#### 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)

Soares Junior, Dirceu, 1969-

S676a 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

Dfb Simonetti

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, consequentemente, 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 "minimill" 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 medid	las
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 (le	C).
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	.48
Figura 3.10 - Tensão de linha no PAC com FEA ligado no Final da corrida - F	ΕA
(FČ)	.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 <sub>rs</sub> , (b) V <sub>st</sub> ,	(C)
V <sub>tr</sub> *	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 <sub>rFEA</sub> ,	(b)
İ <sub>sfea</sub> *, (c) İ <sub>tfea</sub>	.54
Figura 3.16- Espectros dos harmônicos de corrente no FEA - FEA (FC) : (a) i <sub>rF</sub>	ΞEΑ,
(b) i <sub>sFEA</sub> *, (c) i <sub>tFEA</sub>	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 <sub>rT</sub> *, (b) i <sub>sT</sub> *, (c) i <sub>tT</sub> *	62
Figura 3.24 – Espectros das harmônicas de corrente no transf. T30 - FEA (FC):	(a)
i <sub>rT</sub> *, (b) i <sub>sT</sub> *, (c) i <sub>tT</sub> *	63
Figura 4.1 – Diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico em análise	.70

Figura 4.2 – Sistema elétrico no MATLAB/Simulink <sup>®</sup> 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 <sub>s</sub> 74
Figura 4.6 – Cálculo da corrente de curto-circuito $I_{cc}$ e respectiva impedância $Z_{utot}$ no
PAC75
Figura 4.7 – Cálculo de transformação da impedância série $Z_s = Z_{utot}$ em uma
impedância paralela $Z_p$
Figura 4.8 – Modelo do FEA como fonte de corrente controlada.
Figura 4.9 – Janela para inicialização da simulação no Simulink
Figura 4.10 – Sistema de filtragem passiva
Figura 4.11 – Analise da ressonancia paralela80
Figura 4.12 – Analise da ressonancia serie
rigura 4.13 – Detaine dos quatro pontos de impedancia minima na analise da
Figure 4.14 Apólice de recepción paralele: (a) L /L : (b) L /L
Figura 4.14 – Analise da ressonancia paralela. (a) $I_{sh}/I_{h}$ , (b) $I_{fh}/I_{h}$
Figura 4.15 – Analise da l'essolianda selle $I_{sh}/V_{sh}$
medida (d) (e) (f) $85$
Figura 4 17 – Comparação distorção harmônica de corrente simulada (a) (b) (c) e
medida (d) (e) (f).
Figura 5.1 – Topologia de um filtro híbrido série
Figura 5.2 – Controle do filtro híbrido série
Figura 5.3 – Diagrama de blocos para detecção harmônica
Figura 5.4 – Controle de tensão no elo CC do inversor no filtro híbrido série95
Figura 5.5 – Representação por fase do sistema elétrico com filtro híbrido série para
técnica 397
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 <sub>V</sub>
Figura 5.7 – Análise da ressonância série: (a) Circuito por fase para as componentes
harmonicas na fonte de tensao da rede; (b) Representação do filtro hibrido serie por
um ganho K <sub>V</sub>
Figura 5.8 – Sistema Eletrico do FEA com filtro hibrido serie no Matiad/ Simulink°.
Figura 5.9 – Composição do Filiro hibrido serie no Maliad/ Simulink
Figura 5.10 – FLL IIIasico
Figura 5.12 – Fonte de tensão controlada trifásica
Figura 5.13 – Cálculo do ganho do filtro híbrido série: (a) $L_{\rm tr}/L_{\rm tr}$ : (b) $L_{\rm tr}/L_{\rm tr}$ : (c)
Impedância equivalente vista pelos terminais do circuito FFA: (d) $V_{th}/I_{th}$ : (e) $I_{ch}/V_{ch}$ 104
Figura 5.14 – Comparação distorção harmônica de tensão no PAC – sem filtro e com
filtro ativo em série
Figura 5.15 - Comparação distorção harmônica de corrente no PAC - sem filtro e
com filtro ativo em série
Figura 5.16 – Corrente no Transformador T30 (PAC) – sem filtro109

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 5.21 – Controle de tensão no elo CC do inversor do filtro híbrido paralelo. .115 Figura 5.23 - Circuito elétrico com filtro híbrido paralelo para avaliação da Figura 5.24 - Circuito elétrico com filtro híbrido paralelo para avaliação da Figura 5.25 - Sistema Elétrico do FEA com filtro híbrido paralelo no Matlab/ Figura 5.28 – Comparação distorção harmônica de tensão no PAC – sem filtro e com Figura 5.29 - Comparação distorção harmônica de corrente no PAC - sem filtro e com filtro ativo em paralelo......124 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). Figura 5.33 – Corrente no filtro ativo: (a) forma de onda da corrente no filtro ativo; (b) 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 5.37 – Cálculo do ganho do filtro híbrido paralelo com a técnica 1: (a) Ish/Ih; (b) I<sub>fh</sub>/I<sub>lb</sub>; (c) Impedância equivalente vista pelos terminais do FEA (Zeq); (d) V<sub>th</sub>/I<sub>lb</sub> 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 t	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	o87
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)
Tobolo E E Comparação dos Distoraçãos Harmônicos entre os 2 tácni	I I Z
controle	122 Jas ue
Tabela 5.6 – Corrente no FEA n/ 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 si	istema
	134

# LISTA DE ABREVIAÇÕES OU SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BUS	Barramento
B1 a B6	Barra para medições de corrente e tensão no Simulink <sup>®</sup>
C	Capacitor
CA	
	Controlador logico programavel
	Distorção harmônica individual de tenção
	Distolção Harmonica individual de tensão
DSP f	Eroquância
ΓΔ	Filtro Ativo
FEA	Forno Elétrico a Arco
FFA (IC)	FEA operando na fase inicial da corrida
FEA (FC)	FEA operando na fase final da corrida
FPB	Filtro passa baixa
i	Corrente
I <sub>a.b.c</sub>	Corrente nas fases a, b e c proveniente da simulação do modelo
<b>I</b> *	Corrente de referência para o filtro ativo
i <sub>cc</sub>	Corrente de curto circuito
$i^e_1, i^e_2, i^e_1$	Corrente de eixo direto, quadratura e sequência zero no referencial
a ; q ; o	síncrono
IEEE	Institute of Electric and Electronic Engineers
١ <sub>F</sub>	Corrente do filtro passivo
I <sub>FEA</sub>	Corrente do Forno Eletrico a Arco
l <sub>fa</sub>	Corrente do filtro ativo
	Componentes harmonicas de corrente no filito passivo
IGET	Insulated Gate Diputat Mansistor
i.	Corrente de carga
۱ <u>۲</u>	Componentes harmônicas de corrente da carga elétrica
in i'i	Soma das correntes da carga e do filtro passivo
i'un	Soma das correntes harmônicas da carga e do filtro passivo
i <sub>r</sub> E	Corrente da fase R do conjunto de filtros passivos
İrFFA	Corrente da fase R do FEA
i <sub>rT</sub> *	Corrente calculada na fase R do secundário do transformador T30
i <sub>s</sub>	Corrente da rede elétrica ou sistema alimentador
i <sub>sF</sub> *	Corrente calculada na fase S do conjunto de filtros passivos
İ <sub>sfea</sub> *	Corrente calculada na fase S do FEA
i <sub>sh</sub>	Componentes harmônicas de corrente da rede elétrica
i <sub>sT</sub> *	Corrente calculada na fase S do secundário do transformador T30
i <sub>tF</sub>	Corrente da fase T do conjunto de filtros passivos
ItFEA	Corrente da fase T do FEA
I <sub>tT*</sub>	Corrente calculada na fase 1 do secundário do transformador 130
K <sub>a</sub>	Ganho do filtro hibrido paralelo
К <sub>с</sub> К	Ganno comum
n <sub>v</sub>	Ganno do Initro Mibrido Serie Indutância
	Indulancia Motol Ovido Somiconductor Field Effect Transistor

- MVA Mega (10<sup>6</sup>) Volt-Ampere
- PAC Ponto de Acoplamento Comum
- Pcc Potência de Curto-circuito
- P<sub>FA</sub> 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<sub>i</sub> Resistência interna de fonte
- R<sub>p</sub> Resistência de impedância paralela
- R<sub>s</sub> Resistência de impedância série
- S<sub>cc</sub> Potência de curto-circuito da fonte de tensão da rede elétrica
- SRF Synchronous Reference Frame
- ST Single Tuned Filter (Filtro Sintonizado em uma certa freqüência)
- TC Transformador de corrente
- THD Total Harmonic Distortion (Distorção harmônica total)
- THDi Distorção harmônica total de corrente
- TP Transformador de potencial
- Ts Tempo de amostragem das medições utilizado nas simulações
- V Tensão
- V<sub>1</sub> Componente fundamental de tensão
- v\* Tensão de referência para o filtro ativo
- V<sub>ab</sub> Tensão entre as fases A e B proveniente da simulação do modelo
- V<sub>bc</sub> Tensão entre as fases B e C proveniente da simulação do modelo
- v<sub>c</sub> Tensão de compensação do filtro ativo
- V<sub>ca</sub> Tensão entre as fases C e A proveniente da simulação do modelo
- V<sub>cc</sub> Tensão contínua no capacitor
- V<sub>h</sub> Componente harmônica de tensão
- V<sub>N</sub> Tensão nominal
- V<sub>rs</sub> Tensão entre as fases R e S (Tensão de linha)
- V<sub>s</sub> Tensão da rede elétrica ou sistema alimentador
- V<sub>sh</sub> Parcelas harmônicas de tensão na rede elétrica / sist. alimentador
- V<sub>st</sub> Tensão entre as fases S e T (Tensão de linha)
- V<sub>t</sub> Tensão de entrada (vetor)
- V<sub>tr\*</sub> Tensão calculada entre as fases T e R (Tensão de linha)
- V<sub>th</sub> Componentes harmônicas de tensão na carga elétrica
- X<sub>p</sub> Reatância paralela
- Xr Reatância do reator série
- X<sub>s</sub> Reatância da rede elétrica / sist. alimentador ou reatância série
- Xsec Reatância do Forno Elétrico
- Xtf Reatância do transformador do Forno Elétrico
- Xts Reatância do transformador abaixador 138/33 kV
- Z<sub>eq</sub> Impedância equivalente
- Z<sub>F</sub> Impedância do filtro passivo
- Z<sub>S</sub> Impedância da rede elétrica / sist. alimentador ou Impedância série
- Z<sub>p</sub> Impedância paralela
- Z<sub>utot</sub> Impedância total do sistema no PAC
- 3Ø Sistema trifásico a três fios sem neutro
- $\delta$  Ângulo de potência
- $\Theta_1$  Ângulo da transformação no referencial síncrono ( $\omega t_1$  do PLL)
- $\Delta(\%)$  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. MEDIÇOES NO SISTEMA ELETRICO DO FEA	38
	3.4. AVALIAÇÃO DAS MEDIÇÕES	41
	3.4.1. Parametros de Avanação das Distorções Harmonicas	44 /18
	3 4 3 Avaliação das Medições de Tensão	<del>4</del> 0 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 1.30	64
	3.5 CONCLUSÕES	05
4.	MODELAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO DO FEA	69
	$4.1 \qquad \text{IMPLEMENTACÃO E A LISTES DO MODELO}$	60
	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 79
	4.5.5. Avanação do modelo	/ 0 88
5	FILTRACEM HÍRRIDA SÉRIE E PARALELA	80 80
5.		07
	5.1. US FILTRUS HIBRIDUS	89
	5.2. FILTRO HIBRIDO SERIE	91 92
	5.2.1.1. Método de Deteccão 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 HIBRIDO SERIE NO SIST. ELETRICO DO FEA	100
	5.3.1. Ganno do filtro hibrido serie	.103
	5.5.2. Avanação da simulação com filuro Hidrido Serie	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. Método de Detecção Harmônica	115
5.4.1.2. Controle de tensão no capacitor	115
5.4.1.3. Regulador de corrente PWM	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
A PÊNDICE B - PRODUCÃO 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 freqüências [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<sup>®</sup>, 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 Vs é a tensão do sistema alimentador, Xs é a reatância equivalente do sistema da concessionária, determinada pela potência de curto circuito no ponto de suprimento, Xts é a reatância do transformador abaixador, Xr é a reatância do reator, Xtf é a reatância do transformador do forno, Xsec é a reatância do forno e Rarc é a resistência do arco elétrico. Neste diagrama, as reatâncias estão referidas à tensão do sistema alimentador Vs [7].



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 Xsec e todas as

resistências à resistência Rarc. O arco elétrico tem uma característica essencialmente resistiva e representa quase a totalidade da resistência Rarc.

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 distribuidamente 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 freqüências correspondentes à 2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup>, 4<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> 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 freqüência, de forma a eliminar o maior número possível de harmônicas, dentro da variedade de freqüências 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
Características	Capacidade	Indutância (L)	Capacitância (C)
Filtro passa-faixa (1,97ST) - Sintonia 118,2 Hz	14,8 Mvar	69,7 mH	26 µF
Filtro passa-faixa (2,96ST) - Sintonia 177,6 Hz	10,5 Mvar	34,8 mH	23 µF
Filtro passa-faixa (3,89ST) - Sintonia 233,4 Hz	8,0 Mvar	26,3 mH	17,66 µF
Filtro passa-faixa (4,97ST) - Sintonia 298,2 Hz	15,3 Mvar	7,8 mH	36,5 µF

Tabela 3.1 - Características do sistema de filtragem passiva

# 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.

Variável Medida	Simbologia
Corrente na fase R do conjunto de Filtros passivos (2ª, 3ª, 4ª e 5ª)	İrF
Corrente na fase T do conjunto de Filtros passivos (2ª, 3ª, 4ª e 5ª)	İtF
Corrente na fase R do Forno Elétrico a Arco	İ <sub>rFEA</sub>
Corrente na fase T do Forno Elétrico a Arco	İ <sub>tFEA</sub>
Tensão entre as fases R e S (Tensão de linha)	V <sub>rs</sub>
Tensão entre as fases S e T (Tensão de linha)	V <sub>st</sub>

Tabela 3.2 – Variáveis registradas na subestação principal.

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 freqüência, e nem mesmo retirá-los do sistema para ensaios. Como o interesse reside

principalmente nas freqüências abaixo de 1 kHz, considerou-se a resposta em freqüência 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.

Equação	Variável Calculada	Cálculo	Variável
(3.1)	Corrente na fase S do conjunto de Filtros passivos	$=$ - ( $i_{rF}$ + $i_{tF}$ )	i <sub>sF</sub> *
(3.2)	Corrente na fase S do Forno Elétrico a Arco	= - $(i_{rFEA} + i_{tFEA})$	İ <sub>sfea</sub> *
(3.3)	Tensão entre as fases T e R (Tensão de linha)	$= - (V_{rs} + V_{st})$	V <sub>tr</sub> *

Tabela 3.3 – Variáveis calculadas através das variáveis medidas.

Como a corrente no transformador T30 não foi registrada na subestação principal, torna-se necessário o seu cálculo. Aplicando a Lei de Kirchoff 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.

Equação	Variável Calculada	Cálculo	Variável
(3.4)	Corrente da fase R no transformador T30	= İ <sub>rF +</sub> İ <sub>rFEA</sub>	İ <sub>rT</sub> *
(3.5)	Corrente da fase S no transformador T30	$= i_{sF}^* + i_{sFEA}^*$	i <sub>s⊺</sub> *
(3.6)	Corrente da fase T no transformador T30	$= i_{tF} + i_{tFEA}$	İ <sub>tT</sub> *

Tabela 3.4 – Correntes por fase no transformador T30.

# 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).

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)
	V <sub>rs</sub>	34,92	34,87	34,89	
FEA desligado	V <sub>st</sub>	34,97	34,91	34,94	34,93
	V <sub>tr*</sub>	35,00	34,94	34,97	
EEA ligada	V <sub>rs</sub>	35,06	30,59	32,66	
FEA liyauu Início da corrida (IC)	V <sub>st</sub>	34,00	30,84	32,36	32,77
micio da comua (IC)	V <sub>tr*</sub>	35,56	31,62	33,30	
	V <sub>rs</sub>	31,97	30,79	31,52	
FEA ligado Final da corrida (FC)	V <sub>st</sub>	32,61	31,67	32,14	31,78
	V <sub>tr*</sub>	32,19	30,72	31,67	

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

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).

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)
EEA ligada	İ <sub>rFEA</sub>	1150,6	5,6	718,3	
Início da corrida (IC)	İ <sub>sFEA</sub> *	1276,7	540,5	909,5	759,0
	İtFEA	1027,7	14,4	649,2	
	İ <sub>rFEA</sub>	1369,6	1089,2	1184,6	
Final da corrida (FC)	İ <sub>sFEA</sub> *	1173,6	930,3	1055,2	1121,4
	İtFEA	1308,8	990,6	1124,4	

Tabela 3.6 – Análise das correntes no FEA.

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 freqüências, 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<sub>L</sub>) e corrente de curto-circuito (i<sub>CC</sub>) 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).

