



**COPPE/UFRJ**

## ESTUDO DE QUALIDADE DE ENERGIA EM UM PRÉDIO COMERCIAL

Roberto Alexandre Vitoria de Moraes Filho

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Richard Magdalena Stephan

Maria Dias Bellar

Rio de Janeiro  
Setembro de 2009

ESTUDO DE QUALIDADE DE ENERGIA EM UM PRÉDIO COMERCIAL

Roberto Alexandre Vitoria de Moraes Filho

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

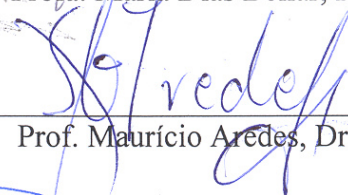
Aprovada por:



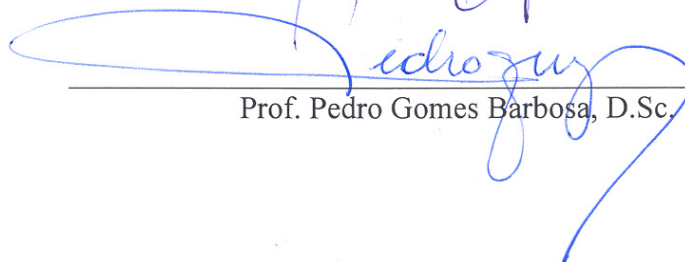
Prof. Richard Magdalena Stephan, Dr.-Ing.



Profa. Maria Dias Bellar, Ph.D.



Prof. Maurício Aredes, Dr.-Ing.



Prof. Pedro Gomes Barbosa, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2009

Moraes Filho, Roberto Alexandre Vitoria de

Estudo de Qualidade de Energia em Um Prédio  
Comercial/ Roberto Alexandre Vitoria de Moraes Filho. –  
Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XX, 156 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Richard Magdalena Stephan

Maria Dias Bellar

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de  
Engenharia Elétrica, 2009.

Referencias Bibliográficas: p. 147-149.

1. Qualidade de Energia 2. Filtros Ativos. I. Stephan,  
Richard *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro,  
COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

## AGRADECIMENTOS

- Aos professores Richard Magdalena Stephan e Maria Dias Bellar , pelo apoio e orientação;
- Paulina Vergara;
- Wilton C. Padrão;
- Paulo Henrique Tavares;
- Cesar Ricci;
- Carlos Alberto de Souza Gomes;
- Paulo Roberto Dias Cruz;

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## ESTUDO DE QUALIDADE DE ENERGIA EM UM PRÉDIO COMERCIAL

Roberto Alexandre Vitoria de Moraes Filho

Setembro/2009

Orientadores: Richard Magdalena Stephan

Maria Dias Bellar

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho apresenta um estudo sobre a qualidade de energia em uma instalação elétrica predial, com medições, simulações, análises e determinação de cargas críticas.

Há um interesse especial em aplicar filtros ativos paralelos de potência segundo a Teoria das Potências Instantâneas. Os filtros ativos paralelos possuem ação local sobre as cargas não lineares e, por suas características, podem ser utilizados para correção de fator de potência e obtenção de correntes senoidais em alimentadores, bem como reduzir, no ponto de acoplamento comum das cargas, a distorção harmônica total de tensão.

É realizada uma análise econômico-financeira comparativa entre a aplicação de soluções convencionais, baseadas em filtros passivos de potência e bancos de capacitores, e os filtros ativos de potência.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## POWER QUALITY STUDY OF A COMMERCIAL BUILDING

Roberto Alexandre Vitoria de Moraes Filho

September/2009

Advisors: Richard Magdalena Stephan  
Maria Dias Bellar

Department: Electrical Engineering

This work presents a study of the power quality of a commercial building, and consists of measurements, simulations, analysis and critical load investigations.

There is a special interest upon applying shunt power active filters based on the Instantaneous Power Theory. The shunt active filters have local action over nonlinear loads and, due to its characteristics, can perform power factor correction as well as achieve sinusoidal current on the sources. Besides that, shunt active filters reduce total harmonic distortion on the voltage at the point of common coupling.

A financial analysis is made in which, classical approaches, based on passive power filters and capacitor bank, are compared with active power filter solutions.

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO PREDIAL.....</b>	<b>6</b>
2.1	Descrição geral.....	6
2.2	Alimentadores e grupos de cargas do complexo predial.....	6
2.2.1	Alimentador das cargas do transformador 1 da subestação 1.....	7
2.2.2	Alimentador das cargas do transformador 2 da subestação 1.....	7
2.2.2.1	Alimentador de acionamentos eletrônicos com controle de velocidade escalar (VVVF) para elevadores com motor de indução trifásico.....	8
2.2.3	Alimentador das cargas do transformador 3 da subestação 1.....	8
2.2.4	Alimentador das cargas do transformador 4 da Subestação 1.....	9
2.2.4.1	Alimentador geral dos 8(oito) UPS de 80 kVA.....	9
2.2.5	Alimentador das cargas do transformador 1 da subestação 2 .....	10
2.2.6	Alimentador das cargas do transformador 2 da subestação 2.....	10
2.2.6.1	Alimentador geral dos UPS de 50 kVA.....	11
<b>3</b>	<b>APRESENTAÇÃO DE MEDIDAS EXPERIMENTAIS, ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES E ESTABELECIMENTO DE PONTOS CRÍTICOS.....</b>	<b>13</b>
3.1	Medição do alimentador das cargas dos transformadores da subestação 1 com os disjuntores TIE abertos e banco de capacitores desligado.....	16
3.1.1	Transformador 1 da subestação 1.....	18
3.1.2	Transformador 2 da subestação 1.....	23
3.1.3	Transformador 3 da subestação 1.....	28
3.1.4	Transformador 4 da subestação 1.....	34
3.2	Medição do alimentador das cargas dos transformadores da subestação 1 com os disjuntores TIE fechados e banco de capacitores ligado.....	39
3.2.1	Transformador 1 da subestação 1.....	41
3.2.2	Transformador 2 da subestação 1.....	45

3.2.3	Transformador 3 da subestação 1.....	49
3.2.4	Transformador 4 da subestação 1.....	53
3.3	Medições do barramento dos disjuntores TIE da subestação 1.....	57
3.4	Medição do alimentador das cargas do transformador 1 da subestação 2.....	60
3.5	Medição do alimentador das cargas do transformador 2 da subestação 2.....	65
3.6	Medição do alimentador de elevador com acionamento eletrônico através de controle escalar de velocidade em motor de indução trifásico.....	70
<b>4</b>	<b>SIMULAÇÕES E IMPLEMENTAÇÃO DE SOLUÇÕES.....</b>	<b>75</b>
4.1	Considerações sobre a utilização de filtros passivos em sistemas elétricos de potência.....	77
4.2	Dimensionamentos aproximados de bancos de capacitores e filtros passivos para as cargas críticas.....	79
4.2.1	Transformador 1 da subestação 1 com disjuntores TIE abertos.....	79
4.2.2	Transformador 2 da subestação 1 com disjuntores TIE abertos.....	81
4.2.3	Transformador 2 da subestação 2.....	82
4.2.4	Acionamento eletrônico com controle escalar de velocidade em motor de indução trifásico.....	83
4.3	Implementação do filtro ativo em simulações utilizando o PSCAD-EMTDC™.....	86
4.4	Simulação das cargas do transformador 1 da subestação 1 com solução por filtro ativo paralelo.....	100
4.5	Simulação das cargas do transformador 2 da subestação 1 com solução por filtro ativo paralelo.....	108
4.6	Simulação das cargas do transformador 2 da subestação 2 com solução por filtro ativo paralelo.....	116
4.7	Simulação do acionamento VVVF do elevador 3 da casa de máquinas do prédio anexo II com solução por filtro ativo paralelo.....	124
<b>5</b>	<b>ANÁLISE ECONÔMICO-FINANCEIRA.....</b>	<b>138</b>
5.1	Solução utilizando bancos de capacitores e filtros passivos de potência.....	138
5.1.1	Bancos de capacitores.....	138
5.1.2	Filtro passivo com banco de capacitores para correção de fator de potência e harmônicos de motores.....	140
5.2	Solução utilizando filtros ativos de potência paralelos.....	140



<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>144</b>
6.1	Conclusões finais.....	144
6.2	Sugestões de trabalhos futuros.....	146
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>147</b>
<b>A</b>	<b>FOLHAS DE DADOS DO ANALISADOR DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZADO.....</b>	<b>150</b>
<b>B</b>	<b>DOCUMENTO DE AUTORIZAÇÃO E ATESTADO DE AUTORIA EMITIDO PELO DIRETOR GERAL DO TRIBUNAL REGIONAL FEDERAL DA SEGUNDA REGIÃO ACERCA DAS MEDIÇÕES ELÉTRICAS REALIZADAS.....</b>	<b>155</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Representação simplificada do sistema elétrico em análise.....	12
Figura 2: Subestação 1 com disjuntores TIE abertos e banco de capacitores desligado .....	17
Figura 3: Cargas do transformador 1 da subestação 1.....	18
Figura 4: Transformador 1 da subestação 1 com TIES abertos - Variação do valor RMS da corrente com o tempo (hora:minuto).....	19
Figura 5: Transformador 1 da subestação 1 com TIES abertos - Variação do valor RMS da tensão com o tempo (hora:minuto).....	19
Figura 6: Transformador 1 da subestação 1 com TIES abertos - Variação do valor percentual de distorção harmônica de corrente com o tempo (hora:minuto)..	20
Figura 7: Transformador 1 da subestação 1 com TIES abertos - Variação do valor percentual de distorção harmônica de tensão com o tempo (hora:minuto)....	20
Figura 8: Transformador 1 da subestação 1 com TIES abertos - Variação do fator de potência da fundamental com o tempo (hora:minuto).....	21
Figura 9: Cargas do transformador 2 da subestação 1.....	23
Figura 10: Transformador 2 da subestação 1 com TIES abertos - Variação do valor RMS da corrente com o tempo (hora:minuto).....	24
Figura 11: Transformador 2 da subestação 1 com TIES abertos - Variação do valor RMS da tensão com o tempo (hora:minuto).....	24
Figura 12: Transformador 2 da subestação 1 com TIES abertos - Variação do valor percentual de distorção harmônica de corrente com o tempo (hora:minuto) .....	25
Figura 13: Transformador 2 da subestação 1 com TIES abertos - Variação do valor percentual de distorção harmônica de tensão com o tempo (hora:minuto)...	25

Figura 14: Transformador 2 da subestação 1 com TIES abertos - Variação do fator de potência da fundamental com o tempo (hora:minuto).....	26
Figura 15: Cargas do transformador 3 da subestação 1.....	28
Figura 16: Transformador 3 da subestação 1 com TIES abertos - Variação do valor RMS da corrente com o tempo (hora:minuto).....	29
Figura 17: Transformador 3 da subestação 1 com TIES abertos - Variação do valor RMS da tensão com o tempo (hora:minuto).....	29
Figura 18: Transformador 3 da subestação 1 com TIES abertos - Variação do valor percentual de distorção harmônica de corrente com o tempo (hora:minuto).....	30
Figura 19: Transformador 3 da subestação 1 com TIES abertos - Variação do valor percentual de distorção harmônica de tensão com o tempo (hora:minuto)...	31
Figura 20: Transformador 3 da subestação 1 com TIES abertos - Variação do fator de potência da fundamental com o tempo (hora:minuto).....	31
Figura 21: Cargas do transformador 4 da subestação 1.....	34
Figura 22: Transformador 4 da subestação 1 com TIES abertos - Variação do valor RMS da corrente com o tempo (hora:minuto) .....	35
Figura 23: Transformador 4 da subestação 1 com TIES abertos - Variação do valor RMS da tensão com o tempo (hora:minuto).....	35
Figura 24: Transformador 4 da subestação 1 com TIES abertos - Variação do valor percentual de distorção harmônica de corrente com o tempo (hora:minuto).....	36
Figura 25: Transformador 4 da subestação 1 com TIES abertos - Variação do valor percentual de distorção harmônica de tensão com o tempo (hora:minuto)...	36
Figura 26: Transformador 4 da subestação 1 com TIES abertos - Variação do fator de potência da fundamental com o tempo (hora:minuto).....	37
Figura 27: Subestação 1 com disjuntores TIE fechados e banco de capacitores ligado..	40
Figura 28: Transformador 1 da subestação 1 com TIES fechados - Variação do valor RMS da corrente com o tempo (hora:minuto).....	41
Figura 29: Transformador 1 da subestação 1 com TIES fechados - Variação do valor RMS da tensão com o tempo (hora:minuto).....	41
Figura 30: Transformador 1 da subestação 1 com TIES fechados - Variação do valor percentual de distorção harmônica de corrente com o tempo (hora:minuto).....	42

Figura 31: Transformador 1 da subestação 1 com TIES fechados - Variação do valor percentual de distorção harmônica de tensão com o tempo (hora:minuto)...	42
Figura 32: Transformador 1 da subestação 1 com TIES fechados - Variação do fator de potência da fundamental com o tempo (hora:minuto) .....	43
Figura 33: Transformador 2 da subestação 1 com TIES fechados - Variação do valor RMS da corrente com o tempo (hora:minuto).....	45
Figura 34: Transformador 2 da subestação 1 com TIES fechados - Variação do valor RMS da tensão com o tempo (hora:minuto).....	45
Figura 35: Transformador 2 da subestação 1 com TIES fechados - Variação do valor percentual de distorção harmônica de corrente com o tempo (hora:minuto) .....	46
Figura 36: Transformador 2 da subestação 1 com TIES fechados - Variação do valor percentual de distorção harmônica de tensão com o tempo (hora:minuto)...	46
Figura 37: Transformador 2 da subestação 1 com TIES fechados - Variação do fator de potência da fundamental com o tempo (hora:minuto).....	47
Figura 38: Transformador 3 da subestação 1 com TIES fechados - Variação do valor RMS da corrente com o tempo (hora:minuto) .....	49
Figura 39: Transformador 3 da subestação 1 com TIES fechados - Variação do valor RMS da tensão com o tempo (hora:minuto).....	49
Figura 40: Transformador 3 da subestação 1 com TIES fechados - Variação do valor percentual de distorção harmônica de corrente com o tempo (hora:minuto) .....	50
Figura 41: Transformador 3 da subestação 1 com TIES fechados - Variação do valor percentual de distorção harmônica de tensão com o tempo (hora:minuto)...	50
Figura 42: Transformador 3 da subestação 1 com TIES fechados - Variação do fator de potência da fundamental com o tempo (hora:minuto).....	51
Figura 43: Transformador 4 da subestação 1 com TIES fechados - Variação do valor RMS da corrente com o tempo (hora:minuto).....	53
Figura 44: Transformador 4 da subestação 1 com TIES fechados - Variação do valor RMS da tensão com o tempo (hora:minuto).....	53
Figura 45: Transformador 4 da subestação 1 com TIES fechados - Variação do valor percentual de distorção harmônica de corrente com o tempo (hora:minuto). .....	54
Figura 46: Transformador 4 da subestação 1 com TIES fechados - Variação do valor	

percentual de distorção harmônica de tensão com o tempo (hora:minuto)...	55
Figura 47: Transformador 4 da subestação 1 com TIES fechados - Variação do fator de potência da fundamental com o tempo (hora:minuto).....	55
Figura 48: Barramento dos disjuntores TIE da subestação 1.....	58
Figura 49: Barramento dos disjuntores TIE da subestação 1 - Variação do valor RMS da tensão com o tempo (hora:minuto).....	59
Figura 50: Barramento dos disjuntores TIE da subestação 1 - Variação do valor percentual de distorção harmônica de tensão com o tempo (hora:minuto)...	59
Figura 51: Alimentador das cargas do transformador 1 da subestação 2.....	60
Figura 52: Transformador 1 da subestação 2 - Variação do valor RMS da corrente com o tempo (hora:minuto).....	61
Figura 53: Transformador 1 da subestação 2 - Variação do valor RMS da tensão com o tempo (hora:minuto).....	61
Figura 54: Transformador 1 da subestação 2 - Variação do valor percentual de distorção harmônica de corrente com o tempo (hora:minuto).....	62
Figura 55: Transformador 1 da subestação 2 - Variação do valor percentual de distorção harmônica de tensão com o tempo (hora:minuto).....	62
Figura 56: Transformador 1 da subestação 2 - Variação do fator de potência da fundamental com o tempo (hora:minuto).....	63
Figura 57: Alimentador das cargas do transformador 2 da subestação 2.....	65
Figura 58: Transformador 2 da subestação 2 - Variação do valor RMS da corrente com o tempo (hora:minuto).....	66
Figura 59: Transformador 2 da subestação 2 - Variação do valor RMS da tensão com o tempo (hora:minuto).....	66
Figura 60: Transformador 2 da subestação 2 - Variação do valor percentual de distorção harmônica de corrente com o tempo (hora:minuto).....	67
Figura 61: Transformador 2 da subestação 2 - Variação do valor percentual de distorção harmônica de tensão com o tempo (hora:minuto).....	67
Figura 62: Transformador 2 da subestação 2 - Variação do fator de potência da fundamental com o tempo (hora:minuto).....	68
Figura 63: Elevador com acionamento eletrônico através de controle escalar de velocidade em motor de indução trifásico - Variação do valor RMS da corrente com o tempo (hora:minuto).....	70
Figura 64: Elevador com acionamento eletrônico através de controle escalar de	

velocidade em motor de indução trifásico - Variação do valor RMS da tensão com o tempo (hora:minuto).....	71
Figura 65: Elevador com acionamento eletrônico através de controle escalar de velocidade em motor de indução trifásico - Variação do valor percentual de distorção harmônica de corrente com o tempo (hora:minuto).....	71
Figura 66: Elevador com acionamento eletrônico através de controle escalar de velocidade em motor de indução trifásico - Variação do valor percentual de distorção harmônica de tensão com o tempo (hora:minuto).....	72
Figura 67: Elevador com acionamento eletrônico através de controle escalar de velocidade em motor de indução trifásico - Variação do fator de potência da fundamental com o tempo (hora:minuto).....	72
Figura 68: Circuito para cálculo da distorção harmônica de tensão.....	77
Figura 69: Banco de capacitores aplicado as cargas do transformador 1 da subestação.1.....	80
Figura 70: Banco de capacitores aplicado as cargas do transformador 2 da subestação 1 .....	82
Figura 71: Banco de capacitores aplicado as cargas do transformador 2 da subestação 2 .....	83
Figura 72: Filtro passivo aplicado ao acionamento eletrônico com controle de velocidade escalar (VVVF) de elevador em motor de indução trifásico.....	85
Figura 73: Filtro ativo de potência paralelo ( <i>shunt</i> ) a três condutores pela estratégia de controle de potência instantânea constante.....	88
Figura 74: Ícone do filtro ativo utilizado nas simulações.....	89
Figura 75: Operação matricial para obtenção de $V_{\alpha}$ .....	90
Figura 76: Operação matricial para obtenção de $V_{\beta}$ .....	91
Figura 77: Operação matricial para obtenção de $I_{\alpha}$ .....	92
Figura 78: Operação matricial para obtenção de $I_{\beta}$ .....	92
Figura 79: Filtragem da potência $\tilde{p}$ e da potência $q$ .....	93
Figura 80: Cálculo das correntes de compensação no PSCAD EMTDC™.....	93
Figura 81: Cálculo de delta.....	94
Figura 82: Cálculo das correntes de compensação nas coordenadas a,b e c no PSCAD EMTDC™.....	94
Figura 83: Bloco abc-dq para algoritmo de geração dos sinais de referência para disparo	

dos IGBTs.....	95
Figura 84: Reguladores PI para geração das funções de controle err_ind e err_inq.....	95
Figura 85: Parametrização de reguladores PI no PSCAD EMTDC™ .....	96
Figura 86: PLL utilizado para gerar o ângulo utilizado na transformação abc-dq.....	96
Figura 87: Parametrização do bloco abc-dq do PSCAD EMTDC™.....	97
Figura 88: Ícone do gerador de onda triangular e respectiva configuração.....	97
Figura 89: Bloco de pulsos interpolados do PSCAD EMTDC™.....	98
Figura 90: Topologia do filtro ativo: inversor a ponte de IGBTs.....	99
Figura 91: Diagrama de circuito da simulação do transformador 1 da subestação 1....	102
Figura 92: Simulação do transformador 1 da subestação 1: Detalhamento da fonte de corrente harmônica da fase A.....	103
Figura 93: Simulação do transformador 1 da subestação 1: Formas de onda da tensão e da corrente na fase A.....	103
Figura 94: Simulação do transformador 1 da subestação 1: Formas de onda da tensões nas fases.....	104
Figura 95: Simulação do transformador 1 da subestação 1: Formas de onda das correntes nas fases.....	104
Figura 96: Simulação do transformador 1 da subestação 1: Implementação no PSCAD™ da medição do fator de potência trifásico da fundamental.....	105
Figura 97: Simulação do transformador 1 da subestação 1 : Aplicação de filtro ativo ao transformador 1.....	106
Figura 98: Simulação do transformador 1 da subestação 1 : Formas de onda de corrente no secundário do transformador 1 com a aplicação do filtro ativo.....	107
Figura 99: Simulação do transformador 1 da subestação 1: Formas de onda da corrente e de tensão em fase no secundário do transformador 1, após a aplicação do filtro ativo.....	107
Figura 100: Simulação do transformador 1 da subestação 1: Fator de potência praticamente unitário no secundário do transformador 1, após a aplicação do filtro ativo.....	108
Figura 101: Simulação do transformador 2 da subestação 1: Diagrama de circuito da simulação do transformador 2 da subestação 1.....	110
Figura 102: Simulação do transformador 2 da subestação 1: Formas de onda da tensão e da corrente na fase A.....	111

Figura 103: Simulação do transformador 2 da subestação 1: Formas de onda de tensões nas fases.....	111
Figura 104: Simulação do transformador 2 da subestação 1: Formas de onda de correntes nas fases.....	112
Figura 105: Simulação do transformador 2 da subestação 1: Implementação no PSCAD da medição do fator de potência trifásico da fundamental.....	113
Figura 106: Aplicação de filtro ativo ao transformador 2 da subestação 1.....	114
Figura 107: Formas de onda de corrente no secundário do transformador 2 da subestação 1 com a aplicação do filtro ativo.....	115
Figura 108: Formas de onda da corrente e de tensão em fase no secundário do transformador 2 da subestação 1, após a aplicação do filtro ativo.....	115
Figura 109: Fator de potência praticamente unitário no secundário do transformador 2 da subestação 1, após a aplicação do filtro ativo.....	116
Figura 110: Diagrama de circuito da simulação do transformador 2 da subestação 2..	118
Figura 111: Simulação do transformador 2 da subestação 2: Formas de onda da tensão e da corrente na fase A.....	119
Figura 112: Simulação do transformador 2 da subestação 2: Formas de onda de tensões nas fases.....	119
Figura 113: Simulação do transformador 2 da subestação 2: Formas de onda de correntes nas fases.....	120
Figura 114: Simulação do transformador 2 da subestação 2: Implementação no PSCAD da medição do fator de potência trifásico da fundamental.....	121
Figura 115: Aplicação de filtro ativo ao transformador 2 da subestação 2.....	122
Figura 116: Formas de onda de corrente no secundário do transformador 2 da subestação 2 com a aplicação do filtro ativo.....	123
Figura 117: Formas de onda da corrente e de tensão em fase no secundário do transformador 2 da subestação 2, após a aplicação do filtro ativo.....	123
Figura 118: Fator de potência praticamente unitário no secundário do transformador 2 da subestação 2 após a aplicação do filtro ativo.....	124
Figura 119: Oscilografia do acionamento VVVF do elevador 3 do prédio anexo 2.....	125
Figura 120: Implementação do controle escalar (v/f) para motor de indução trifásico.	126
Figura 121: Regulador proporcional-integral com anti-reset-windup no PSCAD-EMTDC.....	127
Figura 122: Modelo do acionamento VVVF simulado no PSCAD-EMTDC.....	128



Figura 123: Parametrização dos diodos do retificador do acionamento VVVF.....	129
Figura 124: Parametrização dos IGBTs do inversor do acionamento VVVF.....	129
Figura 125: Lógica para disparo dos IGBTs do inversor do acionamento VVVF.....	131
Figura 126: Correntes na entrada do retificador do acionamento VVVF.....	132
Figura 127: Velocidade do motor seguindo perfil de velocidade de referência.....	134
Figura 128: Tensões aplicadas ao motor.....	134
Figura 129: Tensão DC na saída do retificador.....	135
Figura 130: Aplicação de filtro ativo a entrada do acionamento VVVF.....	136
Figura 131: Formas de onda no lado de baixa (220V) do autotransformador após a aplicação de filtro ativo no lado de alta (380V).....	137
Figura 132: Topologia <i>Split-Capacitor</i> para filtro ativo a quatro condutores.....	142

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Transformador 1 da subestação 1 com TIES abertos - Registro obtido as 13:06:00,01 h do dia 24/03/2009.....	21
Tabela 2: Transformador 2 da subestação 1 com TIES abertos - Registro obtido as 11:36:00,03 h do dia 24/03/2009.....	26
Tabela 3: Transformador 3 da subestação 1 com TIES abertos - Registro obtido as 14:27:00,09 h do dia 24/03/2009.....	32
Tabela 4: Transformador 4 da subestação 1 com TIES abertos - Registro obtido as 14:12:00,01 h do dia 02/06/2009.....	37
Tabela 5: Transformador 1 da subestação 1 com TIES fechados - Registro obtido as 13:33:00,06 h do dia 02/02/2009.....	43
Tabela 6: Transformador 2 da subestação 1 com TIES fechados - Registro obtido as 13:39:00,05 h do dia 02/02/2009.....	47
Tabela 7: Transformador 3 da subestação 1 com TIES fechados - Registro obtido as 13:51:00,04 h do dia 02/02/2009.....	51
Tabela 8: Transformador 4 da subestação 1 com TIES fechados - Registro obtido as 13:48:00,01 h do dia 02/02/2009.....	56
Tabela 9: Transformador 1 da subestação 2 - Registro obtido as 14:10:28.00 h do dia 05/02/2009.....	63
Tabela 10: Transformador 2 da subestação 2 - Registro obtido as 14:10:28.00 h do dia 05/02/2009.....	68
Tabela 11: Elevador com acionamento eletrônico através de controle escalar de velocidade em motor de indução trifásico - Registro obtido as 15:07:34,00 h	

do dia 18/02/2009.....	73
Tabela 12: Transformador 1 da subestação 1 com disjuntores TIE abertos – Registro obtido as 05:51:00,04 h do dia 24/03/2009.....	80
Tabela 13: Transformador 2 da subestação 1 com disjuntores TIE abertos – Registro obtido as 16:24:10,00 h do dia 11/02/2009.....	81
Tabela 14: Transformador 2 da subestação 2 - Registro obtido as 16:24:10,00 h do dia 11/02/2009.....	82
Tabela 15: Elevador com acionamento eletrônico através de controle escalar de velocidade em motor de indução trifásico - Registro obtido as 15:07:34,00 h do dia 11/02/2009.....	84
Tabela 16: Tensão na fase A do transformador 1 da subestação 1 - Registro obtido as 14:33:00,09 h do dia 24/03/2009.....	100
Tabela 17: Corrente na fase A do transformador 1 da subestação 1 - Registro obtido as 14:33:00,09 h do dia 24/03/2009.....	100
Tabela 18: Tensão na fase B do transformador 1 da subestação 1 - Registro obtido as 14:33:00,09 h do dia 24/03/2009.....	100
Tabela 19: Corrente na fase B do transformador 1 da subestação 1 - Registro obtido as 14:33:00,09 h do dia 24/03/2009.....	101
Tabela 20: Tensão na fase C do transformador 1 da subestação 1 - Registro obtido as 14:33:00,09 h do dia 24/03/2009.....	101
Tabela 21: Corrente na fase C do transformador 1 da subestação 1 - Registro obtido as 14:33:00,09 h do dia 24/03/2009.....	101
Tabela 22: Tensão na fase A do transformador 2 da subestação 1 - Registro obtido as 14:33:00,05 h do dia 24/03/2009.....	108
Tabela 23: Corrente na fase A do transformador 2 da subestação 1 - Registro obtido as 14:33:00,05 h do dia 24/03/2009.....	108
Tabela 24: Tensão na fase B do transformador 2 da subestação 1 - Registro obtido as 14:33:00,05 h do dia 24/03/2009.....	108
Tabela 25: Corrente na fase B do transformador 2 da subestação 1 - Registro obtido as 14:33:00,05 h do dia 24/03/2009.....	108
Tabela 26: Tensão na fase C do transformador 2 da subestação 1 - Registro obtido as 14:33:00,05 h do dia 24/03/2009.....	108
Tabela 27: Corrente na fase C do transformador 2 da subestação 1 - Registro obtido as 14:33:00,05 h do dia 24/03/2009.....	109

Tabela 28: Tensão na fase A do transformador 2 da subestação 2 - Registro obtido as 16:24:10,00 h do dia 11/02/2009.....	117
Tabela 29: Corrente na fase A do transformador 2 da subestação 2 - Registro obtido as 16:24:10,00 h do dia 11/02/2009.....	117
Tabela 30: Tensão na fase B do transformador 2 da subestação 2 - Registro obtido as 16:24:10,00 h do dia 11/02/2009.....	117
Tabela 31: Corrente na fase B do transformador 2 da subestação 2 - Registro obtido as 16:24:10,00 h do dia 11/02/2009.....	117
Tabela 32: Tensão na fase C do transformador 2 da subestação 2 - Registro obtido as 16:24:10,00 h do dia 11/02/2009.....	117
Tabela 33: Corrente na fase C do transformador 2 da subestação 2 - Registro obtido as 16:24:10,00 h do dia 11/02/2009.....	118
Tabela 34: Orçamento de bancos de capacitores automáticos.....	139
Tabela 35: Orçamento de banco de capacitores com filtro de harmônicos para o acionamento VVVF.....	140
Tabela 36: Orçamento de filtros ativos.....	142

# Capítulo 1

## Introdução

As inovações da engenharia elétrica no campo do condicionamento da energia elétrica visam promover a sua utilização mais eficiente e econômica.

A eletrônica de potência busca prover soluções para produzir fontes de alimentação controladas específicas para as mais diversas aplicações. O acionamento de máquinas elétricas, fontes chaveadas para micro-computadores, fontes de alimentação ininterruptas (UPS- *Uninterruptable Power Supplies*), dispositivos eletroeletrônicos para partida e regulação de tensão de lâmpadas fluorescentes e de descarga (reatores eletrônicos), FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*) e HVDC (*High-voltage, Direct Current*), são algumas dentre as mais diversas aplicações conhecidas.

A vasta utilização de equipamentos e dispositivos de eletrônica de potência em instalações elétricas industriais e comerciais tem sido bastante notada nos tempos atuais.

Se, por um lado, a utilização de equipamentos de eletrônica de potência constitui um grande avanço na busca da eficiência energética, economia e conforto, por outro, pode gerar distúrbios para a qualidade da energia da instalação que os contém.

Por qualidade de energia entende-se que as grandezas elétricas fundamentais – tensão, corrente e frequência – devem encontrar-se em características adequadas a correta operação de equipamentos e a otimização do uso das instalações elétricas.

O objetivo do presente trabalho é avaliar a qualidade de energia de uma instalação elétrica de um prédio comercial real e propor soluções para os problemas de distorção harmônica e baixo fator de potência.

A partir da solução desses problemas, pretende-se realizar liberação de potência, visando futuros aumentos de carga, bem como otimizar o uso das instalações elétricas.

Em meio a trabalhos sobre qualidade de energia que têm sido publicados por organizações como o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) e pesquisas acadêmicas diversas publicadas sob a forma de seminários ou dissertações de mestrado, esse trabalho focaliza-se exclusivamente em uma instalação elétrica predial comercial. Vale citar os trabalhos de autores como: SIAHKALI [1], que discorreu sobre índices de qualidade de energia para distúrbios contínuos e discretos em uma área de

distribuição; SAEED *et al* [2], que apresentaram o resultado e a análise do monitoramento da qualidade de energia em baixa tensão para um determinado número de prédios acadêmicos; DU *et al* [3], que realizaram estudo de qualidade de energia em prédios de escritórios, identificando requisitos de harmônicos para o administrador predial e estabelecendo estratégias para adequação a limites de distorção harmônica, inclusive no projeto de instalações; SALEM *et al* [4], que trataram do desenvolvimento de um instrumento de monitoração da qualidade de energia baseado em DSP para detecção em tempo real de distúrbios; GRADY *et al* [5], que abordaram causas, efeitos e soluções para harmônicos em sistemas de potência; DOUGLAS [6], que fez um resumo de soluções para distúrbios de qualidade de energia; ATAIDE [7], que realizou um estudo aplicado a filtro ativo monofásico de potência enfatizando o projeto de filtro passivo de saída e da malha de controle; VILLALVA [8], que realizou estudo da aplicação de filtros ativos paralelos a sistemas trifásicos a quatro fios; YIN *et al* [9], que fizeram um resumo dos resultados de pesquisas sobre requisitos de qualidade de energia em indústrias de alta tecnologia; LIMONGI [10], que estudou propostas de compensação das distorções nas correntes da rede elétrica geradas pela presença de cargas que contém um alto conteúdo harmônico; ORTMANN *et al* [11], que apresentaram um estudo, simulação e implementação de um filtro ativo trifásico paralelo, com vistas à compensação harmônica de cargas não lineares comumente encontradas na indústria; HAFNER [12], que descreveu aspectos de implementação de um medidor de qualidade de energia elétrica, visando uma futura implementação de seus blocos funcionais.

As dissertações e artigos citados nesse parágrafo anterior trouxeram idéias para a realização do presente trabalho.

Os trabalhos [1] a [3] motivaram o desenvolvimento da metodologia utilizada neste trabalho. Nas referências [5],[6]e [9], a contribuição foi verificar soluções adequadas ao contexto de instalações elétricas prediais. Em [4] e [12] foi possível analisar qual o medidor mais adequado a verificação da qualidade de energia. A respeito da utilização de filtros ativos, as pesquisas dos autores ATAIDE [7], VILLALVA [8], LIMONGI [10] e ORTMANN *et al* [11] auxiliaram sobre como aplicar filtros ativos à cargas com distorção harmônica.

As contribuições deste trabalho são: apresentar as peculiaridades de instalações elétricas prediais no que concerne a distorção harmônica e variações da carga com o tempo; propor uma modelagem dessas cargas baseado em medições; utilizar

ferramentas de simulação para verificar esses modelos; e, por fim, simular a implantação de soluções de filtragem ativa nesses modelos, visando a sua realização na prática.

As cargas prediais são diferentes em seu comportamento de cargas industriais, em vista do fato de haver um predomínio de cargas monofásicas e com um espectro harmônico de corrente variante no tempo. A abordagem de cargas com essas características de variância no tempo é uma necessidade para que se possa desenvolver equipamentos ou soluções de filtragem otimizadas para instalações elétricas prediais.

Para uma efetiva análise de qualidade de energia em instalações elétricas, é necessário realizar medições em pontos de acoplamento comum e utilizar medidores adequados. O trabalho dos autores DU *et al* [3] ilustra bem esse aspecto.

Nos dias modernos houve um grande avanço em tecnologias de instrumentos de medição.

A evolução tecnológica em medidores de grandezas elétricas tem proporcionado a disponibilidade de analisadores de energia digitais, microprocessados e dotados de memória de massa. Esses instrumentos, programados para armazenar valores de tensões e correntes em tempo real, em intervalo de tempo definido e com intervalo de amostragem parametrizado pelo usuário, constituem-se, em ferramentas eficazes para análise da qualidade de energia de uma instalação, bem como para estudar o comportamento de cargas.

Osciloscópios digitais modernos permitem armazenamento de formas de onda em arquivos digitais.

Softwares de análise, fornecidos pelos fabricantes juntamente com os instrumentos de medição, permitem a organização de dados coletados em tabelas, relatórios e gráficos, o que facilita a discussão dos resultados por equipes técnicas de engenheiros.

Neste trabalho foram realizadas medições, com analisadores de energia, nas instalações elétricas do Tribunal Regional da 2ª Região, localizado à Rua Acre,80, Centro, Rio de Janeiro – RJ, Brasil. Trata-se de tribunal regional de segunda instância da justiça federal, constituído por um total de 5 (cinco) prédios.

A determinação dos pontos de medição foi precedida por um levantamento em campo das cargas do sistema elétrico predial, consultando e retificando diagramas unifilares existentes, ou elaborando novos a partir das observações nos locais.

Foram medidos os alimentadores gerais das principais cargas do sistema e identificados os pontos de acoplamento comum. Dados os resultados, foram detectados os pontos de degradação da qualidade de energia, sob os aspectos de distorção harmônica de tensão, de corrente, desbalanceamento de fases e baixo fator de potência.

A partir das medições realizadas, foram obtidos equivalentes elétricos simples com indutores, resistores, capacitores e fontes de corrente ideais, representando as cargas prediais no período de maior utilização, em instantes específicos. Esses modelos foram simulados de forma a reproduzir as medições e mostrar as formas de onda instantâneas obtidas a partir dos valores observados.

Para a carga mais crítica, que, para o sistema em análise, consiste no acionador do motor de indução trifásico para elevadores de passageiros, que utiliza a técnica de controle escalar de velocidade, foi elaborado um modelo mais detalhado. Esse modelo detalhou cada componente normalmente presente em um acionamento eletrônico real: retificador, inversor, motor e funcionamento e implementação do controle de velocidade. A limitação do modelo foi a indisponibilidade de dados precisos em virtude de o acionamento eletrônico real ser patenteado ao fabricante do mesmo ou do elevador. Houve, todavia, a preocupação de reproduzir no modelo simulado as medições observadas e tomando-se o cuidado de respeitar valores nominais oriundos de dados de placa.

A partir dos modelos obtidos, foi também simulada a implementação de filtros ativos de potência de modo a avaliar o impacto da inserção desses equipamentos no sistema.

A Teoria das Potências Instantâneas, desenvolvida inicialmente por diversos autores como Akagi, Kanazawa e Nabae [13],[14],[15] e [16], foi utilizada no controle dos filtros ativos.

Por fim, uma análise econômica comparativa entre a aplicação de filtros ativos e as soluções convencionais foi realizada, a partir de orçamentos obtidos junto a fornecedores do mercado.

A organização deste trabalho segue o roteiro abaixo.

No Capítulo 2, será feita a descrição do sistema elétrico predial, com base nos levantamentos de campo e consulta a documentações das instalações prediais.

No Capítulo 3, serão apresentadas as medições experimentais, seguidas de análise de resultados e estabelecimento de pontos críticos.



No Capítulo 4, serão mostradas simulações do sistema elétrico, buscando reproduzir as medições em campo, com posterior implementação de soluções a filtros ativos de potência.

No Capítulo 5, será realizada uma análise econômica da implantação de soluções convencionais (filtros passivos e bancos de capacitores) confrontadas com solução por filtros ativos.

## Capítulo 2

# Descrição do Sistema Elétrico Predial

## 2.1 Descrição Geral

O sistema elétrico predial em análise é alimentado em 13,8 kV, por alimentador de distribuição dedicado, existindo reserva, partindo de subestação de subtransmissão [17] da concessionária local.

No complexo há duas subestações de consumidor de instalação interior em invólucro metálico [17].

Na primeira, denominada principal ou primária, há quatro transformadores de 1 MVA a seco em resina, que se encontram ligados em paralelo, interligados no secundário, à jusante das respectivas proteções, através de barramentos seccionáveis por disjuntores denominados *TIE*. A ligação dos enrolamentos é, no primário, em delta; no secundário, em estrela. A tensão de linha é, nos enrolamentos primários, de 13,8 kV; nos enrolamentos secundários, de 220V.

Na segunda, denominada subestação secundária, há dois transformadores de 1 MVA a seco em resina. Esses transformadores não estão ligados em paralelo. A ligação dos enrolamentos é, no primário, em delta; no secundário, em estrela. A tensão de linha é, nos enrolamentos primários, de 13,8 kV; nos enrolamentos secundários, de 440V.

Nos casos de desenergização das subestações, há geração de energia local através de 2(dois) grupos moto-geradores de 440 kVA.

## 2.2 Alimentadores e grupos de cargas do complexo predial

A Figura 1 a seguir é uma representação unifilar simplificada do sistema elétrico predial em análise. Nessa figura, estão destacados os pontos onde foram efetuadas

medições e detalhados quais os analisadores usados – os modelos fixos de painel, ou de campo, conforme o caso.

Nas seções que se seguem, será feita uma breve descrição de cada alimentador ou grupo de cargas.

No caso da subestação 1 ou principal, o paralelismo dos transformadores, através dos disjuntores *TIE* ocasiona um compartilhamento de carga. O banco de capacitores da subestação 1 corrige o fator de potência das cargas dos quatro transformadores em paralelo e é de 375 kvar.

As seções a seguir quando se referirem a subestação 1, terão a descrição da carga que cada transformador alimenta com os disjuntores *TIE* abertos.

A subestação 1 atualmente opera com os disjuntores *TIES* fechados.

### **2.2.1 Alimentador das cargas do transformador 1 da subestação 1**

As cargas que estão ligadas ao transformador 1 consistem, principalmente, de compressores das unidades autônomas de ar-condicionado do tipo *self-contained* e circuitos de iluminação e tomadas comuns do prédio sede do complexo predial.

### **2.2.2 Alimentador das cargas do transformador 2 da subestação 1**

As cargas que estão ligadas ao transformador 2 alimentam o prédio anexo II do complexo predial e consistem, principalmente, de *fan-coils* de ar-condicionado, circuitos de iluminação, tomadas comuns e cinco elevadores de passageiros com motor de indução trifásico, sendo quatro deles acionados eletronicamente com controle de velocidade escalar em corrente alternada (*VVVF-Variable Voltage, Variable Frequency*), e o elevador restante, com acionamento eletromecânico convencional, através de contadores e relés.

O alimentador geral das cargas do prédio anexo II sai em barramento blindado, da subestação 1, localizada no subsolo do complexo predial, e se estende até o vigésimo

terceiro pavimento acima do nível térreo, considerando-se um pé direito de três metros, apresentando derivações nos andares em cabos.

### **2.2.2.1 Alimentador de acionamentos eletrônicos com controle de velocidade escalar (VVVF) para elevadores com motor de indução trifásico**

Os quatro acionamentos alimentados pelo transformador 2 da subestação 1 são parte significativa da carga do prédio anexo II.

Não é possível medir o alimentador de todos os elevadores em vista de este ser um barramento blindado sem ponto de acesso para medição. Desse barramento blindado, no final da prumada (23º pavimento), derivam alimentadores individuais, em cinco grupos de três condutores de 120mm<sup>2</sup>, correspondentes as três fases, sendo cada grupo terminado em sua respectiva chave seccionadora .

### **2.2.3 Alimentador das cargas do transformador 3 da subestação 1**

As cargas que estão ligadas ao transformador 3 consistem, principalmente, de bombas de serviço (água, esgoto, incêndio), circuitos de iluminação, tomadas de áreas especiais, alimentação das cargas do prédio plenário, iluminação de emergência, dois elevadores de passageiros com acionamento eletromecânico em corrente alternada e um elevador de passageiros com acionamento eletrônico VVVF escalar. São, em sua grande maioria, cargas de baixo fator de utilização, em vista de serem acionadas em instantes específicos e por curto lapso de tempo. Poucas cargas permanecem ligadas durante todo o horário de funcionamento do prédio. Essas cargas são alimentadas pelos grupos motor-geradores nos casos de desenergização da subestação principal e monitoradas através de uma USCA (unidade de supervisão de corrente alternada) microprocessada.

A alimentação da iluminação de emergência dos andares e dos elevadores é feita através de barramento blindado que se estende até o 23º pavimento, apresentado derivações em cabos, em cada andar.

O elevador de passageiros com acionamento eletrônico VVVF escalar, alimentado pelo transformador 3 da subestação 1 encontra-se na casa de máquinas do prédio anexo II. No 23º pavimento derivam três cabos do barramento blindado, correspondentes as três fases, com seção nominal de 120mm<sup>2</sup> e que terminam em chave seccionadora.

Na situação normal de disjuntores TIE ligados, não é possível medir o perfil conjunto dessas cargas. Entretanto, durante dois dias, com a subestação 1 funcionando com disjuntores TIE desligados e com banco de capacitores de 375 kvar desligado, foi possível obter o perfil dessa carga através do analisador de painel ligado nesse transformador, uma vez que o transformador 3 só alimentou, nessa situação, as cargas ligadas ao respectivo barramento secundário.

## **2.2.4 Alimentador das cargas do transformador 4 da subestação 1**

As cargas que estão ligadas ao transformador 4 consistem, principalmente, de tomadas comuns e circuitos de iluminação do prédio anexo I, bombas hidráulicas, 8 (oito) UPS de 80kVA para alimentação de estações de trabalho de usuários e 4 (quatro) elevadores com acionamento *Ward-Leonard* eletromecânico (localizados no prédio sede do complexo predial).

As cargas de iluminação e tomadas comuns do prédio anexo I são supridas nos andares por meio de barramento blindado que se estende até o 23º pavimento. Em cada andar, o barramento deriva em cabos.

### **2.2.4.1 Alimentador geral dos 8(oito) UPS de 80 kVA**

Esses UPS são de dois fabricantes diferentes.

Quatro deles alimentam cargas prediais distantes sem redundância de carga e sem paralelismo entre si, possuindo topologia operacional dupla conversão.

Na topologia dupla conversão, a tensão de entrada é retificada e depois transformada de contínua para alternada por um inversor. Na presença da tensão de rede da concessionária, o retificador carrega o banco de baterias. Na ausência de alimentação

da concessionária, o banco de baterias supre a tensão contínua para o inversor. Nessa topologia, uma chave estática pode comutar a tensão de entrada diretamente à saída, por comando remoto ou local, ou sob determinadas condições de falha no UPS.

Esses UPS de dupla conversão possuem filtragem passiva na entrada, que acarreta redução da distorção harmônica total de corrente na entrada e também correção do fator de potência da fundamental na entrada.

Os outros quatro UPS operam em paralelismo ativo redundante de carga [18] em topologia de patente proprietária do fabricante dos mesmos, mas sendo uma variante da dupla conversão, alimentando as cargas prediais com divisão igual de carga entre UPS, dois a dois, em operação normal, ou um UPS assumindo a carga total, no caso de falha do outro UPS.

Esses UPS de tecnologia proprietária também possuem filtragem na entrada para redução da distorção harmônica total de corrente e correção do fator de potência da fundamental na entrada.

## **2.2.5 Alimentador das cargas do transformador 1 da subestação 2**

As cargas que estão ligadas ao transformador 1 da subestação 2 consistem de resfriadores (*chillers*) de ar-condicionado central tipo parafuso.

Esse transformador possui banco de capacitores automático de 130 kvar que corrige o fator de potência da fundamental.

## **2.2.6 Alimentador das cargas do transformador 2 da subestação 2**

As cargas que estão ligadas ao transformador 2 da subestação 2 consistem de compressores de ar-condicionado central, bombas de serviço do sistema de ar-condicionado central e UPS de 50 kVA que atendem a Central de Processamento de Dados (CPD) do complexo predial.

### **2.2.6.1 Alimentador geral dos UPS de 50 kVA**

Esse alimentador está ligado ao transformador 2 da subestação 2 e alimenta 2 (dois) UPS de 50 kVA que atendem a Central de Processamento de Dados (CPD) do complexo predial.

