

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DIRCEU SOARES JUNIOR

**ANÁLISE DE FILTROS HÍBRIDOS APLICADOS A UM FORNO
ELÉTRICO A ARCO**

VITÓRIA
2011

DIRCEU SOARES JUNIOR

**ANÁLISE DE FILTROS HÍBRIDOS APLICADOS A UM FORNO
ELÉTRICO A ARCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de concentração em Automação.

Orientador:
Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti

VITÓRIA
2011

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

S676a Soares Junior, Dirceu, 1969-
Análise de filtros híbridos aplicados a um forno elétrico a Arco /
Dirceu Soares Junior. – 2011.
153 f. : il.

Orientador: Domingos Sávio Lyrio Simonetti.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Sistemas de energia elétrica. 2. Fornos elétricos. 3. Filtros
elétricos ativos. 4. Filtros elétricos passivos. 5. Análise harmônica. I.
Simonetti, Domingos Sávio Lyrio. II. Universidade Federal do
Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 621.3

DIRCEU SOARES JUNIOR

**ANÁLISE DE FILTROS HÍBRIDOS APLICADOS A UM FORNO
ELÉTRICO A ARCO**

Tese submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica – Automação.

Aprovada em 22 de agosto de 2011.

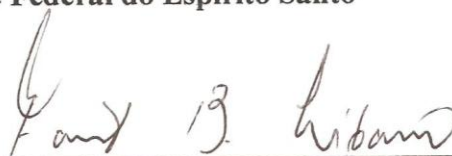
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador



Prof. Dr. Paulo José M. Menegáz
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Fausto Bastos Líbano
Faculdade de Tecnologia SENAI Porto Alegre

"Que Deus nos dê a sabedoria dos simples e a humildade dos mestres para que possamos continuar nossos estudos em busca do conhecimento fraterno e divisível entre todos."

(Geanete Lavorato)

Aos meus pais, filhos e esposa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo seu amor onipresente e incondicional que sempre me guiaram para o caminho do bem, da retidão e da graça de estar em paz comigo mesmo.

À Universidade Federal do Espírito Santo e aos professores do mestrado em engenharia elétrica com que tive contato, pela confiança depositada, profissionalismo e sabedoria no conhecimento compartilhado.

Ao professor e orientador Domingos Sávio Lyrio Simonetti pela clareza e competência na orientação do trabalho desenvolvido, mas principalmente pelo suporte encorajador e amigo.

Aos colegas do curso de mestrado pela troca de experiências e conhecimentos, entre os quais eu gostaria de destacar, o colega de mestrado e hoje professor Hélio Antunes, pelo grande apoio no desenvolvimento deste trabalho. Também ao colega da ArcelorMittal Brasil e ex-aluno do mestrado Célio Ferreira, pelo suporte técnico e logístico nas medições de campo realizadas.

Aos meus pais Dirceu Soares e Ivanoska Araújo Soares, onde tudo começou, desde a minha criação e educação, até a formação de um cidadão preparado para os desafios da vida.

Aos meus filhos Guilherme e Daniel, e a minha esposa Cibele, pela paciência e compreensão naqueles momentos que estive dedicado aos estudos, mas sempre tendo neles a força fundamental para continuar seguindo em frente.

RESUMO

Uma planta siderúrgica caracteriza-se pela existência em seu processo produtivo de cargas não lineares de elevada potência. Dentre estas cargas, as siderúrgicas do tipo “mini-mill” possuem normalmente Forno Elétrico a Arco (FEA) na sua fase inicial de produção do aço, que ocorre a partir da fusão de sucatas metálicas como principal matéria-prima utilizada. Os fornos elétricos absorvem uma corrente distorcida da rede elétrica, causando assim uma distorção de tensão no ponto de acoplamento comum (PAC) e inúmeros problemas de qualidade de energia elétrica. Uma solução muito utilizada para a mitigação harmônica neste tipo de carga elétrica é obtida através do uso de filtros passivos, com vários estágios de filtragem. Porém esta é uma solução que pode levar ao efeito da ressonância harmônica, elevando com isto a distorção harmônica no sistema elétrico e causando sobrecarga no sistema de filtragem.

Neste trabalho é apresentado um estudo de caso em uma siderúrgica não integrada (siderúrgica que possui sucata metálica e ferro gusa como matérias-primas principais na fabricação do aço), localizada na região da Grande Vitória. Por meio de medições na subestação principal da usina, são apresentadas as principais formas de onda das correntes e tensões, em conjunto com seus espectros harmônicos, que comprovam a existência de distorções harmônicas, sobretudo provenientes da corrente do forno elétrico a arco. As medições consideradas no trabalho, para simulação dos modelos contendo os filtros híbridos, foram aquelas originadas da condição operacional mais crítica do processo, sob o ponto de vista de momento onde o comportamento da carga acarreta o maior desvio quanto à qualidade de energia nas variáveis elétricas medidas.

O modelo utilizado para o sistema em questão apresenta forte grau de correlação com o sistema real, retratado através das medições elétricas efetuadas. De posse do modelo é realizada uma análise comparativa por meio de simulação entre duas topologias de filtragem híbrida, o filtro híbrido série e o filtro híbrido paralelo, para a compensação harmônica e amortecimento da ressonância.

Os resultados das simulações e das análises das ressonâncias mostraram que o filtro híbrido paralelo é a topologia que permite a maior redução das distorções harmônicas de corrente e de tensão no PAC, utilizando-se um filtro ativo com a menor potência nominal. Contudo, a filtragem híbrida paralela não provê a eliminação por completo da ressonância paralela. E, quanto à ressonância série, o filtro utilizado não possui a capacidade de interferir na condição de amplificação harmônica existente no sistema elétrico.

Finalmente, o estudo propõe que a definição da melhor alternativa de filtragem leve em consideração a escolha do ganho do filtro ativo e, conseqüentemente, a sua potência, de forma bem alinhada aos objetivos de melhoria na qualidade de energia elétrica que são esperados para o sistema em questão.

Palavras-chave: Qualidade de Energia, Forno Elétrico a Arco, Sistemas de Energia Elétrica, Distorções Harmônicas, Filtragem Híbrida, Ressonância harmônica.

ABSTRACT

A steelmaking plant is characterized for having in its productive process non linear loads of high power. For these loads, the steelmaking industries called “mini-mill” normally have Electric Arc Furnace (EAF) in its initial steel production phase that happen with metallic scrap melting being the principal raw material used. The EAF absorb a distorted current from the electric main, causing voltage distortion in its point of common coupling (PCC) and many problems with respects the electric power quality. A standard solution used for the harmonic mitigation in this application is obtained through the use of composite passive filter. However this is a solution that can cause harmonic resonance, increasing the harmonic distortion in the electrical system and causing overload in the filtering system.

In this work, a case in a non integrated steel industry, located at Grande Vitoria region, is presented. Through measurements in the main substation of the plant, the main current and voltage waveforms are presented, along with its harmonic spectrum, that confirm the existence of harmonic resonance phenomenon, mainly from Electric Arc Furnace current. The measurement considered in this work to simulate the hybrid filters models, was that originated from operational condition with higher process criticism, under viewpoint of the moment where the behavior of the load brings to a major deviation regarding the power quality at the measured variables.

The model used for the system under study shows strong correlation with the real system portrayed through the electrical measurements done. Using the model, a comparative simulation analysis is done, between two hybrid topologies, the series hybrid filter and the parallel hybrid filter, with the objective of harmonic compensation and resonance damping.

The results of simulations and resonance analysis showed that the parallel hybrid filter is the topology that allows the greatest reduction in harmonic distortion of current and voltage in the PCC (Point of Common Coupling), using an active filter with the lowest nominal power rating. However, the parallel hybrid filtering does not

provide the complete elimination of parallel resonance, and for the series resonance, the filter used does not have the ability to interfere in the harmonic amplification condition existing in the electrical system.

Finally, the study proposes that the best filtering alternative takes into account the choice of the active filter gain and consequently its power, so well aligned with the objectives of improving the power quality that are expected for the system under analysis.

Keywords: Power Quality, Electric Arc Furnace, Electrical Power Systems, Harmonics Distortions, Hybrid Filtering, Resonance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Topologia típica do sistema elétrico alimentador de um FEA [15]	25
Figura 2.2 – Circuito do FEA sem compensador de reativos: (a) Unifilar; (b) Equivalente monofásico.	26
Figura 2.3 – Instalação típica de um FEA [15].....	27
Figura 2.4 – Forno com Vazamento Excêntrico por baixo (EBT) [7]	28
Figura 2.5 – Foto de um Forno Elétrico a Arco em vista lateral.....	29
Figura 2.6 – Medição de Tensão Secundária em um FEA	30
Figura 3.1 – Fluxograma do processo siderúrgico.	35
Figura 3.2 – Diagrama unifilar do sistema elétrico da siderúrgica em análise [15]....	36
Figura 3.3 – Diagrama unifilar simplificado do circuito do FEA com variáveis medidas e calculadas	37
Figura 3.4 – Tensão eficaz de linha no PAC com FEA desligado.	41
Figura 3.5 – Tensão eficaz de linha no PAC c/ FEA ligado durante a etapa inicial da corrida (fusão).	42
Figura 3.6 – Tensão eficaz de linha no PAC c/ FEA ligado durante a etapa final da corrida (refino).	42
Figura 3.7 – Corrente eficaz no FEA durante a etapa inicial da corrida (fusão).	43
Figura 3.8 – Corrente eficaz no FEA durante a etapa final da corrida (refino).	43
Figura 3.9 – Tensão de linha no PAC com FEA ligado no Início da corrida - FEA (IC).	48
Figura 3.10 – Tensão de linha no PAC com FEA ligado no Final da corrida – FEA (FC).	48
Figura 3.11 – Espectros dos harmônicos de tensão – FEA (IC) : (a) V_{rs} , (b) V_{st} , (c) V_{tr}^*	49
Figura 3.12 – Espectros dos harmônicos de tensão – FEA (FC) : (a) V_{rs} , (b) V_{st} , (c) V_{tr}^*	50
Figura 3.13 – Corrente no FEA no Início da corrida – FEA (IC).	53
Figura 3.14 – Corrente no FEA no Final da corrida – FEA (FC).	53
Figura 3.15 – Espectros dos harmônicos de corrente no FEA – FEA (IC) : (a) i_{rFEA} , (b) i_{sFEA}^* , (c) i_{tFEA}	54
Figura 3.16– Espectros dos harmônicos de corrente no FEA – FEA (FC) : (a) i_{rFEA} , (b) i_{sFEA}^* , (c) i_{tFEA}	55
Figura 3.17 – Corrente no sistema de filtragem passiva - FEA (IC).	57
Figura 3.18 – Corrente no sistema de filtragem passiva - FEA (FC).	57
Figura 3.19 – Espectros das harmônicas de corrente do filtro passivo - FEA (IC): (a) i_{rF} , (b) i_{sF}^* , (c) i_{tF}	58
Figura 3.20 – Espectros das harmônicas de corrente do filtro passivo - FEA (FC): (a) i_{rF} , (b) i_{sF}^* , (c) i_{tF}	59
Figura 3.21 – Corrente no Transformador T30 (PAC) – FEA (IC).	61
Figura 3.22 – Corrente no Transformador T30 (PAC) – FEA (FC).	61
Figura 3.23 – Espectros das harmônicas de corrente no transf. T30 - FEA (IC): (a) i_{rT}^* , (b) i_{sT}^* , (c) i_{tT}^*	62
Figura 3.24 – Espectros das harmônicas de corrente no transf. T30 - FEA (FC): (a) i_{rT}^* , (b) i_{sT}^* , (c) i_{tT}^*	63
Figura 4.1 – Diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico em análise.....	70

Figura 4.2 – Sistema elétrico no MATLAB/Simulink®.	71
Figura 4.3 – Janela de configuração do bloco “Three-Phase Source” (a) e parâmetros (b).	72
Figura 4.4 – Janela de configuração do bloco “Three-Phase Parallel RLC Branch” (a) e impedância no PAC (b).	73
Figura 4.5 – Mensagem de erro gerada na simulação quando modelo estava com impedância Z_s .	74
Figura 4.6 – Cálculo da corrente de curto-circuito I_{cc} e respectiva impedância Z_{utot} no PAC.	75
Figura 4.7 – Cálculo de transformação da impedância série $Z_s = Z_{utot}$ em uma impedância paralela Z_p .	76
Figura 4.8 – Modelo do FEA como fonte de corrente controlada.	77
Figura 4.9 – Janela para inicialização da simulação no Simulink.	78
Figura 4.10 – Sistema de filtragem passiva.	79
Figura 4.11 – Análise da ressonância paralela.	80
Figura 4.12 – Análise da ressonância série.	81
Figura 4.13 – Detalhe dos quatro pontos de impedância mínima na análise da ressonância série.	81
Figura 4.14 – Análise da ressonância paralela: (a) I_{sh}/I_{lh} ; (b) I_{fh}/I_{lh} .	82
Figura 4.15 – Análise da ressonância série I_{sh}/V_{sh} .	83
Figura 4.16 – Comparação da distorção harmônica de tensão simulada (a),(b),(c) e medida (d),(e),(f).	85
Figura 4.17 – Comparação distorção harmônica de corrente simulada (a),(b),(c) e medida (d),(e),(f).	86
Figura 5.1 – Topologia de um filtro híbrido série.	91
Figura 5.2 – Controle do filtro híbrido série.	92
Figura 5.3 – Diagrama de blocos para detecção harmônica.	94
Figura 5.4 – Controle de tensão no elo CC do inversor no filtro híbrido série.	95
Figura 5.5 – Representação por fase do sistema elétrico com filtro híbrido série para técnica 3.	97
Figura 5.6 – Análise da ressonância paralela: (a) Circuito equivalente por fase para as componentes harmônicas na carga; (b) Representação do filtro híbrido série por um ganho K_v .	98
Figura 5.7 – Análise da ressonância série: (a) Circuito por fase para as componentes harmônicas na fonte de tensão da rede; (b) Representação do filtro híbrido série por um ganho K_v .	99
Figura 5.8 – Sistema Elétrico do FEA com filtro híbrido série no Matlab/ Simulink®.	101
Figura 5.9 – Composição do Filtro híbrido série no Matlab/ Simulink®.	102
Figura 5.10 – PLL trifásico.	102
Figura 5.11 – Método de detecção harmônica.	103
Figura 5.12 – Fonte de tensão controlada trifásica.	103
Figura 5.13 – Cálculo do ganho do filtro híbrido série: (a) I_{sh}/I_{lh} ; (b) I_{fh}/I_{lh} ; (c) Impedância equivalente vista pelos terminais do circuito FEA; (d) V_{th}/I_{lh} ; (e) I_{sh}/V_{sh}	104
Figura 5.14 – Comparação distorção harmônica de tensão no PAC – sem filtro e com filtro ativo em série.	107
Figura 5.15 – Comparação distorção harmônica de corrente no PAC – sem filtro e com filtro ativo em série.	108
Figura 5.16 – Corrente no Transformador T30 (PAC) – sem filtro.	109

Figura 5.17 – Corrente no Transformador T30 (PAC) – com filtro híbrido série.....	109
Figura 5.18 – (a) Forma de onda da Tensão de fase no filtro ativo; (b) Forma de onda da Corrente de linha no filtro híbrido série.....	110
Figura 5.19 – Filtro Híbrido Paralelo.....	113
Figura 5.20 – Controle do filtro híbrido paralelo.	114
Figura 5.21 – Controle de tensão no elo CC do inversor do filtro híbrido paralelo. .	115
Figura 5.22– Filtro híbrido paralelo conectado ao sistema elétrico.	116
Figura 5.23 – Circuito elétrico com filtro híbrido paralelo para avaliação da ressonância paralela.	117
Figura 5.24 – Circuito elétrico com filtro híbrido paralelo para avaliação da ressonância série.	117
Figura 5.25 – Sistema Elétrico do FEA com filtro híbrido paralelo no Matlab/ Simulink®	120
Figura 5.26 – Composição do Filtro Ativo no Matlab/ Simulink®	120
Figura 5.27 – Fonte de corrente controlada trifásica.	121
Figura 5.28 – Comparação distorção harmônica de tensão no PAC – sem filtro e com filtro ativo em paralelo.	123
Figura 5.29 – Comparação distorção harmônica de corrente no PAC – sem filtro e com filtro ativo em paralelo.....	124
Figura 5.30 – Corrente no Transformador T30 (PAC) – sem filtro.....	125
Figura 5.31 – Corrente no Transformador T30 (PAC) – com filtro híbrido paralelo. .	125
Figura 5.32 – Corrente no filtro passivo: (a) forma de onda da corrente; (b) Espectro harmônico sem filtro ativo ($t < 0,5s$); (c) espectro harmônico com filtro ativo ($t > 0,5s$).	126
Figura 5.33 – Corrente no filtro ativo: (a) forma de onda da corrente no filtro ativo; (b) espectro harmônico da corrente no filtro ativo ($t > 0,5s$).	126
Figura 5.34 – Correntes no filtro passivo antes da entrada do filtro ativo ($t < 0,5s$). .	127
Figura 5.35 – Correntes no filtro passivo após a entrada do filtro ativo ($t > 0,5s$)....	127
Figura 5.36 – Corrente no filtro ativo	128
Figura 5.37 – Cálculo do ganho do filtro híbrido paralelo com a técnica 1: (a) I_{sh}/I_{lh} ; (b) I_{th}/I_{lh} ; (c) Impedância equivalente vista pelos terminais do FEA (Z_{eq}); (d) V_{th}/I_{lh} .	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Características do sistema de filtragem passiva.....	38
Tabela 3.2 – Variáveis registradas na subestação principal.....	39
Tabela 3.3 – Variáveis calculadas através das variáveis medidas.....	40
Tabela 3.4 – Correntes por fase no transformador T30.....	41
Tabela 3.5 – Análise das tensões no PAC - secundário do transformador T30.	42
Tabela 3.6 – Análise das correntes no FEA.	44
Tabela 3.7 – Limites das distorções harmônicas de corrente IEEE 519.	45
Tabela 3.8 – Valores de referência da distorção harmônica total de tensão.	46
Tabela 3.9 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão.	46
Tabela 3.10 – Corrente no FEA p/ Análise da Amplificação Harmônica	66
Tabela 3.11 – Corrente no PAC p/ Análise da Amplificação Harmônica	66
Tabela 4.1 – Frequências de ressonância paralela.....	80
Tabela 4.2 – Frequências de ressonância série.....	80
Tabela 4.3 – Comparação das Tensões (Modelo X Medição) no PAC.	84
Tabela 4.4 – Comparação das Correntes (Modelo X Medição) no Filtro Passivo.	87
Tabela 5.1 – Comparação das Tensões no PAC: Sem Filtro X Com Filtro.	106
Tabela 5.2 – Comparação das Correntes no PAC: Sem Filtro X Com Filtro.	106
Tabela 5.3 – Corrente no FEA p/ Análise da Amplificação Harmônica (Filtro Série)	112
Tabela 5.4 – Corrente no PAC p/ Análise da Amplificação Harmônica (Filtro Série)	112
Tabela 5.5 – Comparação das Distorções Harmônicas entre as 3 técnicas de controle.....	122
Tabela 5.6 – Corrente no FEA p/ Análise da Amp. Harmônica (Filtro Paralelo)	132
Tabela 5.7 – Corrente no PAC p/ Análise da Amp. Harmônica (Filtro Paralelo).....	132
Tabela 5.8 – Comparação entre as topologias de Filtro Híbrido aplicadas ao sistema.	134

LISTA DE ABREVIATÖES OU SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BUS	Barramento
B1 a B6	Barra para medições de corrente e tensão no Simulink®
C	Capacitor
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CLP	Controlador lógico programável
DTT	Distorção harmônica total de tensão
DIT _h	Distorção harmônica individual de tensão
DSP	Digital Signal Processing
f	Frequência
FA	Filtro Ativo
FEA	Forno Elétrico a Arco
FEA (IC)	FEA operando na fase inicial da corrida
FEA (FC)	FEA operando na fase final da corrida
FPB	Filtro passa baixa
i	Corrente
$I_{a,b,c}$	Corrente nas fases a, b e c proveniente da simulação do modelo
I^*	Corrente de referência para o filtro ativo
i_{cc}	Corrente de curto circuito
i_d^e, i_q^e, i_o^e	Corrente de eixo direto, quadratura e sequência zero no referencial síncrono
IEEE	Institute of Electric and Electronic Engineers
I_F	Corrente do filtro passivo
I_{FEA}	Corrente do Forno Elétrico a Arco
i_{fa}	Corrente do filtro ativo
i_{fh}	Componentes harmônicas de corrente no filtro passivo
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IGCT	Insulated Gate Commutated Thyristor
i_L	Corrente de carga
i_{lh}	Componentes harmônicas de corrente da carga elétrica
i'_L	Soma das correntes da carga e do filtro passivo
i'_{Lh}	Soma das correntes harmônicas da carga e do filtro passivo
i_{rF}	Corrente da fase R do conjunto de filtros passivos
i_{rFEA}	Corrente da fase R do FEA
i_{rT}^*	Corrente calculada na fase R do secundário do transformador T30
i_s	Corrente da rede elétrica ou sistema alimentador
i_{sF}^*	Corrente calculada na fase S do conjunto de filtros passivos
i_{sFEA}^*	Corrente calculada na fase S do FEA
i_{sh}	Componentes harmônicas de corrente da rede elétrica
i_{sT}^*	Corrente calculada na fase S do secundário do transformador T30
i_{tF}	Corrente da fase T do conjunto de filtros passivos
i_{tFEA}	Corrente da fase T do FEA
i_{tT}^*	Corrente calculada na fase T do secundário do transformador T30
K_a	Ganho do filtro híbrido paralelo
K_c	Ganho comum
K_v	Ganho do filtro híbrido série
L	Indutância
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

MVA	Mega (10^6) Volt-Ampere
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
P _{cc}	Potência de Curto-circuito
P _{FA}	Potência do Filtro ativo
PI	Controlador proporcional integral
PLL	Phase Locked Loop
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
PWM	Pulse width modulation
R	Resistor
Rarc	Resistência do Arco Elétrico do FEA
R _i	Resistência interna de fonte
R _p	Resistência de impedância paralela
R _s	Resistência de impedância série
S _{cc}	Potência de curto-circuito da fonte de tensão da rede elétrica
SRF	Synchronous Reference Frame
ST	Single Tuned Filter (Filtro Sintonizado em uma certa frequência)
TC	Transformador de corrente
THD	Total Harmonic Distortion (Distorção harmônica total)
THDi	Distorção harmônica total de corrente
TP	Transformador de potencial
T _s	Tempo de amostragem das medições utilizado nas simulações
V	Tensão
V ₁	Componente fundamental de tensão
v*	Tensão de referência para o filtro ativo
V _{ab}	Tensão entre as fases A e B proveniente da simulação do modelo
V _{bc}	Tensão entre as fases B e C proveniente da simulação do modelo
V _c	Tensão de compensação do filtro ativo
V _{ca}	Tensão entre as fases C e A proveniente da simulação do modelo
V _{cc}	Tensão contínua no capacitor
V _h	Componente harmônica de tensão
V _N	Tensão nominal
V _{rs}	Tensão entre as fases R e S (Tensão de linha)
V _s	Tensão da rede elétrica ou sistema alimentador
V _{sh}	Parcelas harmônicas de tensão na rede elétrica / sist. alimentador
V _{st}	Tensão entre as fases S e T (Tensão de linha)
V _t	Tensão de entrada (vetor)
V _{tr*}	Tensão calculada entre as fases T e R (Tensão de linha)
V _{th}	Componentes harmônicas de tensão na carga elétrica
X _p	Reatância paralela
X _r	Reatância do reator série
X _s	Reatância da rede elétrica / sist. alimentador ou reatância série
X _{sec}	Reatância do Forno Elétrico
X _{tf}	Reatância do transformador do Forno Elétrico
X _{ts}	Reatância do transformador abaixador 138/33 kV
Z _{eq}	Impedância equivalente
Z _F	Impedância do filtro passivo
Z _S	Impedância da rede elétrica / sist. alimentador ou Impedância série
Z _p	Impedância paralela
Z _{utot}	Impedância total do sistema no PAC
3Ø	Sistema trifásico a três fios sem neutro
δ	Ângulo de potência
Θ ₁	Ângulo da transformação no referencial síncrono (ωt ₁ do PLL)
Δ(%)	Desvio percentual entre medição e modelo (tensão ou corrente eficaz)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
2. UM FORNO ELÉTRICO A ARCO	24
2.1. SISTEMA ELÉTRICO DE UM FEA	24
2.2. CARACTERÍSTICAS E FUNCIONAMENTO DE UM FEA.....	26
2.3. CONCLUSÕES	33
3. O FORNO ELÉTRICO EM ESTUDO.....	34
3.1. PROCESSO DE PRODUÇÃO DA SIDERÚRGICA	34
3.2. SISTEMA ELÉTRICO DA SIDERÚRGICA.....	35
3.3. MEDIÇÕES NO SISTEMA ELÉTRICO DO FEA.....	38
3.4. AVALIAÇÃO DAS MEDIÇÕES.....	41
3.4.1. Parâmetros de Avaliação das Distorções Harmônicas	44
3.4.2. Medições de Tensão no PAC	48
3.4.3. Avaliação das Medições de Tensão	51
3.4.4. Medições de Corrente no FEA	53
3.4.5. Avaliação das Medições de Corrente no FEA.....	56
3.4.6. Medições de Corrente no Sistema de Filtragem Passiva.....	56
3.4.7. Avaliação das Medições de Corrente no Sistema de Filtragem Passiva	60
3.4.8. Medições de Corrente no Transformador T30.....	60
3.4.9. Avaliação das Medições de Corrente no Transformador T30	64
3.4.10. Análise da Amplificação Harmônica de Corrente	65
3.5. CONCLUSÕES	67
4. MODELAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO DO FEA	69
4.1. IMPLEMENTAÇÃO E AJUSTES DO MODELO	69
4.1.1. Bloco 1 - Fonte de alimentação do sistema elétrico.....	71
4.1.2. Bloco 2 - FEA.....	77
4.1.3. Bloco 3 - Filtro Passivo.....	78
4.2. AVALIAÇÃO DA RESSONÂNCIA HARMÔNICA NO SIST. ELÉTRICO DO FEA.....	79
4.3. VALIDAÇÃO DO MODELO DO SISTEMA	83
4.3.1. Verificação das Tensões.....	84
4.3.2. Verificação das Correntes	86
4.3.3. Avaliação do modelo	87
4.4. CONCLUSÕES	88
5. FILTRAGEM HÍBRIDA SÉRIE E PARALELA.....	89
5.1. OS FILTROS HÍBRIDOS	89
5.2. FILTRO HÍBRIDO SÉRIE.....	91
5.2.1. Controle do Filtro Híbrido Série	92
5.2.1.1. Método de Detecção Harmônica.....	92
5.2.1.2. Controle de Tensão do Capacitor.....	95
5.2.1.3. Regulador de Tensão PWM.....	96
5.2.2. Princípio de Compensação	96
5.3. APLICAÇÃO DO FILTRO HÍBRIDO SÉRIE NO SIST. ELÉTRICO DO FEA	100
5.3.1. Ganho do filtro híbrido série	103
5.3.2. Avaliação da simulação com Filtro Híbrido Série	106

5.3.3.	Análise da Amplificação Harmônica com Filtro Híbrido Série.....	111
5.4.	FILTRO HÍBRIDO PARALELO	113
5.4.1.	Controle do Filtro Híbrido Paralelo	114
5.4.1.1.	<i>Método de Detecção Harmônica</i>	115
5.4.1.2.	<i>Controle de tensão no capacitor</i>	115
5.4.1.3.	<i>Regulador de corrente PWM</i>	116
5.4.2.	Princípio de compensação do filtro híbrido paralelo	116
5.5.	APLICAÇÃO DO FILTRO HÍBRIDO PARALELO NO SIST. ELÉTRICO DO FEA....	119
5.5.1.	Avaliação da simulação com Filtro Híbrido Paralelo	121
5.5.2.	Avaliação da Ressonância Paralela.....	129
5.5.3.	Análise da Amplificação Harmônica com Filtro Híbrido Paralelo	131
5.6.	CONCLUSÕES	133
6.	CONCLUSÕES E PROPOSTA DE CONTINUIDADE	135
6.1.	CONCLUSÕES	135
6.2.	PROPOSTAS DE CONTINUIDADE DO ESTUDO	138
	APÊNDICE A – LISTA DE ROTINAS	144
A.1 –	Excel_Transfer.m.....	144
A.2 –	Calcula_TensaoFonte_Impedancia_rn.m	145
A.3 –	DefasagemAngular_RMS_rn.mdl.....	146
	APÊNDICE B - PRODUÇÃO CIENTÍFICA	147

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada uma descrição sucinta da abordagem deste trabalho, descrevendo alguns dos principais tópicos que norteiam as preocupações com qualidade de energia elétrica em termos de compensação harmônica na indústria siderúrgica que é operada com Fornos Elétricos a Arco (FEA), bem como a organização e conteúdo do texto.

Nas indústrias siderúrgicas que operam Fornos Elétricos a Arco no processo de transformação da sucata metálica em aço líquido, a qualidade da energia elétrica tem sido, ao longo dos anos, objeto de estudos no intuito de conhecer cada vez mais as peculiaridades deste tipo de carga altamente não-linear, e com isso buscar alternativas de equipamentos e configuração do sistema elétrico ao qual a carga está inserida, para minimizar os efeitos inerentes à característica de concepção e operação do FEA.