120 V $\leq$ V <sub>N</sub> $\leq$ 69 kV						
		Distorção harn	nônica individual de	corrente (%)		
I <sub>CC</sub> /I <sub>L</sub>	h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ 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

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

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%.

Tensão nominal do barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) %
$V_N \le 1 \ kV$	10
1 kV < $V_N \le$ 13,8 kV	8
13,8 kV < V <sub>N</sub> ≤ 69 kV	6
69 kV < $V_N \le$ 138 kV	3

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

A Tabela 3.9 define os limites individuais de distorção harmônica de tensão (DIT<sub>h</sub> ou THD<sub>i</sub>), em porcentagem da tensão na frequência fundamental.

Ordena Llarma ânica		Distorção Harmônica Individual de Tensão (DIT <sub>h</sub> ) [%]			
Ordem Harmo	onica	$V_N \le 1 \ kV$	$1 \text{ kV} < V_N \le 13,8 \text{ kV}$	13,8 kV <v<sub>N≤69 kV</v<sub>	69 kV <v<sub>N≤138 kV</v<sub>
	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
Impares não múltiplas de 3	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
	3	6.5	5	4	2
	9	2	1.5	1.5	1
Impares múltiplas de 3	15	1	0.5	0.5	0.5
	21	1	0.5	0.5	0.5
	>21	1	0.5	0.5	0.5
	2	2.5	2	1.5	1
_	4	1.5	1	1	0.5
	8	1	0.5	0.5	0.5
Pares	10	1	0.5	0.5	0.5
	12	1	0.5	0.5	0.5
	>12	1	0.5	0.5	0.5

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

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.

\_\_\_\_\_

$$DIT_h = \frac{V_h}{V_1} \times 100\% \tag{3.1}$$

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



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)  $V_{tr}^*$ .



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 interharmônicos 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<sup>®</sup>, consideram apenas os harmônicos individuais de múltiplos inteiros (h2, h3, h4, h5, h6,...), 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 16<sup>a</sup> 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 25<sup>a</sup> 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 5<sup>a</sup> 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 3.14 – Corrente no FEA no Final da corrida – FEA (FC).



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<sub>rFEA</sub>, (b) i<sub>sFEA</sub>\*, (c) i<sub>tFEA</sub>.



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)  $i_{rFEA}$ , (b)  $i_{sFEA}^{*}$ , (c)  $i_{tFEA}$ .

As tabelas lateralmente às Figuras 3.15 e 3.16 objetivam mostrar, através do agrupamento de freqüências por faixa (ex. 181 a 239), a contribuição total de interharmônicos 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<sup>a</sup> 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 25<sup>a</sup> 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<sup>a</sup> 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 3.18 - Corrente no sistema de filtragem passiva - FEA (FC).



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*<sub>rF</sub>, (b) *i*<sub>sF</sub>\*, (c) *i*<sub>tF</sub>.



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 freqüências por faixa (ex. 151 a 179), a contribuição total de interharmônicos 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 16<sup>a</sup> harmônica, objetivando a melhor visualização dos harmônicos e inter-harmônicos de menor ordem, que foram as freqüências significativas, para esta avaliação foram considerados os espectros dos harmônicos medidos até a 25<sup>a</sup> 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 freqüências correspondentes a 3<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> harmônicas, como era esperado, uma vez que são freqüências 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 3.22 – Corrente no Transformador T30 (PAC) – FEA (FC).



Amplitude média entre fases: 881,4 A
Taxa de distorção harmônica média
s 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<sub>rT</sub>\*, (b) i<sub>sT</sub>\*, (c) i<sub>tT</sub>\*.



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<sub>rT</sub>\*, (b) i<sub>sT</sub>\*, (c) i<sub>tT</sub>\*.

As tabelas lateralmente às Figuras 3.23 e 3.24 objetivam mostrar, através do agrupamento de freqüências por faixa (ex. 151 a 179), a contribuição total de interharmônicos 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<sup>a</sup> harmônica, objetivando a melhor visualização das harmônicos e inter-harmônicos de menor ordem, que foram as freqüências significativas, para esta avaliação foram considerados os espectros dos harmônicos medidos até a 25<sup>a</sup> 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<sub>i</sub>) 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<sup>a</sup>. 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 freqüências ou faixas de freqüência. 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 freqüência ou faixa de freqüência 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 freqüências 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 freqüências de sintonia do filtro passivo, a corrente no PAC é diminuída pela ação do próprio filtro. A amplificação harmônica ocorre para todas as freqüências e faixas de freqüência até 239 Hz, exceto nas freqüências 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 <sub>FEA</sub> (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 <sub>T</sub> (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 aos que foram encontrados diretamente superiores na simulação pelo Matlab/Simulink<sup>®</sup>, pois na definição da distorção total são considerados apenas os harmônicos de múltiplos inteiros (h2, h3, h4, h5, h6,...).

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 freqüência, 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<sup>®</sup>, 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<sup>®</sup>, 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<sub>p</sub>, 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<sup>®</sup>.

#### 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<sub>s</sub>) e o ângulo de potência (delta -  $\delta$ ) 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 (Vrn) a partir dos valores das tensões de linha medidas. A amplitude e ângulo da corrente no transformador T30 (Ir) 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<sup>®</sup>, 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 "Vrn" e "Ir" 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  $Z_{utot}$ ), que ao ser multiplicado pela corrente no transformador T30 (obtida pela corrente Ir), 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<sub>s</sub>" e pelo ângulo "delta -  $\delta$ ".

📓 Block Parameters: Fonte 🛛 🕐 🔀	
Three-Phase Source (mask) (link)	
Three-phase voltage source in series with RL branch.	
Parameters	
Phase-to-phase rms voltage (V):	
Phase angle of phase A (degrees):	
Frequency (Hz):	
60	
Internal connection: Yg	
Specify impedance using short-circuit level	
Source resistance (Ohms):	V 21 499 V
Ri Course industrant #D	$V_{S} = 51.488 \text{ V}$
ource inductance (n):	$\delta = 162^{\circ}$
	$R_i = 10^{-12} \Omega$
<u>QK</u> <u>C</u> ancel <u>H</u> elp <u>A</u> pply	
(a)	(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<sub>p</sub>, 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.

🗟 Block Parameters: Three-Phase Parallel RLC Branch 🛛 🔹 🔀
Three-Phase Parallel RLC Branch (mask) (link)
This block implements a three-phase parallel RLC branch.
Parameters
Resistance R (Ohms):
24.71
Inductance L (H):
6.36e-3
Capacitance C (F):
Measurements None
<u>UK</u> <u>Lancel</u> <u>H</u> elp <u>Apply</u>
(0)
(a)

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<sub>s</sub>. 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.

3	sep_fpassiv	o_atual_rev	_rev	
Vie	w Font Size			
•	Message Model error	Source Unknown	Reported by Simulink	Summary Error using ==> powersys\private\psb2sys>getAPQProblem:
Erro	or using ==> p	owersys\priva	te\psb2sys>g	etAPQ
Pro FEA	blem: The 'ph VControlled C	ase_A: Subsy urrent Source	(stem1) i blo I block.	ick is connected in series with the ' /Fonte Correntes
The of '	Inductance o /Fonte Corre	f 'phase_A: Su ntes FEA/Con	ibsystem1/ trolled Curren	' block cannot be connected in series with the current source it Source' block.
Sug	gestion: Add	a resistance i	in parallel with	n the ' /Fonte Correntes FEA/Controlled Current Source'
				Open Help Close

Figura 4.5 – Mensagem de erro gerada na simulação quando modelo estava com impedância Z<sub>s</sub>.



Figura 4.6 – Cálculo da corrente de curto-circuito I<sub>cc</sub> e respectiva impedância Z<sub>utot</sub> no PAC.

75

Zp =	Zs= Rs= Xs= <u>Rp.jX</u> Rp+j.X	Rs Rup+R Xup+X <u>p</u> x	+ J. Ruc-1 + Rut + Luc-1 + Xut + J Rp - j.) Rp - j.)	Ruc-: Xuc-2 (p	Xs => =>	Rs = Xs = j.Rp <sup>z</sup> .Xp	0,230282 2,374514 + Rp <sup>2</sup> + Xp <sup>2</sup>	Rp.Xp <sup>2</sup>	Rs	-777- ×s		=			_ Др		
							Faz	zendo :	Zs	=	Zp						
							Rs	+ J.	Xs	=	Rp.Xp <sup>z</sup>	+ J.	Rp <sup>z</sup> .Xp Rp <sup>z</sup> + Xp <sup>z</sup>				
						Tere	mos, termo a	atemnα	Rs	=	Rp.Xp <sup>2</sup> Rp <sup>2</sup> + Xp <sup>2</sup>	===>	(Rp <sup>z</sup> +Xp <sup>z</sup> ).Rs		=	Rp.Xp <sup>z</sup>	(1)
									Xs	=	Rp <sup>z</sup> .Xp Rp <sup>z</sup> + Xp <sup>z</sup>	===>	(Rp <sup>z</sup> +Xp <sup>z</sup> ).Xs		=	Rp <sup>z</sup> .Xp	(2)
								(1)/(2):	<u>Rs</u> Xs	=	<u>        Хр     </u> Rp	===>	Xp = _	Rs.Rp Xs	3		
								(3) em (1):	Rp	=	Xs <sup>z</sup> Rs	x	1 + (Rs/Xs) <sup>2</sup> )		(4)		
								entãα	Rp = Xp =	24,71467607 2,396846648	>	Хр	= 2.pi.f.L	===>	L=	0,00636	

Figura 4.7 – Cálculo de transformação da impedância série  $Z_s = Z_{utot}$  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 área de trabalho do Matlab, através na 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 Ts, 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.

🖬 Model Properties 🔹 🤶 🗙
Main Callbacks History Description
Model pre-load function:
Ts=100e-6; ExcelTransfer_simulaC;
Model initialization function:
Ts=100e-6; ExcelTransfer_simulaC; kc≠-1;
Simulation start function:
Ts=100e-6; ExcelTransfer_simulaC;
Simulation stop function:
Model pre-save function:
Model close function:
<u>O</u> K <u>C</u> ancel <u>H</u> elp <u>Apply</u>

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 nãolinear. 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

Tabela 4.2 – Frequências de ressonância série.

paralela.

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



Freqüência (Hz)	Ζ (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



Figura 4.11 – Análise da ressonância paralela.





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<sub>sh</sub>/I<sub>lh</sub> e I<sub>fh</sub>/I<sub>lh</sub> 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).

$$\frac{I_{sh}}{I_{lh}} = \frac{Z_F}{Z_s + Z_F} \tag{4.1}$$

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

$$\frac{I_{sh}}{V_{sh}} = \frac{I_{fh}}{V_{sh}} = \frac{1}{Z_s + Z_F}$$
(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 freqüências 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<sub>sh</sub>/V<sub>sh</sub>.

### 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.

	Modelo V <sub>ab</sub>	Medição V <sub>rs</sub>	Desvio (%)	Modelo V <sub>bc</sub>	Medição V <sub>st</sub>	Desvio (%)	Modelo V <sub>ca</sub>	Medição V <sub>tr</sub>	Desvio (%)
Volts (rms)	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

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

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

$$\Delta(\%) = \frac{(V_{maior} - V_{menor})}{V_{maior}} x100$$
(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).

	Modelo i <sub>a</sub>	Medição i <sub>r</sub>	Desvio (%)	Modelo i <sub>b</sub>	Medição i <sub>s</sub> *	Desvio (%)	Modelo i <sub>c</sub>	Medição i <sub>t</sub>	Desvio (%)
Amperes ( <i>rms</i> )	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

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

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

$$\Delta(\%) = \frac{(i_{maior} - i_{menor})}{i_{maior}} x100$$
(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 freqüências 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.

# 5. FILTRAGEM HÍBRIDA SÉRIE E PARALELA

Tendo em vista o fenômeno da amplificação harmônica no sistema elétrico do FEA devido às ressonâncias paralela e série, consequentes dos filtros passivos em operação, e também a possibilidade de melhorar a distorção harmônica, sobretudo a de corrente, que é gerada a partir do Forno Elétrico a Arco, torna-se necessário um estudo para apontar alternativas para melhorar esta situação. Os filtros híbridos são apontados como uma possível solução para amortecimento da ressonância e compensação harmônica, com uma melhor eficiência e de menor custo. Assim sendo, neste capítulo será apresentado um estudo sobre filtros híbridos, mostrando as configurações mais aplicadas, as técnicas de controle utilizadas, e destacando os principais pontos, favoráveis e desfavoráveis, nas aplicações.

### 5.1. OS FILTROS HÍBRIDOS

Os filtros híbridos de potência alcançaram um espaço de destaque com a sua tecnologia que têm evoluído continuamente para a compensação de tensão e principalmente a compensação de corrente em diferentes tipos de cargas não-lineares. Os filtros híbridos tem se tornado uma alternativa interessante para compensação em sistemas industriais de elevada potência porque combinam as vantagens dos filtros passivos com as vantagens da aplicação dos filtros ativos. Diversas topologias alternativas foram desenvolvidas com o foco na melhoria da qualidade da energia elétrica de cargas não-lineares, dentre as quais se destacam os pioneiros filtros passivos, os filtros ativos operando como fonte de corrente ou fonte de tensão, e os filtros híbridos série ou paralelo. Aplicações de filtragem híbrida são constituídas com o princípio de eliminação das maiores parcelas de distorção harmônica pelo filtro passivo e eliminação de boa parte das parcelas pelo filtro ativo.

Filtros passivos consistindo de bancos L-C sintonizados, vêm sendo utilizados largamente por um longo tempo, conectados em paralelo com a carga, provendo assim um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas de cargas não-lineares, como Fornos Elétricos a Arco. Os filtros passivos também podem ser

conectados em série com a rede elétrica, bloqueando as parcelas não-lineares da carga, criando assim um amortecimento em série com a fonte de tensão. Entretanto os filtros passivos possuem limitações como compensação fixa e ressonância com a rede elétrica, que são eliminados através do uso de filtros ativos [6].

Os filtros ativos puros foram desenvolvidos para compensar as desvantagens dos filtros passivos, provendo um excelente desempenho para a compensação de distorções. Porém, estes são mais caros em aplicações de elevada potência, com custos altos de construção e de operação [21]. Por um lado, em alguns casos, é possível reduzir o tamanho do filtro ativo em comparação com a utilização de um filtro ativo paralelo puro.

Os filtros híbridos são considerados a melhor opção para propiciar uma melhora na qualidade da energia elétrica, pois possuem a melhor relação custo benefício e são apontados como uma solução ideal para a compensação de cargas não-lineares, provendo desta forma um sistema elétrico livre de distúrbios harmônicos [22].

Uma das principais razões para o avanço dos filtros híbridos deve-se ao avanço da tecnologia dos elementos que compõe um filtro ativo, como as chaves semicondutoras de estado sólido com elevada frequência de chaveamento, como o MOSFET e o IGBT. O desenvolvimento de sensores de baixo custo propiciou a melhora da resposta e custo dos filtros híbridos. Sensores de efeito hall e amplificadores isolados têm tornado os filtros híbridos ainda mais acessíveis.

Outro fator importante para esta revolução dos filtros híbridos deve-se à evolução da tecnologia na área da microeletrônica. O desenvolvimento de processadores de sinais e de microcontroladores com baixo custo, alta precisão e rapidez, tornaram possível a implementação de algoritmos de controle complexos para o controle em tempo real, com preços acessíveis [23].

### 5.2. FILTRO HÍBRIDO SÉRIE

Um filtro híbrido série é composto pela conexão série de um filtro passivo e um filtro ativo, que por sua vez está conectado em paralelo à carga não-linear e ao sistema elétrico. Na Figura 5.1 é mostrada a topologia do filtro híbrido série.



Figura 5.1 – Topologia de um filtro híbrido série.

Com a conexão do filtro ativo é possível melhorar significativamente as características de compensação harmônica do sistema de filtragem passiva existente, eliminando as desvantagens da aplicação isolada do filtro ativo e passivo. Nesta configuração, o filtro passivo atua absorvendo as componentes não-lineares da carga e, em contrapartida, o filtro ativo atua como um isolador harmônico entre a rede elétrica e o filtro passivo, permitindo assim eliminar a ressonância harmônica no sistema elétrico [2]. Como a maior parte da tensão está aplicada sobre o filtro passivo, e o filtro ativo se comporta como um curto-circuito para a componente fundamental, consegue-se reduzir a sua potência nominal de forma significativa quando comparado ao filtro ativo puro. Como consequência, esta topologia torna-se atrativa, com baixo custo em aplicações de elevada potência na indústria [24], [25].

Com o avanço da Eletrônica de Potência, principalmente no que concerne às chaves semicondutoras com elevada capacidade de potência e chaveamento, como IGBT e IGCT, não há necessidade de um transformador para fazer o acoplamento entre o filtro ativo e o passivo, pois os inversores de média tensão existentes no

mercado suportam os níveis de tensão e corrente exigidos. Como consequência, muitos sistemas elétricos industriais que utilizam um sistema de filtragem passiva estariam aptos a compor esta topologia híbrida [26].

