frequência fundamental) define a sua ordem harmônica [6].

Para melhor ilustrar este fenômeno, a Figura 1 (desenvolvida no MATLAB) mostra um sinal senoidal, sua terceira harmônica, e o que acontece quando se somam esses sinais.

Além do sinal resultante aparecer visualmente distorcido, observa-se também que a amplitude deste sinal variou de 4 para 5. Esta distorção em sistemas elétricos pode ser muito prejudicial para as diversas cargas ligadas a ele, trazendo prejuízos tanto a concessionária fornecedora de energia elétrica quanto ao consumidor.

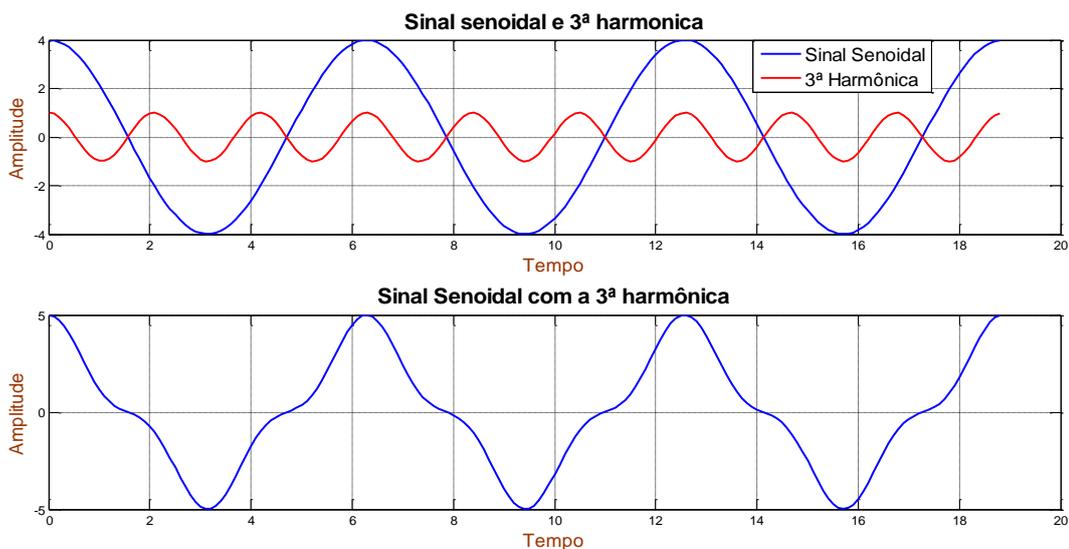


Figura 1 – Sinal senoidal e sua 3ª harmônica

A presença de harmônicos em um sinal elétrico não é um fenômeno novo. A preocupação com essas distorções surgiu no início da história dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) em corrente alternada. Entretanto, o interesse hoje em dia é muito maior, pois a utilização por grandes indústrias de equipamentos, que se baseiam na eletrônica de potência, vem crescendo devido ao ótimo controle do fluxo de potência que eles possuem.

1.1.1 Distorção Harmônica Total

Para dimensionar e quantificar o conteúdo harmônico de um sistema elétrico qualquer, existem alguns indicadores que se fundamentam nos valores de grandezas encontrados com os devidos medidores de harmônicos. O principal deles é a Distorção de Harmônica Total (DHT). Esse indicador pode ser calculado para os valores de tensão e corrente, e tomam como base o valor das grandezas fundamentais [14].

A DHT de tensão e corrente são dadas pelas Equações (1) e (2), respectivamente.

$$DHT_v = \frac{\sqrt{\sum_{h \neq 1} V_h^2}}{V_1} \quad (1)$$

$$DHT_i = \frac{\sqrt{\sum_{h \neq 1} I_h^2}}{I_1} \quad (2)$$

V_1 e I_1 representam a componente fundamental do sinal, enquanto que V_h e I_h representam a componente harmônica de ordem h (2,3,4,...). Esses valores podem ser de pico ou RMS [6].

O DHT_V de tensão admitida é no máximo 10%, pois valores acima disso são inaceitáveis e podem causar problemas especialmente para cargas sensíveis. Já o DHT_i de corrente pode variar de poucos por cento para mais de 100%. Sendo assim, uma boa análise por um especialista dos valores da DHT se fazem imprescindíveis. Por exemplo, pode-se pensar a princípio que uma DHT encontrada na corrente de alimentação de um equipamento pode ser danosa ou perigosa, entretanto se for considerado que este equipamento possui uma corrente muito baixa em relação à corrente total da rede, as amplitudes das harmônicas seriam pequenas e poderiam ser facilmente “diluídas” por outras cargas ligadas no mesmo alimentador. Por outro lado, se um equipamento possui DHT de corrente de 100% e o mesmo possui corrente alta em relação às outras cargas ligadas ao alimentador, esse harmônico certamente seria nocivo [1].

1.1.2 Geradores de harmônicos

Para entender os harmônicos e os problemas relacionados a eles, é interessante compreender as características das cargas que os produzem, que são em sua grande maioria cargas não lineares.

Os diferentes setores de produção estão dominados por uma grande variedade de equipamentos que possuem características não lineares, que normalmente incidem em três categorias [6]:

- I - Dispositivos eletrônicos de potência: conversores estáticos monofásicos e trifásicos.
- II - Dispositivos ferromagnéticos: transformadores e máquinas rotativas.
- III - Dispositivos a arco: iluminação a descarga e fornos elétricos a arco.

Os harmônicos são produzidos, por exemplo, pelos conversores estáticos ou reatores saturáveis devido ao processo de chaveamento dos equipamentos eletrônicos, e pelos transformadores devido às correntes de magnetização de seus núcleos [15].

Para definir as cargas não lineares, pode-se dizer que estas são cargas nas quais a corrente que por ela circula não é diretamente proporcional à tensão fornecida. Logo, qualquer carga que requisita uma corrente não senoidal de uma tensão senoidal da rede é dita não linear [15].

A nível de interesse deste trabalho, apenas os conversores, transformadores e fornos a arco elétrico serão vistos com um pouco mais de detalhes.

1.1.2.1 Conversores eletrônicos

Esses equipamentos possuem alta capacidade de produzir correntes harmônicas, constituindo atualmente a mais importante classe de cargas não lineares em sistemas elétricos de potência.

É bastante comum a presença destas cargas até mesmo em edifícios residenciais e comerciais, principalmente as monofásicas com fontes de alimentação chaveadas. Uma característica distintiva dessas fontes monofásicas é o alto conteúdo harmônico presente na corrente, principalmente o de 3ª ordem, o que não acontece com os conversores eletrônicos trifásicos, pois não geram correntes harmônicas triplas [3].

As características do conteúdo harmônico gerado pelos conversores trifásicos respeitam a relação $h = kq \pm 1$, em que q é o número de pulsos do conversor e k é um número inteiro (1, 2, 3,...). Como normalmente a harmônica de 3ª ordem possui a maior amplitude, a ausência desta em conversores trifásicos pode significar uma grande vantagem. Entretanto, sob condição de desequilíbrio, esses conversores poder requerer correntes não características da fonte, fazendo assim que surja por exemplo a harmônica de 3ª ordem e outras correntes triplas [6]. Como as componentes triplas são aditivas no neutro de um sistema trifásico, isso pode causar uma sobrecarga no mesmo, em especial nas instalações elétricas mais antigas. Uma tendência recente tem sido o uso de fontes chaveadas com correção de fator de potência de entrada objetivando tornar a fonte chaveada como uma carga resistiva vista pela fonte de alimentação, tal que a corrente apareça senoidal e em fase com a tensão aplicada [6].

O circuito de um conversor retificador trifásico de onda completa com índice de pulsação igual a 6 pode ser visto na Figura 2 (criada no ambiente do software Simulink).

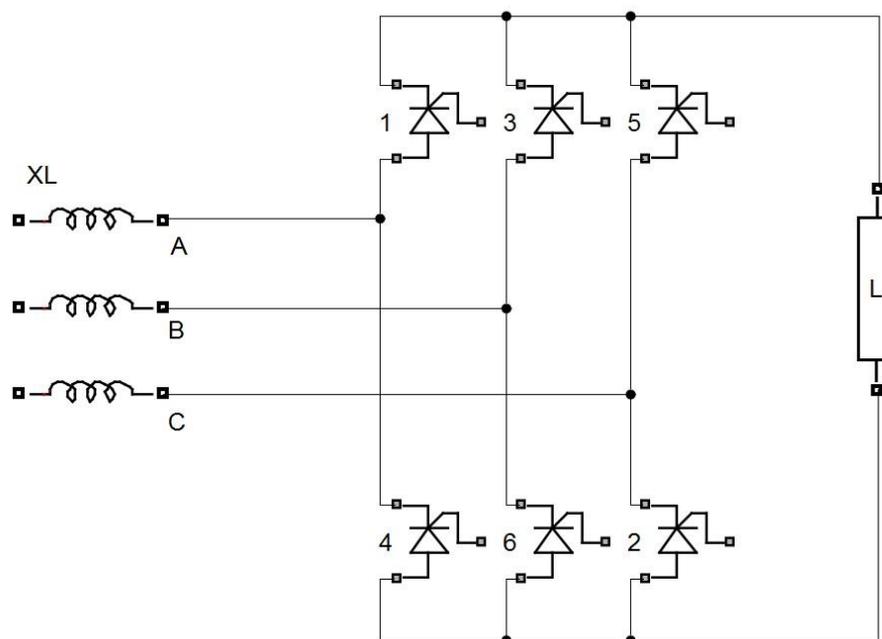


Figura 2 – Conversor retificador trifásico de 6 pulsos de onda completa

A reatância da fonte é representada por “XL” e a ordem de disparo dos tiristores é feita na ordem numérica. O símbolo “L” representa a carga (do inglês Load).

Este conversor tem presença de harmônicos de ordem $6K \pm 1$ para valores inteiros de K, e ausência de harmônicos múltiplos de ordem 3 [1].

1.1.2.2 Transformadores

Os transformadores injetam correntes harmônicas no sistema elétrico devido ao material ferromagnético utilizado em seus núcleos que se comportam de maneira não linear. A corrente de magnetização necessária para a criação e manutenção do fluxo magnético é uma onda não senoidal [6]. Principalmente nos transformadores de potência, em que a sua condição de operação é próxima ao joelho da curva de saturação, esses são os que mais incidem harmônicos dentre os transformadores.

Os harmônicos produzidos pela corrente de magnetização são normalmente de ordem ímpar devido a simetria do ciclo de histerese, a forma alternada da corrente de magnetização e ausência de componente CC (corrente contínua) [6].

Em transformadores trifásicos de potência, a possibilidade de circulação da 3ª harmônica, juntamente com as outras triplas, deve condicionar a escolha do tipo de ligação de seus enrolamentos. A presença de correntes harmônicas nos transformadores pode provocar, além de aumento na corrente eficaz e aquecimento, problemas de ressonância no circuito.

1.1.2.3 Fornos a arco elétrico

Estes equipamentos são utilizados em empresas siderúrgicas no processo de fundição e refino de metais, principalmente o ferro, para a produção de aço. O calor para fundir esses materiais provém do arco elétrico e é transferido para a carga por convecção ou radiação.