Esses UPS não trabalham simultaneamente. Estão ligados em paralelismo passivo redundante de carga [18], ou seja, em caso de falha ou de fim da autonomia do UPS principal, a carga é automaticamente transferida, sem interrupção, para o UPS reserva (de mesma potência- 50 kVA). Em caso de manutenção do UPS principal, a carga é transmitida manualmente para o UPS reserva, sem interrupção da carga, através de manobras de seccionadora, chaves rotativas e botoeiras do quadro de transferência de carga, em sequência de operação pré-definida pelo fabricante dos UPS.

Esses UPS ainda contam com redundância de alimentação. Podem ser alimentados pelos grupos moto-geradores.

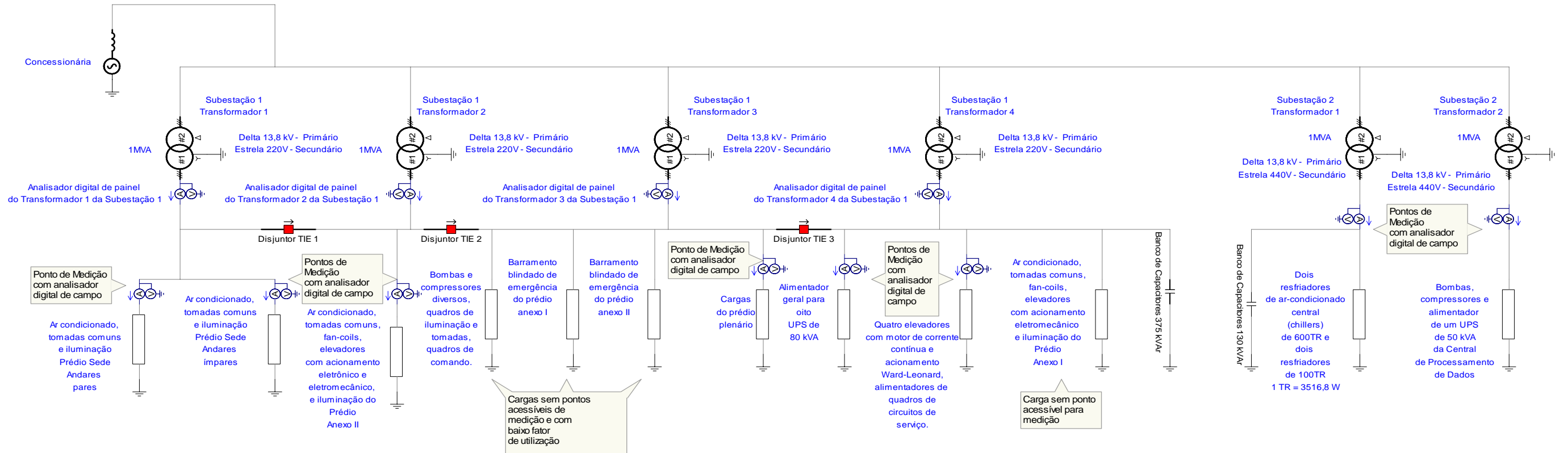


Figura 1: Representação simplificada do sistema elétrico em análise



## Capítulo 3

# Apresentação de medidas experimentais, análise dos resultados das medições e estabelecimento de pontos críticos

Foram realizadas medições com analisadores de energia elétrica em dias distintos buscando traçar a evolução das cargas prediais ao longo do tempo.

Tais medições foram realizadas pelo autor deste trabalho com a autorização do Diretor Geral do Tribunal Regional Federal da 2ª Região.

Os locais onde se realizaram medições correspondem aos alimentadores principais das cargas do complexo predial, ou seja, barramentos do secundário de cada um dos transformadores, alimentadores de grupos de cargas, ou, conforme a conveniência, uma carga específica.

A partir dessas medições, foram estabelecidos pontos críticos com respeito à qualidade de energia.

Na Figura 1 do Capítulo 2 observa-se que o barramento secundário dos transformadores 1 a 4 da subestação 1 pode ser seccionado pelos disjuntores denominados *TIE*. Foram realizadas medições através dos analisadores de painel indicados nessa figura, em dias distintos: em um, com os disjuntores *TIE* abertos; em outro, com os disjuntores *TIE* fechados. Em outros dias, foram realizadas medições em cada uma das cargas acessíveis dos barramentos dos transformadores 1 a 4 da subestação 1, conforme indicados na Figura 1 do Capítulo 2, com analisador portátil de campo, na situação de disjuntores *TIES* fechados, sendo esse o estado normal desses disjuntores.

As cargas dos transformadores 1 e 2 da subestação 2 foram medidas com analisador portátil de campo.

A metodologia para estabelecimento de pontos críticos, sob o ponto de vista da qualidade de energia, baseou-se em critérios quantitativos e qualitativos e focou-se: na carga equivalente do secundário de cada transformador da subestação 1, na condição de não paralelismo dos transformadores (disjuntores *TIE* abertos); na carga equivalente do

secundário de cada transformador da subestação 2 (que não possuem paralelismo); ou, na carga ou grupo de cargas individuais, indicadas na Figura 1 do Capítulo 2; ou eventualmente localizados em pontos da instalação predial não representados nessa figura, nos quais os valores medidos violarem expressivamente esses critérios quantitativos e qualitativos que serão descritos nos parágrafos à seguir.

O paralelismo dos quatro transformadores da subestação 1 é a condição de operação normal desses transformadores. Todavia, os barramentos e proteções não são dimensionados para a alta corrente de curto-circuito decorrente da ligação em paralelo. Há uma necessidade de se corrigir isso, abrindo os disjuntores de ligação (*TIE*) e dimensionando equipamentos (bancos de capacitores ou filtros) que corrijam o fator de potência e eliminem harmônicos de corrente, nos alimentadores das cargas que se encontram sob cada transformador. Neste trabalho, as medições com *TIES* abertos visam gerar dados para que esses citados dimensionamentos possam ser feitos.

O estabelecimento de pontos críticos sob o ponto de vista quantitativo baseou-se: em valores tabelados pela norma IEEE 519-1992 [19] para análise de distorções harmônicas de corrente e de tensão; no valor estabelecido pela legislação brasileira, através da ANEEL, para fator de potência da fundamental (0,92); e, no comportamento gráfico de correntes e tensões eficazes ao longo do tempo, para análise de desbalanceamentos.

Sob o ponto de vista qualitativo, procurou-se avaliar o quanto que a ocorrência de distorções harmônicas na corrente e de a existência de baixos valores no valor do fator de potência da fundamental influenciam, em termos de eficiência energética, e o quanto que a melhora desses parâmetros pode representar em liberação de potência, para futuros aumentos de carga. O que se almeja é otimizar a utilização das instalações elétricas prediais e possibilitar aumento da carga instalada, minimizando novos investimentos em infra-estrutura elétrica.

As medições e análises das cargas acessíveis dos barramentos da subestação 1 não foram incluídas nesse capítulo em função de, em todos os casos observados, excetuando-se a carga intitulada “Ar condicionado, tomadas comuns, *fan-coils*, elevadores com acionamento eletrônico e eletromecânico, e iluminação do prédio anexo II” (Figura 2 do Capítulo 2), não terem apresentado valores críticos expressivos em todos os critérios quantitativos.

Apesar da metodologia de estabelecimento de pontos críticos não focar os transformadores da subestação 1 na condição de paralelismo, as medições desses

transformadores foram incluídas para efeito comparativo do comportamento das distorções harmônicas de corrente e de tensão com a situação de não paralelismo.

Foram medidas a tensão e a distorção harmônica de tensão no barramento comum dos quatro transformadores da subestação 1, com os *TIES* fechados. Tais medições serviram para avaliar se as cargas da subestação 1 introduzem distorção harmônica de tensão acima do estabelecido pela norma IEEE 519-1992 [19].

Os alimentadores de quatro dos elevadores do prédio anexo II, que atendem a acionamentos eletrônicos de controle escalar de velocidade de motor de indução trifásico, foram considerados especialmente críticos, por violarem severamente todos os critérios quantitativos acima descritos.

Gráficos demonstrando a variação, ao longo do tempo, das grandezas elétricas medidas, serão mostrados a seguir. O eixo horizontal representa a grandeza tempo, com os valores no formato hora: minuto. O eixo vertical representa a grandeza sob análise. As correntes são medidas em Ampères (A) RMS, as tensões em Volts (V) RMS, as distorções harmônicas de corrente (DHT<sub>i</sub>) e tensão (DHT<sub>v</sub>) em valor percentual da fundamental (%) e o fator de potência em valor adimensional, no qual  $0 \leq |Fp| \leq 1$ .

Logo após a apresentação das medições de cada alimentador ou grupo de cargas é feita a análise dos resultados pelos critérios supramencionados.

Para o leitor situar o local de cada medição, partes da Figura 1 do Capítulo 2 foram repetidas oportunamente, para cada conjunto de medições, com uma indicação em círculo representando o ponto medido.

As correntes de curto circuito consideradas em cada caso tiveram cálculo aproximado sem o conhecimento da impedância de sistema no primário, considerando apenas o lado secundário dos transformadores, a potência nominal dos transformadores (1MVA) e a impedância percentual de cada transformador (6,5%).

As correntes de neutro não foram medidas em ambas subestações em virtude de os neutros não estarem individualmente acessíveis à medição, nos secundários dos transformadores.

No caso dos alimentadores dos acionamentos eletrônicos dos elevadores, não existe neutro. Cabos elétricos das três fases e derivações do condutor terra oriundo da malha de aterramento da subestação são levados às entradas dos acionadores por meio de autotransformadores que elevam a tensão de linha de 220V para 380V.

### **3.1 Medição do alimentador das cargas dos transformadores da subestação 1 com os disjuntores TIE abertos e banco de capacitores desligado**

A Figura 2 a seguir apresenta um diagrama elétrico simplificado da subestação 1 com os disjuntores *TIE* abertos e o banco de capacitores de 375 kvar desligado.

Nessa Figura são destacados os analisadores de painel utilizados.

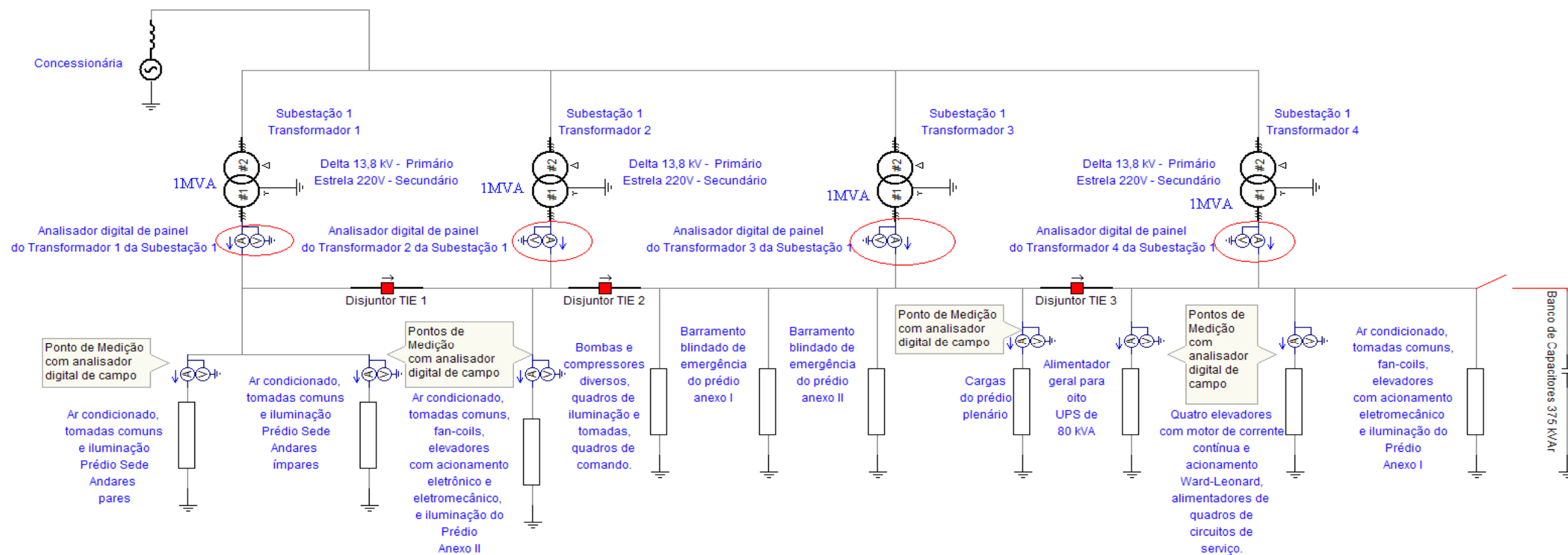


Figura 2: Subestação 1 com disjuntores TIE abertos e banco de capacitores desligado

### 3.1.1 Transformador 1 da subestação 1

A Figura 3 abaixo é um detalhamento do diagrama simplificado da Figura 2, mostrando as cargas do transformador 1 com os disjuntores *TIE* abertos.

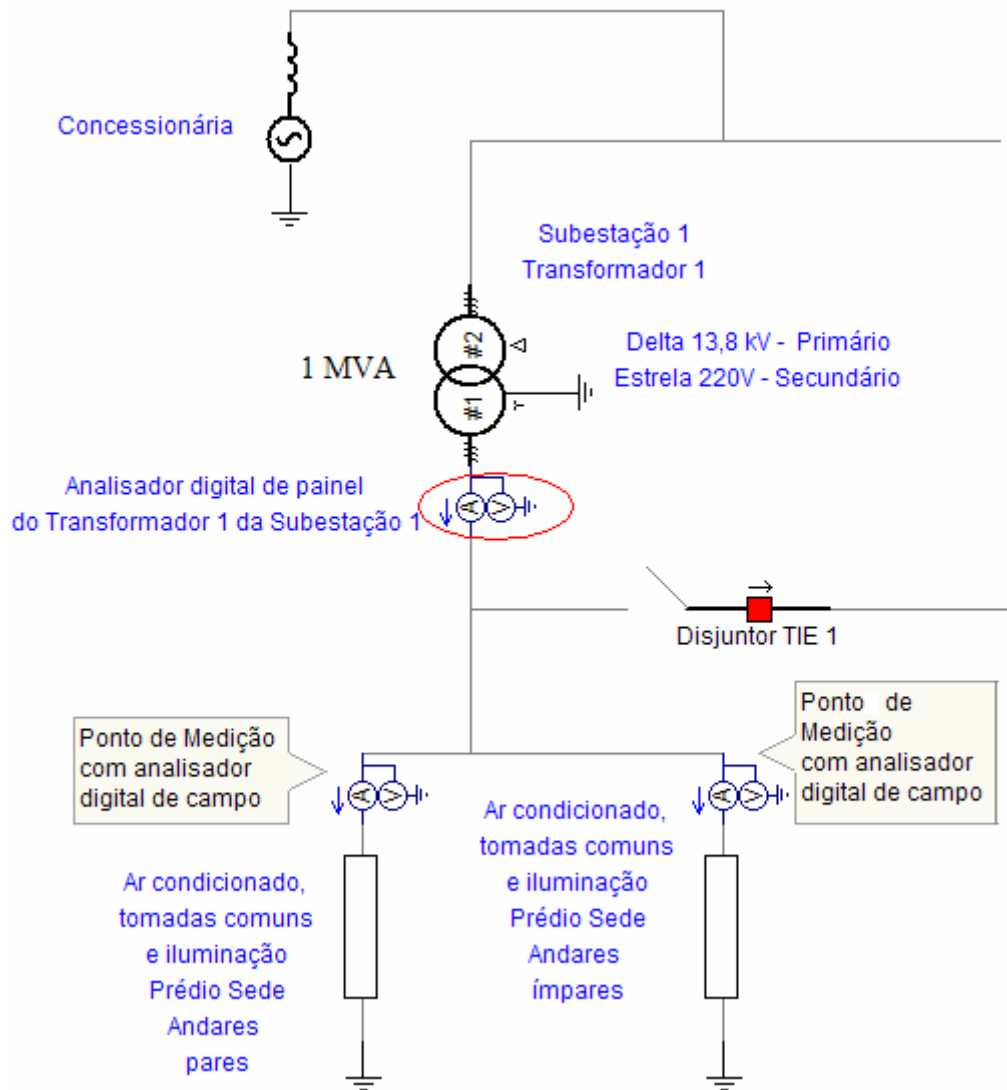


Figura 3: Cargas do transformador 1 da subestação 1.

As Figuras 4 e 5 abaixo mostram, respectivamente, a variação do valor *RMS* da corrente (em Ampères) e da tensão (em Volts) com o tempo no dia 24/03/2009.

Percebe-se, entre 4:00 e 7:00h um valor de pico na corrente (Figura 4), decorrente da ligação de unidades autônomas de refrigeração do tipo *self-contained*. Tal valor não será considerado na análise que se seguirá em razão de ter ocorrido fora do

horário de expediente do prédio (11:00 as 19:00h) e de não ser uma ocorrência usual a ligação de todas essas cargas no horário em que se verificou.

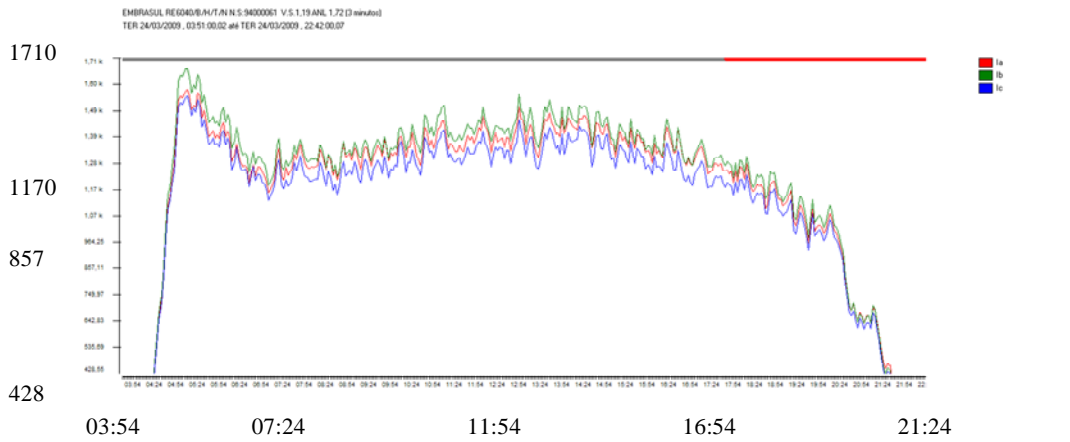


Figura 4: Variação do valor RMS da corrente com o tempo (hora:minuto).

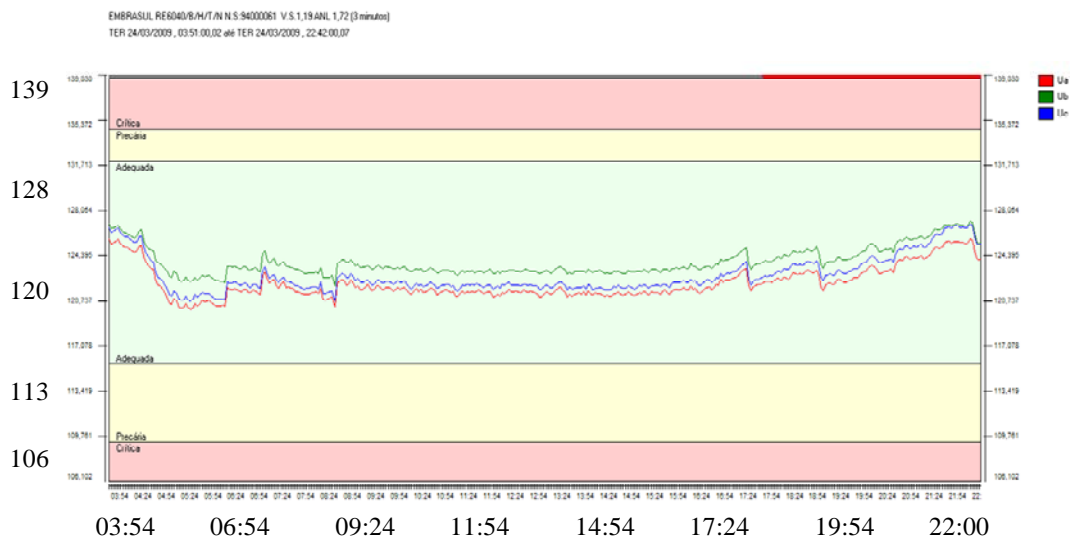


Figura 5: Variação do valor RMS da tensão com o tempo (hora:minuto).

As Figuras 6 e 7 abaixo mostram, respectivamente, a variação da distorção harmônica da corrente e da tensão (ambos em valor percentual) com o tempo, no dia 24/03/2009.

A existência de picos no valor da distorção harmônica de corrente entre 0:00 e 04:00h e após 20:30h (Figura 6) ocorre em horários em que a carga predial ligada é mínima.

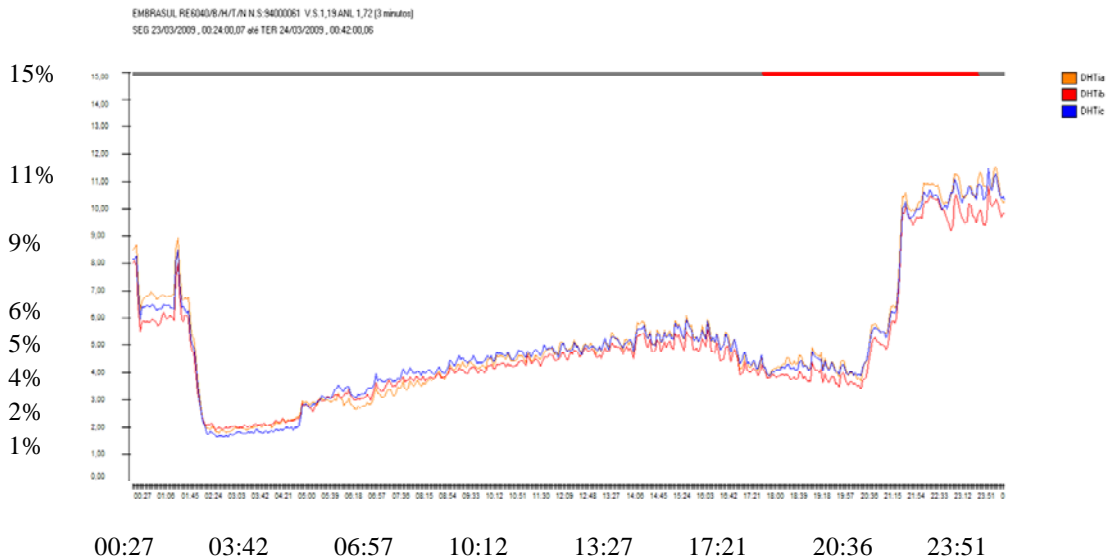


Figura 6: Variação do valor percentual de distorção harmônica de corrente com o tempo (hora:minuto)

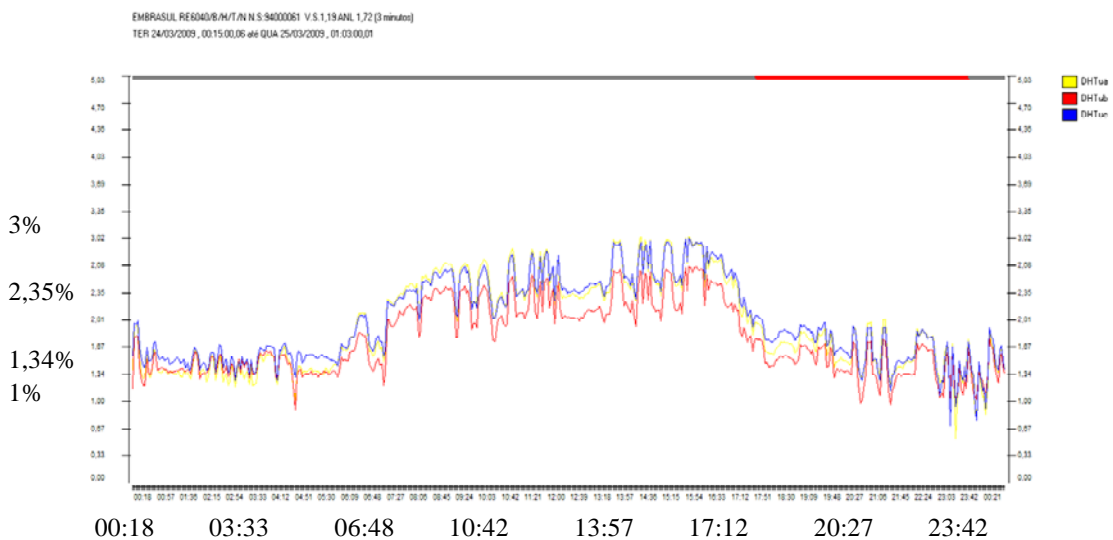


Figura 7: Variação do valor percentual de distorção harmônica de tensão com o tempo (hora:minuto)



A Figura 8 abaixo mostra a variação do fator de potência da fundamental com o tempo, no dia 24/03/2009.

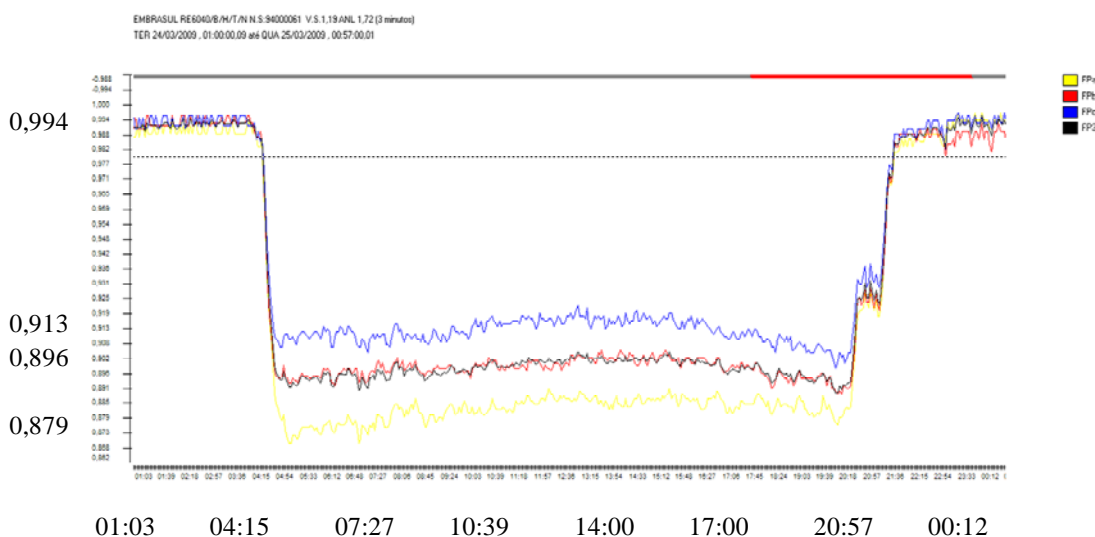


Figura 8: Variação do fator de potência da fundamental com o tempo (hora:minuto).

Para o transformador 1, com os disjuntores *TIE* abertos, foi obtido um pico de carga durante expediente de trabalho normal do prédio (11:00 às 19:00h), que ocorreu entre 13:00 e 15:00h, sendo esse registro obtido as 13:06:00,01 h do dia 24/03/2009. Foram obtidos os seguintes valores de corrente e distorções harmônicas:

**Tabela 1: Registro obtido as 13:06:00.01 h do dia 24/03/2009.**

Fase	Corrente RMS (A)	Distorção Harmônica de Tensão (%)	Distorção Harmônica de Corrente (%)
Fase A	1510,000	2,330	4,650
Fase B	1560,000	2,100	4,620
Fase C	1460,000	2,410	4,670

A corrente de curto circuito no secundário do transformador 1 com os disjuntores *TIE* abertos é de 40374 A.

A relação entre a corrente de curto-circuito e a corrente de carga resulta aproximadamente 25, para os valores da Tabela 1.

Para a utilização da Tabela 10.3 da norma IEEE 519-1992 [19] é recomendado que o valor da corrente de carga seja calculada como a corrente média das demandas

máximas dos doze meses precedentes. Na falta de dados acerca dessas demandas, optou-se por trabalhar com os valores de pico da Tabela 1. A utilização do valor de corrente nominal (aproximadamente 2600 A) resultaria em menores limites para a distorção harmônica de corrente, o que seria uma análise pouco verossímil. Os valores de pico da Tabela 1 são razoáveis em razão de terem sido verificados em medições feitas em outros dias.

Segundo a Tabela 10.3 da norma IEEE 519-1992 [19], para valores entre 20 e 50 da relação entre a corrente de circuito e a corrente de carga, a distorção harmônica de corrente admissível é de 8,0 %. Logo, para o transformador 1, com os disjuntores TIE abertos, a distorção harmônica de corrente não é crítica. Na Figura 6 também pode ser verificado que a distorção harmônica de corrente no período de maior utilização das instalações elétricas prediais, entre 13:00 e 15:00h, não ultrapassa 5%.

Segundo a Tabela 11.1 da norma IEEE 519-1992 [19], verifica-se que a distorção harmônica de tensão observada nas medições apresentadas na Tabela 1 encontra-se dentro dos padrões aceitáveis, pois, para tensões menores ou iguais a 69kV, a distorção harmônica de tensão não deve ser superior a 5%. Na Figura 7 também pode ser verificado que a distorção harmônica de tensão no período de maior utilização das instalações elétricas prediais, entre 13:00 e 15:00h, não ultrapassa 3%.

Na Figura 8, observa-se que o fator de potência da fundamental varia entre 0,89 e 0,92, no período de maior utilização das instalações elétricas prediais, o que demonstra a necessidade de uma correção, a fim de elevá-lo para acima de 0,92.

A análise das Figuras 4 e 5 revela que não há desbalanceamentos significativos de tensão e de corrente nas fases.

Em termos qualitativos, as cargas do transformador 1 não apresentam distorções harmônicas significativas, entretanto, carecem de correção do fator de potência da fundamental, o que pode ser implementado por filtro ativo shunt ou por banco de capacitores.

### 3.1.2 Transformador 2 da subestação 1

A Figura 9 abaixo é um detalhamento do diagrama simplificado da Figura 2, mostrando as cargas do transformador 2 com os disjuntores *TIE* abertos.

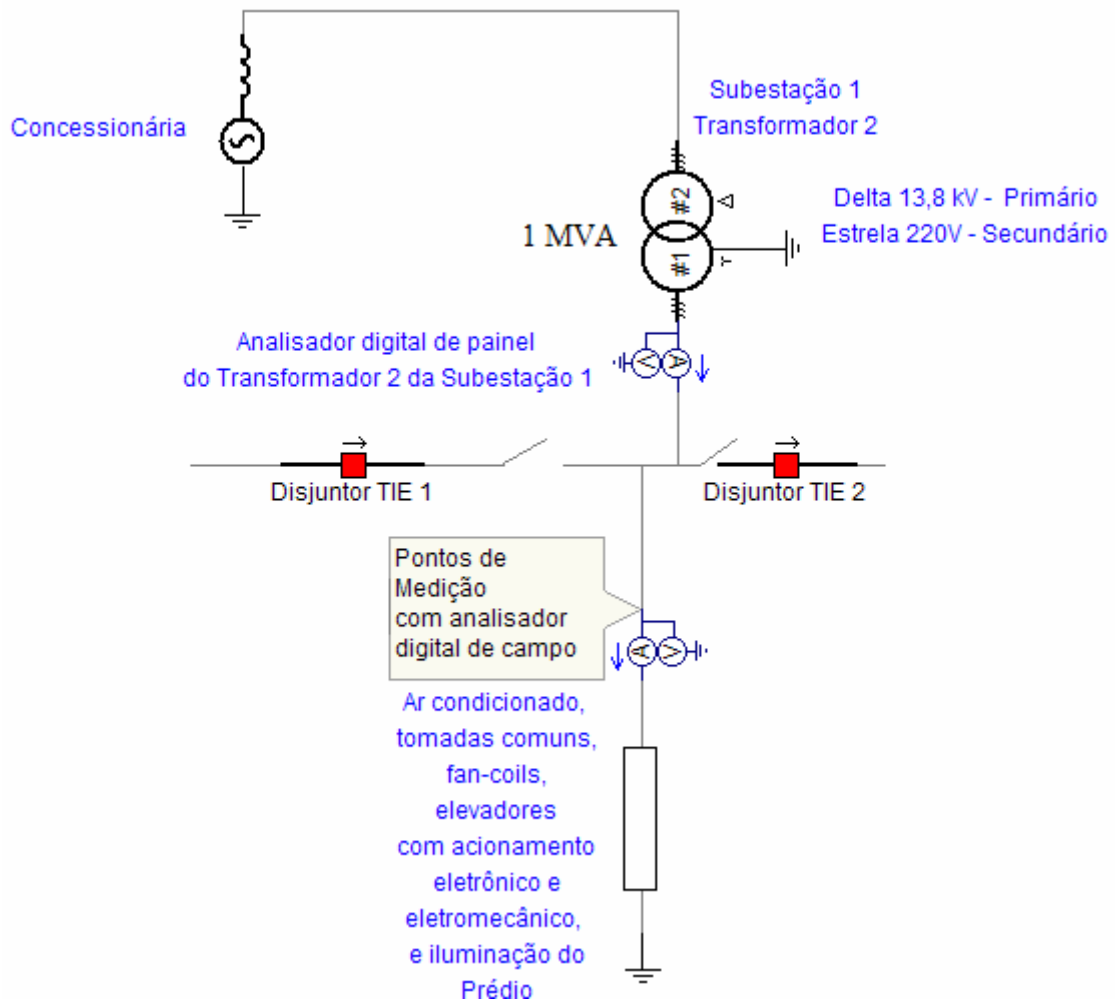


Figura 9: Cargas do transformador 2 da subestação 1.

As Figuras 10 e 11 abaixo mostram, respectivamente, a variação do valor *RMS* da corrente (em Ampères) e da tensão (em Volts) com o tempo no dia 24/03/2009.

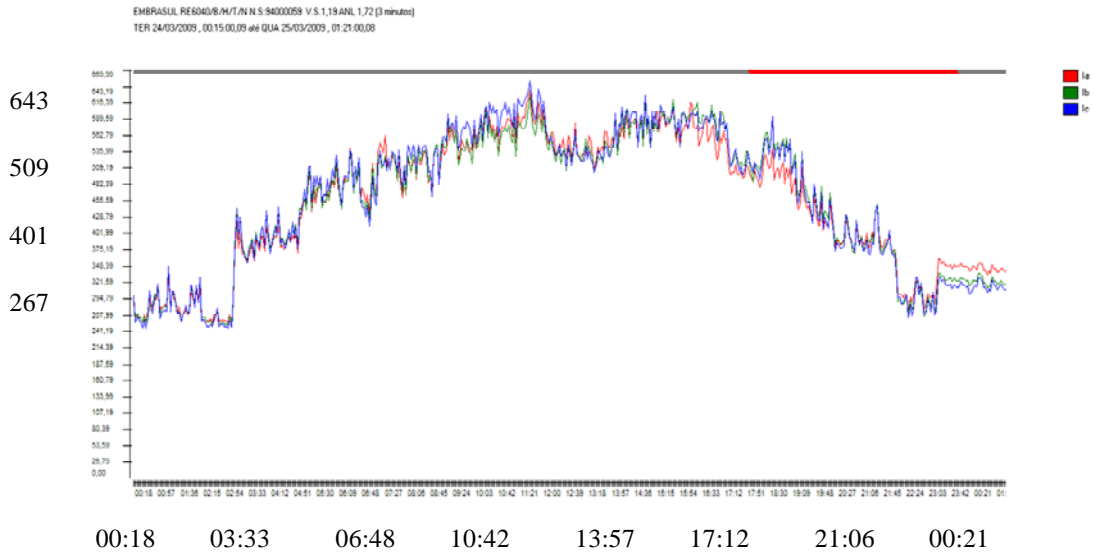


Figura 10: Variação do valor *RMS* da corrente com o tempo (hora:minuto).

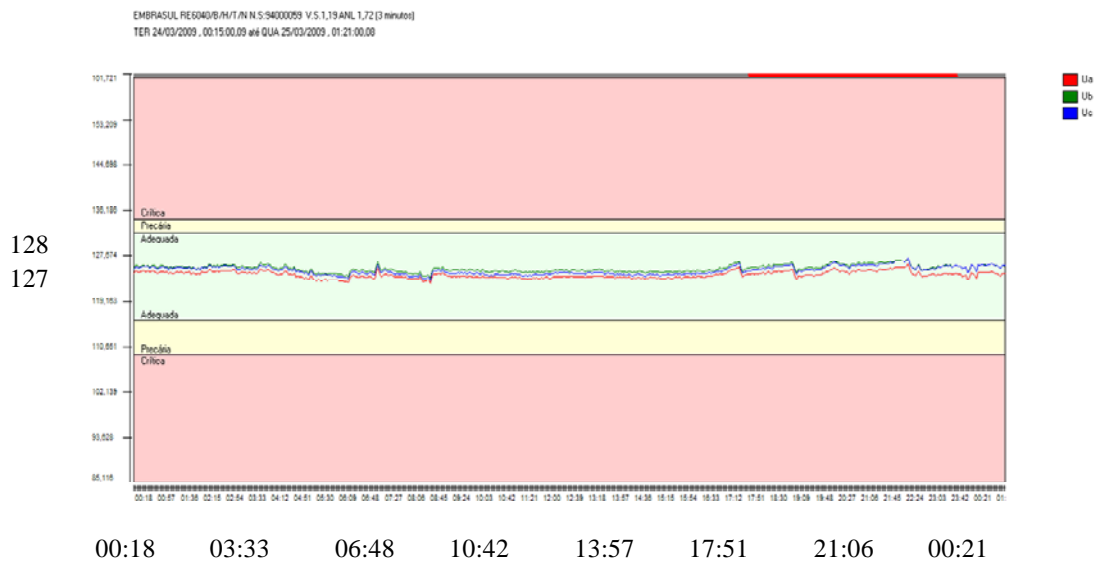


Figura 11: Variação do valor *RMS* da tensão com o tempo (hora:minuto).

As Figuras 12 e 13 abaixo mostram, respectivamente, a variação da distorção harmônica da corrente e da tensão (ambos em valor percentual) com o tempo, no dia 24/03/2009.

A existência de picos no valor da distorção harmônica de corrente entre 0:00 e 03:40h e após 21:00h (Figura 10) ocorre em horários em que a carga predial ligada é mínima.

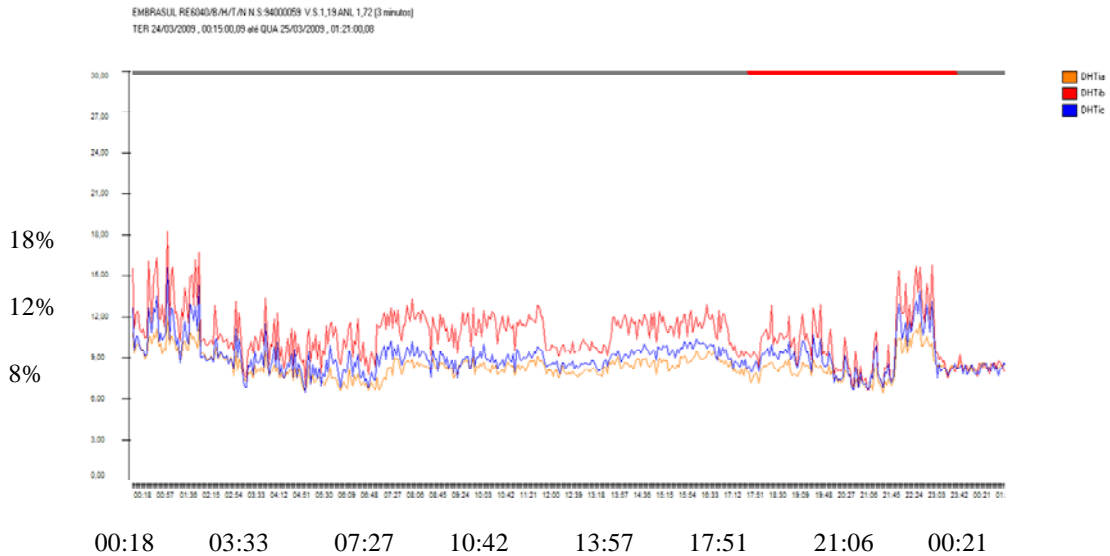


Figura 12: Variação do valor percentual de distorção harmônica de corrente com o tempo (hora:minuto).

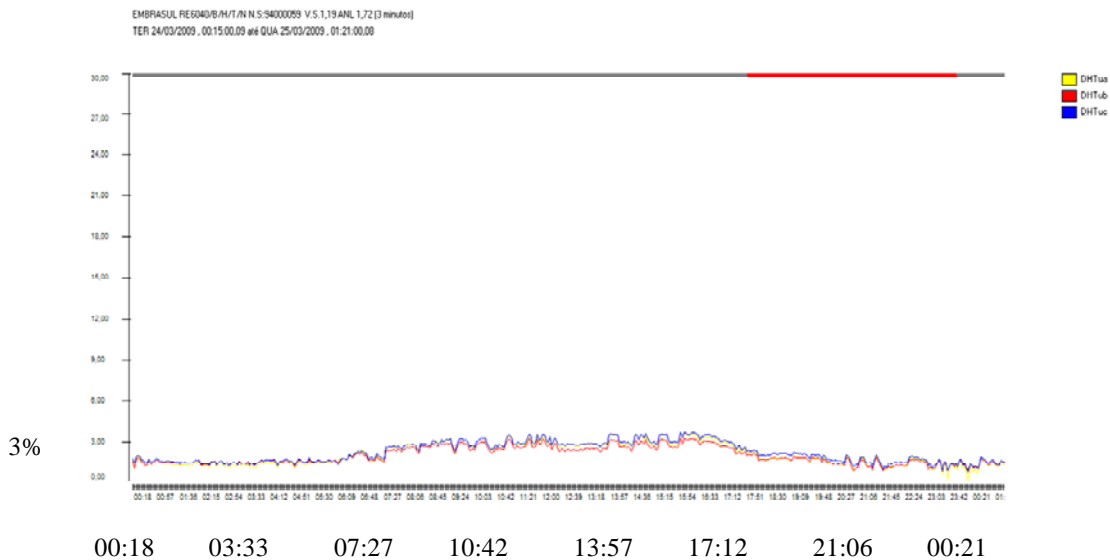


Figura 13: Variação do valor percentual de distorção harmônica de tensão com o tempo (hora:minuto).

A Figura 14 abaixo mostra a variação do fator de potência da fundamental com o tempo, no dia 24/03/2009.

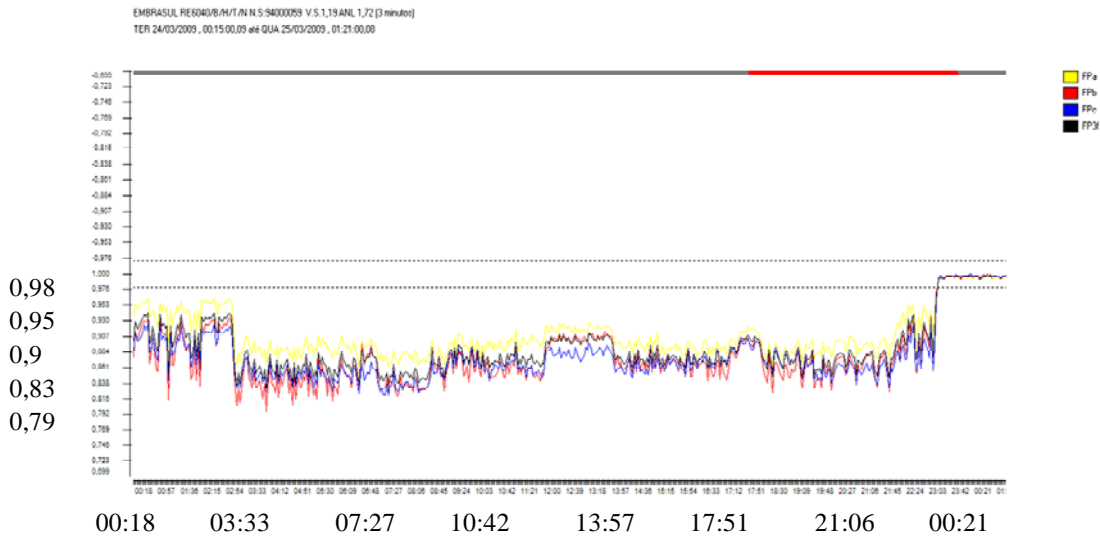


Figura 14: Variação do fator de potência da fundamental com o tempo (hora:minuto).

Para o transformador 2, com os disjuntores TIE abertos, considerando o pico registrado as 11:36:00,03h do dia 24/03/2009, um pouco após o início do expediente no complexo predial (11:00h), foram obtidos os seguintes valores de corrente e distorções harmônicas:

**Tabela 2: Registro obtido as 11:36:00,03 h do dia 24/03/2009.**

Fase	Corrente RMS (A)	Distorção Harmônica de Tensão (%)	Distorção Harmônica de Corrente (%)
Fase A	637,200	3,470	8,660
Fase B	628,790	3,220	12,140
Fase C	651,600	3,560	9,400

A corrente de curto circuito no secundário do transformador 2 com os disjuntores TIE abertos é de 40374 A.

A relação entre a corrente de curto-circuito e a corrente de carga resulta aproximadamente 64, para os valores da Tabela 2.

Para a utilização da Tabela 10.3 da norma IEEE 519-1992 [19] é recomendado que o valor da corrente de carga seja calculada como a corrente média das demandas

máximas dos doze meses precedentes. Na falta de dados acerca dessas demandas, optou-se por trabalhar com os valores de pico da Tabela 2. A utilização do valor de corrente nominal (aproximadamente 2600 A) resultaria em menores limites para a distorção harmônica de corrente, o que seria uma análise pouco verossímil. Os valores de pico da Tabela 2 são razoáveis em razão de terem sido verificados em medições feitas em outros dias.

Segundo a Tabela 10.3 da norma IEEE 519-1992 [19], para valores entre 50 e 100 da relação entre a corrente de circuito e a corrente de carga, a distorção harmônica de corrente admissível é de 12,0 %. Logo, para o transformador 2, com os disjuntores TIE abertos, a distorção harmônica de corrente encontra-se no limiar do estabelecido pela IEE 519-1992 [19], ou seja, 12%. Na Figura 12 também pode ser verificado que a distorção harmônica de corrente no período de maior utilização das instalações elétricas prediais, entre 13:00 e 15:00h, encontra-se nas proximidades de 12%.

Segundo a Tabela 11.1 da norma IEEE 519-1992 [19], verifica-se que a distorção harmônica de tensão observada nas medições apresentadas na Tabela 2 encontra-se dentro dos padrões aceitáveis, pois para tensões menores ou iguais a 69kV, a distorção harmônica de tensão não deve ser superior a 5%. Na Figura 13 também pode ser verificado que a distorção harmônica de tensão no período de maior utilização das instalações elétricas prediais, entre 13:00 e 15:00h, ultrapassa ligeiramente o patamar de 3%.