Distorções harmônicas em sistemas de potência são causadas por dispositivos não-lineares que produzem formas de onda distorcidas ou não senoidais. Exemplos incluem dispositivos controlados eletronicamente (tais como retificadores e controladores de potência) e cargas geradas pelo arco elétrico (tais como fornos elétricos a arco e máquinas de solda a arco). Instalações de Fornos a Arco empregam vários tipos de filtros de harmônicos baseados em uma variedade de objetivos de aplicação. Fornos a Arco operam com um fator de potência aproximado de 0,7 a 0,85 atrasado e requerem compensação de reativos para corrigir o fator de potência. A fim de aplicar a correção de fator de potência ao circuito do FEA, bancos de capacitores são geralmente aplicados em uma configuração de filtro passivo (combinação de indutores e capacitores) de harmônicos sintonizado. Os filtros de harmônicos irão melhorar o fator de potência do circuito e mitigar os harmônicos gerados pelo forno a arco [1].

Além de reduzirem o conteúdo harmônico da corrente, reduzem a distorção de tensão e melhoram o fator de potência. O seu uso é atrativo, devido ao baixo custo inicial e elevada eficiência. Porém, os filtros passivos possuem uma série de desvantagens [2]:

- Sensibilidade à variação da frequência da rede;
- A frequência de sintonia do filtro é fixa e difícil de ser ajustada;
- A impedância da rede afeta fortemente as características de filtragem;
- Pode ocorrer ressonância paralela e série entre a fonte e o filtro passivo;
- Apresentam tamanho e peso significativos;

O projeto dos filtros passivos de harmônicos requer conhecimento dos harmônicos reais gerados pelos fornos. Na maioria das aplicações, são necessários filtros de harmônicos múltiplos. As frequências de sintonia e o número de filtros necessários são normalmente baseados nos objetivos de operação da planta, tais como requisitos de fator de potência, limites de harmônicos, limites de flicker, etc. Em Fornos a Arco, a presença de harmônicos não característicos (inter-harmônicos) sugere que pode ser necessário controlar os modos de ressonância paralela daquelas frequências, para evitar excessiva amplificação harmônica, as quais podem produzir flicker proveniente de tais frequências [1]. A utilização de filtro ativo (fonte controlada de tensão ou corrente) em uma combinação de compensador ativo e compensador passivo de potência reativa são aplicados na mitigação de flicker em forno elétrico a arco em [3].

Exemplos de aplicação de filtros ativos em sistemas reais incluem compensação de corrente harmônica em alimentadores e supressão de variação de potência reativa gerada por fornos elétricos [4]. Os filtros ativos são ideais para a filtragem localizada de correntes harmônicas de uma forma dirigida, isto permite aplicar o conceito "você suja, você limpa". Este conceito não pode ser aplicado utilizando os filtros passivos convencionais. Da mesma forma, os filtros ativos permitem eliminar alguns dos problemas dos filtros passivos, tais como a sintonia pobre devido à dispersão dos seus parâmetros característicos, e ressonâncias que podem aparecer com a impedância da rede elétrica [5]. Os filtros híbridos são mais atrativos com relação à compensação harmônica do que os filtros ativos puros, tanto do ponto de vista econômico como de viabilidade de sua implantação, principalmente em aplicações de potência elevada [6].

No desenvolvimento deste trabalho será de interesse maior o estudo das características relacionadas à compensação harmônica de corrente e tensão

provenientes da operação de Forno Elétrico a Arco. O trabalho será elaborado com base em um estudo de caso onde foram realizadas medições elétricas de campo que permitem a análise do espectro dos harmônicos do sistema elétrico do FEA, e a verificação de desempenho do sistema de compensação harmônica existente baseada em filtragem passiva.

Como principais contribuições deste trabalho, podem ser citadas as seguintes:

- Obtenção de uma caracterização típica de Forno Elétrico a Arco com base em medições de campo das correntes e tensões provenientes de duas condições de operação real do FEA, nas etapas de fusão e de refino;
- Desenvolvimento de um modelo para a simulação computacional de um sistema elétrico de FEA, visando à obtenção de variáveis que possibilitam a análise qualitativa do sistema elétrico;
- Formação de uma metodologia para gerar um modelo de simulação computacional a partir da caracterização da carga elétrica obtida através de medições que retratem o seu comportamento na operação desejada;
- Desenvolvimento dos modelos para simulação computacional dos filtros híbridos série e paralelo aplicados aos sistemas elétricos do FEA;
- Avaliação comparativa entre os desempenhos dos sistemas elétricos do FEA com filtro híbrido série e com filtro híbrido paralelo, em termos de distorção harmônica e amplificação harmônica quando submetido à ressonância paralela e série.

O desenvolvimento desta dissertação será dividido em mais cinco capítulos, além deste introdutório, a seguir descritos.

No capítulo 2 deste trabalho é feita uma contextualização de Fornos Elétricos a Arco, descrevendo as suas instalações típicas, dentre elas as informações do sistema elétrico e seus componentes. Mostra as características operacionais e de

funcionamento do equipamento, abordando os conceitos que levam à formação do arco elétrico e suas influências.

No capítulo 3 é apresentado um estudo de caso de uma siderúrgica localizada na região da Grande Vitória, onde é mostrado o Forno Elétrico a Arco, objeto do trabalho, com o detalhamento das informações do seu sistema elétrico. Neste capítulo é feita a apresentação das medições elétricas de campo que foram realizadas no sistema elétrico do FEA da siderúrgica, apontando as suas características principais e as formas de onda obtidas nas medições.

O capítulo 4 foi criado para ilustrar como se chegou ao modelo de simulação do sistema elétrico contendo o FEA. Neste capítulo é feito o detalhamento de algumas características do sistema elétrico em estudo, tais como a impedância do sistema alimentador no PAC (Ponto de Acoplamento Comum). É mostrada também como o sistema real se comporta quando submetido à ressonância harmônica, paralela e série, oriundas da composição dos filtros passivos. Por fim, o capítulo faz a validação do modelo de simulação proposto em termos de fidelidade ao sistema elétrico real.

No capítulo 5 é abordado, por meio de simulação no ambiente computacional Matlab/Simulink®, o desempenho de cada estrutura híbrida paralela e série quanto à redução das distorções harmônicas de corrente e tensão no PAC, bem como o comportamento do sistema quanto ao amortecimento das ressonâncias. Também são apresentados os conceitos das estruturas híbridas série e paralela, relatando as vantagens e desvantagens das respectivas topologias e técnicas de controle envolvidas.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido, destacando-se os principais resultados obtidos e contribuições da dissertação, quando também são colocados assuntos como proposição para continuidade dos estudos.

2. UM FORNO ELÉTRICO A ARCO

O Forno Elétrico a Arco (FEA) é o principal equipamento de transformação da sucata metálica em aço, sendo de fundamental importância na indústria siderúrgica devido ao seu benefício ambiental a partir da reciclagem de materiais metálicos. Desta forma os processos siderúrgicos, tendo como base as aciarias elétricas, tornam-se elemento vital na sustentabilidade da cadeia de produção e consumo humano de bens fabricados a partir do aço como matéria-prima. O processo de fusão da sucata metálica em aço sob a forma líquida demanda grande quantidade de energia elétrica consumida, em decorrência principalmente da predominância de elevadas correntes elétricas, acima de 30 kA, geradas a partir da formação do arco elétrico que é proveniente da ocorrência de curto-circuito entre os eletrodos do Forno Elétrico a Arco (FEA), passando pelo material metálico, a uma tensão comumente em torno de 1200 V. Este capítulo abordará os aspectos relacionados à operação de um Forno Elétrico a Arco e suas características mais relevantes, abordando os seus principais equipamentos e os modos de funcionamento, bem como relacionando com o sistema elétrico e conseqüentemente mostrando particularidades deste tipo de carga elétrica.

2.1. SISTEMA ELÉTRICO DE UM FEA

As subestações das usinas siderúrgicas que operam com aciarias elétricas são geralmente alimentadas em alta tensão por níveis de tensão superiores a 100 kV e tendo uma potência de curto-circuito no ponto de acoplamento comum (PAC) comumente superior a no mínimo 30 vezes a potência nominal do transformador do FEA. Na subestação de entrada da usina, um ou mais transformadores abaixam a alta tensão do sistema alimentador da planta para um nível de tensão que tipicamente é de 22 ou 33 kV. As instalações mais recentes de fornos elétricos possuem transformadores com potências que tipicamente excedem 100 MVA, onde o nível de tensão em 33 kV acaba sendo o mais adequado para esta faixa de potência, e desta forma tem sido o mais adotado no projeto de novas instalações siderúrgicas. A Figura 2.1 ilustra uma topologia típica de um sistema elétrico alimentador de um FEA.

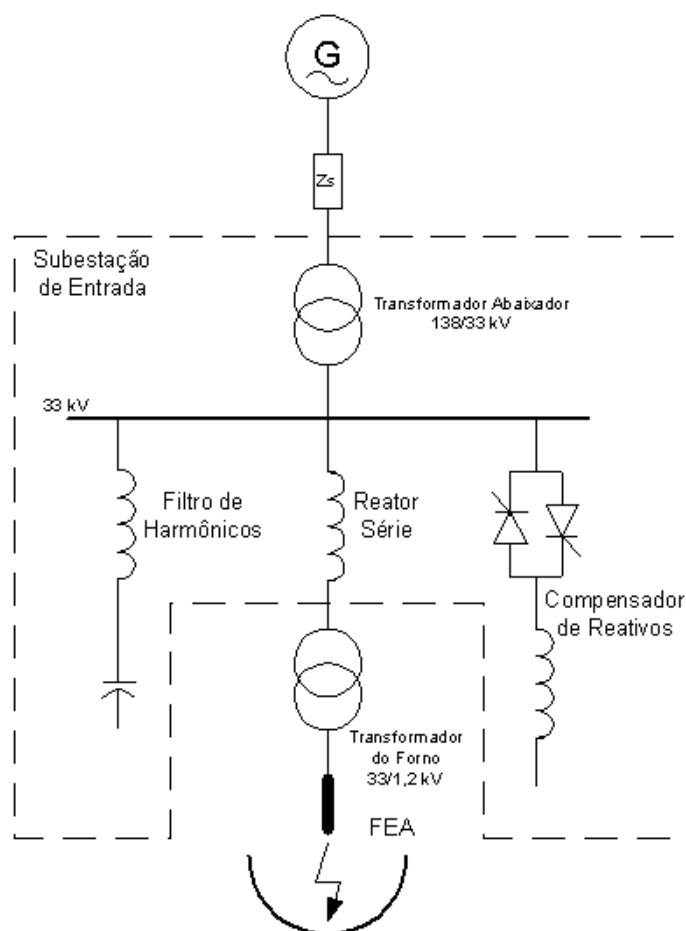
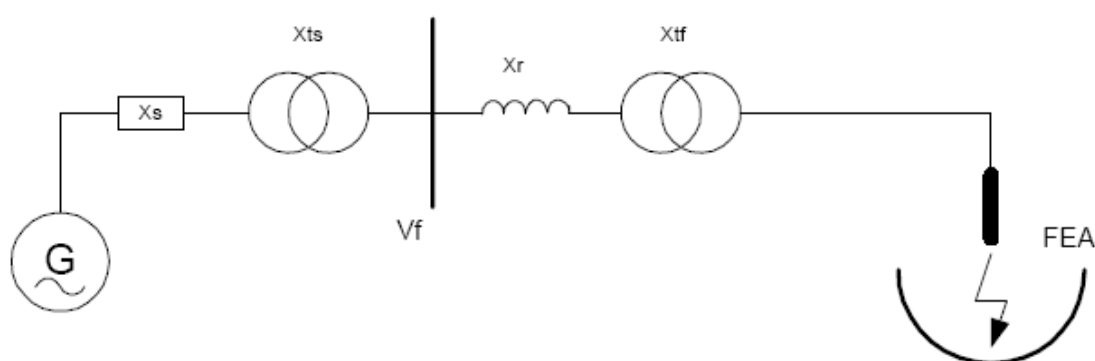


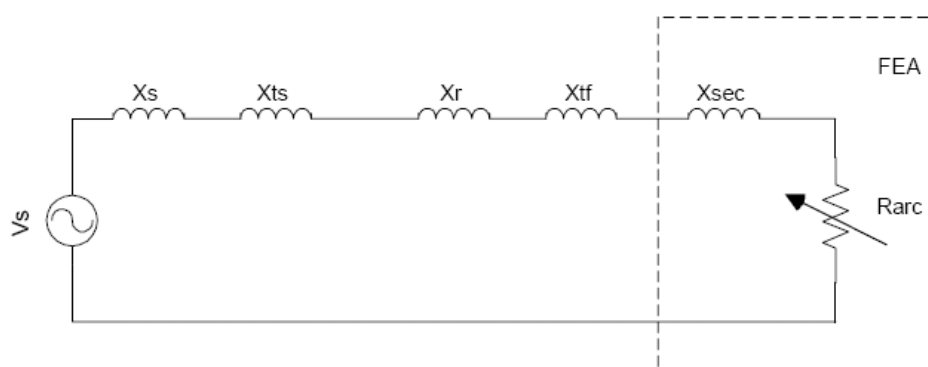
Figura 2.1 – Topologia típica do sistema elétrico alimentador de um FEA [15]

Normalmente interligados ao barramento de média tensão do circuito elétrico do FEA, e localizados na subestação de entrada da usina, estão os filtros de harmônicos e os bancos de capacitores para a correção do fator de potência. O compensador estático de reativos, eventualmente existente, também está conectado a este barramento. Cabe ressaltar que a predominância de um compensador estático de reativos, do tipo SVC, chaveado por tiristores, ocorre nas instalações mais modernas de Fornos Elétricos a Arco. A partir deste barramento deriva-se o circuito alimentador em si do Forno Elétrico, que geralmente, antes de atingir o transformador do FEA, passa por um reator série, normalmente também localizado na subestação de entrada, que tem a função de aumentar a estabilidade do arco elétrico. Da saída do reator série, com origem na subestação de entrada da usina, até entregar a energia elétrica no transformador do forno, o circuito alimentador pode se constituir de cabos isolados ou de uma linha aérea, dependendo da distância da subestação de entrada até o prédio do forno localizado na área da aciaria.

O equivalente monofásico do circuito do forno, sem considerar o filtro de harmônicos e o compensador de reativos, é indicado no diagrama da Figura 2.2, onde V_s é a tensão do sistema alimentador, X_s é a reatância equivalente do sistema da concessionária, determinada pela potência de curto circuito no ponto de suprimento, X_{ts} é a reatância do transformador abaixador, X_r é a reatância do reator, X_{tf} é a reatância do transformador do forno, X_{sec} é a reatância do forno e R_{arc} é a resistência do arco elétrico. Neste diagrama, as reatâncias estão referidas à tensão do sistema alimentador V_s [7].



(a)



(b)

Figura 2.2 – Circuito do FEA sem compensador de reativos: (a) Unifilar; (b) Equivalente monofásico.

2.2. CARACTERÍSTICAS E FUNCIONAMENTO DE UM FEA

O prédio do forno elétrico tem tipicamente a forma indicada na Figura 2.3, onde o alimentador oriundo da subestação de entrada se interliga aos cubículos da sala de média tensão. Um destes cubículos alimenta o transformador do forno

localizado na sala superior e de onde sai o barramento secundário para a conexão dos cabos refrigerados a água. O barramento secundário faz o fechamento em delta dos seis terminais secundários, dois por fase, do transformador do forno. Normalmente este fechamento é externo ao transformador do forno, pelas altas correntes secundárias. O circuito secundário deve ser conectado em delta, sem ponto de conexão com a terra, para que não haja um caminho de circulação de corrente pela água de refrigeração dos cabos ou pela carcaça do forno, que estão em contato com a terra. Tipicamente, a tensão secundária das novas instalações de FEAs tem um valor máximo de 1100 a 1350 V [7].

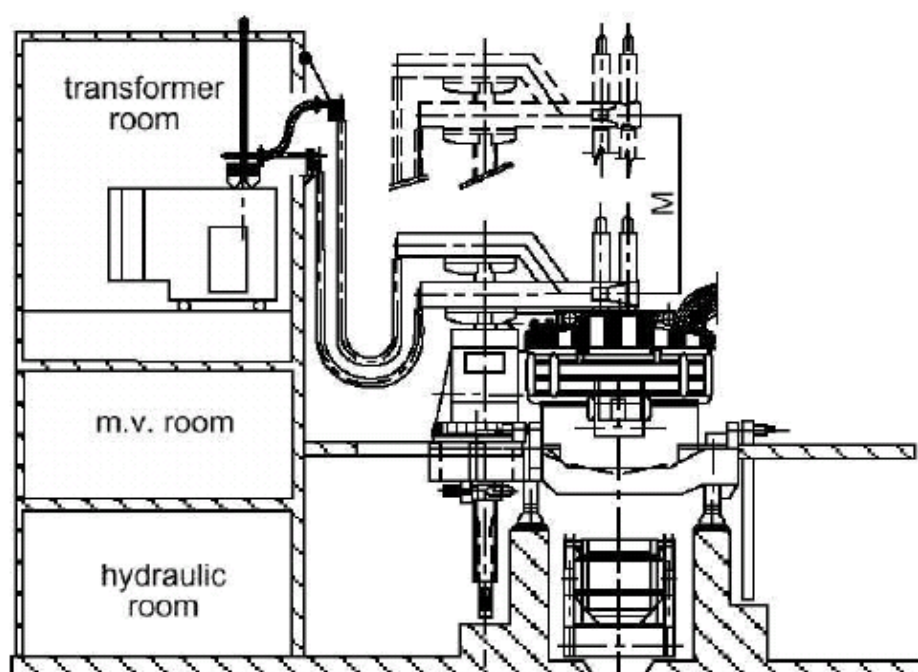


Figura 2.3 – Instalação típica de um FEA [15]

Os cabos refrigerados se conectam nas outras extremidades aos braços de sustentação dos eletrodos. Os braços dos eletrodos se movimentam verticalmente acionados por cilindros hidráulicos movidos por bombas localizadas na sala hidráulica, em um percurso indicado pela cota M na instalação da Figura 2.3. A distância da extremidade inferior dos eletrodos até a superfície do material no interior do forno é controlada pelo regulador de posição dos eletrodos, em função do comprimento do arco elétrico desejado [15]. A tampa superior do forno ou abóbada é acionada por cilindros hidráulicos para um pequeno deslocamento vertical e giro lateral para permitir o carregamento do forno por cestões carregados de sucata

metálica. O conjunto da abóbada, braços e eletrodos giram lateralmente para o carregamento do forno. O desenho superior da Figura 2.4 indica simultaneamente os eletrodos na posição lateral de carregamento do forno e na posição de fusão da carga [7]. O desenho inferior da Figura 2.4 mostra a vista superior em corte do forno elétrico, destacando os cabos refrigerados interligados aos braços condutores que suportam os três eletrodos no centro do forno. A Figura 2.5 mostra a foto de um Forno Elétrico a Arco em vista lateral.

Logo depois da carga metálica ter sido carregada e fundida no FEA, um cilindro hidráulico faz o basculamento lateralmente do forno para o vazamento do aço líquido no furo excêntrico, localizado na parte inferior da carcaça do forno. O vazamento pelo furo excêntrico, “Excentric Bottom Tapping” (EBT), permite que ocorra o controle do vazamento por meio do ângulo de basculamento do forno, objetivando-se minimizar o vazamento da escória que fica sobre o aço líquido devido à sua menor densidade, e com isso possibilita que um resto líquido de aço permaneça no interior do forno para facilitar a fusão da próxima carga metálica.

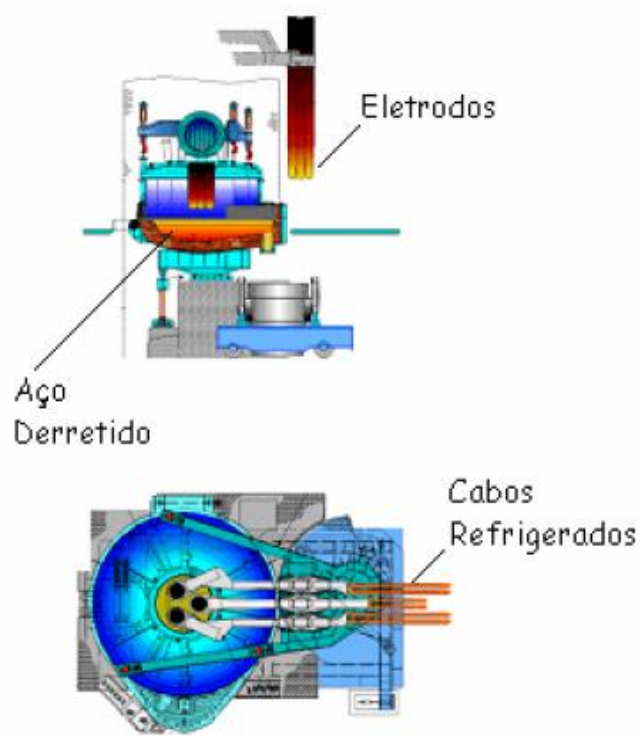


Figura 2.4 – Forno com Vazamento Excêntrico por baixo (EBT) [7]

Os seis terminais dos enrolamentos secundários do transformador do forno são geralmente acessíveis para o fechamento em delta através de um barramento externo ao tanque do transformador. Aos pontos de fechamento do delta, são conectados os cabos refrigerados e os cabos do primário dos transformadores de potencial para a medição da tensão secundária.



Figura 2.5 – Foto de um Forno Elétrico a Arco em vista lateral

Os transformadores de potencial medem a diferença de potencial entre os pontos no barramento secundário e um ponto na parte inferior da carcaça do forno, como indicado na Figura 2.6. A tensão e corrente secundárias são necessárias para o controle de posição dos eletrodos, ao qual é dada uma impedância de referência para determinação do erro em relação à impedância determinada pelos valores eficazes medidos da tensão e corrente secundários. A corrente secundária é geralmente determinada pela medição da corrente primária ou medida diretamente no circuito secundário através de bobinas de Rogowski ou transformadores de alta corrente. É interessante observar que, pela conexão em delta do secundário, a

medição da tensão secundária, pelo esquema da Figura 2.6, somente é possível quando pelo menos dois eletrodos tocam a carga metálica ou quando já existe um arco elétrico nas extremidades dos eletrodos. Se não existe o arco e os eletrodos não tocam a carga, não existe circulação de corrente pelo voltímetro e o valor medido da tensão secundária é zero, mesmo com o transformador do forno energizado [7].

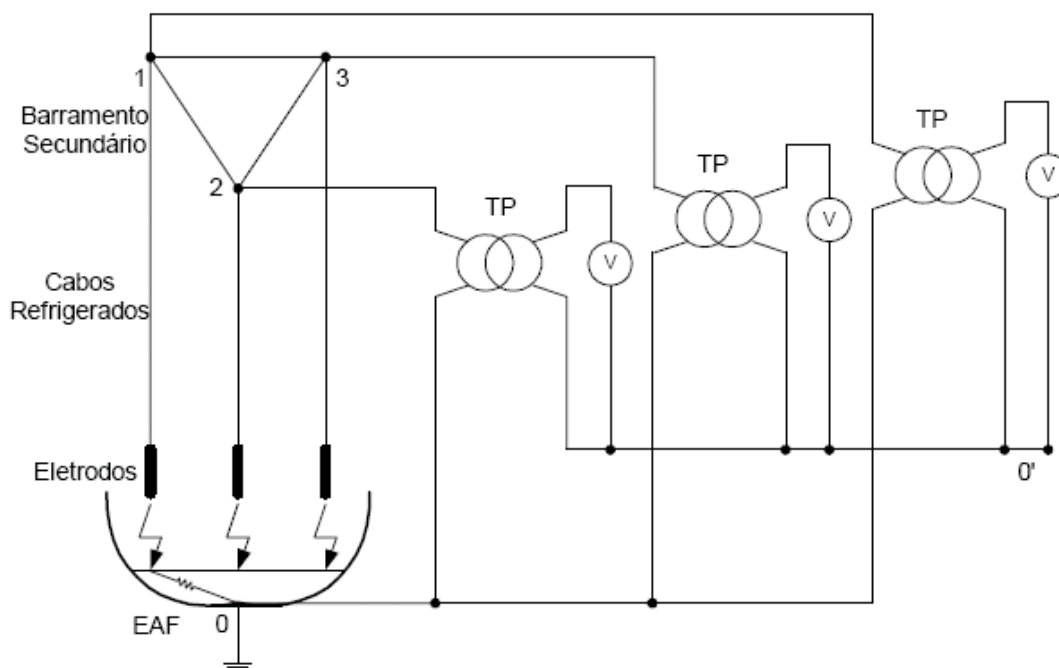


Figura 2.6 – Medição de Tensão Secundária em um FEA

A tensão medida entre o barramento secundário e a carcaça do forno compreende a queda de tensão na impedância dos cabos refrigerados, do braço de sustentação do eletrodo, do eletrodo, do arco elétrico propriamente dito e da impedância da carga metálica entre o arco elétrico e o ponto de medição na carcaça. A impedância da carga metálica, como a indicada na Figura 2.6 para a fase 1, é mais acentuada na parte inicial da fusão, quando ainda existem peças sólidas e eventuais materiais não condutores na carga. As impedâncias dos componentes deste circuito compreendem ainda as indutâncias próprias e as indutâncias mútuas entre cada duas fases do circuito secundário. Para uma situação do circuito com correntes senoidais balanceadas, pode ser determinada uma impedância equivalente desacoplada [8], como o equivalente monofásico da Figura 2.2, onde todas as indutâncias do circuito foram incorporadas à indutância X_{sec} e todas as

resistências à resistência R_{arc} . O arco elétrico tem uma característica essencialmente resistiva e representa quase a totalidade da resistência R_{arc} .

O comutador de taps sob carga dos transformadores para fornos permite o ajuste da tensão secundária ao longo da corrida, possibilitando a limitação da potência do arco elétrico no início da fusão, por exemplo. No início da fusão, logo após o carregamento do forno, os arcos elétricos estão acima da carga, próximos da abóbada, e a limitação de potência é necessária para a proteção da abóbada do forno até que os eletrodos penetrem na sucata. Após cerca de 1 minuto, os eletrodos já penetraram na carga e a sucata ao redor do arco fornece uma proteção contra o calor irradiado do arco para a abóbada e para os painéis refrigerados da carcaça do forno [9]. Após a fusão completa da carga metálica, o arco deve ser recoberto pela escória espumante, formada principalmente pela adição controlada de cal no interior do forno, para proteção do revestimento refratário e painéis refrigerados [10]. Se não houver escória espumante com altura suficiente, o tap da tensão secundária deve ser novamente reduzido para a limitação da potência no arco.

A formação do arco elétrico é proveniente da ocorrência de curto-circuito entre os eletrodos do FEA, passando pela carga metálica, a uma tensão de cerca de 1200 Volts no interior do forno. O sistema automático de regulação da posição dos eletrodos faz com que os eletrodos se abaixem para a circulação inicial de corrente entrando em contato com o material metálico depositado no forno após o primeiro carregamento. Na sequência, os eletrodos são erguidos e o arco inicial é mantido pela ação do sistema regulador que atua no ajuste do comprimento do arco, através da movimentação das colunas de eletrodos que são acionadas por cilindros hidráulicos, tendo como base a impedância de referência para o circuito secundário do forno.

O arco elétrico se forma e é extinto a cada semiciclo da corrente alternada. Uma tensão superior à tensão de ignição do arco inicia o processo de avalanche característico do arco elétrico, quando os elétrons emitidos pelo catodo adquirem energia suficiente para libertar vários outros elétrons, após a colisão com moléculas do gás existentes entre o eletrodo e a carga. Os elétrons libertados pela ionização

do gás adquirem, por sua vez, energia suficiente para libertar outros elétrons, criando um processo auto-sustentado de avalanche para a corrente elétrica [11]. A corrente no arco aumentará então sem limites, se não houver uma limitação no circuito externo ao arco e se for mantida uma diferença de potencial suficiente para manter o caminho condutor entre o eletrodo e catodo. Este processo é caracterizado por uma descarga elétrica de alta corrente, baixa tensão e altas temperaturas, sendo os elétrons inicialmente emitidos pelos pontos de concentração do campo elétrico na superfície irregular da sucata e, posteriormente, com o aquecimento da extremidade dos eletrodos e da carga metálica, passa a ser o efeito termiônico a principal fonte de emissão de elétrons para o arco. O aquecimento do ambiente no interior do forno contribui ainda para uma maior estabilidade do arco [12].

As condições sob as quais ocorre a geração do arco elétrico no processo do FEA implicam em transformações também na Qualidade da Energia Elétrica (QEE) ao qual todo o sistema elétrico alimentador está sujeito. Entre os principais problemas de qualidade da energia comumente encontrados nas operações de FEAs estão incluídos: desequilíbrios de tensão, distorção da forma de onda (harmônicas, inter-harmônicas, sub-harmônicas) e flutuações de tensão. FEAs são cargas não lineares, variáveis no tempo, que freqüentemente causam grandes flutuações de tensão e distorção harmônica. A maioria das grandes flutuações de corrente ocorre no início do ciclo de fusão. O arco elétrico sozinho é de fato melhor representado como uma fonte de harmônicos de tensão [13].

A característica tensão-corrente de um forno a arco tem um formato quase trapezoidal e sua magnitude é função do comprimento do arco. As impedâncias do sistema do FEA, incluindo o transformador, têm um efeito tampão sobre a tensão de alimentação e assim a carga arco aparece como uma fonte relativamente estável de corrente harmônica. No entanto, a variação estocástica de tensão devido a alterações repentinas no comprimento do arco produz uma dispersão de freqüências, predominantemente na faixa de 0,1 a 30 Hz sobre cada um dos harmônicos presentes. Este efeito é mais evidente durante a fase de fusão, ocasionado pela movimentação contínua da sucata sendo fundida e pela interação de forças eletromagnéticas entre os arcos. Durante a parte do processo de refino, o

arco se comporta melhor, mas ainda há alguma modulação do comprimento do arco por ondas na superfície do metal fundido [14].