Os fornos a arco elétrico operam normalmente com um fator de potência em torno de 0,7 a 0,85 atrasado e requerem compensação de reativos para corrigir este fator de potência. Sendo assim, objetivando aplicar esta correção, bancos de capacitores são geralmente inseridos no circuito do forno a arco elétrico em uma configuração de filtro passivo (combinação de indutores e capacitores) de harmônicos sintonizado. Esses filtros além de melhorarem o fator de potência do circuito, irão também minimizar os efeitos harmônicos produzidos pelo forno a arco [16].

O processo de fusão da sucata metálica em aço demanda grande quantidade de energia, em decorrência principalmente dos grandes níveis de corrente elétrica que são atingidos (cerca de 30 kA) devido à formação do arco elétrico. Este arco é proveniente da ocorrência de um curto circuito entre os eletrodos do forno a arco, passando pelo material metálico uma tensão em torno de 1200 V [16].

Desta forma, fornos a arco elétrico são cargas extremamente não lineares, perturbadoras, e com um grande impacto na qualidade de energia. Suas perturbações não são apenas de natureza harmônica, mas também de várias outras como: flutuação de tensão, desequilíbrio de corrente e tensão, cintilação luminosa, dentre outras.

1.1.3 Efeitos dos harmônicos

Os efeitos causados pela presença de componentes harmônicas em um sistema elétrico são dos mais variados. Dentre eles incluem:

- Baixo fator de potência

- Correntes no neutro podem se igualar ou até mesmo exceder as correntes de fase.
- Sobreaquecimento de transformadores e motores.
- Atuação de dispositivos de proteção (disjuntores, relés, chaves seccionadoras) de forma intempestiva.
- Aumento de tensões neutro-terra.
- Estresse em isolamentos devido à ação de tensões harmônicas.
- Aumento de vibração.
- Aumento de cruzamentos por zero.
- Queima de fusíveis sem sobrecarga aparente.
- Mau funcionamento de controladores.

Os efeitos de sobreaquecimentos em máquinas rotativas, como motores e geradores, se dão principalmente devido à dessincronia causada pelas correntes harmônicas entre o eixo do motor e o campo girante, causando torques pulsantes [6].

Nos relés, os harmônicos podem forçar uma atuação indevida fazendo com que dispositivos de proteção não exerçam sua função corretamente.

Nos transformadores trifásicos, as harmônicas triplas ímpares (3^a, 9^a, 15^a, 21^a,...) estão sempre em fase, por este motivo, normalmente o primário é conectado em Δ (delta) de modo a prover um caminho para a circulação dessas componentes, que ficam retidas, não sendo injetadas no sistema de alimentação. No entanto, a 5^a e a 7^a harmônicas, que possuem amplitudes normalmente entre 5% e 10% da corrente nominal, são injetados no sistema causando distorção de corrente e tensão. Sendo assim, as consequências das harmônicas nos transformadores são o aumento de perdas no cobre por correntes parasita nos enrolamentos (causados pelas correntes harmônicas), e também, o aumento de perdas no núcleo e por histerese (causadas pelas tensões harmônicas) [6].

1.2 Modelagem de cargas não lineares

Em favor de pesquisas sobre a qualidade de energia elétrica, simuladores eletrônicos cada vez mais simples de se manusear vem surgindo, juntamente com equipamentos de processamento digital cada vez mais eficientes. Mesmo assim, no processo de modelagem de cargas não lineares o processo ainda pode ser árduo e trabalhoso, visto que para se obter bons resultados seria necessária uma fiel reprodução dos circuitos eletrônicos, elétricos e eletromecânicos originais [5].

Entretanto, objetivando ganhar tempo sem perder tanta eficiência, uma boa estratégia pode ser empregada no processo de modelagem de cargas não lineares. Esta estratégia consiste na inserção de fontes de correntes alternadas que representam as correntes drenadas pelos equipamentos quando submetidos as condições nominais. Perceba que não existe a necessidade de se reproduzir fielmente os circuitos de características não lineares. Entretanto, para isso, é necessária uma boa coleta de informações dos conteúdos harmônicos característicos dos equipamentos que se deseja modelar por meio dessas fontes de correntes. Bem como, para eficácia do modelo, o mesmo deve ser aplicado em sistemas em que a Distorção Harmônica Total (DHT) de tensão é inferior a 10% [5].

De qualquer forma, uma vez determinado o conteúdo harmônico da corrente drenada, pode-se reproduzir o modelo digital da carga não linear, por meio da inserção de fontes de correntes, para a representação dos harmônicos mais significativos.

Para melhor compreender a forma de ligação dessas fontes no sistema elétrico modelado é dada a Figura 3.

Como é possível observar, o carregamento do sistema elétrico é todo inserido em um único bloco (representado pelo resistor e pelo indutor), colocando separadamente apenas a parcela não linear (representada pelo tiristor em amarelo) das cargas. Para substituir esta parcela não linear, as fontes de correntes equivalentes aos harmônicos que circulam naquele sistema elétrico são inseridas em paralelo ao carregamento. A quantidade de fontes dependerá dos harmônicos significativos do sistema.

Além disso, essas fontes devem estar sincronizadas com as fases A, B e C do sistema elétrico trifásico, possuindo a mesma defasagem das correntes que circulam em cada uma das fases.

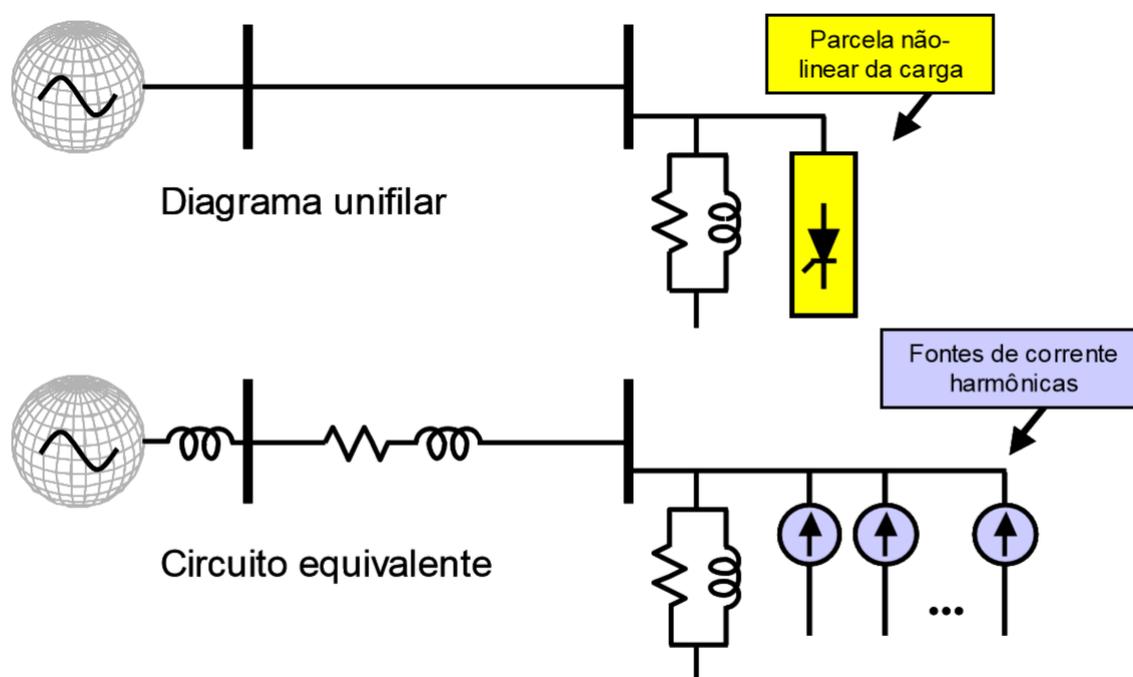


Figura 3 – Forma de ligação das fontes de corrente [5]

1.3 Objetivos gerais

Na engenharia, a simulação digital é muito utilizada para investigar resultados a partir de um modelo matemático, que representa um fenômeno ou um comportamento físico, com o objetivo de reduzir riscos nas tomadas de decisões e identificar problemas antes de sua ocorrência.

O principal objetivo deste trabalho consiste basicamente na modelagem e simulação de um sistema elétrico industrial, criando um ambiente sob efeito das distorções harmônicas geradas pelas mais diversas fontes. Uma vez criado e simulado este ambiente, será feita uma análise do sistema elétrico, e um estudo da qualidade de energia do mesmo, avaliando o seu comportamento diante de cargas operantes de diversas impedâncias e características harmônicas diferentes.

Além disso, uma outra proposta é verificar a existência e a injeção de correntes harmônicas no sistema elétrico por cargas não lineares, que resultam em uma piora na Qualidade de Energia Elétrica (QEE) de um sistema elétrico. Para isso foram feitas algumas medições no Laboratório de Engenharia Elétrica (LEE) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), coletando dados de corrente de entrada e saída de um inversor de frequência, que por sua vez alimenta um motor de indução de 0,75 cv ligado sem carga. A proposta desta parte experimental é fazer um estudo de caso de uma das principais cargas, largamente utilizadas nas grandes indústrias, que são responsáveis pela injeção de harmônicos nas redes elétricas.

2 *Materiais e Métodos*

2.1 *Base de dados*

Este trabalho consiste na simulação de um sistema elétrico industrial e análise do mesmo com foco nas distorções harmônicas. Os dados utilizados para a simulação foram retirados de [1] e baseiam-se em um estudo que coletou todos os dados pertinentes para uma boa análise de um sistema elétrico industrial, sendo possível uma avaliação fidedigna dos efeitos harmônicos.

A planta industrial, na qual este trabalho é baseado e cujos dados foram medidos e disponibilizados em [1], localiza-se no Estado da Bahia e é uma empresa siderúrgica com fabricação de cerca de 500 mil toneladas de aço por ano. Em particular, esta siderúrgica utiliza fornos a arco elétrico no processo de fusão e refino do metal, sendo assim de grande importância a análise da injeção de harmônicos neste sistema, pois estas são cargas extremamente não lineares [1].

Os demais dados utilizados neste trabalho foram medidos no Laboratório de Engenharia Elétrica (LEE) da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

As próximas subseções deste capítulo mostrarão com mais detalhes os dados do sistema elétrico industrial, utilizados como parâmetros e fornecidos por [1], e mostrarão também como foram realizadas as medições e coleta dos dados no LEE.

2.1.1 O sistema elétrico industrial

O diagrama unifilar simplificado da planta industrial, na qual foram utilizados os dados como parâmetros em estudo neste trabalho, pode ser observado na Figura 4.