Na Figura 14, observa-se que o fator de potência da fundamental varia entre 0,81 e 0,90, no período de maior utilização das instalações elétricas prediais, o que demonstra a necessidade de uma correção, a fim de elevá-lo para acima de 0,92.

A análise das Figuras 10 e 11 revela que não há desbalanceamentos significativos de tensão e de corrente nas fases.

Em termos qualitativos, as cargas do transformador 2 apresentam distorções harmônicas de corrente no limiar do patamar máximo estabelecido pela norma IEEE 519-1992 [19], além de necessitar de correção do fator de potência da fundamental. A redução da distorção harmônica, juntamente com a correção do fator de potência da fundamental, podem ser implementadas com eficácia, através da aplicação de filtro ativo shunt ou filtro passivo.

Verificou-se que boa parte da distorção harmônica de corrente observada deve-se ao fato de que o acionamento eletrônico dos motores de quatro elevadores de

passageiros gerar formas de onda altamente distorcidas na entrada, conforme se verificará adiante no Tópico 3.6.

### 3.1.3 Transformador 3 da subestação 1

A Figura 15 abaixo é um detalhamento do diagrama simplificado da Figura 2, mostrando as cargas do transformador 3 com os disjuntores *TIE* abertos.

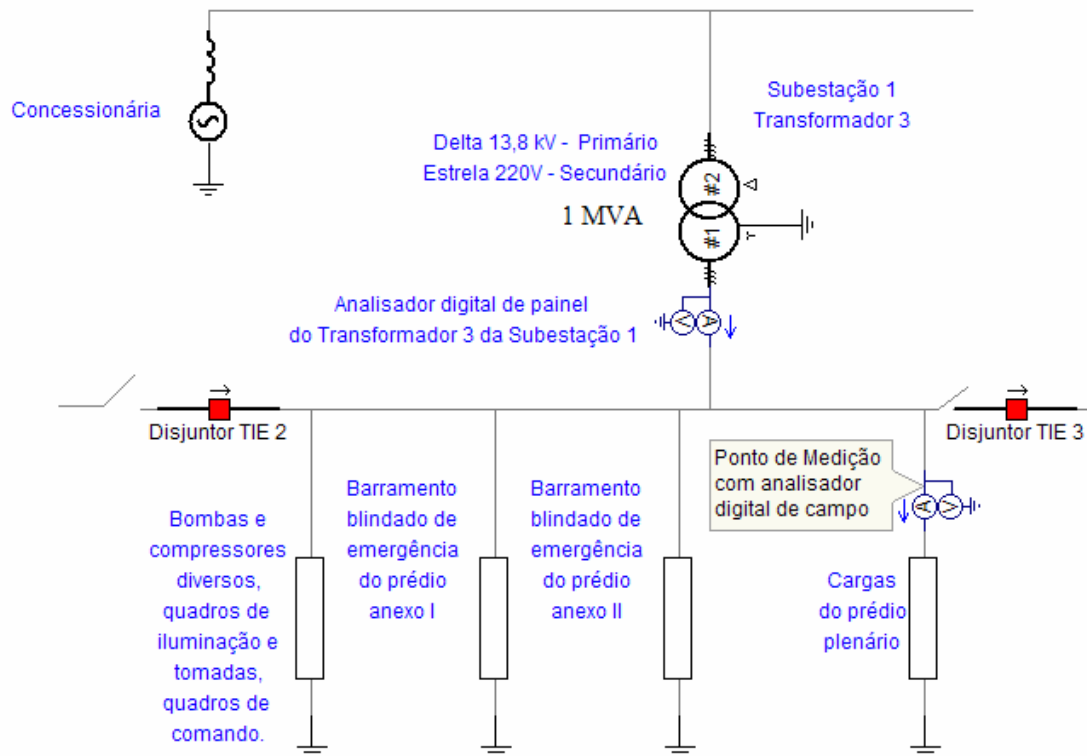


Figura 15: Cargas do transformador 3 da subestação 1.



As Figuras 16 e 17 abaixo mostram, respectivamente, a variação do valor *RMS* da corrente (em Ampères) e da tensão (em Volts) com o tempo no dia 24/03/2009.

As linhas retas observadas nas vizinhanças da abscissa 03:36h correspondem a um intervalo de tempo em que o analisador de painel, por algum motivo, não efetuou registro de grandezas elétricas.

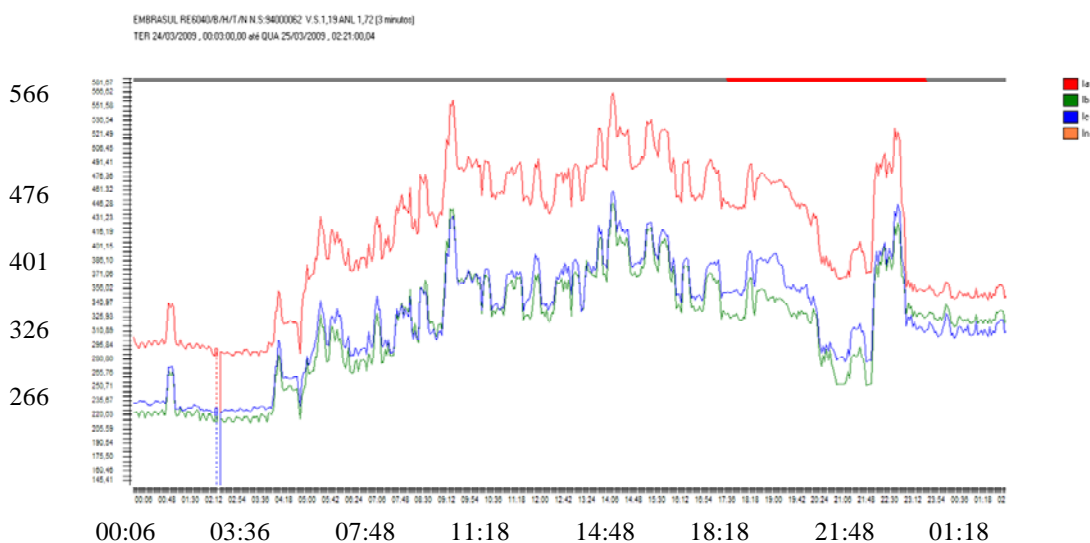


Figura 16: Variação do valor RMS da corrente com o tempo (hora:minuto).

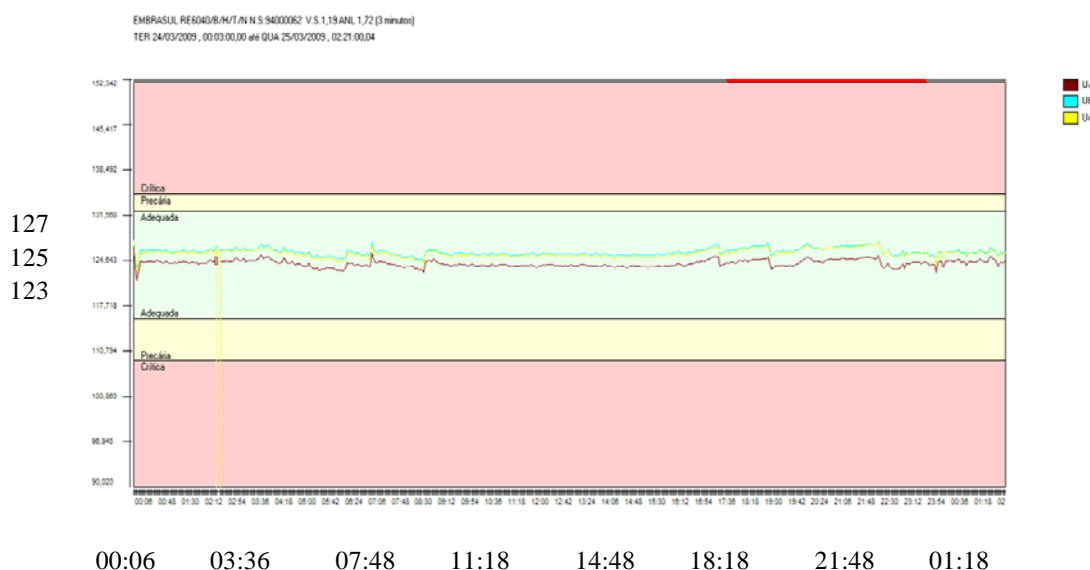


Figura 17: Variação do valor RMS da tensão com o tempo (hora:minuto).

As Figuras 18 e 19 abaixo mostram, respectivamente, a variação da distorção harmônica da corrente e da tensão (ambos em valor percentual) com o tempo, no dia 24/03/2009.

Ao contrário do observado nas cargas dos transformadores 1 e 2 vistas anteriormente, a distorção harmônica de corrente variou, durante boa parte do dia (00:00 à 22:00h) entre 9 e 13%, tanto em horários de pleno funcionamento das instalações prediais, como em horários em que a maior parte das cargas encontra-se desligada.

As linhas verticais observadas nas vizinhanças da abscissa 03:36h correspondem a um intervalo de tempo em que o analisador de painel, por algum motivo, não efetuou registro de grandezas elétricas.

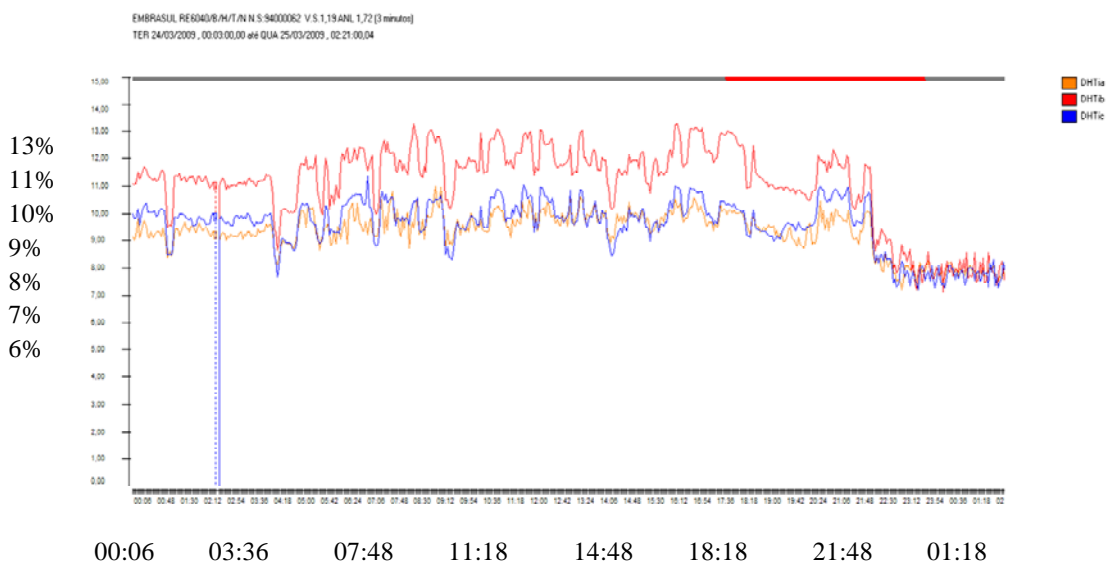


Figura 18: Variação do valor percentual de distorção harmônica de corrente com o tempo (hora:minuto)

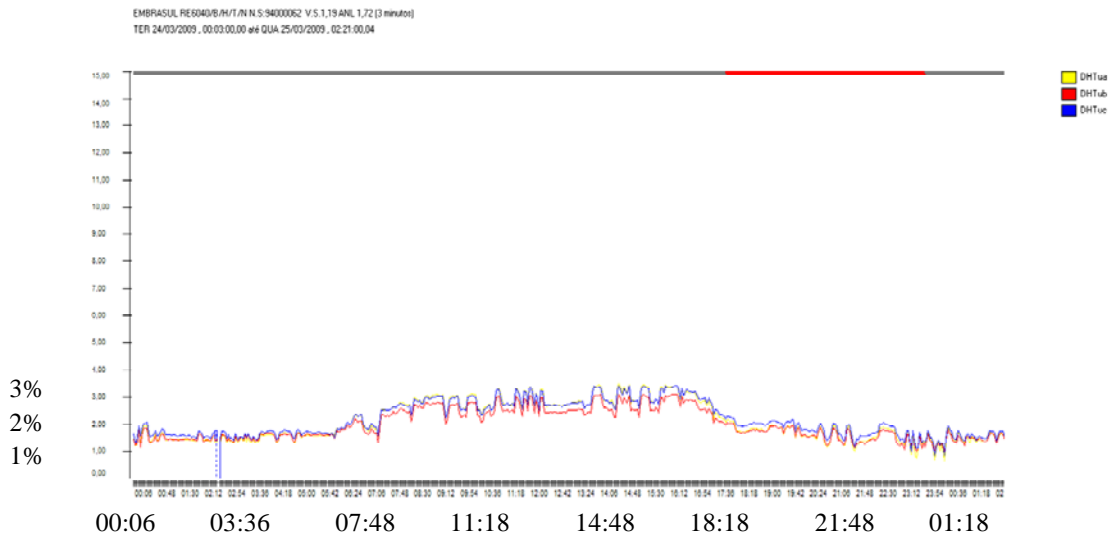


Figura 19: Variação do valor percentual de distorção harmônica de tensão com o tempo (hora:minuto)

A Figura 20 abaixo mostra a variação do fator de potência da fundamental com o tempo, no dia 24/03/2009.

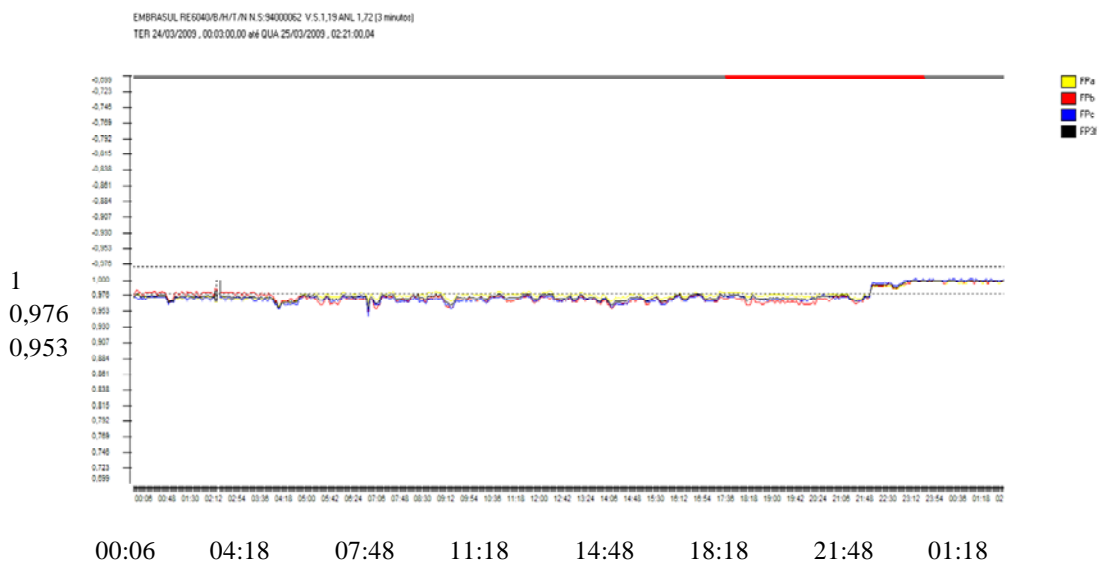


Figura 20: Variação do fator de potência da fundamental com o tempo (hora:minuto)

Para o transformador 3, com os disjuntores TIE abertos, considerando o pico registrado as 14:27:00,09h do dia 24/03/2009, que se encontra dentro do horário de máxima utilização das instalações prediais (13:00 às 15:00h), foram obtidos os seguintes valores de corrente e distorções harmônicas:

**Tabela 3: Registro obtido as 14:27:00,09 h do dia 24/03/2009.**

Fases	Corrente RMS (A)	Distorção Harmônica de Tensão (%)	Distorção Harmônica de Corrente (%)
Fase A	566,390	2,890	9,170
Fase B	447,600	2,520	10,170
Fase C	461,390	2,810	8,410

A corrente de curto circuito no secundário do transformador 3 com os disjuntores TIE abertos é de 40374 A.

A relação entre a corrente de curto-circuito e a corrente de carga resulta aproximadamente entre 70 e 90, para os valores da Tabela 3.

Para a utilização da Tabela 10.3 da norma IEEE 519-1992 [19] é recomendado que o valor da corrente de carga seja calculada como a corrente média das demandas máximas dos doze meses precedentes. Na falta de dados acerca dessas demandas, optou-se por trabalhar com os valores de pico da Tabela 3. A utilização do valor de corrente nominal (aproximadamente 2600 A) resultaria em menores limites para a distorção harmônica de corrente, o que seria uma análise pouco verossímil. Os valores de pico da Tabela 3 são razoáveis em razão de terem sido verificados em medições feitas em outros dias.

Segundo a Tabela 10.3 da norma IEEE 519-1992 [19], para valores entre 50 e 100 da relação entre a corrente de circuito e a corrente de carga, a distorção harmônica de corrente admissível é de 12,0 %. Logo, para o transformador 3, com os disjuntores TIE abertos e para o registro da Tabela 3, a distorção harmônica de corrente encontra-se quase dois pontos percentuais abaixo do estabelecido pela norma IEEE 519-1992 [19]. Na Figura 18 também pode ser verificado que a distorção harmônica de corrente no período de maior utilização das instalações elétricas prediais, entre 13:00 e 15:00h, encontra-se nas proximidades de 12%.

Segundo a Tabela 11.1 da norma IEEE 519-1992 [19], verifica-se que a distorção harmônica de tensão observada nas medições apresentadas na Tabela 3 encontra-se dentro dos padrões aceitáveis, pois para tensões menores ou iguais a 69kV, a distorção harmônica de tensão não deve ser superior a 5%. Na Figura 19 também pode ser verificado que a distorção harmônica de tensão no período de maior utilização das

instalações elétricas prediais, entre 13:00 e 15:00h, ultrapassa ligeiramente o patamar de 3%.

Na Figura 20, observa-se que o fator de potência da fundamental varia entre 0,96 e 0,97, no período de maior utilização das instalações elétricas prediais, o que demonstra não haver necessidade de uma correção, pois já se encontra acima de 0,92.

A análise das Figuras 16 e 17 revela, entretanto, que há desbalanceamentos significativos de corrente nas fases.

Em termos qualitativos, as cargas do transformador 3 apresentam distorções harmônicas de corrente no limiar do patamar máximo estabelecido pela norma IEEE 519-1992 [19], ou seja, 12%, mas não necessitam de correção do fator de potência da fundamental.

Uma filtragem na carga desse transformador, apesar de o limiar de distorção harmônica de corrente do IEEE ter sido atingido, não se faz necessária, pois a distorção harmônica de tensão não ultrapassa 4%.

Outro aspecto a considerar é que o fator de potência da fundamental encontra-se acima de 0,92.

Finalmente, observa-se também que a corrente máxima registrada, da ordem de 20% da corrente nominal do transformador no lado secundário, não é significativa no contexto das cargas da subestação 1.

O desbalanceamento observado nas correntes pode ser solucionado por realocação de cargas.

Verificou-se que boa parte da distorção harmônica de corrente observada deve-se ao acionamento eletrônico de um dos motores de elevador de passageiros, bem como a presença acentuada de cargas de iluminação (que faz uso de reatores eletrônicos).

### 3.1.4 Transformador 4 da subestação 1

A Figura 21 abaixo é um detalhamento do diagrama simplificado da Figura 2, mostrando as cargas do transformador 4 com os disjuntores *TIE* abertos.

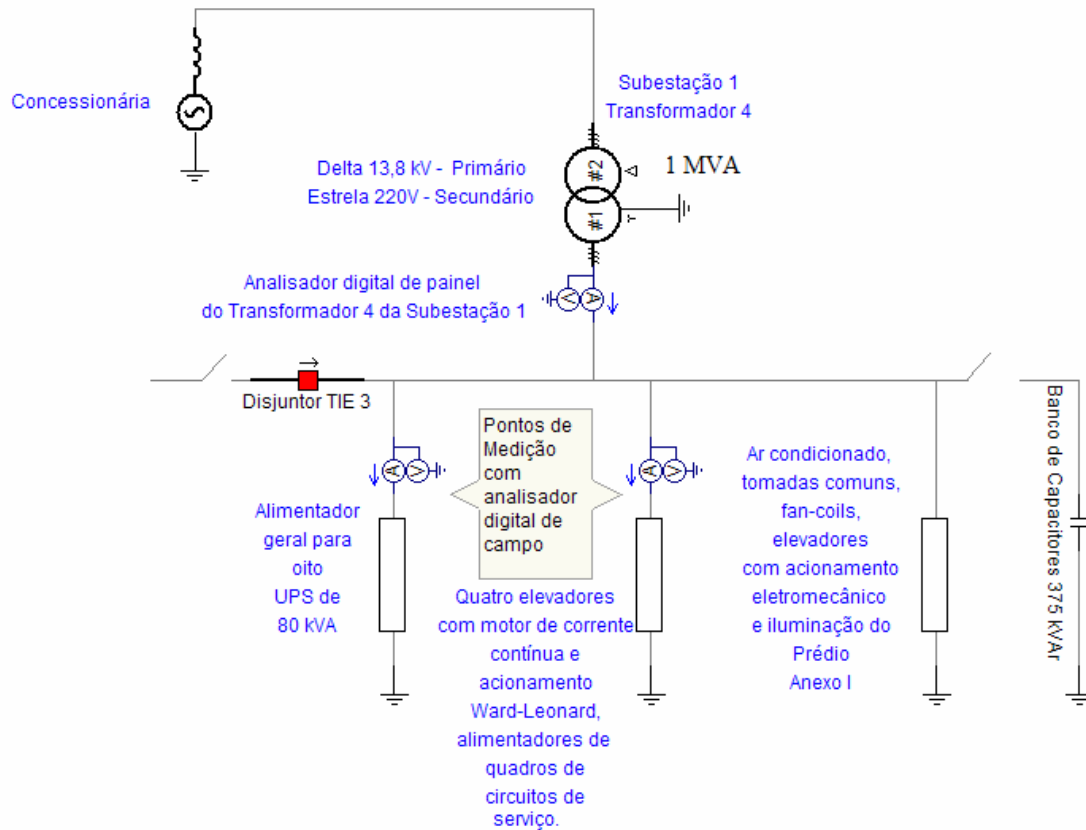


Figura 21: Cargas do transformador 4 da subestação 1.

As Figuras 22 e 23 abaixo mostram, respectivamente, a variação do valor *RMS* da corrente (em Ampères) e da tensão (em Volts) com o tempo no dia 02/06/2009.

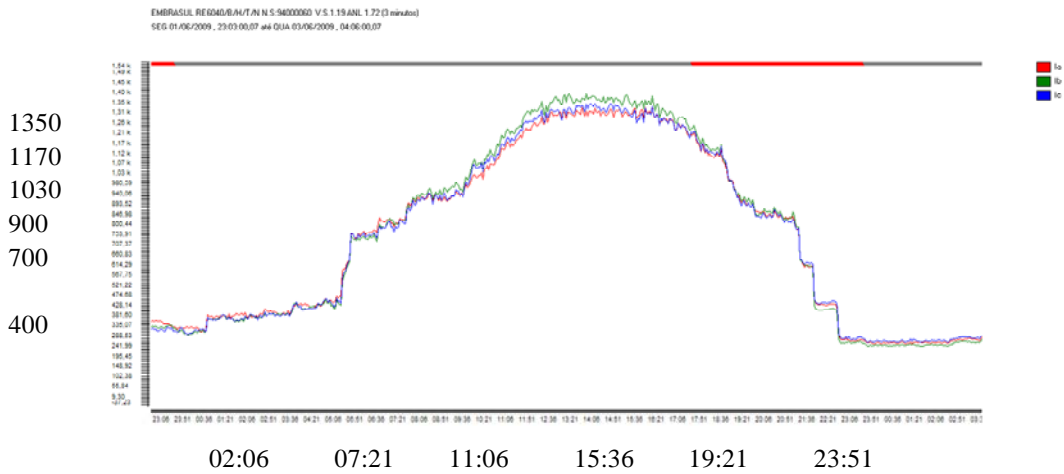


Figura 22: Variação do valor *RMS* da corrente com o tempo (hora:minuto).

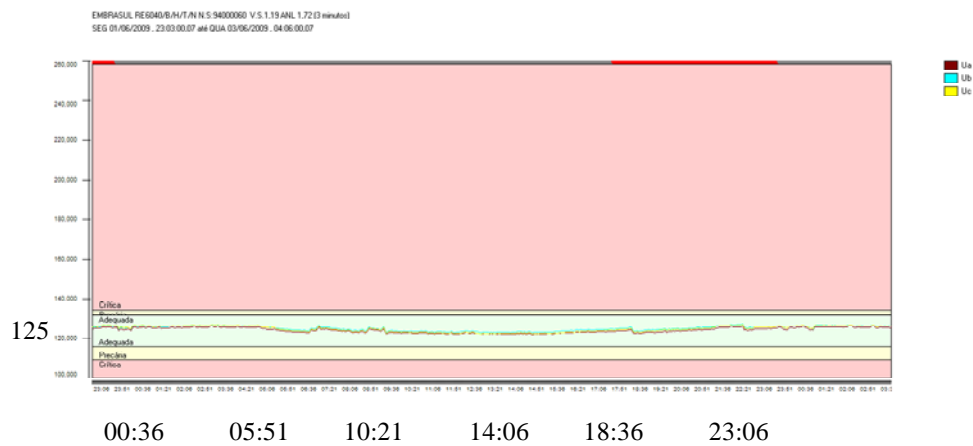


Figura 23: Variação do valor *RMS* da tensão com o tempo (hora:minuto).

As Figuras 24 e 25 abaixo mostram, respectivamente, a variação da distorção harmônica da corrente e da tensão (ambos em valor percentual) com o tempo, no dia 02/06/2009.

A existência de picos no valor da distorção harmônica de corrente, entre 0:00h e 10:20h e após 23:00h (Figura 24), ocorre em horários em que a carga predial ligada é mínima.

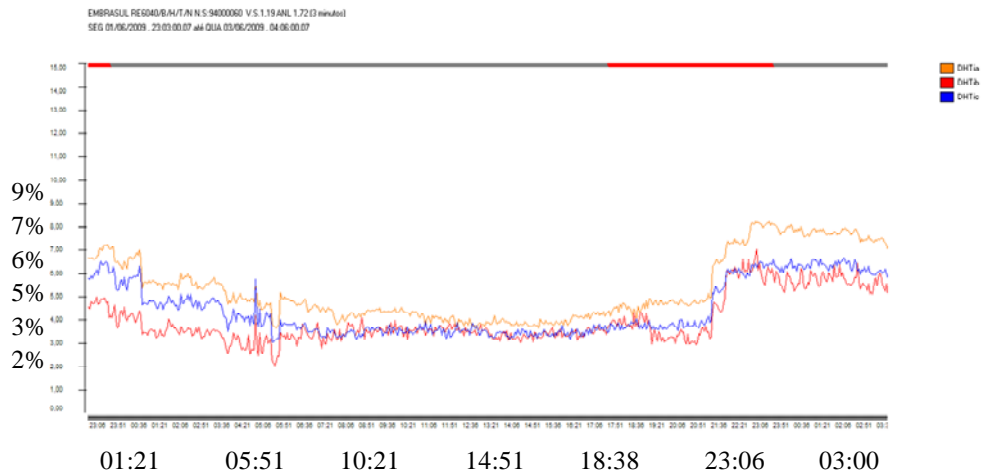


Figura 24: Variação do valor percentual de distorção harmônica de corrente com o tempo (hora:minuto)

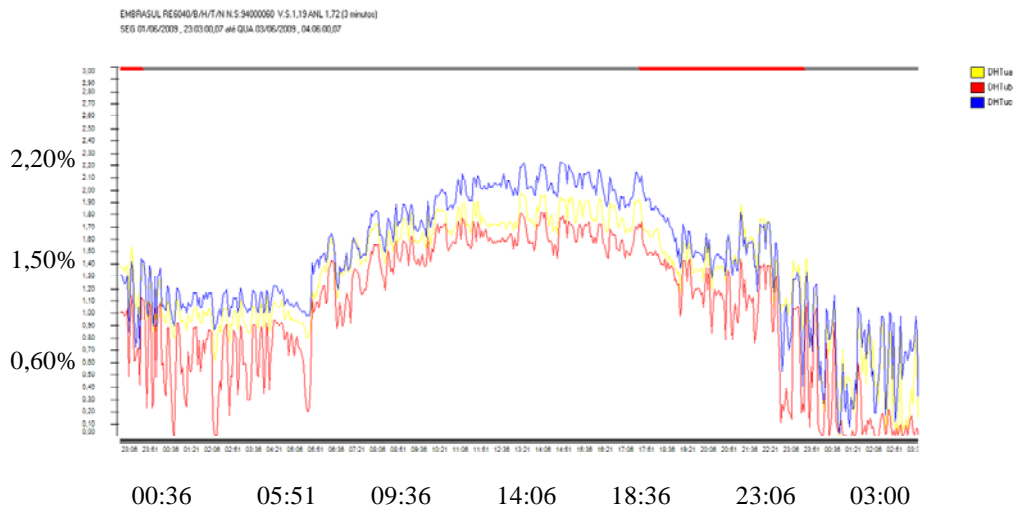


Figura 25: Variação do valor percentual de distorção harmônica de tensão com o tempo (hora:minuto)



A Figura 26 abaixo mostra a variação do fator de potência da fundamental com o tempo, no dia 02/06/2009.

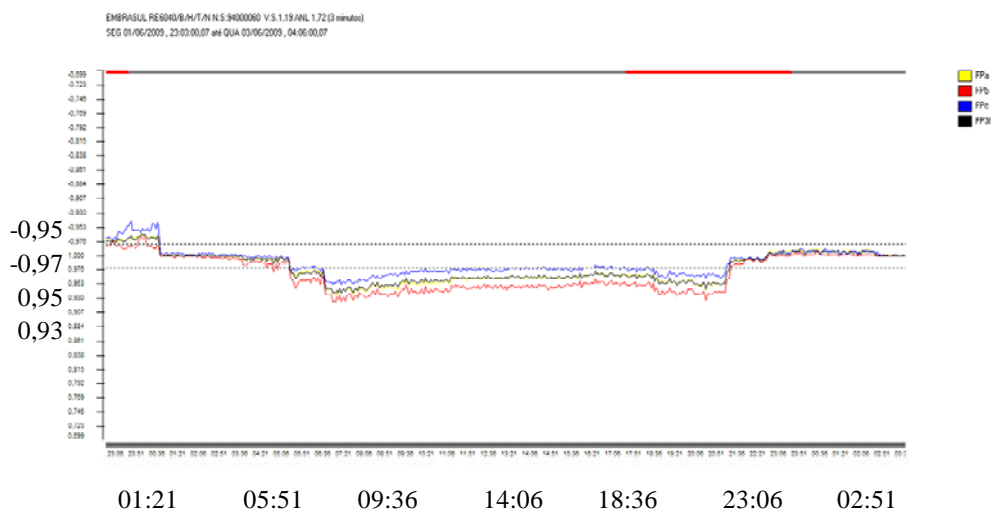


Figura 26: Variação do fator de potência da fundamental com o tempo (hora:minuto)

Para o transformador 4, com os disjuntores TIE abertos, considerando valor de pico registrado as 14:12:00,01h do dia 02/06/2009, que se encontra dentro do horário de máxima utilização das instalações prediais (13:00 às 15:00h), foram obtidos os seguintes valores de corrente e distorções harmônicas:

**Tabela 4: Registro obtido as 14:12:00,01 h do dia 02/06/2009.**

Fase	Corrente RMS (A)	Distorção Harmônica de Tensão (%)	Distorção Harmônica de Corrente (%)
Fase A	1310,000	1,820	3,930
Fase B	1390,000	1,700	3,540
Fase C	1350,000	2,060	3,290

A corrente de curto circuito no secundário do transformador 4 com os disjuntores TIE abertos é de 40374 A.

A relação entre a corrente de curto-circuito e a corrente de carga resulta aproximadamente entre 26 e 28, para os valores da Tabela 4.

Para a utilização da Tabela 10.3 da norma IEEE 519-1992 [19] é recomendado que o valor da corrente de carga seja calculado como a corrente média das demandas máximas dos doze meses precedentes. Na falta de dados acerca dessas demandas, optou-se por trabalhar com os valores de pico da Tabela 4. A utilização do valor de

corrente nominal (aproximadamente 2600 A) resultaria em menores limites para a distorção harmônica de corrente, o que seria uma análise pouco verossímil. Os valores de pico da Tabela 4 são razoáveis em razão de terem sido verificados em medições feitas em outros dias.

Segundo a Tabela 10.3 da norma IEEE 519-1992 [19], para valores entre 20 e 50 da relação entre a corrente de circuito e a corrente de carga, a distorção harmônica de corrente admissível é de 8,0 %. Logo, para o transformador 4, com os disjuntores TIE abertos e para o registro da Tabela 4, a distorção harmônica de corrente encontra-se quase quatro pontos e meio percentuais abaixo do estabelecido pela norma IEEE 519-1992 [19]. Na Figura 24 também pode ser verificado que a distorção harmônica de corrente no período de maior utilização das instalações elétricas prediais, entre 13:00 e 15:00h, encontra-se nas proximidades de 5%.

Segundo a Tabela 11.1 da norma IEEE 519-1992 [19], verifica-se que a distorção harmônica de tensão observada nas medições apresentadas na Tabela 3 encontra-se dentro dos padrões aceitáveis, pois para tensões menores ou iguais a 69kV, a distorção harmônica de tensão não deve ser superior a 5%. Na Figura 25 também pode ser verificado que a distorção harmônica de tensão no período de maior utilização das instalações elétricas prediais, entre 13:00 e 15:00h, fica abaixo do patamar de 2,2%.

Na Figura 26, observa-se que o fator de potência da fundamental varia entre 0,93 e 0,98, no período de maior utilização das instalações elétricas prediais, o que demonstra não haver necessidade de uma correção, pois já se encontra acima de 0,92.

A análise das Figuras 22 e 23 mostra que não há desbalanceamentos significativos de tensão e de corrente nas fases.

Em termos qualitativos, as cargas do transformador 4 apresentam distorções harmônicas de corrente abaixo do patamar máximo estabelecido pela norma IEEE 519-1992 [19] e também não necessitam de correção do fator de potência da fundamental.

Apesar de o transformador 4 alimentar 8 (oito) UPS de 80 kVA, estes não contribuíram de forma substancial para a distorção harmônica de corrente devido ao fato de apresentarem filtragem na entrada. Além disso, essa filtragem produz adiantamento da forma de onda de corrente em relação à tensão, o que colabora para que, na carga vista pelo secundário do transformador, seja corrigido o fator de potência indutivo da fundamental para valor acima do mínimo determinado pela legislação.

As medições demonstraram que não há necessidade de aplicar filtros ou bancos de capacitores para as cargas alimentadas por esse transformador.

## **3.2 Medição do alimentador das cargas dos transformadores da subestação 1 com os disjuntores *TIE* fechados e banco de capacitores ligado**

Nessa situação, as medições nos locais assinalados na Figura 27 abaixo não representam apenas as cargas que estão sob o barramento secundário de cada transformador, pois é o paralelo dos quatro transformadores que alimenta as cargas da subestação 1.

A corrente de curto-circuito resultante da ligação em paralelo dos quatro transformadores, no ponto de acoplamento comum deles, é de, aproximadamente, 160 kA.

Em termos de análise quantitativa da qualidade de energia, o paralelismo dos transformadores não apresentou valores críticos, todavia, a elevada corrente de curto circuito no secundário dos transformadores é algo que pode vir a comprometer a segurança da instalação, em caso de falta, haja vista o fato de que os disjuntores e barramentos não estão dimensionados para valores de corrente curto circuito acima de 65kA.

Quando as proteções elétricas e barramentos são corretamente dimensionados, ligar transformadores em paralelo é uma forma de diminuir o impacto da distorção harmônica de corrente na instalação, através do aumento da corrente de curto-circuito. Esse fato pode ser observado na Tabela 10.3 da IEEE 519-1992 [19].

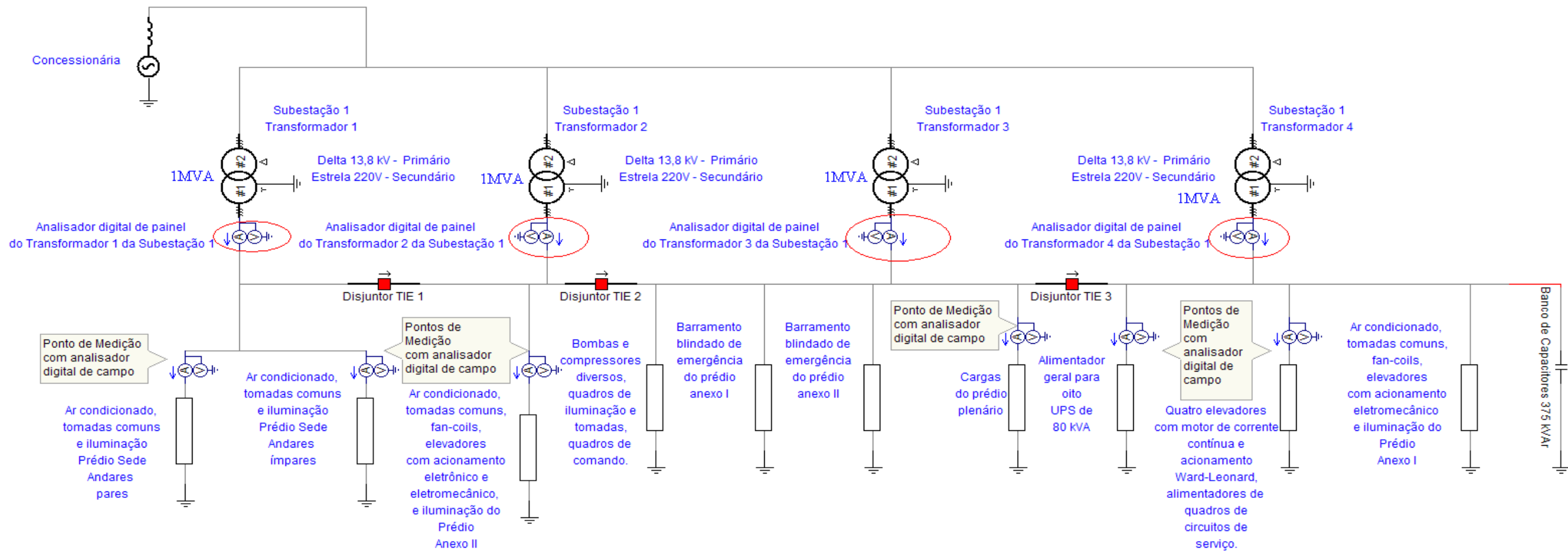


Figura 27: Subestação 1 com disjuntores TIE fechados e banco de capacitores ligado

### 3.2.1 Transformador 1 da subestação 1

As Figuras 28 e 29 abaixo mostram, respectivamente, a variação do valor *RMS* da corrente (em Ampères) e da tensão (em Volts) com o tempo no dia 02/02/2009.

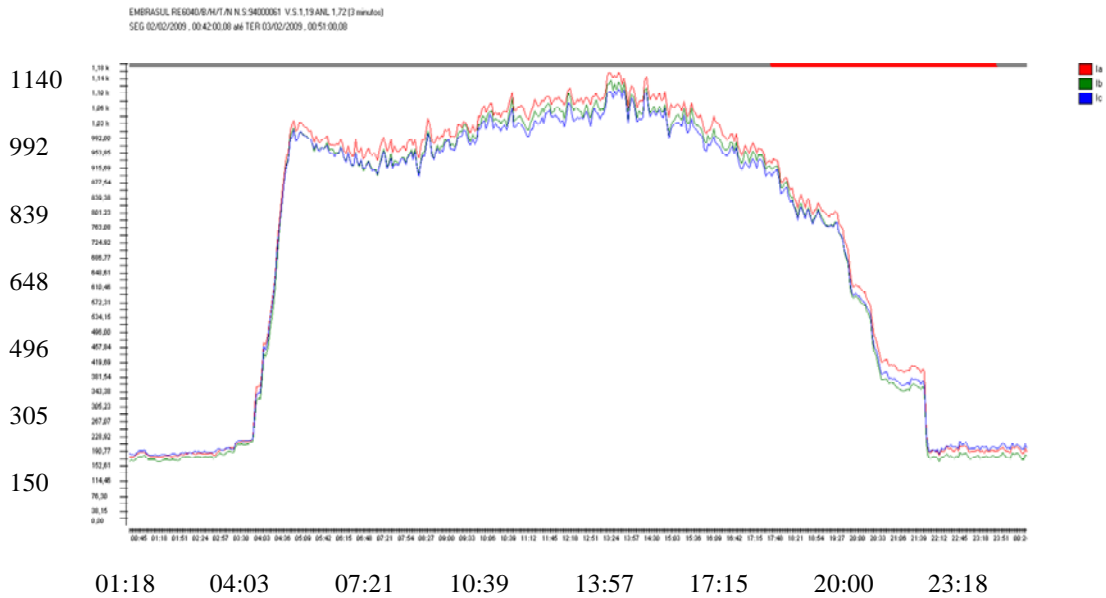


Figura 28: Variação do valor RMS da corrente com o tempo (hora:minuto).

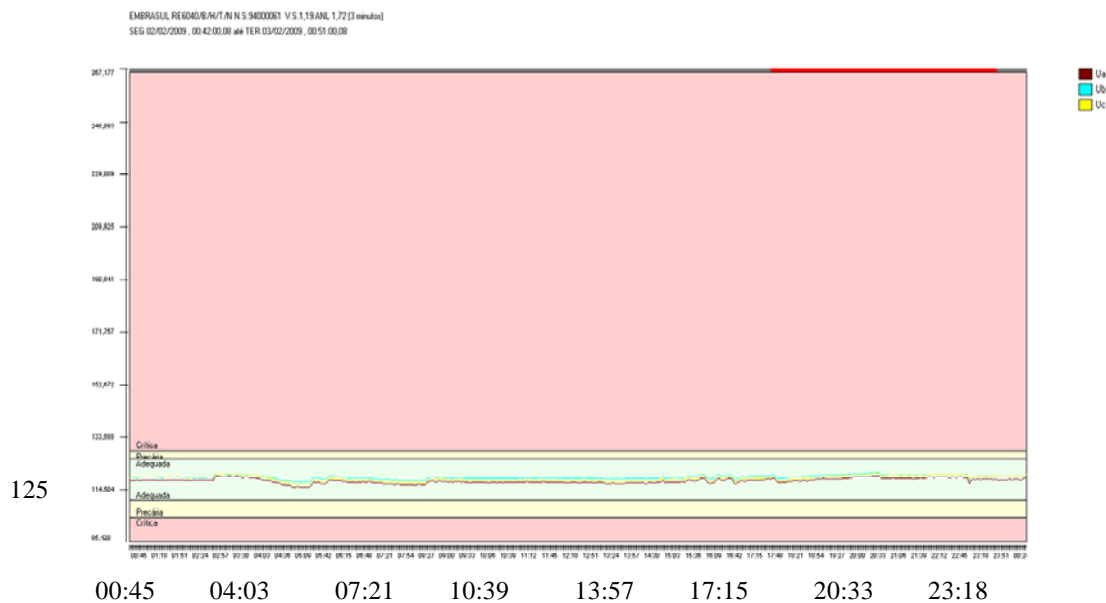


Figura 29: Variação do valor RMS da tensão com o tempo (hora:minuto).

As Figuras 30 e 31 abaixo mostram, respectivamente, a variação da distorção harmônica da corrente e da tensão (ambos em valor percentual) com o tempo, no dia 02/02/2009.

A existência de picos no valor da distorção harmônica de corrente entre 0:00 e 05:00h e após 21:00h (Figura 30) ocorre em horários em que a carga predial ligada é mínima.

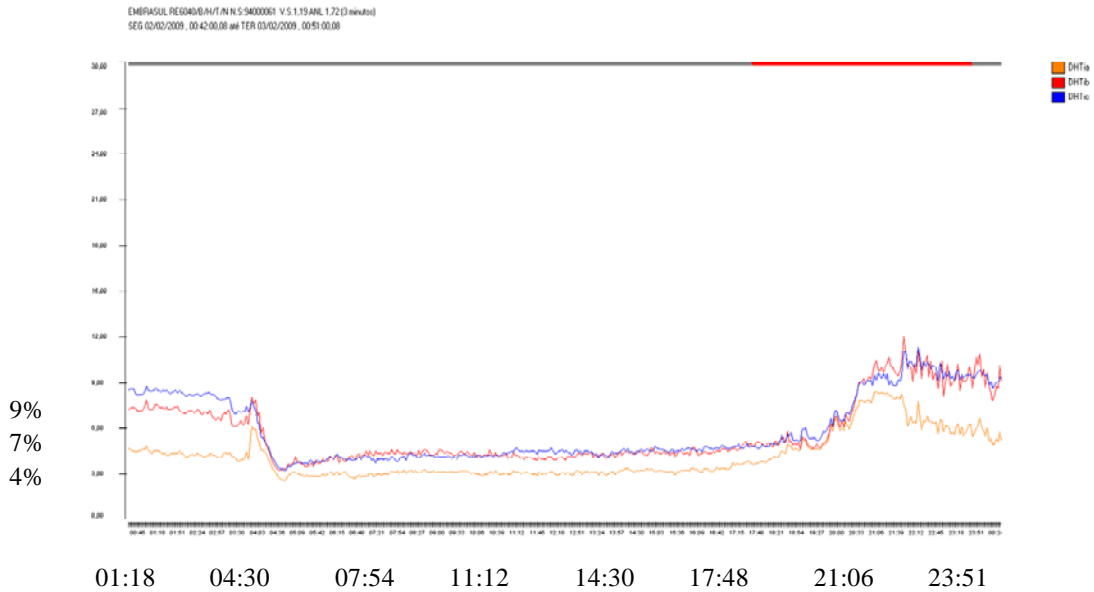


Figura 30: Variação do valor percentual de distorção harmônica de corrente com o tempo (hora:minuto)

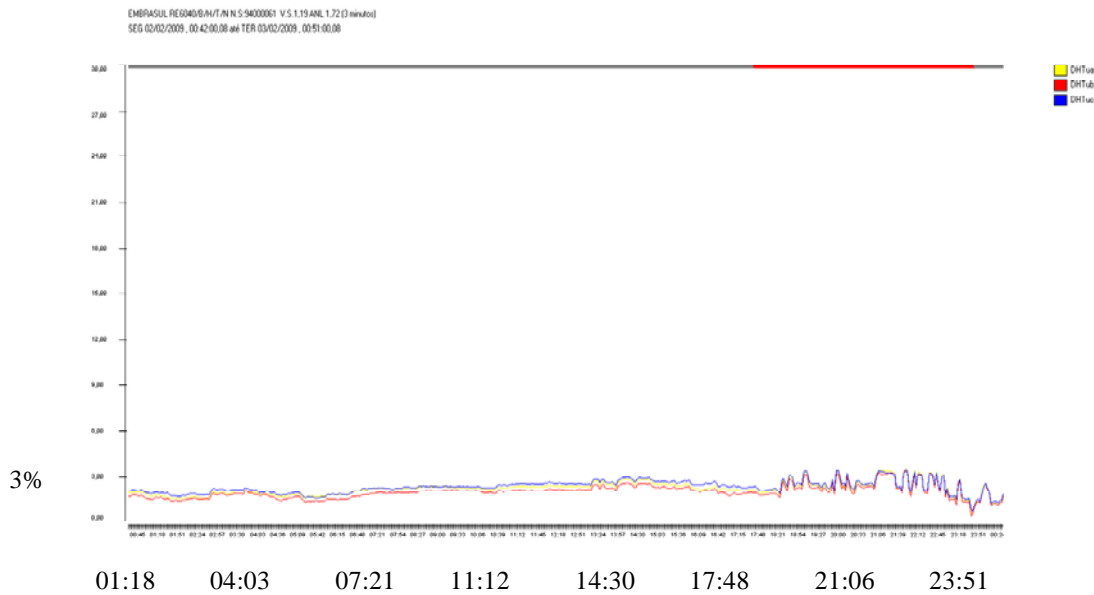


Figura 31: Variação do valor percentual de distorção harmônica de tensão com o tempo (hora:minuto)

A Figura 32 abaixo mostra a variação do fator de potência da fundamental com o tempo, no dia 02/02/2009.