2.3. CONCLUSÕES

Neste capítulo foram apresentadas as características do sistema elétrico alimentador, e de operação dos equipamentos e de funcionamento do processo que envolve o Forno Elétrico a Arco. A abordagem de caracterização do arco elétrico permitiu conhecer como ocorre a sua geração a partir do processo de fusão da sucata metálica, envolvendo os principais componentes que determinam a origem do arco como elemento fundamental na produção do aço no Forno Elétrico.

Deve-se destacar que os equipamentos e componentes que fazem parte da operação e interferem no processo de produção no FEA são controlados de forma integrada em sistemas de automação geralmente com controle distribuído, utilizando Controladores Lógicos Programáveis (CLP) e softwares de supervisão e operação dos equipamentos que fazem a interface do homem com o processo através de microcomputadores. Estes sistemas de controle e automação possuem atualmente tecnologias que são fundamentais para garantir maior eficiência na operação do FEA, tais como o sistema de regulação e controle de eletrodos.

Foram apresentadas algumas especificidades que definem melhor o arco elétrico que é gerado no FEA, objetivando relacionar as suas peculiaridades com as consequências provocadas na Qualidade da Energia Elétrica no sistema elétrico alimentador, principalmente em termos dos níveis de componentes harmônicas de corrente e tensão, e as suas distorções.

No próximo capítulo é apresentado o caso particular do FEA explorado por este trabalho.

3. O FORNO ELÉTRICO EM ESTUDO

Neste capítulo será apresentado um estudo de caso de uma siderúrgica não integrada com aciaria elétrica localizada na Grande Vitória. Será realizada uma breve contextualização sobre o processo produtivo, com um maior enfoque no Forno Elétrico a Arco (FEA). Para uma avaliação das condições de distorções harmônicas no sistema elétrico do FEA, serão apresentadas medições de tensão e corrente realizadas em diversos pontos do sistema que permitirão avaliar as condições atuais de operação.

3.1. PROCESSO DE PRODUÇÃO DA SIDERÚRGICA

Todo o processo de produção de aços longos laminados tem início na Aciaria quando o Forno Elétrico recebe a sucata e o ferro gusa que compõem a carga metálica, através do carregamento de um cestão que é içado com ponte rolante e despejado sobre o forno. Aproximadamente 75% desta carga metálica são sucatas e o restante, 25%, são de ferro gusa, que pode ser disposto tanto na forma sólida como líquida. A partir daí, ocorrem as etapas de fusão da carga metálica no FEA conforme descrito no capítulo anterior. Nesta etapa ocorrem diversas reações químicas e o aço líquido é formado.

Em seguida, o aço líquido é transportado em panelas dispostas em cima de carros sobre trilho até o Forno Panela onde sofre o refino secundário, um ajuste de sua composição química e de temperatura antes do seu molde e solidificação em forma de tarugos.

Na etapa de Lingotamento Contínuo, ainda na Aciaria, o aço líquido é derramado sobre o molde e resfriado de forma controlada, solidificando em forma de tarugos que são formados distribuídamente ao longo de 4 veios em paralelo. Os tarugos são o primeiro produto comercializado pela siderúrgica.

A maior parte da produção de tarugos é levada até os Laminadores de Perfis Leves e Perfis Médios, onde são reaquecidos a 1150°C e passam por um processo de desbaste e deformações sucessivas ao longo das linhas de laminação, até

atingirem forma e dimensões pré-definidas. Em seguida as peças individuais laminadas são agrupadas, empacotadas e pesadas, gerando outros produtos de venda para a indústria. A Figura 3.1 representa toda a cadeia produtiva da siderúrgica.

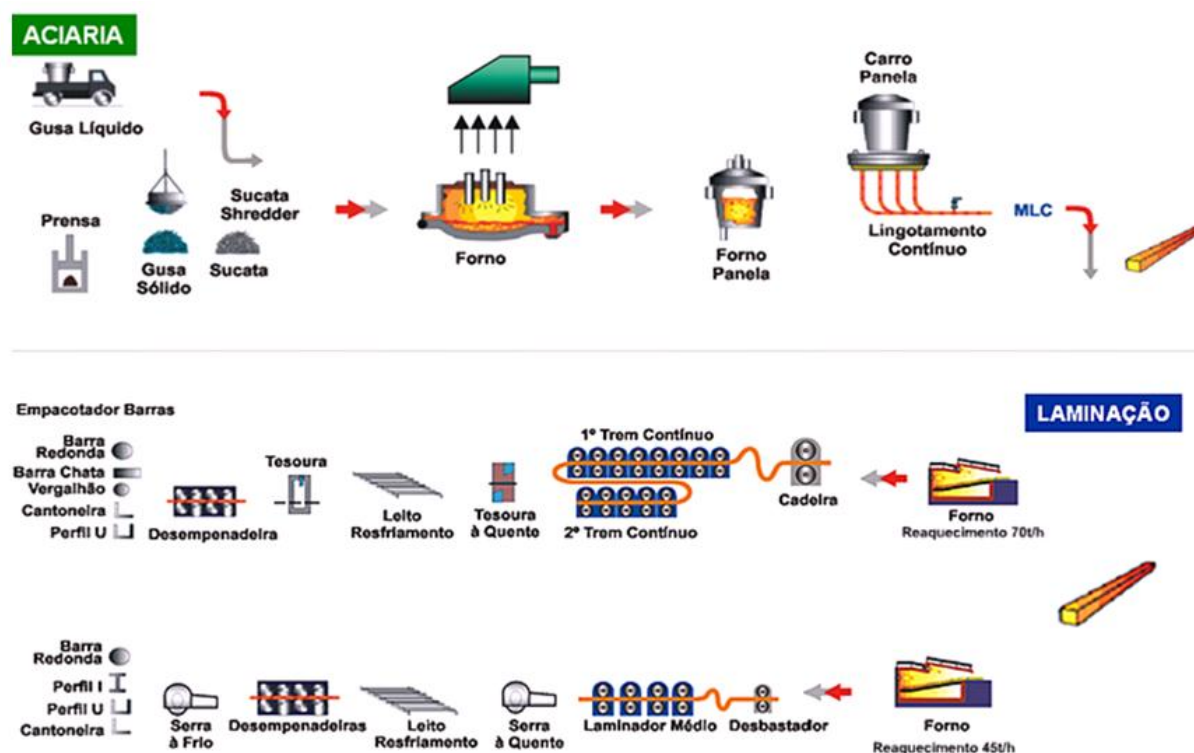


Figura 3.1 – Fluxograma do processo siderúrgico.

3.2. SISTEMA ELÉTRICO DA SIDERÚRGICA

Para atender o consumo total de energia elétrica, a siderúrgica possui um sistema de distribuição da energia nas tensões de 138 kV, 33 kV e 6,3 kV. O sistema elétrico da usina está interligado ao sistema brasileiro em 138 kV por duas linhas de transmissão que estão conectadas à subestação de Pitanga localizada na região da Grande Vitória. Ambas as linhas estão ligadas a uma subestação principal de recebimento de energia da siderúrgica, composta por três transformadores abaixadores de tensão para os níveis de 33 kV e 6,3 kV.

A distribuição de energia na subestação principal é feita a partir das duas linhas de 138 kV da seguinte forma: a linha 2 supre o sistema em 33 kV proveniente do transformador T30 que alimenta a Aciaria Elétrica composta do Forno Elétrico e

do Forno Panela; e a linha 1 alimenta os transformadores T1 e T2, para o suprimento das barras A e B na tensão de 6,3 kV de alimentação das demais cargas da usina, composta pelos laminadores e equipamentos auxiliares da aciaria elétrica.

Neste trabalho será dado enfoque ao sistema elétrico alimentador da aciaria elétrica a partir da linha 2, e mais especificamente à análise da operação do Forno Elétrico a Arco. Tendo em vista a potência e o impacto bem menor em relação ao FEA quanto à qualidade da energia elétrica, o Forno Panela, que possui também uma maior estabilidade operacional, não foi considerado neste estudo, estando o equipamento desligado nos instantes em que foram realizadas as medições. A Figura 3.2 mostra o diagrama unifilar simplificado do Sistema Elétrico da usina siderúrgica.

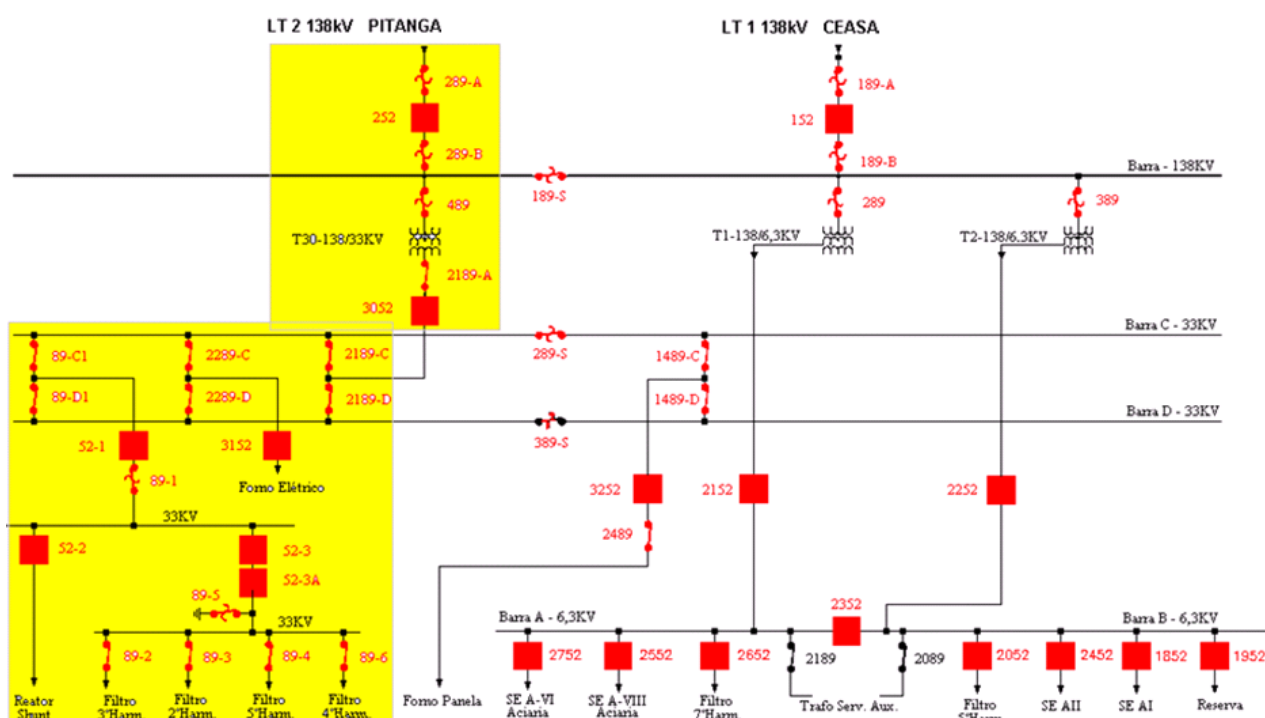


Figura 3.2 – Diagrama unifilar do sistema elétrico da siderúrgica em análise [15]

A parte em destaque no unifilar, que se refere ao circuito alimentador do Forno Elétrico, objeto deste trabalho, contempla, a partir da linha 2, o transformador abaixador T30 de 138/33 kV. Está interligada ao seu secundário uma barra de distribuição da tensão de 33 kV que é utilizada para suprir diretamente a linha do Forno Elétrico a Arco e o Filtro de harmônicos, estes sintonizados nas frequências correspondentes à 2ª, 3ª, 4ª e 5ª ordens. Convém ressaltar que o Reator Shunt, que está inserido na parte em destaque como integrante do circuito alimentador do FEA,

não será tratado já que não interfere nas medições e no propósito deste trabalho, tendo em vista que ele é chaveado alternadamente com o Forno Elétrico, isto é, quando o FEA é desligado através da detecção de ausência de corrente nas três fases então o reator shunt é ligado, e vice-versa. O reator shunt vem a ser um componente auxiliar para minimizar a variação de tensão percebida no sistema elétrico, em 138 kV, em decorrência dos chaveamentos do Forno Elétrico.

A Figura 3.3 representa o unifilar simplificado do circuito alimentador do Forno Elétrico a Arco. Para filtrar as componentes harmônicas e inter-harmônicas geradas durante o funcionamento do Forno Elétrico, existe instalado um sistema de Filtro Passivo no barramento de 33 kV, sendo este dividido em quatro ramos, cada um destes sintonizado em uma frequência, de forma a eliminar o maior número possível de harmônicas, dentro da variedade de frequências geradas na operação do FEA. As principais características de cada ramo de filtragem passiva podem ser visualizadas na Tabela 3.1 [15].

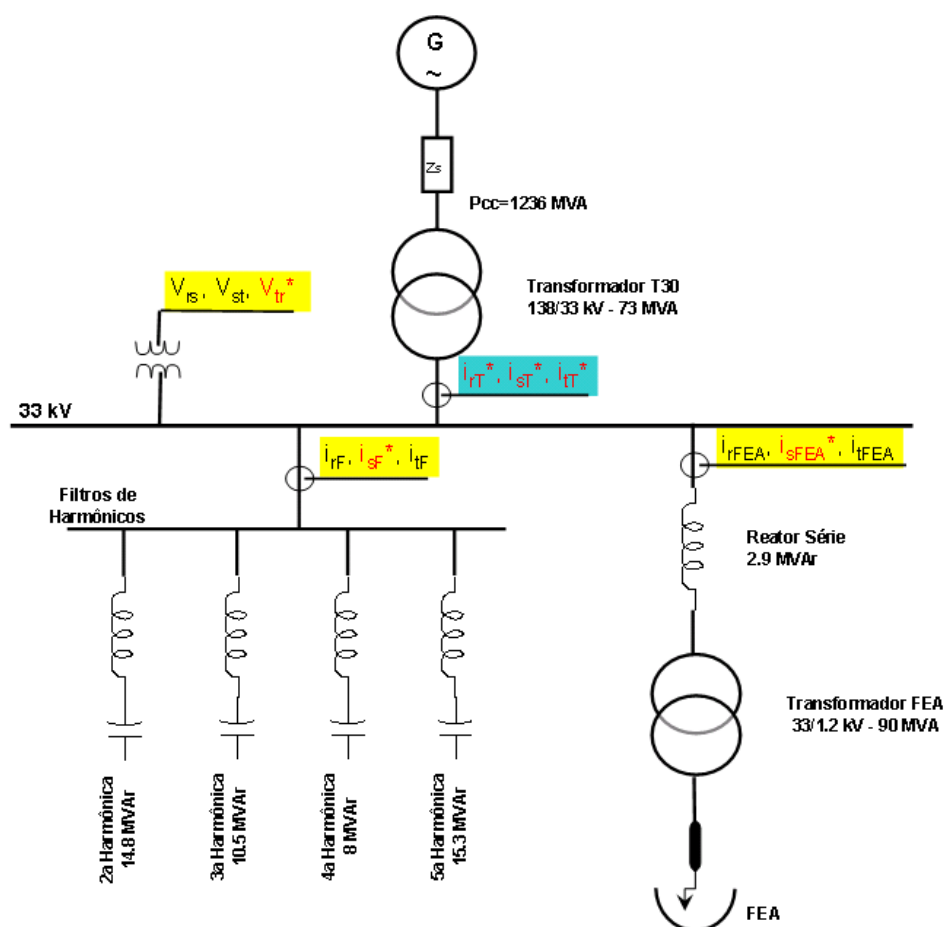


Figura 3.3 – Diagrama unifilar simplificado do circuito do FEA com variáveis medidas e calculadas

Tabela 3.1 – Características do sistema de filtragem passiva

Características	Capacidade	Indutância (L)	Capacitância (C)
Filtro passa-faixa (1,97ST) - Sintonia 118,2 Hz	14,8 Mvar	69,7 mH	26 μ F
Filtro passa-faixa (2,96ST) - Sintonia 177,6 Hz	10,5 Mvar	34,8 mH	23 μ F
Filtro passa-faixa (3,89ST) - Sintonia 233,4 Hz	8,0 Mvar	26,3 mH	17,66 μ F
Filtro passa-faixa (4,97ST) - Sintonia 298,2 Hz	15,3 Mvar	7,8 mH	36,5 μ F

3.3. MEDIÇÕES NO SISTEMA ELÉTRICO DO FEA

Para este trabalho foram realizadas oscilografias de tensão e corrente na subestação principal, utilizando um equipamento Registrador Hioki – Modelo 8841. As medições foram realizadas a partir do secundário do transformador T30, no nível de tensão de 33 kV, o qual foi convencionado como sendo o ponto de acoplamento comum (PAC) do sistema elétrico.

As medições foram realizadas de forma a possibilitar a caracterização de todas as condições de operação do sistema, e de forma a permitir também calcular outras variáveis de interesse através dos dados medidos. As condições de operação acontecem nas etapas do processo produtivo no Forno Elétrico que ocorre ao longo do período de operação chamado de corrida.

No processo de fusão de metálicos no Forno Elétrico ao longo da corrida, a característica da carga que está sendo fundida e a temperatura do ambiente interior da carcaça do FEA são determinantes para alterar o comportamento das medições. Estas características estão completamente relacionadas à evolução da corrida no tempo, isto é, logo no instante inicial da corrida, quando se inicia a fusão, a carga metálica está completamente sólida e desagregada, levando a uma maior instabilidade das variáveis elétricas medidas. Com o passar da corrida, à medida que a carga metálica vai se fundido e tornando-se mais líquida, e com a temperatura mais elevada da carga e da carcaça interna do FEA, o comportamento da tensão e corrente, quanto a variações bruscas, vai diminuindo e tornando as variáveis mais estáveis. Desta forma, as medições foram realizadas e serão aqui apresentadas para dois momentos de destaque: uma na etapa final da corrida, com o aço praticamente na fase líquida, durante o processo chamado de refino da carga; e a

outra medição logo no primeiro minuto da corrida, no momento mais agressivo do processo. No entanto, para o propósito do trabalho, de forma a avaliar a condição mais crítica para o comportamento do sistema elétrico em estudo, a partir dos próximos capítulos, desenvolvidos com base no modelamento do sistema elétrico do FEA, a condição de operação do Forno Elétrico retratada no início da corrida será a utilizada para o desenvolvimento do estudo. Todas as variáveis que serão apresentas referem-se a esta condição operacional.

Devido à disponibilidade limitada de equipamentos para a medição, nem todas as grandezas elétricas puderam ser medidas. Porém, as medições foram realizadas de forma que, com as variáveis medidas, fosse possível, por meio de cálculo, obter as outras grandezas elétricas. Foram medidas tensões e correntes de linha, as quais estão definidas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Variáveis registradas na subestação principal.

Variável Medida	Simbologia
Corrente na fase R do conjunto de Filtros passivos (2ª, 3ª, 4ª e 5ª)	i_{rF}
Corrente na fase T do conjunto de Filtros passivos (2ª, 3ª, 4ª e 5ª)	i_{tF}
Corrente na fase R do Forno Elétrico a Arco	i_{rFEA}
Corrente na fase T do Forno Elétrico a Arco	i_{tFEA}
Tensão entre as fases R e S (Tensão de linha)	V_{rs}
Tensão entre as fases S e T (Tensão de linha)	V_{st}

A Figura 3.3 destaca, no diagrama unifilar simplificado, a localização das variáveis que foram medidas na subestação principal (variáveis em negro nos destaques em amarelo).

Para a perfeita aquisição dos dados, fez-se necessário o ajuste das escalas do registrador, principalmente devido à necessidade de realização das medições no secundário dos TP's e dos TC's existentes nos painéis da sala de controle da subestação principal. Os TP's e TC's utilizados foram os já existentes na instalação, e não foi possível obter informações a respeito de sua resposta em frequência, e nem mesmo retirá-los do sistema para ensaios. Como o interesse reside

principalmente nas frequências abaixo de 1 kHz, considerou-se a resposta em frequência do mesmo linear.

O registrador oscilógrafo é desta forma ajustado para já apresentar os valores tanto de tensão quanto os de corrente em seus valores de linha. Além dos ajustes de escala, foram necessários ajustes da forma de aquisição dos dados, permitindo sua perfeita reconstituição, dentro de parâmetros pré-estabelecidos. Dentre estes principais ajustes que se fizeram necessários são destacados:

- Taxa de amostragem => 0,1 ms
- Intervalo total de cada medição => 5 s

Com isso, foram obtidos 50.000 pontos de medição para cada variável medida no intervalo de 5 segundos, o que garante 166 valores obtidos em um ciclo de senóide.

A Tabela 3.3 especifica como foram obtidas, por meio de cálculos, as variáveis que não foram medidas na subestação principal (variáveis em vermelho nos destaques em amarelo na Figura 3.3). Todos os cálculos partem do pressuposto que o sistema elétrico alimentador da concessionária é do tipo trifásico a três fios e equilibrado.

Tabela 3.3 – Variáveis calculadas através das variáveis medidas.

Equação	Variável Calculada	Cálculo	Variável
(3.1)	Corrente na fase S do conjunto de Filtros passivos	$= - (i_{rF} + i_{tF})$	i_{sF}^*
(3.2)	Corrente na fase S do Forno Elétrico a Arco	$= - (i_{rFEA} + i_{tFEA})$	i_{sFEA}^*
(3.3)	Tensão entre as fases T e R (Tensão de linha)	$= - (V_{rS} + V_{st})$	V_{tr}^*

Como a corrente no transformador T30 não foi registrada na subestação principal, torna-se necessário o seu cálculo. Aplicando a Lei de Kirchhoff das correntes no barramento de 33 kV da subestação principal, a corrente do transformador T30 é ilustrada na Figura 3.3 (variáveis no destaque em azul), sendo calculada conforme exibido na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Correntes por fase no transformador T30.

Equação	Variável Calculada	Cálculo	Variável
(3.4)	Corrente da fase R no transformador T30	$= i_{rF} + i_{rFEA}$	i_{rT}^*
(3.5)	Corrente da fase S no transformador T30	$= i_{sF}^* + i_{sFEA}^*$	i_{sT}^*
(3.6)	Corrente da fase T no transformador T30	$= i_{tF} + i_{tFEA}$	i_{tT}^*

3.4. AVALIAÇÃO DAS MEDIÇÕES

A seguir são apresentadas as formas de onda referentes às medições de tensão no ponto de acoplamento comum, medições de corrente do Forno Elétrico a Arco e medições de corrente no sistema de filtragem passiva, com seus respectivos espectros harmônicos.

As Figuras 3.4, 3.5 e 3.6, bem como a Tabela 3.5, referem-se à tensão eficaz de linha no PAC, para comparação de três situações diferentes: FEA desligado; FEA ligado durante a etapa inicial da corrida (fusão); e FEA ligado durante a etapa final da corrida (refino).

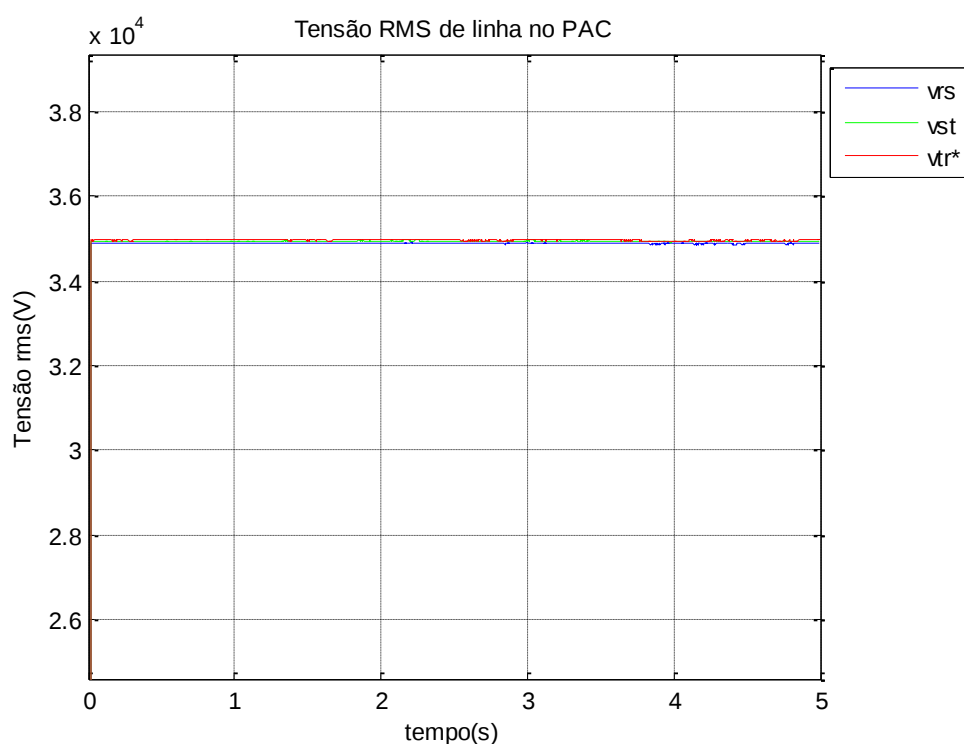


Figura 3.4 – Tensão eficaz de linha no PAC com FEA desligado.

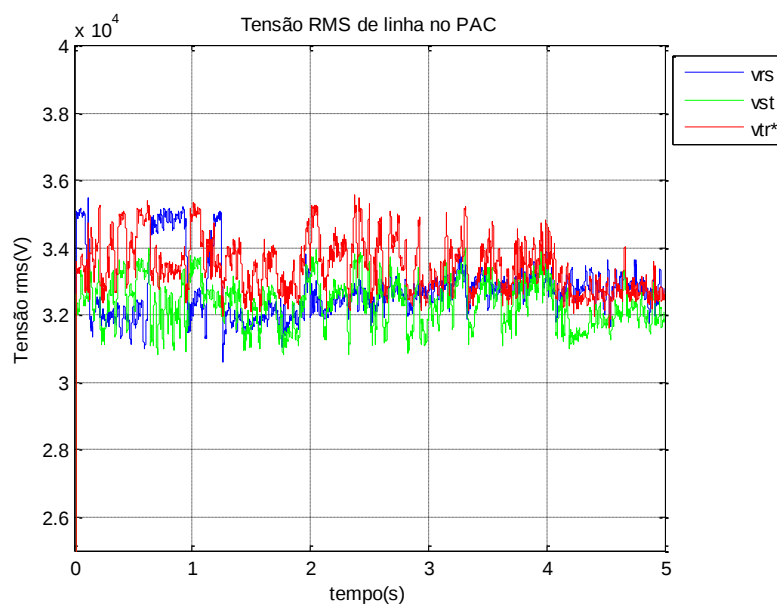


Figura 3.5 – Tensão eficaz de linha no PAC c/ FEA ligado durante a etapa inicial da corrida (fusão).

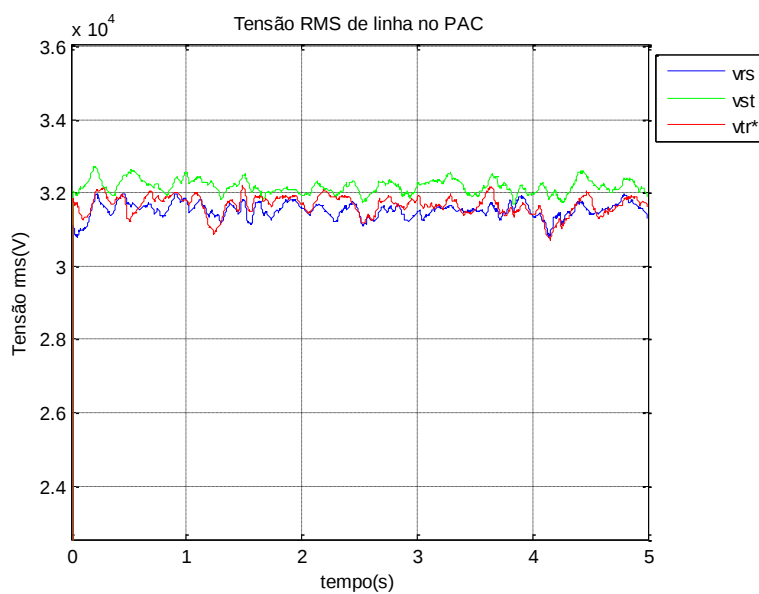


Figura 3.6 – Tensão eficaz de linha no PAC c/ FEA ligado durante a etapa final da corrida (refino).

Tabela 3.5 – Análise das tensões no PAC - secundário do transformador T30.

Situações de medição	Tensão de linha eficaz	Valor Eficaz Máximo (kV)	Valor Eficaz Mínimo (kV)	Valor Eficaz Médio (kV)	Valor Eficaz Médio entre fases (kV)
FEA desligado	V_{rs}	34,92	34,87	34,89	34,93
	V_{st}	34,97	34,91	34,94	
	V_{tr^*}	35,00	34,94	34,97	
FEA ligado Início da corrida (IC)	V_{rs}	35,06	30,59	32,66	32,77
	V_{st}	34,00	30,84	32,36	
	V_{tr^*}	35,56	31,62	33,30	
FEA ligado Final da corrida (FC)	V_{rs}	31,97	30,79	31,52	31,78
	V_{st}	32,61	31,67	32,14	
	V_{tr^*}	32,19	30,72	31,67	

As Figuras 3.7 e 3.8, bem como a Tabela 3.6 referem-se à corrente eficaz no FEA para as duas situações de operação do Forno Elétrico:

- FEA ligado no Início da Corrida => FEA (IC)
- FEA ligado no Final da Corrida => FEA (FC)

Estas situações serão abordadas para todas as demais medições consideradas neste capítulo.