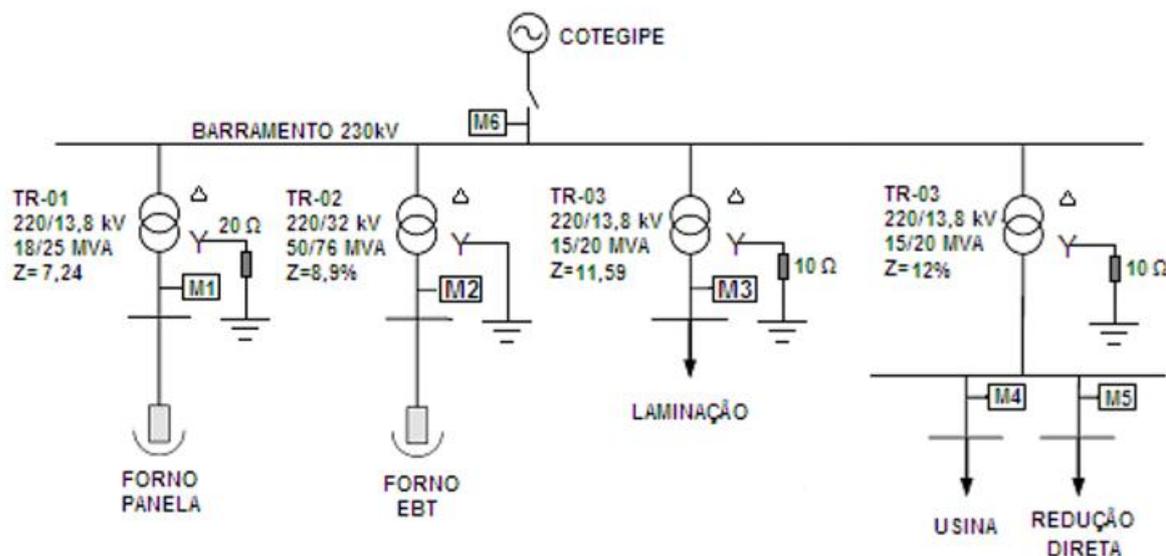


Figura 4 – Diagrama unifilar simplificado [1]

Os pontos M's indicados no diagrama estão informando os pontos de coletas dos dados. Os pontos M1, M2 e M3 estão nos secundários dos transformadores de alimentação de suas respectivas cargas e os pontos M4, M5 e M6 nas entradas dos seus respectivos barramentos, sendo que o M6 está no barramento principal de alimentação de 230 kV.

As potências de cada uma das cargas mostradas no diagrama unifilar encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Potências ativa e reativa das cargas

Cargas	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVar)
Forno Panela	10,07	-3,00
Forno EBT	57,56	22,44
Laminação	4,81	9,62
Usina	8,69	6,44
Redução	2,16	0,98

2.1.1.1 Dados dos harmônicos de corrente do sistema elétrico industrial

As distorções individuais de corrente foram obtidas ao longo do tempo de monitoração e mostradas na forma de espectro de frequência por valores P95%. Esses valores são

normalmente utilizados como patamares de comparação em várias normas existentes, por isso são mostrados dessa forma.

Valores P95% são índices com probabilidade de 95% de não serem excedidos, ou seja, eles expressam que em 95% do tempo monitorado, as grandezas apresentam níveis iguais ou abaixo dos valores que preenchem a coluna P95% [2].

A Tabela 2 mostra os dados de distorção harmônica individual de corrente (% da fundamental em RMS) medidos nos pontos de medição de M1 à M5 do sistema elétrico da Figura 1. Esses dados são valores médios das 3 fases, entretanto, os mesmos apresentam valores bastante próximos entre cada uma das fases.

Tabela 2 – Dados de distorção harmônica individual de corrente

Distorção de Corrente (%)															
	Ordem harmônica														
<u>Ponto de Medição</u>	2^a	3^a	4^a	5^a	6^a	7^a	8^a	9^a	10^a	11^a	12^a	13^a	15^a	17^a	19^a
<u>M1</u>	-	9,8	1,3	2,7	2,5	1,5	0,5	0,6	-	0,5	0,6	0,3	-	-	0,2
<u>M2</u>	8,5	5,5	2,7	3,9	1,5	1,8	1,1	1,2	0,8	0,8	0,7	0,6	-	-	-
<u>M3</u>	-	3,4	-	6,1	-	0,7	-	0,3	-	0,2	-	0,4	0,2	0,5	0,5
<u>M4</u>	-	0,8	-	1,5	-	0,7	-	0,1	-	0,4	-	0,4	0,1	0,2	0,1
<u>M5</u>	-	0,4	-	2,0	-	1,2	-	0,8	-	3,8	-	3,4	0,4	0,9	0,4

2.2 Modelagem e simulação

A simulação deste sistema elétrico foi realizada com o auxílio do software MATLAB/Simulink. Nesta fase do projeto, foram feitos vários pequenos modelos simplificados antes do desenvolvimento do modelo completo, para um melhor reconhecimento das ferramentas do programa e dos parâmetros do sistema elétrico em estudo.

Por fim, o modelo completo em estudo pode ser observado na Figuras 5a, com continuação na Figura 5b.

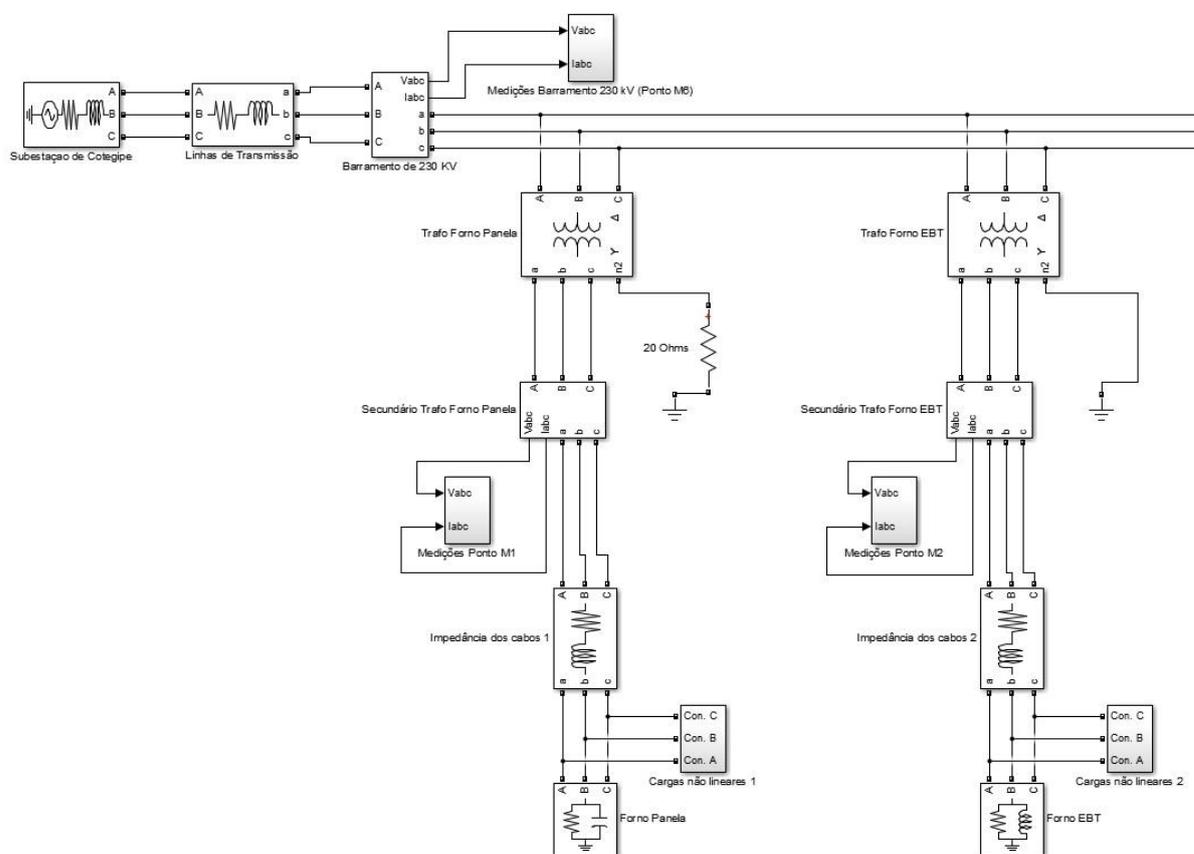


Figura 5a – Modelo completo do SEP em estudo (cargas Forno Painela e Forno EBT)

A construção deste modelo foi dividida em várias etapas, seguindo da subestação da fonte de alimentação do SEP em questão (Cotegipe), linhas de transmissão, transformadores, cabos de distribuição, cargas lineares, cargas não lineares (responsáveis pela injeção de harmônicos) e blocos de medições.

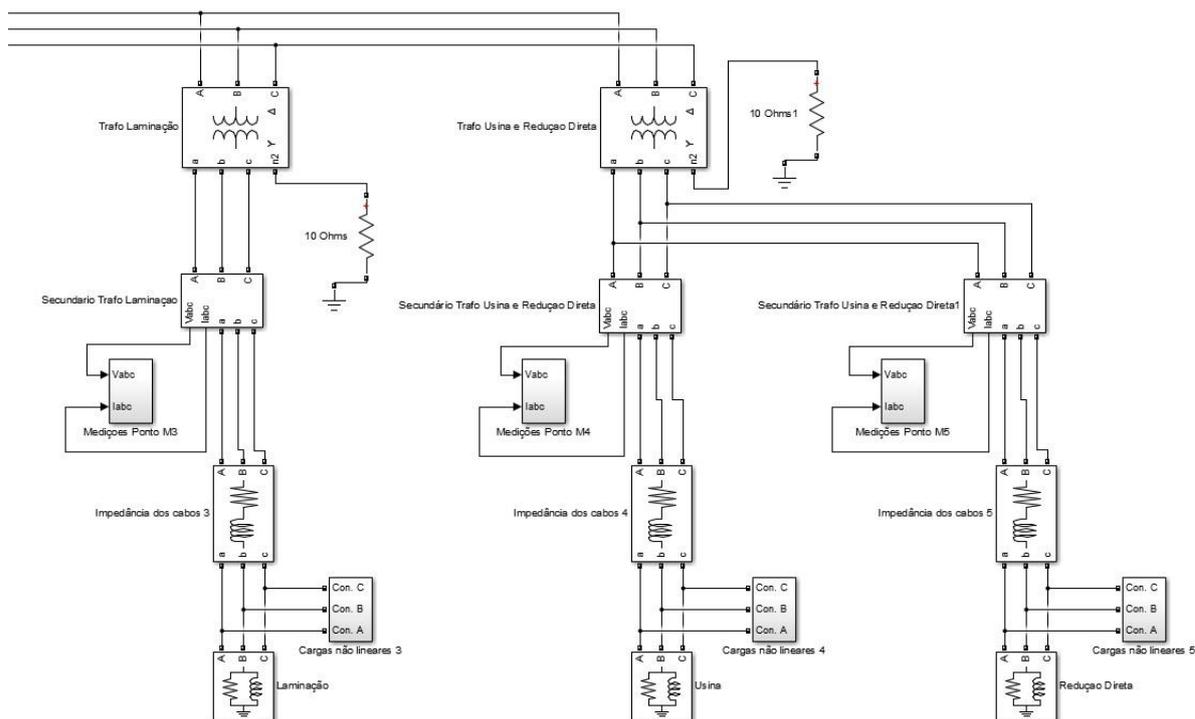


Figura 5b – Modelo completo do SEP em estudo (cargas Laminação, Usina e Redução Direta)

Nas subseções a seguir, são mostrados de forma mais detalhada, a concepção de cada etapa. Deve-se ressaltar a importância desta fase de reconhecimento dos parâmetros, pois desta forma chega-se o mais próximo possível dos resultados do sistema real. Infelizmente para alguns parâmetros foram feitas algumas considerações por não se ter posse dos dados reais, mas nada que afetasse o estudo do SEP.