### 5.2.1. Controle do Filtro Híbrido Série

Para que o filtro híbrido série apresente funcionamento e desempenho adequados, o seu controle é um requisito fundamental. O controle do filtro ativo é composto por três módulos [25]:

- Método de detecção harmônica;
- Regulador de tensão no elo CC do inversor;
- Regulador de tensão PWM;

A Figura 5.2 mostra através de um diagrama de blocos a conexão entre os módulos de controle do filtro ativo, que compõem o filtro híbrido série.



Figura 5.2 – Controle do filtro híbrido série.

Onde:

 $V_t$  - Vetor tensão de entrada:  $[v_{ta} v_{tb} v_{tc}]^{T}$ 

V<sub>cc</sub> - Tensão no elo CC do inversor

I - Vetor corrente de entrada:  $[i_a i_b i_c]^T$ 

 $V_{B}^{*}$  - Vetor tensão para controle no capacitor:  $[v_{Ba}^{*}v_{Bb}^{*}v_{Bc}^{*}]^{T}$ 

 $V_{h}^{*}$  - Vetor tensão para compensação harmônica:  $[v_{ha}^{*}v_{hb}^{*}v_{hc}^{*}]^{T}$ 

 $V_{C}^{*}$  - Vetor tensão de referência para o filtro ativo:  $[v_{Ca}^{*}v_{Cb}^{*}v_{Cc}^{*}]^{T}$ 

### 5.2.1.1. Método de Detecção Harmônica

O método de detecção harmônica tem a capacidade de determinar características específicas das componentes harmônicas (frequência, amplitude, fase, tempo de duração) de um dado sinal de entrada (tensão ou corrente) [27]. A

eficiência na operação de um filtro híbrido série tem como fator determinante a implementação deste método.

A corrente de referência que é utilizada no controle do filtro ativo pode ser obtida por meio de vários algoritmos, que podem ser diferenciados pelos algoritmos no domínio da freqüência e no domínio do tempo. Os algoritmos no domínio da freqüência são identificados principalmente através do uso da transformada de Fourier reagrupada para prover um resultado mais rápido, reduzindo o número de cálculos e permitindo sua implementação em tempo real em microprocessadores. Existem, no entanto, algumas desvantagens, tais como: necessidade de filtro antialising, sincronização entre a amostra e a frequência fundamental, capacidade elevada de memória para armazenagem, complexidade computacional alta para implementação em DSP, e imprecisão dos resultados em condições transitórias.

Os algoritmos no domínio do tempo são mais rápidos, possuem uma estrutura mais simples, e com resultados mais eficazes quando comparados aos algoritmos no domínio da frequência. O método do eixo de referência síncrono (SRF - Synchronous Reference Frame) é ilustrado na Figura 5.3, sendo implementado no domínio do tempo. Este método tem a vantagem de ser imune a distorções de tensão provenientes da rede o que possibilita gerar correntes de referência com maior fidelidade ao conteúdo desejado a ser compensado [27].

Com o algoritmo no domínio do tempo, através de sensores, as correntes nas coordenadas abc são amostradas em um determinado ponto do sistema elétrico, e transformadas para as coordenadas dq0 no referencial síncrono, por meio da transformação de Park, conforme relação (5.1). Um PLL (Phase Locked Loop) trifásico é aplicado para a obtenção do ângulo de referência da frequência fundamental, que é necessário para efetuar o cálculo da transformação dq0 no referencial síncrono.



Figura 5.3 – Diagrama de blocos para detecção harmônica.

$$\begin{bmatrix} i_{d}^{e} \\ i_{q}^{e} \\ i_{0}^{e} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} sen \theta_{1} & sen(\theta_{1} - 2\pi/3) & sen(\theta_{1} + 2\pi/3) \\ \cos \theta_{1} & \cos(\theta_{1} - 2\pi/3) & \cos(\theta_{1} + 2\pi/3) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{a} \\ i_{b} \\ i_{c} \end{bmatrix}$$
(5.1)

Onde:

 $i_d^e, i_q^e, i_0^e$  - Correntes no referencial síncrono: de eixo direto, em quadratura e de sequência zero

 $i_a, i_b, i_c$  - Correntes nas fases a, b, c

 $\theta_1$  - Ângulo da transformação no referencial síncrono ( $\omega t_1$  do PLL)

Como o eixo dq gira com velocidade angular na frequência fundamental (60 Hz), as correntes fundamentais apresentam um nível CC e os componentes harmônicos apresentam um nível CA. Através de um filtro passa baixa (FPB) ocorre a separação da componente CC que posteriormente é subtraída das correntes  $i_d^e, i_q^e$  provenientes da transformação de Park, gerando-se as componentes harmônicas da corrente. A componente de sequência zero é nula a partir do sistema trifásico sendo considerado como do tipo equilibrado ou sem neutro.

O cálculo das correntes harmônicas de referência nas coordenadas a,b,c é feito através da transformação inversa de Park (5.2). As tensões harmônicas de referência a serem aplicadas pelo inversor são obtidas multiplicando as correntes harmônicas pelo ganho K<sub>v</sub> do filtro híbrido série. A necessidade de aplicação de um

PLL é uma desvantagem da utilização do eixo de referência síncrono para se obter o ângulo da transformação  $\theta_1$ .

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{a} \\ \dot{i}_{b} \\ \dot{i}_{c} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} sen\theta_{1} & \cos\theta_{1} & 1 \\ sen(\theta_{1} - 2\pi/3) & \cos(\theta_{1} - 2\pi/3) & 1 \\ sen(\theta_{1} + 2\pi/3) & \cos(\theta_{1} + 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{d}^{e} \\ \dot{i}_{q}^{e} \\ \dot{i}_{0}^{e} \end{bmatrix}$$
(5.2)

#### 5.2.1.2. Controle de Tensão do Capacitor

Para o funcionamento de um filtro híbrido série é fundamental ocorrer um controle eficiente da tensão no elo CC do inversor. Ao longo do processo de compensação harmônica, a tensão CC no capacitor irá variar com um nível de oscilação devido às perdas elétricas no inversor e ao consumo de uma potência harmônica ativa, pois nesta topologia um resistor fictício é emulado [24], [25].

O controle de tensão no capacitor pode ser visualizado na Figura 5.4, conforme apresentado em [28]. O filtro ativo pode controlar a tensão no elo CC do inversor sem a necessidade de uma fonte externa de tensão. Uma forma de drenar uma potência ativa e manter a tensão constante no elo CC pode ser implementada injetando uma tensão na frequência fundamental, em fase com a corrente adiantada que circula pelo filtro híbrido série [25]. Um excesso de absorção de potência ativa pode elevar de forma danosa a tensão no capacitor, danificando o filtro ativo. Da mesma forma, a falta de potência ativa pode reduzir a tensão e impedir a compensação harmônica do filtro híbrido série [28].



Figura 5.4 – Controle de tensão no elo CC do inversor no filtro híbrido série.

A comparação da tensão de referência com a tensão no capacitor gera um erro que por sua vez é multiplicado por um ganho proporcional, com isso uma tensão em quadratura no referencial síncrono é gerada. Em seguida é aplicada a transformação inversa de Park no referencial síncrono e uma tensão de referência é gerada para o inversor. Multiplicando a tensão em fase do inversor com a corrente adiantada do filtro híbrido série implica na absolvição de uma potência ativa nos terminais do inversor que mantém o capacitor carregado.

#### 5.2.1.3. Regulador de Tensão PWM

Como último passo há necessidade de geração dos sinais de controle do filtro ativo integrante do conjunto híbrido série. Conforme apresentado na Figura 5.2, os sinais provenientes do método de detecção harmônica e da malha de controle do elo CC são somados, gerando um sinal de referência de tensão a ser sintetizado pelo inversor trifásico. Este sinal é comparado com uma onda triangular que possui certa frequência de chaveamento, gerando com isso um sinal característico para disparar o chaveamento do inversor trifásico.

Geralmente adota-se a frequência de chaveamento do inversor, como sendo dez vezes a máxima frequência da componente harmônica que se deseja compensar no sistema [28].

#### 5.2.2. Princípio de Compensação

Na topologia de um filtro híbrido série, o filtro ativo é comumente implementado por meio de um inversor do tipo fonte de tensão, gerando em seus terminais uma tensão controlada por uma corrente ou tensão.

Foi realizada por Antunes em [23] uma ampla pesquisa na literatura sobre a aplicação de filtros híbridos série para a compensação harmônica e amortecimento da ressonância. Foram encontradas diversas formas de se controlar a tensão na saída do filtro ativo, sendo estas bem específicas com a configuração do filtro passivo (tipo sintonizado ou com vários estágios de filtragem). A seguir será apresentada a técnica de controle da tensão do filtro ativo escolhida para ser aplicada na simulação do filtro híbrido série em estudo. Esta técnica corresponde à técnica 3 que foi escolhida dentre as demais abordadas conjuntamente em [23].

Nesta técnica o filtro ativo produz uma tensão na terminação comum do filtro passivo, controlada pelas componentes harmônicas da corrente da rede elétrica, conforme a relação:

$$v_c(t) = K_V i_{sh}(t) \tag{5.3}$$

Onde:

v<sub>c</sub> – Tensão de compensação do filtro ativo

K<sub>V</sub> – Ganho do filtro híbrido série

ish – Componentes harmônicas da corrente na rede elétrica

A Figura 5.5 representa o circuito por fase de um sistema elétrico no qual está conectado o filtro híbrido série, considerando a carga elétrica como uma fonte de corrente.



Figura 5.5 – Representação por fase do sistema elétrico com filtro híbrido série para técnica 3.

Aplicando o Método das Malhas (Lei de Kirchoff das Tensões) ao circuito da Figura 5.5, pode-se expressar a componente da corrente da rede elétrica e do filtro híbrido série como:

$$i_{s} = \frac{1}{Z_{s} + Z_{F} + K_{V}} v_{s} + \frac{Z_{F}}{Z_{s} + Z_{F} + K_{V}} i_{L}$$
(5.4)

$$i_F = \frac{1}{Z_s + Z_F + K_V} v_s - \frac{(Z_s + K_V)}{Z_s + Z_F + K_V} i_L$$
(5.5)

- Ressonância paralela

Utilizando o Teorema da Superposição para avaliar a ressonância paralela, a partir do circuito elétrico da Figura 5.6(a), têm-se as seguintes relações:

$$Z_{eq} = \frac{v_{th}}{i_{lh}} = \frac{-Z_F Z_s}{Z_s + Z_F + K_V}$$
(5.6)



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<sub>v</sub>.

$$v_{th} = v_{sh} - Z_s i_{sh} = \frac{-Z_F Z_s}{Z_s + Z_F + K_V} i_{Lh}$$
(5.7)

$$i_{sh} = \frac{Z_F}{Z_s + Z_F + K_V} i_{Lh}$$
 (5.8)

$$i_{Fh} = \frac{-(Z_s + K_V)}{Z_s + Z_F + K_V} i_{Lh}$$
(5.9)

Com a conexão do filtro ativo os picos na impedância equivalente são amortecidos, pois agora  $|Z_F + Z_s + K_v| \neq 0$ . Logo a distorção de tensão nos terminais da carga é reduzida e não ocorre mais amplificação harmônica na corrente da rede elétrica e do filtro passivo.

A partir das expressões (5.8) e (5.9) pode-se verificar que as correntes obtidas são derivadas de forma similar a um divisor de corrente, uma técnica utilizada para análise de circuitos elétricos. Logo, o filtro ativo insere uma resistência em série com a impedância da rede, cujo valor é igual ao ganho do filtro híbrido série (K<sub>v</sub>). O circuito equivalente do sistema pode ser visualizado na Figura 5.6(b).

Com o ajuste do ganho do filtro híbrido série, de tal forma que  $K_V >> |Z_F+Z_s|$  a componente harmônica de corrente na rede torna-se aproximadamente igual a zero  $(i_{sh} \approx 0)$  e a corrente harmônica do filtro híbrido série é igual à corrente não-linear da carga, porém com sinal oposto  $(i_{Fh} = -i_{Lh})$ . Assim a impedância equivalente seria nula  $(Z_{eq} = 0)$  e não haveria distorção de tensão nos terminais da carga  $(v_{th} = 0)$ . Esta condição apresentada seria ideal, pois o ganho do filtro híbrido série seria muito

elevado, implicando em um filtro ativo de elevada potência nominal [2]. Importante ressaltar que um ganho elevado do filtro ativo pode levar a uma operação instável do filtro híbrido série [22].

Nesta técnica de controle o resistor K<sub>V</sub> emulado pelo filtro ativo, têm como função aumentar a impedância equivalente da rede elétrica vista pela carga nãolinear. Com isso, as componentes harmônicas da corrente são forçadas a fluir em direção ao caminho de menor impedância, que é a passagem pelo filtro passivo. Consequentemente, ocorre a redução da distorção harmônica de tensão provocada pela queda de tensão na impedância da rede. Além disso, o aumento da impedância equivalente da rede permite o amortecimento da ressonância paralela, melhorando as características de compensação harmônica do sistema de filtragem passiva.

- Ressonância Série

Utilizando o Teorema da Superposição para a análise da ressonância série, têm-se as principais relações (equações 5.10 a 5.12) a partir do circuito elétrico da Figura 5.7(a).



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<sub>v</sub>.

$$Z_{eq} = \frac{v_{sh}}{i_{sh}} = Z_s + Z_F + K_V$$
(5.10)

$$i_{sh} = i_{Fh} = \frac{1}{Z_s + Z_F + K_V} v_{sh}$$
(5.11)

$$v_{th} = \frac{Z_F + K_V}{Z_s + Z_F + K_V} v_{sh}$$
(5.12)

Ao conectar um filtro ativo este insere uma resistência em série com o sistema elétrico, cujo valor é igual a K<sub>V</sub>, conforme pode ser visto na Figura 5.7(b). Se o ganho do filtro for ajustado de forma que K<sub>V</sub> >>|Z<sub>F</sub> + Z<sub>s</sub>|, a impedância equivalente vista pelos terminais da fonte não terá mais pontos de mínima impedância, eliminando as correntes geradas devido à v<sub>sh</sub>. Desta forma, o fenômeno da ressonância série é amortecido.

Um filtro híbrido série ideal, com um ganho infinito, leva a obtenção de condições de operação em um sistema elétrico sem desvios, já que a tensão harmônica da rede seria igual à tensão harmônica nos terminais da carga ( $v_{th} = v_{sh}$ ) e as componentes harmônicas da corrente na rede elétrica tenderiam a zero ( $i_{sh} \approx 0$ ). Isto é, um filtro híbrido série amortece a ressonância harmônica e elimina todas as componentes harmônicas da corrente da carga não-linear, no entanto a característica da tensão distorcida na carga é inerente à operação do filtro.

## 5.3. APLICAÇÃO DO FILTRO HÍBRIDO SÉRIE NO SIST. ELÉTRICO DO FEA

Para se avaliar o desempenho de um filtro híbrido série no sistema elétrico do Forno Elétrico a Arco em estudo, foi implementada a simulação digital no Matlab/ Simulink<sup>®</sup>. O modelo do sistema elétrico do FEA é o mesmo apresentado no capítulo 4, porém com a adição de um filtro ativo ideal em série com o sistema de filtragem passiva existente.

Na simulação o filtro ativo atua como sendo uma fonte de tensão controlada por corrente e sem perdas. A tensão de referência gerada no filtro ativo é injetada no barramento de acoplamento ao sistema de filtragem passiva. Para o controle da tensão de saída do filtro ativo são utilizadas as componentes harmônicas de corrente da rede elétrica, conforme apresentado no item 5.2.2, pois com esta técnica de controle é possível amortecer a amplificação harmônica e incrementar as características de filtragem do filtro passivo. A Figura 5.8 ilustra como foi implementada a simulação digital do filtro híbrido série no Matlab/ Simulink<sup>®</sup>, mostrando o modelo com as divisões em blocos. Os blocos 1, 2 e 3 são os mesmos apresentados no capítulo 4, representando respectivamente a fonte de tensão do sistema elétrico, o Forno Elétrico a Arco, e o Filtro Passivo composto dos filtros sintonizados de 2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup>, 4<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> harmônicas. O bloco 4 representa o filtro ativo, que em conexão com o bloco 3 compõem o filtro híbrido série.



Figura 5.8 – Sistema Elétrico do FEA com filtro híbrido série no Matlab/ Simulink<sup>®</sup>.

A Figura 5.9 ilustra a composição dos blocos 3 e 4, onde o filtro passivo é apresentado somente com o intuito de mostrar os pontos de conexão trifásica com o filtro ativo ideal.



Figura 5.9 – Composição do Filtro híbrido série no Matlab/ Simulink<sup>®</sup>.

O filtro ativo ideal apresentado na Figura 5.9 possui os seguintes componentes:

PLL (Phase Locked Loop): é do tipo 3Ø, nativo do Simulink<sup>®</sup>, conforme mostrado na Figura 5.10. Na saída do bloco são gerados vetores unitários do tipo seno e cosseno com o ângulo derivado da frequência fundamental, utilizados na transformação dq no referencial síncrono.