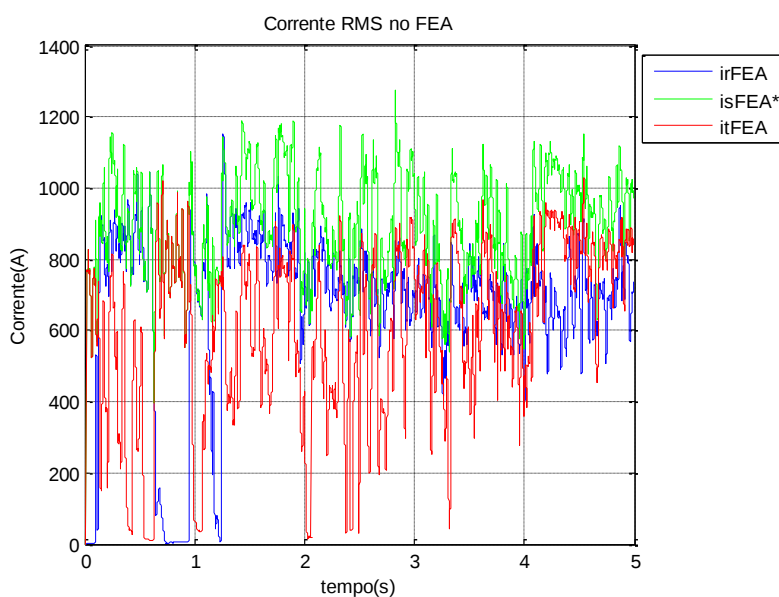


Figura 3.7 – Corrente eficaz no FEA durante a etapa inicial da corrida (fusão).

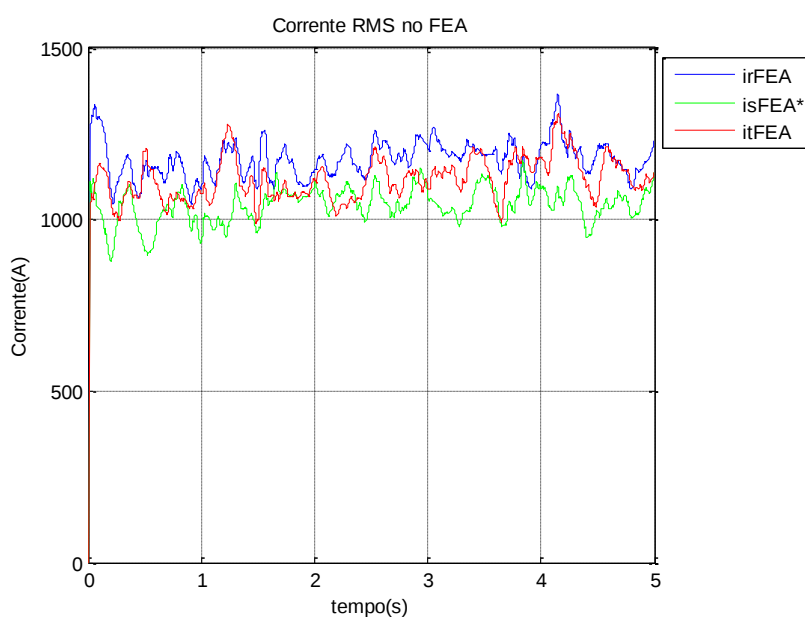


Figura 3.8 – Corrente eficaz no FEA durante a etapa final da corrida (refino).

Tabela 3.6 – Análise das correntes no FEA.

Situações de medição	Corrente de linha eficaz	Valor Eficaz Máximo (A)	Valor Eficaz Mínimo (A)	Valor Eficaz Médio (A)	Valor Eficaz Médio entre fases (A)
FEA ligado Início da corrida (IC)	i_{rFEA}	1150,6	5,6	718,3	759,0
	i_{sFEA}^*	1276,7	540,5	909,5	
	i_{tFEA}	1027,7	14,4	649,2	
FEA ligado Final da corrida (FC)	i_{rFEA}	1369,6	1089,2	1184,6	1121,4
	i_{sFEA}^*	1173,6	930,3	1055,2	
	i_{tFEA}	1308,8	990,6	1124,4	

As formas de onda senoidais de tensão e corrente, apresentadas a seguir neste capítulo, serão ilustradas no período de 2,5 a 2,65 segundos, que foi escolhido de forma aleatória dentro do intervalo total de 5 s transcorridos em cada medição.

3.4.1. Parâmetros de Avaliação das Distorções Harmônicas

Com o crescente aumento da utilização de cargas não lineares conectadas aos sistemas de distribuição de energia elétrica, principalmente cargas provenientes de processos industriais; as agências de regulamentação, órgãos e institutos de normatização do setor elétrico, tanto nacional como internacional, estabeleceram e recomendaram limites de referência para as distorções harmônicas de tensão e corrente, objetivando manter um padrão satisfatório de qualidade de energia elétrica nos sistemas de distribuição. Com isso, padrões e recomendações têm sido estabelecidos, especificando limites totais e individuais para distorções harmônicas de tensão e corrente em suas diversas frequências, tendo como referência a componente fundamental.

Dentre estas recomendações existentes, destacam-se as seguintes que serão utilizadas neste trabalho para avaliação das medições:

- Institute of Electrical and Electronic Engineers – IEEE, “Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”, Standard 519 – 1992 [16];
- PRODIST – ANEEL – Módulo 8 “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional” [17];

A recomendação IEEE 519 foi utilizada já que a ANEEL não possui procedimentos estabelecendo valores de referência para harmônicos de corrente, o que será de interesse avaliar no âmbito deste trabalho. Como a aplicação em estudo

neste trabalho é alimentada em 33 kV no PAC (Ponto de Acoplamento Comum) onde foram realizadas as medições, para definição de valores de referência das componentes harmônicas de corrente, será utilizada a recomendação IEEE 519 para níveis de tensão inferiores a 69 kV. Nesta recomendação os limites para as distorções harmônicas de corrente são baseadas na corrente de carga (i_L) e corrente de curto-circuito (i_{CC}) no ponto de acoplamento comum, conforme apresentado na Tabela 3.7. Quanto maior a relação entre a corrente de curto-circuito e a da carga, maiores são os limites estabelecidos, pois estes afetarão em menor proporção a tensão no ponto de acoplamento comum.

A faixa da Tabela 3.7 a ser utilizada para este trabalho será para os valores referentes à ($i_{CC}/i_L < 20$), tendo em vista que a corrente de curto-circuito no barramento de 33 kV (PAC) é de 7.986 A, conforme cálculo que será apresentado na Figura 4.6, e a corrente da carga Forno Elétrico a Arco varia de 759 a 1121 A (tabela 3.6), para as duas situações operacionais avaliadas: FEA (IC) e FEA (FC).

Tabela 3.7 – Limites das distorções harmônicas de corrente IEEE 519.

120 V ≤ V _N ≤ 69 kV						
Distorção harmônica individual de corrente (%)						
i_{CC}/i_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	THDi
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Para avaliação dos índices relacionados à tensão, serão utilizados os valores de referência do PRODIST - Módulo 8, que possuem força de regulamentação. Definido o ponto de acoplamento comum (PAC), o PRODIST sugere limites harmônicos globais e individuais de tensão para a classe de tensão avaliada.

A Tabela 3.8 define os valores de distorção harmônica total de tensão, com a classe de tensão. Para uma tensão igual a 33 kV no ponto de acoplamento do sistema, que será analisado neste trabalho, a distorção harmônica total de tensão (DTT) limite máximo é de 6%.

Tabela 3.8 – Valores de referência da distorção harmônica total de tensão.

Tensão nominal do barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) %
$V_N \leq 1 \text{ kV}$	10
$1 \text{ kV} < V_N \leq 13,8 \text{ kV}$	8
$13,8 \text{ kV} < V_N \leq 69 \text{ kV}$	6
$69 \text{ kV} < V_N \leq 138 \text{ kV}$	3

A Tabela 3.9 define os limites individuais de distorção harmônica de tensão (DIT_h ou THD_i), em porcentagem da tensão na frequência fundamental.

Tabela 3.9 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão.

Ordem Harmônica		Distorção Harmônica Individual de Tensão (DIT_h) [%]			
		$V_N \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_N \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_N \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_N \leq 138 \text{ kV}$
Ímpares não múltiplas de 3	5	7.5	6	4.5	2.5
	7	6.5	5	4	2
	11	4.5	3.5	3	1.5
	13	4	3	2.5	1.5
	17	2.5	2	1.5	1
	19	2	1.5	1.5	1
	23	2	1.5	1.5	1
	25	2	1.5	1.5	1
	>25	1.5	1	1	0.5
Ímpares múltiplas de 3	3	6.5	5	4	2
	9	2	1.5	1.5	1
	15	1	0.5	0.5	0.5
	21	1	0.5	0.5	0.5
	>21	1	0.5	0.5	0.5
Pares	2	2.5	2	1.5	1
	4	1.5	1	1	0.5
	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

As equações (3.1) e (3.2) especificam o cálculo para obtenção das distorções harmônicas individuais de tensão e para a obtenção das distorções harmônicas totais de tensão, respectivamente.

$$DIT_h = \frac{V_h}{V_1} \times 100\% \quad (3.1)$$

$$DTT = THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (3.2)$$

V_h – Amplitude da tensão harmônica de ordem h

V_1 – Amplitude da tensão fundamental

Deve ser ressaltado que os indicadores considerados nesta seção não contemplam as componentes inter-harmônicas.

3.4.2. Medições de Tensão no PAC

As Figuras 3.9 e 3.10 apresentam a tensão de linha no PAC com FEA no início (IC) e no final (FC) da corrida. Como já dito, considera-se neste trabalho, na visualização de grandezas no tempo, o intervalo de 2,5 a 2,65 s da medição. Já as Figuras 3.11 e 3.12 mostram os respectivos espectros harmônicos destas tensões.

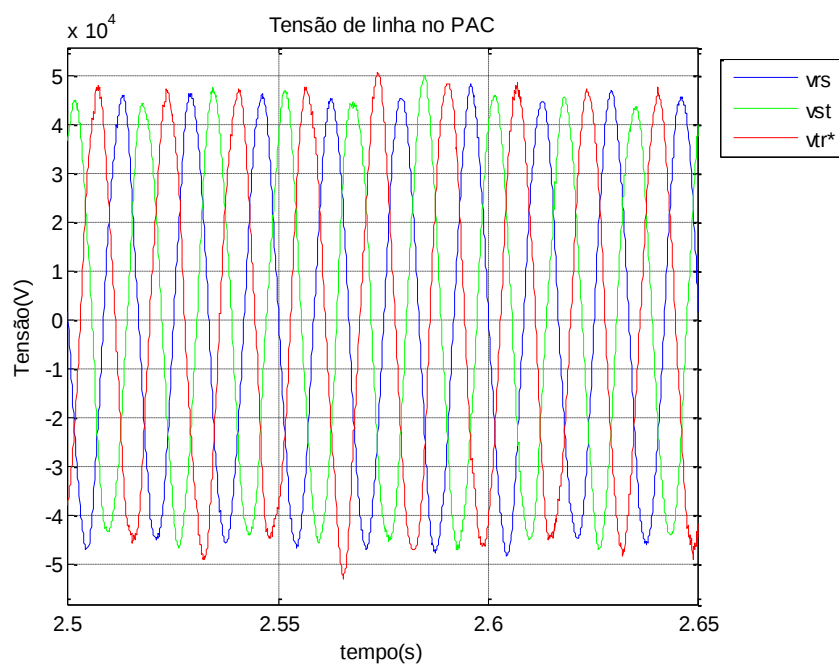


Figura 3.9 – Tensão de linha no PAC com FEA ligado no Início da corrida - FEA (IC).

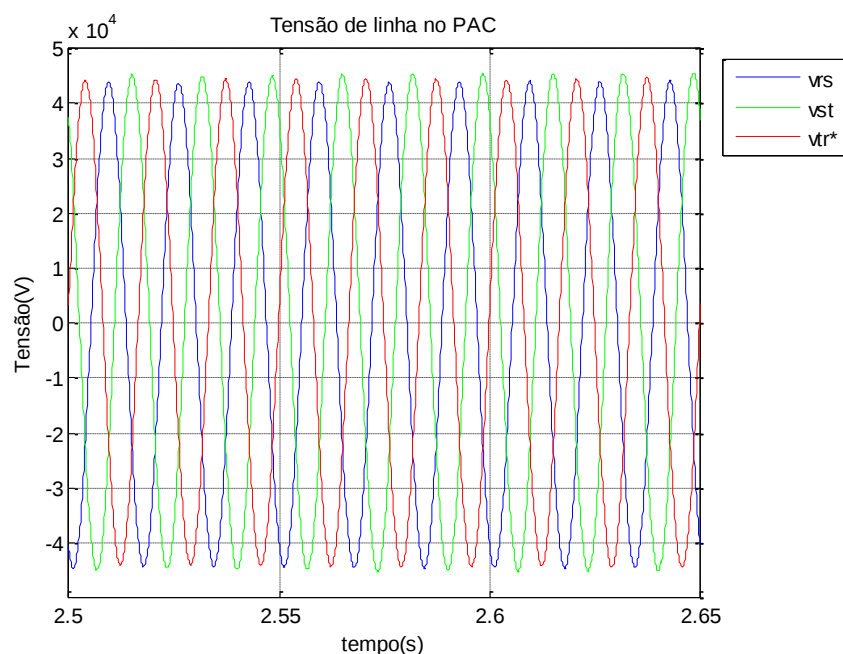
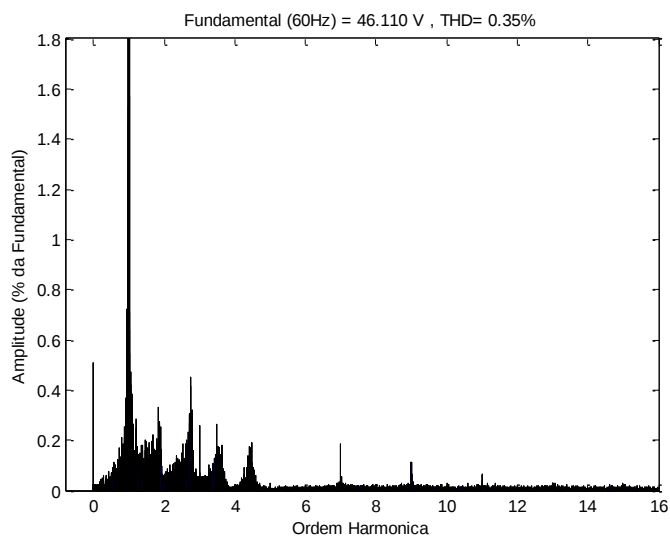
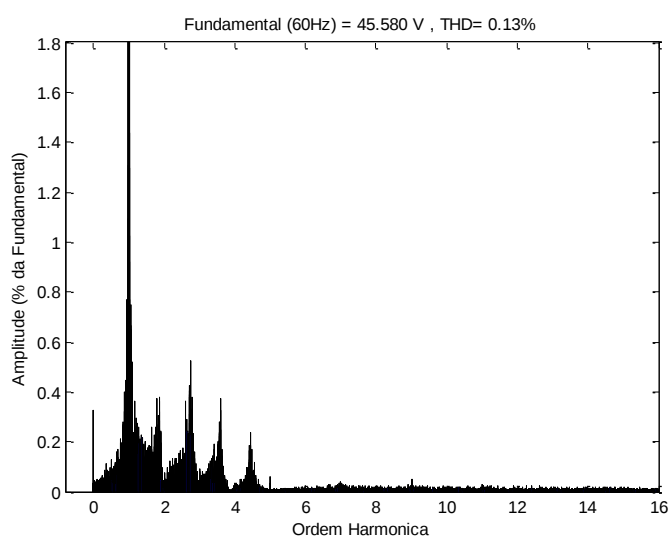


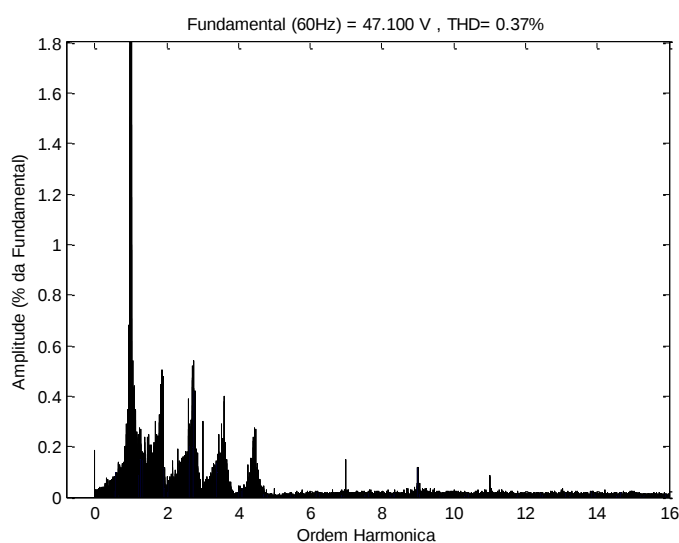
Figura 3.10 – Tensão de linha no PAC com FEA ligado no Final da corrida – FEA (FC).



(a)



(b)



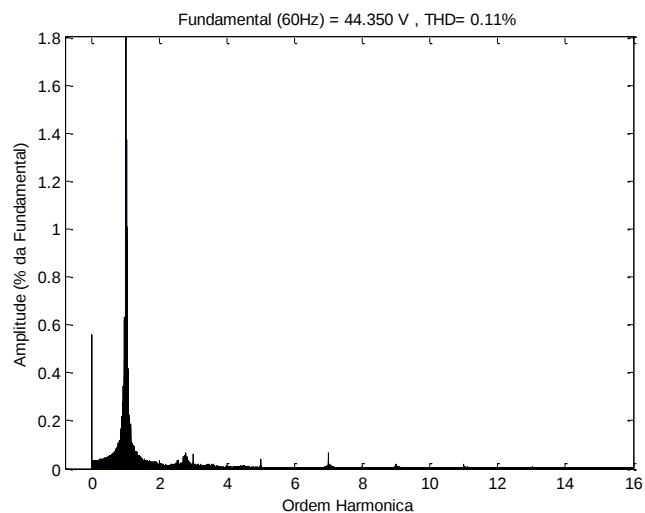
(c)

Amplitude média entre fases: 46,26 kV

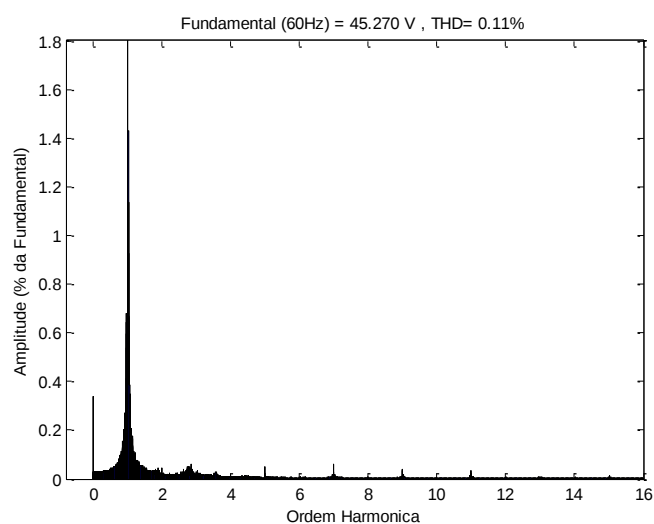
Taxa de distorção harmônica média
das três fases: 0,28%

Hz	(%)
0 (DC)	0,34
0,2 a 19	0,27
19,2 a 29	0,30
29,2 a 39	0,43
39,2 a 49	0,69
49,2 a 54	0,78
55	0,27
56	0,29
57	0,47
58	0,58
59	1,18
60 (h1)	100,00
60,2 a 70	6,39
70,2 a 80	0,99
80,2 a 100	1,16
100,2 a 119	1,47
120 (h2)	0,03
120,2 a 150	0,82
150,2 a 179	1,92
180 (h3)	0,22
180,2 a 239	1,31
240 (h4)	0,03
240,2 a 299	0,87
300 (h5)	0,04
300,2 a 359	0,15
360 (h6)	0,02
360,2 a 419	0,20
420 (h7)	0,13
420,2 a 479	0,22
480 (h8)	0,02
480,2 a 539	0,20
540 (h9)	0,08
540,2 a 599	0,23
600 (h10)	0,02
600,2 a 659	0,18
660 (h11)	0,06
660,2 a 719	0,20
720 (h12)	0,01
720,2 a 779	0,17
780 (h13)	0,02

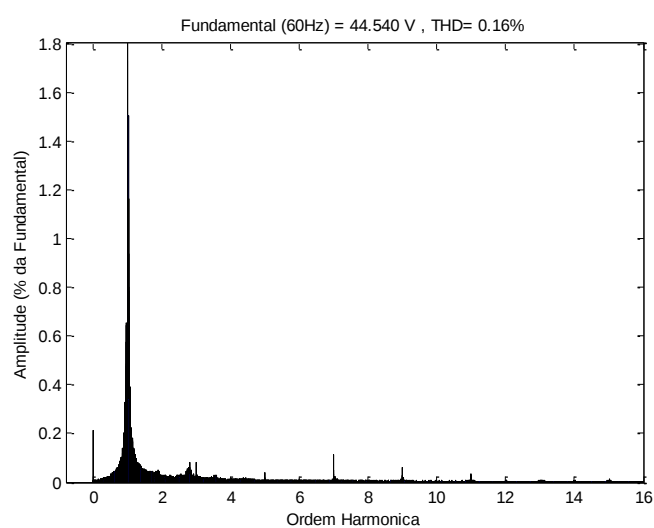
Figura 3.11 – Espectros dos harmônicos de tensão – FEA (IC) : (a) V_{rs} , (b) V_{st} , (c) V_{tr}^* .



(a)



(b)



(c)

Amplitude média entre fases: 44,72 kV

Taxa de distorção harmônica média
das três fases: 0,13%

Hz	(%)
0 (DC)	0,37
0,2 a 19	0,24
19,2 a 29	0,22
29,2 a 39	0,30
39,2 a 49	0,50
49,2 a 54	0,67
55	0,23
56	0,26
57	0,37
58	0,54
59	1,03
60 (h1)	100,00
60,2 a 70	7,37
70,2 a 80	0,55
80,2 a 100	0,39
100,2 a 119	0,24
120 (h2)	0,03
120,2 a 150	0,20
150,2 a 179	0,28
180 (h3)	0,06
180,2 a 239	0,20
240 (h4)	0,01
240,2 a 299	0,14
300 (h5)	0,04
300,2 a 359	0,09
360 (h6)	0,01
360,2 a 419	0,08
420 (h7)	0,08
420,2 a 479	0,09
480 (h8)	0,01
480,2 a 539	0,05
540 (h9)	0,04
540,2 a 599	0,05
600 (h10)	0,00
600,2 a 659	0,03
660 (h11)	0,02
660,2 a 719	0,04
720 (h12)	0,00
720,2 a 779	0,01
780 (h13)	0,01

Figura 3.12 – Espectros dos harmônicos de tensão – FEA (FC) : (a) V_{rs} , (b) V_{st} , (c) V_{tr}^* .

As tabelas lateralmente às Figuras 3.11 e 3.12 objetivam mostrar, através do agrupamento de freqüências por faixa (ex. 60,2 a 70), a contribuição total de inter-harmônicos da respectiva faixa, em coerência com o que é visualizado no espectro. Chama-se atenção que a distorção harmônica total (THD), mostradas nestas figuras e em todos os espectros harmônicos apresentados neste trabalho, que são calculados pelo Matlab/Simulink®, consideram apenas os harmônicos individuais de múltiplos inteiros (h_2 , h_3 , h_4 , h_5 , h_6 ,...), ou seja, no caso da distorção harmônica total de tensão (DTT) o cálculo é feito conforme equação 3.2 referente ao módulo 8 do Prodist. Desta forma, se este cálculo da distorção total considerasse todos os inter-harmônicos, o valor obtido seria bem maior. Por exemplo, a DTT completa da tensão conforme tabela da figura 3.11 (que contempla 5 s de medição) resultaria em 9,43%, considerando harmônicos e inter-harmônicos desde 0,2 Hz a 780 Hz, a cada 0,2 Hz.

3.4.3. Avaliação das Medições de Tensão

Apesar dos resultados apresentados na Figura 3.11 e Figura 3.12 terem mostrado somente até a 16ª harmônica, objetivando a melhor visualização das harmônicas e inter-harmônicas de menor ordem que foram as freqüências significativas, para esta avaliação foram considerados os espectros das harmônicas medidos até a 25ª harmônica. Os valores obtidos de DTT variaram entre 0,11% (FEA (FC)) e 0,37% (FEA (IC)) para as duas situações operacionais avaliadas. Como o limite normativo estabelecido pelo Prodist no módulo 8 é de 6%, conclui-se que, para as tensões medidas, os valores verificados encontram-se em uma faixa bem inferior ao limite especificado pela regulamentação brasileira. Os valores obtidos nas distorções harmônicas individuais, também avaliadas conforme o Prodist, não indica, da mesma forma, valores superiores aos limites recomendados.

Os espectros dos harmônicos de tensão, sobretudo na situação FEA (IC), confirmam as elevadas contribuições inter-harmônicas, principalmente na faixa até a 5ª ordem, bem como mostram a relevância das sub-harmônicas. Nesta situação operacional, que é muito mais crítica em termos de impacto negativo na qualidade da energia elétrica do que a condição operacional FEA (FC), destaca-se a elevada

diferença entre as tensões de linha (V_{rs} , V_{st} e V_{tr*}), tanto verificando o perfil da distribuição harmônica como através das curvas senoidais mostradas na Figura 3.9.

O perfil gráfico das curvas de tensão apresentadas nas Figuras 3.5 e 3.6, referentes ao comportamento da tensão eficaz ao longo de todo o período de medição para as duas situações operacionais do FEA, também reforçam o que foi dito quanto à maior agressividade para o sistema elétrico da etapa do FEA no início da corrida. A Figura 3.4 ilustra a estabilidade da tensão no PAC quando o Forno Elétrico está desligado, ressaltando-se que, apesar do valor nominal da tensão de linha ser de 33 KV, o seu ajuste é possível através do comutador manual de taps do transformador T30, que regula a tensão normalmente na faixa de 34,5 a 35 kV na condição em vazio, isto é, FEA desligado e filtros passivos ligados.

3.4.4. Medições de Corrente no FEA

As Figuras 3.13 e 3.14 apresentam a corrente no FEA, no início (IC) e no final (FC) da corrida. Como já dito, considera-se neste trabalho, na visualização de grandezas no tempo, o intervalo de 2,5 a 2,65 s da medição. Já as Figuras 3.15 e 3.16 mostram os respectivos espectros harmônicos destas correntes.

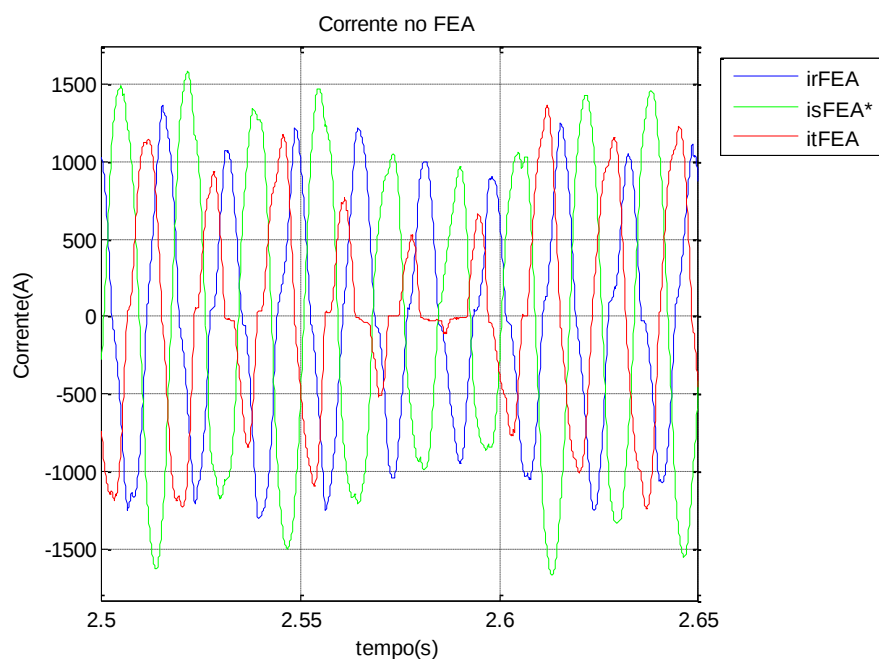


Figura 3.13 – Corrente no FEA no Início da corrida – FEA (IC).