2.2.1 Subestação do SEP em estudo (Cotegipe)

Para a modelagem da subestação de entrada que alimenta este sistema elétrico, foi utilizada uma fonte de tensão trifásica representada pelo bloco *Three-Phase Source*. Como os parâmetros de resistência e indutância desta fonte são desconhecidos e muito difíceis de serem estimados (pois dependem muito da impedância de todo o sistema elétrico de geração e transmissão que alimentam a subestação), optou-se por especificar a impedância usando nível de curto circuito e uma relação X/R (reatância/resistência) igual a 7 (padrão). Na tensão de linha foi considerada logicamente os 230kV que alimentam o barramento de entrada da indústria, frequência de 60 Hz e conexão interna em Y aterrado.

2.2.2 Linhas de transmissão e cabos de distribuição

Para a modelagem das linhas de transmissão e cabos de distribuição foi utilizado um bloco denominado *Three-Phase Series RLC Branch*. Em ambos os casos foi considerado apenas os parâmetros de resistência e indutância dos fios por se considerar que a linha de transmissão é uma linha curta e os cabos de distribuição são de alcances menores que 1 Km.

A linha de transmissão que vai da subestação de Cotegipe até o barramento de 230kV possui 10 Km de comprimento. Na revisão bibliográfica para encontrar a resistência e indutância dessa linha, percebeu-se que para ter uma boa exatidão seria necessário ter conhecimentos muito específicos, tais como materiais e métodos de construção dos condutores, distância entre os eixos centrais dos condutores, seção nominal do condutor, demanda de corrente, coeficiente de efeito pelicular, coeficiente de proximidade, dentre outros [3]. Sendo assim, os valores utilizados nesses parâmetros foram retirados de um exemplo de [4]. Isto pode ser feito seguramente, pois além do fato de vários parâmetros desses cabos de condução serem inacessíveis, o principal foco deste trabalho é a análise das distorções harmônicas.

Mesmo assim, foi feita uma validação dos valores encontrados para verificar a proximidade com valores reais de sistemas reais. Para isso tomou-se como referência o valor de resistência. A Tabela 3 mostra algumas características dos condutores mais comuns utilizados em Portugal [3]. Para efeito de proximidade com as linhas de transmissão de 220kV utilizadas no Brasil podem ser considerados os parâmetros de ZAMBEZE e ZEBRA.

Tabela 3 – Condutores nus para redes de transporte e distribuição (220kV e 400kV)

CABO	Diâm. (mm)	Secção (mm ²)	massa (kg/m)	Mod. E (kg/mm ²)	C.D.T. (°)	Cf.Form	CR (kg)	Rcc (20°C) (Ohm/m)	Kr (/K)	CCL (J/m/K)	S aço (mm ²)	Coef. Ef. Pel.
ACST14.6	14,60	120,54	0,526	9388	17,20E-6	1,1	6429	311,00E-6				
ACST15.5	15,50	137,82	0,578	9133	17,00E-6	1,1	8271	309,00E-6				
ACST16.3	16,25	151,21	0,633	9252	17,00E-6	1,0	9092	280,00E-6				
ASTER570	31,05	570,24	1,575	5508	23,00E-6	1,0	18735	58,30E-6	3,60E-3	1397,09	0,00	1,024
BEAR	23,45	326,12	1,226	8112	17,80E-6	1,0	11161	109,30E-6	4,03E-3	881,06	61,70	1,003
DORKING	16,00	152,81	0,719	10663	15,30E-6	1,0	7865	299,20E-6	4,03E-3	449,26	56,30	
GUINEA	14,60	127,24	0,598	10663	15,30E-6	1,1	6782	359,40E-6	4,03E-3	374,09	46,88	
OPGW14.6	14,60	120,50	0,519	9381	17,20E-6	1,1						
OPGW15.5	15,50	135,86	0,573	9279	17,00E-6	1,1	8271	309,00E-6				
PANTHER	21,00	261,20	0,974	7875	17,73E-6	1,0			4,03E-3			
PASTEL147	15,75	147,11	0,553	8568	18,10E-6	1,1	8352	279,00E-6	3,60E-3	397,43	27,83	
SWG19/13	11,70	81,61	0,649	19000	11,50E-6	1,2	7200		3,50E-3	308,49	81,61	
SWG7/13	7,02	30,10	0,240	19339	11,52E-6	1,2			3,50E-3		30,10	
TEJO	25,11	373,90	1,615	9350	15,75E-6	1,0			4,03E-3			
ZAMBEZE	31,80	594,97	1,798	6276	21,20E-6	1,0	12211	51,10E-6	4,03E-3	1497,03	29,59	1,021
ZEBRA	28,62	484,48	1,632	6939	19,30E-6	1,0	13111	67,40E-6	4,03E-3	1260,92	55,60	1,011

Desta forma, conforme a Tabela 3 o valor de resistência encontrado para a linha de transmissão de 10 km iria variar de 0,511 ohms (ZAMBALE) a 0,674 ohms (ZEBRA), já multiplicando os valores apresentados na tabela de Ohm/m por 10000 metros. Comparando com os valores utilizados do exemplo [4], considera-se aceitável a aproximação.

Dessa forma, os valores de impedância utilizados na simulação são dados pela Equação (3) e foram considerados iguais para as três fases.

$$Z = 0,05899 + j0,5612 \quad \Omega/km \quad (3)$$

O valor da indutância pode ser facilmente encontrado por meio da Equação (4), sendo “x” a reatância indutiva e “w” a frequência angular da rede ($2\pi f$).

$$L = \frac{x}{w} \quad H \quad (4)$$

Considerando que os comprimentos dos cabos de distribuição são menores que 1 km cada, a impedância dos mesmos foi também aproximada para o valor de impedância fornecido pela Equação (1) sem grandes impactos na simulação, já que as perdas nessas linhas são pequenas.

2.2.3 Transformadores

O bloco utilizado para a modelagem dos transformadores que alimentam as cargas principais, foi o *Three-Phase Transformer (Two Windings)*. Todos esses transformadores possuem a configuração triângulo no primário e estrela aterrado no secundário, sendo que 3 deles possuem resistores de aterramento, que são os que alimentam o Forno Painela, a Laminação e a Usina/Redução-Direta.

Os valores de potência nominal, relação de tensão dos enrolamentos e impedância dos transformadores são dados na Figura 4, onde se encontra o diagrama unifilar simplificado da planta industrial. É interessante observar que o transformador do Forno EBT provavelmente está sendo utilizado em condição de resfriamento forçado, pois sua carga exige uma potência maior do que a nominal (com resfriamento natural). Portanto, o valor utilizado na simulação para a potência nominal desta carga (Forno EBT) foi o valor em condição de resfriamento forçado. Para as demais cargas foram utilizados os valores de potência nominal em condições de resfriamento normal.

Para encontrar os valores de resistência e indutância dos enrolamentos, a sequência de cálculos realizados para a carga do Forno Panela são dados a seguir:

$$Z = 7,24\% \quad \Rightarrow \quad Z = 0,0724 \text{ pu}$$

$$FP = 0,958 \text{ (Fator de potência da carga)}$$

$$\Theta = \cos^{-1}(FP) = \cos^{-1}(0,958) = 16,665^\circ$$

$$Z = 0,0724 \angle \Theta \quad \Rightarrow \quad Z = 0,0724 \angle 16,665^\circ$$

$$Z = 0,06936 + j0,02076 \quad (Z = R + jX)$$

Logo,

$$R = 0,06936 \text{ pu}$$

$$L = X/\omega = 0,02076/(2*\pi*60) = 0,000055 \text{ pu}$$

Desta forma procederam também os cálculos para os transformadores do Forno EBT, Laminação e Usina/Redução-Direta.

A Tabela 4 mostra os valores de resistência e indutância encontrados para cada carga.

Tabela 4 – Resistência e indutância nos enrolamentos dos transformadores

Carga	Resistência (pu)	Indutância (pu)
Forno Panela	0,06936	0,0000550
Forno EBT	0,08290	0,0000856
Laminação	0,05180	0,0002750
Usina e Redução Direta	0,09946	0,0001780

Os valores de resistência e indutância de magnetização dos transformadores utilizados em todos os casos e para todas as cargas foi de 500 pu. Fez-se essa definição com valores em pu bastante altos, por não se conhecer os parâmetros de magnetização do núcleo do transformador, desta forma as perdas no núcleo serão muito pequenas (devido aos altos valores de impedância de magnetização do núcleo utilizados).

2.2.4 Cargas lineares

Para modelar as cargas do sistema foi utilizado o bloco *Three-Phase Parallel RLC Load*. Neste caso os parâmetros necessários para a utilização do bloco são bastante simples, necessitando informar apenas as potências ativa e reativa do sistema, tensão de linha e frequência nominal. Considerou-se as cargas em configuração Y aterrado.

2.2.5 Injeção de harmônicos (cargas não-lineares)

Na representação dos harmônicos que circulam na rede, foram inseridas fontes de correntes em paralelo com as cargas.

Na modelagem de cargas não lineares por fontes de corrente, procura-se reproduzir a corrente drenada pelo equipamento quando o mesmo está submetido a condições nominais de operação. De fato, uma solução bastante precisa seria pensar na reprodução fiel dos circuitos eletrônicos, elétricos e eletromecânicos originais. Entretanto essa seria uma tarefa árdua e que levaria a uma complexidade muito grande do modelo [5]. Além do fato que, no presente estudo, não se tem o conhecimento de tais circuitos e equipamentos.

Sendo assim, pode-se representar as cargas não-lineares de forma alternativa por fontes de correntes harmônicas equivalentes [5]. Visto que se possui as principais informações a respeito do conteúdo harmônico do sistema, segundo a Tabela 2, pode-se certamente aplicar esta estratégia de modelagem.

Dando início a esta etapa, inseriu-se as fontes de correntes de forma sincronizada individualmente nas fases A, B e C. Em outras palavras, as fontes foram inseridas em fase com cada fase. Por exemplo, se a fase “A” possui defasagem de 20° , a corrente harmônica inserida também irá possuir defasagem de 20° , de forma a representar que a própria carga está inserindo essas correntes no sistema elétrico.

A Figura 6 representa a forma de ligação das fontes de corrente. Foi utilizado para ilustração a carga do Forno Panela, mas todas as ligações foram feitas da mesma forma, inserindo em cada fase o conjunto de harmônicas mais influentes no sistema elétrico.