Figura 5.10 – PLL trifásico.

 Detecção harmônica com algoritmo de controle tipo SRF ("Synchronous Reference Frame" - eixo de referência síncrona): conforme mostrado na Figura 5.11, as tensões de referência que devem ser sintetizadas pela fonte de tensão ideal são geradas a partir da multiplicação das correntes de referência pelo ganho do filtro híbrido série (K<sub>V</sub>).



Figura 5.11 – Método de detecção harmônica.

 Fonte de tensão trifásica controlada ideal: conforme mostrado na Figura 5.12.



Figura 5.12 - Fonte de tensão controlada trifásica.

### 5.3.1. Ganho do filtro híbrido série

O desempenho do filtro híbrido série na compensação harmônica e no amortecimento da ressonância paralela é avaliado através do cálculo do ganho "K<sub>v</sub>" do filtro híbrido série utilizando o método proposto por Akagi em [2]. Este método prevê que seja traçada a curva referente à expressão (5.8) e determinar por experimento o ganho obtido quando a curva mostrar que não existe mais amplificação harmônica no sistema elétrico. A Figura 5.13(a) ilustra esta curva para vários valores de ganho.



Figura 5.13 – Cálculo do ganho do filtro híbrido série: (a) I<sub>sh</sub>/I<sub>lh</sub>; (b) I<sub>fh</sub>/I<sub>lh</sub>; (c) Impedância equivalente vista pelos terminais do circuito FEA; (d) V<sub>th</sub>/I<sub>lh</sub>; (e) I<sub>sh</sub>/V<sub>sh</sub>

Utilizando um filtro ativo com  $K_v = 15$ , ocorre o amortecimento de toda a região onde há a amplificação harmônica. A curva traçada pela relação " $I_{sh}/I_{lh}$ " está sempre igual ou abaixo a 0 db, e a relação " $I_{fh}/I_{lh}$ " apresentada na Figura 5.13(b) é de uma curva situada em grande parte no 0 db, o que mostra que a amplificação harmônica é cancelada tanto para a corrente da rede elétrica quanto para a corrente do filtro passivo. Desta forma as componentes não-lineares da carga são forçadas a fluírem em direção ao filtro passivo, pois este possui as suas características de filtragem aprimoradas. Fica aparente que, para valores maiores de ganho, as componentes harmônicas da rede elétrica são ainda mais atenuadas, no entanto, quanto maior o ganho do filtro híbrido série maior será a potência nominal do filtro ativo.

As características de filtragem para freqüências mais elevadas, conforme pode ser verificado a partir da Figura 5.13(a), são muito similares para os ganhos de 0 a 45 db. Já com valor de ganho muito elevado (como K<sub>v</sub> = 150) a característica de filtragem é incrementada significativamente.

A Figura 5.13(c) ilustra a impedância equivalente vista pela carga não-linear conseqüente da atuação do filtro ativo. Para um ganho  $K_v = 15$  já é possível verificar um grande amortecimento dos picos de impedância nas frequências de ressonância paralela do sistema. À medida que a frequência aumenta junto com o aumento do ganho, a impedância equivalente vista pela carga é reduzida, o que faz com que toda a corrente harmônica da carga seja forçada a fluir para o filtro passivo. Com o amortecimento dos picos de impedância, ocorre também a redução da distorção de tensão no filtro passivo causada pela corrente da carga não-linear, conforme pode ser verificado na Figura 5.13(d).

Na análise da ressonância série, a Figura 5.13(e) mostra que, na utilização do filtro ativo, para todas as frequências, e para os ganhos analisados ( $K_v \neq 0$ ), a curva está sempre abaixo de 0 db, o que garante que a relação não atinge valores nulos e desta forma não existe nenhuma frequência de ressonância série que leve a fonte de tensão do sistema a uma condição de curto-circuito.

Com base em toda esta análise feita, a escolha de um ganho K<sub>v</sub>=15 para o filtro híbrido série garante que o sistema elétrico do FEA não ficará submetido à ocorrência de amplificação harmônica devido ao efeito da ressonância paralela e

série, bem como ocorrerá a atenuação das componentes harmônicas na rede elétrica a partir da melhora das características de desempenho do sistema de filtragem passiva.

### 5.3.2. Avaliação da simulação com Filtro Híbrido Série

A avaliação do desempenho do filtro híbrido série, utilizando o ganho K<sub>v</sub>=15 anteriormente definido, foi realizada por meio da comparação entre as distorções harmônicas de tensão e corrente obtidas no novo modelo simulado e as correspondentes distorções obtidas no modelo original do sistema elétrico do FEA. Deve-se lembrar que as análises representam a pior condição, isto é, FEA(IC).

A Figura 5.14 apresenta o perfil da distorção harmônica para a tensão de linha no PAC e a Tabela 5.1 mostra comparativamente os valores que representam a queda da Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT).

	V <sub>ab</sub>			Vab Vbc				$V_{ca}$		V- <sub>média</sub>		
	Sem filtro	Com filtro	Queda (%)	Sem filtro	Com filtro	Queda (%)	Sem filtro	Com filtro	Queda (%)	Sem filtro	Com filtro	Queda (%)
DTT (%)	0,35	0,20	43%	0,17	0,09	47%	0,32	0,18	44%	0,28	0,16	45%

Tabela 5.1 – Comparação das Tensões no PAC: Sem Filtro X Com Filtro.

A Figura 5.15 apresenta o perfil da distorção harmônica para a corrente de linha no PAC e a Tabela 5.2 mostra comparativamente os valores que representam a queda da Distorção Harmônica Total de Corrente (THDi).

Tabela 5.2 – Comparação das Correntes no PAC: Sem Filtro X Com Filtro.

	la			Ι <sub>b</sub>				I <sub>c</sub>		I- <sub>média</sub>		
	Sem filtro	Com filtro	Queda (%)	Sem filtro	Com filtro	Queda (%)	Sem filtro	Com filtro	Queda (%)	Sem filtro	Com filtro	Queda (%)
THDi (%)	1,26	0,61	52%	1,12	0,60	46%	1,46	0,50	66%	1,28	0,57	55%







As Figuras 5.16 e 5.17 apresentam as formas de onda da corrente no PAC (transformador T30) comparando o efeito do filtro híbrido série no sistema elétrico com a condição sem filtragem, onde pode ser visto que, apesar da grande variação entre fases que é uma condição inerente ao processo do FEA, a distorção da forma de onda é atenuada com o filtro híbrido série.



Figura 5.16 – Corrente no Transformador T30 (PAC) – sem filtro.



Figura 5.17 – Corrente no Transformador T30 (PAC) – com filtro híbrido série.

Conforme descrito anteriormente na análise da Figura 5.13(a), para freqüências maiores, acima da 5<sup>a</sup> harmônica, e com ganho K<sub>v</sub>< 45, a redução da amplitude das componentes harmônicas de corrente na rede elétrica é praticamente desprezível. Como o ganho do filtro ativo aplicado na simulação é K<sub>v</sub>=15, para freqüências acima de 300 Hz o filtro ativo realmente não melhora as características
de compensação harmônica do sistema de filtragem passiva. Nesta situação, para que o filtro ativo tenha impacto na redução das componentes harmônicas da carga, seria necessário aplicar um ganho  $K_v$  muito elevado, com isso aumentando consideravelmente a potência nominal do filtro ativo. Analisando os valores e espectros harmônicos de tensão e corrente no PAC, antes e depois da conexão do filtro ativo com ganho  $K_v$ =15, e tendo como base as tabelas 5.1 e 5.2 e as Figuras 5.14 e 5.15, verifica-se que as reduções médias das distorções harmônicas de tensão e corrente 45% e 55% respectivamente.

A Figura 5.18 tem o objetivo de verificar a tensão fase-neutro ao qual está submetido o filtro ativo, e a corrente de linha no filtro híbrido série.



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.

Conforme Akagi em [6], um filtro ativo, que integra um filtro híbrido série, pode ser dimensionamento através da equação (5.13) a seguir:

$$P_{FA} = \sqrt{3} \cdot \frac{V_{CC}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{FA}}{\sqrt{2}}$$
(5.13)

Onde: P<sub>FA</sub>– Potência do filtro ativo

V<sub>CC</sub> – Tensão no capacitor

IFA – Máximo valor de corrente no filtro ativo

Utilizando um inversor trifásico com modulação PWM a dois níveis, a tensão no capacitor pode ser considerada como sendo duas vezes a máxima tensão de fase do filtro ativo. Deve-se ressaltar que esta referência de cálculo tem o objetivo de servir somente como comparação com o modelo do filtro híbrido paralelo, já que na prática se sabe que um inversor a dois níveis não seria o mais indicado para o nível de tensão a que está submetido o filtro ativo. Nesta condição, o filtro ativo precisa estar dimensionado para atender à seguinte potência:

$$P_{FA} = \sqrt{3} \cdot \frac{(2 \times 18000)}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1900}{\sqrt{2}} = 59,2 \ MVA$$

Para possibilitar a redução em torno de 55% do conteúdo harmônico na corrente do sistema elétrico do Forno Elétrico a Arco, e também permitir a melhora das características do sistema de filtragem passiva, é requerido um filtro ativo de potência nominal igual a 59,2 MVA, que é uma potência muito alta em relação à potência aproximada de 43 MVA que o FEA estava operando durante as medições base deste trabalho. Lembrando que o filtro híbrido série já conta com uma potência de 48,6 MVA proveniente do conjunto de filtragem passiva.

Para se fazer uma correlação, com um ganho  $K_v=10$  no filtro ativo, a redução da distorção harmônica de corrente seria em torno de 40%, contando-se com uma potência nominal de 41 MVA no filtro ativo.

#### 5.3.3. Análise da Amplificação Harmônica com Filtro Híbrido Série

Analogamente à análise da amplificação harmônica realizada no item 3.4.10, que foi feita para o sistema elétrico do FEA na condição real de operação quando foi submetido a medições elétricas, neste tópico será feita a análise para o modelo com o filtro híbrido série que foi simulado.

As Tabelas 5.3 e 5.4 mostram, comparativamente, os valores das correntes no FEA e no PAC (transformador T30), no qual pode ser visto que, apesar de ter diminuído consideravelmente a quantidade, ainda foram encontradas algumas freqüências ou faixas de freqüências (em destaque) em que ocorre a amplificação harmônica, especialmente em algumas frequências próximas à fundamental (60Hz). Esta discordância de comportamento de filtragem em relação ao teórico visualizado na Figura 5.13-a merece ser analisada, e é proposto como continuidade ao estudo.

Tabela 5.3 – Corrente no FEA p/ Análise da Amplificação Harmônica (Filtro Série)

Amplitude média entre fases: 973 A

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

Hz	(%)	I <sub>FEA</sub> (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 5 <mark>9</mark> 9	0,87	8,48	
600 (h10)	0,06	0,55	
600,2 a 65 <mark>9</mark>	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 5.4 – Corrente no PAC p/ Análise da Amplificação Harmônica (Filtro Série)

Amplitude média entre fases: 771 ,5 A Taxa de distorção harmônica média das três fases: 0,57%

Hz	(%)	I <sub>T</sub> (A)	
0,2 a 19	14,26	110,00	
19,2 a 29	9,58	73,90	
29,2 a 39	9,50	73,27	
39,2 a 49	11,12	85,81	
49,2 a 54	10,33	79,68	
55	2,07	15,97	
56	1,74	13,42	
57	3,17	24,48	
58	5,76	44,44	
59	5,68	43,85	
60 (h1)	100,00	771,50	
60,2 a 70	37,13	286,43	
70,2 a 80	21,66	167,12	
80,2 a 100	9,31	71,80	
100,2 a 119	5,74	44,28	
120 (h2)	0,10	0,80	
120,2 a 150	4,62	35,68	
150,2 a 179	3,28	25,30	
180 (h3)	0,48	3,68	
180,2 a 239	3,49	26,89	
240 (h4)	0,06	0,49	
240,2 a 299	1,41	10,84	
300 (h5)	0,03	0,23	
300,2 a 359	0,48	3,68	
360 (h6)	0,04	0,33	
360,2 a 419	0,51	3,91	
420 (h7)	0,18	1,41	
420,2 a 479	0,55	4,27	
480 (h8)	0,02	0,18	
480,2 a 539	0,46	3,52	
540 (h9)	0,15	1,16	
540,2 a 599	0,47	3,66	
600 (h10)	0,03	0,23	
600,2 a 659	0,37	2,89	
660 (h11)	0,06	0,49	
660,2 a 719	0,38	2,90	
720 (h12)	0,01	0,08	
720,2 a 779	0,31	2,43	
780 (h13)	0,04	0,33	

Nas freqüências de sintonia do filtro passivo pode ser verificada a contribuição do filtro ativo através de uma maior redução da respectiva corrente no PAC,

comparando-se com os valores obtidos somente com a filtragem passiva (Tabela 3.11). Lembrando que todas as simulações e análises a partir do capítulo 4 são para a situação operacional de forno elétrico no início de corrida – FEA (IC).

## 5.4. FILTRO HÍBRIDO PARALELO

Um filtro híbrido paralelo é composto pela conexão paralela de um filtro ativo com o sistema de filtragem passiva, a carga não-linear e o sistema elétrico. Na Figura 5.19 é mostrada a topologia em análise. A compensação de reativos fundamentais e de harmônicas com frequência fixa é realizada pelo sistema de filtragem passiva, enquanto as componentes de frequência variável provenientes de cargas com grande variação dinâmica é realizada pelo filtro ativo. Desta forma, os sistemas de filtragem operam em cooperação, permitindo reduzir a capacidade nominal do filtro ativo [35].



Figura 5.19 – Filtro Híbrido Paralelo.

Para esta topologia híbrida paralela, o filtro passivo é um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas da carga, além da função de compensação de reativos na frequência fundamental. O filtro ativo funciona injetando correntes em fase oposta à da carga não linear, cancelando as harmônicas de forma parcial ou na sua totalidade [30]. Um filtro híbrido paralelo, além de realizar a compensação de reativos fundamentais e a compensação harmônica, pode

amortecer a ressonância harmônica em um sistema elétrico [31]. Um filtro híbrido paralelo possui outra função de destaque, além daquelas citadas neste parágrafo: a redução de Flicker na tensão [31]. Filtros ativos paralelos são extensivamente usados para compensar as harmônicas de corrente e potência reativa de cargas regulares, além disso, foi proposto para compensar variações irregulares da potência reativa de Fornos Elétricos a Arco e supressão de Flicker na tensão [33].

## 5.4.1. Controle do Filtro Híbrido Paralelo

O controle do filtro ativo é fundamental para o seu desempenho em um filtro híbrido paralelo. Há semelhança entre o controle do filtro ativo na topologia híbrida paralela e série, no entanto ressalta-se que na topologia híbrida paralela o filtro ativo atua operando como uma fonte de corrente controlada por corrente. Nesta topologia o filtro ativo é conectado em paralelo com a rede elétrica através de uma indutância, sendo normalmente implementado com um inversor do tipo fonte de tensão, o que permite injetar correntes de referência em fase oposta à que se desejar compensar.

O controle do filtro híbrido paralelo pode ser dividido em:

- Método de detecção harmônica;
- Regulador de tensão no elo CC do inversor;
- Regulador de corrente PWM;

Através de diagrama de blocos, a Figura 5.20 mostra como é feita a conexão entre os módulos de controle do filtro ativo que compõem o filtro híbrido paralelo.



Figura 5.20 – Controle do filtro híbrido paralelo.

Onde: V<sub>t</sub> - Vetor tensão de entrada: [v<sub>ta</sub> v<sub>tb</sub> v<sub>tc</sub>]<sup>T</sup>

V<sub>cc</sub> - Tensão no elo CC do inversor

I - Vetor corrente de entrada:  $[i_a i_b i_c]^T$ 

 $I_B^*$  - Vetor corrente para controle da tensão no capacitor:  $[i_{Ba}^* i_{Bb}^* i_{Bc}^*]^T$ 

 $I_{h}^{*}$  - Vetor corrente para compensação harmônica:  $[i_{ha}^{*} i_{hb}^{*} i_{hc}^{*}]^{T}$ 

 $I_{C}^{*}$  - Vetor corrente de referência para o filtro ativo:  $[i_{Ca}^{*} i_{Cb}^{*} i_{Cc}^{*}]^{T}$ 

#### 5.4.1.1. Método de Detecção Harmônica

O método de detecção harmônica tem a mesma implementação do filtro híbrido série, utilizando o Eixo de Referência Síncrona (SRF). As correntes de referência são geradas e multiplicadas pelo ganho do filtro híbrido paralelo (K<sub>a</sub>), para que possam ser posteriormente sintetizadas de forma parcial ou em sua totalidade pela fonte de corrente.

#### 5.4.1.2. Controle de tensão no capacitor

Também em um filtro híbrido paralelo, a tensão no elo CC do inversor deve ser mantida constante para que o filtro ativo cumpra a sua função na compensação harmônica. Uma forma muito comum de manter a tensão constante no capacitor pode ser obtida através da técnica apresentada na Figura 5.21.



Figura 5.21 – Controle de tensão no elo CC do inversor do filtro híbrido paralelo.