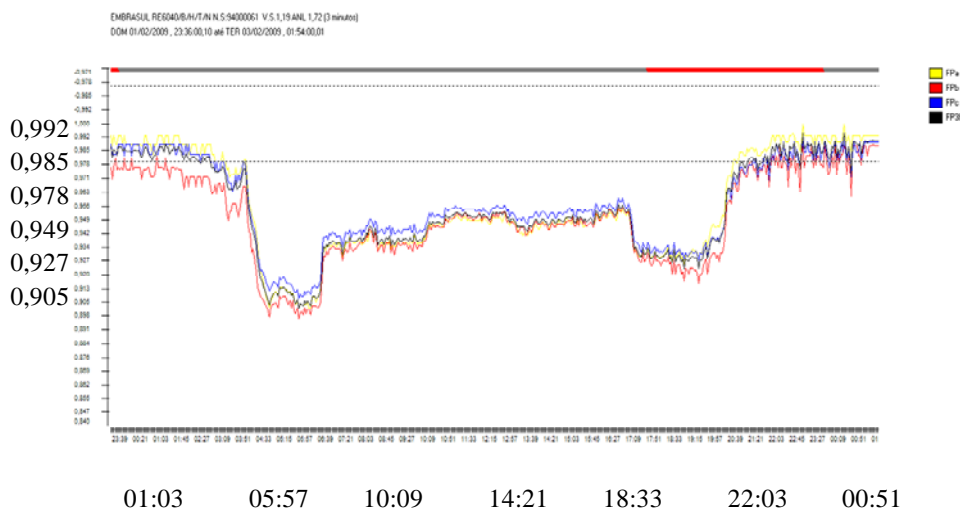


Figura 32: Variação do fator de potência da fundamental com o tempo (hora:minuto)

O valor da corrente de curto circuito a ser considerado para os cálculos da relação entre corrente de carga e corrente de curto-circuito é de 161496 A.

Para o transformador 1, com os disjuntores TIE fechados, considerando o pico registrado as 13:33:00,06h do dia 02/02/2009, que se encontra dentro do horário de máxima utilização das instalações prediais (13:00 às 15:00h), foram obtidos os seguintes valores de corrente e distorções harmônicas:

**Tabela 5: Registro obtido as 13:33:00,06 h do dia 02/02/2009.**

Fases	Corrente RMS (A)	Distorção Harmônica de Tensão (%)	Distorção Harmônica de Corrente (%)
Fase A	1160,000	2,740	3,160
Fase B	1120,000	2,470	4,370
Fase C	1110,000	2,850	4,290

Segundo as Tabela 10.3 e 11.1 da norma IEEE 519-1992 [19], as distorções harmônicas de corrente e de tensão, para os valores da Tabela 5, encontram-se dentro de valores aceitáveis.

Para a utilização da Tabela 10.3 da norma IEEE 519-1992 [19] é recomendado que o valor da corrente de carga seja calculada como a corrente média das demandas máximas dos doze meses precedentes. Na falta de dados acerca dessas demandas, optou-se por trabalhar com os valores de pico da Tabela 5. A utilização do valor de

corrente nominal (aproximadamente 2600 A) resultaria em menores limites para a distorção harmônica de corrente, o que seria uma análise pouco verossímil. Os valores de pico da Tabela 5 são razoáveis em razão de terem sido verificados em medições feitas em outros dias.

Segundo a Tabela 10.3 da norma IEEE 519-1992 [19], para valores entre 100 e 1000 da relação entre a corrente de circuito e a corrente de carga, a distorção harmônica de corrente admissível é de 15,0 %.

As Figuras 30 e 31 demonstram a variação no tempo das distorções harmônicas de corrente e tensão. No caso da distorção harmônica de corrente, os valores não excedem 6% ao longo de todo o horário de máxima utilização das instalações prediais (13:00 a 15:00h). A distorção harmônica de tensão encontra-se abaixo de 3%, no mesmo intervalo.

Comparando-se os valores de distorções harmônicas de corrente e de tensão da Tabela 5 (transformador 1 com disjuntor *TIE* fechado) com os valores da Tabela 1, onde as cargas do transformador 1 são medidas com o disjuntor *TIE* aberto, não resultou em diferenças significativas, todavia, o aumento da corrente de curto circuito no ponto de acoplamento comum para aproximadamente 161 kA reduz o impacto das distorções harmônicas de corrente nas instalações da subestação 1. A distorção harmônica de corrente admissível, segundo a IEEE 519-1992 [19], passou de 8% (disjuntores *TIE* abertos) para 15% (disjuntores *TIE* fechados).

O valor do fator de potência da fundamental apresenta-se acima de 0,92 em todos os instantes, conforme mostra a Figura 32, devido a ação de banco de capacitores automático (figura 27).

As Figuras 28 e 29, que se referem aos valores RMS de tensões e correntes nas fases ao longo do tempo, não evidenciam desbalanceamentos.



### 3.2.2 Transformador 2 da subestação 1

As Figuras 33 e 34 abaixo mostram, respectivamente, a variação do valor *RMS* da corrente (em Ampères) e da tensão (em Volts) com o tempo no dia 02/02/2009.

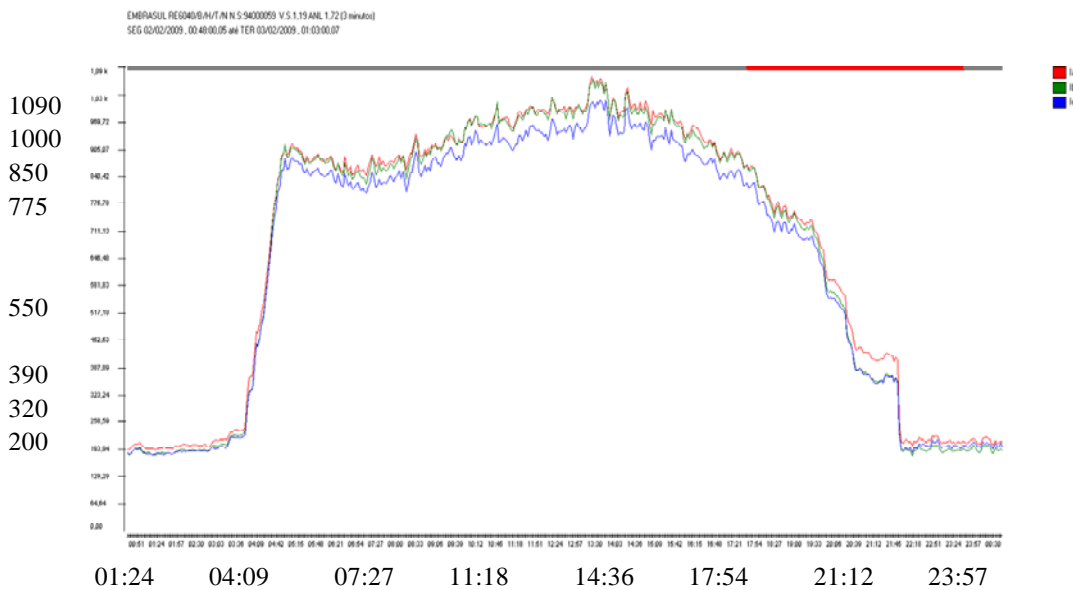


Figura 33: Variação do valor RMS da corrente com o tempo (hora:minuto).

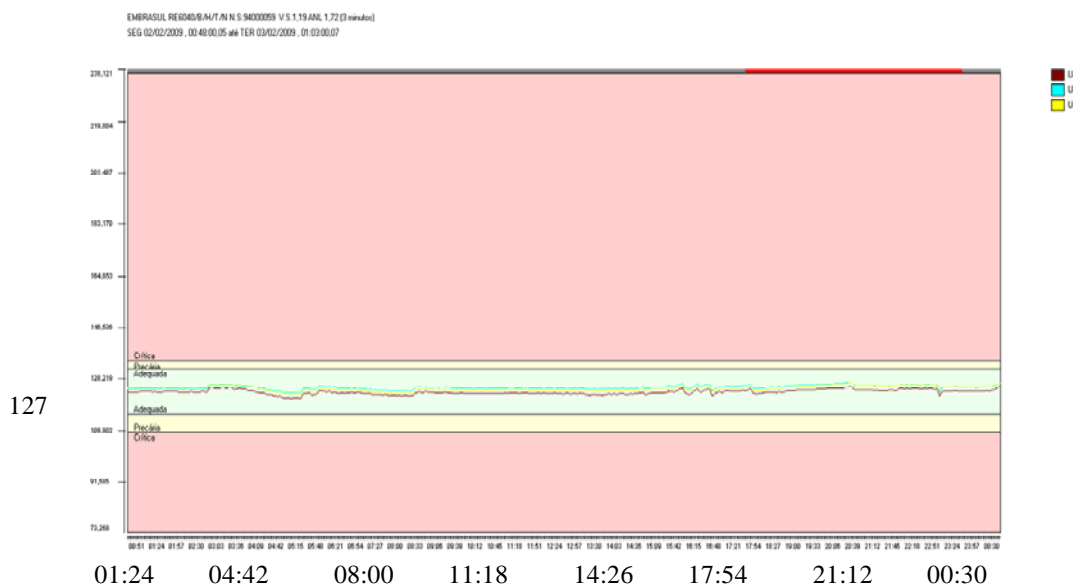


Figura 34: Variação do valor RMS da tensão com o tempo (hora:minuto).

As Figuras 35 e 36 abaixo mostram, respectivamente, a variação da distorção harmônica da corrente e da tensão (ambos em valor percentual) com o tempo, no dia 02/02/2009.

A existência de picos no valor da distorção harmônica de corrente entre 0:00 e 06:00h e após 21:00h (Figura 35) ocorre em horários em que a carga predial ligada é mínima.

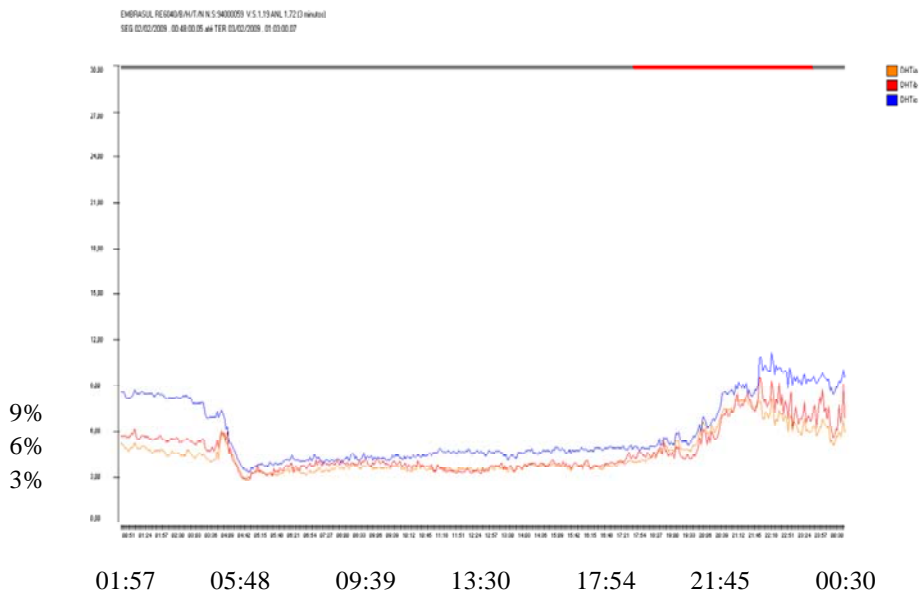


Figura 35: Variação do valor percentual de distorção harmônica de corrente com o tempo (hora:minuto).

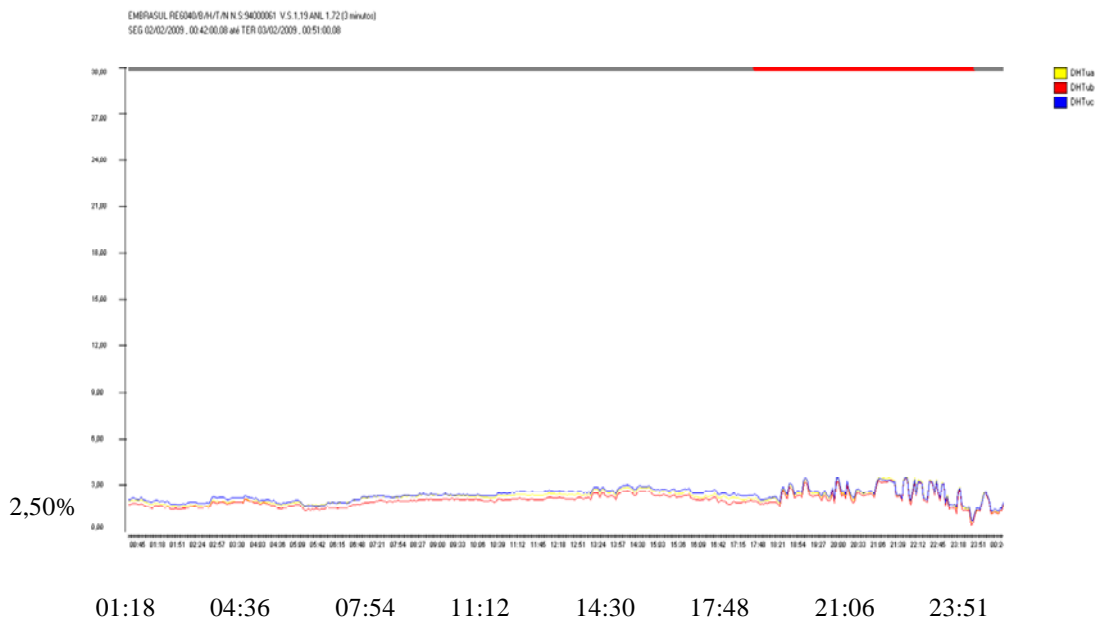


Figura 36: Variação do valor percentual de distorção harmônica de tensão com o tempo (hora:minuto)

A Figura 37 abaixo mostra a variação do fator de potência da fundamental com o tempo, no dia 02/02/2009.

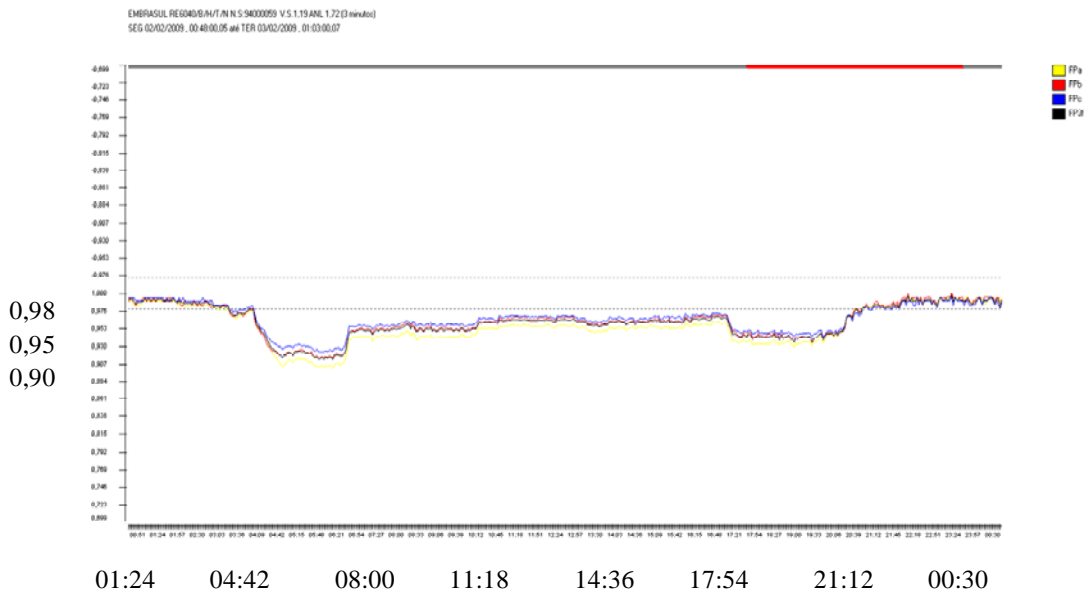


Figura 37: Variação do fator de potência da fundamental com o tempo (hora:minuto)

O valor da corrente de curto circuito a ser considerado para os cálculos da relação entre corrente de carga e corrente de curto-circuito é de 161496 A.

Para o transformador 2, com os disjuntores TIE fechados, considerando o pico registrado as 13:39:00,05h do dia 02/02/2009, que se encontra dentro do horário de máxima utilização das instalações prediais (13:00 às 15:00h), foram obtidos os seguintes valores de corrente e distorções harmônicas:

**Tabela 6: Registro obtido as 13:39:00,05 h do dia 02/02/2009.**

Fases	Corrente RMS (A)	Distorção Harmônica de Tensão (%)	Distorção Harmônica de Corrente (%)
Fase A	1070,000	2,790	3,500
Fase B	1070,000	2,430	3,500
Fase C	1010,000	2,870	4,440

Segundo as Tabelas 10.3 e 11.1 da norma IEEE 519-1992 [19], as distorções harmônicas de corrente e de tensão, para os valores da Tabela 6, encontram-se dentro de valores aceitáveis.

Para a utilização da Tabela 10.3 da norma IEEE 519-1992 [19] é recomendado que o valor da corrente de carga seja calculada como a corrente média das demandas máximas dos doze meses precedentes. Na falta de dados acerca dessas demandas, optou-se por trabalhar com os valores de pico da Tabela 6. A utilização do valor de corrente nominal (aproximadamente 2600 A) resultaria em menores limites para a distorção harmônica de corrente, o que seria uma análise pouco verossímil. Os valores de pico da Tabela 6 são razoáveis em razão de terem sido verificados em medições feitas em outros dias.

Segundo a Tabela 10.3 da norma IEEE 519-1992 [19], para valores entre 100 e 1000 da relação entre a corrente de circuito e a corrente de carga, a distorção harmônica de corrente admissível é de 15,0 %.

As Figuras 35 e 36 mostram a variação no tempo das distorções harmônicas de corrente e tensão. No caso da distorção harmônica de corrente, os valores não excedem 6% ao longo de todo o horário de máxima utilização das instalações prediais (13:00 a 15:00h). A distorção harmônica de tensão encontra-se abaixo de 3%, no mesmo intervalo.

Comparando-se os valores de distorções harmônicas de corrente e de tensão da Tabela 6 (transformador 2 com disjuntor *TIE* fechado) com os valores da Tabela 2, onde as cargas do transformador 2 são medidas com o disjuntor *TIE* aberto, resultou em diferenças significativas. Com os disjuntores *TIE* fechados, os valores de distorção harmônica de tensão reduziram e os de corrente, além da acentuada redução, apresentaram valores próximos entre si nas fases. O aumento da corrente de curto circuito no ponto de acoplamento comum para aproximadamente 161 kA reduz o impacto das distorções harmônicas de corrente nas instalações da subestação 1. A distorção harmônica de corrente admissível, segundo a IEEE 519-1992 [19], passou de 12% (disjuntores *TIE* abertos) para 15% (disjuntores *TIE* fechados).

O valor do fator de potência da fundamental apresenta-se acima de 0,92 em todos os instantes, conforme mostra a Figura 37, devido a ação de banco de capacitores automático (Figura 27).

As Figuras 33 e 34, que se referem aos valores RMS de tensões e correntes nas fases ao longo do tempo, evidenciam um pequeno desbalanceamento de corrente.

### 3.2.3 Transformador 3 da subestação 1:

As Figuras 38 e 39 abaixo mostram, respectivamente, a variação do valor *RMS* da corrente (em Ampères) e da tensão (em Volts) com o tempo no dia 02/02/2009.

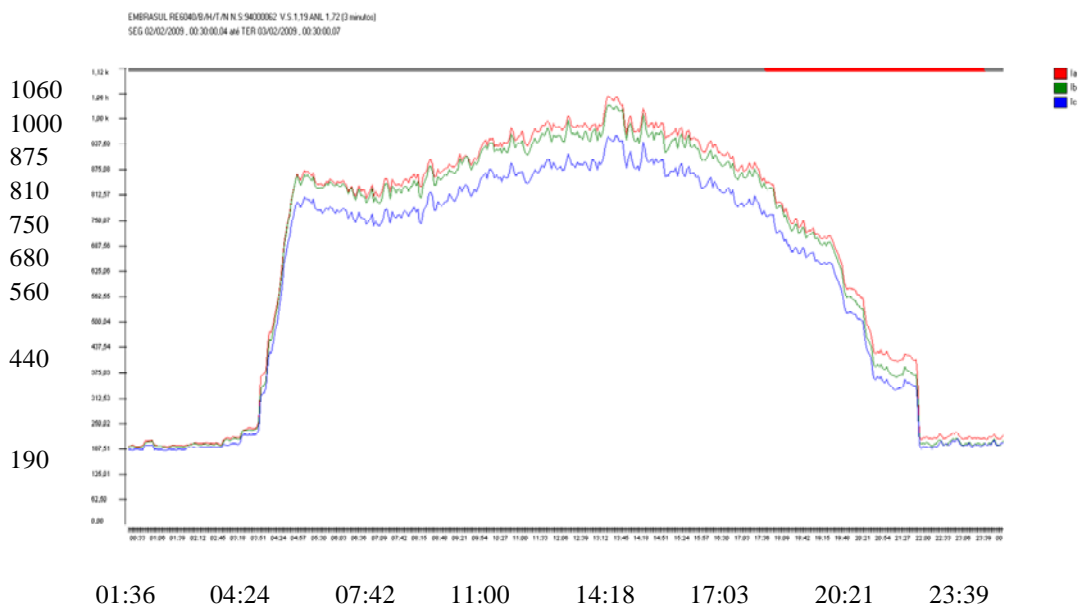


Figura 38: Variação do valor RMS da corrente com o tempo (hora:minuto).

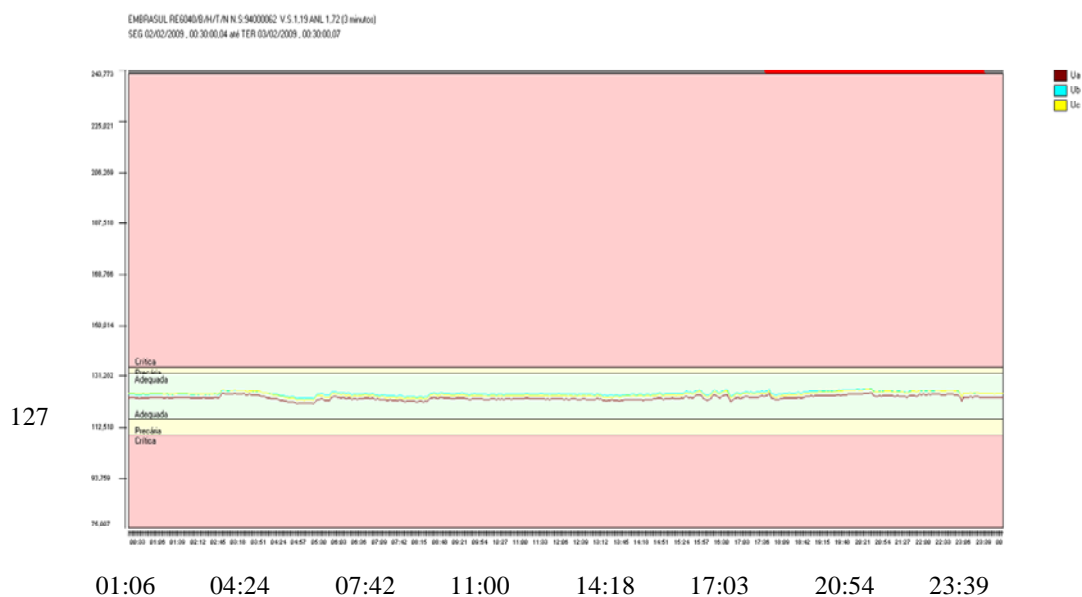


Figura 39: Variação do valor RMS da tensão com o tempo (hora:minuto).

As Figuras 40 e 41 abaixo mostram, respectivamente, a variação da distorção harmônica da corrente e da tensão (ambos em valor percentual) com o tempo, no dia 02/02/2009.

A existência de picos no valor da distorção harmônica de corrente entre 0:00 e 04:30h e após 21:00h (Figura 40) ocorre em horários em que a carga predial ligada é mínima.

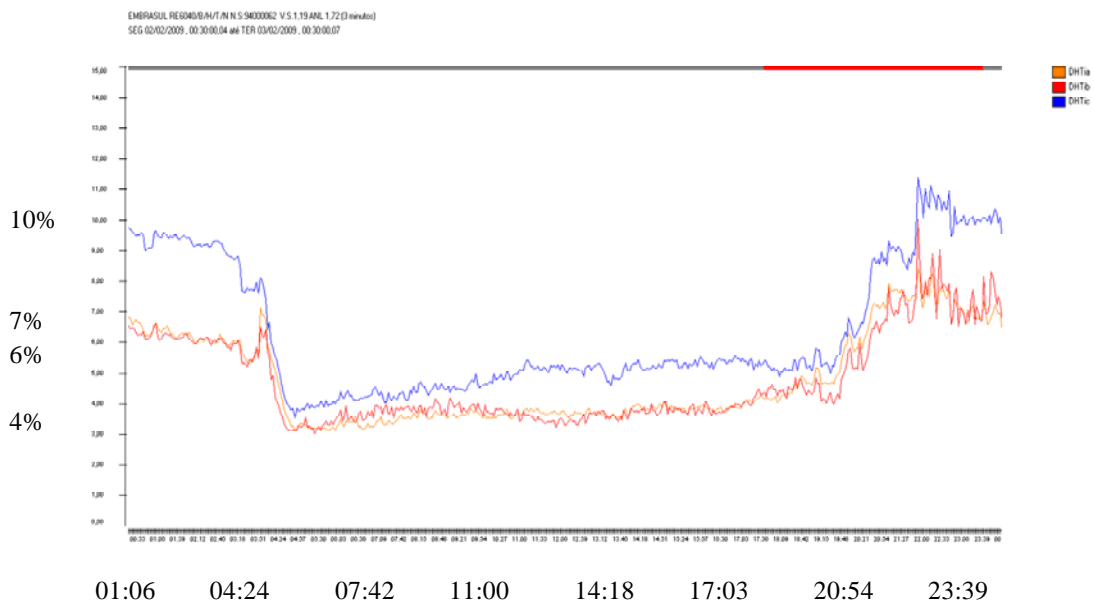


Figura 40: Variação do valor percentual de distorção harmônica de corrente com o tempo (hora:minuto)

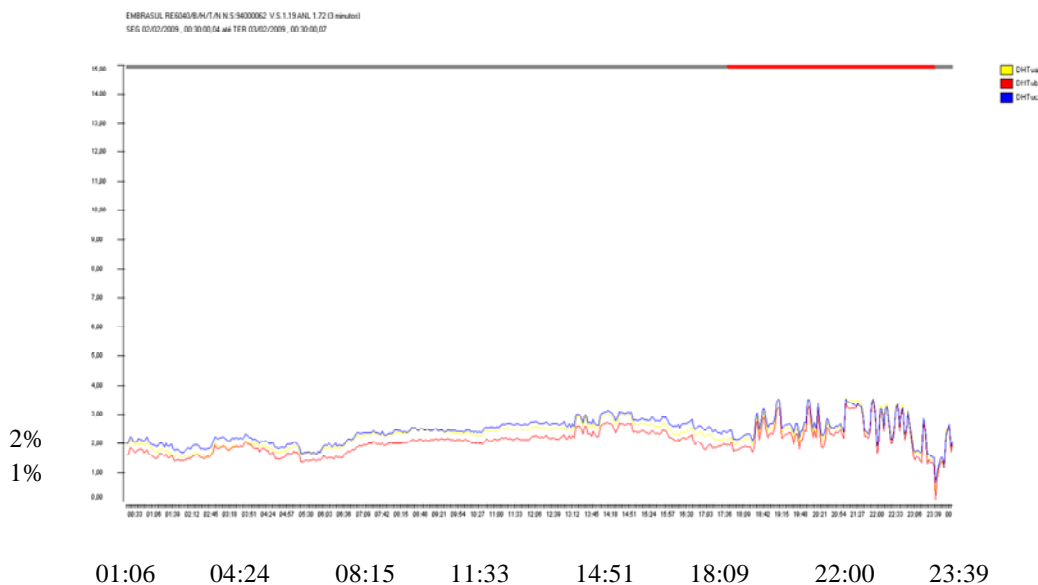


Figura 41: Variação do valor percentual de distorção harmônica de tensão com o tempo (hora:minuto)

A Figura 42 abaixo mostra a variação do fator de potência da fundamental com o tempo, no dia 02/02/2009.

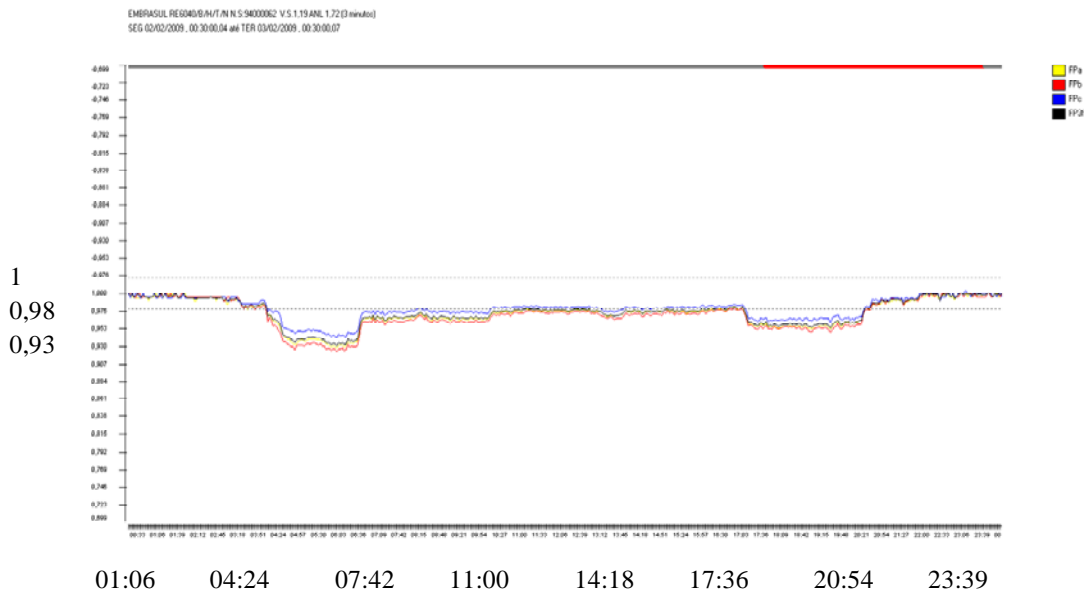


Figura 42: Variação do fator de potência da fundamental com o tempo (hora:minuto)

O valor da corrente de curto circuito a ser considerado para os cálculos da relação entre corrente de carga e corrente de curto-circuito é de 161496 A.

Para o transformador 3, com os disjuntores TIE fechados, considerando o pico registrado as 13:51:00,04h do dia 02/02/2009, que se encontra dentro do horário de máxima utilização das instalações prediais (13:00 às 15:00h), foram obtidos os seguintes valores de corrente e distorções harmônicas:

**Tabela 7: Registro obtido as 13:51:00,04 h do dia 02/02/2009.**

Fases	Corrente RMS (A)	Distorção Harmônica de Tensão (%)	Distorção Harmônica de Corrente (%)
Fase A	1050,000	2,600	3,470
Fase B	1030,000	2,310	3,520
Fase C	957,600	2,700	4,860

Segundo as Tabela 10.3 e 11.1 da norma IEEE 519-1992 [19], as distorções harmônicas de corrente e de tensão, para os valores da Tabela 7, encontram-se dentro de valores aceitáveis.

Para a utilização da Tabela 10.3 da norma IEEE 519-1992 [19] é recomendado que o valor da corrente de carga seja calculado como a corrente média das demandas máximas dos doze meses precedentes. Na falta de dados acerca dessas demandas, optou-se por trabalhar com os valores de pico da Tabela 7. A utilização do valor de corrente nominal (aproximadamente 2600 A) resultaria em menores limites para a distorção harmônica de corrente, o que seria uma análise pouco verossímil. Os valores de pico da Tabela 7 são razoáveis em razão de terem sido verificados em medições feitas em outros dias.

Segundo a Tabela 10.3 da norma IEEE 519-1992 [19], para valores entre 100 e 1000 da relação entre a corrente de circuito e a corrente de carga, a distorção harmônica de corrente admissível é de 15,0 %.

As Figuras 40 e 41 do capítulo 3 demonstram a variação no tempo das distorções harmônicas de corrente e tensão. No caso da distorção harmônica de corrente, os valores não excedem 6% ao longo de todo o horário de máxima utilização das instalações prediais (13:00 a 15:00h). A distorção harmônica de tensão encontra-se abaixo de 3%, no mesmo intervalo.

Comparando-se os valores de distorções harmônicas de corrente e de tensão da Tabela 7 (transformador 3 com disjuntor *TIE* fechado) com os valores da Tabela 3, onde as cargas do transformador 3 são medidas com o disjuntor *TIE* aberto, resultou em diferenças significativas. Com os disjuntores *TIE* fechados, os valores de distorção harmônica de corrente apresentaram acentuada redução e a distorção harmônica de tensão apresentou pouca alteração. O aumento da corrente de curto circuito no ponto de acoplamento comum para aproximadamente 161 kA reduz o impacto das distorções harmônicas de corrente nas instalações da subestação 1. A distorção harmônica de corrente admissível, segundo a IEEE 519-1992 [19], passou de 12% (disjuntores *TIE* abertos) para 15% (disjuntores *TIE* fechados).

O valor do fator de potência da fundamental apresenta-se acima de 0,92 em todos os instantes, conforme mostra a Figura 42, devido a ação de banco de capacitores automático (Figura 27).

As Figuras 38 e 39, que se referem aos valores RMS de tensões e correntes nas fases ao longo do tempo, mostram que há desbalanceamento nas correntes.



### 3.2.4 Medição do alimentador das cargas do transformador 4 da subestação 1 com os disjuntores TIE fechados

As Figuras 43 e 44 abaixo mostram, respectivamente, a variação do valor *RMS* da corrente (em Ampères) e da tensão (em Volts) com o tempo no dia 02/02/2009.

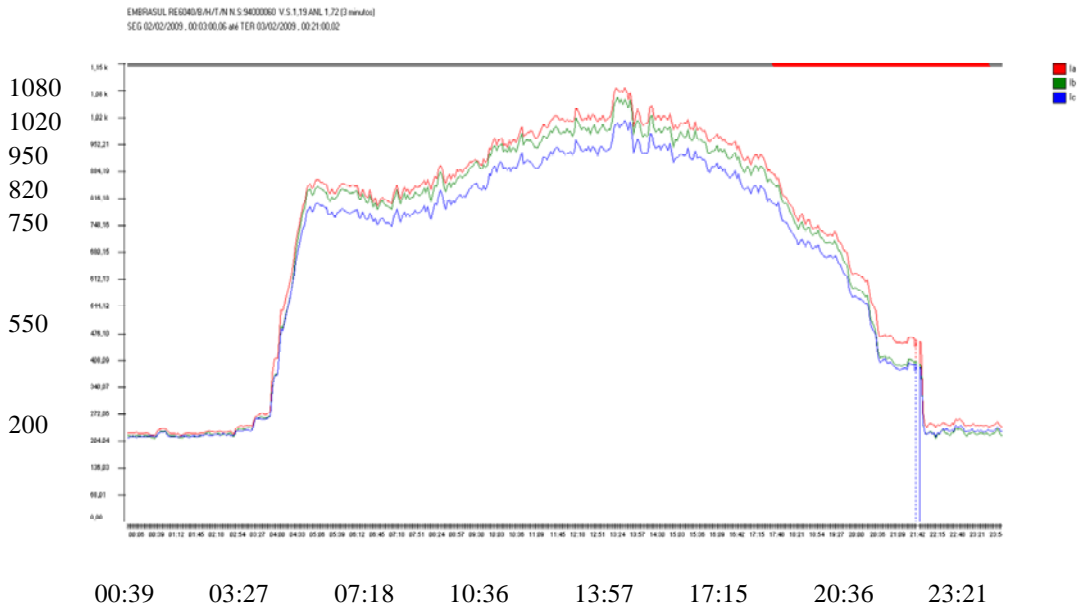


Figura 43: Variação do valor RMS da corrente com o tempo (hora:minuto).

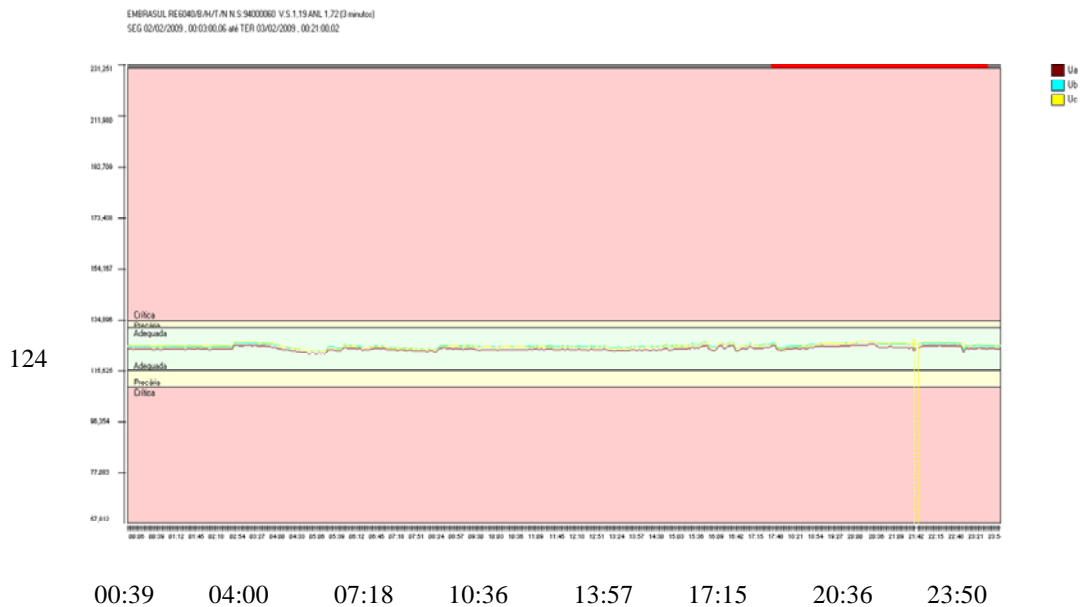


Figura 44: Variação do valor RMS da tensão com o tempo (hora:minuto).

As Figuras 45 e 46 abaixo mostram, respectivamente, a variação da distorção harmônica da corrente e da tensão (ambos em valor percentual) com o tempo, no dia 02/02/2009.

A existência de picos no valor da distorção harmônica de corrente entre 0:00 e 04:00h e após 20:30h (Figura 45) ocorre em horários em que a carga predial ligada é mínima.

As linhas verticais observadas nas vizinhanças da abscissa 23:21h correspondem a um intervalo de tempo em que o analisador de painel, por algum motivo, não efetuou registro de grandezas elétricas.

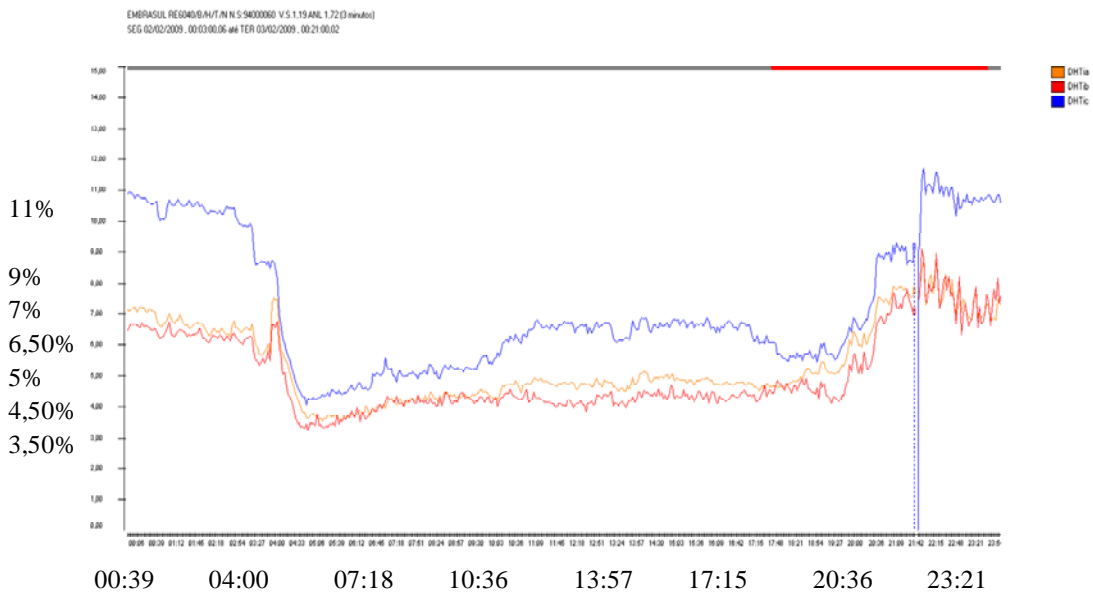


Figura 45: Variação do valor percentual de distorção harmônica de corrente com o tempo (hora:minuto)

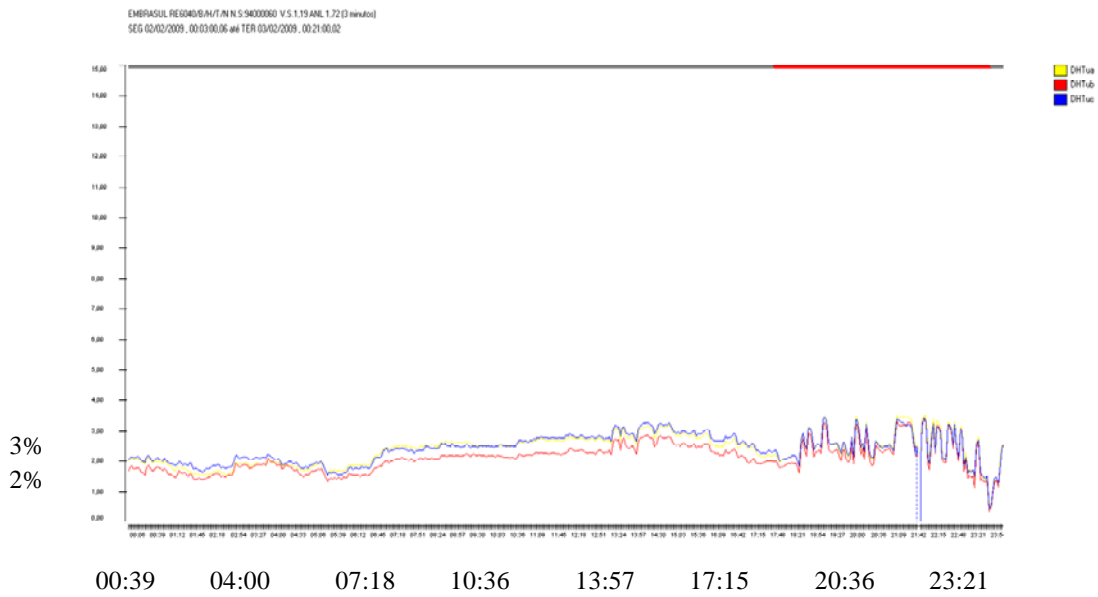


Figura 46: Variação do valor percentual de distorção harmônica de tensão com o tempo (hora:minuto).

A Figura 47 abaixo mostra a variação do fator de potência da fundamental com o tempo, no dia 02/02/2009.

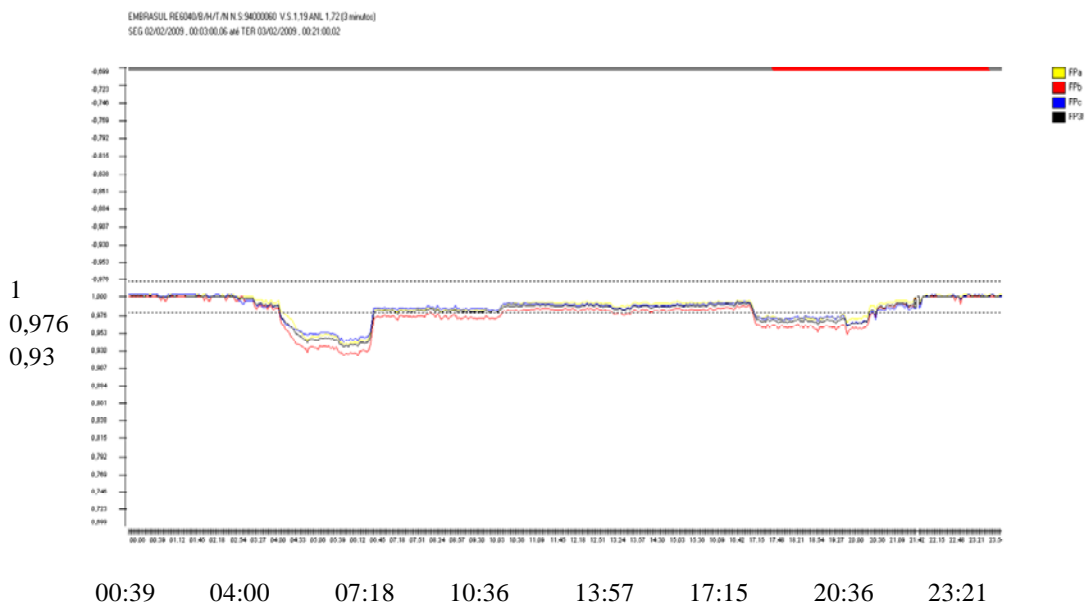


Figura 47: Variação do fator de potência da fundamental com o tempo (hora:minuto)

O valor da corrente de curto circuito a ser considerado para os cálculos da relação entre corrente de carga e corrente de curto-circuito é de 161496 A.