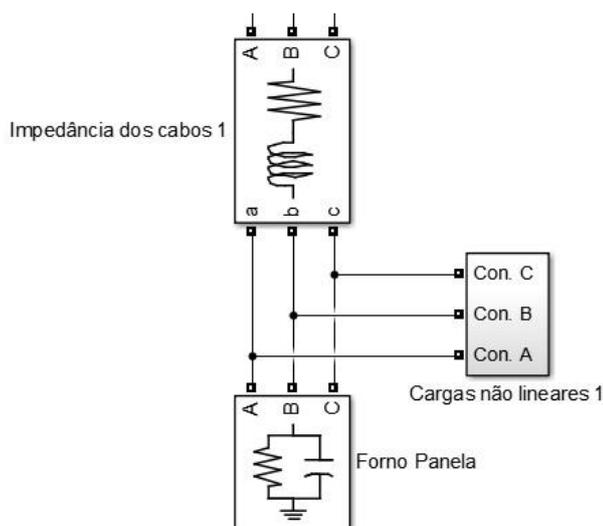


Figura 6 – Forma de ligação das fontes de correntes representando as cargas não-lineares

As correntes harmônicas são inseridas por meio das conexões 1, 2 e 3 do Bloco *Cargas não lineares 1* em suas respectivas fases.

Dentro do bloco *Cargas não lineares 1*, estão inseridas 5 das correntes harmônicas mais influentes em cada fase, ligadas também em paralelo entre elas, como pode ser visto na Figura 7.

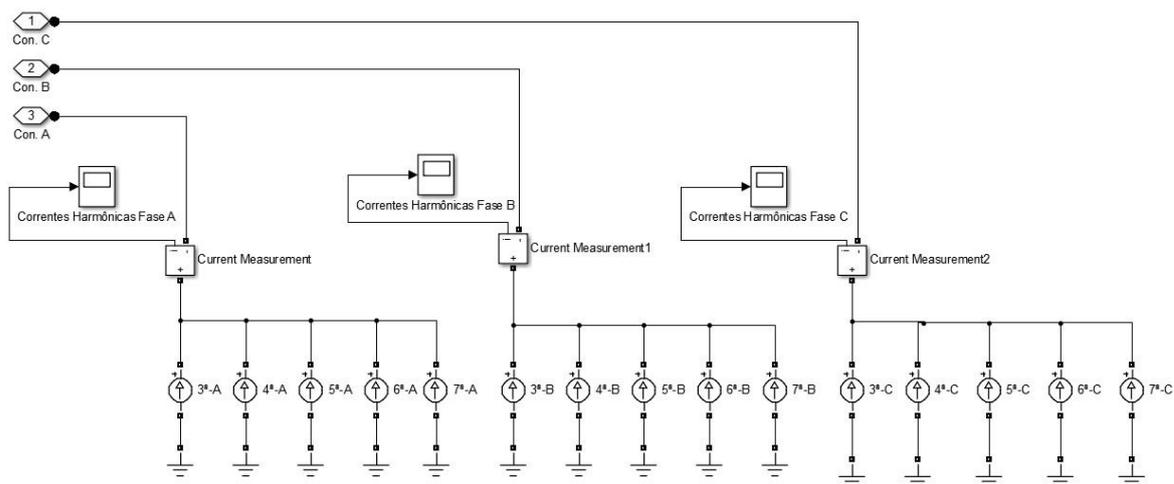


Figura 7 – Representação das correntes harmônicas

Como pode ser visto, as 5 harmônicas de maior influência (amplitude) inseridas, neste caso, estão em sequência da 3ª até a 7ª ordem, entretanto essa disposição poderá variar entre as cargas, pois as amplitudes dessas correntes dependem da natureza da carga não linear.

Cada uma das correntes harmônicas representadas na Figura 4 possuem suas respectivas amplitudes e frequências, de acordo com os dados dos harmônicos de corrente do subitem 2.1.1.1 (Tabela 2).

2.2.6 Blocos de medição

Assim como as cargas não lineares, os blocos de medição também foram inseridos em subsistemas e podem ser vistos com mais detalhes nas Figuras 8 e 9.

A Figura 8 representa a construção básica dos blocos que medem os parâmetros de forma individual para cada carga do sistema elétrico. Alguns desses valores encontrados foram utilizados como base para auxiliar na modelagem das cargas não lineares (sincronização das fontes de correntes harmônicas). Foram estes os valores de corrente RMS de fase e os ângulos de defasagem (em graus) de cada uma das correntes A, B e C.

A Figura 9 mostra a disposição dos blocos que medem os parâmetros de entrada do sistema, ou seja, do barramento de 230kV.

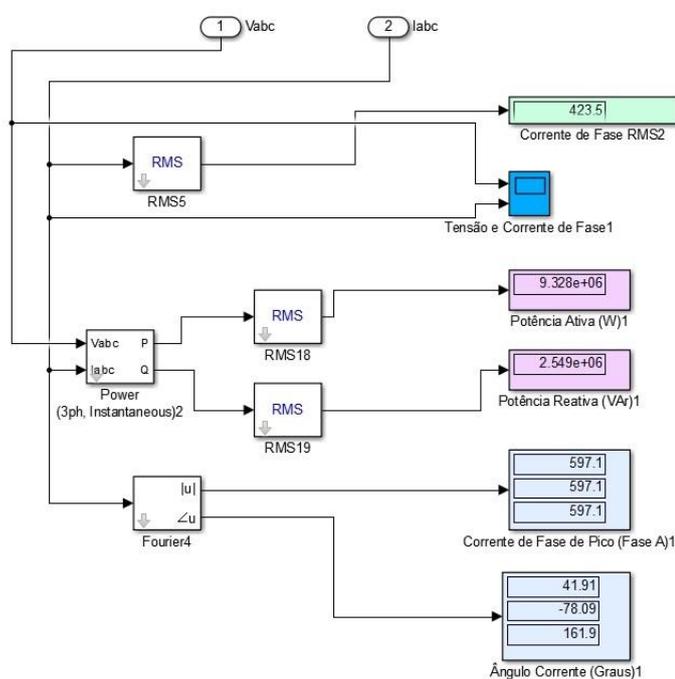


Figura 8 – Construção básica do sistema de medição de cada carga

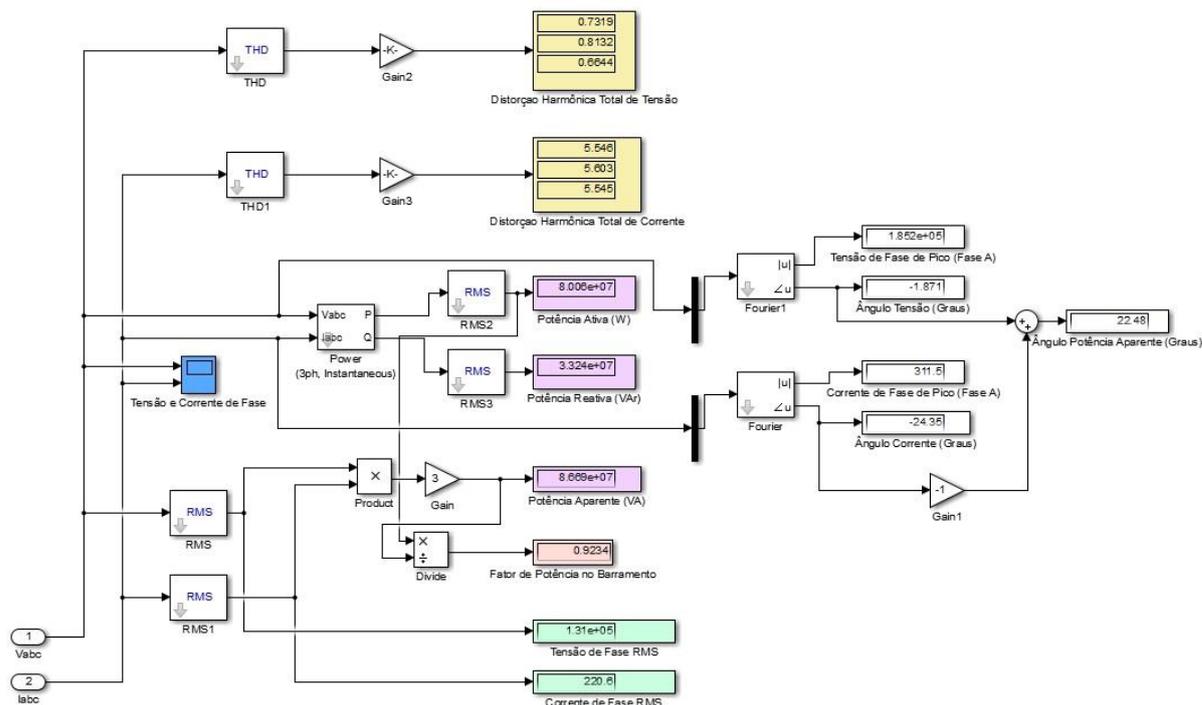


Figura 9 – Construção do sistema de medição no barramento de entrada de 230 kV

2.3 Parte prática

Para verificar a existência das correntes harmônicas, e que elas são injetadas no sistema elétrico principalmente por cargas não lineares, mediu-se os sinais de corrente de entrada e de saída de um inversor de frequência que alimenta um motor de 4 polos ligado sem carga. Os sinais foram coletados por um osciloscópio em sua forma de onda temporal e processados no software MATLAB para a sua análise espectral. A principal proposta desta prática foi fazer um estudo de caso de uma das cargas não lineares utilizadas em indústrias, os inversores de frequência, que são grandes geradores de harmônicos.

2.3.1 Materiais utilizados

O inversor de frequência é o CFW-11 da Weg, como pode ser visto na Figura 10. Este modelo possui frequência de entrada de 50/60 Hz e frequência de saída de 0 a 300 Hz. Sua alimentação é trifásica alternada de 200 a 240V.



Figura 10 – Inversor de frequência

O motor utilizado também é um modelo da Weg e trata-se de um motor de indução trifásico de 0,75cv de potência, com alimentação de 220V em ligação Δ e 380V em ligação Y. O mesmo pode ser observado na Figura 11.



Figura 11 – Motor de indução trifásico

O osciloscópio que auxiliou nas medições foi o TDS 1001B digital de dois canais da marca Tektronix. A Figura 12 ilustra o modelo. Este osciloscópio possui um sistema de armazenamento digital e drive USB, no qual é possível exportar dados.