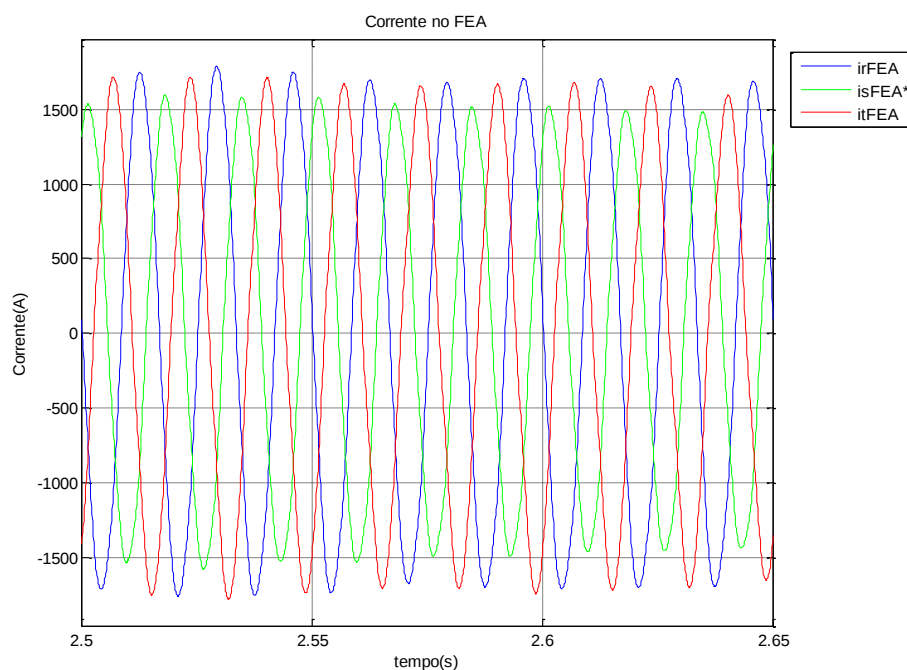
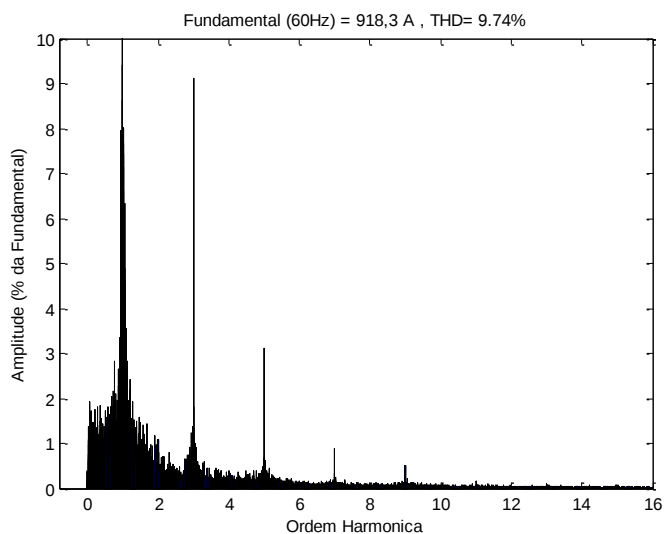
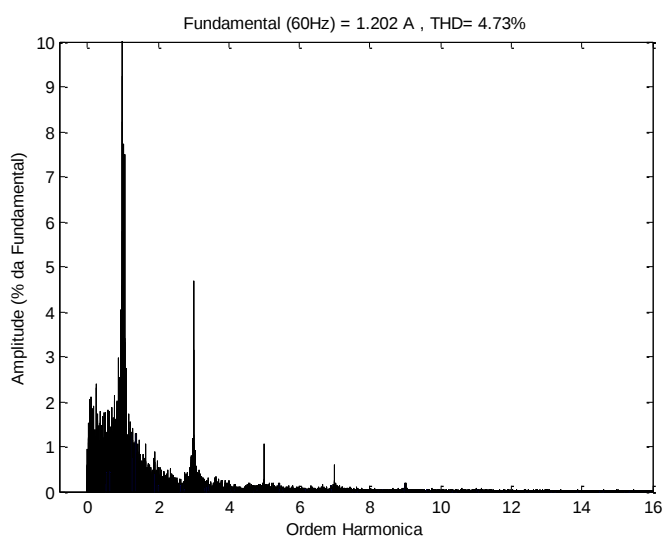


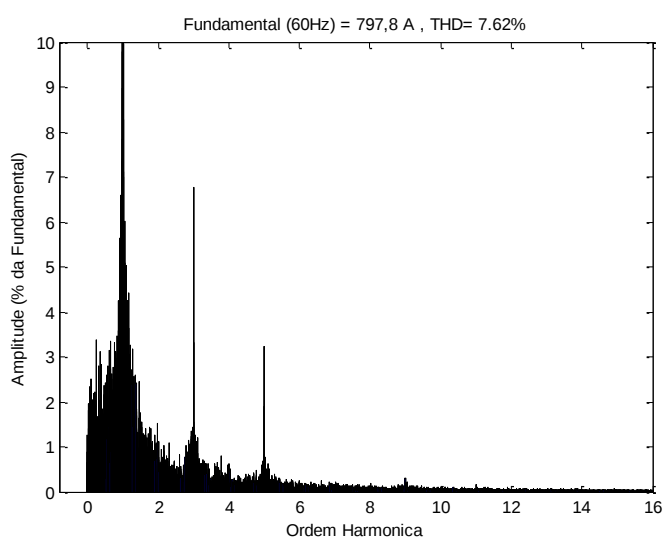
Figura 3.14 – Corrente no FEA no Final da corrida – FEA (FC).



(a)



(b)



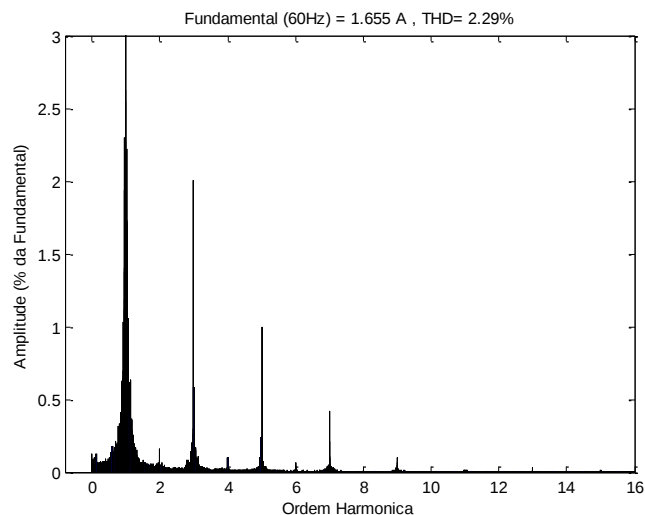
(c)

Amplitude média entre fases: 973 A

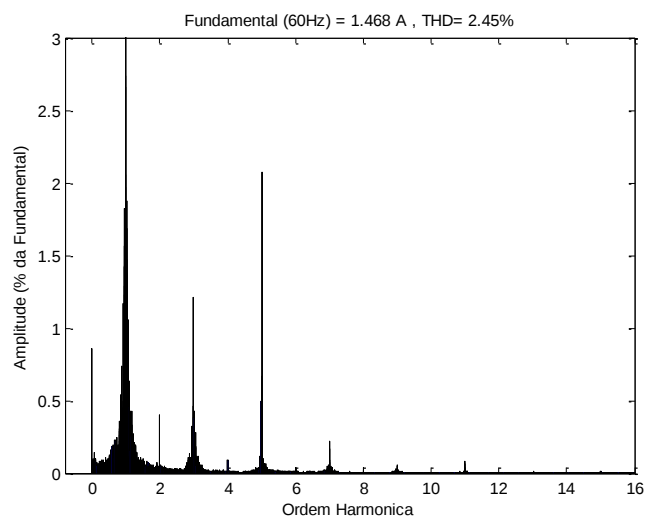
Taxa de distorção harmônica média
das três fases: 7,36%

Hz	(%)
0 (DC)	0,78
0,2 a 19	10,85
19,2 a 29	7,80
29,2 a 39	8,17
39,2 a 49	9,82
49,2 a 54	8,58
55	1,43
56	1,66
57	2,34
58	3,77
59	5,54
60 (h1)	100,00
60,2 a 70	27,40
70,2 a 80	8,92
80,2 a 100	8,15
100,2 a 119	5,28
120 (h2)	0,79
120,2 a 150	4,32
150,2 a 179	4,88
180 (h3)	6,85
180,2 a 239	6,35
240 (h4)	0,30
240,2 a 299	2,69
300 (h5)	2,19
300,2 a 359	2,84
360 (h6)	0,18
360,2 a 419	1,32
420 (h7)	0,54
420,2 a 479	1,19
480 (h8)	0,05
480,2 a 539	0,87
540 (h9)	0,34
540,2 a 599	0,87
600 (h10)	0,06
600,2 a 659	0,59
660 (h11)	0,12
660,2 a 719	0,56
720 (h12)	0,02
720,2 a 779	0,43
780 (h13)	0,07

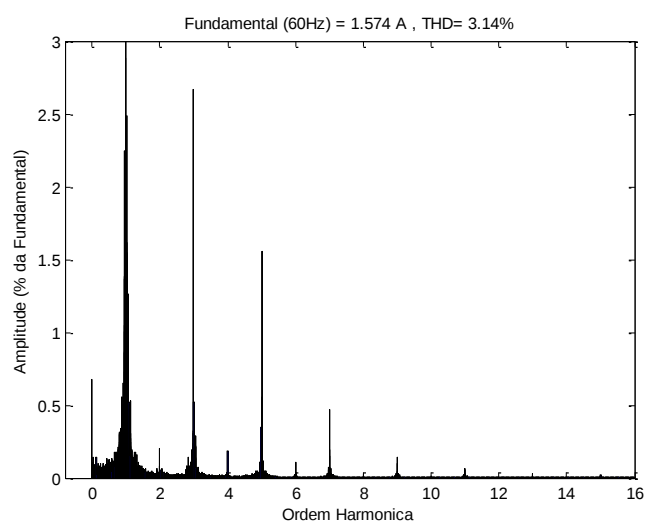
Figura 3.15 – Espectros dos harmônicos de corrente no FEA – FEA (IC) : (a) i_{rFEA} , (b) i_{sFEA}^* , (c) i_{tFEA} .



(a)



(b)



(c)

Amplitude média entre fases: 1.566 A

Taxa de distorção harmônica média
das três fases: 2,63%

Hz	(%)
0 (DC)	0,55
0,2 a 19	0,52
19,2 a 29	0,40
29,2 a 39	0,59
39,2 a 49	1,03
49,2 a 54	1,55
55	0,39
56	0,95
57	1,20
58	1,36
59	1,75
60 (h1)	100,00
60,2 a 70	8,00
70,2 a 80	0,84
80,2 a 100	0,47
100,2 a 119	0,31
120 (h2)	0,25
120,2 a 150	0,29
150,2 a 179	0,74
180 (h3)	1,96
180,2 a 239	0,95
240 (h4)	0,12
240,2 a 299	0,34
300 (h5)	1,54
300,2 a 359	0,72
360 (h6)	0,07
360,2 a 419	0,17
420 (h7)	0,37
420,2 a 479	0,28
480 (h8)	0,03
480,2 a 539	0,09
540 (h9)	0,10
540,2 a 599	0,12
600 (h10)	0,01
600,2 a 659	0,04
660 (h11)	0,04
660,2 a 719	0,08
720 (h12)	0,01
720,2 a 779	0,02
780 (h13)	0,01

Figura 3.16– Espectros dos harmônicos de corrente no FEA – FEA (FC) : (a) i_{FEA} , (b) i_{SFEA}^* , (c) i_{tFEA} .

As tabelas lateralmente às Figuras 3.15 e 3.16 objetivam mostrar, através do agrupamento de frequências por faixa (ex. 181 a 239), a contribuição total de inter-harmônicos da respectiva faixa, em coerência com o que é visualizado no espectro.

3.4.5. Avaliação das Medições de Corrente no FEA

Apesar dos resultados apresentados na Figura 3.15 e na Figura 3.16 terem mostrado somente até a 16^a harmônica, objetivando a melhor visualização das harmônicas e inter-harmônicas de menor ordem que foram as frequências significativas, para esta avaliação foram considerados os espectros das harmônicas medidos até a 25^a harmônica. Os valores obtidos de THD variaram de 2,29% (FEA (FC)) a 9,74% (FEA (IC)) para as duas situações operacionais avaliadas.

Assim como na avaliação das medições de tensão, os espectros das harmônicas de corrente, sobretudo na situação de FEA (IC), confirmam as elevadas contribuições inter-harmônicas, principalmente até a 5^a ordem. As sub-harmônicas se destacam visualmente, atingindo valores muito significativos, por vezes superiores a 4%. O grande desequilíbrio das correntes nas três fases nesta condição operacional é outra característica importante constatada na Figura 3.13.

3.4.6. Medições de Corrente no Sistema de Filtragem Passiva

As Figuras 3.17 e 3.18 apresentam a corrente no Sistema de Filtragem Passiva, no início (IC) e no final (FC) da corrida. Como já dito, considera-se neste trabalho, na visualização de grandezas no tempo, o intervalo de 2,5 a 2,65 s da medição. Já as Figuras 3.19 e 3.20 mostram os respectivos espectros harmônicos destas correntes.

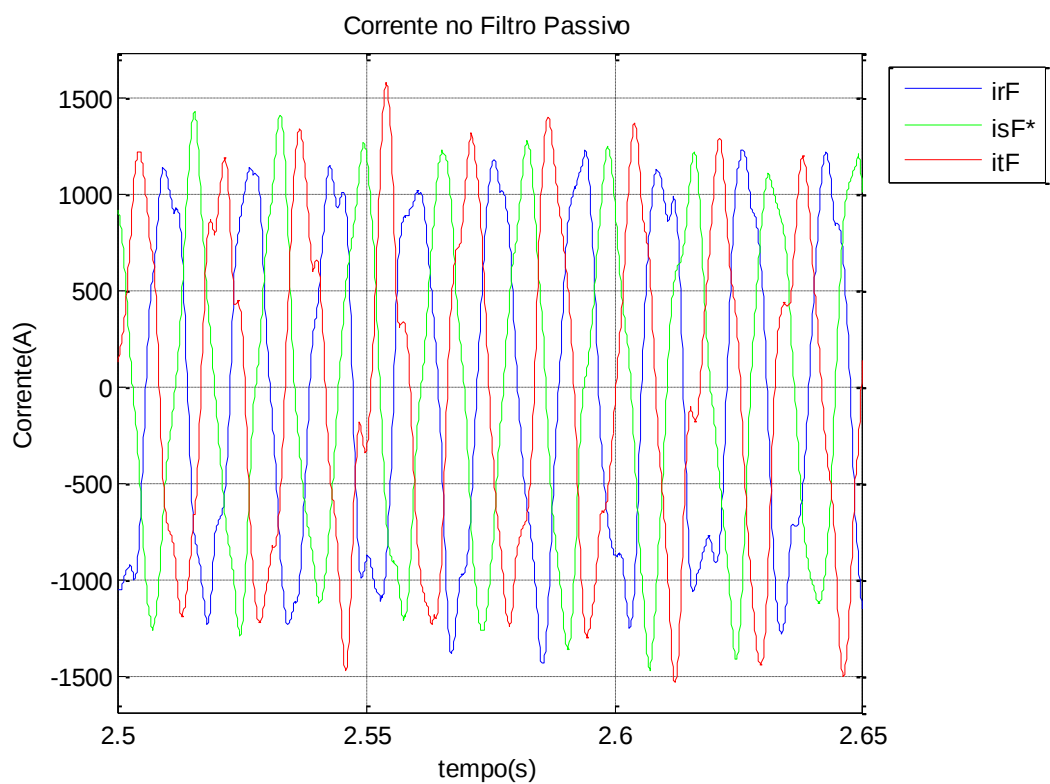


Figura 3.17 – Corrente no sistema de filtragem passiva - FEA (IC).

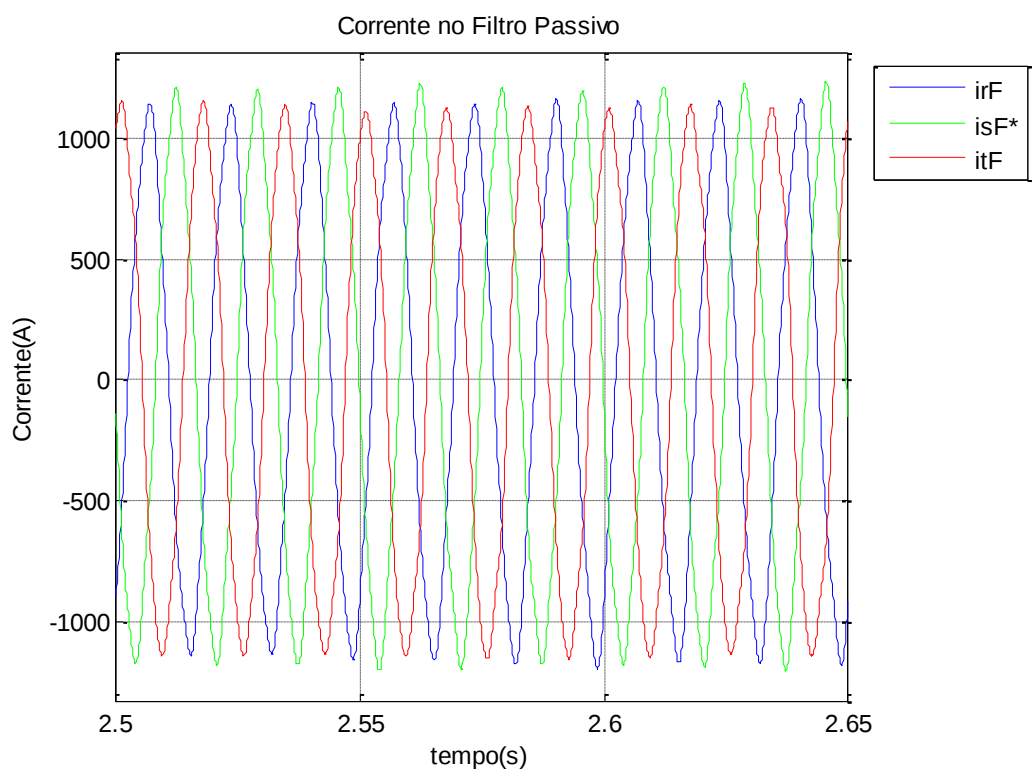
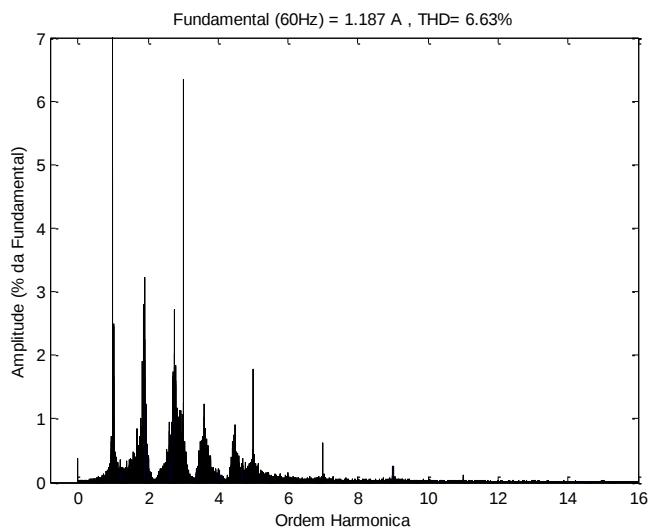
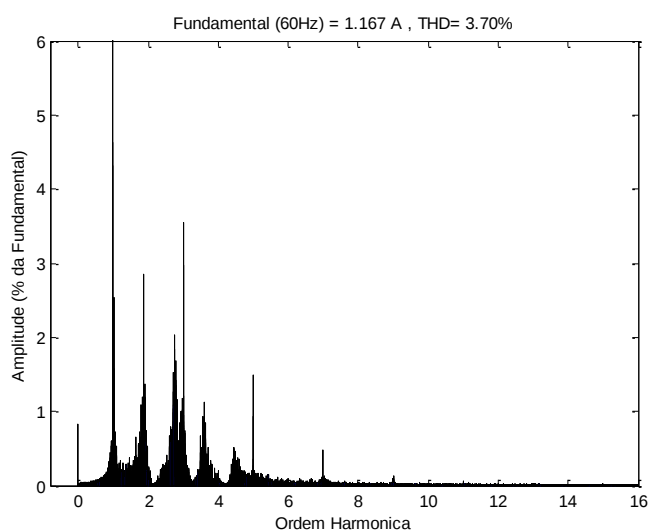


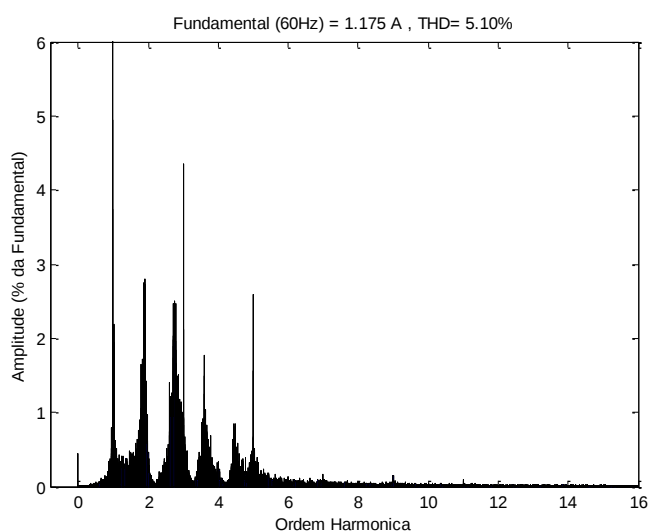
Figura 3.18 – Corrente no sistema de filtragem passiva - FEA (FC).



(a)



(b)

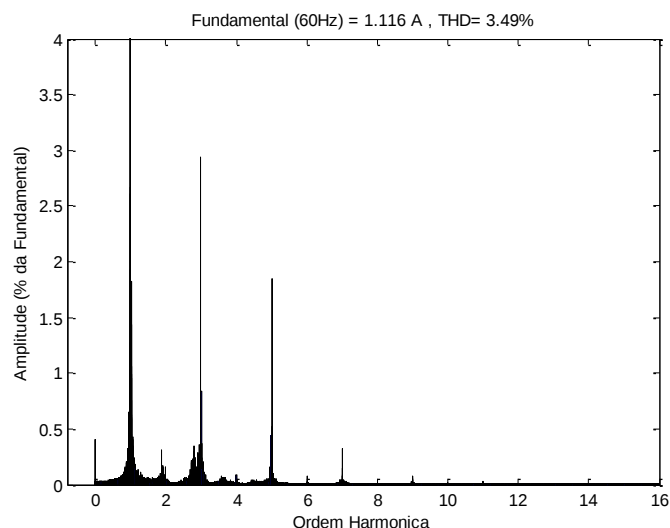


(c)

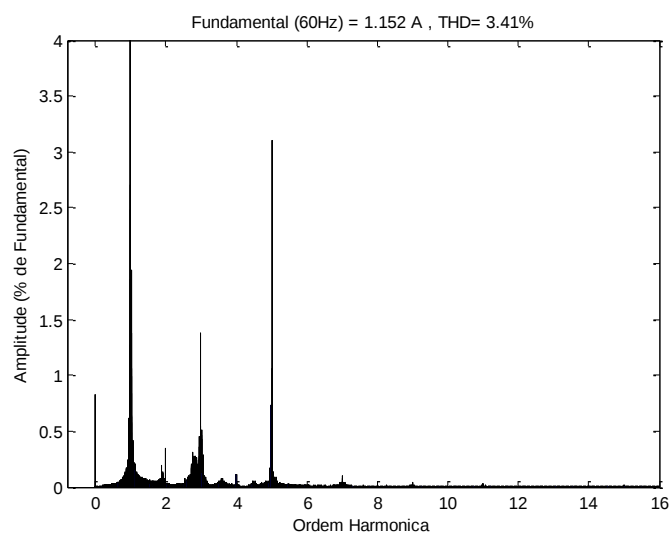
Amplitude média entre fases: 1176,3 A
 Taxa de distorção harmônica média das
 três fases: 5,14%

Hz	(%)
0 (DC)	0,55
0,2 a 19	0,24%
19,2 a 29	0,24%
29,2 a 39	0,34%
39,2 a 49	0,59%
49,2 a 54	0,73%
55	0,26%
56	0,29%
57	0,46%
58	0,58%
59	1,19%
60 (h1)	100,00%
60,2 a 70	6,42%
70,2 a 80	1,29%
80,2 a 100	2,30%
100,2 a 119	8,04%
120 (h2)	0,31%
120,2 a 150	1,47%
150,2 a 179	9,55%
180 (h3)	4,74%
180,2 a 239	5,94%
240 (h4)	0,24%
240,2 a 299	3,15%
300 (h5)	1,77%
300,2 a 359	2,18%
360 (h6)	0,11%
360,2 a 419	0,71%
420 (h7)	0,43%
420,2 a 479	0,60%
480 (h8)	0,05%
480,2 a 539	0,40%
540 (h9)	0,17%
540,2 a 599	0,40%
600 (h10)	0,02%
600,2 a 659	0,26%
660 (h11)	0,07%
660,2 a 719	0,26%
720 (h12)	0,02%
720,2 a 779	0,19%
780 (h13)	0,03%

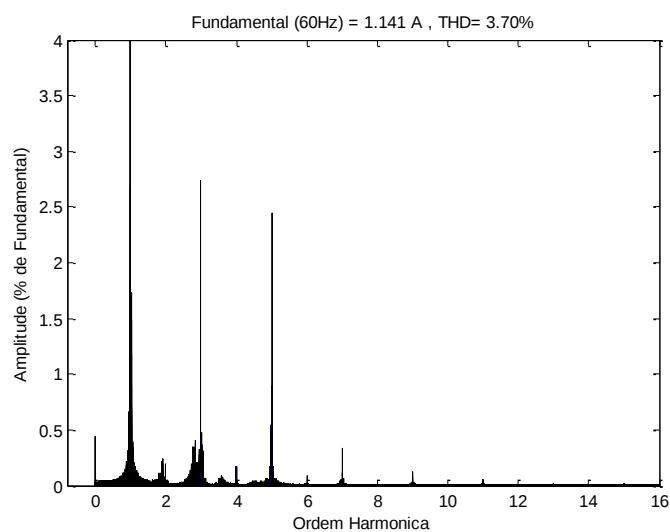
Figura 3.19 – Espectros das harmônicas de corrente do filtro passivo - FEA (IC): (a) i_{rF} , (b) i_{sF}^* , (c) i_{tF} .



(a)



(b)



(c)

Amplitude média entre fases: 1136,3 A
Taxa de distorção harmônica média das
três fases: 3,53%

Hz	(%)
0 (DC)	0,56
0,2 a 19	0,25
19,2 a 29	0,23
29,2 a 39	0,31
39,2 a 49	0,50
49,2 a 54	0,68
55	0,22
56	0,26
57	0,36
58	0,54
59	1,03
60 (h1)	100,00
60,2 a 70	7,37
70,2 a 80	0,55
80,2 a 100	0,41
100,2 a 119	0,66
120 (h2)	0,23
120,2 a 150	0,24
150,2 a 179	1,64
180 (h3)	2,35
180,2 a 239	1,13
240 (h4)	0,13
240,2 a 299	0,51
300 (h5)	2,47
300,2 a 359	1,14
360 (h6)	0,06
360,2 a 419	0,18
420 (h7)	0,25
420,2 a 479	0,22
480 (h8)	0,03
480,2 a 539	0,10
540 (h9)	0,08
540,2 a 599	0,11
600 (h10)	0,01
600,2 a 659	0,05
660 (h11)	0,04
660,2 a 719	0,07
720 (h12)	0,00
720,2 a 779	0,03
780 (h13)	0,01

Figura 3.20 – Espectros das harmônicas de corrente do filtro passivo - FEA (FC): (a) i_{rF} , (b) i_{sF}^* , (c) i_{tF} .

As tabelas lateralmente às Figuras 3.19 e 3.20 objetivam mostrar, através do agrupamento de frequências por faixa (ex. 151 a 179), a contribuição total de inter-harmônicos da respectiva faixa, em coerência com o que é visualizado no espectro.

3.4.7. Avaliação das Medições de Corrente no Sistema de Filtragem Passiva

Apesar dos resultados apresentados na Figura 3.19 e Figura 3.20 terem mostrado somente até a 16ª harmônica, objetivando a melhor visualização dos harmônicos e inter-harmônicos de menor ordem, que foram as frequências significativas, para esta avaliação foram considerados os espectros dos harmônicos medidos até a 25ª harmônica. Os valores obtidos de THD variaram de 3,41% (FEA (FC)) a 6,63% (FEA (IC)) para as duas situações operacionais avaliadas.

Os valores mais elevados de distorção harmônica de corrente, durante a situação operacional FEA (FC), ocorreram nas frequências correspondentes a 3ª e 5ª harmônicas, como era esperado, uma vez que são frequências de sintonia do banco. Já na situação operacional FEA (IC) pode ser verificada uma maior quantidade de inter-harmônicos, evidenciando desta forma a influência do comportamento do Forno Elétrico no sistema de filtragem passiva.

Os efeitos de sobrecarga, e consequente perda de vida útil de filtros harmônicos passivos, ocorrem em função do fato de que a magnitude das frequências inter-harmônicas não é, em geral, prevista no dimensionamento desses equipamentos. Outro efeito associado à presença de inter-harmônicas em circuitos com filtros harmônicos passivos sintonizados diz respeito à exposição do equipamento a uma maior probabilidade de ocorrência de ressonância paralela, podendo esta danificar tanto o filtro quanto os demais equipamentos da instalação [18].

3.4.8. Medições de Corrente no Transformador T30

As Figuras 3.21 e 3.22 apresentam a corrente no Transformador T30 (Ponto de Acoplamento Comum - PAC) no início (IC) e no final (FC) da corrida. Como já dito, considera-se neste trabalho, na visualização de grandezas no tempo, o

intervalo de 2,5 a 2,65 s da medição. Já as Figuras 3.23 e 3.24 mostram os respectivos espectros harmônicos destas correntes.