A comparação entre a tensão de referência e a tensão no capacitor gera um erro, que ao ser multiplicado por um ganho proporcional cria uma corrente de referência no eixo direto. Um controlador proporcional, como apresentado por Corasaniti em [34], poderá dar lugar a um controlador PI conforme citado por Akagi em [6]. Na sequência é usada a transformação inversa de Park para obtenção da corrente de referência, que está em fase com a tensão da rede, consequentemente o inversor irá absorver uma potência ativa, e com isso o capacitor será carregado.

#### 5.4.1.3. Regulador de corrente PWM

Um filtro ativo sofre influência direta na sua eficiência dos seguintes tópicos: método para definir as correntes harmônicas a serem compensadas, características de projeto do controlador de corrente, e técnica de modulação utilizada. A maioria das técnicas de modulação utilizadas em filtros ativos tipo fonte de corrente é baseada na estratégia PWM, sendo estas divididas em [32]:

- Amostragem periódica;
- Controle por portadora triangular;
- Controle por banda de histerese;
- Controle vetorial;

## 5.4.2. Princípio de compensação do filtro híbrido paralelo

Para análise do comportamento da conexão de um filtro híbrido paralelo em um sistema elétrico são apresentadas três técnicas para o controle da corrente de saída do filtro ativo, conforme exposto por Shimamura em [4]. Em todos os casos o filtro ativo é implementado como uma fonte de corrente, controlada pelas parcelas harmônicas de corrente de um ponto do sistema elétrico.

A Figura 5.22 representa o sistema elétrico por fase, ao qual está conectado o filtro híbrido paralelo.



Figura 5.22- Filtro híbrido paralelo conectado ao sistema elétrico.

Utilizando o Teorema da Superposição, admitindo a carga não-linear como única fonte geradora de correntes harmônicas, têm-se o sistema elétrico ilustrado conforme a Figura 5.23 para a análise da ressonância paralela.



Figura 5.23 – Circuito elétrico com filtro híbrido paralelo para avaliação da ressonância paralela.

Para a análise da ressonância série é utilizado o circuito da Figura 5.24, sendo considerada a fonte da rede elétrica como única fonte poluidora da rede elétrica, com a corrente de carga igual a zero.



Figura 5.24 - Circuito elétrico com filtro híbrido paralelo para avaliação da ressonância série.

As relações 5.14, 5.15 e 5.16 apresentam as técnicas de controle 1, 2 e 3 respectivamente, onde o filtro ativo é implementado usando uma fonte de corrente controlada pelas próprias parcelas harmônicas da corrente de um ponto do sistema.

$$\dot{i}_{FA}(t) = K_a \cdot \dot{i}_{Lh}(t) \tag{5.14}$$

$$i_{FA}(t) = K_a \cdot \dot{I}_{Lh}(t)$$
 (5.15)

$$i_{FA}(t) = K_a \cdot i_{sh}(t) \tag{5.16}$$

Onde:

 $i_{FA}(t)$  - Corrente de compensação harmônica do filtro ativo

*K<sub>a</sub>* - Ganho do filtro híbrido paralelo

 $i_{Lh}(t)$  - Componente de corrente harmônica da carga

 $\dot{t}_{Lh}(t)$  - Soma das componentes harmônicas de corrente de carga e do filtro passivo

$$i_{sh}(t)$$
 - Componente harmônica da rede elétrica

A seguir será apresentada a técnica de controle da tensão do filtro ativo escolhida para ser aplicada na simulação do filtro híbrido série em estudo. Esta técnica corresponde à técnica 1 que foi escolhida dentre as demais abordadas conjuntamente por Antunes em [23], já que, conforme será visto na seção 5.5, esta foi a técnica que apresentou o melhor resultado na redução das distorções harmônicas.

Na técnica 1, as parcelas harmônicas de corrente da carga elétrica são extraídas utilizando o método de detecção harmônica apresentado na seção 5.4.1.1 (eixo de referência síncrono – SRF). A partir da Figura 5.22, utilizando o Método das Malhas (Lei de Kirchoff das tensões) são obtidas a corrente da rede elétrica e do filtro passivo:

$$i_{s} = \frac{1}{Z_{s} + Z_{F}} v_{s} + \frac{(1 - K_{a})Z_{F}}{Z_{s} + Z_{F}} i_{L}$$
(5.17)

$$i_F = \frac{1}{Z_s + Z_F} v_s - \frac{(1 - K_a)Z_s}{Z_s + Z_F} i_L$$
(5.18)

Na análise da ressonância paralela conforme Figura 5.23, para a técnica 1 são válidas as seguintes relações:

$$Z_{eq} = \frac{v_{th}}{i_{th}} = \frac{-Z_s Z_F (1 - K_a)}{Z_s + Z_F}$$
(5.19)

$$v_{th} = v_{sh} - Z_s i_{sh} = \frac{-Z_s Z_F (1 - K_a)}{Z_s + Z_F} i_{Lh}$$
(5.20)

$$i_{sh} = \frac{(1 - K_a)Z_F}{Z_s + Z_F} i_{Lh}$$
(5.21)

$$i_{Fh} = -\frac{(1 - K_a)Z_s}{Z_s + Z_F} i_{Lh}$$
(5.22)

Conectando-se um filtro ativo com um ganho K<sub>a</sub> situado entre 0 e 1, ocorre o amortecimento dos picos de impedância vista pelos terminais da carga (5.19), reduzindo também a distorção de tensão nos terminais do filtro passivo (5.20), e eliminando-se a amplificação harmônica da corrente da rede elétrica (5.21) e do filtro passivo (5.22). Consequentemente, o filtro ativo amortece a ressonância paralela no sistema elétrico.

Sendo o ganho K<sub>a</sub> unitário, é possível obter valores nulos para a impedância equivalente (Z<sub>eq</sub>) e para a distorção harmônica de tensão nos terminais da carga

(V<sub>th</sub>). Analogamente, as correntes harmônicas da rede elétrica e do filtro passivo também serão iguais a zero, pois todas serão absorvidas pelo filtro ativo. Desta forma o filtro passivo passa a ser um compensador de reativos fundamentais.

Na análise da ressonância série conforme Figura 5.24, para a técnica 1, onde o filtro ativo é inoperante devido à condição de desativação da carga, são válidas as seguintes relações:

$$Z_{eq} = \frac{v_{sh}}{i_{sh}} = Z_s + Z_F$$
(5.23)

$$\dot{i}_{sh} = \dot{i}_{Fh} = \frac{1}{Z_s + Z_F} v_{sh}$$
(5.24)

$$v_{th} = v_{sh} - Z_s i_{sh} = \frac{-Z_s}{Z_s + Z_F} i_{Lh}$$
(5.25)

Como é possível obter  $|Z_s + Z_F| \approx 0$  para uma ou várias frequências, então o fenômeno da ressonância série não é amortecido com o controle do filtro ativo apresentado, sendo esta uma desvantagem desta técnica.

## 5.5. APLICAÇÃO DO FILTRO HÍBRIDO PARALELO NO SIST. ELÉTRICO DO FEA

Para se avaliar o desempenho de um filtro híbrido paralelo no sistema elétrico do Forno Elétrico a Arco em estudo, é implementada a simulação digital no Matlab/ Simulink®. O modelo do sistema elétrico do FEA é o mesmo apresentado no capítulo 4, porém com a adição de um filtro ativo ideal em paralelo com o sistema de filtragem passiva existente e com o Forno Elétrico a Arco (FEA).

O modelo implementado também adota o filtro ativo como sendo uma fonte de corrente controlada por corrente e sem perdas. A corrente de referência gerada no filtro ativo é injetada diretamente no barramento do Ponto de Acoplamento Comum (PAC), na tensão de 33 kV. O controle da corrente de saída do filtro ativo é realizado através de uma das três técnicas, conforme anteriormente descrito em 5.4.2. Para isto, foram feitas simulações para as três condições de

utilização das componentes harmônicas de corrente: corrente da carga elétrica FEA, corrente da soma do filtro passivo com a carga FEA, e corrente da fonte do sistema.

A Figura 5.25 ilustra como foi implementada a simulação digital do filtro híbrido paralelo no Matlab/ Simulink<sup>®</sup>, mostrando o modelo com as divisões em blocos. Os blocos 1, 2 e 3 são os mesmos apresentados no capítulo 4, representando respectivamente a fonte de tensão do sistema elétrico, o Forno Elétrico a Arco, e o Filtro Passivo composto dos filtros sintonizados de 2ª, 3ª, 4ª e 5ª harmônicas. O bloco 4 representa o filtro ativo, que conectado ao mesmo barramento do PAC que está conectado o bloco 3, compõem o filtro híbrido paralelo.



Figura 5.25 – Sistema Elétrico do FEA com filtro híbrido paralelo no Matlab/ Simulink<sup>®</sup>.

A Figura 5.26 ilustra a composição do bloco 4, referente ao filtro ativo ideal. Onde se vê a medição de corrente "labc\_B2" como sinal de entrada no bloco de Controle SRF, refere-se à aplicação da técnica de controle 1 através da utilização da corrente da carga FEA que flui pela barra B2 mostrada na Figura 5.25.



Figura 5.26 – Composição do Filtro Ativo no Matlab/ Simulink<sup>®</sup>.

O filtro ativo ideal apresentado na Figura 5.26 é composto por:

- PLL
- Método de detecção harmônica com algoritmo de controle do tipo SRF ("Synchronous Reference Frame" - eixo de referência síncrona)
- Fonte de corrente controlada do tipo ideal

Tanto o PLL quanto o método de detecção harmônica são os mesmos que foram implementados no filtro híbrido série. Ocorre somente uma diferença, onde as correntes geradas pelo método de detecção harmônica são multiplicadas por um ganho K<sub>a</sub>, e então utilizadas como referência para a fonte de corrente controlada.

A fonte de corrente controlada ideal pode ser visualizada na Figura 5.27.



Figura 5.27 – Fonte de corrente controlada trifásica.

#### 5.5.1. Avaliação da simulação com Filtro Híbrido Paralelo

A avaliação do desempenho do filtro híbrido paralelo foi realizada por meio da comparação das distorções harmônicas de tensão e corrente medidas no PAC obtidas no novo modelo simulado aplicando-se as três técnicas de controle citadas na secção 5.4.2. A tabela 5.5 mostra os valores comparativamente obtidos nas simulações das três técnicas, utilizando-se três valores de ganho "K<sub>a</sub>" para cada técnica de controle.

DTT (%)		$V_{ab}$			V <sub>bc</sub>			$V_{ca}$			V-média	
Ganho-K <sub>a</sub>	T-1	T-2	T-3	T-1	T-2	T-3	T-1	T-2	T-3	T-1	T-2	T-3
0,6	0,14	0,26	0,31	0,07	0,13	0,16	0,12	0,25	0,29	0,11	0,21	0,25
0,8	0,07	0,19	0,30	0,03	0,10	0,15	0,06	0,18	0,28	0,05	0,16	0,24
1,0	0,01	0,06	0,29	0,01	0,05	0,15	0,01	0,06	0,27	0,01	0,06	0,24
THDi (%)		la			l <sub>b</sub>			lc			l- <sub>média</sub>	
THDi (%) Ganho-K <sub>a</sub>	T-1	l <sub>a</sub> T-2	T-3	T-1	I₀ T-2	T-3	T-1	I <sub>c</sub> T-2	T-3	T-1	I- <sub>média</sub> T-2	T-3
THDi (%) Ganho-K <sub>a</sub> 0,6	T-1 0,65	l <sub>a</sub> T-2 1,25	T-3 1,32	T-1 0,46	I <sub>b</sub> T-2 0,92	T-3 1,04	T-1 0,52	I <sub>c</sub> T-2 1,00	T-3 1,22	T-1 0,54	I- <sub>média</sub> T-2 1,06	T-3 1,19
THDi (%)           Ganho-K <sub>a</sub> 0,6           0,8	T-1 0,65 0,38	l <sub>a</sub> T-2 1,25 1,01	T-3 1,32 1,31	T-1 0,46 0,24	I <sub>b</sub> T-2 0,92 0,69	T-3 1,04 1,01	T-1 0,52 0,28	I₀ T-2 1,00 0,73	T-3 1,22 1,18	T-1 0,54 0,30	I- <sub>média</sub> T-2 1,06 0,81	T-3 1,19 1,17

Tabela 5.5 – Comparação das Distorções Harmônicas entre as 3 técnicas de controle

Conforme resultados apresentados na tabela 5.5, a técnica de controle 1 possui a maior redução das distorções harmônicas de tensão e corrente na aplicação do filtro híbrido paralelo. Os valores obtidos com a técnica 1 são cerca de 50% menores que a técnica 2, que resultou na segunda maior redução.

Os valores de distorção harmônica de tensão e corrente obtidos com a técnica 1 e com ganho  $K_a=0,6$  são aproximadamente equivalentes aos valores obtidos com o filtro híbrido série que foi selecionado na secção 5.3.2, desta forma será considerada a análise comparativa para esta condição.

A Figura 5.28 apresenta o perfil da distorção harmônica para a tensão de linha no PAC, e a Figura 5.29 apresenta o perfil da distorção harmônica para a corrente de linha no PAC.

Avaliando o espectro harmônico da corrente no PAC sem e com a conexão do filtro ativo paralelo, conforme Figura 5.29, percebe-se a redução do conteúdo harmônico da fundamental até a quinta harmônica, incluindo os sub-harmônicos e inter-harmônicos. Acima do quinto harmônico as componentes harmônicas têm sua amplitude reduzida significativamente, sendo praticamente eliminadas, o que comprova o bom desempenho do filtro híbrido paralelo na compensação harmônica em freqüências mais altas.







As Figuras 5.30 e 5.31 apresentam as formas de onda da corrente no PAC (transformador T30) comparando o efeito do filtro híbrido paralelo no sistema elétrico com a condição sem filtragem, onde pode ser visto que, apesar da grande variação entre fases que é uma condição inerente ao processo do FEA, a distorção da forma de onda é atenuada com o filtro híbrido paralelo.



Figura 5.30 – Corrente no Transformador T30 (PAC) – sem filtro.





Na Figura 5.32 é ilustrada a corrente no filtro passivo e na Figura 5.33 é apresentada a corrente no filtro ativo. A simulação completa dura 5 s, e o filtro ativo é habilitado a operar em t = 0.5 s.









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).



Figura 5.34 – Correntes no filtro passivo antes da entrada do filtro ativo (t < 0,5s) Corrente no Filtro Passivo



Figura 5.35 – Correntes no filtro passivo após a entrada do filtro ativo (t > 0,5s)



Verificando as Figuras 5.32, 5.33, 5.34, 5.35 e 5.36, é possível constatar a diferença de comportamento do Filtro Passivo antes a após a entrada do Filtro Ativo, que ocorre no instante t=0,5 s, quando a forma de onda da corrente torna-se visivelmente mais estável. O espectro harmônico da corrente no filtro passivo mostra que a amplificação harmônica tem a sua amplitude amortecida devido ao papel do filtro ativo que entra absorvendo grande parte das parcelas harmônicas de corrente, o que pode ser constatado pelo espectro harmônico da corrente no filtro ativo, atingindo níveis elevados de amplificação harmônica. A partir daí o filtro passivo funciona em sua maior parte como um compensador de reativos fundamentais.

Conforme descrito por Akagi em [6], um filtro ativo, componente de um filtro híbrido paralelo, é dimensionado seguindo a seguinte equação:

$$P_{FA} = \sqrt{3} \cdot \frac{V_{CC}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{FA}}{\sqrt{2}}$$
(5.26)

Utilizando um inversor trifásico com modulação PWM a dois níveis, a tensão no capacitor deve ser maior que a máxima tensão de pico entre fases nos terminais do inversor. Deve-se ressaltar que esta referência de cálculo tem o objetivo de servir somente como comparação com o modelo do filtro híbrido série, já que na prática se sabe que um inversor a dois níveis não seria o mais indicado para o nível de tensão a que está submetido o filtro ativo. Com isso, o filtro ativo precisa estar dimensionado para atender a seguinte potência:

$$P_{FA} = \sqrt{3} \cdot 33k \cdot \frac{760}{\sqrt{2}} = 30,7 \ MVA$$

Com um filtro ativo em paralelo de capacidade nominal igual a 30,7 MVA, o que representaria 71% da potência aproximada de 43 MVA que o FEA estava operando durante as medições base deste trabalho, é possível reduzir a Distorção Harmônica no sistema elétrico do Forno a Arco em cerca de 58% para a corrente e em cerca de 61% para a tensão.

#### 5.5.2. Avaliação da Ressonância Paralela

Conforme descrito na secção 5.4.2, o fenômeno da ressonância série não é amortecido com o controle do filtro ativo utilizando-se a técnica 1. Desta forma, não será nem avaliado o comportamento do sistema frente à ressonância série.