Para o transformador 4, com os disjuntores TIE fechados, considerando o pico registrado as 13:48:00,01h do dia 02/02/2009, que se encontra dentro do horário de máxima utilização das instalações prediais (13:00 às 15:00h), foram obtidos os seguintes valores de corrente e distorções harmônicas:

**Tabela 8: Registro obtido as 13:48:00,01 h do dia 02/02/2009.**

Fases	Corrente RMS (A)	Distorção Harmônica de Tensão (%)	Distorção Harmônica de Corrente (%)
Fase A	1090,000	2,850	4,490
Fase B	1060,000	2,500	4,070
Fase C	1010,000	2,930	6,170

Segundo as Tabelas 10.3 e 11.1 da norma IEEE 519-1992 [19], as distorções harmônicas de corrente e de tensão, para os valores da Tabela 8, encontram-se dentro de valores aceitáveis.

Para a utilização da Tabela 10.3 da norma IEEE 519-1992 [19] é recomendado que o valor da corrente de carga seja calculada como a corrente média das demandas máximas dos doze meses precedentes. Na falta de dados acerca dessas demandas, optou-se por trabalhar com os valores de pico da Tabela 8. A utilização do valor de corrente nominal (aproximadamente 2600 A) resultaria em menores limites para a distorção harmônica de corrente, o que seria uma análise pouco verossímil. Os valores de pico da Tabela 8 são razoáveis em razão de terem sido verificados em medições feitas em outros dias.

Segundo a Tabela 10.3 da norma IEEE 519-1992 [19], para valores entre 100 e 1000 da relação entre a corrente de circuito e a corrente de carga, a distorção harmônica de corrente admissível é de 15,0 %.

As Figuras 45 e 46 demonstram a variação no tempo das distorções harmônicas de corrente e tensão. No caso da distorção harmônica de corrente, os valores não excedem 7% ao longo de todo o horário de máxima utilização das instalações prediais (13:00 a 15:00h). A distorção harmônica de tensão encontra-se abaixo de 3%, no mesmo intervalo.

Comparando-se os valores de distorções harmônicas de corrente e de tensão da Tabela 8 (transformador 4 com disjuntor TIE fechado) com os valores da Tabela 4, onde as cargas do transformador 4 são medidas com o disjuntor TIE aberto, resultou em

diferenças significativas. Com os disjuntores *TIE* fechados, os valores de distorção harmônica de corrente e a distorção harmônica de tensão aumentaram. O aumento da corrente de curto circuito no ponto de acoplamento comum para aproximadamente 161 kA reduz o impacto das distorções harmônicas de corrente nas instalações da subestação 1. A distorção harmônica de corrente admissível, segundo a IEEE 519-1992 [19], passou de 8% (disjuntores *TIE* abertos) para 15% (disjuntores *TIE* fechados).

O valor do fator de potência da fundamental apresenta-se acima de 0,92 em todos os instantes, conforme Figura 47, devido a ação de banco de capacitores automático (Figura 27).

As Figuras 43 e 44 se referem aos valores RMS de tensões e correntes nas fases ao longo do tempo e mostram um pequeno desbalanceamento nas correntes.

### **3.3 Medições do barramento dos disjuntores *TIE* da subestação 1**

As medições efetuadas no barramento dos disjuntores *TIE* se prestaram a verificar qualidade da tensão nesse ponto de acoplamento comum das cargas da subestação principal e foram medidas com os disjuntores *TIE* fechados (Figura 48).

Essas medições foram tomadas em 13/04/2009 entre 12:54 e 17:48h aproximadamente. São horários que correspondem ao pleno funcionamento do complexo predial em um dia típico.

A subestação 1 funciona normalmente com os disjuntores *TIE* fechados. Os disjuntores somente são abertos em caso de manutenção da subestação 1.

A distorção harmônica de tensão se encontra, conforme Figura 50, abaixo de 2%, o que atende as recomendações da Tabela 11.1 da norma IEEE 519-1992 [19].

As tensões nas fases estão com um desbalanceamento pequeno, da ordem de 1%, conforme Figura 49. Houve uma ligeira queda no entorno do horário 16:20h, para valores aproximados de 120Vrms (fase-neutro), e uma ligeira elevação, nas vizinhanças do horário 17:15h, para valores aproximados de 128 Vrms. Esses pontos correspondem, respectivamente, a um instante específico de pico de carga (queda na tensão) e de alívio de algumas cargas (elevação na tensão). Todavia esses valores não correspondem a *SAGs* ou *SWELLS* (IEEE 1159-1995) [20] e também se encontram dentro de faixa de variação aceitável (Resolução 505 da ANEEL) [21] [20].

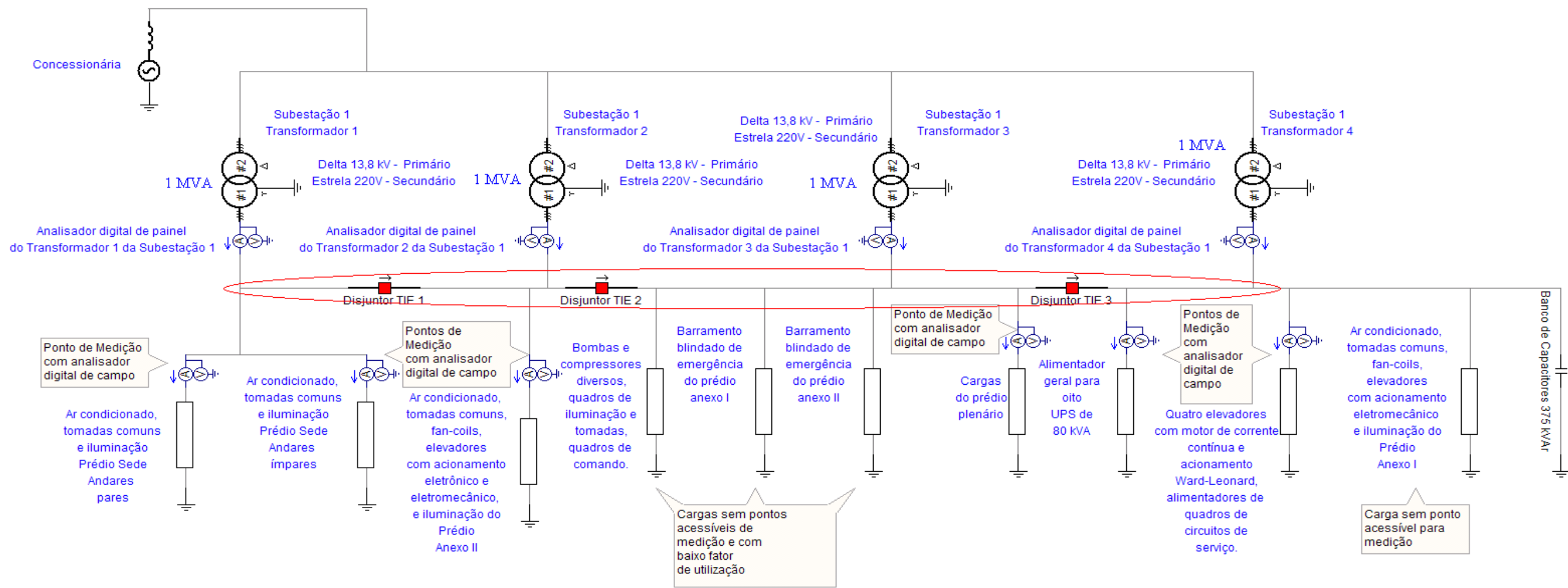


Figura 48: Barramento dos disjuntores TIE da subestação 1

A Figura 49 abaixo mostra a variação do valor RMS da tensão com o tempo.

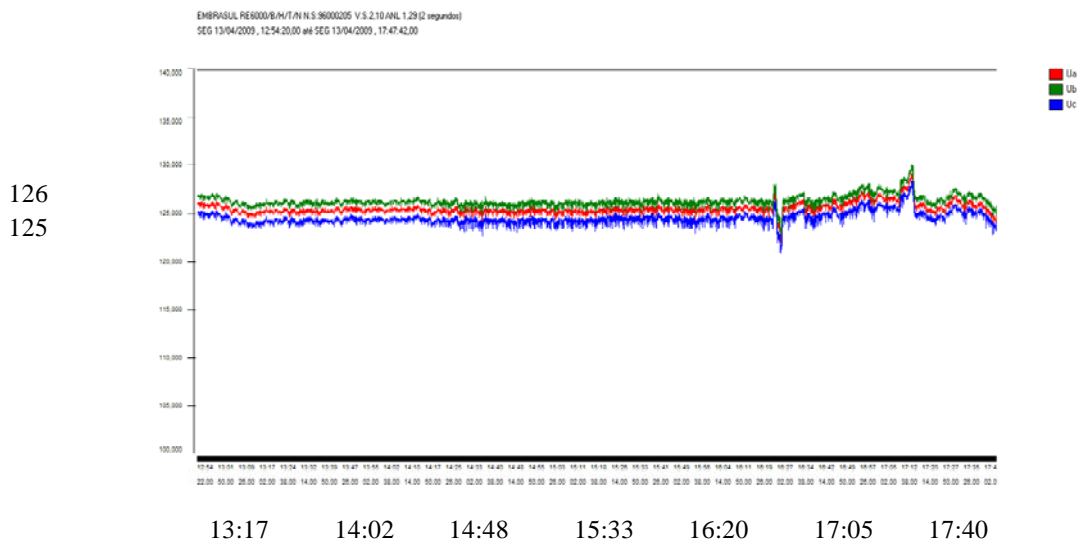


Figura 49: Variação do valor RMS da tensão com o tempo (hora:minuto).

A Figura 50 abaixo mostra a variação da distorção harmônica de tensão com o tempo.

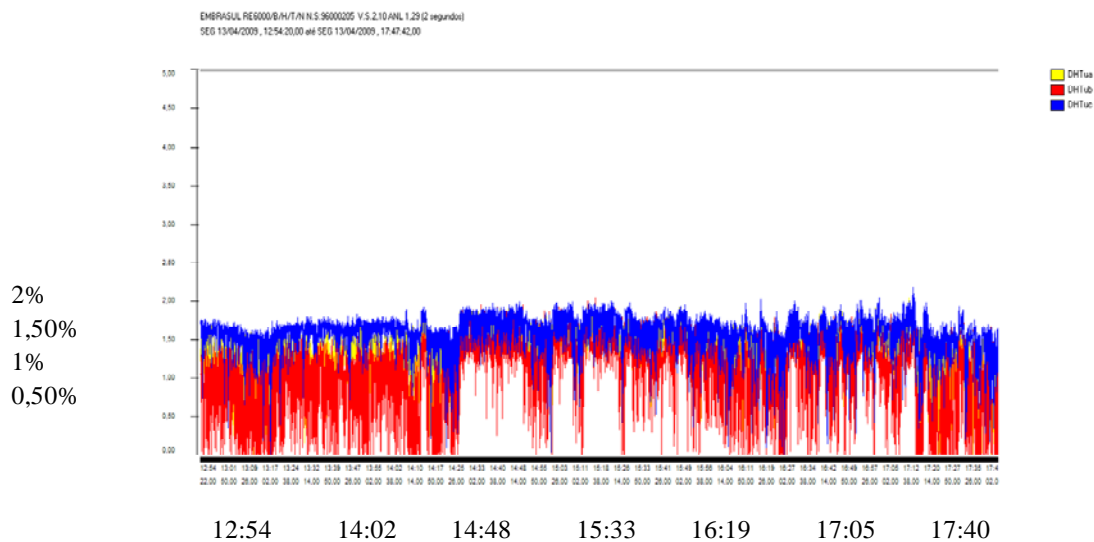


Figura 50: Variação do valor percentual de distorção harmônica de tensão com o tempo (hora:minuto)

### 3.4 Medição do alimentador das cargas do transformador 1 da subestação 2

A Figura 51 abaixo é um diagrama elétrico simplificado da subestação secundária, onde o medidor assinalado mede as cargas do transformador 1.

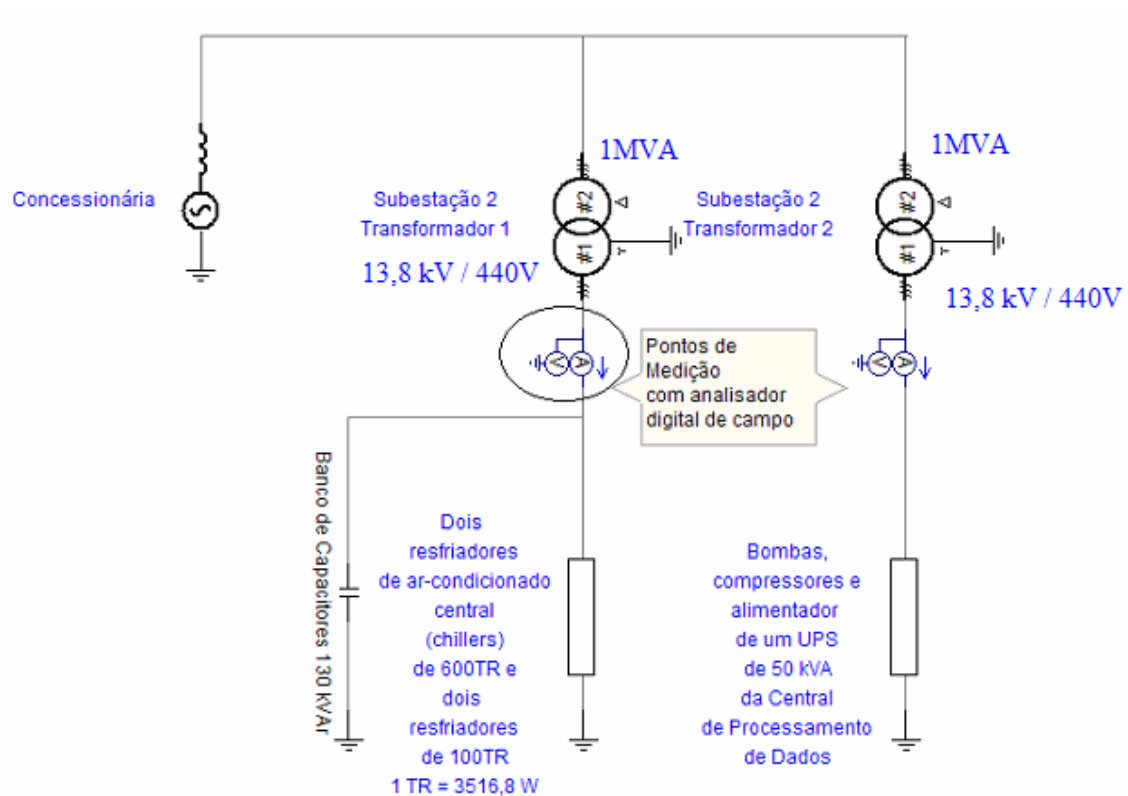


Figura 51: Alimentador das cargas do transformador 1 da subestação 2



As Figuras 52 e 53 abaixo mostram, respectivamente, a variação do valor *RMS* da corrente (em Ampères) e da tensão (em Volts) com o tempo no dia 05/02/2009.

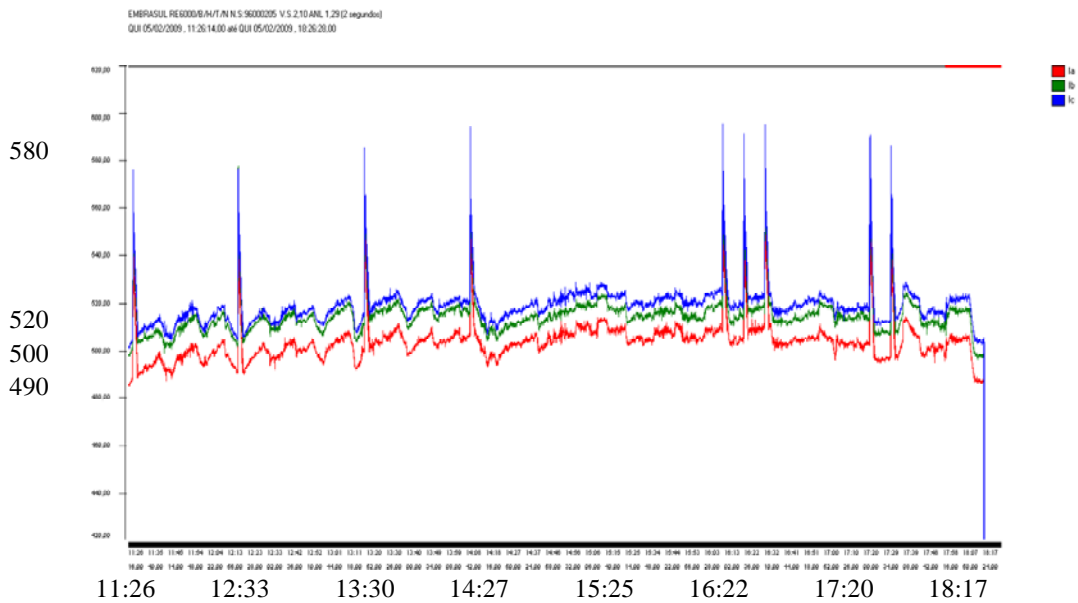


Figura 52: Variação do valor *RMS* da corrente com o tempo (hora:minuto).

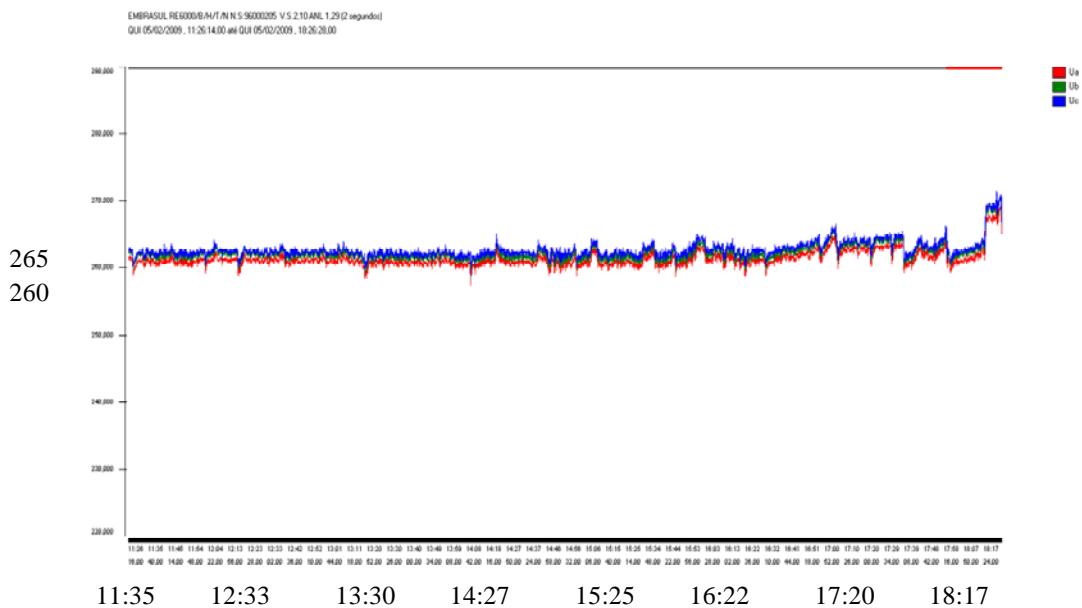


Figura 53: Variação do valor *RMS* da tensão com o tempo (hora:minuto).

As Figuras 54 e 55 abaixo mostram, respectivamente, a variação da distorção harmônica da corrente e da tensão (ambos em valor percentual) com o tempo, no dia 05/02/2009.

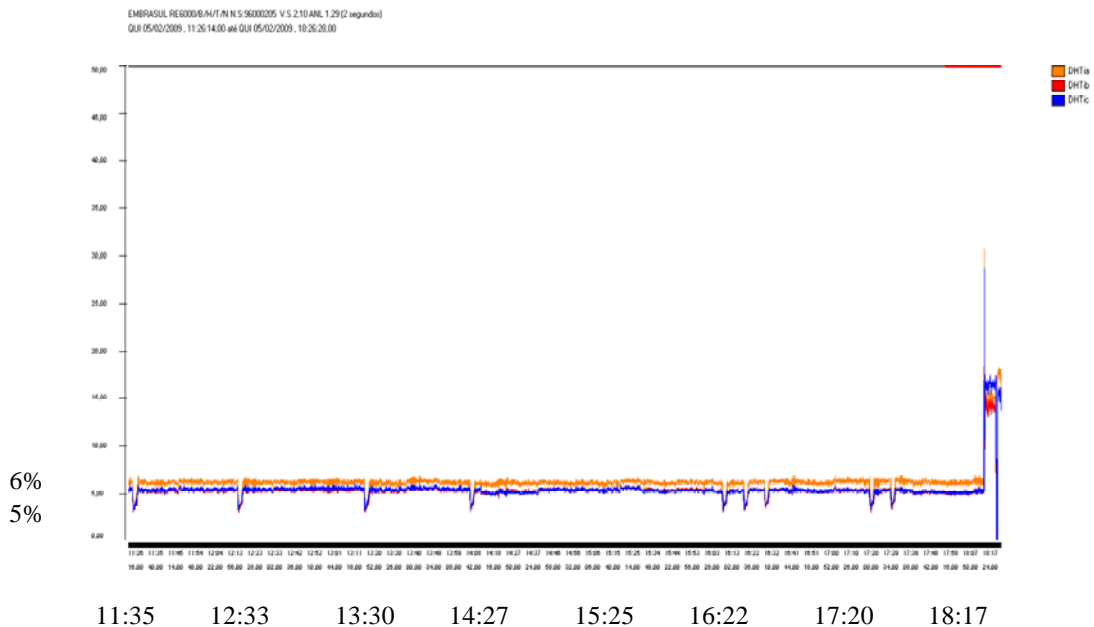


Figura 54: Variação do valor percentual de distorção harmônica de corrente com o tempo (hora:minuto)

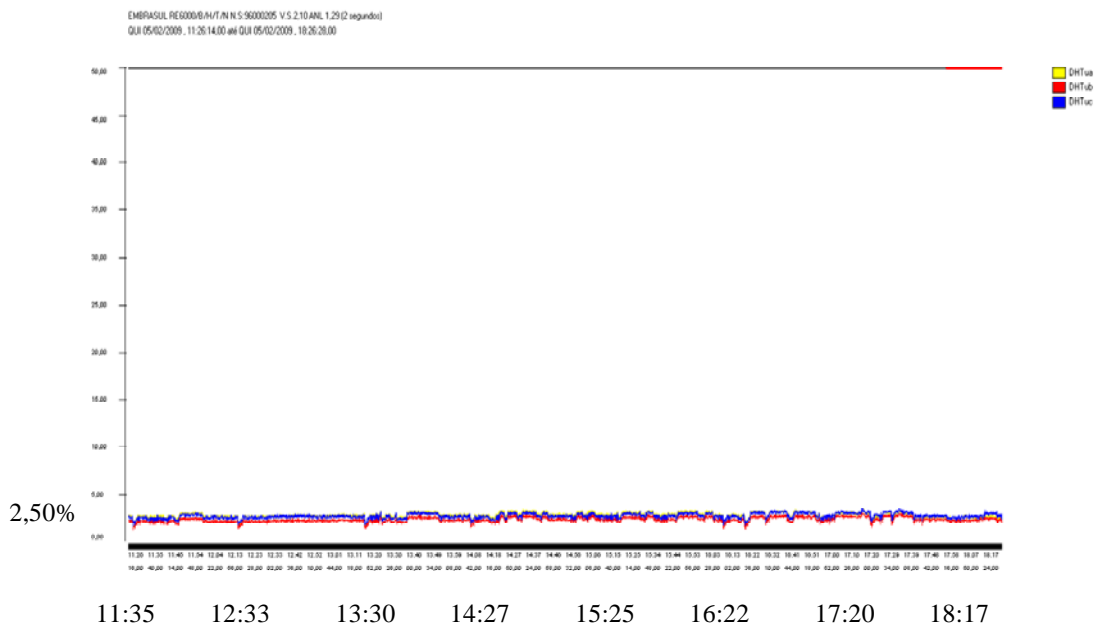


Figura 55: Variação do valor percentual de distorção harmônica de tensão com o tempo (hora:minuto)

A Figura 56 abaixo mostra a variação do fator de potência da fundamental com o tempo, no dia 05/02/2009.

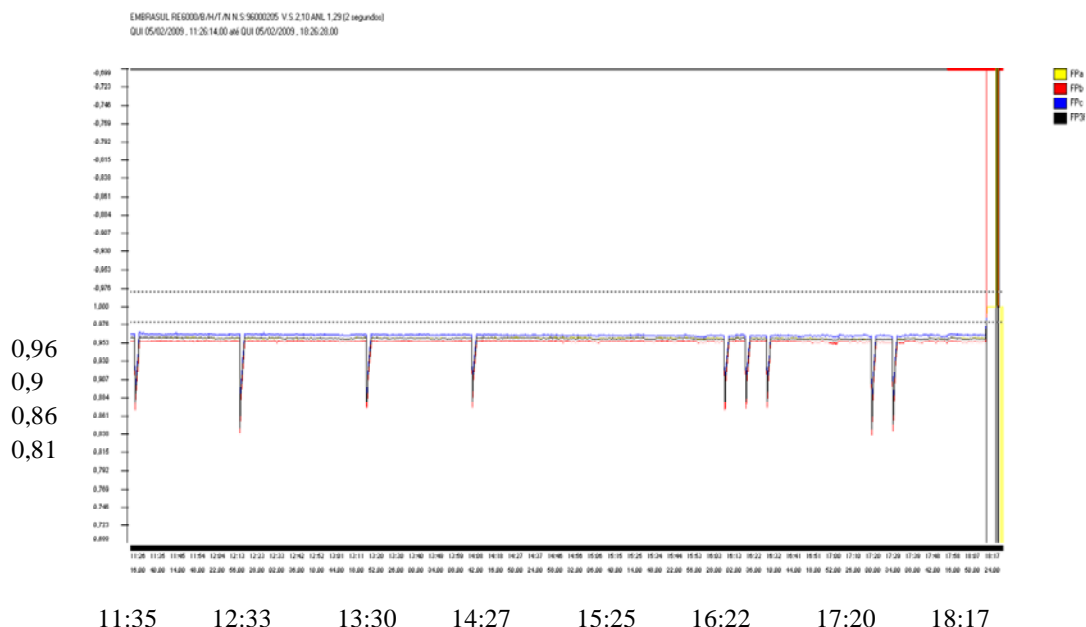


Figura 56: Variação do fator de potência da fundamental com o tempo (hora:minuto)

Esse transformador possui banco de capacitores automático que corrige o fator de potência da fundamental.

Para o transformador 1 da subestação 2, no horário de pico da carga, entre 13:00 e 15:00h, para o registro obtido as 14:10:28,00 h do dia 05/02/2009, foram obtidos os seguintes valores de corrente e distorções harmônicas:

**Tabela 9: Registro obtido as 14:10:28.00 h do dia 05/02/2009.**

Fases	Corrente RMS (A)	Distorção Harmônica de Tensão (%)	Distorção Harmônica de Corrente (%)
Fase A	576,000	1,820	3,770
Fase B	592,500	1,510	3,430
Fase C	594,000	1,870	3,580

A corrente de curto circuito no secundário do transformador 1 da subestação 2 é de 20187 A.

A relação entre a corrente de curto-circuito e a corrente de carga resulta valor entre 34 e 35, para os valores da Tabela 9.

Para a utilização da Tabela 10.3 da norma IEEE 519-1992 [19] é recomendado que o valor da corrente de carga seja calculada como a corrente média das demandas máximas dos doze meses precedentes. Na falta de dados acerca dessas demandas, optou-se por trabalhar com os valores de pico da Tabela 9. A utilização do valor de corrente nominal (aproximadamente 1312 A) resultaria em menores limites para a distorção harmônica de corrente, o que seria uma análise pouco verossímil. Os valores de pico da Tabela 9 são razoáveis em razão de terem sido verificados em medições feitas em outros dias.

Segundo a Tabela 10.3 da norma IEEE 519-1992 [19], para valores entre 20 e 50 da relação entre a corrente de circuito e a corrente de carga, a distorção harmônica de corrente admissível é de 8,0 %. Logo, para o transformador 1 da subestação 2, a distorção harmônica de corrente não é crítica. Na Figura 54, também pode ser verificado que a distorção harmônica de corrente no período de maior utilização das instalações elétricas prediais, entre 13:00 e 15:00h, não ultrapassa 7%.

Segundo a Tabela 11.1 da norma IEEE 519-1992 [19], verifica-se que a distorção harmônica de tensão observada nas medições apresentadas na tabela 9 encontra-se dentro dos padrões aceitáveis, pois para tensões menores ou iguais a 69kV, a distorção harmônica de tensão não deve ser superior a 5%. Na Figura 55, também pode ser verificado que a distorção harmônica de tensão no período de maior utilização das instalações elétricas prediais, entre 13:00 e 15:00h, não ultrapassa 3%.

Na Figura 56, observa-se que o fator de potência da fundamental varia entre 0,96 e 0,97, no período de maior utilização das instalações elétricas prediais, o que demonstra que o banco de capacitores está corrigindo adequadamente.

A análise da Figura 52 revela que há desbalanceamentos pequenos de corrente nas fases.

Os picos no valor RMS da corrente verificados na figura 48 referem-se a partidas de motor de indução, e coincidem com os mínimos observados no valor RMS da tensão, verificados na Figura 53.

Em termos qualitativos, as cargas do transformador 1 da subestação 2 não apresentam distorções harmônicas significativas e também apresentam o do fator de potência da fundamental acima do mínimo estabelecido pela legislação brasileira. Não

há necessidade de intervenções para melhoria da qualidade de energia para esse transformador.

### 3.5 Medição do alimentador das cargas do transformador 2 da subestação 2

A Figura 57 abaixo é um diagrama elétrico simplificado da subestação secundária, onde o medidor assinalado mede as cargas do transformador 2.

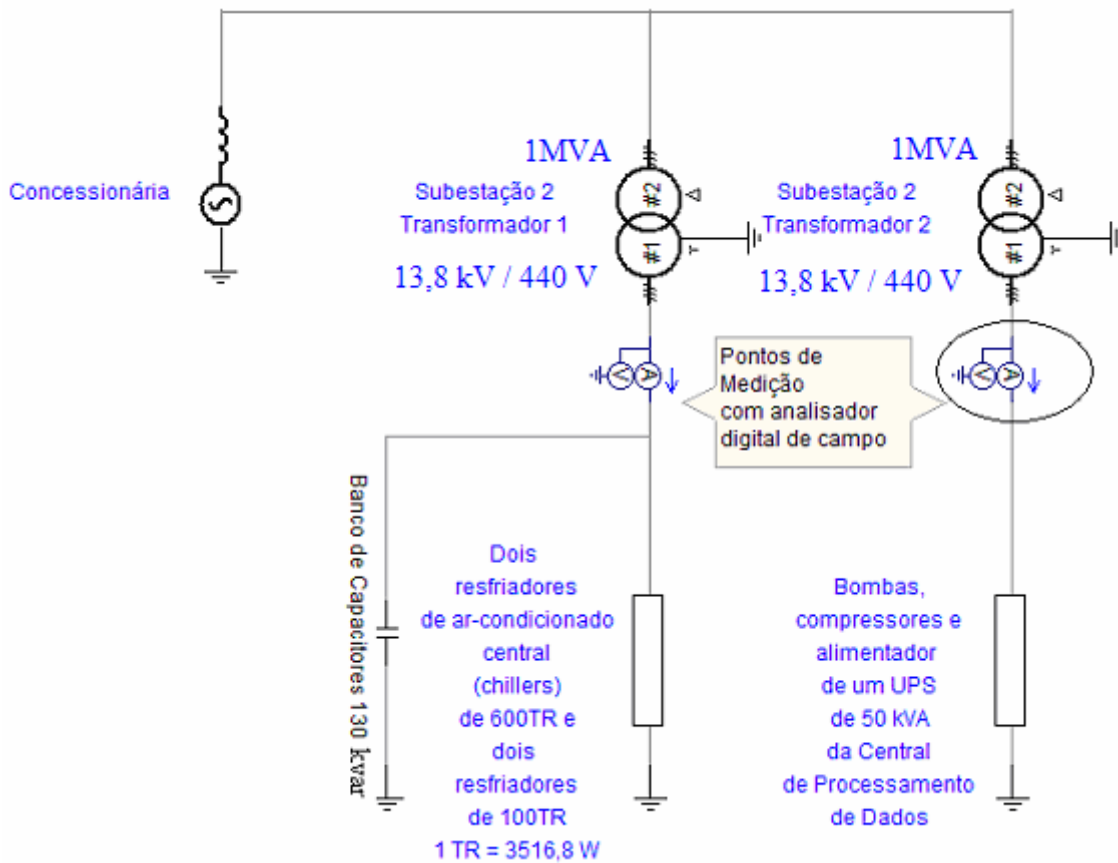


Figura 57: Alimentador das cargas do transformador 2 da subestação 2.

As Figuras 58 e 59 abaixo mostram, respectivamente, a variação do valor *RMS* da corrente (em Ampères) e da tensão (em Volts) com o tempo no dia 11/02/2009.

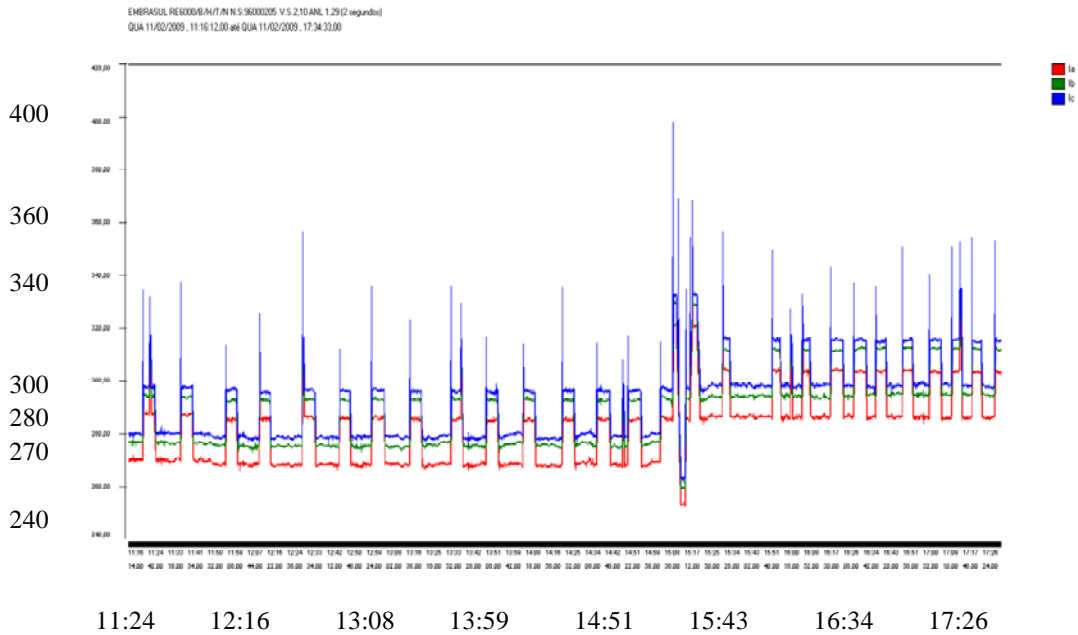


Figura 58: Variação do valor *RMS* da corrente com o tempo (hora:minuto).

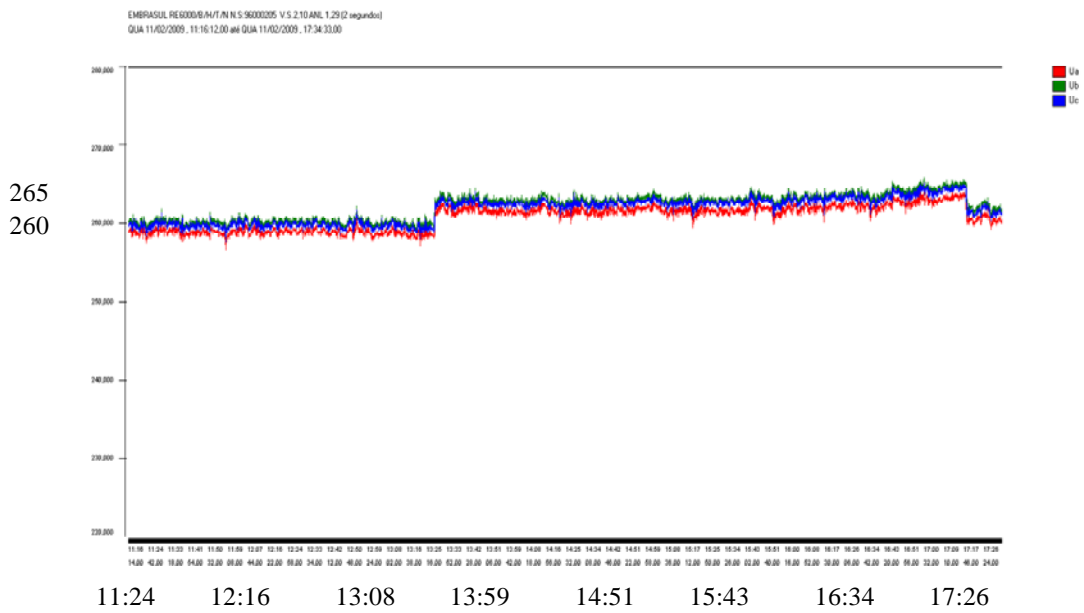


Figura 59: Variação do valor *RMS* da tensão com o tempo (hora:minuto).

As Figuras 60 e 61 abaixo mostram, respectivamente, a variação da distorção harmônica da corrente e da tensão (ambos em valor percentual) com o tempo, no dia 11/02/2009.

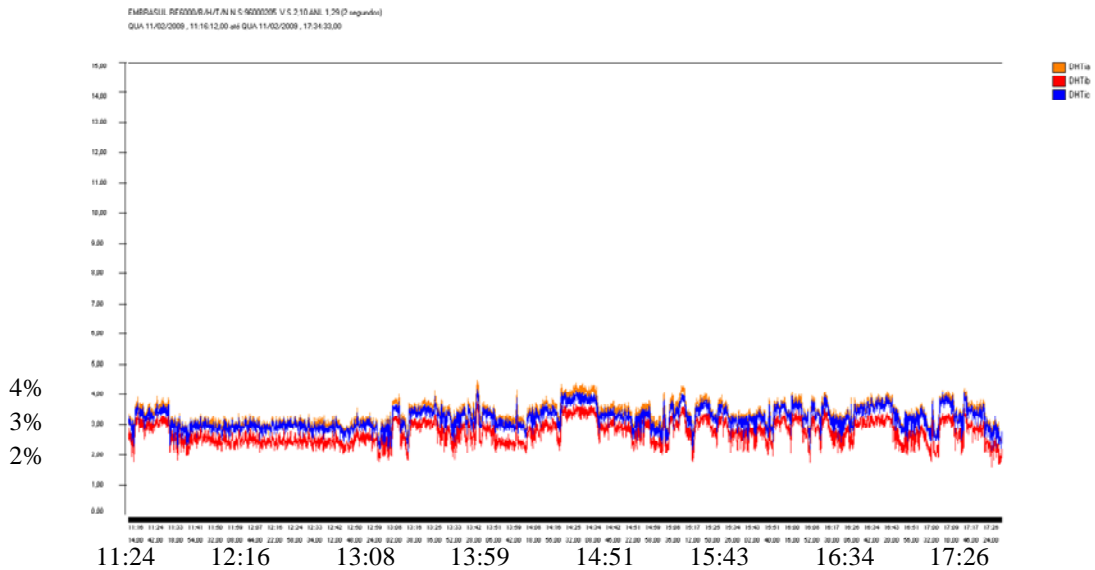


Figura 60: Variação do valor percentual de distorção harmônica de corrente com o tempo (hora:minuto)

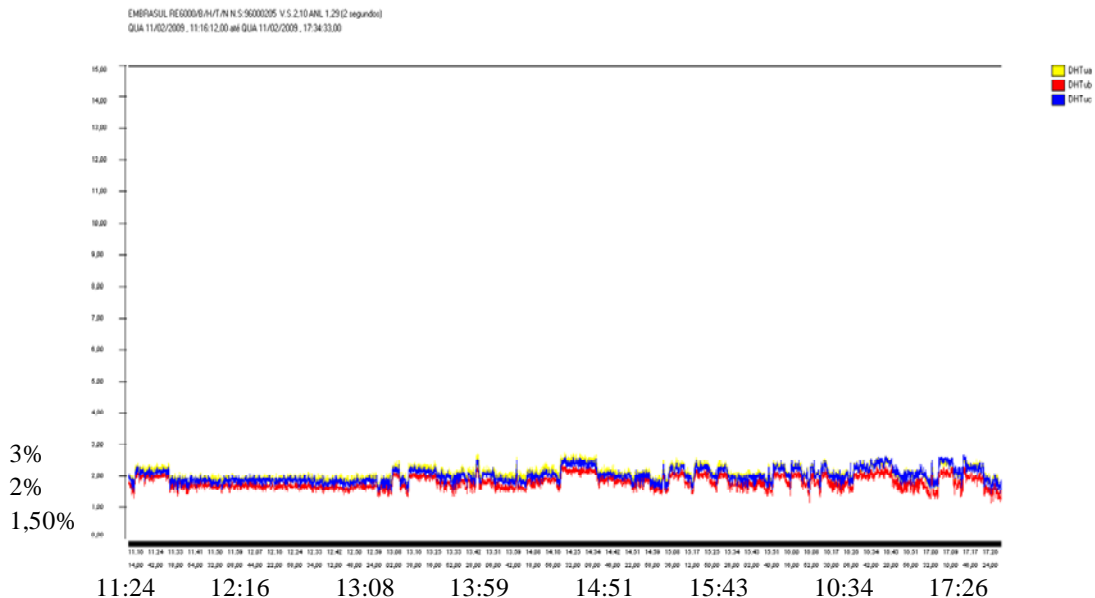


Figura 61: Variação do valor percentual de distorção harmônica de tensão com o tempo (hora:minuto).

A Figura 62 abaixo mostra a variação do fator de potência da fundamental com o tempo, no dia 11/02/2009.

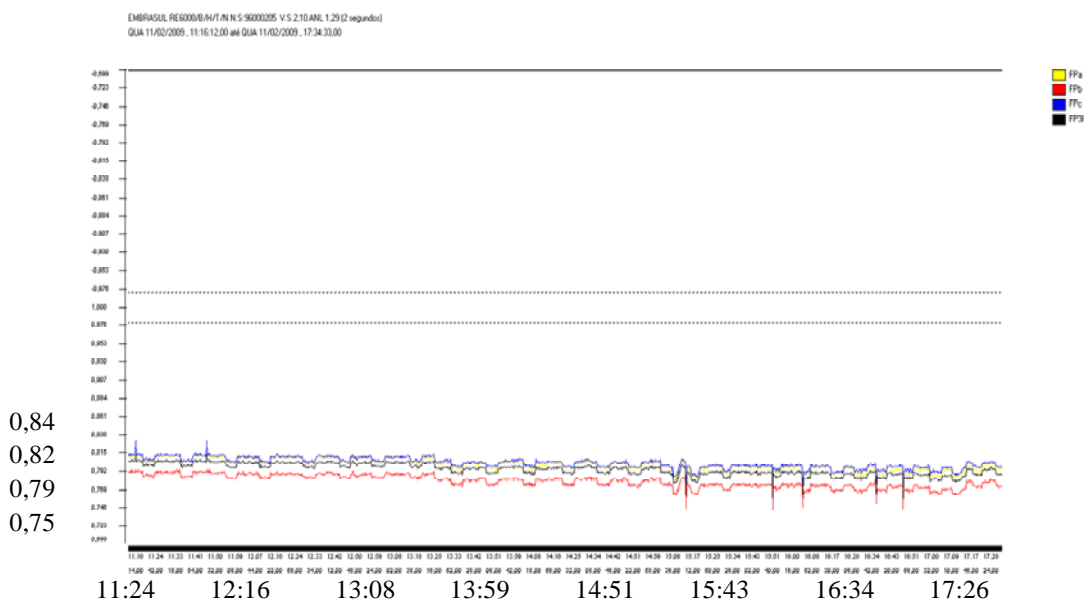


Figura 62: Variação do fator de potência da fundamental com o tempo (hora:minuto).

Para o transformador 2 da subestação 2, no horário de pico da carga, entre 15:00 e 17:20h, para o registro obtido as 16:28:18,00 h do dia 11/02/2009, foram obtidos os seguintes valores de corrente e distorções harmônicas:

**Tabela 10: Registro obtido as 16:28:18,00 h do dia 11/02/2009.**

Fases	Corrente RMS (A)	Distorção Harmônica de Tensão (%)	Distorção Harmônica de Corrente (%)
Fase A	287,100	1,810	2,850
Fase B	294,600	1,470	2,180
Fase C	298,500	1,730	2,790

A corrente de curto circuito no secundário do transformador 1 da subestação 2 é de 20187 A.



A relação entre a corrente de curto-circuito e a corrente de carga resulta valor entre 67 e 71, para os valores da Tabela 10.

Para a utilização da Tabela 10.3 da norma IEEE 519-1992 [19] é recomendado que o valor da corrente de carga seja calculado como a corrente média das demandas máximas dos doze meses precedentes. Na falta de dados acerca dessas demandas, optou-se por trabalhar com os valores de pico da Tabela 10. A utilização do valor de corrente nominal (aproximadamente 1312 A) resultaria em menores limites para a distorção harmônica de corrente, o que seria uma análise pouco verossímil. Os valores de pico da Tabela 10 são razoáveis em razão de terem sido verificados em medições feitas em outros dias.

Segundo a Tabela 10.3 da norma IEEE 519-1992 [19], para valores entre 50 e 100 da relação entre a corrente de circuito e a corrente de carga, a distorção harmônica de corrente admissível é de 12,0 %. Logo, para o transformador 2 da subestação 2, a distorção harmônica de corrente não é crítica. Na Figura 60 também pode ser verificado que a distorção harmônica de corrente no período de maior utilização das instalações elétricas prediais, entre 15:00 e 17:20h, não ultrapassa 4%.

Segundo a Tabela 11.1 da norma IEEE 519-1992 [19], verifica-se que a distorção harmônica de tensão observada nas medições apresentadas na Tabela 10 encontra-se dentro dos padrões aceitáveis, pois para tensões menores ou iguais a 69kV, a distorção harmônica de tensão não deve ser superior a 5%. Na Figura 61 também pode ser verificado que a distorção harmônica de tensão no período de maior utilização das instalações elétricas prediais, entre 15:00 e 17:20h, não ultrapassa 3%.

Na Figura 62 observa-se que o fator de potência da fundamental varia entre 0,79 e 0,82, o que demonstra a necessidade de uma correção.

A análise da Figura 58 revela que há desbalanceamentos pequenos de corrente nas fases.

Em termos qualitativos, as cargas do transformador 2 da subestação 2 não apresentam distorções harmônicas significativas, entretanto apresentam o fator de potência da fundamental abaixo do mínimo estabelecido pela legislação brasileira. A correção do fator de potência da fundamental com banco de capacitores é suficiente.

### 3.6 Medição do alimentador de elevador com acionamento eletrônico através de controle escalar de velocidade em motor de indução trifásico

Foi realizada medição do alimentador de um motor de indução trifásico de elevador de passageiros com acionamento eletrônico VVVF escalar em um dia típico.

As Figuras 63 e 64 abaixo mostram, respectivamente, a variação do valor *RMS* da corrente (em Ampères) e da tensão (em Volts) com o tempo no dia 18/02/2009.