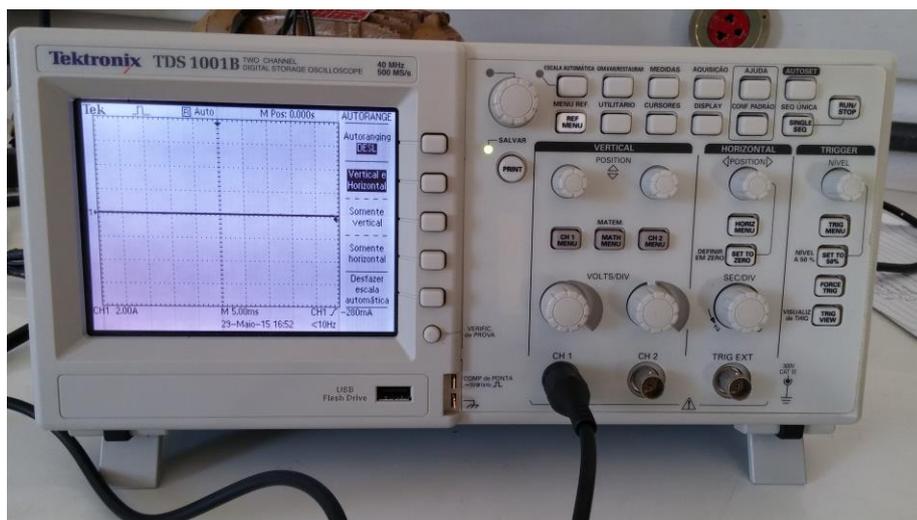


Figura 12 – Osciloscópio digital

2.3.2 Medições

Primeiramente foi feita a montagem do sistema alimentando o inversor de frequência, com o motor acoplado em sua saída, em 220V CA (rede). Feito isso, com a ponta de prova na entrada do inversor de frequência, obteve-se o sinal de corrente exigido da rede, quando se alimenta o motor para uma frequência ajustada em 48Hz e rotação de 1440 rpm (escolha arbitrária). O sinal encontrado está mostrado conforme a Figura 13.

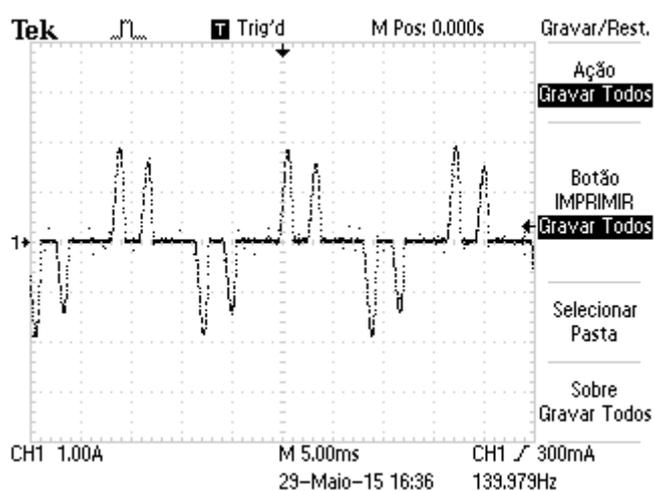


Figura 13 – Sinal de corrente de entrada do inversor de frequência

Para medir o sinal de entrada do motor, a ponta de prova foi colocada na saída do inversor de frequência (que é o sinal que alimenta o motor), obtendo uma corrente de acordo com a Figura 14.

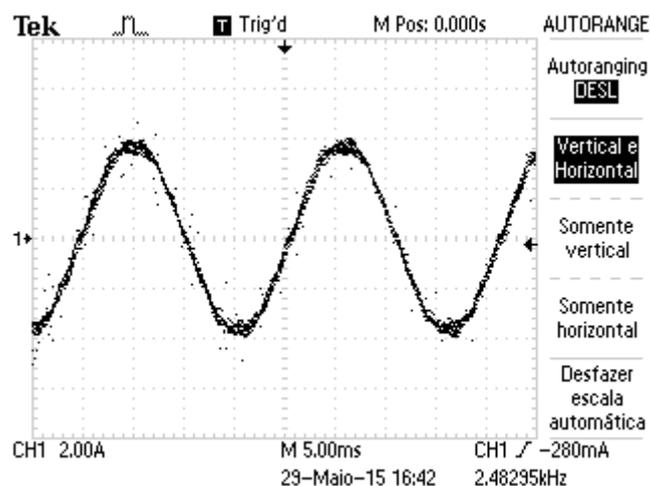


Figura 14 – Sinal de corrente de saída do inversor de frequência

Sendo assim, para coletar e armazenar esses valores para posteriores estudos e análises, foi salvo uma cópia dos mesmos em um pen-drive através do Flash Drive USB do osciloscópio, que exporta imagens do display e também dados das grandezas em formato de tabelas.

3 *Resultados e Discussões*

3.1 *Simulação da planta industrial*

A primeira etapa deste trabalho consiste no processo de modelagem da planta industrial mostrada na Figura 1, seguida da etapa de simulação.

Os valores obtidos nos pontos de medições das cargas, resultados da simulação do modelo completo, estão mostrados nas Tabelas de 5 a 9. Para comparação desses resultados, foram utilizados os valores medidos encontrados em [1].

Tabela 5 – Valores simulados e medidos no Forno Panela

Forno Panela (Ponto de medição M1)		
Grandezas	Valores Medidos	Valores Simulados
Tensão RMS de fase	7,98 kV	7,62 kV
Corrente RMS de fase	504 A	432,5 A
DHT da Tensão	1,41 %	1,15 %
DHT da Corrente	11,61 %	7,82 %
Potência Ativa	10,07 MW	9,33 MW
Potência Reativa	- 3,0 MVar	- 2,55 MVar

Tabela 6 – Valores simulados e medidos no Forno EBT

Forno EBT (Ponto de medição M2)		
Grandezas	Valores Medidos	Valores Simulados
Tensão RMS de fase	15,10 kV	16,96 kV
Corrente RMS de fase	1296,13 A	1010 A
DHT da Tensão	4,64 %	1,27 %
DHT da Corrente	12,33 %	6,96 %
Potência Ativa	57,56 MW	47,2 MW
Potência Reativa	22,44 MVar	20,15 MVar

Tabela 7 – Valores simulados e medidos na Laminação

Laminação (Ponto de medição M3)		
Grandezas	Valores Medidos	Valores Simulados
Tensão RMS de fase	8,48 kV	7,95 kV
Corrente RMS de fase	422,16 A	436,5 A
DHT da Tensão	2,86 %	0,94 %
DHT da Corrente	6,59 %	5,27 %
Potência Ativa	4,81 MW	4,57 MW
Potência Reativa	9,62 MVar	9,35 MVar

Tabela 8 – Valores simulados e medidos na Usina

Usina (Ponto de medição M4)		
Grandezas	Valores Medidos	Valores Simulados
Tensão RMS de fase	7,94 kV	7,18 kV
Corrente RMS de fase	429,84 A	397,4 A
DHT da Tensão	1,39 %	0,9 %
DHT da Corrente	2,01 %	1,34 %
Potência Ativa	8,69 MW	6,8 MW
Potência Reativa	6,34 MVar	5,2 MVar

Tabela 9 – Valores simulados e medidos na Redução Direta

Redução Direta (Ponto de medição M5)		
Grandezas	Valores Medidos	Valores Simulados
Tensão RMS de fase	7,86 kV	7,18 kV
Corrente RMS de fase	113,91 A	89,22 A
DHT da Tensão	1,53 %	0,9 %
DHT da Corrente	5,58 %	4,41 %
Potência Ativa	2,16 MW	1,75 MW
Potência Reativa	0,98 MVar	0,81 MVar

Os valores obtidos no ponto de medição M6 de entrada (barramento de 230 kV), resultantes da simulação do modelo completo encontra-se na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores simulados e medidos no barramento de entrada (230kV)

Barramento de entrada 230 kV (Ponto de medição M6)		
Grandezas	Valores Medidos	Valores Simulados
Tensão RMS de fase	133,03 kV	131,0 kV
Corrente RMS de fase	257,45 A	220,6 A
DHT da Tensão	1,3 %	0,81 %
DHT da Corrente	8,36 %	5,61%
Potência Ativa	83,29 MW	80,10 MW
Potência Reativa	36,39 MVar	33,24 MVar
Potência Aparente	90,89 MVA	86,69 MVA
Fator de Potência	0,916	0,923

Observando os valores obtidos na simulação, percebe-se que eles normalmente se encontram ligeiramente abaixo dos valores medidos. Isso certamente se deve ao fato de que foram feitas muitas considerações no processo de modelagem idealizando alguns parâmetros que na prática não são ideais, implicando assim em uma demanda menor de corrente devido à menores perdas de potência, tanto ativa quanto reativa.

Uma outra justificativa para as pequenas discrepâncias nos resultados (principalmente para os valores DHT de tensão e corrente) foram as fontes de correntes harmônicas que foram “ignoradas” no processo de modelagem das cargas não lineares (pois utilizou-se apenas as 5 correntes harmônicas de maior influência). Isso fez com que os valores de distorções harmônicas apresentados fossem menores que os valores reais medidos.

Mesmo assim, os valores encontrados na simulação são bastante aceitáveis devido as limitações da modelagem, uma vez que é um modelo simplificado de um sistema industrial.

É válido ainda, além de se obter os valores de DHT para análise das distorções harmônicas, observar também os formatos de onda das grandezas de tensão e corrente resultantes das distorções.

As Figuras 15 e 16 apresentam as formas de onda de tensão e corrente respectivamente no barramento de 230kV de entrada do sistema elétrico.

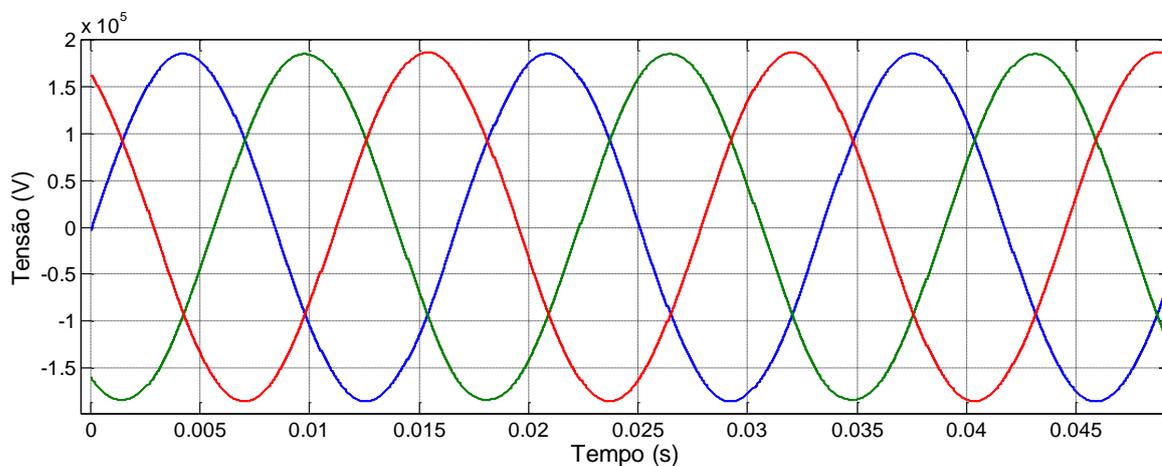


Figura 15 – Sinal de tensão trifásica de entrada no barramento de 230kV

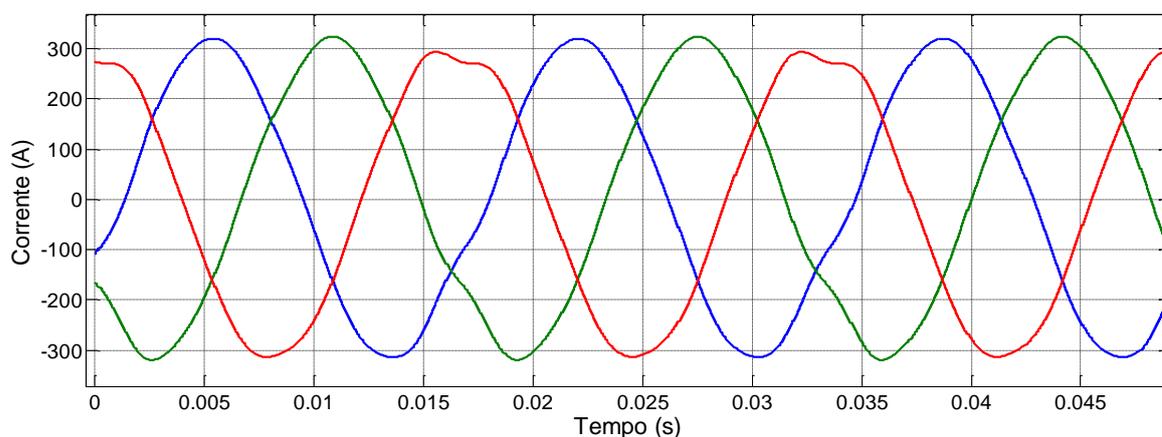


Figura 16 – Sinal de corrente trifásica de entrada no barramento de 230kV

Como é possível observar, os sinais de corrente demonstram as distorções com mais facilidade visual, o que condiz claramente com os valores de DHT encontrados para tensão e corrente.