O desempenho do filtro híbrido paralelo no amortecimento da ressonância paralela é avaliado utilizando-se as relações  $I_{sh}/I_{lh}$  e  $I_{Fh}/I_{lh}$ , obtidas para a técnica 1, que controla a corrente de saída do filtro ativo a partir das parcelas harmônicas da corrente de carga. Utilizando as equações (5.19), (5.20), (5.21) e (5.22), foram obtidos os valores do sistema em estudo, e com isso foi possível traçar a Figura 5.37 com as relações  $i_{sh}/i_{lh}$  (a),  $i_{fh}/i_{lh}$  (b),  $Z_{eq}$  (c) e  $v_{th}/i_{lh}$  (d), para alguns valores de ganho do filtro ativo.



Figura 5.37 – Cálculo do ganho do filtro híbrido paralelo com a técnica 1: (a) I<sub>sh</sub>/I<sub>lh</sub>; (b) I<sub>fh</sub>/I<sub>lh</sub>; (c) Impedância equivalente vista pelos terminais do FEA (Zeq); (d) V<sub>th</sub>/I<sub>lh</sub>

Analisando a Figura 5.37, verifica-se que com esta técnica de controle pode ocorrer amplificação harmônica em algumas faixas de freqüência, tanto na corrente da rede elétrica ( $I_{sh}/I_{lh}$ ) quanto na corrente do sistema de filtragem passiva ( $I_{fh}/I_{lh}$ ), para os diversos valores de ganhos K<sub>a</sub> que foram considerados, exceto o ganho unitário que permite eliminar a amplificação harmônica na sua totalidade, já que todo o traçado da curva fica bem abaixo do 0 db. Vale ressaltar que as faixas de freqüência acima de 0 db são as mesmas faixas apresentadas na secção 4.2 onde ocorre a amplificação harmônica para o modelo do sistema elétrico sem filtro ativo. No entanto, ao ser dado um zoom nestas faixas de freqüência onde ocorre a amplificação harmônica, é possível verificar que a faixa reduz significativamente com a aplicação do filtro ativo em relação à condição sem filtro (K<sub>a</sub>=0), sendo a diferença

muito pequena entre o ganho escolhido na secção 5.5.1 ( $K_a=0,6$ ) e os demais ganhos.

O filtro ativo, ao injetar no sistema elétrico, correntes harmônicas em fase oposta à da carga não-linear, faz com que ocorra a redução da impedância equivalente vista pelos terminais da carga, conforme ilustrado na Figura 5.37(c), reduzindo com isso os picos de impedância também com um ganho K<sub>a</sub>=0,6. Desta forma minimiza-se o aumento da distorção de tensão nos terminais da carga, causada pela interação entre os picos de impedância e a corrente na carga não-linear, como pode ser visto na Figura 5.37(d).

O filtro ativo configurado com um ganho unitário (K<sub>a</sub>=1) acabaria compensando todas as parcelas de corrente da carga não-linear e com isso a impedância equivalente vista pelos terminais da carga seria nula, fazendo com que a distorção de tensão, proveniente da interação da impedância com a corrente da carga, também fosse eliminada. Consequentemente, o filtro passivo atuaria apenas como um compensador de reativos na freqüência fundamental, tornando o filtro ativo de potência nominal muito elevada, o que faria a sua aplicação ficar na prática inviável.

#### 5.5.3. Análise da Amplificação Harmônica com Filtro Híbrido Paralelo

As Tabelas 5.6 e 5.7 mostram, comparativamente, os valores das correntes no FEA e no PAC (transformador T30) para análise da amplificação harmônica.

As tabelas mostram que, como não ocorre aumento da corrente no PAC em relação à corrente no FEA, exceto para uma única frequência (57 Hz) isoladamente, pode-se dizer que a aplicação do filtro híbrido paralelo não acarreta amplificação harmônica no sistema. Como a avaliação da ressonância paralela (item 5.5.2) mostra que ocorre amplificação harmônica para algumas faixas de freqüência, esta discordância de comportamento de filtragem da simulação em relação ao teórico visualizado na Figura 5.37-a merece ser analisada, e é proposto como continuidade ao estudo.

Tabela 5.6 – Corrente no FEA p/ Análise da Amp. Harmônica (Filtro Paralelo)

#### Amplitude média entre fases: 973 A

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

	(		
Hz	(%)	I <sub>FEA</sub> (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 5.7 – Corrente no PAC p/ Análise da Amp. Harmônica (Filtro Paralelo)

#### Amplitude média entre fases: 732,2 A

Taxa de distorção harmônica média das três fases: 0,54%

Hz	(%)	I <sub>T</sub> (A)	
0,2 a 19	4,68	34,24	
19,2 a 29	4,44	32,53	
29,2 a 39	6,59	48,29	
39,2 a 49	10,08	73,82	
49,2 a 54	9,58	70,13	
55	1,81	13,25	
56	0,90	6,57	
57	3,39	24,82	
58	3,13	22,94	
59	3,10	22,72	
60 (h1)	100,00	732,20	
60,2 a 70	30,10	220,36	
70,2 a 80	10,96	80,28	
80,2 a 100	8,03	58,78	
100,2 a 119	5,84	42,75	
120 (h2)	0,16	1,15	
120,2 a 150	2,66	19,44	
150,2 a 179	3,51	25,73	
180 (h3)	0,49	3,59	
180,2 a 239	2,55	18,64	
240 (h4)	0,05	0,34	
240,2 a 299	1,14	8,33	
300 (h5)	0,02	0,15	
300,2 a 359	0,43	3,15	
360 (h6)	0,04	0,27	
360,2 a 419	0,40	2,91	
420 (h7)	0,09	0,68	
420,2 a 479	0,37	2,73	
480 (h8)	0,02	0,12	
480,2 a 539	0,31	2,30	
540 (h9)	0,09	0,63	
540,2 a 599	0,30	2,19	
600 (h10)	0,01	0,10	
600,2 a 659	0,25	1,85	
660 (h11)	0,03	0,24	
660,2 a 719	0,24	1,76	
720 (h12)	0,01	0,07	
720,2 a 779	0,21	1,55	
780 (h13)	0,01	0,10	

## 5.6. CONCLUSÕES

Neste capítulo foram apresentadas análises comparativas entre os desempenhos dos filtros híbridos série e paralelo, onde foram mostrados os modelos utilizados nas simulações de cada sistema, contendo os seus respectivos componentes e as suas configurações. As avaliações foram realizadas com base nos resultados obtidos de compensação harmônica e amortecimento das ressonâncias em cada modelo aplicado ao sistema elétrico do FEA.

A topologia híbrida série propiciou uma queda acima da metade nas distorções harmônicas de tensão e corrente no PAC, e conseguindo teoricamente o pleno amortecimento da ressonância harmônica no sistema elétrico (na simulação, houve pequena divergência em freqüências próximas à do sistema), através da aplicação de um filtro ativo de potência igual a 59,2 MVA. Já a topologia híbrida paralela conseguiu uma redução um pouco maior das distorções harmônicas com a utilização de um filtro ativo de 30,7 MVA, mas não permitiu a completa eliminação da ressonância paralela, no entanto a amplificação harmônica de corrente praticamente não existe conforme pôde ser verificado na tabela 5.7. O filtro híbrido paralelo também não possuía aplicabilidade na redução ou eliminação da ressonância série do sistema.

A Tabela 5.8 mostra comparativamente o desempenho obtido nos modelos com os filtros híbridos série e paralelo. Os valores de distorção harmônica são os apurados no PAC do sistema.

Conforme a síntese dos resultados apresentados na tabela 5.8 de forma comparativa entre as duas topologias de filtro híbrido simuladas, a aplicação do filtro híbrido paralelo permite uma redução até maior nas distorções harmônicas de tensão e corrente no PAC, com a utilização de um filtro ativo de potência quase a metade da potência do filtro ativo empregado no modelo da topologia híbrida série. Entretanto, a resposta do sistema com filtro híbrido paralelo ao efeito da ressonância paralela, não permite a total eliminação da amplificação harmônica, o que acontece com o sistema que utiliza o filtro híbrido série.

PARÂMETROS	SEM FILTRO	FILTRO HÍBRIDO SÉRIE	FILTRO HÍBRIDO PARALELO
Distorção Harmônica Total de Tensão - DTT (%)	0,28	0,16	0,11
Distorção Harmônica Total de Corrente - THDi (%)	1,28	0,57	0,54
Potência Filtro Ativo – P (MVA)	0	59,2	30,7
Efeito Teórico da Ressonância paralela	Amplificação harmônica presente	Amplificação harmônica eliminada	Amplificação harmônica reduzida
Efeito Teórico da Ressonância série	Amplificação harmônica presente	Amplificação harmônica eliminada	Amplificação harmônica presente
Amplificação harmônica de corrente (simulada)	Presente	Parcial (até 80 Hz)	Ausente

Tabela 5.8 – Comparação entre as topologias de Filtro Híbrido aplicadas ao sistema.

Apesar da desvantagem de não eliminar totalmente os efeitos teóricos das amplificações harmônicas provenientes das ressonâncias paralela e série, tal como ocorre com o sistema elétrico convencional do FEA funcionando somente com filtros passivos, ainda assim a aplicação do filtro híbrido paralelo neste tipo de carga parece ser o mais recomendado, tendo em vista que a potência nominal de 30,7 MVA obtida para o filtro ativo é bem mais viável tecnicamente e economicamente que um filtro de 59,2 MVA diante de um Forno Elétrico operando a 43 MVA.

# 6. CONCLUSÕES E PROPOSTA DE CONTINUIDADE

Neste trabalho foi apresentado um estudo de caso de uma siderúrgica que utiliza o processo de aciaria através de um Forno Elétrico a Arco na metalurgia primária do aço. O enfoque foi dado na avaliação da situação atual e proposições em termos de filtragem híbrida no sistema elétrico do FEA quanto à compensação harmônica frente às características de forte não-linearidade da carga. Este capítulo faz abordagem geral dos pontos de destaque levantados ao longo das análises das medições e simulações, bem como enumera alguns itens relevantes para evoluir na contextualização e desenvolvimento do tema, dando-se continuidade aos estudos aqui iniciados.

## 6.1. CONCLUSÕES

A partir do resultado das medições realizadas na subestação principal da indústria durante a operação normal do Forno Elétrico a Arco, com o enfoque na análise da qualidade da energia elétrica, principalmente no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) que foi definido e que influencia na rede de distribuição da concessionária de energia, o trabalho abordou as diversas modelagens do sistema, partindo da obtenção de um modelo que refletisse com boa fidelidade as características do sistema em estudo, passando pelos modelos de sistema que permitissem simular e mostrar as diferenças na aplicação de filtros híbridos série e paralelo. Mediante o estudo realizado na etapa inicial, foi possível confirmar o FEA como sendo uma carga singular em termos de instabilidade, sobretudo na grandeza elétrica corrente durante a etapa inicial do processo de fusão da carga metálica.

As medições de tensão e corrente realizadas nas diversas variáveis do sistema elétrico em estudo, com destaque para as correntes da linha do Forno Elétrico a Arco, permitiram caracterizar bem os diversos componentes do sistema, em duas situações operacionais bem definidas e distintas para propiciar o conhecimento e modelagem mais realista possível desta carga atípica e ao mesmo

tempo bem conhecida em termos de não-linearidade pela literatura de Qualidade de Energia Elétrica.

Na verificação das medições do sistema no PAC, mesmo na pior condição operacional de início da corrida, em termos de qualidade de energia, foi visto que as distorções de tensão e corrente estão dentro dos padrões de referência estabelecidos pelo IEEE519 e PRODIST. Mas comprovou-se que o sistema elétrico está sujeito aos fenômenos de ressonância harmônica, devido à interação entre a impedância da rede elétrica de alimentação e a impedância do sistema de filtragem passiva. Com isso, a amplificação harmônica na corrente da rede elétrica e no sistema de filtragem passiva ocorre em uma ampla faixa de fregüência, submetendo, desta forma, o sistema de filtragem passiva a sobrecargas. É importante destacar que, apesar da vulnerabilidade do sistema de filtragem passiva aos efeitos das ressonâncias, pode-se atribuir a este uma boa eficiência na atenuação da distorção harmônica de corrente, haja vista as características de desequilíbrio das correntes no FEA, atingindo patamares acima de 9% de distorção harmônica, notadamente durante a operação mais agressiva do Forno Elétrico durante o início da corrida, que chega a ser quase três vezes maior em termos de distorção comparado com a etapa de final de corrida no FEA.

Conforme ressaltado no capítulo 3, os baixos valores de distorção total de harmônicos, tanto de tensão quanto de corrente, no PAC, não retratam as distorções provenientes de inter-harmônicos, já que os valores são calculados no Matlab/Simulink<sup>®</sup> através do uso apenas dos múltiplos inteiros (h2, h3, h4, h5,...), apesar de estarem em coerência com o cálculo preconizado no Prodist (Módulo 8) e no IEEE519. Para se ter uma idéia, se os valores de distorção total de harmônicos de tensão e corrente levassem em consideração todos os componentes inter-harmônicos obtidos a cada 0,2 Hz, o resultado seria em torno de 30 vezes maior que o valor encontrado diretamente no Matlab/Simulink<sup>®</sup>. Esta abordagem possibilita concluir que, para Fornos Elétricos a Arco, que são cargas não lineares com comportamento atípico em termos de geração de inter-harmônicos, deve-se evoluir na discussão do cálculo e dos parâmetros limites que são aplicados à distorção total de harmônicos.

aquelas relacionadas ao fenômeno Flicker, a seguir citado como proposta de continuidade de estudo.

O modelo computacional desenvolvido na plataforma Matlab/Simulink<sup>®</sup> foi construído de forma a simular o sistema de potência em estudo com a maior fidelidade em relação ao sistema real onde foram realizadas as medições das variáveis elétricas. Este objetivo pôde ser alcançado através da validação do modelo implementado através da comparação e verificação dos desvios obtidos entre as variáveis medidas em campo e os seus correspondentes valores obtidos através da simulação do modelo, o que foi feito com boa exatidão para a variável tensão no PAC e para a corrente no sistema de filtragem passiva, tanto em termos de valores eficazes como em valores de distorção harmônica total (%). A variável corrente no FEA não foi avaliada comparativamente já que o bloco criado para representar o Forno Elétrico como fonte de corrente foi configurado para representar, na íntegra, o comportamento do FEA a partir das medições realizadas.

Foram avaliadas topologias de filtragem híbrida série e paralela com o intuito de melhorar o comportamento do sistema elétrico em termos de redução das distorções harmônicas de corrente e tensão, e eliminação da amplificação harmônica proveniente dos fenômenos de ressonância. Estas topologias foram estudadas dentro de uma premissa que combinasse as vantagens da atual filtragem passiva com a implantação dos filtros ativos através de uma operação bem coordenada destes conjuntos. Dentro desta filosofia de funcionamento integrado dos filtros passivo e ativo, avaliando-se previamente os comportamento e efeitos destes componentes no resultado esperado do sistema, foram levantadas e aplicadas técnicas de controle para o método SRF (*"Synchronous Reference Frame"*). Estas técnicas escolhidas levaram em consideração outras referências e estudos já realizados, mas sempre objetivando obter o melhor resultado para o sistema elétrico em estudo.

Os resultados das simulações aplicando as duas topologias, e com as suas variantes de técnicas e ganhos dos filtros híbridos, mostrou que o filtro híbrido série é vantajoso na compensação harmônica, mas resultando na utilização de um filtro ativo de elevadíssima capacidade nominal (59,2 MVA), no entanto, quanto à

amplificação harmônica, ela está parcialmente presente, principalmente para algumas faixas de freqüências menores. Já o filtro híbrido paralelo consegue uma redução até maior nas distorções harmônicas com a utilização de um filtro ativo de capacidade nominal igual a 30,7 MVA, que é uma potência mais viável de ser aplicada. E quanto ao fenômeno de amplificação harmônica, esta se mostrou como sendo praticamente inexistente na simulação do filtro híbrido paralelo. Os efeitos teóricos das ressonâncias paralela e série em ambos os filtros híbridos estudados mostrou ser contrário aos resultados de amplificação harmônica obtidos nas simulações, o que merece ser reavaliado como uma proposta de continuidade ao trabalho.

Os diferentes comportamentos e respostas do sistema elétrico do FEA quando submetidos aos filtros híbridos série e paralelo são influenciados diretamente pelos valores dos respectivos ganhos "K<sub>v</sub>" e "K<sub>a</sub>". A redução de um ganho, que invariavelmente implica na redução da potência do filtro ativo, mesmo que abrindo mão de uma redução mais significativa nas distorções harmônicas, pode vir de encontro com um objetivo maior de reduzir a possibilidade de amplificação harmônica. Como exemplo, é possível citar a redução do ganho "K<sub>v</sub>" do filtro híbrido série de 15 para 5, que acarreta na redução da potência do filtro ativo para cerca de 19 MVA, mas ainda assim obtém-se uma significativa redução das faixas de freqüência que estarão sujeitas a amplificação harmônica devido aos efeitos das ressonâncias paralela e série.

## 6.2. PROPOSTAS DE CONTINUIDADE DO ESTUDO

O presente trabalho, mesmo que desenvolvido com algumas limitações na visão inicial de seus objetivos, não tinha foco no detalhamento de alguns pontos fundamentais relacionados ao projeto do filtro ativo, e que propiciariam uma análise mais precisa e realista das melhores alternativas para o desempenho da compensação harmônica do sistema elétrico em estudo, assim como agregar funcionalidades no controle do filtro ativo que permitem também melhorar a eficiência do sistema de filtragem híbrida.