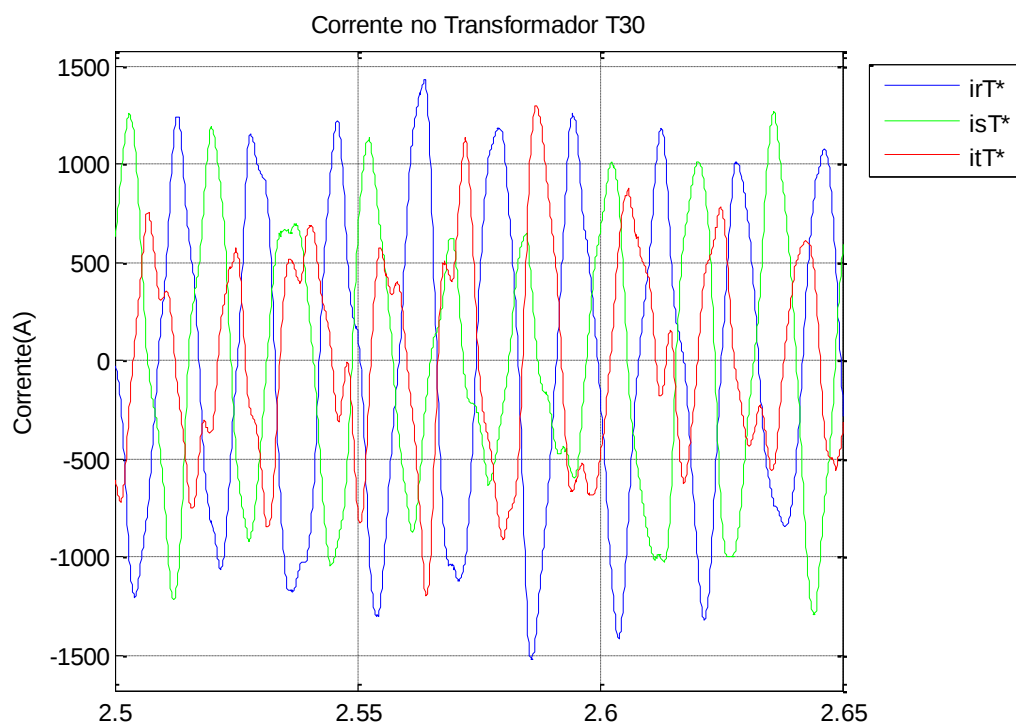


Figura 3.21 – Corrente no Transformador T30 (PAC) – FEA (IC).

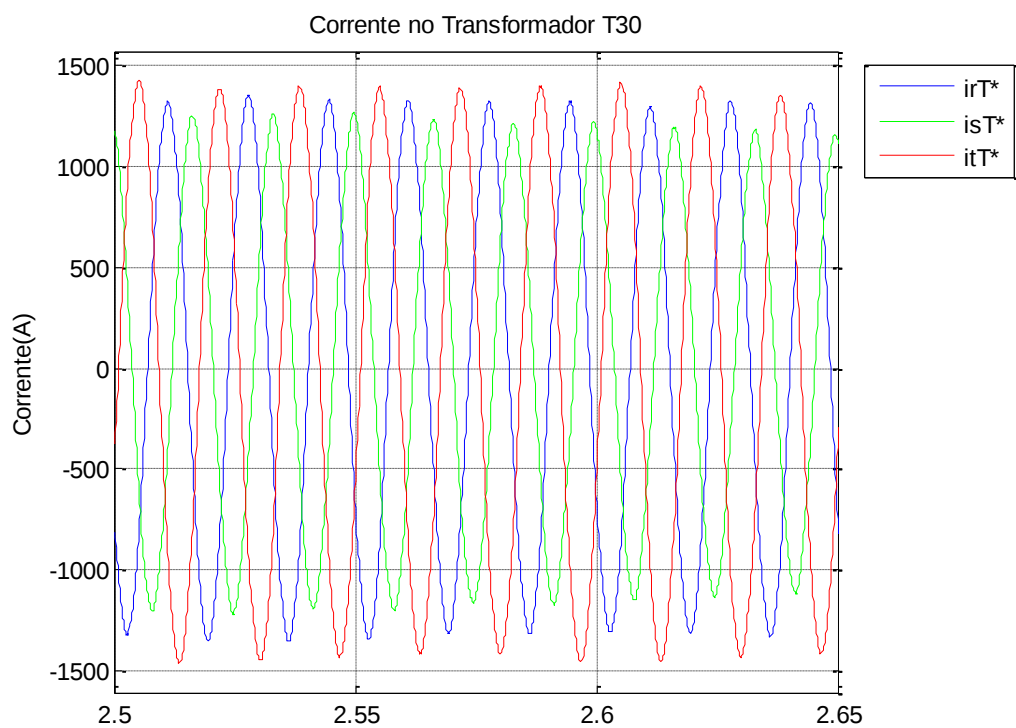
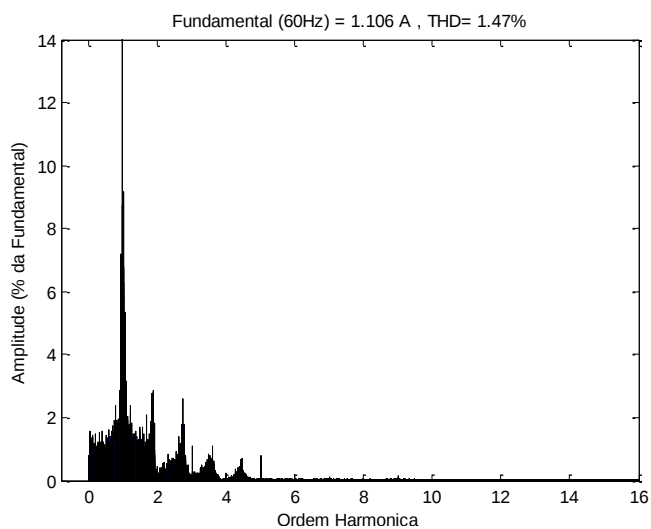
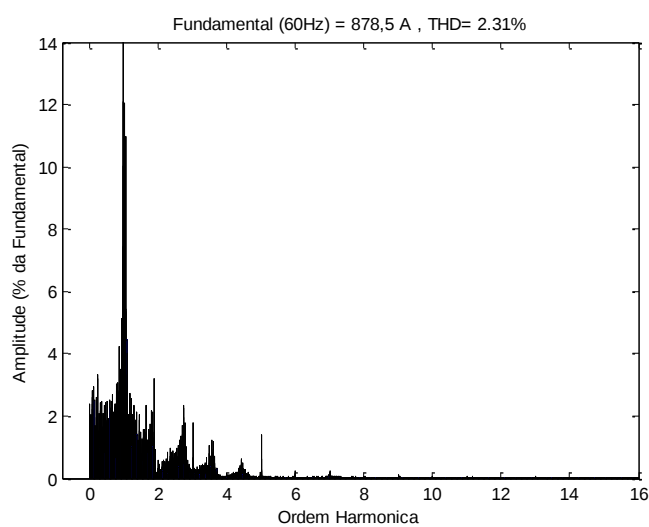


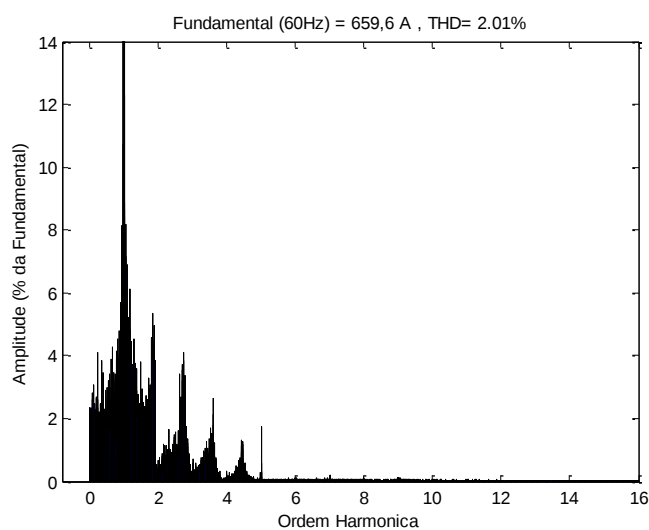
Figura 3.22 – Corrente no Transformador T30 (PAC) – FEA (FC).



(a)



(b)

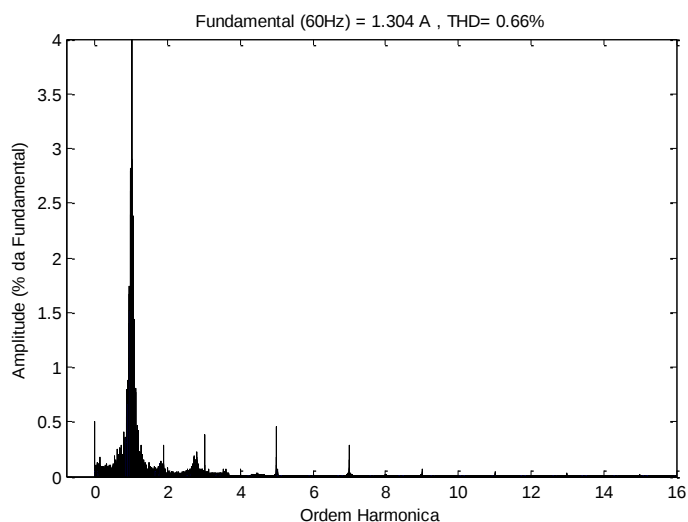


(c)

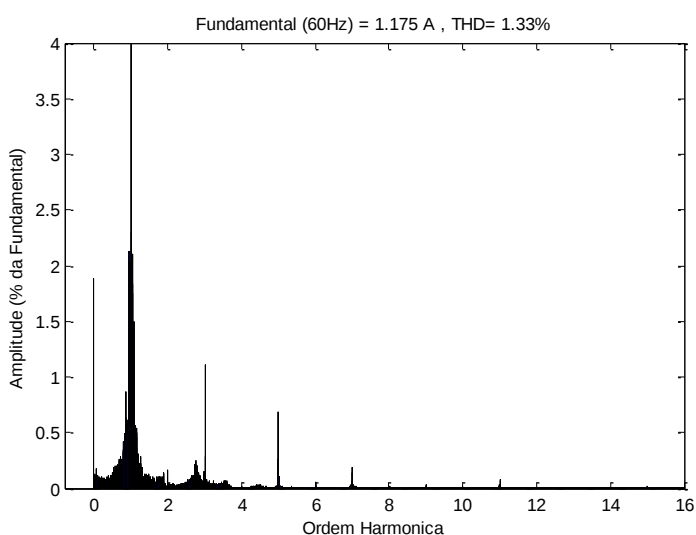
Amplitude média entre fases: 881,4 A
 Taxa de distorção harmônica média
 das três fases: 1,93%

Hz	(%)
0 (DC)	1,64
0,2 a 19	12,54%
19,2 a 29	9,06%
29,2 a 39	9,61%
39,2 a 49	11,70%
49,2 a 54	10,32%
55	1,94%
56	2,00%
57	3,27%
58	4,88%
59	6,69%
60 (h1)	100,00%
60,2 a 70	31,04%
70,2 a 80	11,77%
80,2 a 100	12,22%
100,2 a 119	13,00%
120 (h2)	0,48%
120,2 a 150	5,57%
150,2 a 179	11,77%
180 (h3)	1,19%
180,2 a 239	6,44%
240 (h4)	0,18%
240,2 a 299	3,32%
300 (h5)	1,30%
300,2 a 359	0,80%
360 (h6)	0,17%
360,2 a 419	0,55%
420 (h7)	0,17%
420,2 a 479	0,54%
480 (h8)	0,07%
480,2 a 539	0,42%
540 (h9)	0,14%
540,2 a 599	0,43%
600 (h10)	0,05%
600,2 a 659	0,31%
660 (h11)	0,04%
660,2 a 719	0,29%
720 (h12)	0,02%
720,2 a 779	0,24%
780 (h13)	0,04%

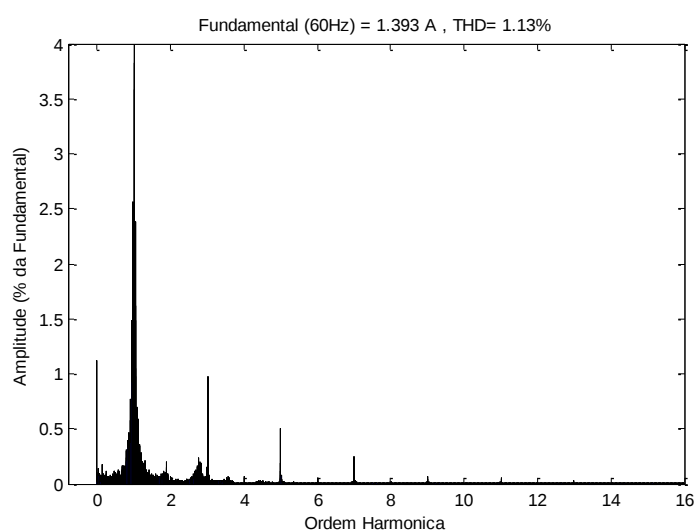
Figura 3.23 – Espectros das harmônicas de corrente no transf. T30 - FEA (IC): (a) i_{rT}^* , (b) i_{sT}^* , (c) i_{tT}^* .



(a)



(b)



(c)

Amplitude média entre fases:

1290,7 A

Taxa de distorção harmônica média
das três fases: 1,04%

Hz	(%)
0 (DC)	1,17
0,2 a 19	0,61
19,2 a 29	0,43
29,2 a 39	0,68
39,2 a 49	1,20
49,2 a 54	1,90
55	0,51
56	1,19
57	1,57
58	1,76
59	1,96
60 (h1)	100,00
60,2 a 70	7,94
70,2 a 80	1,05
80,2 a 100	0,61
100,2 a 119	0,60
120 (h2)	0,10
120,2 a 150	0,28
150,2 a 179	0,91
180 (h3)	0,82
180,2 a 239	0,45
240 (h4)	0,05
240,2 a 299	0,19
300 (h5)	0,55
300,2 a 359	0,26
360 (h6)	0,04
360,2 a 419	0,09
420 (h7)	0,24
420,2 a 479	0,18
480 (h8)	0,02
480,2 a 539	0,05
540 (h9)	0,05
540,2 a 599	0,06
600 (h10)	0,01
600,2 a 659	0,03
660 (h11)	0,04
660,2 a 719	0,07
720 (h12)	0,00
720,2 a 779	0,01
780 (h13)	0,01

Figura 3.24 – Espectros das harmônicas de corrente no transf. T30 - FEA (FC): (a) i_{iT}^* , (b) i_{sT}^* , (c) i_{tT}^* .

As tabelas lateralmente às Figuras 3.23 e 3.24 objetivam mostrar, através do agrupamento de frequências por faixa (ex. 151 a 179), a contribuição total de inter-harmônicos da respectiva faixa, em coerência com o que é visualizado no espectro.

3.4.9. Avaliação das Medições de Corrente no Transformador T30

Apesar dos resultados apresentados na Figura 3.23 e Figura 3.24 terem mostrado somente até a 16^a harmônica, objetivando a melhor visualização das harmônicos e inter-harmônicos de menor ordem, que foram as frequências significativas, para esta avaliação foram considerados os espectros dos harmônicos medidos até a 25^a harmônica. Os valores obtidos de THD variaram de 0,66% (FEA (FC)) a 2,31% (FEA (IC)) para as duas situações operacionais avaliadas. Conforme a IEEE 519, o limite da distorção harmônica total de corrente (THD_i) é 5%, logo os valores obtidos de THD referentes à corrente no PAC são inferiores e atendem aos limites da IEEE 519 (lembrando que estes valores de corrente no transformador T30 são obtidos a partir do cálculo da soma das correntes no FEA e no sistema de filtragem passiva, Tabela 3.4).

Além disso, todos os valores obtidos nas distorções harmônicas individuais de corrente estão abaixo do limite de 4% definido na norma, que é estipulado para as harmônicas de ordem inferior a 11^a. A obtenção de valores de distorção harmônica de corrente dentro dos limites neste ponto do sistema mostram que a correção através dos filtros passivos é satisfatória sob este ponto de vista.

Não diferentemente das avaliações anteriores, também a corrente no transformador T30, mostra claramente a grande discrepância entre os comportamentos nas condições de operação FEA (IC) e FEA (FC), conforme pode ser visto nas Figuras 3.21 e 3.22. Além da distorção harmônica ser significativamente mais alta no início da corrida do forno elétrico, a interferência de inter-harmônicas também é bem maior, com grande destaque neste caso para as sub-harmônicas, recebendo influência direta da corrente do FEA.

3.4.10. Análise da Amplificação Harmônica de Corrente

A amplificação harmônica pode ser analisada a partir da comparação entre os valores das correntes no FEA e no PAC, obtidos para as mesmas frequências ou faixas de frequência. As tabelas contidas nas Figuras 3.15 e 3.23, referentes às contribuições de harmônicos de corrente no FEA (I_{FEA}) e no PAC (I_T) respectivamente, ambas na condição de início de corrida (IC), são as bases para compor as Tabelas 3.10 e 3.11.

Para cada frequência ou faixa de frequência apresentada, a respectiva corrente é obtida conforme o percentual de harmônico em relação à amplitude da corrente média entre as fases, cujos valores são mostrados nas Figuras 3.15 e 3.23. As frequências destacadas na Tabela 3.11 são aquelas nas quais ocorre a amplificação harmônica, tendo em vista que a corrente no PAC (transformador T30) é aumentada em relação à corrente no FEA. Como era de se esperar, nas frequências de sintonia do filtro passivo, a corrente no PAC é diminuída pela ação do próprio filtro. A amplificação harmônica ocorre para todas as frequências e faixas de frequência até 239 Hz, exceto nas frequências de sintonia conforme foi dito. A amplificação harmônica é notadamente grande nas faixas de 81 a 100 Hz, 101 a 119 Hz e 151 a 179 Hz.

Tabela 3.10 – Corrente no FEA p/ Análise da Amplificação Harmônica

Amplitude média entre fases: 973 A

Taxa de distorção harmônica média das três fases: 7,36%

Hz	(%)	I_{FEA} (A)
0,2 a 19	10,85	105,55
19,2 a 29	7,80	75,91
29,2 a 39	8,17	79,49
39,2 a 49	9,82	95,54
49,2 a 54	8,58	83,48
55	1,43	13,88
56	1,66	16,18
57	2,34	22,77
58	3,77	36,71
59	5,54	53,90
60 (h1)	100,00	973,00
60,2 a 70	27,40	266,59
70,2 a 80	8,92	86,75
80,2 a 100	8,15	79,30
100,2 a 119	5,28	51,41
120 (h2)	0,79	7,72
120,2 a 150	4,32	42,01
150,2 a 179	4,88	47,51
180 (h3)	6,85	66,68
180,2 a 239	6,35	61,82
240 (h4)	0,30	2,89
240,2 a 299	2,69	26,16
300 (h5)	2,19	21,34
300,2 a 359	2,84	27,66
360 (h6)	0,18	1,75
360,2 a 419	1,32	12,82
420 (h7)	0,54	5,29
420,2 a 479	1,19	11,54
480 (h8)	0,05	0,52
480,2 a 539	0,87	8,42
540 (h9)	0,34	3,31
540,2 a 599	0,87	8,48
600 (h10)	0,06	0,55
600,2 a 659	0,59	5,70
660 (h11)	0,12	1,20
660,2 a 719	0,56	5,41
720 (h12)	0,02	0,19
720,2 a 779	0,43	4,20
780 (h13)	0,07	0,65

Tabela 3.11 – Corrente no PAC p/ Análise da Amplificação Harmônica

Amplitude média entre fases: 881,4 A

Taxa de distorção harmônica média das três fases: 1,93%

Hz	(%)	I_T (A)
0,2 a 19	12,54%	110,52
19,2 a 29	9,06%	79,85
29,2 a 39	9,61%	84,74
39,2 a 49	11,70%	103,13
49,2 a 54	10,32%	90,97
55	1,94%	17,10
56	2,00%	17,63
57	3,27%	28,79
58	4,88%	42,98
59	6,69%	59,00
60 (h1)	100,00%	881,40
60,2 a 70	31,04%	273,63
70,2 a 80	11,77%	103,77
80,2 a 100	12,22%	107,73
100,2 a 119	13,00%	114,57
120 (h2)	0,48%	4,20
120,2 a 150	5,57%	49,09
150,2 a 179	11,77%	103,71
180 (h3)	1,19%	10,52
180,2 a 239	6,44%	56,80
240 (h4)	0,18%	1,56
240,2 a 299	3,32%	29,28
300 (h5)	1,30%	11,43
300,2 a 359	0,80%	7,06
360 (h6)	0,17%	1,47
360,2 a 419	0,55%	4,80
420 (h7)	0,17%	1,53
420,2 a 479	0,54%	4,79
480 (h8)	0,07%	0,59
480,2 a 539	0,42%	3,74
540 (h9)	0,14%	1,20
540,2 a 599	0,43%	3,75
600 (h10)	0,05%	0,41
600,2 a 659	0,31%	2,72
660 (h11)	0,04%	0,32
660,2 a 719	0,29%	2,52
720 (h12)	0,02%	0,18
720,2 a 779	0,24%	2,08
780 (h13)	0,04%	0,32

3.5. CONCLUSÕES

Foi apresentado neste capítulo o sistema de distribuição de energia elétrica do Forno Elétrico a Arco em estudo. Medições oscilográficas de tensão e corrente foram realizadas e aqui apresentadas para duas diferentes situações de operação do FEA, nas condições de início da corrida (FEA (IC)) e próximo ao final da corrida (FEA (FC)). A partir dos resultados de medição obtidos foram realizadas avaliações referenciadas a procedimentos e recomendações normativas nacionais e internacionais.

Com as medições e a compilação dos seus resultados foi também possível realizar uma avaliação de desempenho do sistema de filtragem passiva para compensação harmônica, utilizada pelo sistema em estudo. Os níveis de distorção harmônica total e individual da tensão ficaram bem abaixo dos limites impostos pelo procedimento normativo Nacional (PRODIST) que de fato possuem força de lei. O resultado das medições no PAC, que verifica o desempenho do sistema de filtragem passiva na abrangência do sistema do Forno Elétrico em questão, ficou dentro dos limites para as distorções harmônicas, total e individual, de corrente. No entanto, deve-se ressaltar que, se fossem considerados os inter-harmônicos no cálculo da distorção total de harmônicos, sejam de tensão ou corrente, os valores seriam bem superiores aos que foram encontrados diretamente na simulação pelo Matlab/Simulink®, pois na definição da distorção total são considerados apenas os harmônicos de múltiplos inteiros ($h_2, h_3, h_4, h_5, h_6, \dots$).

Considera-se que o esforço de filtragem passiva melhora significativamente a forma da corrente, mas o resultado pode ser melhorado empregando outras técnicas, principalmente tendo-se em vista influências externas que possam causar sobrecarga do sistema de filtragem, e também devido ao problema de ressonância que é característico nos sistemas de filtragem passiva, e será abordado no capítulo que segue. Também o problema da amplificação harmônica de corrente para algumas faixas de frequência, sobretudo nas frequências inter-harmônicas, é uma deficiência do sistema de filtragem passiva aplicada. Presume-se que a utilização de filtragem ativa, formando um sistema híbrido de filtragem, permitirá um melhor desempenho do sistema sob análise, sendo este o próximo passo do estudo.

As medições realizadas serão importantes no transcorrer deste trabalho e permitirão o desenvolvimento de modelos do sistema elétrico em estudo, capazes de propiciar a avaliação de melhorias no mesmo.

4. MODELAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO DO FEA

Neste capítulo será apresentado o desenvolvimento de um modelo computacional que foi implementado para permitir a simulação do sistema elétrico de potência em estudo. Este modelamento objetiva principalmente o aprofundamento dos estudos no sistema elétrico do FEA, para que possa ser possível retratar com grande fidelidade o sistema real tendo como base as medições e resultados que foram apresentados no capítulo anterior e, por conseguinte, o modelo seja um elemento para avançar nos estudos com alterações que permitam caracterizar bem aquilo que é desejado.

4.1. IMPLEMENTAÇÃO E AJUSTES DO MODELO

O modelo do sistema elétrico em estudo foi implementado com base em levantamentos diversos, realizados na documentação do sistema de distribuição de energia elétrica do Forno Elétrico, de suas principais características elétricas, como as impedâncias que compõem o sistema, características técnicas do sistema de filtragem passiva, utilização das medições realizadas no sistema elétrico para a modelagem da carga do FEA, dentre outras considerações. O modelo foi desenvolvido na plataforma Matlab/Simulink®, utilizando uma biblioteca específica para sistemas de potência (SymPowerSystems - PSB).

O PSB emprega análise por meio de variáveis de estado para modelagem e solução de equações em sistemas elétricos e eletromecânicos, e é formado por um conjunto de bibliotecas contendo diversos componentes de sistemas de potência para ser utilizado no próprio Simulink. O conjunto de bibliotecas do PSB é bastante completo, fornecendo modelos de diversos componentes de rede, tais como elementos RLC concentrados, cargas não lineares, diversos modelos de máquinas elétricas, componentes de eletrônica de potência, fontes controladas, etc [19].

O diagrama unifilar do sistema elétrico de potência com sua respectiva divisão em blocos, mostrado na Figura 4.1, gerou o sistema modelado na plataforma

Matlab/Simulink®, apresentado na Figura 4.2. Os blocos indicados com os números de 1 a 3 na Figura 4.1 são modelados com as seguintes características:

- Bloco 1: É a fonte do sistema no PAC, obtida através do transformador do sistema (138 / 33 kV – 73 MVA) que é modelado a partir do secundário como uma fonte de tensão que produz apenas componente de sequência positiva (60 Hz), juntamente com a impedância Z_p , referente à composição de impedâncias obtida neste ponto do sistema.
- Bloco 2: O Forno Elétrico a Arco percebido no ponto de medição na subestação principal é modelado como uma fonte de corrente controlada, sendo portanto composto de toda linha de transmissão e reator série, além do próprio FEA com seu transformador dedicado.
- Bloco 3: O sistema de filtragem passiva foi modelado a partir dos seus respectivos parâmetros, indutores e capacitores, obtidos nos desenhos técnicos da siderúrgica.

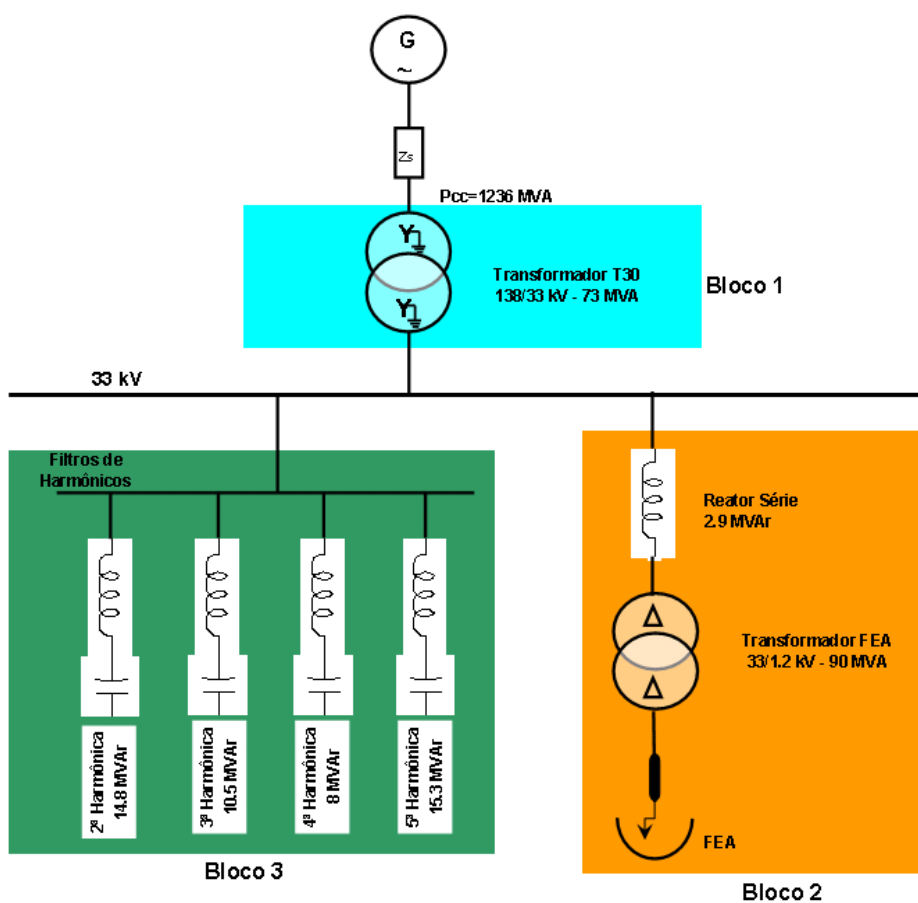


Figura 4.1 – Diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico em análise.