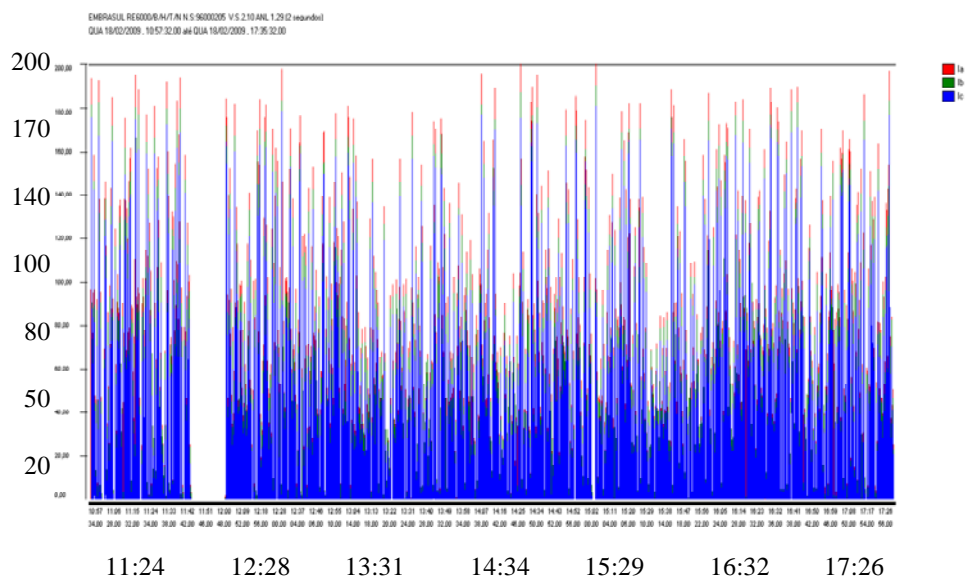


Figura 63: Variação do valor *RMS* da corrente com o tempo (hora:minuto).

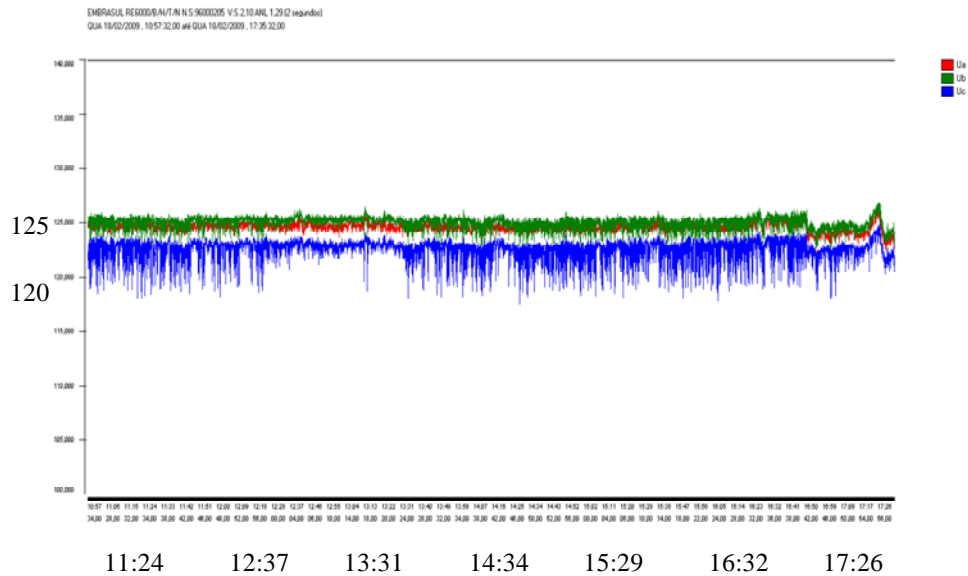


Figura 64: Variação do valor RMS da tensão com o tempo (hora:minuto).

As Figuras 65 e 66 abaixo mostram, respectivamente, a variação da distorção harmônica da corrente e da tensão (ambos em valor percentual) com o tempo, no dia 11/02/2009.

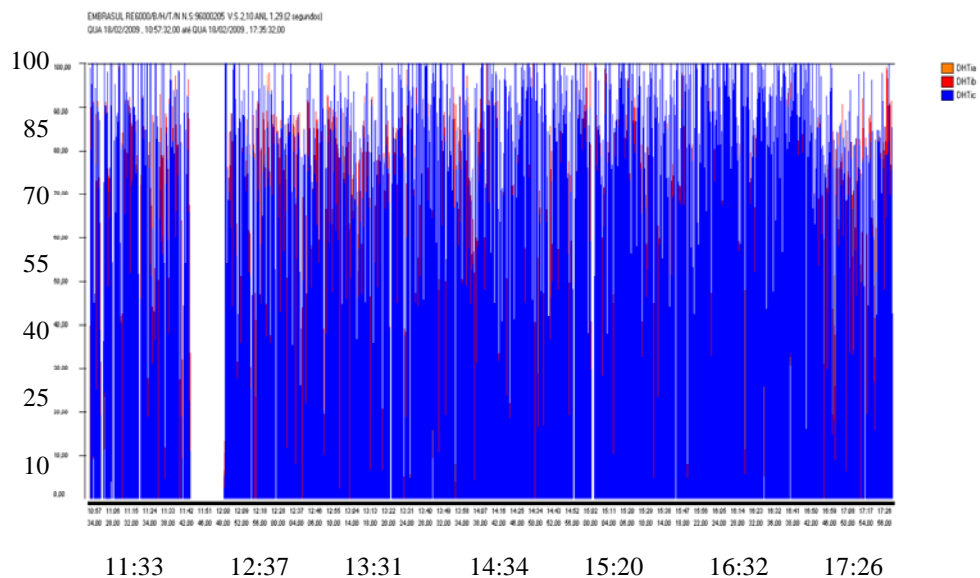


Figura 65: Variação do valor percentual de distorção harmônica de corrente com o tempo (hora:minuto)

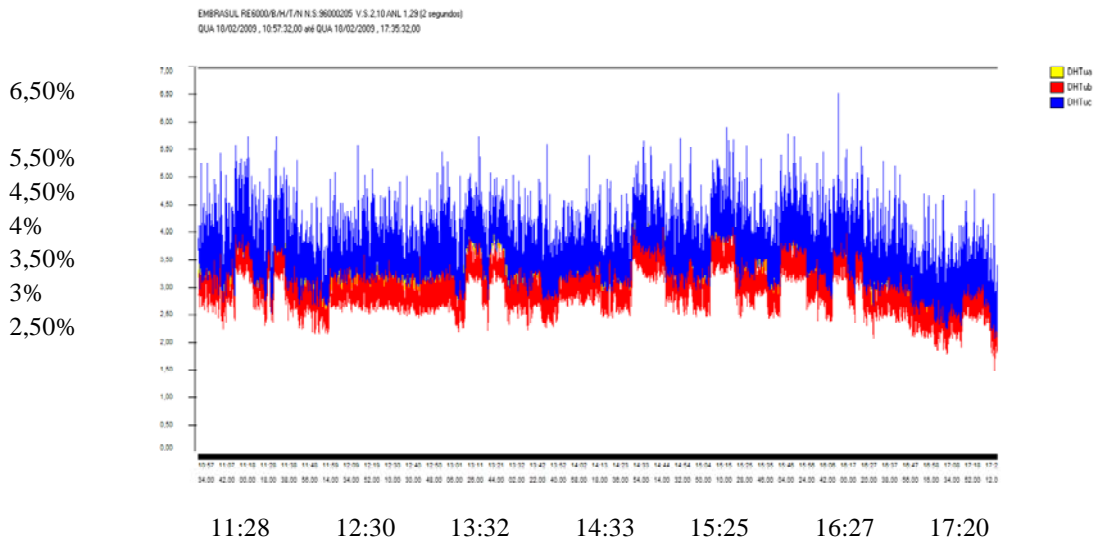


Figura 66: Variação do valor percentual de distorção harmônica de tensão com o tempo (hora:minuto)

A Figura 67 abaixo mostra a variação do fator de potência da fundamental com o tempo, no dia 18/02/2009.

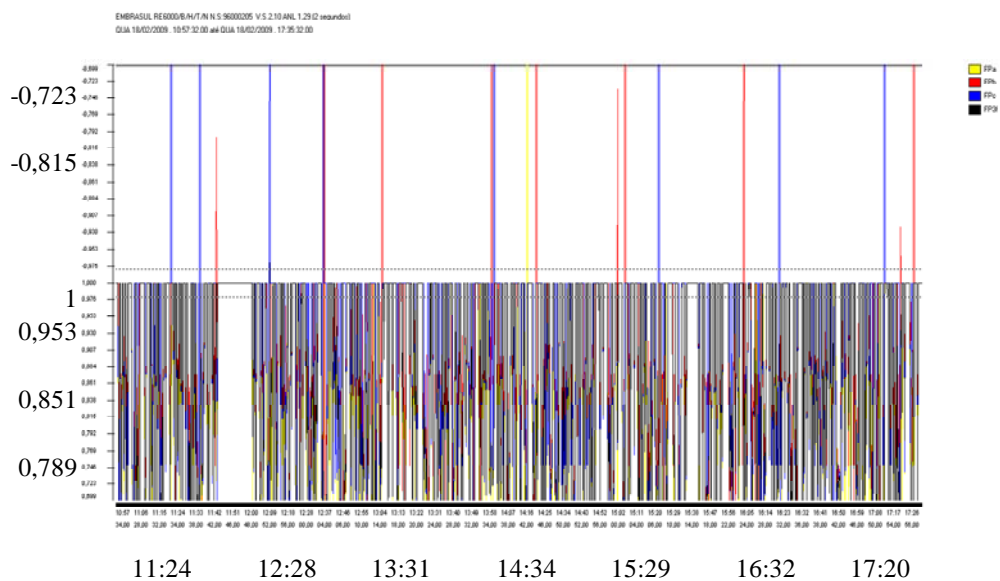


Figura 67: Variação do fator de potência da fundamental com o tempo (hora:minuto).

Foi medido o alimentador do elevador nº 3, da casa de máquinas do anexo II, que é alimentada por barramento blindado que parte do transformador 2 (vide Figura 2).

Para esse elevador, alimentado por drive VVVF escalar, em horário de pico da carga, entre 11:00 e 17:20h e para o registro obtido as 15:07:34,00 h do dia 18/02/2009, foram obtidos os seguintes valores de corrente e distorções harmônicas:

**Tabela 11: Registro obtido as 15:07:34,00 h do dia 18/02/2009.**

Fases	Corrente RMS (A)	Distorção Harmônica de Tensão (%)	Distorção Harmônica de Corrente (%)
Fase A	203,400	3,750	60,470
Fase B	190,500	3,810	64,950
Fase C	180,900	4,840	65,730

A corrente de curto circuito no alimentador do elevador 3 é de aproximadamente 10 kA.

A relação entre a corrente de curto-circuito e a corrente de carga resulta valor aproximado entre 50 e 100, para os valores da Tabela 10.

Para a utilização da Tabela 10.3 da norma IEEE 519-1992 [19] é recomendado que o valor da corrente de carga seja calculado como a corrente média das demandas máximas dos doze meses precedentes. Na falta de dados acerca dessas demandas, optou-se por trabalhar com os valores de pico da Tabela 11. Os valores de pico da Tabela 11 são razoáveis em razão de terem sido verificados em medições feitas em outros dias.

Segundo a Tabela 10.3 da norma IEEE 519-1992 [19], para valores entre 50 e 100 da relação entre a corrente de circuito e a corrente de carga, a distorção harmônica de corrente admissível é de 12,0 %. Logo, para esse alimentador, a distorção harmônica de corrente está bastante acima do admissível. Na Figura 65, também pode ser verificado que a distorção harmônica de corrente no período de maior utilização das instalações elétricas prediais, entre 11:00 e 17:20h, ultrapassa 50% em diversos instantes de tempo.

Segundo a Tabela 11.1 da norma IEEE 519-1992 [19], verifica-se que a distorção harmônica de tensão observada nas medições apresentadas na Tabela 10 encontra-se no limiar dos padrões aceitáveis, pois para tensões menores ou iguais a 69kV, a distorção harmônica de tensão não deve ser superior a 5%. Na Figura 66 também pode ser verificado que a distorção harmônica de tensão no período de maior utilização das instalações elétricas prediais, entre 11:00 e 17:20h, em diversos instantes de tempo ultrapassa 5%.

Na Figura 67 observa-se que o fator de potência da fundamental cai abaixo de 0,67 indutivo em diversos instantes.

A análise das Figura 64 revela que há um ligeiro desbalanceamento de tensão.

Em termos qualitativos, essa carga apresenta distorções harmônicas significativas, além de fator de potência da fundamental abaixo do mínimo estabelecido pela legislação brasileira, na maior parte do tempo, devido ao fato de os motores partirem e desacelerarem a todo instante.

Filtros ativos individuais para cada alimentador seriam ideais para corrigir simultaneamente todos os problemas apresentados, mas filtros passivos podem ser também ser utilizados. Os principais harmônicos de corrente encontrados são o 3º, 5º, 7º e 11º. Na tensão, destacam-se o 3º e 5º harmônicos.

## Capítulo 4

### Simulações e implementação de soluções

Para cada transformador das subestações 1 e 2 e suas cargas equivalentes, vistas pelos respectivos secundários, foram montados modelos elétricos simples com indutores, resistores, capacitores e fontes de corrente ideais, representando as cargas prediais no período de maior utilização, em instantes específicos. Esses modelos foram simulados no PSCAD EMTDC™ [22] de forma a reproduzir as medições e mostrar as formas de onda instantâneas obtidas a partir dos valores observados.

As simulações da subestação 1 foram feitas , considerando os disjuntores TIE abertos (vide Figura 1 do Capítulo 2).

Foram incluídas apenas as simulações dos casos relevantes sob o ponto de vista de correção de problemas de qualidade de energia, levantados no Capítulo 3. As simulações incluídas são as seguintes: transformadores 1 e 2 da subestação 1 com os disjuntores TIE abertos; transformador 2 da subestação 2 e do acionamento eletrônico com controle escalar de velocidade em motor de indução trifásico.

Os valores medidos e os horários nos quais foram coletados serão mencionados em cada seção deste capítulo para observação do leitor.

Esses valores embasaram as simulações e correspondem a amostras em que todas as grandezas (tensão, corrente, distorções harmônicas de tensão, distorções harmônicas de corrente, fator de potência da fundamental, espectro harmônico de tensão e espectro harmônico de corrente) foram registradas pelos analisadores de campo ou de painel utilizados.

Os espectros harmônicos de tensão e de corrente não são registrados em todas as amostragens, mas somente em algumas. Oscilografias, ou registros gráficos de formas de onda, são registrados em algumas medições, quando ocorrem altas derivadas nas formas de onda de tensão ou de corrente, transientes e em caso de subtensões ou sobretensões, quando não se encontram em faixa de valores pré-definidos na parametrização do instrumento. A quantidade de oscilografias armazenadas depende da memória de massa disponível para uma dada medição.

Para a carga mais crítica, o acionamento eletrônico com controle escalar de velocidade em motor de indução trifásico para elevadores de passageiros, foi elaborado um modelo mais detalhado. Esse modelo detalhou cada componente normalmente presente em um acionamento (*drive*) real: retificador, inversor, motor e funcionamento e implementação do controle de velocidade. Como não foram disponibilizados dados técnicos precisos do acionamento (*drive*) real pelo fabricante do mesmo, a simulação foi realizada em nível sistêmico e ajustada de forma a ser coerente com dados de placa do motor e com as medições realizadas. As medições do drive registraram oscilografias, das quais uma foi reproduzida nas simulações.

As fontes de corrente harmônicas utilizadas nos modelos são montadas utilizando fontes de corrente simples da biblioteca básica do simulador PSCAD-EMTDC™ [22] (Figura 92). Essas fontes de corrente harmônica assim montadas aparecem nas Figuras 97,101 e 106 a seguir e utilizando os valores das tabelas de cada seção.

Após cada modelo simulado, foi mostrado o efeito da aplicação de filtros ativos de potência que operam segundo a teoria das potências instantâneas [23] [24][25][26].

A aplicação de filtragem ativa ou passiva revela-se desnecessária sobre o ponto de vista econômico para os casos dos transformadores 1 e 2 da subestação 1 com os disjuntores TIE abertos e para o transformador 2 da subestação 2, bastando tão somente implantar bancos de capacitores, em vistas de a distorção harmônica total de tensão não exceder 3%. Todavia, considerando a tendência de queda no custo de semicondutores e a economia de escala de custo de fabricação, decorrente do aumento do uso de filtros ativos pelo mercado, a aplicação de filtros ativos para esses casos pode se tornar viável em futuro próximo.

A correção da distorção harmônica da corrente na entrada dos drives VVVF de elevadores, bem como a correção do fator de potência, devem ser feitos em tempo real, devido aos tempos da ordem de milissegundos envolvidos nas partidas e frenagens dos motores. Filtros compostos de reatores e bancos de capacitores automáticos com contadores podem não responder adequadamente. Bancos de capacitores fixos podem injetar potência reativa além do necessário para corrigir o fator de potência da fundamental. Filtros ativos, ou, filtros passivos contendo bancos de capacitores automáticos, comandados por chaves estáticas, são o ideal para eliminar harmônicos e corrigir o fator de potência nos alimentadores de drives de elevadores.



## 4.1 Considerações sobre a utilização de filtros passivos em sistemas elétricos de potência

O dimensionamento de um filtro passivo é definido pela potência reativa que o mesmo fornecerá na frequência fundamental, sendo o número de estágios do filtro determinado pela potência reativa das fontes harmônicas e quanto desse total pode ser fornecido pela fonte. [27] [28]

Um critério razoável para projeto é buscar a redução da distorção harmônica total de tensão para valores aceitáveis definidos por norma, como a IEEE 519-1992 [19]. [27]

O projeto de filtros buscando a redução da distorção harmônica total de tensão envolve os seguintes passos, segundo os autores TAVARES *et al.* [27]: primeiro, o cálculo das tensões harmônicas considerando o espectro da corrente harmônica produzida pelas cargas não lineares injetado em um circuito constituído pelos filtros em paralelo com o sistema de potência AC (Figura 68); segundo, usar o resultado obtido no primeiro passo para calcular a distorção harmônica total de tensão e outros parâmetros de interesse como o fator de interferência telefônica (TIF) [19]; terceiro, considerar variações nos valores dos elementos do filtro (capacitores, indutores e resistores) decorrentes de envelhecimento para assim determinar valores nominais e perdas.

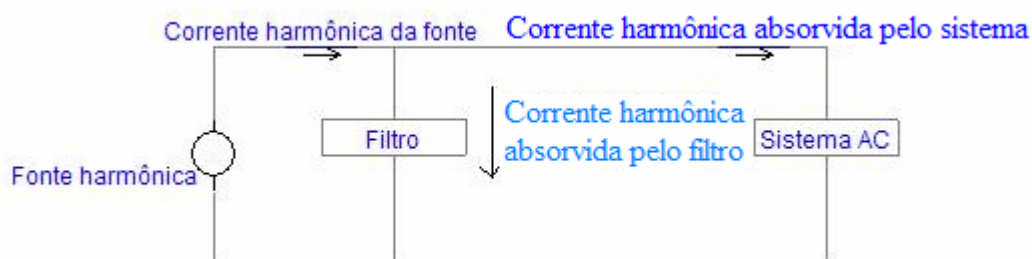


Figura 68: Circuito para cálculo da distorção harmônica de tensão [27]

Três componentes devem ser considerados no dimensionamento do filtro: a fonte de corrente ou tensão, a corrente absorvida pelo filtro e a admitância do sistema. [27]

Deve-se considerar que o conteúdo harmônico de corrente das cargas não lineares se altera em decorrência das variações da carga e, com relação a admitância do sistema, é preciso haver a preocupação de se calcular os valores mínimos da admitância

total para cada ordem harmônica, na qual resultará nos valores máximos de distorção de tensão. [27]

Todavia, nos casos em que existam grandes cargas não lineares na planta, os critérios acima mencionados poderão levar a uma solução inadequada e instabilidades harmônicas. O critério de dimensionamento tradicional supra mencionado ignora a interação que existe entre as cargas não lineares e o restante do sistema de potência, visto que tais interações afetam a injeção de correntes harmônicas, bem como a impedância harmônica de todo o sistema de potência (que deve incluir a contribuição efetiva das cargas não lineares). Nesses casos, uma solução iterativa é a mais adequada; sendo, para esse fim utilizados softwares que utilizem modelos de equações diferenciais. [27]

A análise da introdução de filtros passivos em sistemas como o estudado neste trabalho, para o efeito de um projeto adequado, deve ser, pelos motivos acima mencionados, feita com o auxílio de ferramentas computacionais conforme já mencionado. Entre essas ferramentas, os softwares de simulação de sistemas de potência, a exemplo do ETAP™ [29], revelam-se satisfatórios.

O estudo do impacto da utilização de filtros passivos em um sistema elétrico deve, pelos motivos supracitados, considerar o sistema elétrico como um todo. O projeto de filtros passivos é facilitado se as cargas não lineares são do tipo identificadas [23], com um espectro bem conhecido e característico, o que tipicamente ocorre em plantas industriais. No caso de um complexo predial comercial, objeto do presente trabalho, a maior parte das cargas não lineares são do tipo não identificadas [23].

Outro fator que dificulta o projeto de filtros passivos no sistema elétrico em análise é a predominância de cargas monofásicas, típicas de instalações comerciais e residenciais.

A falta de conhecimento do comportamento de todas as cargas, em todos os pontos do sistema elétrico predial comercial, bem como a ausência de dados técnicos importantes como, por exemplo, impedâncias de barramentos, cabos, transformadores e fator de utilização das cargas, agravadas pela falta de documentação das instalações (prontuário, diagramas unifilares) e pela dificuldade de levantar em campo dados para a adequada modelagem, dificulta a análise de soluções utilizando filtros passivos.

É válido ressaltar que a inserção de filtros passivos não possui um efeito local sobre as cargas não lineares, mas sobre todo o sistema. Ademais, a presença de correntes com distorção harmônica em determinado ponto da instalação, faz com que

outros pontos também apresentem distorção harmônica de corrente. Nessa interação entre as cargas não lineares, filtros passivos e o sistema de potência, a propagação harmônica pode acarretar ressonâncias indesejadas, além de efeitos térmicos sobre os componentes da rede elétrica. [30]

Dada a complexidade acima descrita e na ausência de dados detalhados sobre as cargas não lineares e parâmetros elétricos de todo o sistema elétrico em análise, não foram realizadas simulações aplicando filtros passivos às cargas em que se verificaram problemas de qualidade de energia, mas tão somente um dimensionamento aproximado de filtros passivos ou bancos de capacitores, baseados apenas em valores de pico da carga e espectros harmônicos verificados por medições, sob o critério supramencionado [27].

No dimensionamento foi escolhido o fator de potência 0,95 para a fundamental de forma a embutir um fator de incerteza sobre as cargas e medições, uma previsão de aumento de carga na instalação e uma aproximação para valor superior decorrente da diferença entre valores de capacitores calculados e valores comerciais ofertados pelos fabricantes.

O citado dimensionamento foi feito para subsidiar uma análise econômica estimativa da solução de problemas de qualidade de energia nas instalações estudadas, por filtros passivos ou bancos de capacitores.

## **4.2 Dimensionamentos aproximados de bancos de capacitores e filtros passivos para as cargas críticas**

### **4.2.1 Transformador 1 da subestação 1 com disjuntores TIE abertos**

Para o transformador 1 da subestação 1, com os disjuntores TIE abertos, considerando o pico registrado as 05:21:00,04h do dia 24/03/2009, onde foram obtidos, simultaneamente, picos de corrente e de potência reativa indutiva, os seguintes valores foram registrados:

**Tabela 12: Registro obtido as 05:51:00,04 h do dia 24/03/2009.**

Fases	Tensão RMS (V)	Corrente RMS (A)	Potência ativa(kW)	Potência reativa(kvar)	Potência aparente (kVA)	Distorção Harmônica de Tensão (%)	Distorção Harmônica de Corrente (%)	Fator de potência da fundamental
Fase A	120,189	1580,000	166,391	92,958	190,597	1,37	2,75	0,872
Fase B	122,349	1670,000	182,914	91,164	204,373	1,33	2,83	0,895
Fase C	120,819	1560,000	171,770	77,759	188,551	1,59	2,68	0,911

Sabendo-se que as distorções harmônicas de corrente para a carga desse transformador são tipicamente inferiores a 5%, de acordo com a Figura 6, e que as distorções harmônicas de tensão são tipicamente inferiores a 3%, de acordo com a Figura 6, não há necessidade de se aplicar filtragem para as harmônicas de corrente. Outro fato que corrobora para a não necessidade de filtragem é o fato de as harmônicas de corrente mais significativas (terceira e quinta) não excederem 5% da fundamental.

O cálculo da potência capacitiva de compensação é dado por [27]:

$$Q_{capacitor} = P_{ativa} (\tan(\arccos(\phi_1)) - \tan(\arccos(\phi_2))) \quad (4.2.1.1)$$

sendo  $\cos(\phi_1)$  o fator de potência medido e  $\cos(\phi_2)$  o fator de potência desejado.

Considerando-se uma correção de fator de potência para 0,95, a potência reativa capacitiva a ser fornecida às cargas desse transformador é de aproximadamente 91,2 kvar.

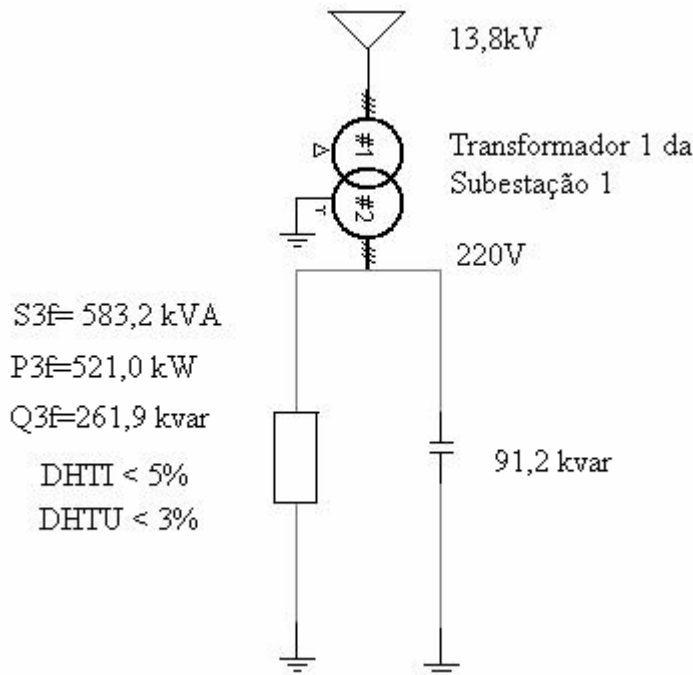


Figura 69: Banco de capacitores aplicado as cargas do transformador 1 da subestação 1.

## 4.2.2 Transformador 2 da subestação 1 com disjuntores TIE abertos

Para o transformador 2 da subestação 1, com os disjuntores TIE abertos, considerando o pico registrado as 11:36:00,03h do dia 24/03/2009, onde foram obtidos, simultaneamente, picos de corrente e de potência reativa indutiva, os seguintes valores foram registrados:

**Tabela 13: Registro obtido as 05:51:00,04 h do dia 24/03/2009.**

Fases	Tensão RMS (V)	Corrente RMS (A)	Potência ativa(kW)	Potência reativa(kvar)	Potência aparente (kVA)	Distorção Harmônica de Tensão (%)	Distorção Harmônica de Corrente (%)	Fator de potência da fundamental
Fase A	123,569	637,200	70,943	34,158	78,738	3,47	8,66	0,901
Fase B	124,790	628,790	67,403	40,173	78,467	3,22	12,14	0,858
Fase C	124,140	651,600	69,565	41,277	80,889	3,56	9,4	0,859

De acordo com a Figura 12 e a Tabela 13, as distorções harmônicas de corrente para as cargas desse transformador são normalmente inferiores a 12%, para as fases A e C e, em alguns instantes, como o acima retratado pela Tabela 13, ligeiramente superiores a 12% para a fase B. A distorção harmônica de corrente para a fase B está no limiar do valor máximo recomendado, de acordo com o estabelecido na Tabela 10.3 da norma IEEE 519-1992 [19], considerando que a corrente de curto-circuito no secundário do transformador 2 com os disjuntores TIE abertos é de aproximadamente 40 kA.

A distorção harmônica de tensão é sempre inferior a 5% nas três fases e em nenhum instante excede as vizinhanças de 3%, conforme a Figura 13 e a Tabela 13.

Considerando que a carga máxima sobre esse transformador é ligeiramente inferior a 25% do valor nominal e que as distorções harmônicas totais de tensão são inferiores a 4%, não há necessidade de se aplicar filtragem de harmônicos de corrente para as cargas desse transformador, mas tão somente de aplicar banco de capacitores para correção do fator de potência da fundamental.

Aplicando a equação (4.2.1.1) para uma correção do fator de potência ao valor de 0,95 indutivo, resulta que a potência reativa capacitiva a ser fornecida às cargas desse transformador é de aproximadamente 47,7 kvar.

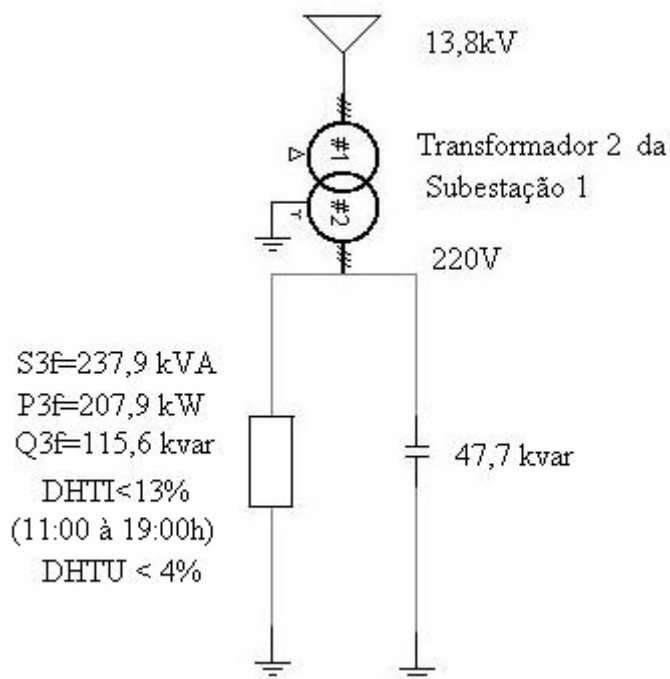


Figura 70: Banco de capacitores aplicado as cargas do transformador 2 da subestação 1.

### 4.2.3 Transformador 2 da subestação 2

Para o transformador 2 da subestação 2, considerando o pico registrado as 16:24:10,00h do dia 11/02/2009, onde foram obtidos, simultaneamente, picos de corrente e de potência reativa indutiva, os seguintes valores foram registrados:

Tabela 14: Registro obtido as 16:24:10,00 h do dia 11/02/2009.

Fase	Tensão RMS (V)	Corrente RMS (A)	Potência ativa(kW)	Potência reativa(kvar)	Potência aparente (kVA)	Distorção Harmônica de Tensão (%)	Distorção Harmônica de Corrente (%)	Fator de potência da fundamental
Fase A	262,029	303,600	62,846	48,774	79,552	1,940	3,080	0,790
Fase B	263,420	311,690	63,141	52,487	82,108	1,610	2,500	0,769
Fase C	263,120	315,600	65,768	50,698	83,04	2,040	2,970	0,792

As distorções harmônicas de corrente para as cargas desse transformador são inferiores a 4%, de acordo com a Figura 60.

A distorção harmônica de tensão é sempre inferior a 3% nas três fases, conforme Figura 61.

Considerando que a carga máxima sobre esse transformador é ligeiramente inferior a 25% do valor nominal; que as distorções harmônicas totais de tensão são inferiores a 3%; que as distorções harmônicas totais de corrente são inferiores a 4%, não

há necessidade de se aplicar filtragem de harmônicos de corrente para as cargas desse transformador, mas tão somente de aplicar banco de capacitores para correção do fator de potência da fundamental.

Aplicando a equação (4.2.1.1) para uma correção do fator de potência ao valor de 0,95 indutivo, resulta que a potência reativa capacitiva a ser fornecida às cargas desse transformador é de aproximadamente 90 kvar.

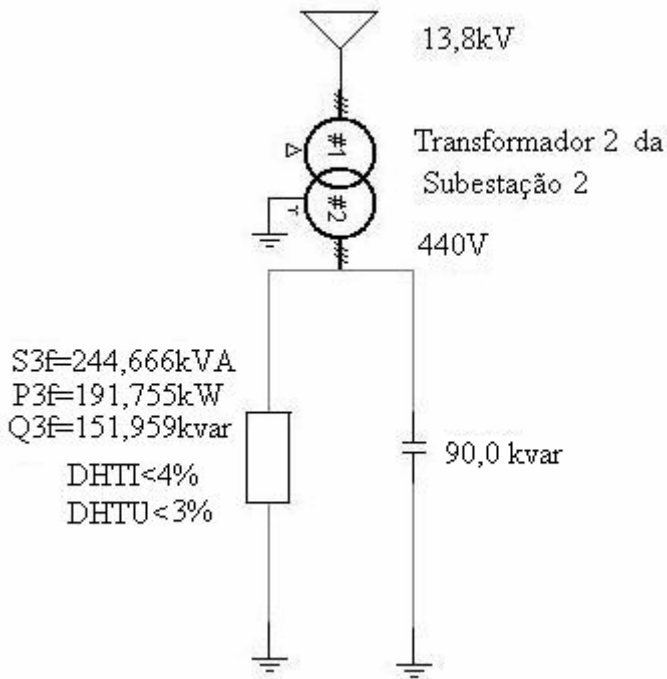


Figura 71: Banco de capacitores aplicado as cargas do transformador 2 da subestação 2.

#### 4.2.4 Acionamento eletrônico com controle escalar de velocidade em motor de indução trifásico

Um total de quatro elevadores possuindo acionamento eletrônico com controle escalar de velocidade em motor de indução trifásico (VVVF) é alimentado pelo transformador 2 da subestação 1 e um, pelo transformador 3 da subestação 1, conforme a descrição do sistema elétrico feita no Capítulo 2.

Os alimentadores desses acionamentos (*drives*) derivam do barramento blindado em cabos, sendo essa derivação feita no ponto terminal desse barramento (23º pavimento), segundo já citado no Capítulo 2.

Os retificadores desses acionamentos (*drives*) apresentaram um perfil de corrente, segundo oscilografias verificadas em medições, compatíveis com retificadores trifásicos a diodo de seis pulsos.

Para o elevador 3 da casa de máquinas do prédio anexo II, cujo alimentador provém do barramento blindado do transformador 2 da subestação 1, considerando o pico registrado as 15:07:34h do dia 18/02/2009, foram obtidos os seguintes valores:

**Tabela 15: Registro obtido as 15:07:34,00 h do dia 11/02/2009.**

Fase	Tensão RMS (V)	Corrente RMS (A)	Potência ativa(kW)	Potência reativa(kvar)	Potência aparente (kVA)	Distorção Harmônica de Tensão (%)	Distorção Harmônica de Corrente (%)	Fator de potência da fundamental
Fase A	123,640	203,400	20873,152	14026,843	25148,376	3,759	60,479	0,829
Fase B	123,950	190,500	19645,579	13099,625	23612,475	3,810	64,959	0,831
Fase C	120,890	180,900	17954,449	12485,629	21869,001	4,849	65,739	0,820

Para um retificador de seis pulsos como nesse acionamento, a IEEE 519-1981 (atualmente IEEE 519-1992) [19] considera como valores típicos de harmônicas de corrente geradas, um valor de 17,5% para a quinta harmônica, um valor de 11% para a sétima, um valor de 4,5% para a décima-primeira.[27]

Através da equação (4.2.1.1), considerando uma correção do fator de potência ao valor de 0,95 indutivo, resulta que a potência reativa capacitiva a ser fornecida a esse drive é de aproximadamente 20,5 kvar. Essa potência será fornecida ao acionamento na fundamental para uma configuração de filtro passivo que pode ser composta por dois filtros sintonizados, respectivamente, para a quinta e sétima harmônicas e um passa altas sintonizado na décima-primeira harmônica. [28]



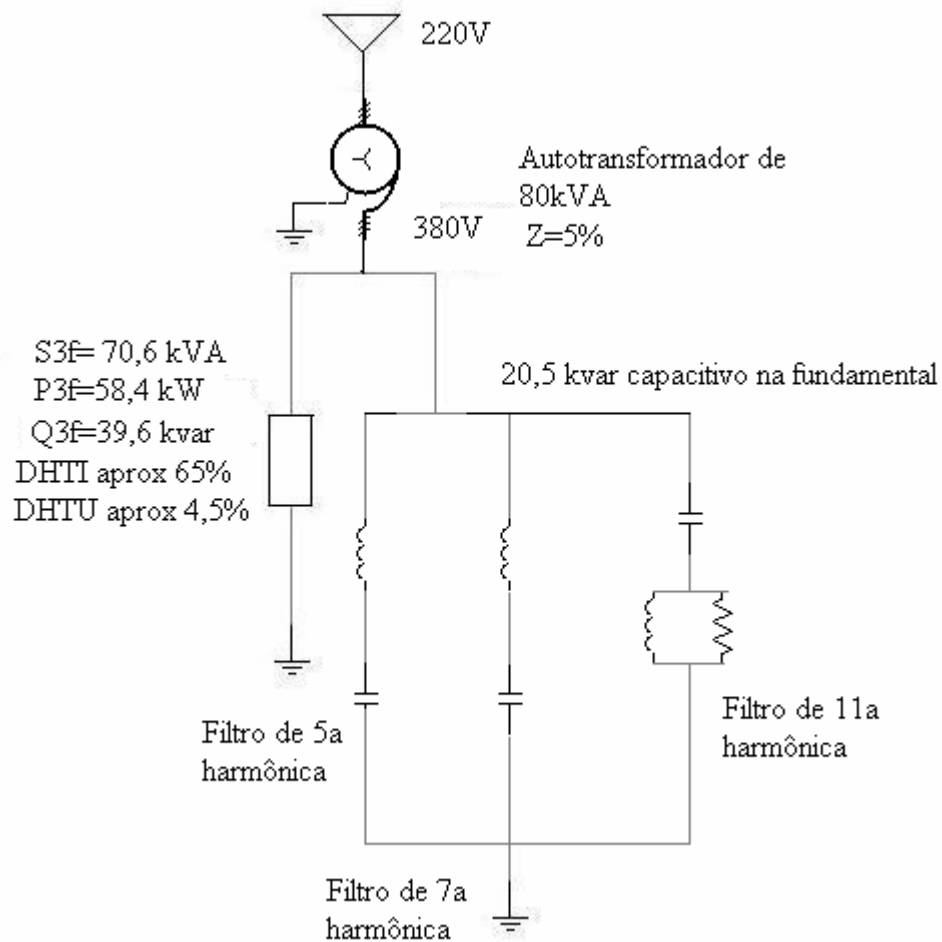


Figura 72: Filtro passivo aplicado ao acionamento eletrônico com controle de velocidade escalar (VVVF) de elevador com motor de indução trifásico.

De acordo com os autores D'ÁVILA FILHO et al [28], para a configuração de filtro da Figura 72, os capacitores, indutores e o resistor podem ser calculados pelas seguintes equações:

$$C = \frac{\frac{k \text{ var}}{3} * \left(\frac{1,25V}{V}\right)^2 * 0,001}{2\pi f x (1,25V)^2} \quad (4.2.4.1)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi f * 0,95 * h)^2 * C}, \text{ sendo } h \text{ a ordem harmônica a ser filtrada.} \quad (4.2.4.2)$$

$$R = Q * \sqrt{\frac{L}{C}}, \text{ com } 0,5 < Q < 2, \text{ valores típicos para } Q. \quad (4.2.4.3)$$

### 4.3 Implementação do filtro ativo em simulações utilizando o PSCAD-EMTDC™

Um projeto ou aplicação real de filtro ativo para atender a casos levantados no Capítulo anterior, como as cargas dos transformadores 1 e 2 da subestação 1 com os disjuntores TIE abertos e as cargas do transformador 2 da subestação 2, demanda a aplicação de um filtro ativo a quatro condutores, de forma a compensar a corrente de neutro, visto que há uma predominância de cargas monofásicas na instalação, que produzem componentes de seqüência zero.

No outro caso levantado no Capítulo 3, o da carga constituída pelo acionamento eletrônico com controle escalar de velocidade em motor de indução trifásico, um filtro ativo a três condutores revela-se adequado por ser esta uma carga trifásica e balanceada e devido a essa carga ser alimentada pelas três fases, sem ser fornecido o neutro, conforme já mencionado no último parágrafo do texto introdutório do Capítulo anterior.

Segundo AKAGI *et al* [23], o projeto de controladores de filtro ativo é particularmente difícil se o filtro ativo paralelo (*shunt*) for aplicado em sistemas de potência em que a tensão do alimentador já está distorcida ou desbalanceada.

As equações gerais da Teoria das Potências Instantâneas mostram que é impossível compensar a corrente de carga e forçar a corrente compensada a satisfazer, simultaneamente, as três características de compensação ótimas, se a rede elétrica contém harmônicas de tensão ou desbalanceamento na freqüência fundamental, que são: obtenção de potência ativa instantânea constante no alimentador; obtenção de corrente senoidal no alimentador e obtenção de mínimo valor RMS da corrente do alimentador que transporta a mesma energia para a carga com perdas mínimas ao longo da linha de transmissão. [23]

Sob a condição de tensões trifásicas senoidais e balanceadas é possível satisfazer as três características ótimas de compensação enumeradas no parágrafo anterior. [23]

Todavia, em um sistema com tensões não senoidais e desbalanceadas, o filtro ativo paralelo (*shunt*) pode compensar correntes de carga para garantir apenas uma característica ótima de compensação. Desta forma, uma escolha deve ser feita antes de projetar o controlador do filtro ativo paralelo (*shunt*), entre as seguintes estratégias de controle: estratégia de controle de potência instantânea constante, estratégia de controle de corrente senoidal e estratégia de controle generalizada de Fryze. [23]

Sob a condição de um sistema trifásico com tensão senoidal e balanceada, as três estratégias de controle produzem o mesmo resultado. Todavia, com tensões não senoidais e desbalanceadas, cada estratégia de controle citada no parágrafo anterior garantirá a sua respectiva característica de compensação, resultando em correntes compensadas diferentes na fonte, conforme a estratégia adotada. [23]

Neste trabalho, com o intuito de simplificar as simulações no PSCAD-EMTDC™ [22], foi utilizada uma implementação de filtro ativo a três condutores com a estratégia de controle de potência instantânea constante. A execução dessa estratégia de controle é mais simples que a estratégia de controle de corrente senoidal, (vide trabalho de AKAGI *et al* [23]), todavia, mais uma vez deve-se ressaltar, a estratégia de controle de potência instantânea constante não garante uma corrente senoidal no alimentador se as tensões que alimentam o sistema não forem senoidais e balanceadas.

Para os casos das cargas dos transformadores 1 e 2 da subestação 1 com os disjuntores TIE abertos e as cargas do transformador 2 da subestação 2, foram consideradas fontes de alimentação trifásicas balanceadas e senoidais. Considerou-se também uma carga balanceada para cada um. Por fim, foi também considerada a aplicação do filtro ativo diretamente sobre o secundário de cada transformador, antes de haver a separação entre os condutores neutro e terra, visto que o neutro é aterrado no secundário de cada transformador.

As considerações do parágrafo anterior, para as cargas dos transformadores 1 e 2 da subestação 1 com os disjuntores TIE abertos e as cargas do transformador 2 da subestação 2, são razoáveis se forem observadas as medições do Capítulo anterior. As Figuras 4,5,10,11, 58 e 59 mostram um desbalanceamento de tensões e correntes muito pequeno. Os valores de distorção harmônica de tensão também se revelaram baixos, de acordo com as Figuras 7,13 e 60. Dessa forma, é conveniente modelar as fontes de alimentação desses modelos simulados por fontes trifásicas, senoidais e equilibradas.

Para o caso do acionamento eletrônico com controle escalar de velocidade em motor de indução trifásico, em que o modelo consiste em um autotransformador elevador conectado a um retificador a diodo de seis pulsos e ligado a um inversor que alimenta um motor de indução trifásico, considerou-se uma fonte de alimentação na entrada de baixa do autotransformador com as características: senoidal, trifásica, balanceada e ideal. Tal modelagem conseguiu reproduzir com boa fidelidade as oscilografias de tensões e correntes mostradas na Figura 119 a seguir, apesar da

distorção harmônica na tensão observada na medição do capítulo anterior atingir valores em torno de 5%, de acordo com a Figura 66.

Segundo os autores AKAGI *et al* [23], a implementação de filtros ativos de potência paralelos (*shunt*) a três condutores pela estratégia de controle de potência instantânea constante segue a seguinte metodologia:

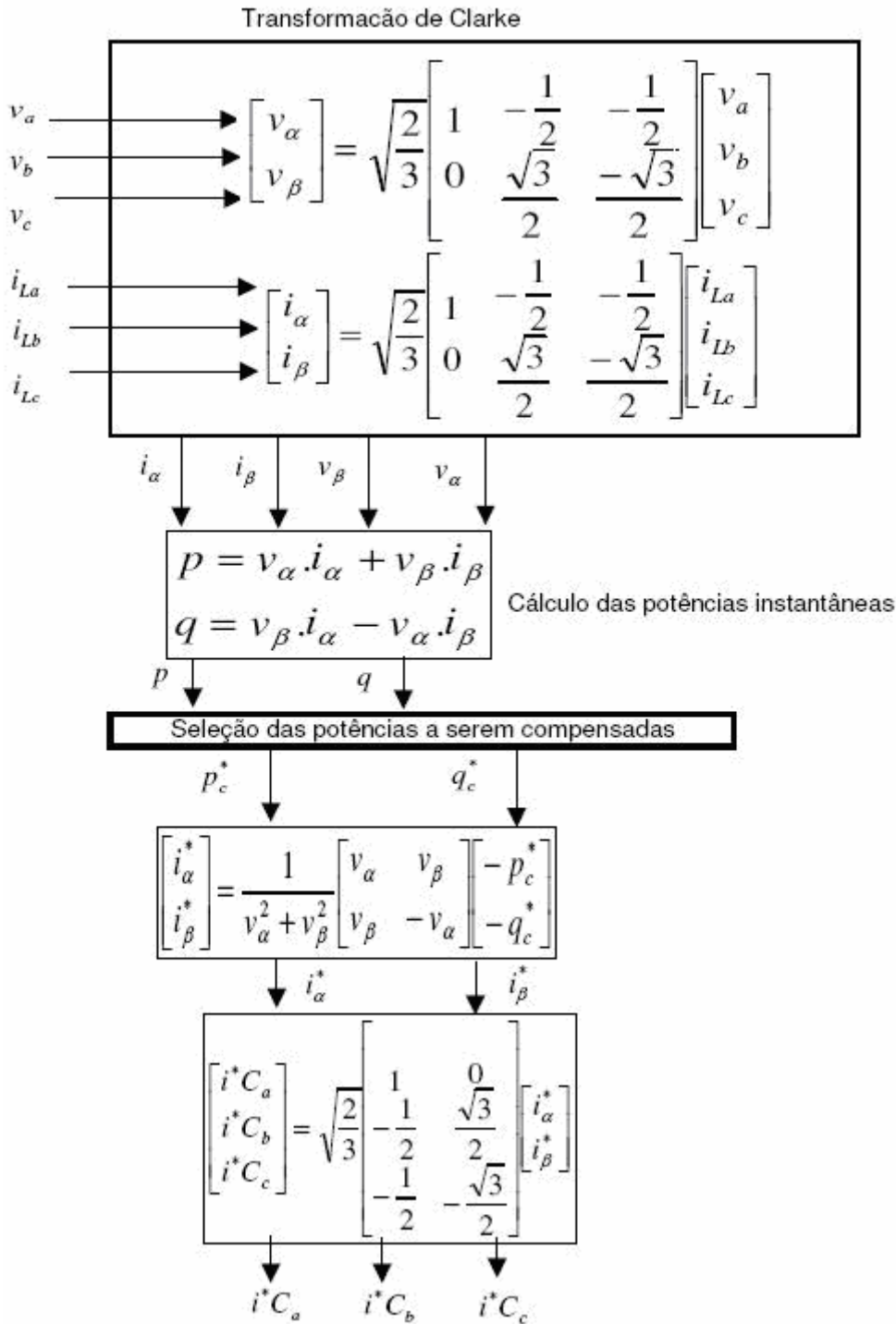


Figura 73: Filtro ativo de potência paralelo (*shunt*) a três condutores pela estratégia de controle de potência instantânea constante [23]

A etapa acima citada de seleção das potências a serem filtradas dá-se por filtragem nas componentes de  $p$  e  $q$  [23][24].