Desta forma, como proposta de continuidade deste trabalho, é válido indicar os seguintes pontos que ainda podem ser abordados como extensão dos estudos aqui desenvolvidos:

- Desenvolver a análise comparativa entre o filtro híbrido série e paralelo aplicado ao sistema elétrico do FEA, considerando o filtro ativo como um inversor de frequência com controle digital em lugar das fontes ideais. Com isso, seria possível avaliar a real influência destas estruturas no comportamento dos respectivos filtros híbridos em termos de impacto na compensação harmônica e amortecimento das ressonâncias.
- Evoluir na implementação de melhorias nos algoritmos de controle dos filtros ativos baseados em inversores de frequência, buscando também alternativas de melhoraria nos blocos de controle internos ao algoritmo SRF ("Syncronous Reference Frame").
- Avaliar através de simulação, a aplicação de uma fonte ideal de corrente controlada por corrente na composição de um filtro ativo presente na topologia híbrida série. Comparar as vantagens e desvantagens desta estrutura de filtragem em relação à configuração que foi usada, com uma fonte de tensão controlada.
- Analisar a simulação de filtros híbridos série e paralelo, compostos de forma integrada no sistema elétrico do FEA. Estudar configurações diversas para os dois filtros ativos, um em paralelo e o outro em série com o filtro passivo, propondo combinações para os dois ganhos "K<sub>v</sub>" e "K<sub>a</sub>" de forma a buscar alternativas de redução significativa das capacidades nominais dos filtros que justifiquem economicamente a aplicação de dois filtros ativos no sistema, com resultados positivos em termos de eliminação da amplificação harmônica e redução das distorções de corrente e tensão. Fazer a abordagem técnico-econômica das alternativas avaliadas, considerando as soluções ótimas para cada caso estudado.
- Implementar tecnologias usualmente aplicadas em sistemas elétricos com Forno Elétrico a Arco, tais como SVC controlado a tiristor e SVC

controlado a IGBT, comparando as vantagens e desvantagens destas topologia de filtragem com as topologias de filtragem híbrida aqui estudadas.

- Estudar o comportamento do sistema elétrico diante do aumento da potência do Forno Elétrico a Arco, apresentando as adequações que seriam necessárias nos sistemas de filtragem híbrida.
- Realizar estudos de flutuação de tensão (fenômeno Flicker) antes e depois do uso de filtros híbridos.
- Estudar a divergência entre análise teórica e simulação na mitigação da ressonância paralela dos filtros híbridos série e paralelo.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

[1] Institute of Electric and Electronics Engineers – IEEE, "Guide for Application and Specification of Harmonic Filters", Standard 1531 - 2003. <u>www.ieee.org</u>.

[2] H. Fujita, H. Akagi, "A Practical Approach to harmonic Compensation in Power Systems – Series Connection of Passive and Active Filters", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 33, pp. 1020-1025, December 1991.

[3] C. Schauder, "STATCOM for compensation of large electric arc furnace installations", IEEE Power Eng. Society Summer Meeting 1999, Vol. 2, pp. 1109-1112, July 1999.

[4] T. Shimamura, R. Kurosawa, M. Hirano and H. Uchino, "Parallel operation of active and passive filters for variable speed Cycloconverter drive systems", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 1, pp.186-191, November 1989.

[5] G. Casaravilha, A. Salvia, C. Briozzo, E. Watanabe, "Selective Active Filter Applied to an Arc Furnace Adjusted to Harmonic Emission Limitations", Proceedings of the IEEE Latin America T&D Conference. Brazil - mar 2002.

[6] H. Akagi, "Active Harmonic Filter", Proceedings of the IEEE, vol.93, no 12, pp. 2128-2138, December 2005.

[7] M.M.G. Cardoso, "Reator Série Chaveado por Tiristores para Fornos Elétricos a Arco", Dissertação de Mestrado, UFMF, Fevereiro de 2006.

[8] A. Wasowski, "Modified Solution of Arc Furnace Electrical Circuit in Terms of Arc Voltage", Ironmaking and Steelmaking, vol. 18, no. 5, pp. 354-358, 1991.

[9] D. Raisz, M. Sakulin, H. Renner, Y. Techlivets, "Recognition of the Operational States in Electric Arc Furnaces", IEEE 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Orlando, USA, October 2000.

[10] B. Bowman, "Effects on furnace arcs of submerging by slag", Ironmaking and Steelmaking, vol. 17, no. 2, pp. 123-129, 1990.

[11] J. B. Calvert, "Electrical Discharges - How the spark, glow and arc work", http://www.du.edu/~jcalvert/phys/dischg.htm, Associate Professor Emeritus of Engineering, University of Denver, revision 9 November 2005.

[12] B. Bowman, G. R. Jordan, "The Physics of High-Current Arcs", Journal of The Iron and Steel Institute, pp. 798-805, June 1969.

[13] R.C. Dugan, M.F. McGranaghan, S. Santoso and H.W. Beaty, "Electrical Power Systems Quality", 2nd ed, McGraw-Hill, pp. 196-319, 2004.

[14] J. Arrillaga, N.R. Watson, "Power System Harmonics", Second Edition, John Wiley & Sons Ltd, pp. 74, 2003.

[15] D. Soares Jr., D.S.L. Simonetti, "Análise Harmônica e Inter-harmônica de um Forno Elétrico a Arco", 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON), 2010.

[16] Institute of Electric and Electronics Engineers – IEEE, "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", Standard 519 - 1992. <u>www.ieee.org</u>.

[17] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, "PRODIST – Procedimentos de Distribuição – Módulo 8", revisão 2 - 01/01/2011, <u>www.aneel.gov.br</u>.

[18] Macedo Jr., José Rubens, "Uma Contribuição à Análise das Componentes Inter-Harmônicas e seus efeitos nos Indicadores de Flutuação de Tensão", Tese de Doutorado, PPGEE-UFES, pp. 54-56, Dezembro de 2009.

[19] W. Freitas, A.M. França, "Modelagem e análise dinâmica de dispositivos DSTATCOM usando o SimPowerSystem para Matlab/Simulink", Revista Controle&Automação, Vol.16, no. 2, Abril/Maio/ Junho, p. 187-199, 2005.

[20] J. Mamede Filho, "Instalações Elétricas Industriais", LTC, 3ª edição, pp. 138-151, Rio de Janeiro, 1988.

[21] X. Zhai, F. Zhuo, R. Duan; W. Lei; P. Zhang, Z. Wang, "Development of a Parallel Hybrid Power Filter with Respective Harmonic Compensation Method", Applied Power Electronics Conference and Exposition, vol.1, pp. 5, March 2006.

[22] B. Singh, V. Verma, A. Chandra, K. Al-Haddad, "Hybrid Filters for Power Quality Improvement", IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, vol. 152, pp. 365-378, May 2005.

[23] H.M.A. Antunes, "Análise comparativa entre Filtros Híbridos Aplicados a Cicloconversores em uma siderúrgica", Dissertação de Mestrado, PPGEE-UFES, Julho de 2009.

[24] H. Na, W. Jian, X. Dianguo, "A Novel Shunt Hybrid Power Filter for Suppressing Harmonics", IEEE International Symposium on Industrial Electronics, vol.2, pp.1155-1160, July 2006.

[25] B. Lin, B. Yang, H. Tsai, "The Operation of Hybrid Active Filter for Harmonic Elimination", IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, vol. 1, pp. 72-76, October 2001.

[26] S. Bhattacharya, P. Cheng, M. Divan, "Hybrid Solutions for Improving Passive Filter Performance in High Power Applications", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, pp. 732-747, May/June 1997.

[27] L. Asiminoaei, F. Blaabjerg, S. Hansen, "Detection is key - Harmonic detection methods for active power filter applications", Industry Applications Magazine IEEE, vol. 13, pp. 22-33, July-Aug. 2007.

[28] R. Inzunza, H. Akagi, "A 6.6 kV Transformerless Shunt Hybrid Active Filter for Installation on a Power Distribution System", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 20, pp. 893-900, July 2005.

[29] C.G. Ferreira, "Análise de um Filtro Ativo em Paralelo a Cicloconversores e Filtro Passivo", Dissertação de Mestrado, PPGEE-UFES, Março de 2008.

[30] Z. Chen, F. Blaabjerg and J.K. Perdesen, "A study of parallel operation of Active and Passive Filters", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 2, pp. 1021-1026, 2002.

[31] Z. Chen, F. Blaabjerg, J.K. Pedersen, "Harmonic Resonance with a Hybrid Compensation System in Power Systems with Dispersed Generation", IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC 04), vol. 4, pp. 3070-3076, 2004.

[32] M.H. Rashid, Power Electronics Handbook: Devices, Circuits and Applications, Elsevier - Academic Press, 2<sup>nd</sup> Edition, New York, USA, 2006.

[33] A. Esfandiari, M. Parniani, H. Mokhtari, "Mitigation of Electric Arc Furnace Disturbances Using the Unified Power Quality Conditioner", The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Busan - Korea, 2004.

[34] V.F. Corasaniti, M.B. Barbieri, P.L. Arnera, M.I. Valla, "Hybrid Active Filter for Reactive and Harmonics Compensation in a Distribution Network", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, pp. 670-677, March, 2009.

[35] S.G.H. Seifossadat, R. Kianinezhad, A. Ghasemi, M. Monadi, "Quality improvement of shunt active power filter, using optimized tuned harmonic passive filters", International Symposium on Power Electronics, vol. 1, pp. 1388-1393, June 2008.

## **APÊNDICE A – LISTA DE ROTINAS**

A seguir são apresentadas as principais rotinas para o desenvolvimento deste trabalho.

## A.1 – Excel\_Transfer.m

Esta função tem o objetivo de realizar a transferência de dados do MSExcel para a área de trabalho do Matlab, preparando-o para a realização das simulações. Os dados provenientes do MSExcel são provenientes de medições reais realizadas com equipamentos de campo para variáveis que foram escolhidas do sistema elétrico em estudo. O vetor 'coluna' contém a posição coluna das variáveis medidas em campo no Excel.

Variáveis: Ir\_Filtro; It\_Filtro; Ir\_FEA; It\_FEA; Vrs\_barra; Vst\_barra

% Realiza a leitura, a partir do arquivo xls (dados.xls) e armazena diretamente no Matlab dados=xlsread('dados.xls');

% Transferência dos dados de Corrente do Filtro dados(1:end,2)=(dados(1:end,2)); dados(1:end,3)=(dados(1:end,3));

% Transferência dos dados de Corrente do Forno Elétrico dados(1:end,4)=(dados(1:end,4)); dados(1:end,5)=(dados(1:end,5));

% Transferência dos dados de Tensão na barra 33 kV dados(1:end,6)=(dados(1:end,6)); dados(1:end,7)=(dados(1:end,7));

estsimula=struct; % Cria uma estrutura de nome "estsimula", necessária para entrada de dados % nas fontes de corrente estsimula.time=[]; % Armazena o valor zero na coluna tempo da estrutura estsimula estsimula.signals.values=dados(:,2:7); % Preenche a estrutura com os valores do arquivo dados nas % Colunas 2 a 7

## A.2 – Calcula\_TensaoFonte\_Impedancia\_rn.m

Esta rotina calcula a tensão de linha e o ângulo de potência, para a modelagem do sistema elétrico do FEA no Matlab/Simulink<sup>®</sup>, através do programa desenvolvido por Ferreira em [29]. Os valores das variáveis medidas são verificados através do modelo DefasagemAngular\_RMS\_rn.mdl.

clc clear all

teta1=157.3*(pi/180);	% angulo da tensao Vrn no PAC, conhecida através do Defasagem_RMS.mdl
teta2=-166*(pi/180);	% angulo da corrente Ir Trafo T30 no PAC, conhecida pelo
	% DefasagemAngular_RMS_rn.mdl
vl=33.0e3;	% tensão de linha
icc=7986;	% valor obtido pelo cálculo da corrente curto-circuito
vrn_pac=19.02e3;	% tensão fase-neutro no PAC - Medida no DefasagemAngular_RMS_rn.mdl
ir_pac=730.3;	% corrente no PAC rms
zt=0.2303+j*2.3745	% impedancia total
vpac=vrn_pac*(cos(tet	a1)+j*sin(teta1));
itrafo=ir_pac*(cos(teta2	?)+j*sin(teta2));
vth=vpac+zt*itrafo;	
vpac_m=abs(vpac);	% módulo de vpac
vpac_a=angle(vpac);	% angulo de vpac - rad
vpac_ml=vpac_m*sqrt(	(3)

```
vth_m=abs(vth)% módulo de vthvth_a=angle(vth)% angulo de vth - radvth_ag=vth_a*(180/pi)% angulo de vth - grausvth_ml=vth_m*sqrt(3)% tensao de linhavpac_ml=vpac_m*sqrt(3)vth_m=abs(vth)% módulo de vthvth_a=angle(vth)% angulo de vth - radvth_ag=vth_a*(180/pi)% angulo de vth - grausvth_ml=vth_m*sqrt(3)% tensao de linha
```
### A.3 – DefasagemAngular\_RMS\_rn.mdl



146

# **APÊNDICE B - PRODUÇÃO CIENTÍFICA**

O artigo em anexo é parte integrante da dissertação de mestrado.

Artigo apresentado no IX INDUSCON – "International Conference on Industry Applications – 2010".

Título: "Análise Harmônica e Inter-harmônica de um Forno Elétrico a Arco"

- Autores: Dirceu Soares Junior
  - Domingos Sávio Lírio Simonetti

## Análise Harmônica e Inter-harmônica de um Forno Elétrico a Arco

Dirceu Soares Jr.; Domingos S.L. Simonetti ArcelorMittal Cariacica; Universidade Federal do Espírito Santo E-mail: dirceu.soares@arcelormittal.com; d.simonetti@ele.ufes.br

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 "minimill" 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. Por sua vez o processo de transformação da sucata em aço demanda alguns cuidados em função da agressividade do próprio processo que leva a um impacto significativo no sistema elétrico alimentador do FEA. Este trabalho apresenta um estudo de aspectos relacionados à compensação harmônica no sistema elétrico de alimentação, considerando a magnitude dos impactos do Forno Elétrico a Arco (FEA) na distorção da tensão e corrente do sistema. O estudo contempla medições de campo, análise harmônica e inter-harmônica, e conseqüentemente a avaliação do conjunto de filtro de harmônicos que compõem o sistema.

*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. In this way the process of transformation the scrap to steel demand some care because of the aggressiveness of the own process that leave to a significant impact in the EAF feeder electric system. This work brings up a study of aspects related to the harmonic compensation for the feeder electric system, considering the Electric Arc Furnace (EAF) impact magnitude to the voltage and current distortion of the system. The study provide field measurements, harmonic and interharmonic analyze, and consequently the evaluation of the harmonic filters set that are part of the system.

#### I. INTRODUÇÃO

Os Fornos Elétricos a Arco são 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 formação 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 de até 1200 V. O arco elétrico sozinho é de fato melhor representado como uma fonte de harmônicos de tensão [1].

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, interharmônicas, 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 [1].

As medições de campo em tensão e corrente realizadas no sistema elétrico alimentador de um FEA permitiram a análise do espectro harmônico durante as principais etapas do processo produtivo no Forno Elétrico que ocorre ao longo de um período chamado de corrida. A comparação entre as medições em três momentos distintos e bem definidos ao longo da corrida no FEA permitiu fazer uma abordagem associativa dos índices de qualidade da energia elétrica com a agressividade do próprio processo de fusão e refino do aço. A Tabela I mostra os momentos em que ocorreram as medições de tensão e corrente ao longo das etapas da corrida do FEA. Cada medição teve uma duração total de 5 segundos com intervalo de amostragem de 0,1ms. A quarta medição apresentada permitiu verificar o comportamento do sistema elétrico com FEA desligado, mas estando o filtro de harmônicos ligados.

TABELA I

MEDICÕES NAS ETAPAS DA CORRIDA NO FEA

Etapa	Instante da medição (hora)	Descrição da Etapa da corrida			
1	15h 26m 26s	Início da corrida, logo após o 1º carregamento de sucata			
2	15h 44m 39s	Logo após o 2º carregamento de sucata na corrida			
3	15h 59m 09s	Durante o refino – aço na fase líquida			
4	16h 09m 02s	Forno Elétrico desligado – sem corrente, mas com tensão no sistema alimentador			

#### II. AS INSTALAÇÕES DE UM FORNO ELÉTRICO

As subestações das usinas siderúrgicas com aciarias elétricas são geralmente supridas por alimentadores de alta tensão, com níveis de tensão superiores a 100 kV e com uma potência de curto-circuito, no ponto de acoplamento comum com outras cargas, superior a pelo menos 30 vezes a potência nominal do transformador do forno. Na subestação de entrada da usina, um ou mais transformadores abaixam a alta tensão do alimentador da planta para a média tensão do circuito do forno, que tipicamente é de 22 ou 33 kV. Os transformadores de novas instalações de fornos elétricos têm potências que tipicamente excedem 100 MVA e, para esta faixa de potência, o nível de 33 kV é mais apropriado, sendo o mais adotado no projeto de novas instalações. A Fig. 1 indica uma topologia típica do sistema elétrico alimentador de um FEA.