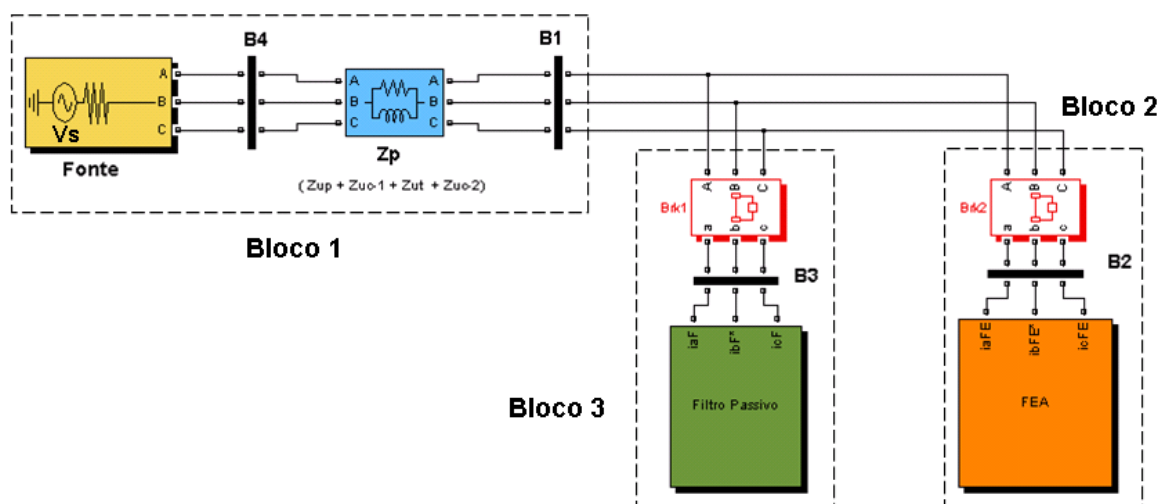


Figura 4.2 – Sistema elétrico no MATLAB/Simulink®.

A seguir será detalhado como cada um dos blocos do sistema elétrico foi representado no ambiente Matlab/Simulink®.

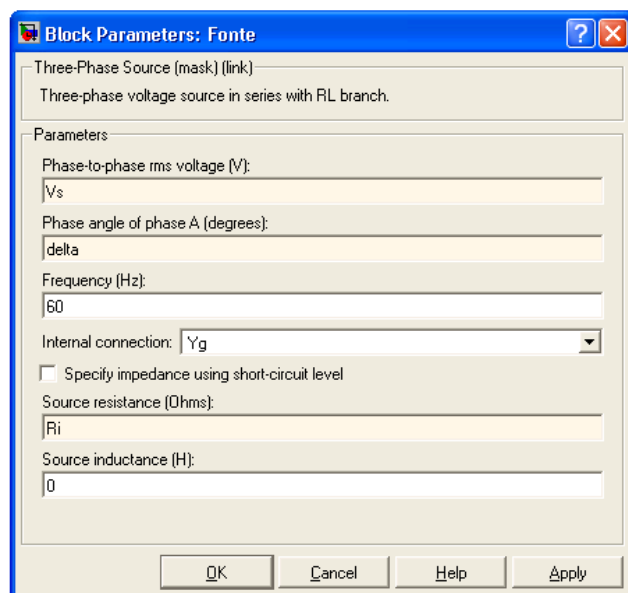
4.1.1. Bloco 1 - Fonte de alimentação do sistema elétrico

O bloco 1 na Figura 4.2 representa a fonte de potência do sistema elétrico do FEA, utilizando o bloco “Three-Phase Source”. A Figura 4.3 ilustra a janela de configuração do bloco, com os respectivos parâmetros. Para o parâmetro resistência da fonte foi colocado um valor insignificante, de 10^{-12} ohms, somente o necessário para não acarretar erro ao executar a simulação do modelo. A tensão específica no secundário do transformador não foi medida, impedindo assim de definir de forma imediata os seus valores de amplitude e ângulo de potência. Logo, para se obter estes parâmetros da fonte, foi utilizada uma rotina no Matlab para este cálculo, cujo nome é *Calcula_TensaoFonte_Impedancia_rn.m* apresentada no Apêndice A. Esta rotina encontra o valor eficaz da tensão de linha do secundário do transformador (V_s) e o ângulo de potência (delta - δ) de forma a minimizar o erro relativo entre a tensão no barramento da subestação do modelo e a tensão do sistema elétrico real do FEA, a partir dos valores medidos.

A rotina *Calcula_TensaoFonte_Impedancia_rn.m* utiliza valores de amplitude e ângulo da tensão de fase e da corrente no transformador T30 que são obtidos através do modelo de simulação *DefasagemAngular_RMS_rn*, que também é apresentado no Apêndice A. A simulação *DefasagemAngular_RMS_rn* obtém a

amplitude e ângulo da tensão de fase (V_{rn}) a partir dos valores das tensões de linha medidas. A amplitude e ângulo da corrente no transformador T30 (I_r) são obtidos pelo cálculo da soma das correntes no FEA e nos Filtros. As amplitudes e ângulos destas variáveis são encontrados através do bloco “Discrete Fourier” do Matlab/Simulink®, sendo os valores aplicados aqueles que são atingidos ao final dos 5 s do ciclo de simulação.

A rotina *Calcula_TensaoFonte_Impedancia_rn.m* utiliza os valores de amplitude e ângulo das variáveis “ V_{rn} ” e “ I_r ” para se chegar na tensão do secundário do transformador T30 que será a tensão da fonte de alimentação do modelo. Contando também com o valor da impedância no PAC, obtida conforme cálculo mostrado na Figura 4.6 (variável Z_{tot}), que ao ser multiplicado pela corrente no transformador T30 (obtida pela corrente I_r), gera a queda de tensão no trecho entre o PAC e o secundário do transformador T30. Desta forma, como se tem a tensão que foi medida no PAC, quando se soma a esta queda de tensão, é obtida na rotina o valor da tensão no secundário do transformador, composta de forma separada pelo valor eficaz “ V_s ” e pelo ângulo “delta - δ ”.



(a)

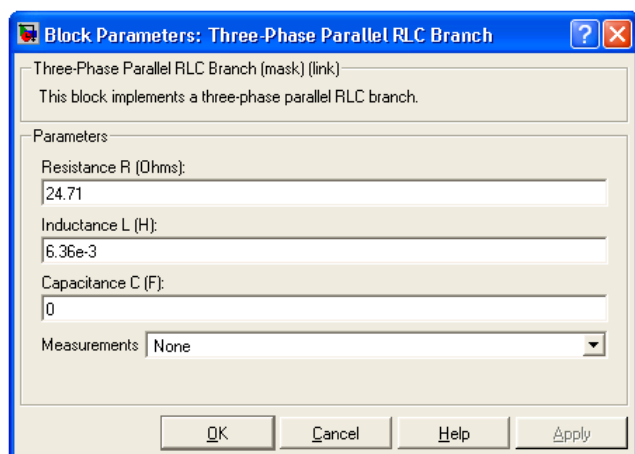
$V_s = 31.488 \text{ V}$
$\delta = 162^\circ$
$R_i = 10^{-12} \Omega$

(b)

Figura 4.3 – Janela de configuração do bloco “Three-Phase Source” (a) e parâmetros (b).

A Figura 4.4 mostra a janela de inserção dos dados através do bloco “Three-Phase Parallel RLC Branch” para a impedância Z_p , obtida pela composição das impedâncias nos diversos trechos do sistema, desde a impedância no ponto de

referência de curto-circuito na entrada de 138 kV, passando pelos trechos de cabos e impedância do transformador T30.



(a)

$$Z_p = 24,71 + j2,4 \, \Omega$$

(b)

Figura 4.4 – Janela de configuração do bloco “Three-Phase Parallel RLC Branch” (a) e impedância no PAC (b).

Os cálculos que levam a obtenção da impedância Z_p são mostrados na Figura 4.6 e Figura 4.7. A Figura 4.6 ilustra o cálculo da corrente de curto-circuito I_{cc} no PAC, determinada a partir da impedância do sistema elétrico informada pela concessionária de energia elétrica no ponto de entrega em 138kV, bem como outros dados disponíveis nos arquivos da siderúrgica. Neste cálculo, para obtenção da corrente I_{cc} , antes é determinada a impedância Z_{utot} , que é a impedância total do sistema no PAC. O processo de cálculo de curto-circuito utilizado neste trabalho é de fácil aplicação no desenvolvimento de um projeto industrial e foi realizado conforme modelo apresentado em [20], estando o resultado obtido coerente com o valor de referência existente em estudos anteriores integrantes do arquivo técnico da siderúrgica.

A impedância Z_{utot} é também nomeada de impedância Z_s na Figura 4.7, onde neste caso o objetivo é a transformação da impedância Z_s , formada pela composição série da resistência R_s com a reatância X_s , em uma impedância Z_p , formada pela composição paralelo da resistência R_p com a reatância X_p .

A transformação para uma impedância paralela Z_p foi necessária devido à ocorrência de falha na simulação quando a impedância série Z_s estava sendo utilizada, indicando que o bloco do FEA como fonte de corrente não podia ser conectado em série com a indutância da impedância Z_s . A Figura 4.5 mostra a

mensagem de erro que era gerada impedindo a simulação do modelo quando estava com a impedância Z_s . O erro ocorre porque, ao se ter o FEA modelado como fonte de corrente, ela (a fonte) necessita de pelo menos um laço fechado sem indutores. Como os filtros passivos existentes não possuem resistência de amortecimento em paralelo, o equivalente paralelo da impedância do sistema de alimentação proporciona um laço elétrico sem indutâncias no caminho.

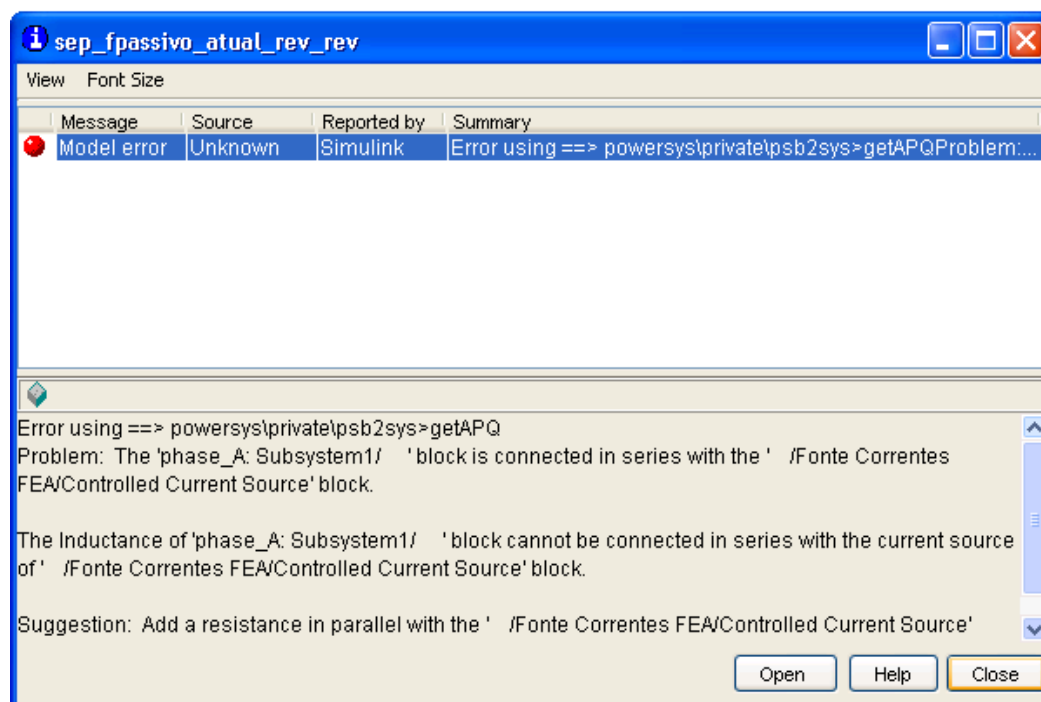


Figura 4.5 – Mensagem de erro gerada na simulação quando modelo estava com impedância Z_s .

$I_{cc} = 5,172 \text{ kA}$ $-78,3 \text{ graus}$
 $V_h = 138 \text{ kV}$
 $P_{cc} = 1236,3 \text{ MVA}$ $-78,3 \text{ graus}$
 $P_b = 100 \text{ MVA}$
 $V_b = 33 \text{ kV}$
 $I_b = 1,750 \text{ kA}$

$\Rightarrow$ Cálculo de Z_{up} :
 $Z_{up} = R_{up} + j.X_{up}$
 $Z_{up} = 0,016403 + j. 0,079206 \text{ pu}$

$\Rightarrow$ Cálculo de Z_{uc-1} :
 $R_c = \frac{R_{u-ohm} \times L_c}{N_c} \Rightarrow 0,001558$
 $R_{uc} = \frac{R_c \times P_b}{V_h^2} \Rightarrow 0,000008$
 $X_c = \frac{X_{u-ohm} \times L_c}{N_c} \Rightarrow 0,024644$
 $X_{uc} = \frac{X_c \times P_b}{V_h^2} \Rightarrow 0,000129$

$\Rightarrow$ Cálculo de Z_{ut} :
 $R_{pt} = \frac{P_{cu}}{1000 \times P_{nt}} \Rightarrow 0,002545455$
 $R_{ut} = \frac{R_{pt} \times P_b \times V_{ht}^2}{P_{nt} \times V_b^2} \Rightarrow 0,004628099$
 $Z_{ut}' = \frac{Z_{pt} \times P_b \times V_{ht}^2}{P_{nt} \times V_b^2} \Rightarrow 0,137090909$
 $X_{ut} = \sqrt{Z_{ut}'^2 - R_{ut}^2} \Rightarrow 0,137012766$
 $Z_{ut} = R_{ut} + j.X_{ut} \text{ pu} \Rightarrow Z_{ut} = 0,0046281 + j. 0,137012766 \text{ pu}$

$\Rightarrow$ Cálculo de Z_{uc-2} :
 $R_c = \frac{R_{u-ohm} \times L_c}{N_c} \Rightarrow 0,001167$
 $R_{uc} = \frac{R_c \times P_b}{V_b^2} \Rightarrow 0,000107$
 $X_c = \frac{X_{u-ohm} \times L_c}{N_c} \Rightarrow 0,018483$
 $X_{uc} = \frac{X_c \times P_b}{V_b^2} \Rightarrow 0,001697$

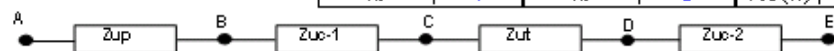
$\Rightarrow$ Cálculo de Z_{utot} :
 $Z_{utot} = (R_{up} + R_{uc-1} + R_{ut} + R_{uc-2}) + j. (X_{up} + X_{uc-1} + X_{ut} + X_{uc-2}) \text{ pu}$
 $Z_{utot} = 0,021146 + j. 0,218045 \text{ pu}$

$\Rightarrow$ Cálculo da Corrente de curto-circuito trifásica simétrica:

$I_{cc} = \frac{I_b}{Z_{utot}} \Rightarrow 7,986 \text{ kA}$ $-84,5 \text{ graus}$

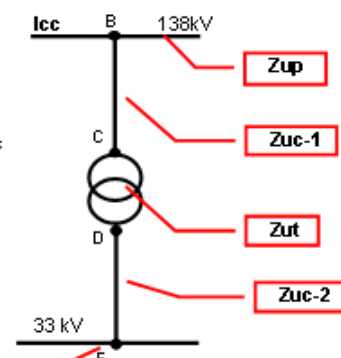
$\sqrt{3} = 1,7320508$

Z_{uc-1}		Z_{uc-2}		Z_{ut}	
R_{u-ohm}	0,0389	R_{u-ohm}	0,0389	$Z_{pt}(\%)$	7,54
X_{u-ohm}	0,6161	X_{u-ohm}	0,6161	$P_{nt}(\text{kVA})$	55000
$L_c(\text{km})$	0,04	$L_c(\text{km})$	0,06	$V_{ht}(\text{kV})$	33
N_c	1	N_c	2	$P_{cu}(\text{W})$	140000



$Z_{up} \Rightarrow$ impedância no ponto onde se tem a referência da corrente de curto-circuito que será base para o cálculo
 $Z_{uc-1} \Rightarrow$ impedância de cabo ou barra interligado entre o ponto base e o transformador ou outra barra ou cabo
 $Z_{ut} \Rightarrow$ impedância proveniente de transformador do circuito
 $Z_{uc-2} \Rightarrow$ impedância de cabo ou barra interligado entre o transformador e o ponto desejado do cálculo

$Z_{uc-1} = R_{uc-1} + j.X_{uc-1} \text{ pu}$
 $Z_{uc-1} = 0,000008 + j. 0,000129 \text{ pu}$
 $Z_{uc-1} = 8,89773E-05 + j. 0,001409 \text{ ohms}$



$I_{cc} = ?$

$Z_b = \frac{V_b^2}{P_b} \Rightarrow 10,89 \text{ ohms}$

$Z_{uc-2} = R_{uc-2} + j.X_{uc-2} \text{ pu}$
 $Z_{uc-2} = 0,000107 + j. 0,001697 \text{ pu}$
 $Z_{uc-2} = 0,001167 + j. 0,018483 \text{ ohms}$

$Z_{utot} = 0,23028201 + j. 2,374513737 \text{ ohms}$

rasounho $\Rightarrow 0,2190683$

$P_{cc} = 456,5 \text{ MVA}$

$\gg$ no ponto E

Figura 4.6 – Cálculo da corrente de curto-circuito I_{cc} e respectiva impedância Z_{utot} no PAC.

=> **Transformação da impedância série $Z_s = Z_{\text{tot}}$ em impedância paralelo $Z_p = R_p + j.X_p$**

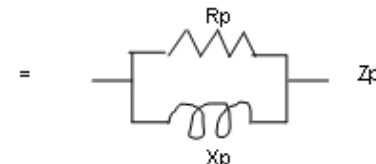
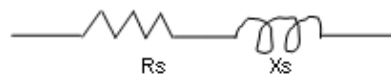
$$Z_s = R_s + j.X_s$$

$$R_s = R_{up} + R_{uc-1} + R_{ut} + R_{uc-2}$$

$$X_s = X_{up} + X_{uc-1} + X_{ut} + X_{uc-2}$$

$$\Rightarrow R_s = 0,230282$$

$$\Rightarrow X_s = 2,374514$$



$$Z_p = \frac{R_p \cdot j.X_p}{R_p + j.X_p} \times \frac{R_p - j.X_p}{R_p - j.X_p} = \frac{j.R_p^2.X_p + R_p.X_p^2}{R_p^2 + X_p^2}$$

$$\text{Fazendo : } Z_s = Z_p$$

$$R_s + j.X_s = \frac{R_p.X_p^2}{R_p^2 + X_p^2} + j.\frac{R_p^2.X_p}{R_p^2 + X_p^2}$$

$$\text{Teremos, termo a termo} \quad R_s = \frac{R_p.X_p^2}{R_p^2 + X_p^2} \implies (R_p^2 + X_p^2).R_s = R_p.X_p^2 \quad (1)$$

$$X_s = \frac{R_p^2.X_p}{R_p^2 + X_p^2} \implies (R_p^2 + X_p^2).X_s = R_p^2.X_p \quad (2)$$

$$(1) / (2): \frac{R_s}{X_s} = \frac{X_p}{R_p} \implies X_p = \frac{R_s \cdot R_p}{X_s} \quad (3)$$

$$(3) \text{ em } (1): R_p = \frac{X_s^2}{R_s} \times 1 + (R_s/X_s)^2 \quad (4)$$

então:

$$R_p = 24,71467607$$

$$X_p = 2,396846648$$

====>

$$X_p = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

====>

$$L = 0,00636$$

Figura 4.7 – Cálculo de transformação da impedância série $Z_s = Z_{\text{tot}}$ em uma impedância paralela Z_p .

4.1.2. Bloco 2 - FEA

O Forno Elétrico é modelado como três fontes de corrente controladas, de forma que uma corrente medida no TC específico da subestação principal seja injetada diretamente no modelo do sistema elétrico. Desta forma, o FEA é modelado de forma bem mais simples e realística, sem a necessidade de se criar um modelo matemático representando o forno elétrico e os demais componentes como reator, cabos, transformador do FEA, etc, o que seria muito complexo e possivelmente não tanto preciso como neste modelo. Esta opção de modelagem torna possível uma avaliação do aumento da potência do FEA, através da multiplicação da sua corrente por um simples ganho. A Figura 4.8 ilustra o modelo do Forno Elétrico a Arco, como fontes de correntes controladas.

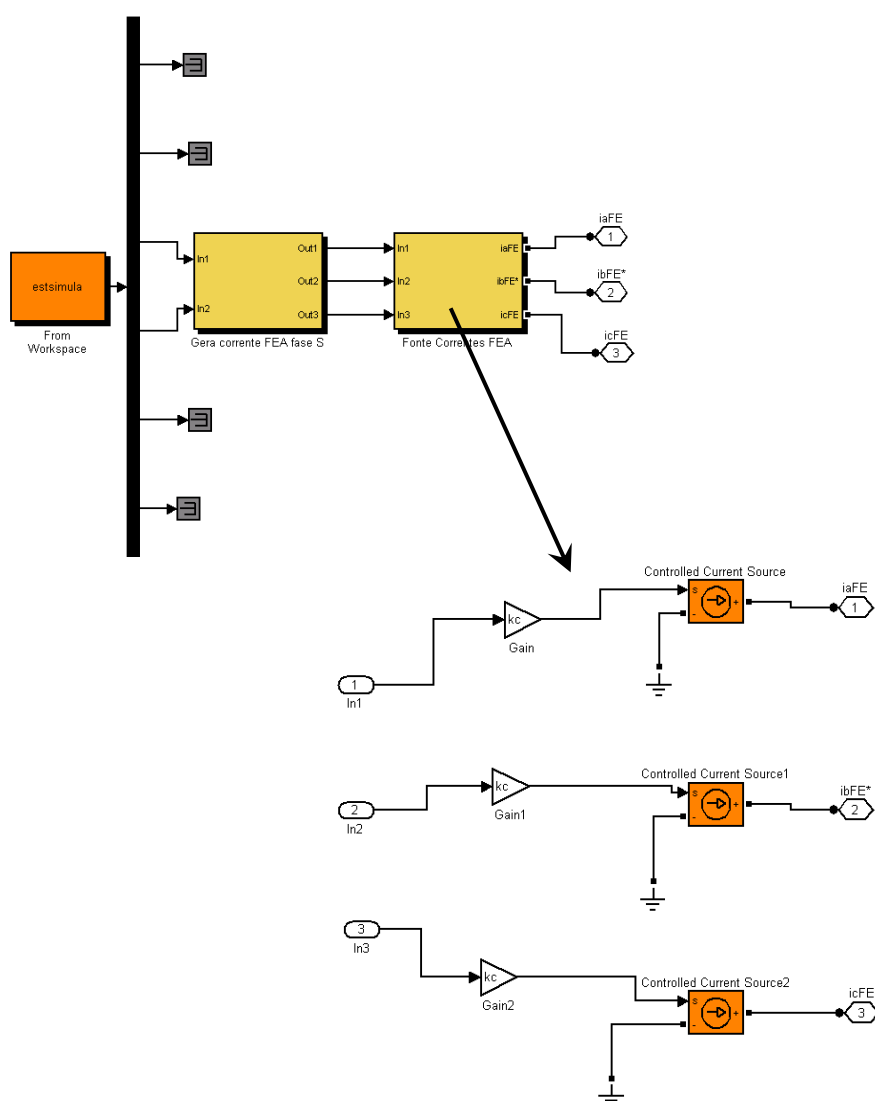


Figura 4.8 – Modelo do FEA como fonte de corrente controlada.

Para que as correntes medidas através do registrador no sistema elétrico em estudo possam ser importadas para posterior cálculo das correntes do FEA no Simulink, é necessário configurar a janela “Model Properties”, como pode ser visualizado na Figura 4.9. Assim, os dados são importados no formato “.xls” e alocados na área de trabalho do Matlab, através da rotina “ExcelTransfer_simulaC.m”, antes da simulação do modelo. A rotina é apresentada no Apêndice A.

Também nesta janela procede-se a entrada do parâmetro T_s , que define o tempo de amostragem das medições inseridas no modelo, e que deve ser compatibilizado com o tempo de amostragem definido no oscilógrafo, quando da realização das medições em campo. Outras variáveis também podem ser inseridas no modelo através desta janela.

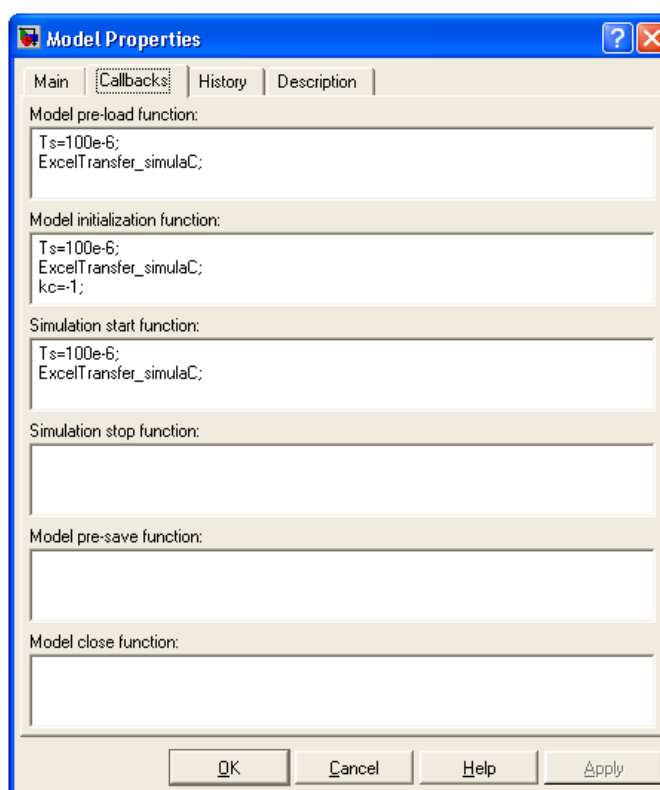


Figura 4.9 – Janela para inicialização da simulação no Simulink.

4.1.3. Bloco 3 - Filtro Passivo

Para a correção do fator de potência e filtragem das componentes harmônicas geradas pelo Forno Elétrico, existe um sistema de filtragem passiva com vários estágios de filtragem. O sistema encontra-se conectado diretamente ao barramento

de 33 kV da subestação principal da usina siderúrgica. Os parâmetros do sistema de filtragem passiva foram apresentados na Tabela 3.1. A Figura 4.10 apresenta a implementação do bloco três referente ao sistema de filtragem passiva.

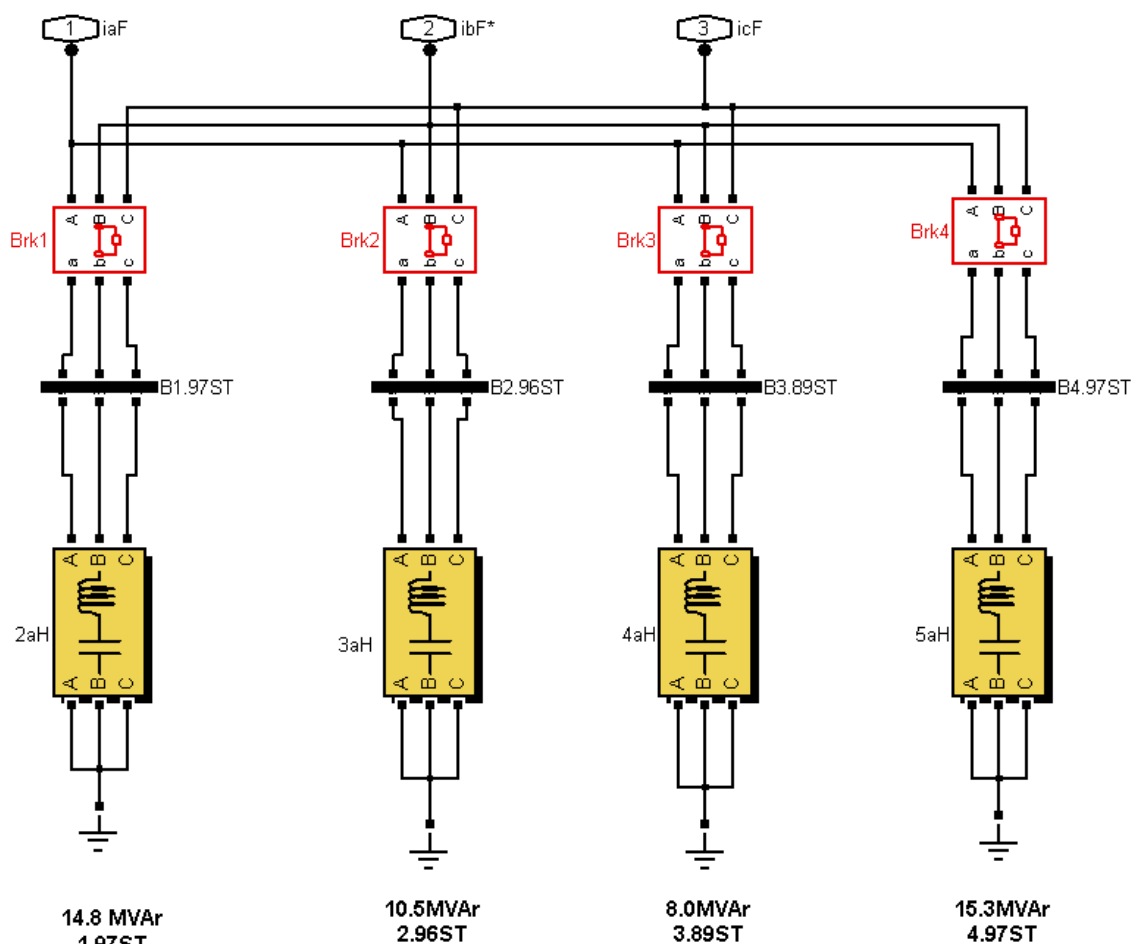


Figura 4.10 – Sistema de filtragem passiva.

4.2. AVALIAÇÃO DA RESSONÂNCIA HARMÔNICA NO SIST. ELÉTRICO DO FEA

A partir dos parâmetros do sistema elétrico do Forno Elétrico a arco, é possível avaliar o fenômeno da ressonância harmônica utilizando o Teorema da Superposição. A análise da ressonância paralela considera a carga não-linear como única fonte de harmônicos da rede. A fonte de tensão do sistema é desativada, e em seu local é realizado um curto-circuito. Já para a ressonância série a fonte de tensão é considerada como única fonte poluidora da rede e a carga não-linear é desativada.