As potências  $p$  e  $q$  possuem valores constantes e uma superposição de componentes oscilantes, donde as parcelas constantes correspondem a valores médios [23] [24]. Essas potências podem ser então formuladas [23] [24]:

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \text{ (potência } p) \quad (4.3.1)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \text{ (potência } q), \quad (4.3.2)$$

onde as potências com índice barra são as parcelas constantes e as com índice til são as oscilantes.

A filtragem para obtenção das potências  $\bar{p}$  e  $\bar{q}$  é passa baixa e, para as demais ( $\tilde{p}$  e  $\tilde{q}$ ), passa alta [23] [24].

A rotina descrita na Figura 73 pode ser empregada em *DSP (Digital Signal Processors - Processadores Digitais de Sinais)*. Dessa maneira, o filtro ativo é um inversor que é chaveado de forma a produzir as correntes de compensação desejadas.

O modelo de filtro ativo feito no PSCAD-EMTDC™ [22] e empregado em todas as simulações a seguir é detalhado a seguir.

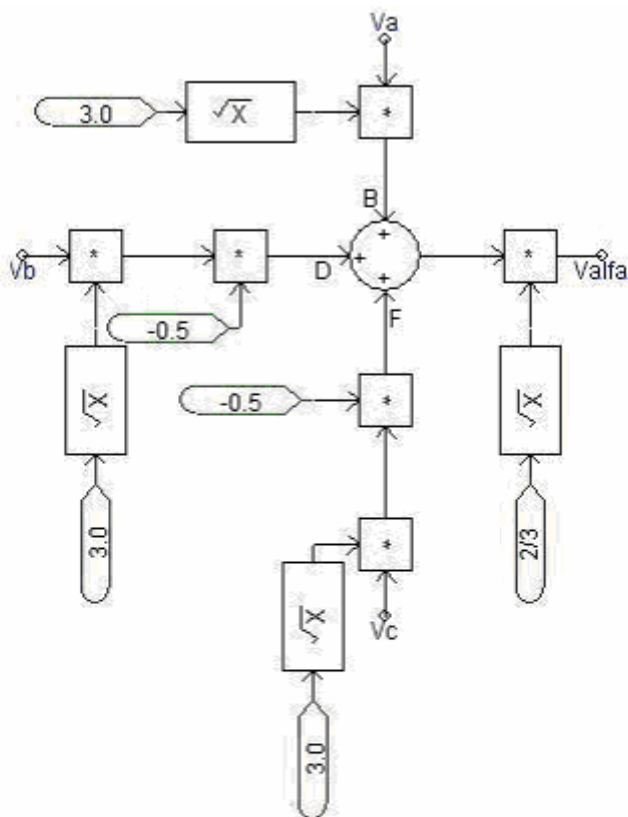
O ícone do filtro ativo é mostrado na figura abaixo.



Figura 74: Ícone do filtro ativo utilizado nas simulações.

As transformadas de Clarke [23], mostradas na Figura 73 acima, são implementadas no PSCAD-EMTDC™ [22] conforme as Figuras 75 a 78.

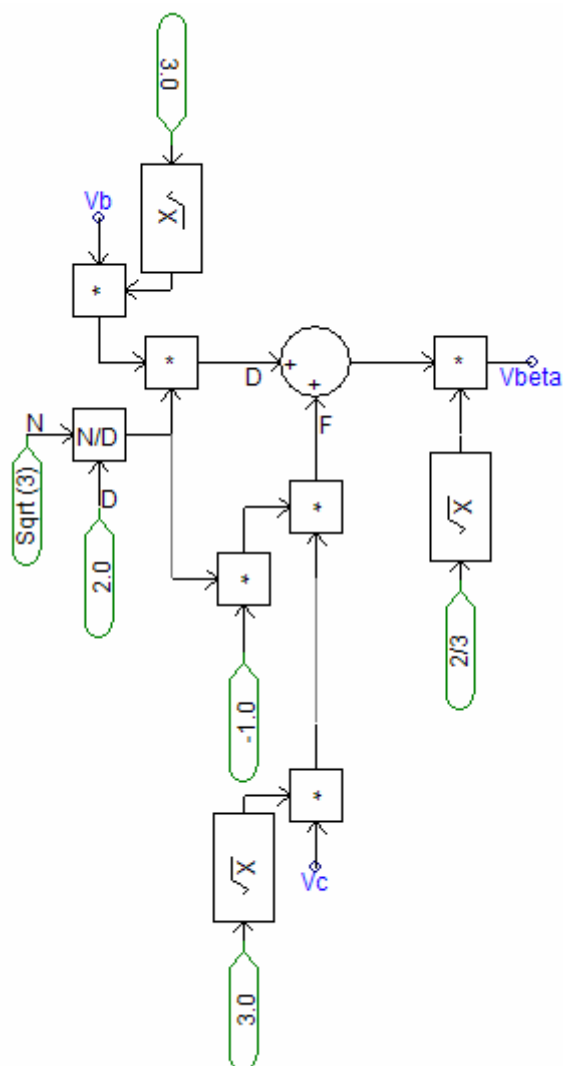
A Figura 75 abaixo mostra como é obtido o valor  $v_\alpha$  [23]:



$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

Figura 75: Operação matricial para obtenção de  $v_\alpha$ .

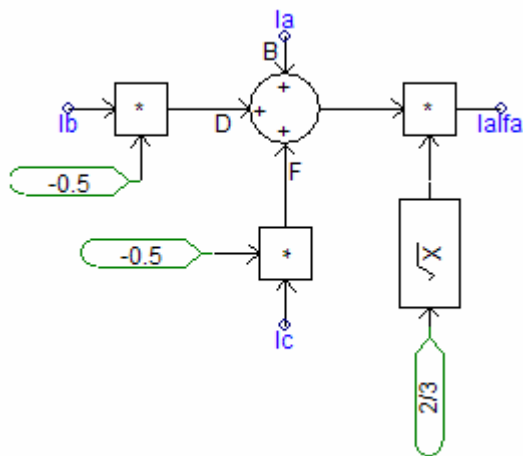
A Figura 76 abaixo mostra como é obtido o valor  $v_\beta$  [23]:



$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

Figura 76: Operação matricial para obtenção de  $v_\beta$ .

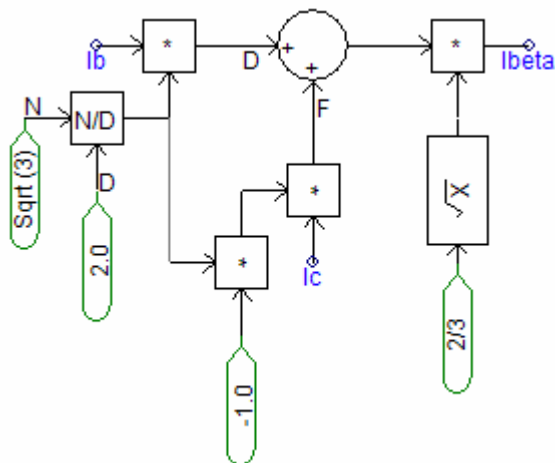
A Figura 77 abaixo mostra como é obtido o valor  $i_\alpha$  [23]:



$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix}$$

Figura 77: Operação matricial para obtenção de  $i_\alpha$  .

A Figura 78 abaixo mostra como é obtido o valor  $i_\beta$  [23]



$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix}$$

Figura 78: Operação matricial para obtenção de  $i_\beta$  .



No filtro ativo utilizado nas simulações, a filtragem nas potências instantâneas  $p$  e  $q$ , utilizada para a obtenção das correntes de compensação, destinou-se a eliminar a potência  $q$  e a parcela oscilante de  $p$  ( $\tilde{p}$ ), conforme Figura 79.

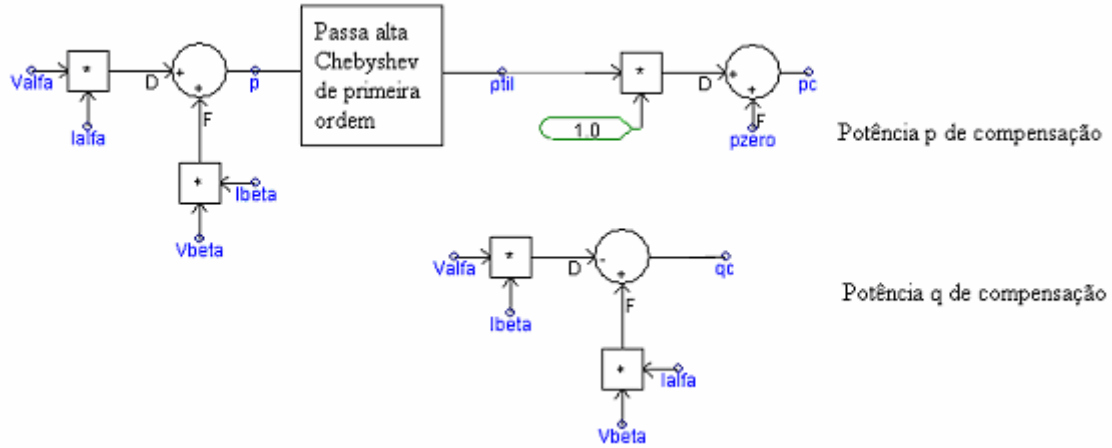


Figura 79: Filtragem da potência  $\tilde{p}$  e da potência  $q$ .

A Figura 80 mostra como foram calculadas as correntes de compensação a partir das potências de compensação  $p_c$  e  $q_c$  (figura 74). Trata-se de realizar a operação matricial mostrada em (4.3.3) [23]. A fase das correntes  $i_{ac}$  e  $i_{bc}$  é acrescida de  $180^\circ$  em etapa posterior (através do algoritmo de geração de pulsos de disparo das chaves estáticas), de forma que o somatório dessas correntes de compensação com as correntes da carga não linear resultarão uma corrente senoidal para a fonte.

$$\begin{bmatrix} i_{ac} \\ i_{bc} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_c \\ q_c \end{bmatrix} \quad (4.3.3)$$

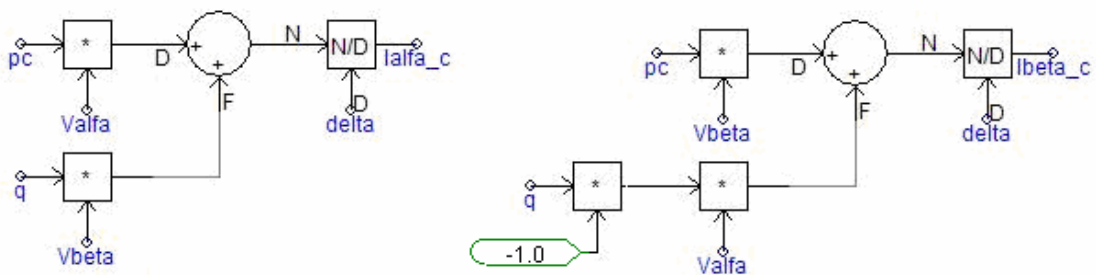


Figura 80: Cálculo das correntes de compensação no PSCAD EMTDC™. [22]

O valor de delta na Figura 80 é calculado conforme Figura 81 abaixo:

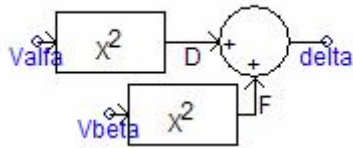


Figura 81: Cálculo de delta.

Para a obtenção das correntes de compensação nas coordenadas a,b e c foi necessário realizar a transformada de Clarke inversa descrita na equação matricial (4.3.4) [23] e mostrada na Figura 82.

$$\begin{bmatrix} i^*Ca \\ i^*Cb \\ i^*Cc \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i^*\alpha \\ i^*\beta \end{bmatrix} \quad (4.3.4)$$

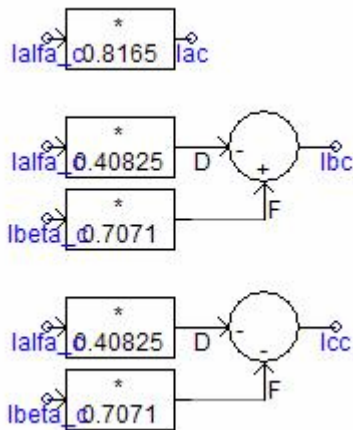


Figura 82: Cálculo das correntes de compensação nas coordenadas a,b e c no PSCAD EMTDC™.[22]

O algoritmo de disparo de pulsos para a ponte de IGBTs do inversor é detalhado nas Figuras 83 a 90. [25] [26]

Com as correntes de compensação calculadas conforme as Figuras 83 a 90 (correntes Iac, Ibc e Icc das Figuras 82 e 83 e as correntes medidas na saída do filtro (correntes Iaf, Ibf e Icf da Figura 83) é realizada uma conversão de coordenadas abc para dq. Essa conversão foi feita para tirar proveito da disponibilidade de um bloco de conversão de coordenadas existente na biblioteca de componentes do PSCAD-EMTDC™ [22] que transforma tensões ou correntes das coordenadas abc para dq0 e de

dq0 para abc, bastando selecionar a transformação desejada na janela de parametrização do bloco.

Com as correntes convertidas para o sistema dq0 é realizado um controle linear através de reguladores do tipo PI (proporcional – integral), de acordo com a Figura 84, para assegurar que as correntes de compensação geradas pelo filtro ativo (Iaf, Ibf e Icf) sejam as correntes de compensação calculadas por meio do algoritmo da Figura 73.

As funções de controle err\_ind e err\_inq, obtidas conforme a Figura 84, sofrem então conversão para as coordenadas abc, onde irão gerar os sinais de referência Refa, Refb e Refc (Figura 83), que serão comparados com a onda triangular vtria (Figura 88) no bloco de pulsos interpolados para disparo dos IGBTs (Figura 89).

Na Figura 83 abaixo, é mostrada a utilização dos blocos abc-dq do PSCAD EMTDC™ no algoritmo para geração dos sinais de referência para disparo dos IGBTs.

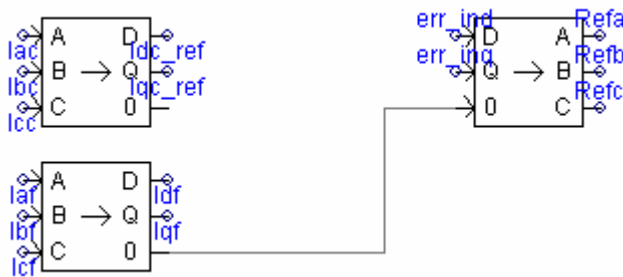


Figura 83: Blocos abc-dq para algoritmo de geração dos sinais de referência para disparo dos IGBTs.

Na Figura 84 abaixo é mostrada a geração das funções de err\_ind e err\_inq.

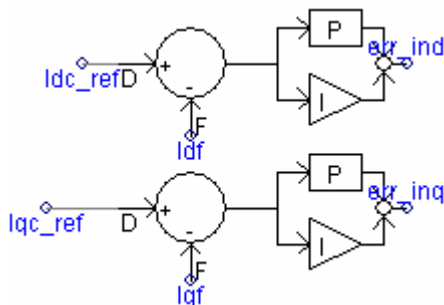


Figura 84: Reguladores PI para geração das funções de controle err\_ind e err\_inq.

Na Figura 85 abaixo mostrada a janela de parametrização dos blocos de reguladores PI (proporcional – integral) do PSCAD EMTDC™ utilizados na Figura 84.

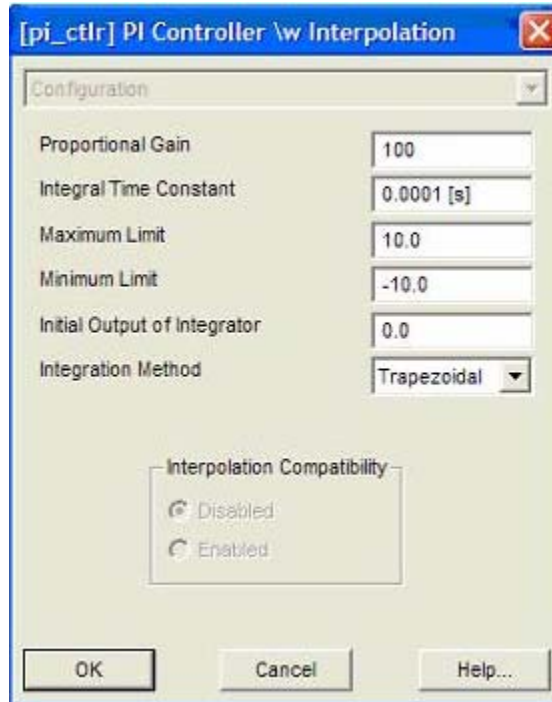


Figura 85: Parametrização de reguladores PI no PSCAD EMTDC™ .

Na Figura 86 abaixo é mostrado o bloco PLL (*Phase Locked Loop*) que é utilizado para gerar o ângulo omegate que será utilizado na transformação de coordenadas do referencial abc para o dq.

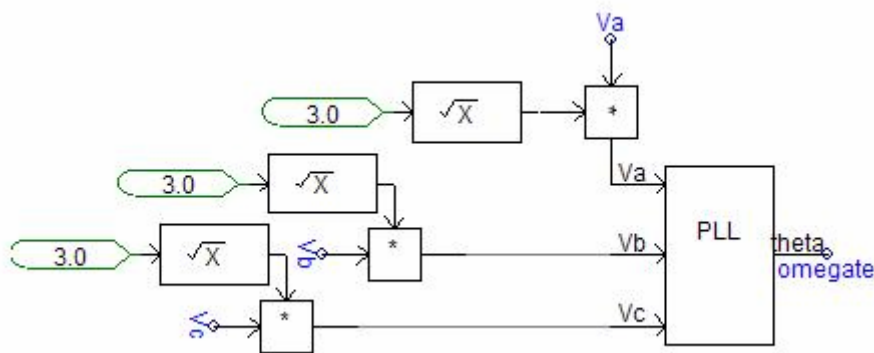


Figura 86: PLL utilizado para gerar o ângulo utilizado na transformação abc-dq.

Na Figura 87 abaixo é mostrada a janela de parametrização do bloco de conversão de coordenadas abc-dq do PSCAD EMTDC™ [22].



Figura 87: Parametrização do bloco abc-dq do PSCAD EMTDC™ [22].

Para a conversão dq0-abc é selecionada a primeira opção do campo “Direction of Transformation” da janela de parametrização mostrada na Figura 87 acima.

Na Figura 88 abaixo é mostrada a janela de parametrização e o ícone do gerador de onda triangular vtria, que será utilizado como sinal de comparação com os sinais Refa, Refb e Refc (Figura 83) para geração dos sinais de disparo (g1,g2,g3,g4,g5 e g6 – Figura 89) a serem aplicados aos terminais gate dos IGBTs da Figura 90.

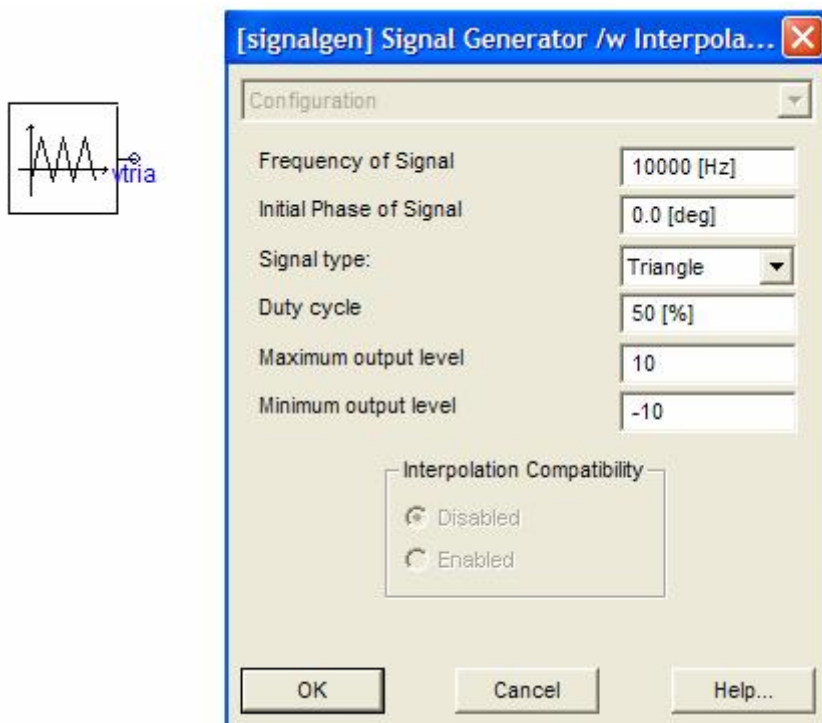


Figura 88: Ícone do gerador de onda triangular e respectiva configuração.

A Figura 89 abaixo é o bloco funcional do PSCAD EMTDC™ [22] que efetua a comparação da onda triangular com os sinais Refa, Refb e Refc (Figura 83) para geração dos sinais que serão aplicados aos terminais gate dos IGBTs da Figura 90 para disparo dos mesmos.

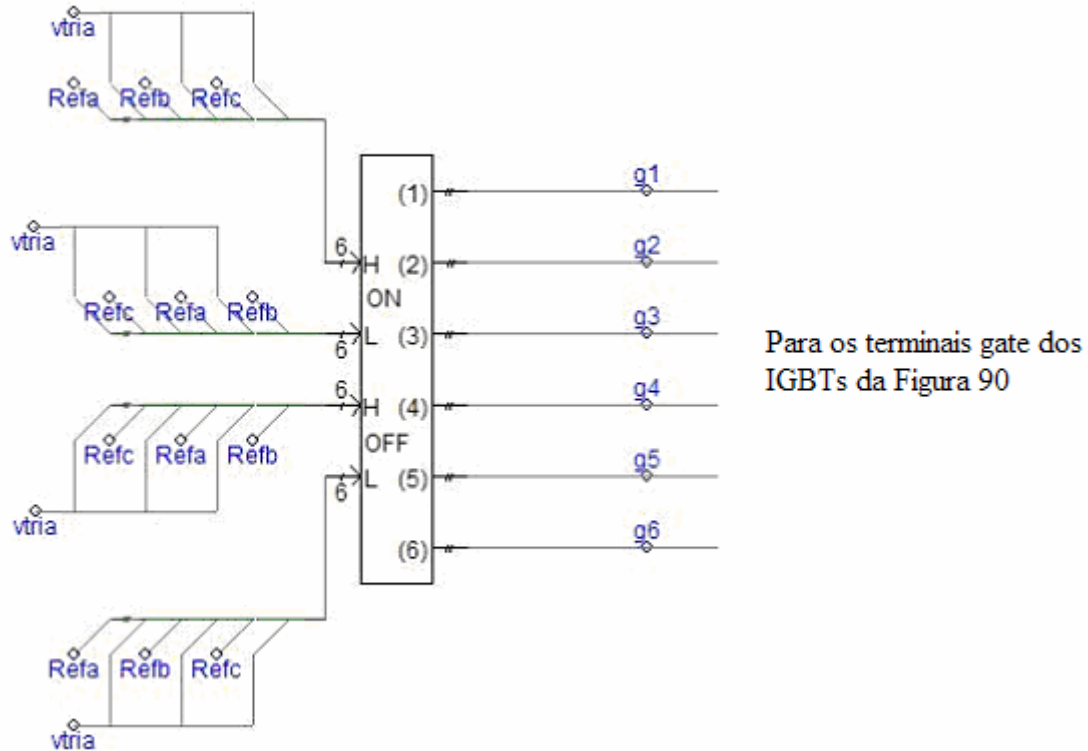


Figura 89: Bloco de pulsos interpolados do do PSCAD EMTDC™ [22].

A topologia do filtro ativo é um inversor com ponte de IGBTs que é mostrada na Figura 90.

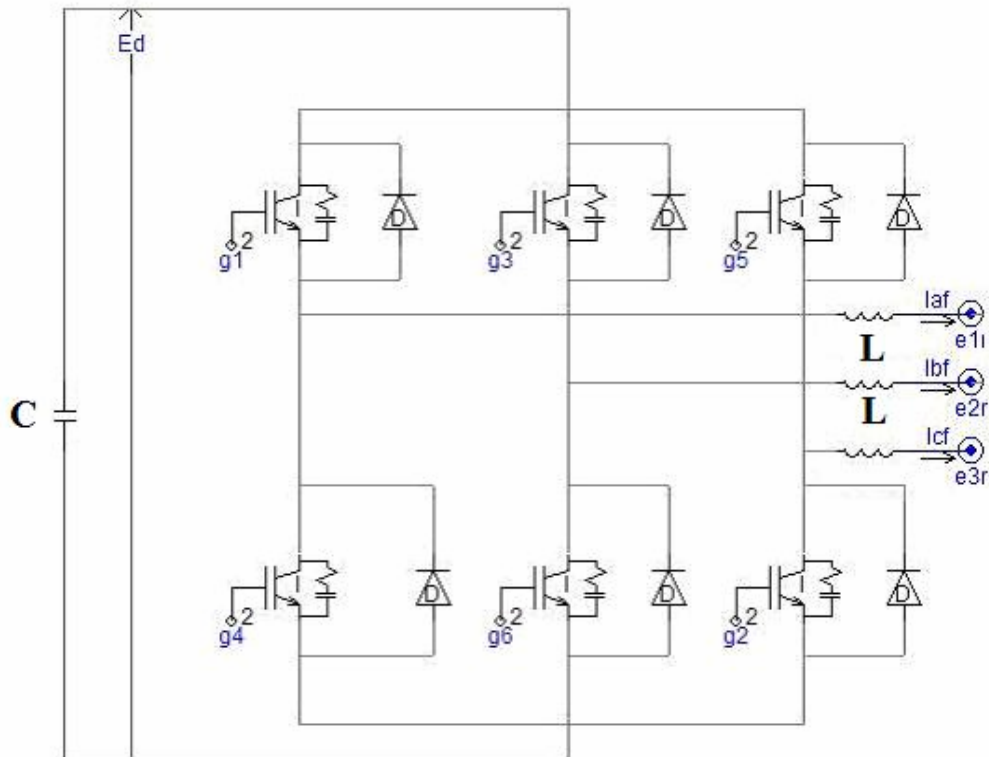


Figura 90: Topologia do filtro ativo: inversor a ponte de IGBTs

O capacitor da Figura 90 pode ser dimensionado em função da potência ativa oscilante média a ser absorvida pelo filtro ativo [23]. Uma equação para esse cálculo pode ser obtida igualando a equação da variação de energia no capacitor ao valor médio da energia ativa oscilante, que resulta:

$$C = \frac{\Delta E}{V_{d0}^2 \cdot \varepsilon} \quad (4.3.5)$$

sendo a equação (4.3.5) derivada das equações (4.3.6), (4.3.7), (4.3.8) e (4.3.9) abaixo:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{\left(\frac{\tau}{2}\right)} \int_0^{\frac{\tau}{2}} \tilde{p} dt \quad (4.3.6)$$

$$V_{d0} = \left( \frac{v_1 + v_2}{2} \right) \quad (4.3.7)$$

$$\Delta v = v_1 - v_2 \quad (4.3.8)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta v}{V_{d0}} \quad (4.3.9)$$

## 4.4 Simulação das cargas do transformador 1 da subestação 1 com solução por filtro ativo paralelo

Para essa simulação foi reproduzido o registro tabelado abaixo, obtido as 14:33:00,09 h do dia 24/03/2009, sendo as tensões e correntes em valores eficazes e os ângulos em graus.

**Tabela 16: Tensão na fase A do transformador 1 da subestação 1**

Fase A:

HARMÔNICO	TENSÃO RMS (V)	FASE
1	121,286	73,69°
3	1,465	150,51°
5	3,288	22,45°

DHTU A (distorção harmônica total de tensão na fase A) = 2,946% .

**Tabela 17: Corrente na fase A do transformador 1 da subestação 1**

HARMÔNICO	CORRENTE RMS (A)	FASE
1	1437,256	45,00°
3	35,646	256,68°
5	69,972	319,61°

DHTI A (distorção harmônica total de corrente na fase A) = 5,463%.

FP A (fator de potência da fundamental na fase A) = 0,877.

**Tabela 18: Tensão na fase B do transformador 1 da subestação 1**

Fase B:

HARMÔNICO	TENSÃO RMS (V)	FASE
1	123,200	191,51°
3	1,171	164,79°
5	2,876	254,88°

DHTU B (distorção harmônica total de tensão na fase B) = 2,521%.



**Tabela 19: Corrente na fase B do transformador 1 da subestação 1**

HARMÔNICO	CORRENTE RMS (A)	FASE
1	1459,524	166,200°
3	47,892	229,260°
5	60,600	197,880°
7	9,768	183,82°

DHTI B (distorção harmônica total de corrente na fase B) = 5,334%

FP B (fator de potência da fundamental na fase B) = 0,904

**Tabela 20: Tensão na fase C do transformador 1 da subestação 1**

Fase C:

HARMÔNICO	TENSÃO RMS (V)	FASE
1	121,887	312,01°
3	1,675	132,89°
5	3,171	143,08°

DHTU C (distorção harmônica total de tensão na fase C) = 2,942%

**Tabela 21: Corrente na fase C do transformador 1 da subestação 1**

HARMÔNICO	CORRENTE RMS (A)	FASE
1	1361,870	288,28°
3	41,245	259,58°
5	59,650	78,39°

DHTI C (distorção harmônica total de corrente na fase C) = 5,334%

FP C (fator de potência da fundamental na fase C) = 0,915

A Figura 91 abaixo é o diagrama de simulação do transformador 1 da subestação

1.

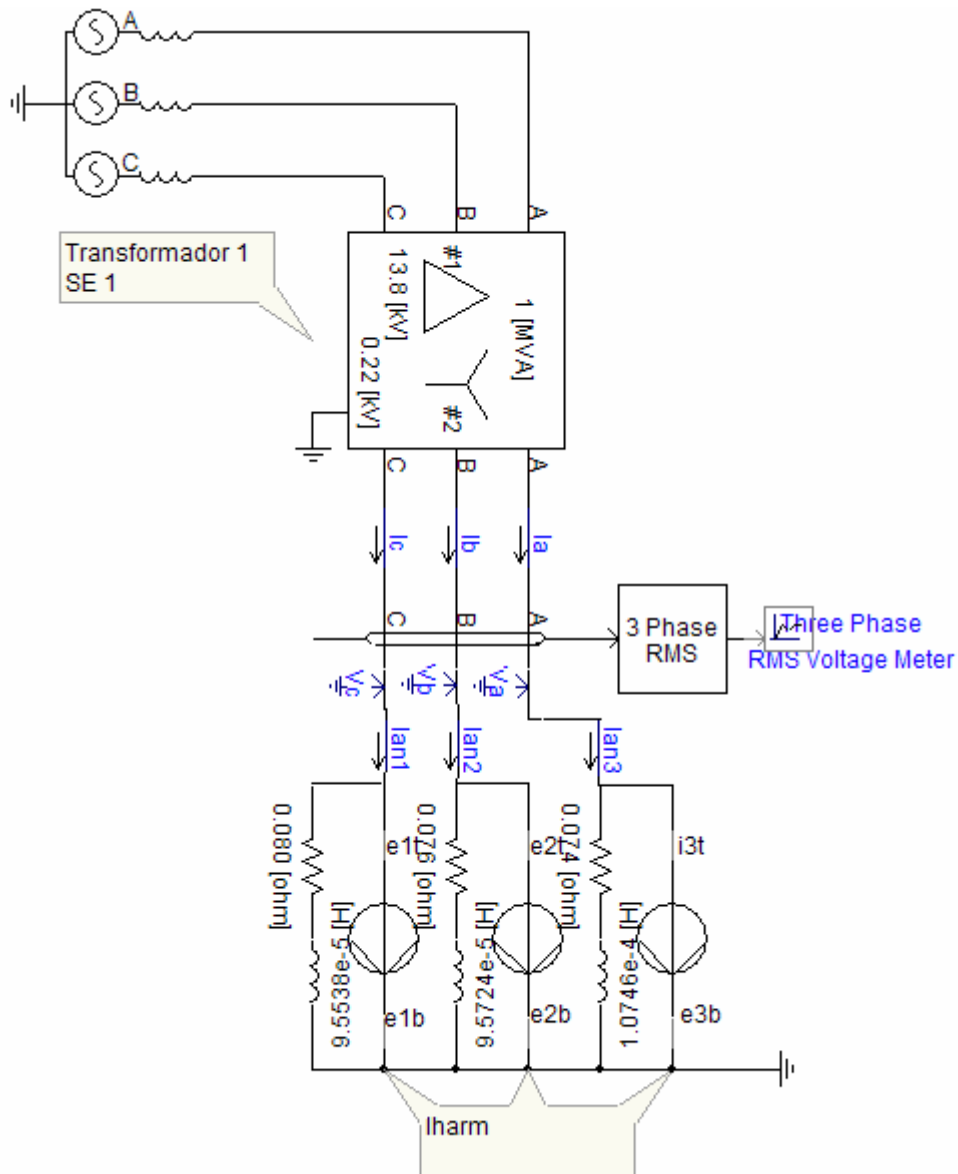


Figura 91: Diagrama de circuito da simulação do transformador 1 da subestação 1.

A Figura 92 abaixo detalha a fonte de corrente harmônica utilizada na fase A da Figura 91.

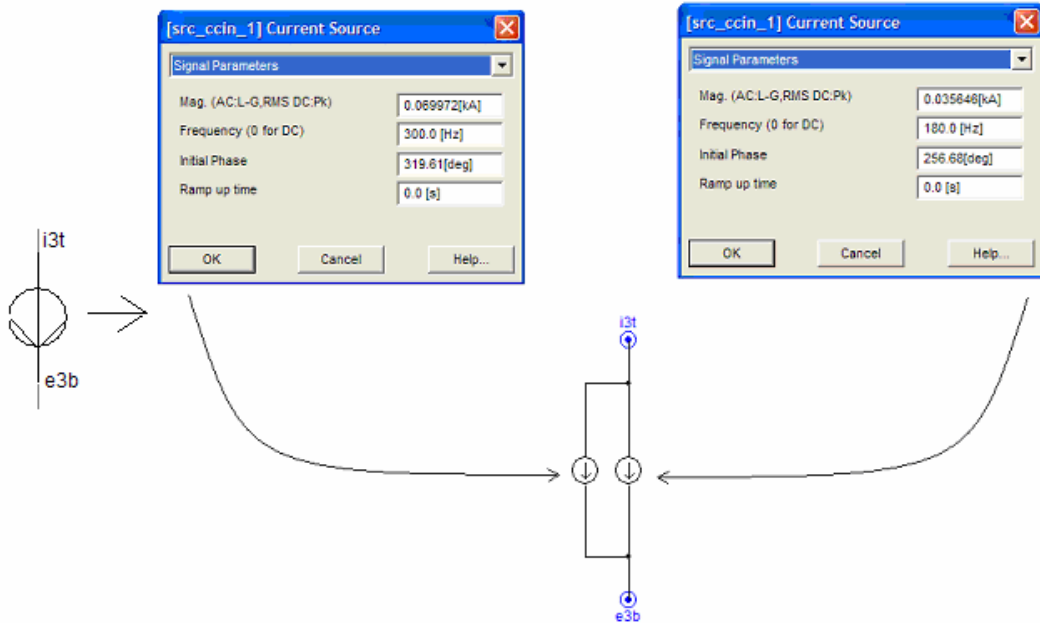


Figura 92: Detalhamento da fonte de corrente harmônica da fase A.

A Figura 93 abaixo mostra as formas de onda de tensão e corrente obtidas na fase A.

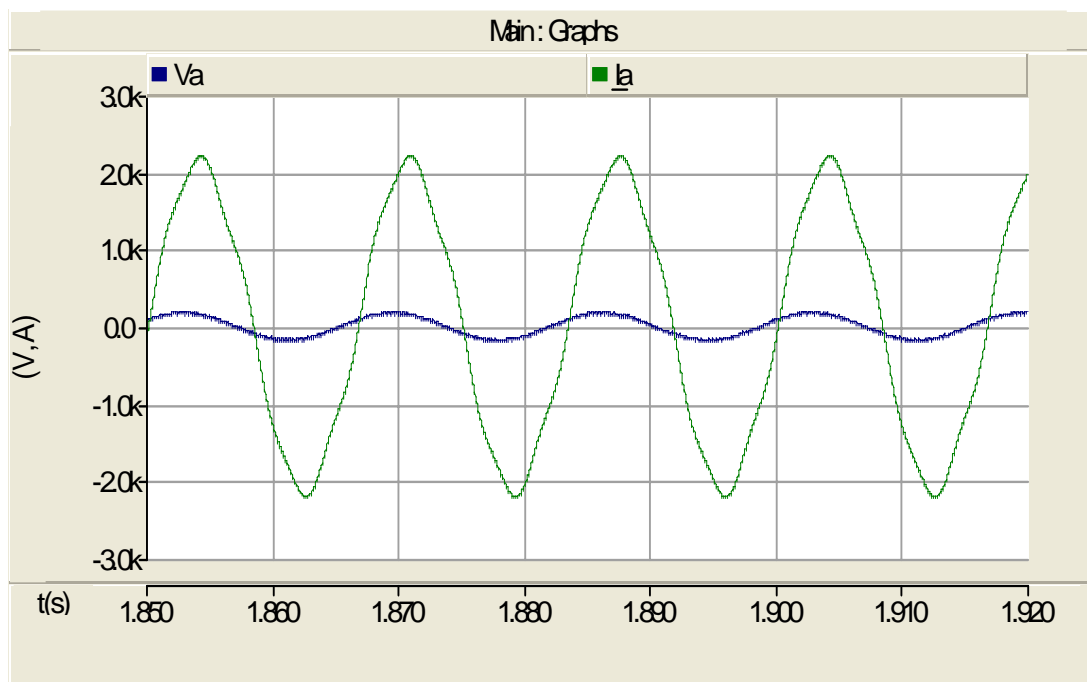


Figura 93: Formas de onda da tensão e da corrente na fase A.

A Figura 94 abaixo mostra as formas de onda de tensão nas fases.

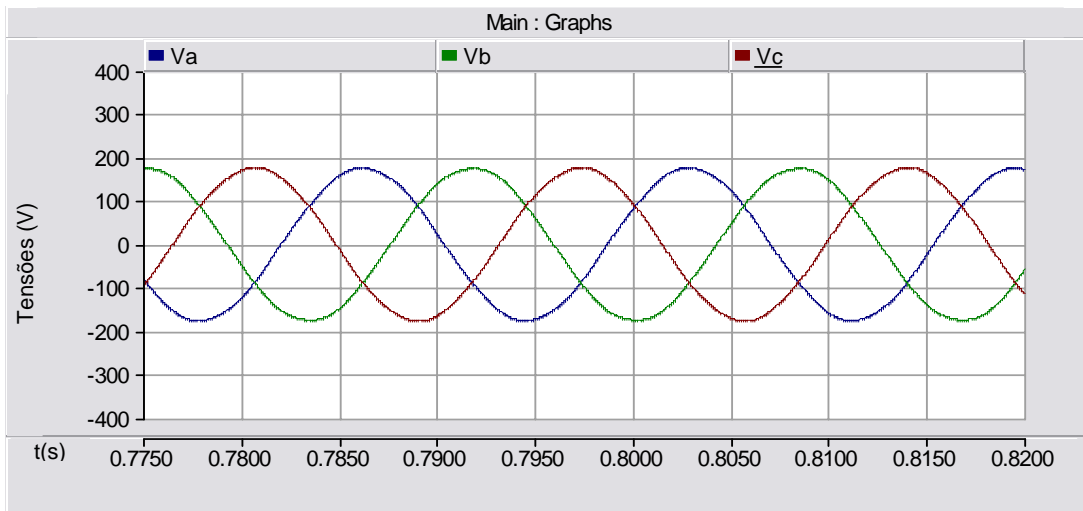


Figura 94: Formas de onda das tensões nas fases.

A Figura 95 mostra as formas de onda de corrente obtidas nas fases.

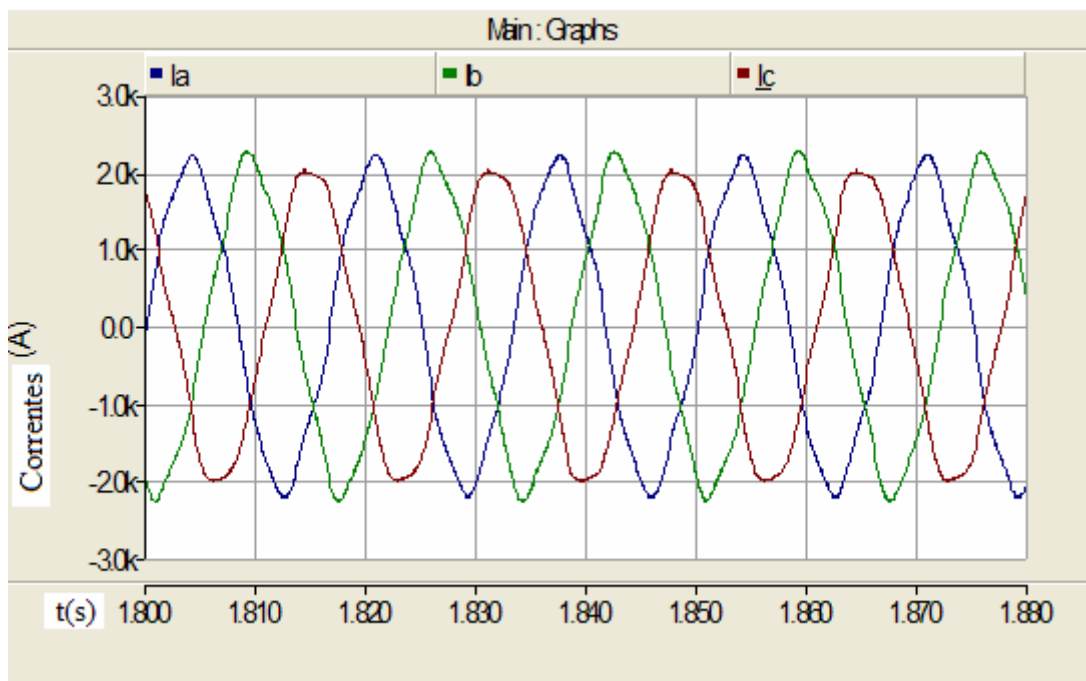


Figura 95: Formas de onda das correntes nas fases.

Na Figura a seguir será mostrado como foi implementado no PSCAD™ [22] a medição do fator de potência trifásico da fundamental. Através dos blocos *FFT* (*Fast Fourier Transform*), da biblioteca desse simulador, a componente fundamental foi

separada da tensão e da corrente, em seguida foi medido o defasamento angular entre a tensão e a corrente e então foi feita a operação cosseno do ângulo obtido. Essa implementação encontra-se na biblioteca do PSCAD™, versão 4.2 [22].

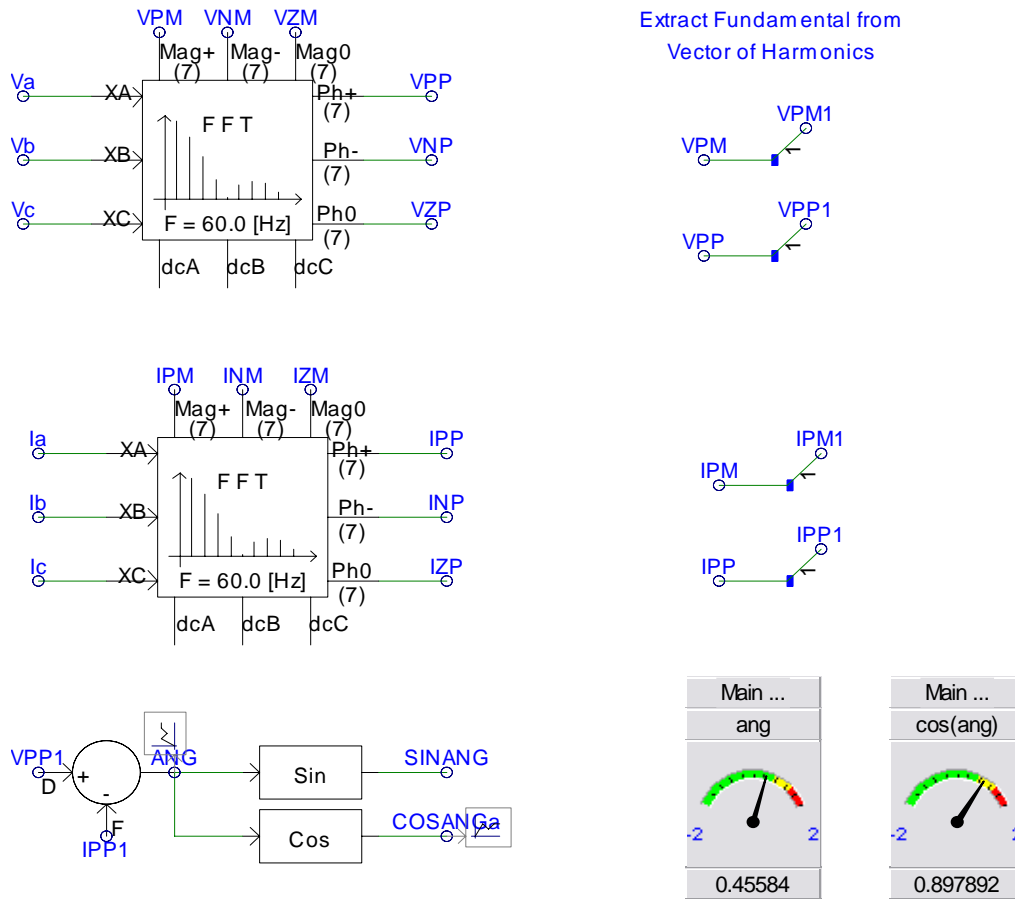


Figura 96: Implementação no PSCAD™ da medição do fator de potência trifásico da fundamental. [22]

A Figura 97 é uma representação esquemática da solução para correção do fator de potência e correção da distorção harmônica de corrente para o transformador 1.