Se fossem retiradas as fontes de correntes que representam as cargas não lineares do sistema, os novos valores simulados para os parâmetros de DHT encontram-se na Tabela 11, e os sinais de tensão e corrente de entrada no barramento de 230 kV são mostrados nas Figuras 17 e 18, respectivamente.

Tabela 11 – Novos valores de DHT sem a influência das cargas não lineares

Barramento de entrada 230kV (sem a influência das cargas não lineares)	
DHT de Tensão	0,53 %
DHT de Corrente	0,64 %

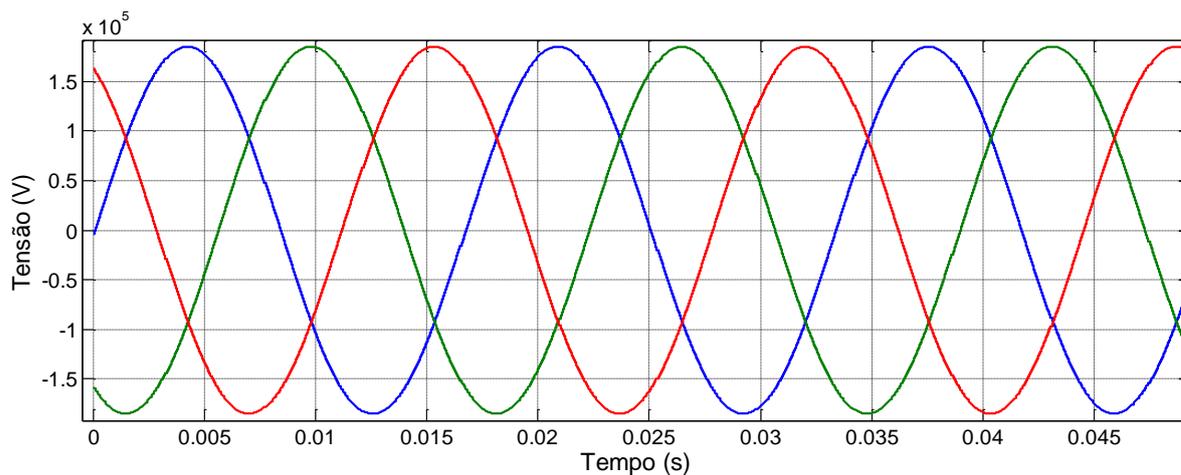


Figura 17 – Sinal de tensão trifásica de entrada sem influência de cargas não lineares

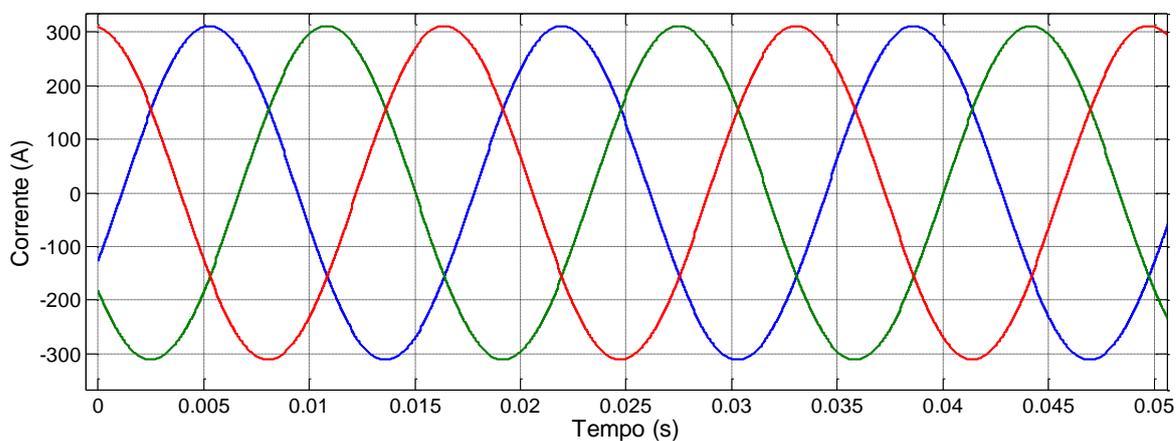


Figura 18 – Sinal de corrente trifásica de entrada sem influência de cargas não lineares

Como visto, neste caso não é possível visualmente observar a influência harmônica na tensão e na corrente, mesmo que a Tabela 11 mostre que existe ainda uma pequena parcela de distorção harmônica. Essa pequena distorção restante observada, muito provavelmente é advinda dos transformadores que alimentam as cargas, devido às características não lineares

dos materiais ferromagnéticos utilizados em seus núcleos, e as correntes de magnetização necessárias à criação do fluxo magnético [6].

Nota-se ainda uma diminuição significativa do DHT de corrente, em relação à simulação contendo cargas não lineares, comprovando assim a origem principal dos harmônicos.

3.2 Etapa experimental

Terminando a primeira parte deste trabalho (modelagem e simulação do sistema elétrico industrial), inicia-se a etapa experimental. Esta baseia-se na coleta de dados no LEE (Laboratório de Engenharia Elétrica) para a visualização e verificação na prática, da existência de injeções harmônicas por cargas não lineares, advindas neste caso do inversor de frequência (carga não linear presente em larga escala nas indústrias).

Após feitas as medições e efetuada a coleta de dados (como detalhado no subitem 2.3.2), os mesmos foram importados para dentro do software MATLAB por meio da função “*import data*”. Em seguida os sinais obtidos foram plotados em função do tempo e da frequência, a qual é muito mais adequada para analisar conteúdos harmônicos de um sinal (pois apresenta picos de amplitude nas frequências harmônicas).

Os resultados obtidos na plotagem do sinal de entrada do inversor de frequência estão apresentados nas Figuras 19 e 20.

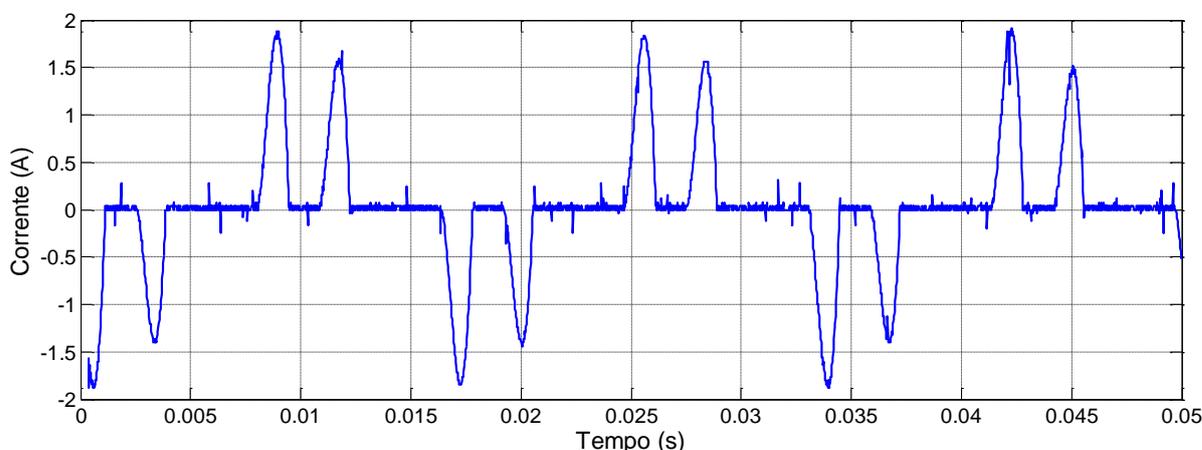


Figura 19 – Forma de onda do sinal de entrada no inversor de frequência

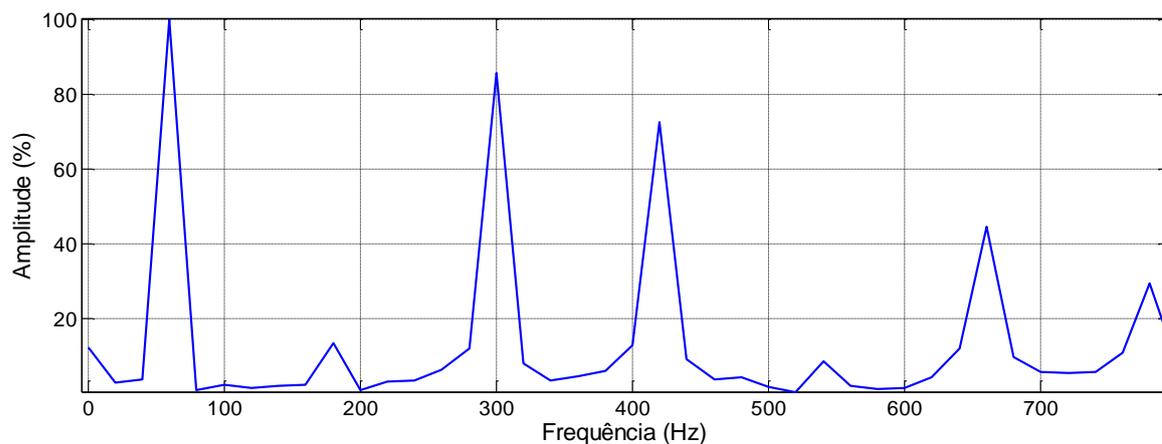


Figura 20 – Espectro de frequência do sinal de entrada no inversor de frequência

Como pode ser observado, a Figura 19 mostra a corrente exigida da rede pelo inversor de frequência. Claramente, é possível verificar que não se trata de uma onda senoidal como a tensão da rede. Sendo assim, quaisquer cargas nas quais a corrente que passa por elas não seja diretamente proporcional à tensão fornecida, geram harmônicos no sistema elétrico [6].