Utilizando o circuito por fase da Figura 4.11(a) para avaliação da ressonância paralela, uma impedância equivalente é obtida a partir dos terminais da carga não-linear. A associação paralela entre a impedância da rede e do filtro passivo gera pontos de máxima impedância em determinadas frequências, conforme ilustrado na Figura 4.11 (b) e quantificado na Tabela 4.1.

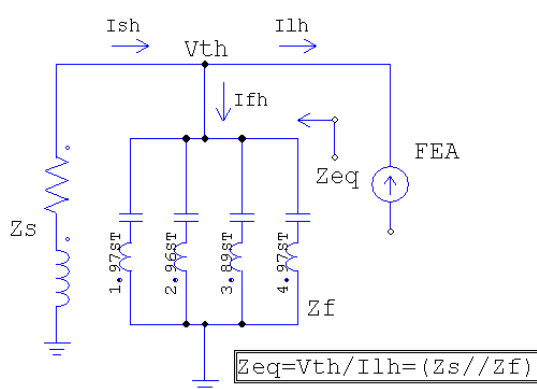
A avaliação da ressonância série é realizada a partir do circuito por fase da Figura 4.12(a), onde uma impedância equivalente resultado da associação série entre a impedância da rede e do filtro passivo é obtida a partir dos terminais da fonte. A impedância equivalente é mostrada na Figura 4.12(b), com pontos de mínima impedância quantificados na Tabela 4.2. Dessa forma se a fonte possui uma tensão harmônica cuja frequência coincida com o ponto de mínima impedância, muito próxima de zero, ocorrerá um curto-circuito na fonte de tensão, causando sobrecorrente e aumentando assim a distorção de tensão no PAC. A Figura 4.12 mostra em detalhes os quatro pontos da curva (Figura 4.12-b) onde a impedância atingiu valor praticamente nulo.

Tabela 4.1 – Frequências de ressonância paralela.

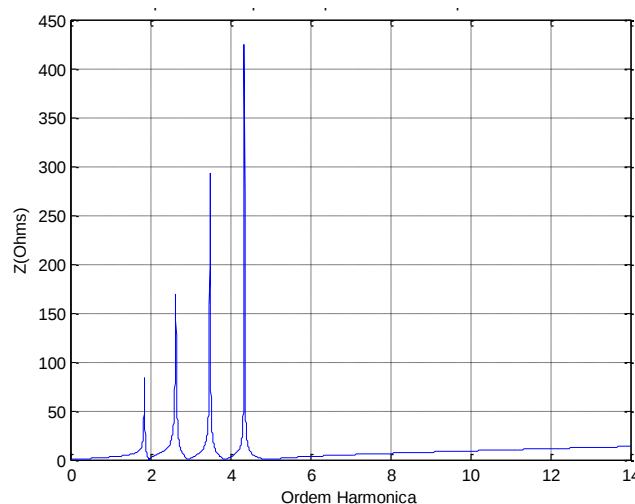
Frequência (Hz)	Z (Ω)
110 (h 1,83)	83
158 (h 2,63)	170
209 (h 3,48)	293
261 (h 4,35)	424

Tabela 4.2 – Frequências de ressonância série.

Frequência (Hz)	Z (Ω)
110 (h 1,83)	0,23
158 (h 2,63)	0,23
209 (h 3,48)	0,24
261 (h 4,35)	0,25



(a) circuito equivalente por fase



(b) impedância equivalente nos terminais da carga

Figura 4.11 – Análise da ressonância paralela.

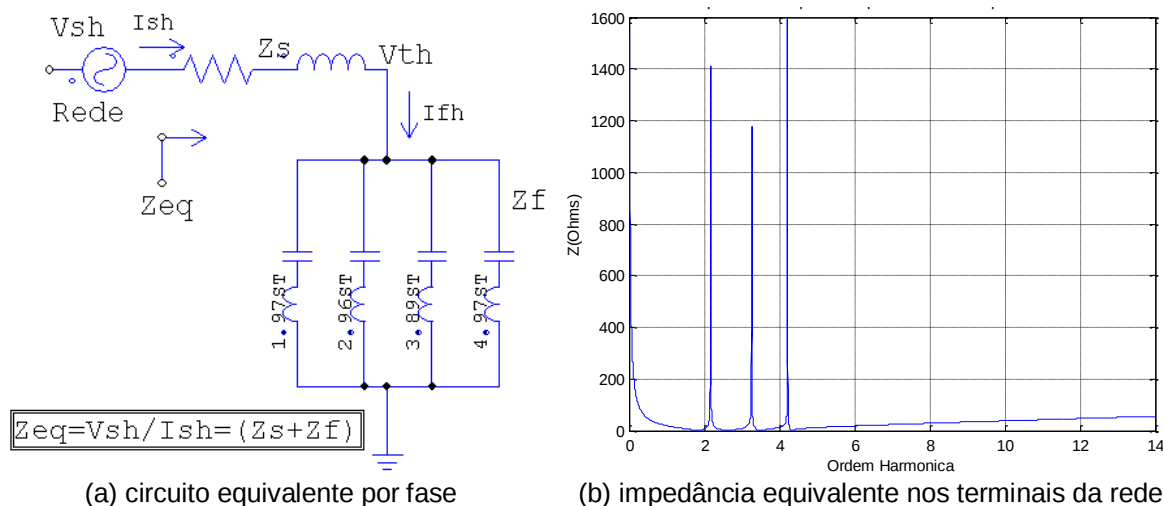


Figura 4.12 – Análise da ressonância série

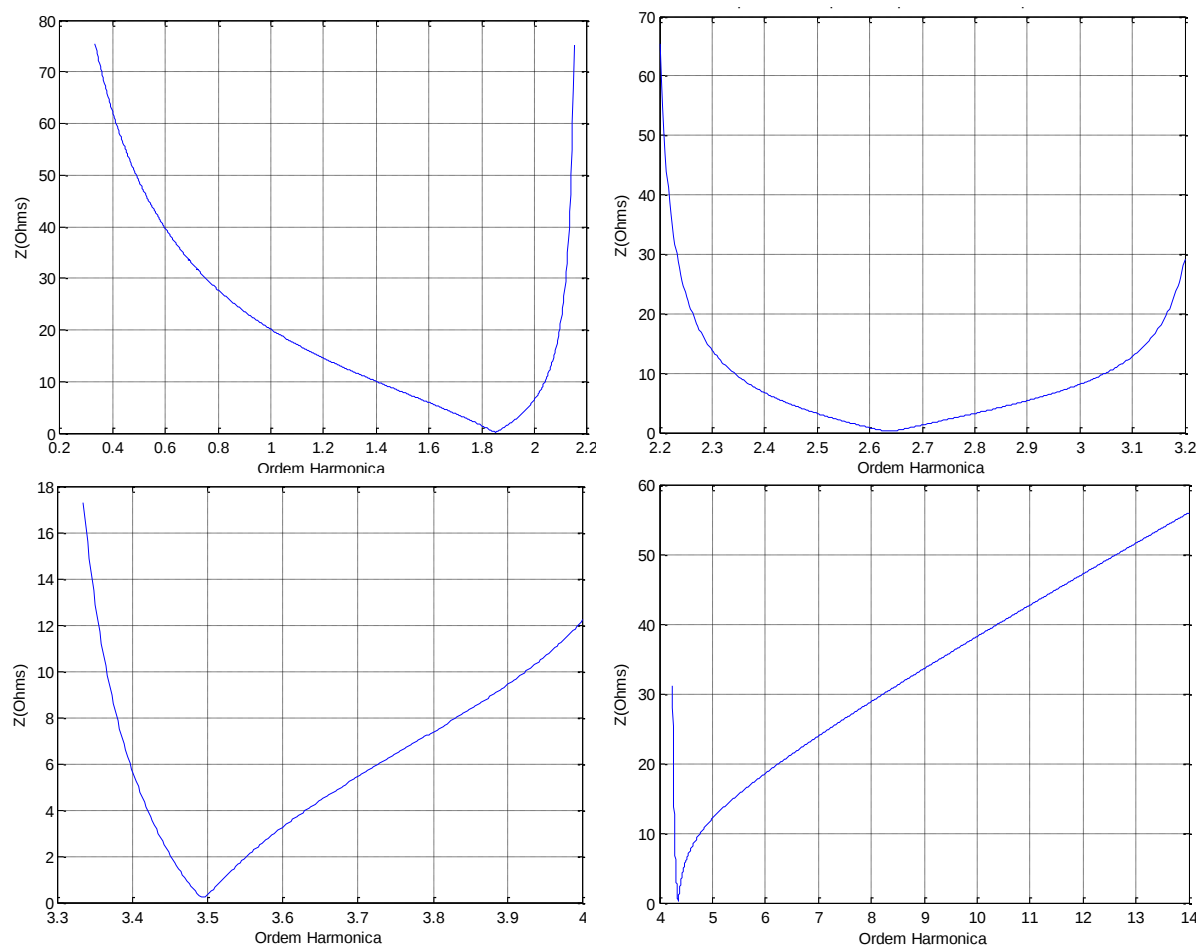


Figura 4.13 – Detalhe dos quatro pontos de impedância mínima na análise da ressonância série.

Em [2] foi estudado por Akagi como a ressonância harmônica contribui quantitativamente na amplificação harmônica da corrente do filtro passivo e da rede elétrica. Para a análise da ressonância paralela as relações I_{sh}/I_{lh} e I_{fh}/I_{lh} são obtidas a partir do circuito elétrico da Figura 4.11(a), através de um divisor de corrente,

modelando o Forno Elétrico a Arco como uma fonte de corrente e obtendo as equações (4.1) e (4.2).

$$\frac{I_{sh}}{I_{lh}} = \frac{Z_F}{Z_s + Z_F} \quad (4.1)$$

$$\frac{I_{fh}}{I_{lh}} = -\frac{Z_s}{Z_s + Z_F} \quad (4.2)$$

Conforme pode ser visualizado na Figura 4.14(a), a corrente da rede elétrica está sendo amplificada entre 0 a 268 Hz. Para a corrente do filtro passivo a amplificação ocorre entre 100 a 298 Hz, conforme mostrado na Figura 4.14(b). O ideal em um sistema elétrico seria que todas as componentes harmônicas da corrente da rede elétrica fossem atenuadas e as componentes de corrente no filtro passivo possuíssem ganho igual 0 dB, desta forma todas as parcelas de corrente da carga não-linear seriam absorvidas pelo sistema de filtragem passiva.

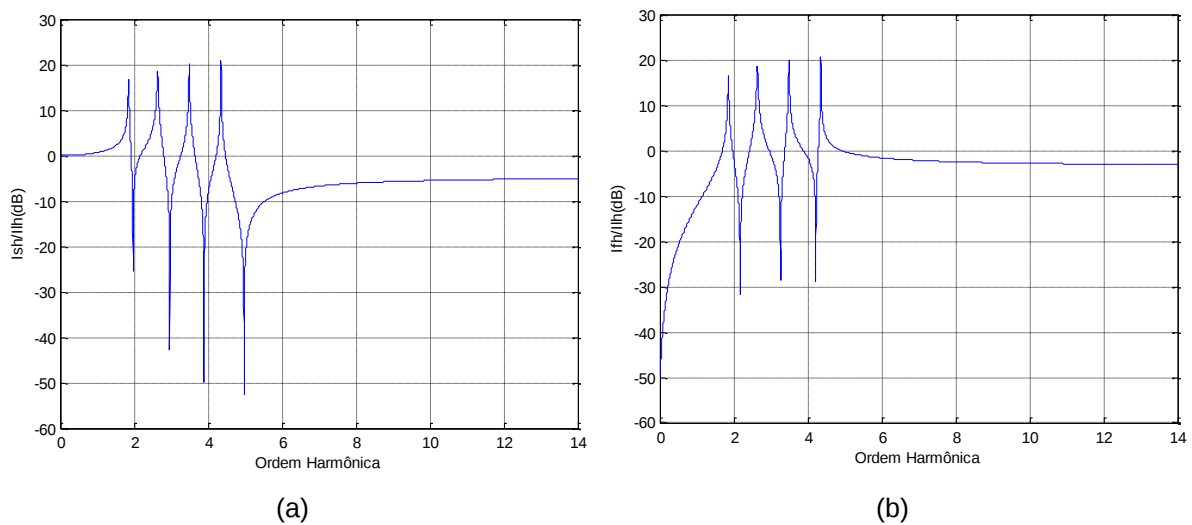


Figura 4.14 – Análise da ressonância paralela: (a) I_{sh}/I_{lh} ; (b) I_{fh}/I_{lh} .

Já para a ressonância série, as relações I_{sh}/V_{sh} e I_{fh}/V_{sh} são obtidas pela Lei de Ohm em (4.3), para o circuito da Figura 4.12 (a).

$$\frac{I_{sh}}{V_{sh}} = \frac{I_{fh}}{V_{sh}} = \frac{1}{Z_s + Z_F} \quad (4.3)$$

A Figura 4.15 ilustra a análise para a ressonância série, onde se pode observar que existem algumas frequências para as quais o ganho está acima de 0 dB, que são as frequências de ressonância série apresentadas na tabela 4.2. O ideal seria que esta relação fosse a mais atenuada possível e não atingisse valores

nulos, pois assim não existiria nenhuma frequência de ressonância série onde se produzisse um curto-circuito na fonte de tensão.

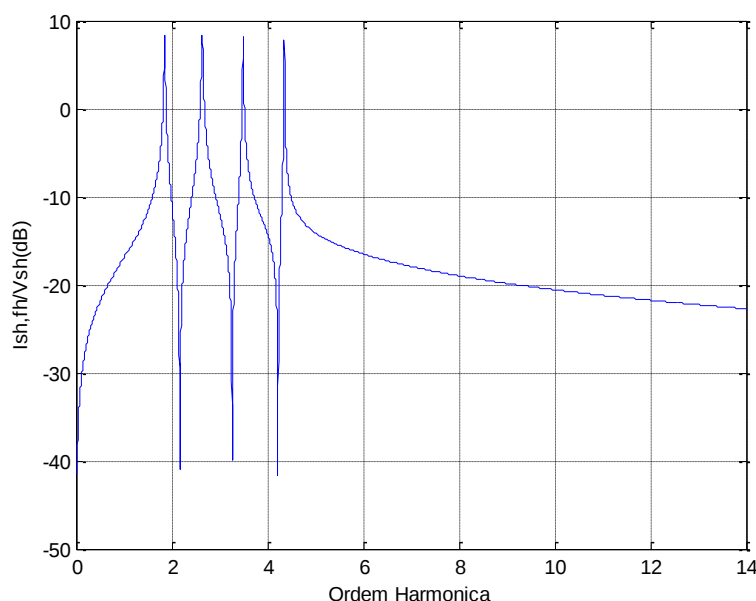


Figura 4.15 – Análise da ressonância série I_{sh}/V_{sh} .

4.3. VALIDAÇÃO DO MODELO DO SISTEMA

O critério adotado para validar o modelo do sistema elétrico do FEA aqui proposto, conforme mostrado na Figura 4.2, foi através da comparação dos resultados encontrados na simulação do modelo em relação aos resultados obtidos nas medições, que foi apresentado no capítulo 3.

Na modelagem do circuito de potência em questão, como a sua estrutura é feita em blocos, o modelo será considerado válido de uma forma global se este incorporar características fundamentais para a aplicação, o que serão verificadas por meio da aderência dos valores obtidos de tensões e correntes geradas na simulação, quando comparadas com as variáveis tensões e correntes medidas em campo. Para isto serão avaliados os desvios provenientes da comparação dos valores eficazes e de distorção harmônica das tensões obtidas no PAC, que corresponde à barra B1 do modelo. Também será avaliada a aderência da corrente no filtro passivo, correspondente à corrente obtida na barra B3 do modelo. A outra variável medida, que foi a corrente no FEA, não tem sentido ser comparada tendo

em vista que o modelo criado utiliza como base o bloco que retrata o comportamento do Forno Elétrico através das correntes que foram medidas.

As verificações são executadas com base nas medições ocorridas durante a condição operacional de FEA no início da corrida, que representa a pior situação em termos de qualidade de energia elétrica. Esta condição será utilizada para retratar o modelo de funcionamento do sistema elétrico do FEA.

A partir deste ponto do trabalho, a nomenclatura de representação da tensão e corrente seguirá a seguinte regra:

- Os índices “r”, “s” e “t”, são padronizados neste texto com referência a tensões e correntes medidas no circuito original, tal como foi apresentado no capítulo 3.
- Os índices “a”, “b” e “c”, são padronizados neste texto com referência a tensões e correntes provenientes de simulação do modelo em questão.

4.3.1. Verificação das Tensões

Conforme explanado no item anterior, a avaliação da aderência das tensões geradas pelo modelo na barra de 33 kV do sistema, definido como ponto de acoplamento comum (PAC), será feita comparando os valores eficazes das tensões de linha e os valores de distorção harmônica em relação às medições realizadas neste ponto do sistema.

A Tabela 4.3 apresenta comparativamente os valores eficazes das tensões e os valores de Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT). A Figura 4.16 mostra os espectros dos harmônicos de tensão.

Tabela 4.3 – Comparação das Tensões (Modelo X Medição) no PAC.

	Modelo V_{ab}	Medição V_{rs}	Desvio (%)	Modelo V_{bc}	Medição V_{st}	Desvio (%)	Modelo V_{ca}	Medição V_{tr}	Desvio (%)
Volts (<i>rms</i>)	32.380	32.610	0,71	31.920	32.230	0,97	33.330	33.310	0,06
DTT (%)	0,35	0,35	0	0,17	0,13	0,04	0,32	0,37	0,05

O desvio percentual da tensão eficaz entre os valores da medição e do modelo obtido pela equação (4.4):

$$\Delta(\%) = \frac{(V_{maior} - V_{menor})}{V_{maior}} \times 100 \quad (4.4)$$

O desvio da Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) é expresso pela simples diferença do maior pelo menor entre os valores da medição e do modelo.

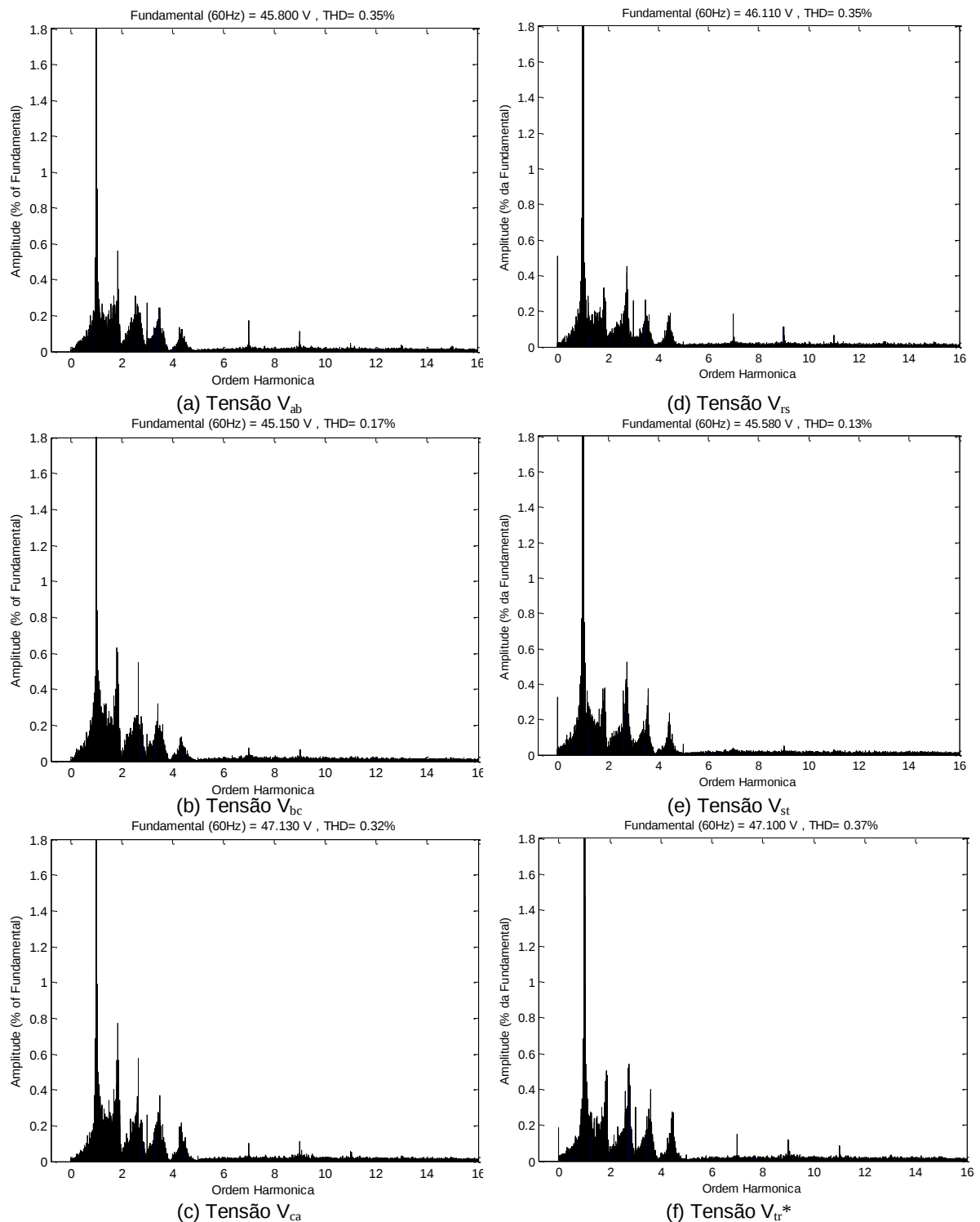


Figura 4.16 – Comparação da distorção harmônica de tensão simulada (a),(b),(c) e medida (d),(e),(f).

4.3.2. Verificação das Correntes

A Figura 4.17 mostra as formas dos espectros dos harmônicos de corrente do filtro passivo.

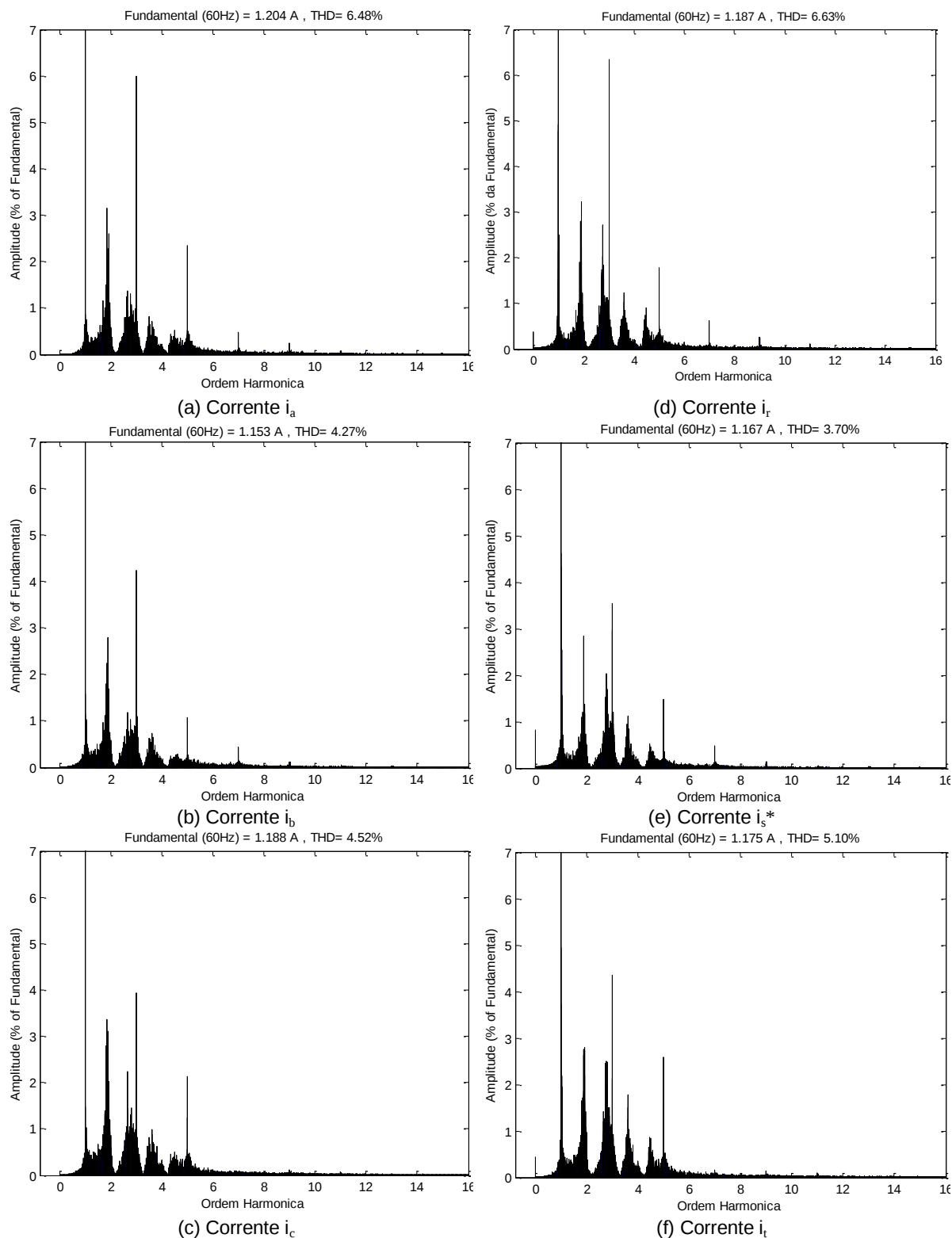


Figura 4.17 – Comparação distorção harmônica de corrente simulada (a),(b),(c) e medida (d),(e),(f).

A Tabela 4.4 apresenta comparativamente os valores eficazes das correntes e os valores de Distorção Harmônica Total de Corrente (THDi).

Tabela 4.4 – Comparação das Correntes (Modelo X Medição) no Filtro Passivo.

	Modelo i_a	Medição i_r	Desvio (%)	Modelo i_b	Medição i_s^*	Desvio (%)	Modelo i_c	Medição i_t	Desvio (%)
Amperes (rms)	851,3	839,2	1,42	815	824,9	1,20	839,8	831	1,05
THDi (%)	6,48	6,63	0,15	4,27	3,70	0,57	4,52	5,10	0,58

Sendo o desvio percentual da corrente eficaz entre os valores da medição e do modelo obtido pela equação (4.5):

$$\Delta(\%) = \frac{(i_{maior} - i_{menor})}{i_{maior}} \times 100 \quad (4.5)$$

O desvio da Distorção Harmônica Total de Corrente (THDi) é expresso pela simples diferença do maior pelo menor entre os valores da medição e do modelo.

4.3.3. Avaliação do modelo

As formas de onda dos espectros das distorções harmônicas de tensões obtidas na simulação do modelo em relação aos espectros das distorções harmônicas a partir da medição mostra que existe elevada aderência das tensões, considerando também a proximidade e coerência dos valores da DTT. Esta interpretação é ratificada com o desvio médio de 0,58% entre os valores eficazes de tensão no PAC, o que pode ser considerado como um modelo de simulação que propicia uma elevada correlação do que foi proposto com o sistema elétrico real do FEA.

Também as formas de onda dos espectros das distorções harmônicas de corrente no filtro passivo permitem a verificação de uma forte correlação. O desvio médio de 1,22% entre os valores eficazes de corrente no filtro passivo pode ser considerado como determinante para concluir quanto à plena aderência do modelo ao sistema real, tendo em vista a própria característica da variável corrente e deste tipo de carga elétrica, que pode sofrer pequenas variações nos valores nominais dos seus elementos L-C, bem como na existência de resistências intrínsecas ao conjunto de componentes dos filtros passivos.

Com base nos resultados apresentados é possível considerar que o modelo implementado possui excelente aderência às variáveis que foram medidas durante a condição de operação real do Forno Elétrico e, portanto, pode ser utilizado como uma referência válida para simulações e análises de outros modelos derivados do modelo em estudo que foi elaborado para o sistema elétrico de potência do FEA.

4.4. CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou o detalhamento para a obtenção do modelo de simulação do sistema elétrico do FEA. Foram apresentados todos os blocos que compõem o sistema e seus ajustes, contendo os componentes e os parâmetros de configuração requeridos para desempenhar as funções esperadas pelo conjunto. As características relevantes do sistema elétrico em estudo foram consideradas para dar respaldo à construção do modelamento e possibilitar o seu entendimento.

O capítulo abordou também o fenômeno das ressonâncias harmônicas, paralela e série, mostrando a existência de frequências nas quais o sistema está sujeito à amplificação harmônica que contribuem para elevação dos níveis de distorção harmônica. Ficou evidente que estas condições de amplificação harmônica levam a vulnerabilidades no comportamento do sistema, seja através da ocorrência de possíveis sobrecorrentes ou mesmo curto-circuito na fonte, que agrava o nível das distorções harmônicas de tensão na rede. Desta forma o estudo deste capítulo indicou a necessidade de se buscar formas para eliminar a amplificação harmônica no sistema elétrico do FEA.

Por fim, o modelamento do sistema pôde ser validado ao justificar a aderência deste para com o sistema real a partir das medições efetuadas. Os resultados em geral mostraram um modelo robusto e apto para o propósito de retratar um sistema elétrico do FEA que seja capaz de sofrer alterações no seu esboço e gerar resultados de simulação que reflitam o que seria a nova condição real alterada.