Os bancos de capacitores para a correção do fator de potência e filtro de harmônicos também estão geralmente localizados na subestação de entrada da usina e interligados ao barramento de média tensão do circuito do forno. A este barramento se conecta ainda o compensador estático de reativos eventualmente existente. Cabe ressaltar que a predominância de compensador estático de reativos do tipo SVC chaveado por tiristores diz respeito às instalações mais modernas de Fornos Elétricos a Arco. Deste barramento se origina o alimentador do reator série, que geralmente também está localizado na subestação de entrada [2].



Fig. 1. Topologia típica do sistema elétrico alimentador de um FEA

Na dinâmica de operação de um Forno Elétrico a Arco, o arco elétrico é elemento fundamental no processo, sendo a sua geração determinada pelo sistema de controle e regulação dos eletrodos do FEA. Os braços dos eletrodos se movimentam verticalmente acionados por cilindros hidráulicos, em um percurso indicado pela cota M na instalação da Fig. 2, sendo o circuito hidráulico comandado por um sistema eletrônico e automático de regulação dos eletrodos. 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 [3].



Fig. 2. Instalação Típica de um FEA

#### III. O SISTEMA ELÉTRICO EM QUESTÃO

A ArcelorMittal Cariacica é uma usina siderúrgica localizada no estado do Espírito Santo – Brasil, pertencente ao grupo ArcelorMittal, líder mundial na produção de aço. A usina é alimentada em energia elétrica pela concessionária distribuidora de energia local através de duas linhas de transmissão de 138kV, sendo a linha 2 para suprir o sistema em 33kV que alimenta a Aciaria Elétrica composta de um Forno Elétrico e um Forno Panela. A linha 1 de 138kV alimenta um dos dois transformadores T1 ou T2, que operam em paralelo, mas atualmente sempre um deles em "stand by" do outro. Estes abaixam de 138kV para a tensão de 6,3kV que supre as demais cargas da usina composta pelos laminadores e equipamentos auxiliares da aciaria elétrica.

O presente trabalho se limitará 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 Fig. 3 mostra o diagrama unifilar simplificado do Sistema Elétrico da ArcelorMittal Cariacica.

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 T30 abaixador (step-down) de 138/33 kV, estando 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 freqüências correspondentes à 2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup>, 4<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> ordens. A Fig. 4 mostra o esquema unifilar simplificado do circuito alimentador do FEA.



Fig. 3. Unifilar do Sistema Elétrico da ArcelorMittal Cariacica



Fig. 4. Unifilar simplificado do circuito alimentador do FEA



Fig. 5. Circuito equivalente monofásico do FEA

O equivalente monofásico do circuito do FEA, sem filtros de harmônicos, está indicado no diagrama da Fig. 5, onde Vs é a tensão secundária, Xs é a reatância equivalente do sistema da concessionária, determinada pela potência de curto circuito no ponto de suprimento, Xts é a reatância do transformador abaixador, Xr é a reatância do reator série, Xtf é a reatância do transformador do forno, Xsec é a reatância do forno e Rarc é a resistência do arco elétrico [4]. Neste diagrama, as reatâncias estão referidas à tensão secundária Vs. Este circuito equivalente do FEA é citado aqui apenas como referência, já que ele não será objeto das análises foco deste trabalho, que serão pautadas nas medições reais das grandezas que estão mostradas em destaque no esquema unifilar simplificado da Fig. 4. As seis variáveis medidas em campo foram:

- IrF => Corrente na fase R do conjunto de Filtro de harmônicos  $(2^a, 3^a, 4^a e 5^a)$ .

- ItF => Corrente na fase T do conjunto de Filtro de harmônicos  $(2^{a}, 3^{a}, 4^{a} e 5^{a})$ .

- IrFEA => Corrente na fase R do Forno Elétrico a Arco.
- ItFEA => Corrente na fase T do Forno Elétrico a Arco.
- Vrs => Tensão entre as fases R e S, no nível de 33kV.
- Vst => Tensão entre as fases S e T, no nível de 33kV.

Conforme dito anteriormente, estas medições foram realizadas em um intervalo total de 5s, e a taxa de amostragem foi de 0,1ms. As variáveis IsF\*, IsFEA\* e Vtr\* foram obtidas algebricamente através das outras variáveis medidas já que a soma das respectivas grandezas nas três fases deve ser zero (ex.: IrF + IsF\* + ItF = 0).

#### IV. COMPENSAÇÃO HARMÔNICA NO SISTEMA ELÉTRICO DO FEA

O contrato de suprimento de energia elétrica com a concessionária de distribuição local estabelece o controle dos índices de qualidade da energia em um âmbito global, sendo feita nos pontos de interligação do sistema elétrico. Desta forma os índices de distorção harmônica a serem controlados e atendidos no contrato com a concessionária são os valores considerados na entrada do sistema elétrico da siderúrgica, na tensão de 138 kV. No entanto a avaliação das medições objeto deste trabalho foi considerada na tensão de 33 kV, onde foram efetivamente realizadas as medições, e para tal levam em consideração os parâmetros para o nível de tensão inferior a 69 kV dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) -Módulo 8 - ANEEL [5]. Os valores de referência para as distorções harmônicas totais de tensão são indicados na tabela II. Estes valores são utilizados como referência do planejamento do sistema elétrico em termos da QEE, seguindo o PRODIST, e para o caso deste trabalho, a DTT se enquadra no limite admissível de 6%.

A recomendação ANEEL, no entanto, não estabelece valores de referência para harmônicas de corrente, que será de interesse avaliar no âmbito deste trabalho. Para tal, faz-se referência à recomendação IEEE 519 – "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems" [6]. Nesta recomendação, os limites para as harmônicas de corrente são baseadas na relação entre a fundamental da corrente de carga (I<sub>L</sub>) e a corrente de curto circuito no ponto de acoplamento comum (PAC). Os limites de distorção irão diferir de acordo com o nível de corrente de curto circuito (I<sub>CC</sub>). Obviamente, quanto maior I<sub>CC</sub> com relação a I<sub>L</sub>, maiores serão os limites admissíveis, pois afetarão menos a tensão no PAC. A Tabela III a seguir mostra os níveis recomendados pela IEEE 519 para tensão inferior a

69 kV, de interesse específico neste trabalho. Desta forma, para o sistema elétrico em estudo o THD de corrente se enquadra no limite admissível de 5%.

#### TABELA II

VALORES DE REFERÊNCIA DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS TOTAIS DE TENSÃO (EM PORCENTAGEM DA TENSÃO FUNDAMENTAL)

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]	
V <sub>N</sub> ≤ 1kV	10	
1kV < V <sub>N</sub> ≤ 13,8kV	8	
<mark>13,8kV &lt; V<sub>N</sub> ≤ 69kV</mark>	<mark>6</mark>	
$69kV < V_N \le 138kV$	3	

TABELA III

Limites das distorções harmônicas de corrente (I\_h) em  $\,\%\,$  de  $\,I_L,$  para tensões inferiores a 69 kV

V <sub>N</sub> ≤ 69 kV				
I <sub>CC</sub> / I <sub>L</sub>	THD			
< 20	<mark>5</mark>			
20 – 50	8			
50 – 100	12			
100 - 1000	15			
> 1000	20			

No circuito em estudo para filtrar as componentes harmônicas e inter-harmônicas geradas durante o funcionamento do Forno Elétrico, foi instalado um sistema de Filtro Passivo no barramento de 33 kV, conforme mostrado na Fig. 4, sendo este dividido em quatro ramos do tipo Passa Faixa, cada um destes sintonizado em uma freqüência, de forma a eliminar o maior número possível de harmônicas, dentro da variedade de freqüências geradas na operação do FEA. O Filtro Passivo de Harmônicos possui as características abaixo relacionadas:

- Ramo 1 sintonizado na harmônica 1,97 => L=69,7mH / C=26µF / 14,8 Mvar
- Ramo 2 sintonizado na harmônica 2,96 => L=34,8mH / C=23µF / 10,5 Mvar
- Ramo 3 sintonizado na harmônica 3,89 => L=26,3mH / C=17,66µF / 8,0 Mvar
- Ramo 4 sintonizado na harmônica 4,97 => L=7,8mH / C=36,5µF / 15,3 Mvar

#### V. RESULTADO DAS MEDIÇÕES

As medições realizadas que serão a seguir apresentadas, com as suas respectivas formas de onda de tensão e corrente, utilizou o Registrador Hioki, modelo 8841. Os gráficos e valores foram obtidos utilizando o software Matlab Simulink versão 7.0. A Fig. 6 mostra o modelo da simulação principal utilizada para as análises gráficas. As variáveis efetivamente medidas compõem a entrada 1 (variáveis).

A primeira medição a ser apresentada é a medição 4 citada na tabela I, para a condição de Forno Elétrico desligado, estando o sistema alimentador de 33kV energizado e conseqüentemente também o conjunto de filtros passivos. Esta situação pode ser considerada como uma condição de referência para as demais medições com carga no FEA.



Fig. 6. Simulação principal a partir das medições de campo

A Fig. 7 mostra a estabilidade e equilíbrio das tensões na barra de 33kV, secundário do transformador T30, que é confirmada através dos valores médios de tensão RMS obtidos no intervalo medido: Vrs = 34941 V, Vst = 34965 V, Vtr\* = 34890 V. A Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) média das três tensões foi de 0,13%. A medição 1 citada na tabela I diz respeito à condição mais agressiva do FEA que ocorre no momento inicial da corrida, logo após o primeiro carregamento de sucata. A Fig. 8 pode ser comparada com a Fig. 7 para destacar as variações das tensões rms e o desequilíbrio entre elas, reflexo da grande instabilidade do arco elétrico nesta fase do processo de fusão. Os valores médios de tensão rms obtidos na Fig. 8 foram: Vrs = 32359 V, Vst = 33302 V, Vtr\* = 32661 V, mostrando também o impacto do FEA na queda de tensão.



Em Fig. 9, Fig. 10 e Fig. 11 são apresentados os comportamentos, da tensão na barra de 33kV, da corrente no

FEA e da corrente no Filtro Passivo, dentro do intervalo de 1,23 a 1,28 segundos, na mesma medição do forno no início da corrida. O intervalo entre 1,23 e 1,28 s foi escolhido por retratar bem esta condição típica do FEA no início da fusão da sucata, onde a variação da corrente entre as fases é muito grande, podendo estar uma fase praticamente sem corrente enquanto as demais fases com valores bem aleatórios, conforme claramente visto na Fig. 10. Apesar disto, a Fig. 9 apresenta um comportamento razoavelmente estável da tensão na barra alimentadora de 33kV, proveniente sobretudo da contribuição do conjunto de filtros passivos, cujas curvas de corrente podem ser vistas na Fig. 11.



Fig. 8. Tensões 33kV-rms => FEA no início da corrida



Fig. 9. Tensões 33kV => FEA no início da corrida

A Fig. 12 mostra o comportamento da distorção harmônica da tensão Vst proveniente do intervalo total dos 5 segundos de medição durante o início da corrida do FEA. Pode-se constatar que o valor de 0,28% para o DTT médio das três tensões está bem abaixo do limite permissível de 6%, conforme tabela II, o que vem de encontro com uma condição de boa estabilidade da tensão conforme dito anteriormente.



-500 -1000 -1000 -1500 1.23 1.24 1.25 tempo(s) Fig. 11. Corrente do Filtro Passivo no início da corrida A Fig. 12 confirma o destaque para as contribuições interarmônicas, sobretudo na faixa até a 5ª ordem, bem como

harmônicas, sobretudo na faixa até a 5<sup>a</sup> ordem, bem como mostra a relevância das sub-harmônicas, fatos que são mais bem retratados no perfil das harmônicas de corrente do FEA, que é apresentado na Fig. 13. Cabe ressaltar que com uma janela de amostragem de 5 segundos ocorre a discretização da freqüência em 0,2 Hz.

A Fig. 13 mostra a distorção harmônica da corrente na fase T (ItFEA), proveniente do intervalo total dos 5s de medição durante o início da corrida do FEA. Pode-se constatar que o valor de 7,36% para o THD médio das correntes nas três fases está acima do limite permissível de 5%, conforme tabela III.

O modelo Simulink mostrado na Fig. 6 gerou as correntes no transformador T30 a partir do cálculo de soma das correntes do FEA e dos Filtros de Harmônicos. Com isto, foi possível fazer uma análise do comportamento das harmônicas e inter-harmônicas de corrente neste ponto, que são refletidas na rede à montante da barra do FEA. Conforme tabela IV, algumas destas correntes inter-harmônicas (Ih) apresentaram valor maior que o da correspondente componente de corrente no FEA, confirmando que o filtro passivo possui deficiência na função de corrigir e atenuar as distorções harmônicas de corrente. Os valores mostrados na tabela são das correntes na fase T. Para as freqüências inter-harmônicas, o valor de corrente Ih refere-se à soma das correntes de cada freqüência indicada na tabela.



Fig. 12. Perfil Harmônico da Tensão Vst (FEA início da corrida)



Fig. 13. Perfil Harmônico da Corrente na fase T (FEA início da corrida)

TABELA IV FREQÜÊNCIAS COM IN MAIOR NO T30 QUE NO FEA

Freqüências (Hz)	lh-FEA (A)	lh-Trafo (A)	
61 + 62	76,3	80,3	
114 + 115 + 116	17,2	33,8	
163 + 164 + 165	8,9	50,9	
213 + 214 + 215 + 216	10,7	41,8	

As medições realizadas nas três diferentes etapas do FEA operando ao longo da corrida (tabela I) permitiram traçar o quadro comparativo mostrado na tabela V a seguir, onde foram considerados os seguintes parâmetros para análise:

- DTT (%) => Distorção Total de Tensão valor médio das tensões Vrs, Vst e Vtr\*.
- THD-I (%) => Distorção Total de Corrente valor médio das correntes IrFEA, IsFEA\* e ItFEA.

COMPARATIVO DAS ETAPAS DA CORRIDA NO FEA				
Etapas	DTT	THD-I		
1- Logo após o 1° carregamento de sucata	0,28	7,36		
2- Logo após o 2º carregamento de sucata	0,15	5,32		
3- Durante o refino (aço na fase líquida)	0,13	2,63		

TABELA V

O comparativo entre as variáveis na tabela IV mostra que, à medida que a corrida no FEA passa de uma etapa para a seguinte, a qualidade da energia elétrica melhora por causa, principalmente, da maior estabilidade do arco elétrico. As reduções das distorções harmônicas de tensão e corrente são significativas ao comparar-se o início da corrida (etapa 1)

com a fase final da corrida (etapa 3). A redução dos valores da etapa 1 para a 2 também era prevista, apesar de ser esperado uma queda um pouco maior da THD-I. Isto pode ser explicado tendo em vista que as medições de corrente do FEA durante a etapa 2 (Fig. 14), apresentaram maior instabilidade em comparação com as medições na etapa 1, em função de alguma particularidade da condição operacional da sucata dentro do FEA.



Fig. 14. Corrente do FEA durante a etapa 2 de medição

#### VI. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou um estudo sobre o contexto da compensação harmônica no sistema de alimentação do Forno Elétrico a Arco de uma indústria siderúrgica. Medições realizadas no sistema mostraram as diferenças de comportamento do espectro harmônico em função das diferentes etapas operacionais do FEA, onde o sistema de filtro passivo atende satisfatoriamente para o limite de harmônicos de tensão que são gerados, cumprindo, portanto, exigência legal estabelecida nos procedimentos do PRODIST. No entanto, para melhoria e adequação dos harmônicos de corrente, há necessidade de evoluir em técnicas diferentes através da implantação de filtros ativos, como do tipo SVC (Fig. 1). Esta melhoria faz parte de futuros planos de investimentos da ArcelorMittal Cariacica.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- R.C. Dugan, M.F. McGranaghan, S. Santoso and H.W. Beaty, "Electrical Power Systems Quality", 2<sup>nd</sup> ed, *McGraw-Hill*, pp. 196.
- [2] M.M.G. Cardoso, "Reator Série Chaveado por Tiristores para Fornos Elétricos a Arco", Dissertação de Mestrado, UFMF, Fevereiro de 2006.
- [3] F. Bosi, "Aciaria Elétrica", apresentado no Curso de Aciaria Elétrica da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, ABM, de 25 a 28 de Outubro de 2004
- [4] R. Collantes-Bellido, T. Gómez, "Identification and Modelling of a Three Phase Arc Furnace for Voltage Disturbance Simulation", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 12, no. 4, Outubro 1997
- [5] Agência Nacional de Energia Élétrica ANEEL, "PRODIST Módulo 8", revisão 1, 01/01/2010. www.aneel.gov.br.
- [6] Institute of Electric and Electronics Engineers IEEE, "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", Standard 519 - 1992. www.ieee.org.