A Figura 20 mostra com bastante clareza os harmônicos que são intrínsecos a esse sinal. As frequências em que se encontram os picos de amplitude mostram quais componentes harmônicas são mais influentes neste sinal. O maior pico está localizado nos 60Hz, pois esta é a frequência fundamental do sinal. Entretanto é possível observar grandes picos também nas frequências de 300Hz e 420Hz, que são as harmônicas de ordem 5 e 7. Seguidos das frequências de 660Hz e 780Hz, que são as harmônicas de 11ª e 13ª ordem.

Este comportamento é característico de conversores eletrônicos trifásicos, que em particular não causam correntes triplas. Esses conversores geram harmônicos de ordem $h = kq \pm 1$, em que q é o número de pulsos do conversor e k é inteiro (1, 2, 3, 4, ...). Isto pode ser uma grande vantagem, pois a harmônica de 3ª ordem normalmente é a componente de maior amplitude [6]. Visto isso, é possível ainda concluir que esse inversor de frequência possui retificador de 6 pulsos, devido às características das componentes harmônicas inseridas por ele no sistema elétrico (harmônicas de 5ª, 7ª, 11ª, 13ª, 17ª, 19ª,... ordem) [7].

Por fim, o sinal de saída do inversor de frequência é mostrado nas Figuras 21 e 22, em função do tempo e da frequência, respectivamente.

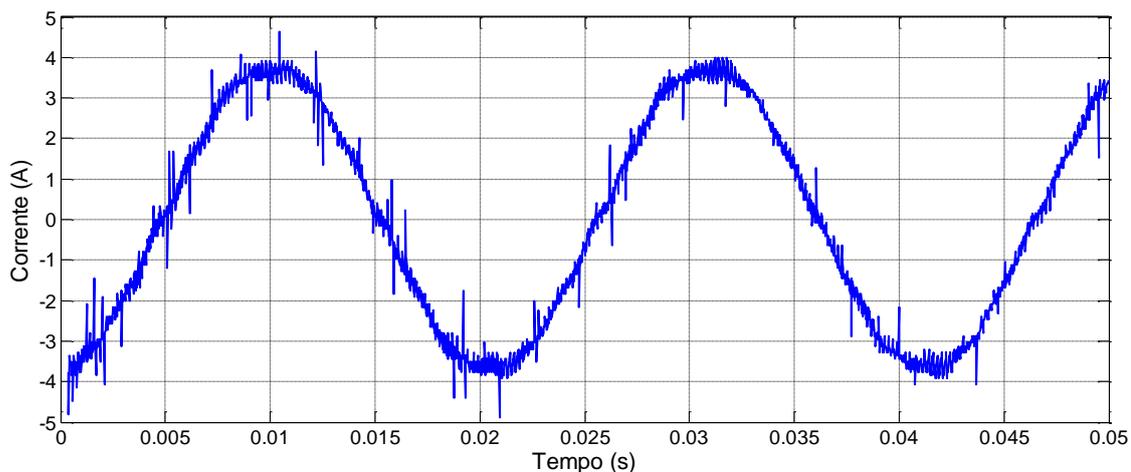


Figura 21 – Forma de onda do sinal de saída no inversor de frequência

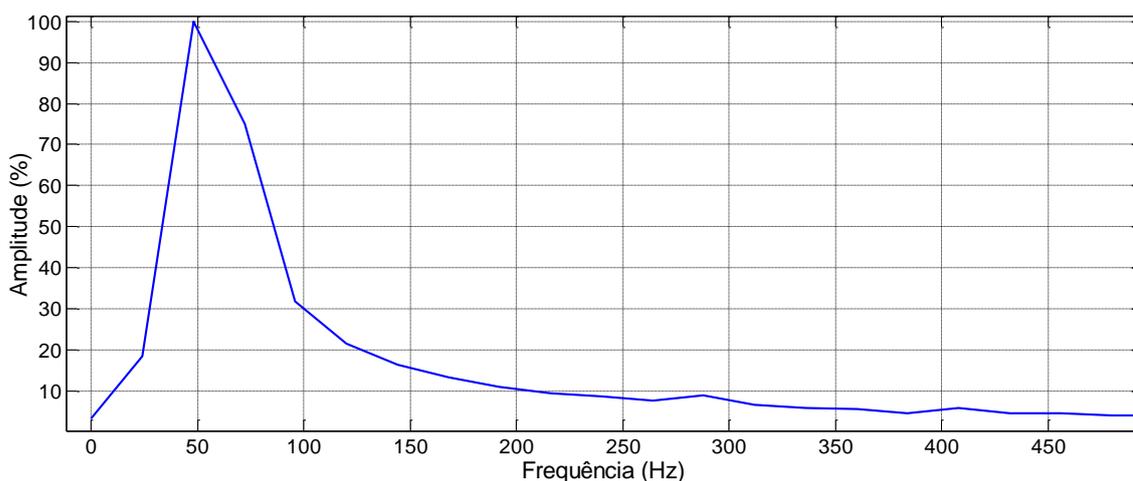


Figura 22 – Espectro de frequência do sinal de saída no inversor de frequência

Como pode ser observado, o sinal que sai do inversor de frequências e alimenta o motor é um sinal senoidal de frequência fundamental de 48Hz (especificação dada ao inversor de frequências na hora das medições). Este sinal é certamente o que se esperava na saída do inversor de frequências, visto que o mesmo alimenta cargas em CA (corrente alternada), que neste caso é um motor de indução trifásico que precisa de uma onda senoidal em sua entrada para a produção do campo girante em seu eixo.

Desta forma justifica-se a injeção de harmônicos no sistema elétrico pelo inversor de frequências deste experimento, pois para conseguir produzir o sinal senoidal de corrente em sua saída com diferentes frequências, ele demanda da rede um sinal não senoidal, como o mostrado na Figura 19.

4 *Conclusões*

A simulação é uma ferramenta de larga utilização na engenharia, certamente devido à sua boa eficiência na previsão de comportamentos físicos, o que faz reduzir muito os riscos nas tomadas de decisões. Isto traz não apenas benefícios econômicos e financeiros, mas também para a própria vida humana, antecipando situações que possam oferecer riscos.

No processo de modelagem de cargas não lineares, a estratégia de inserção de fontes de correntes mostrou-se bastante eficiente, e o modelo final bastante competente, tendo em vista as limitações da modelagem. É válido lembrar que quanto mais são feitas considerações no processo de modelagem de um sistema, mais discrepantes estarão os valores simulados em relação aos reais. Desta forma, como muitos dos componentes do sistema elétrico em estudo possuíam parâmetros e informações limitadas, certas considerações se fizeram obrigatórias para o desenvolvimento do modelo. Mesmo assim, os resultados se mostraram dignos e aceitáveis.

Foi possível observar os impactos e a influência dos harmônicos no sistema elétrico não apenas de forma quantitativa, mas também visual, nas plotagens dos sinais de corrente de entrada do sistema elétrico industrial (com e sem as cargas não lineares).

A etapa experimental mostrou que cargas não lineares, como os inversores de frequência, exigem da rede elétrica uma demanda de corrente com forma de onda não senoidal, o que faz com que estas cargas sejam as principais responsáveis pelas distorções harmônicas em um sistema elétrico.

Para trabalhos futuros, pode-se propor o aumento do fator de potência do sistema elétrico industrial em questão para faixas mais seguras de operação, realizando um bom projeto de bancos de capacitores e análise da resposta em frequência do sistema para prever condições de ressonância. Além disso, pode-se também projetar filtros passivos sincronizados com as frequências harmônicas predominantes, para redução nos níveis de DHT (Distorção Harmônica Total) deste sistema elétrico industrial, e conseqüentemente, uma melhora na qualidade de energia do mesmo.

Referências Bibliográficas

- [01] TEIXEIRA, D. Ângelo. **Análise das distorções harmônicas - Estudo de caso de um sistema industrial.** Belo Horizonte, 2009. Tese de Mestrado - PPGEE, Universidade Federal de Minas Gerais.
- [02] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Procedimentos de rede: Sub-módulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes.** Rio de Janeiro-RJ: 2009.
- [03] DOS SANTOS, J. Neves. **Condutores e cabos de energia.** Porto (Portugal): FEUP, 2005.
- [04] KAGAN, Nelson; DE OLIVEIRA, C. C. Barioni; ROBBIA, E. João. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica.** 2. ed. revista. São Paulo: Blucher, 2010.
- [05] NDIAYE, M. Sop. **Modelagem de cargas não-lineares por fontes de correntes sincronizadas.** Rio de Janeiro, 2006. Tese de Mestrado - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [06] LEÃO, R. P. Saraiva; SAMPAIO, R. Furtado; ANTUNES, F. L. Marcelo. **Harmônicos em sistemas elétricos.** 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- [07] MELLO, C. A. De Freitas. **Efeitos das tensões e correntes harmônicas sobre o sistema elétrico e seus componentes.** Belo Horizonte, 1988. Tese de Mestrado - PPGEE, Universidade Federal de Minas Gerais.
- [08] DA SILVA, M. M. Davi. **Análise de filtros passivos de harmônicos de conversor CA/CC de seis pulsos.** Rio de Janeiro, 2007. Tese de Mestrado - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [09] SOARES, W. S. Lino. **Conversores de frequência VSI-PWM submetidos a afundamentos temporários de tensão e caracterização por harmônicos variantes no tempo.** Viçosa, 2013. Monografia - DEL, Universidade Federal de Viçosa.
- [10] MORÁN, L. A.; DIXON, J. W.; ESPINOSA, J. R.; WALLACE, R. R. Using active power filter to improve power quality. In: **Brazilian Power Electronics Conference**, 5., Paraná, 1999, p. 501-511.
- [11] NETO, C. T. Andrade. **Análise de um motor de indução trifásico submetido a distorções harmônicas na fonte de tensão.** Viçosa, 2012. Monografia - DEL, Universidade Federal de Viçosa.
- [12] BARBOSA, M. Almeida. **Distorções harmônicas em sistemas elétricos industriais.** Belo Horizonte, 1988. Tese de Mestrado - PPGEE, Universidade Federal de Minas Gerais.
- [13] TAVARES, B. Ferreira. **Estudo de harmônicos em sistemas elétricos de potência.** Viçosa, 2009. Monografia - DEL, Universidade Federal de Viçosa.
- [14] NUNES, R. Vinhal. **Análise da penetração harmônica em redes de distribuição desequilibradas devido as cargas comerciais com a utilização do ATP.** Belo Horizonte, 2007. Tese de Mestrado - PPGEE, Universidade Federal de Minas Gerais.
- [15] NASCIMENTO, C. Francisco. **Determinação do conteúdo harmônico de corrente baseada em redes neurais artificiais para cargas não lineares monofásicas.** São Carlos, 2007. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- [16] JUNIOR, D. Soares. **Análise de filtros híbridos aplicados a um forno elétrico a arco.** Vitória, 2011. Tese de Mestrado - CT, Universidade Federal do Espírito Santo.