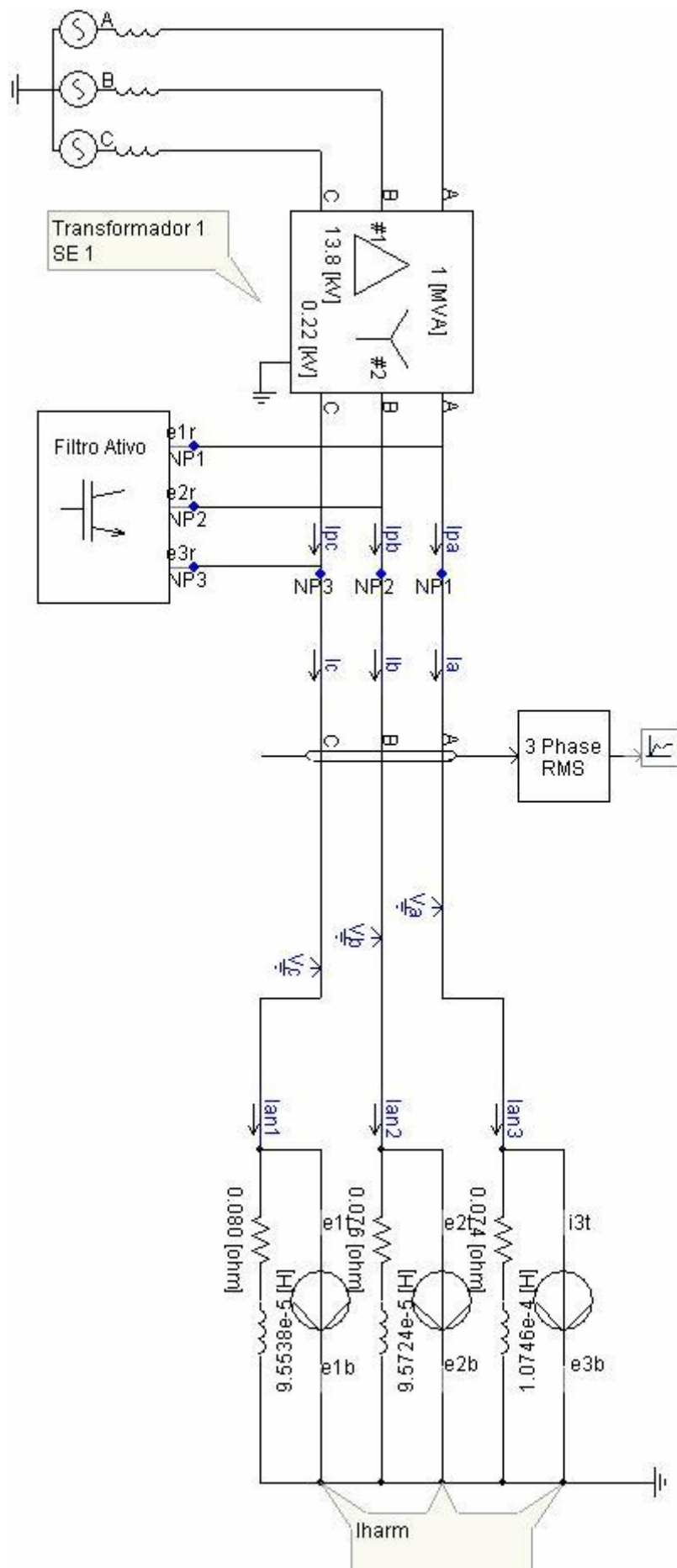


Figura 97: Aplicação de filtro ativo ao transformador 1.

Com a aplicação do filtro ativo, as correntes  $i_{pa}$ ,  $i_{pb}$  e  $i_{pc}$ , vistas pelo secundário do transformador 1, tornam-se senoidais e em fase com as  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$ , conforme pode ser observado nas Figuras 98,99 e 100.

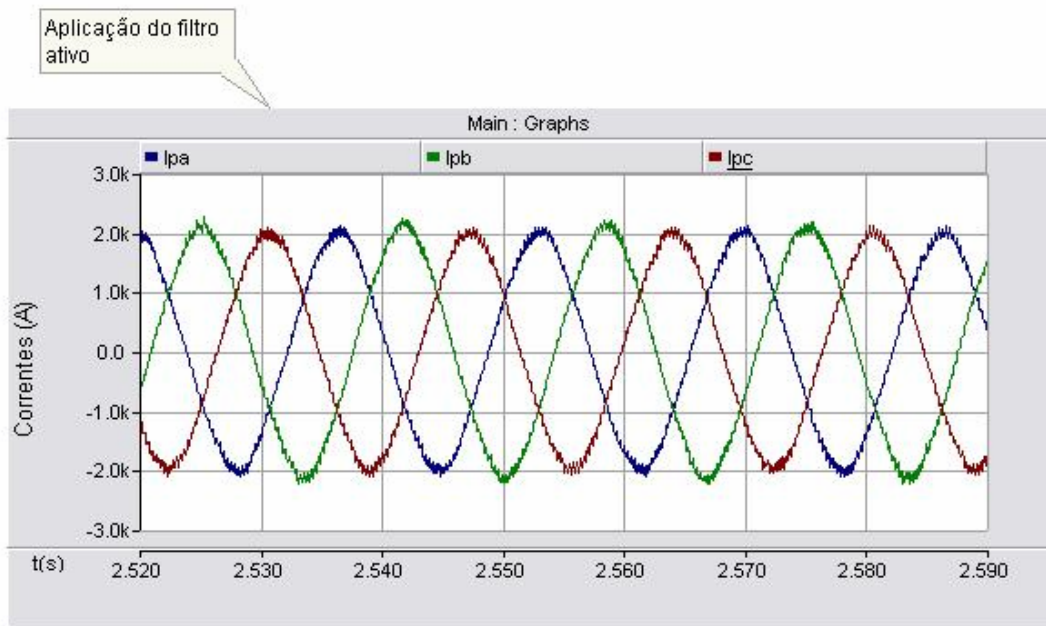


Figura 98: Formas de onda de corrente no secundário do transformador 1 com a aplicação do filtro ativo.

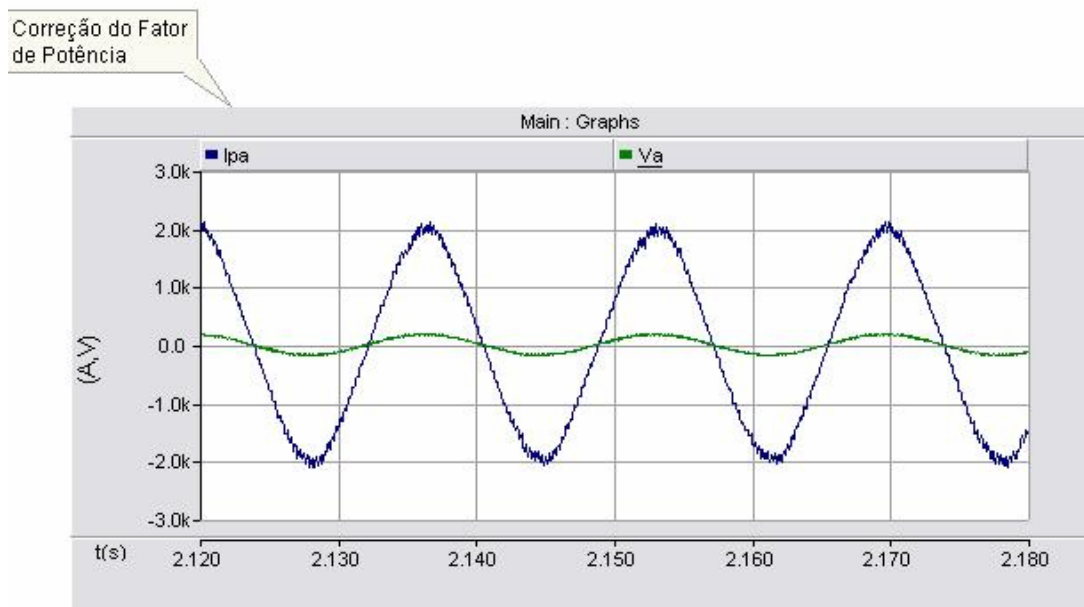


Figura 99: Formas de onda da corrente e de tensão em fase no secundário do transformador 1, após a aplicação do filtro ativo.

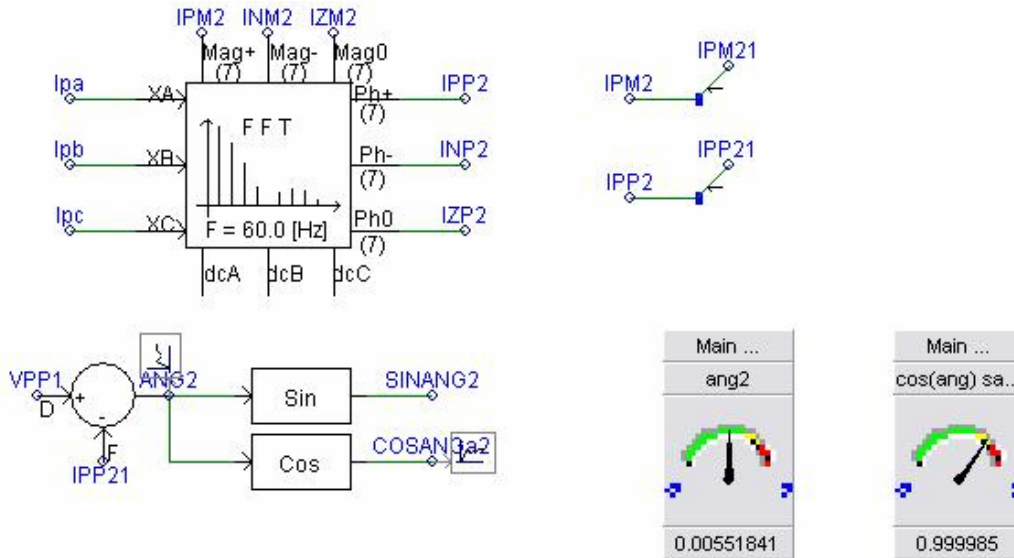


Figura 100: Fator de potência praticamente unitário no secundário do transformador 1, após a aplicação do filtro ativo. [22]

## 4.5 Simulação das cargas do transformador 2 da subestação 1 com solução por filtro ativo paralelo

Para essa simulação foi reproduzido o registro tabelado abaixo, obtido as 14:33:00,05 h do dia 24/03/2009, sendo as tensões e correntes em valores eficazes e os ângulos em graus.

**Tabela 22: Tensão na fase A do transformador 2 da subestação 1**

Fase A:

HARMÔNICO	TENSÃO RMS (V)	FASE
1	123,629	59,15°
3	1,136	92,10°
5	2,96	298,47°

DHTU A (distorção harmônica total de tensão na fase A) = 2,565% .

**Tabela 23: Corrente na fase A do transformador 2 da subestação 1**

HARMÔNICO	CORRENTE RMS (A)	FASE
1	507,833	34,71°
3	24,563	205,00°
5	30,611	249,21°
9	7,257	174,02°

DHTI A (distorção harmônica total de corrente na fase A) = 7,859%.

FP A (fator de potência da fundamental na fase A) = 0,910.



**Tabela 24: Tensão na fase B do transformador 2 da subestação 1**

Fase B:

HARMÔNICO	TENSÃO RMS (V)	FASE
1	123,200	191,51°
3	1,171	164,79°
5	2,876	254,88°

DHTU B (distorção harmônica total de tensão na fase B) = 2,521%.

**Tabela 25: Corrente na fase B do transformador 2 da subestação 1**

HARMÔNICO	CORRENTE RMS (A)	FASE
1	504,389	139,26°
3	99,946	209,97°
5	24,125	50,80°
9	21,703	123,35°
11	8,848	252,99°
15	7,824	11,07°
17	6,799	145,10°

DHTI B (distorção harmônica total de corrente na fase B) = 21,008%.

FP B (fator de potência da fundamental na fase B) = 0,790.

**Tabela 26: Tensão na fase C do transformador 2 da subestação 1**

Fase C:

HARMÔNICO	TENSÃO RMS (V)	FASE
1	124,015	297,24°
5	3,309	60,86°

DHTU C (distorção harmônica total de tensão na fase C) = 2,668%.

**Tabela 27: Corrente na fase C do transformador 2 da subestação 1**

HARMÔNICO	CORRENTE RMS (A)	FASE
1	574,585	265,56°
3	33,316	23,81°
5	9,518	110,30°
9	13,158	282,74°
11	12,505	62,44°
15	6,345	189,14°
17	7,559	327,87°

DHTI C (distorção harmônica total de corrente na fase C) = 7,021%

FP C (fator de potência da fundamental na fase C) = 0,850

A Figura 101 é uma representação esquemática da solução para correção do fator de potência e correção da distorção harmônica de corrente para o transformador 2.

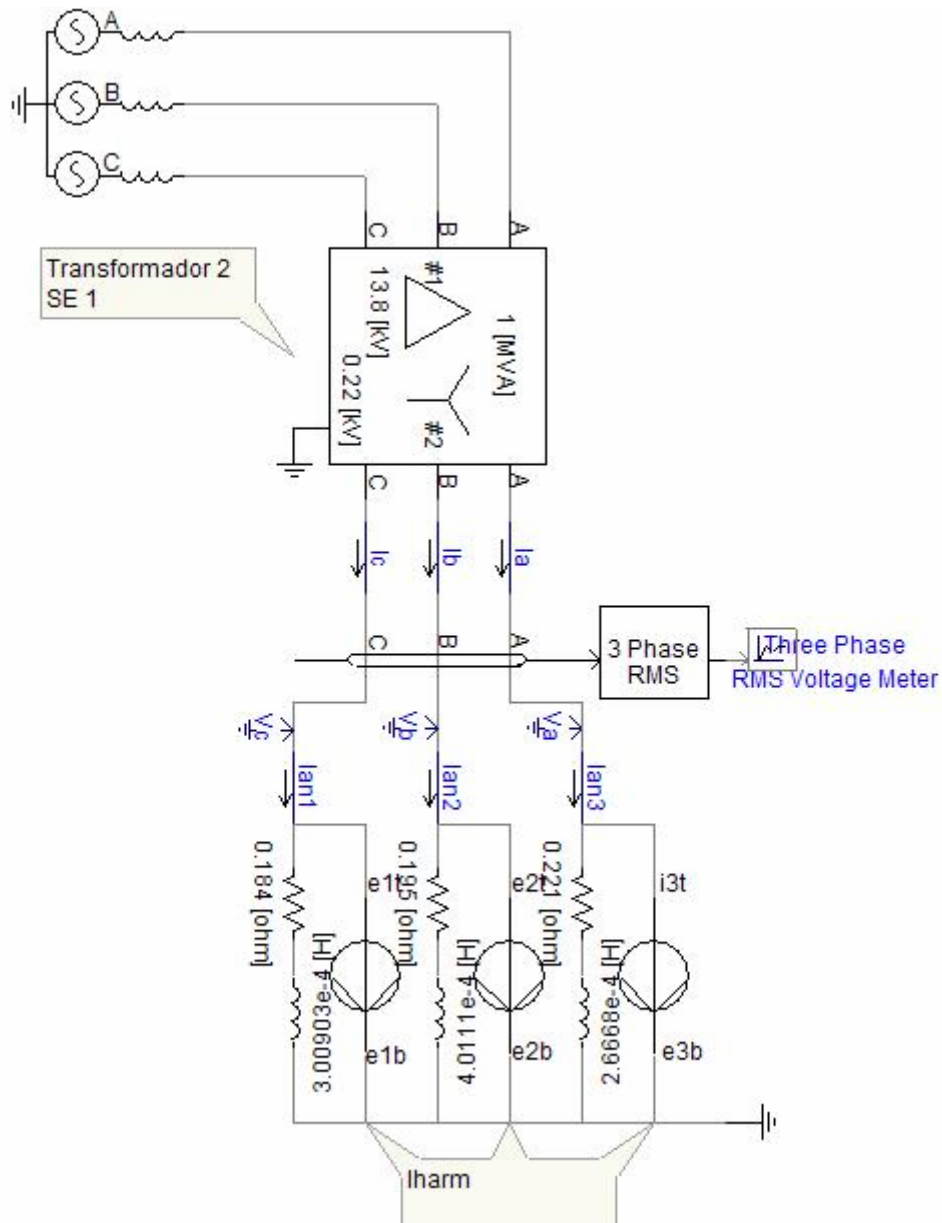


Figura 101: Diagrama de circuito da simulação do transformador 2 da subestação 1

A Figura 102 abaixo mostra as formas de onda de tensão e corrente obtidas na fase A.

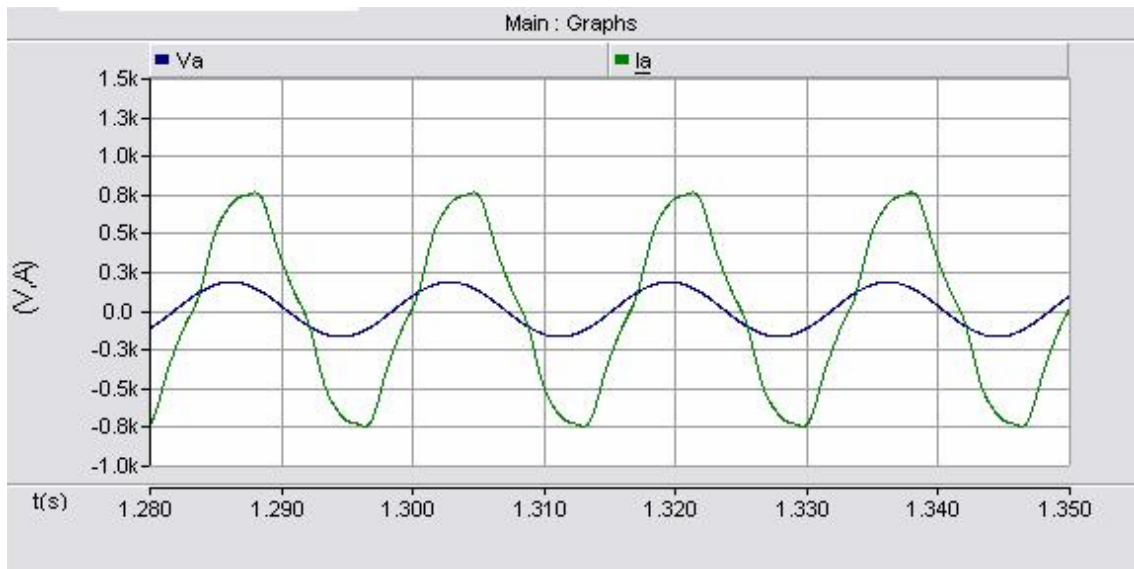


Figura 102: Formas de onda da tensão e da corrente na fase A.

A Figura 103 abaixo mostra as formas de onda de tensão nas fases.

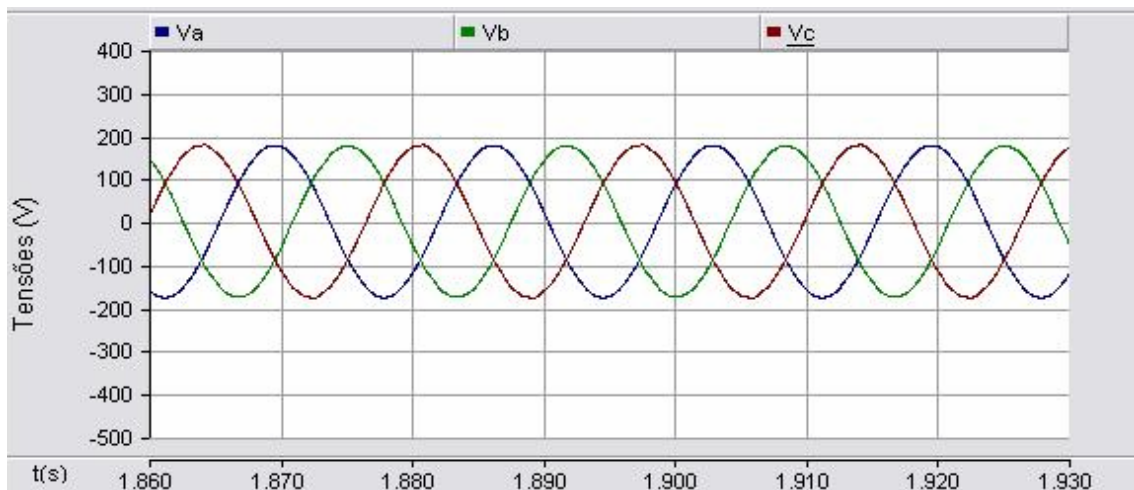


Figura 103: Formas de onda de tensões nas fases.

A Figura 104 mostra as formas de onda de corrente obtidas nas fases.

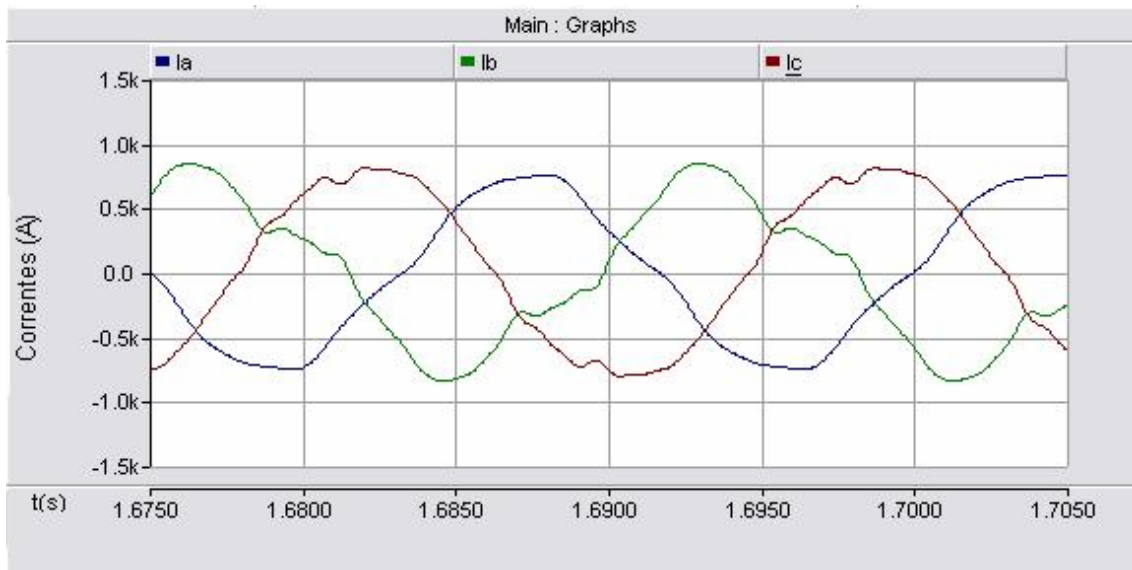


Figura 104: Formas de onda de correntes nas fases.

Na Figura 105 a seguir mostrada a medição do fator de potência trifásico da fundamental com a implementação no PSCAD™ [22].

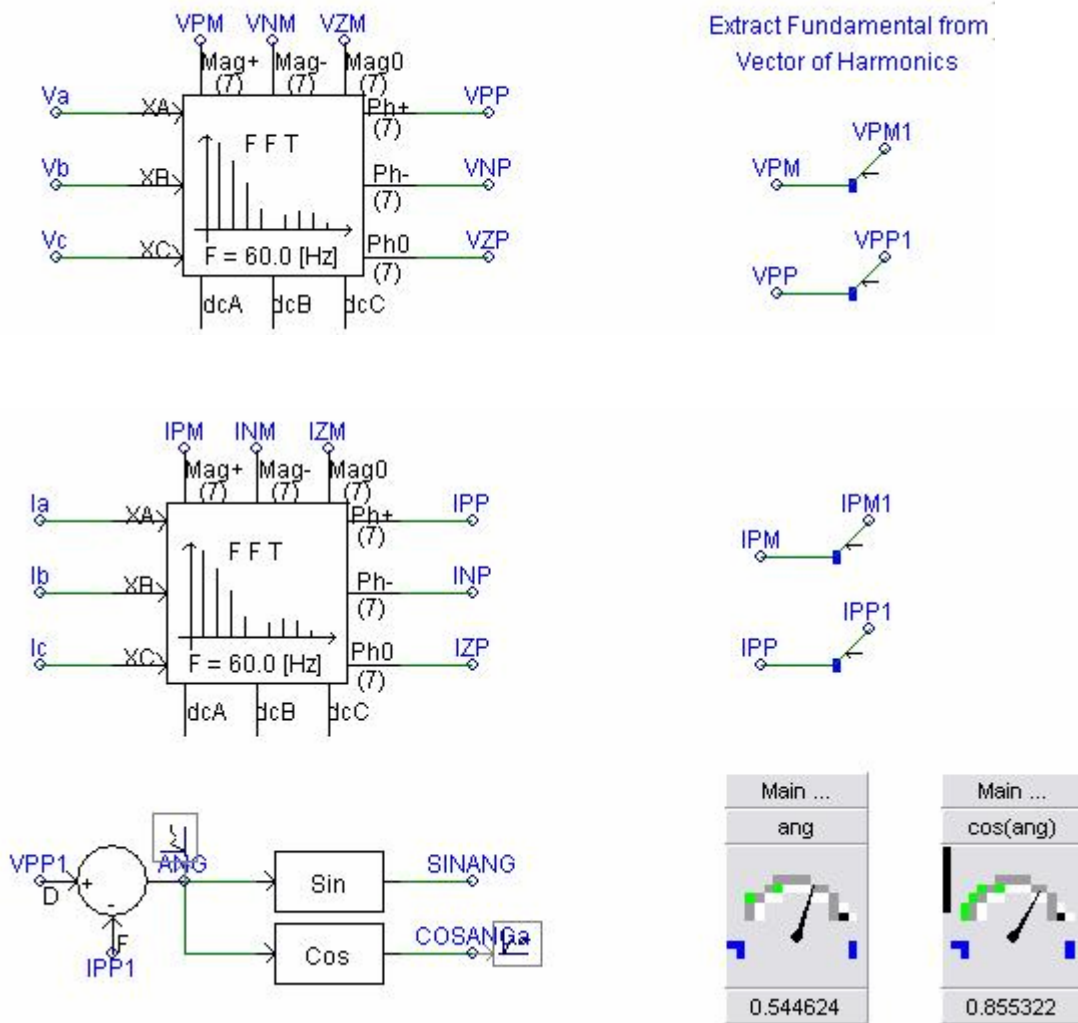


Figura 105: Implementação no PSCAD™ [22] da medição do fator de potência trifásico da fundamental do transformador 2 da subestação 1.

A Figura 106, na próxima página, é uma representação esquemática da solução para correção do fator de potência e correção da distorção harmônica de corrente para o transformador 2 da subestação 1.

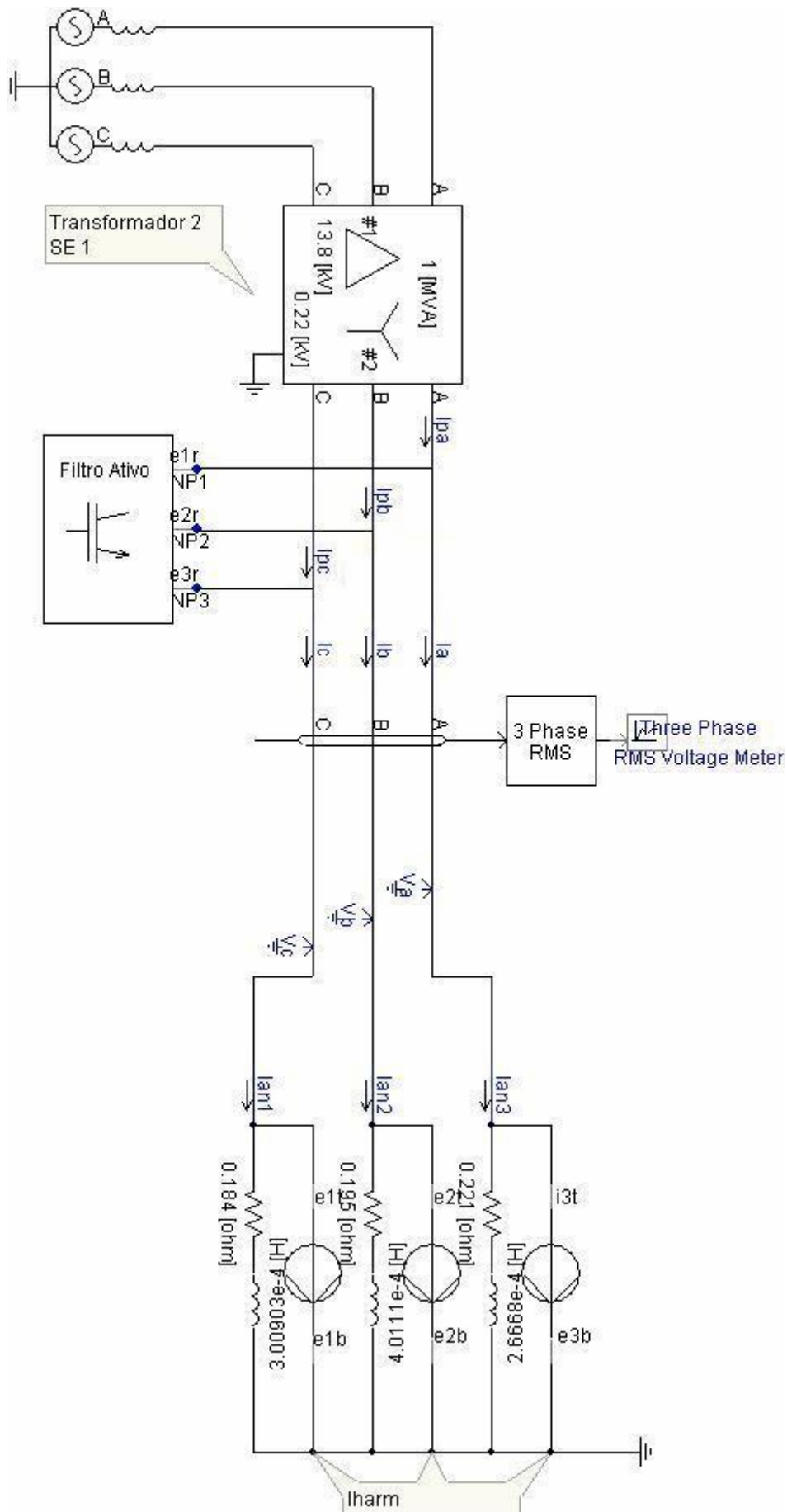


Figura 106: Aplicação de filtro ativo ao transformador 2.

Com a aplicação do filtro ativo, as correntes  $i_{pa}$ ,  $i_{pb}$  e  $i_{pc}$ , vistas pelo secundário do transformador 2, tornam-se senoidais e em fase com as  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$ , conforme pode ser observado nas Figuras 107,108 e 109.

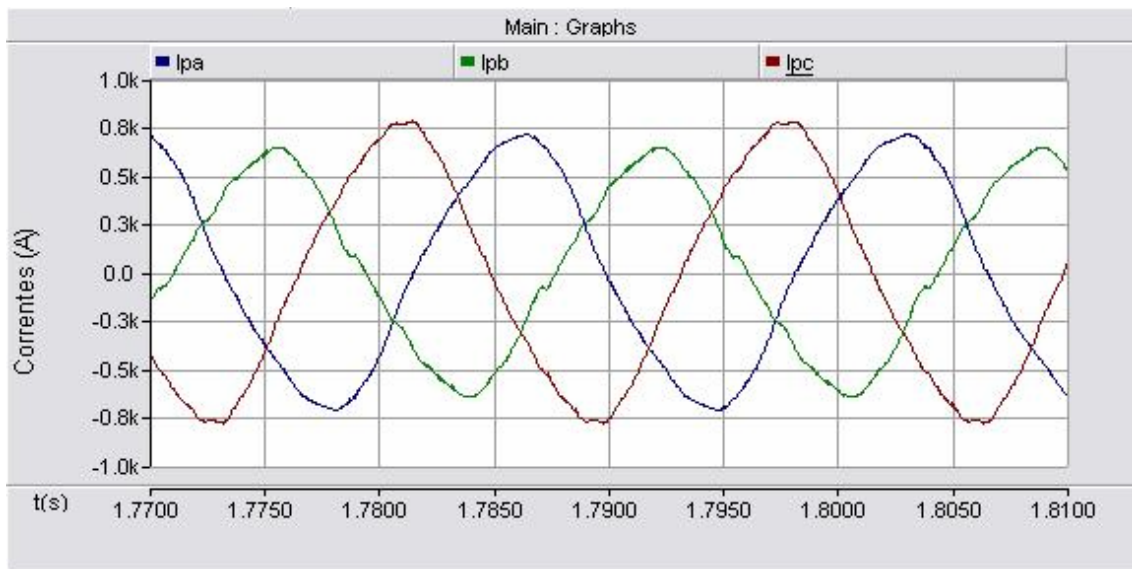


Figura 107: Formas de onda de corrente no secundário do transformador 2 com a aplicação do filtro ativo.

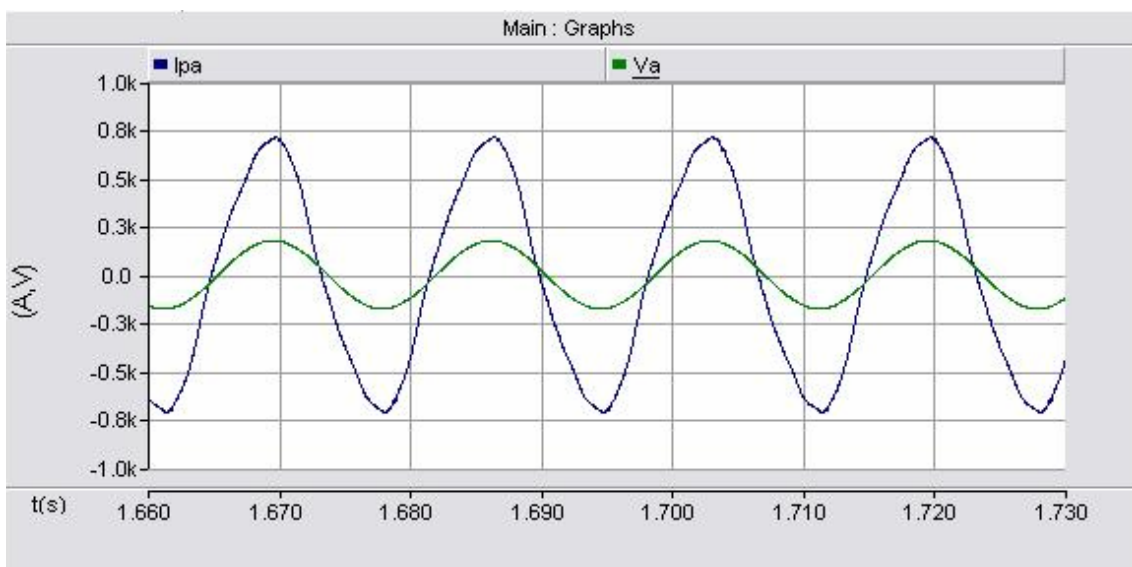


Figura 108: Formas de onda da corrente e de tensão em fase no secundário do transformador 2, após a aplicação do filtro ativo.

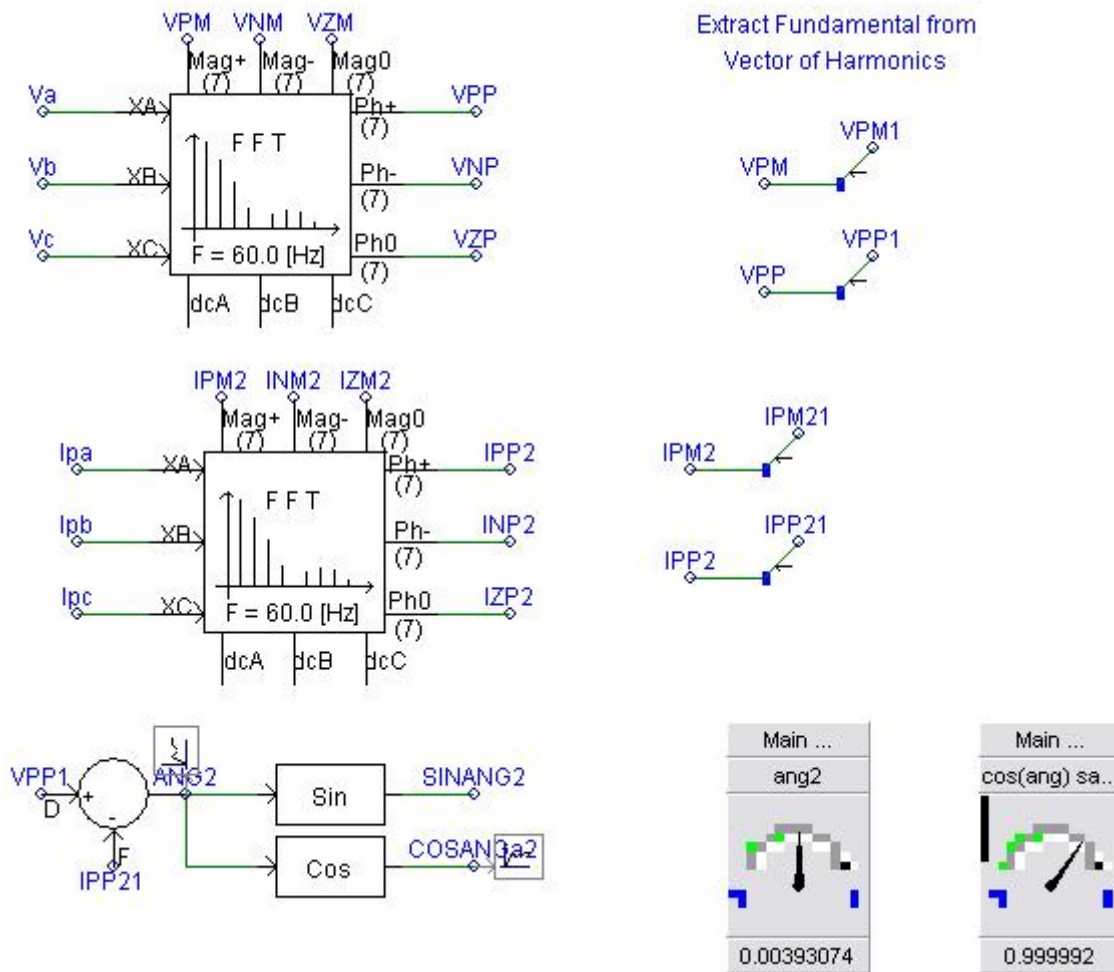


Figura 109: Fator de potência praticamente unitário no secundário do transformador 2, após a aplicação do filtro ativo.

## 4.6 Simulação das cargas do transformador 2 da subestação 2 com solução por filtro ativo paralelo

Para essa simulação foi reproduzido o registro tabelado abaixo, obtido as 16:24:10,00 h do dia 11/02/2009, sendo as tensões e correntes em valores eficazes e os ângulos em graus.



**Tabela 28: Tensão na fase A do transformador 2 da subestação 2**

Fase A:

HARMÔNICO	TENSÃO RMS (V)	FASE
1	261,809	107,49°
5	5,137	276,89°

DHTU A (distorção harmônica total de tensão na fase A) = 1,962%.

**Tabela 29: Corrente na fase A do transformador 2 da subestação 2**

HARMÔNICO	CORRENTE RMS (A)	FASE
1	303,759	69,74°
5	8,694	206,36°
7	3,079	125,46°

DHTI A (distorção harmônica total de corrente na fase A) = 3,036%.

FP A (fator de potência da fundamental na fase A) = 0,790.

**Tabela 30: Tensão na fase B do transformador 2 da subestação 2**

Fase B:

HARMÔNICO	TENSÃO RMS (V)	FASE
1	263,205	227,41°
5	4,262	159,12°

DHTU B (distorção harmônica total de tensão na fase B) = 1,619%.

**Tabela 31: Corrente na fase B do transformador 2 da subestação 2**

HARMÔNICO	CORRENTE RMS (A)	FASE
1	311,605	187,73°
5	7,049	91,36°
7	3,072	239,06°

DHTI B (distorção harmônica total de corrente na fase B) = 2,467%

FP B (fator de potência da fundamental na fase B) = 0,770

**Tabela 32: Tensão na fase C do transformador 2 da subestação 2**

Fase C:

HARMÔNICO	TENSÃO RMS (V)	FASE
1	262,882	347,60°
5	4,931	46,58°
7	2,431	146,99°

DHTU C (distorção harmônica total de tensão na fase C) = 2,091%

**Tabela 33: Corrente na fase C do transformador 2 da subestação 2**

HARMÔNICO	CORRENTE RMS (A)	FASE
1	315,464	310,07°
5	8,616	337,14°
7	3,335	9,09°

DHTI C (distorção harmônica total de corrente na fase C) = 2,928%.

FP C (fator de potência da fundamental na fase C) = 0,793.

A Figura 110 abaixo é o diagrama de simulação do transformador 2 da subestação 2.

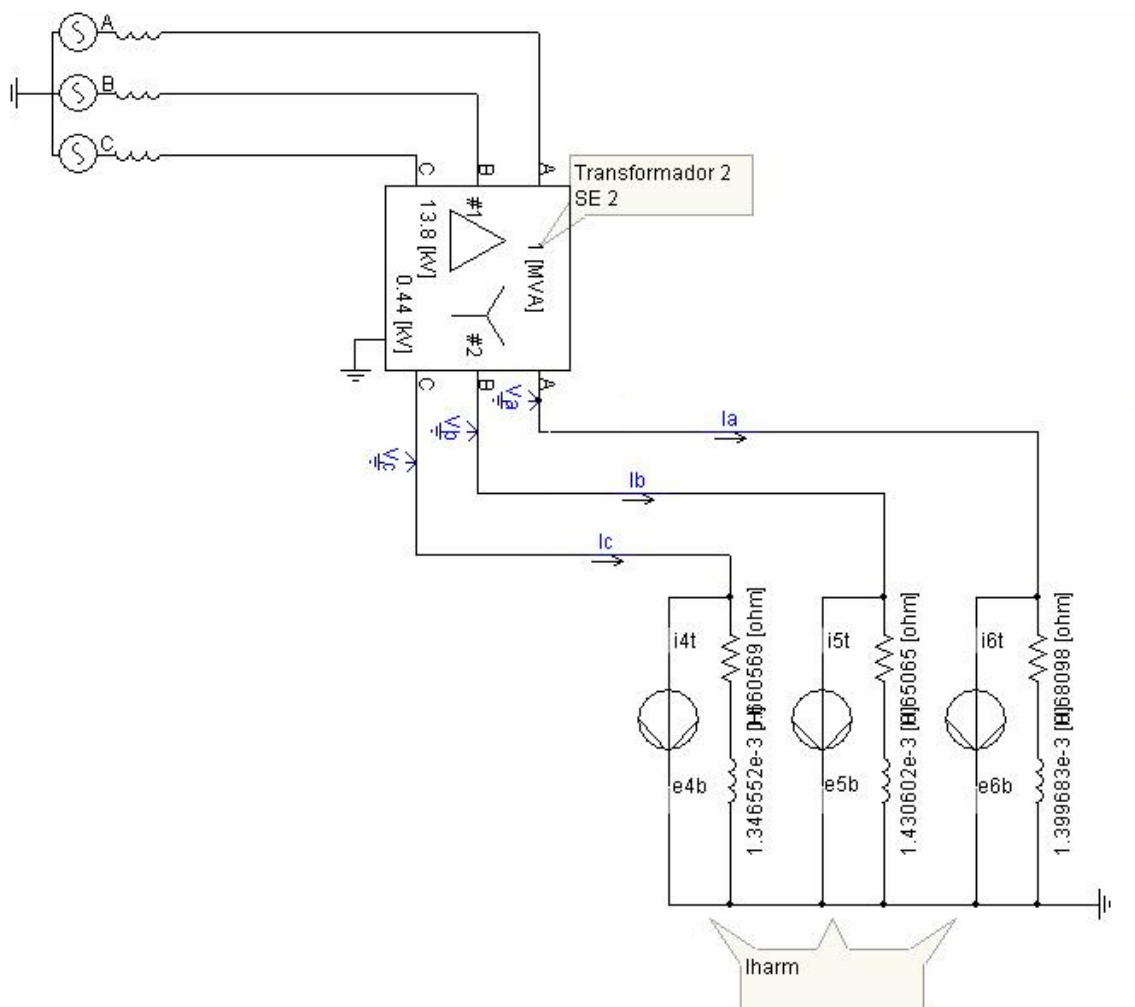


Figura 110: Diagrama de circuito da simulação do transformador 2 da subestação 2.

A Figura 111 abaixo mostra as formas de onda de tensão e corrente obtidas na fase A.

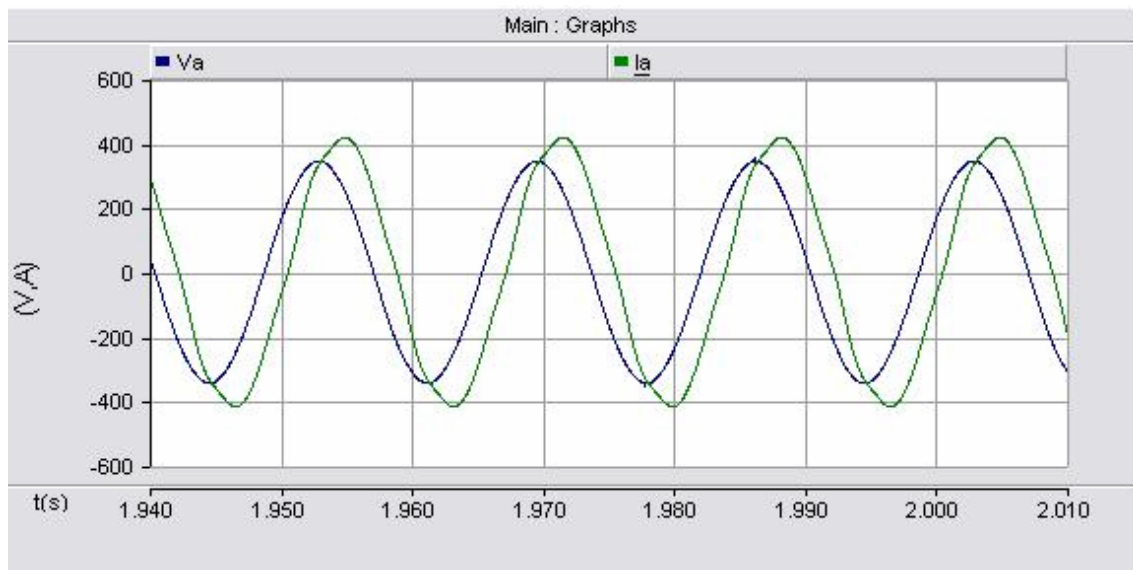


Figura 111: Formas de onda da tensão e da corrente na fase A.

A Figura 112 abaixo mostra as formas de onda de tensão nas fases.

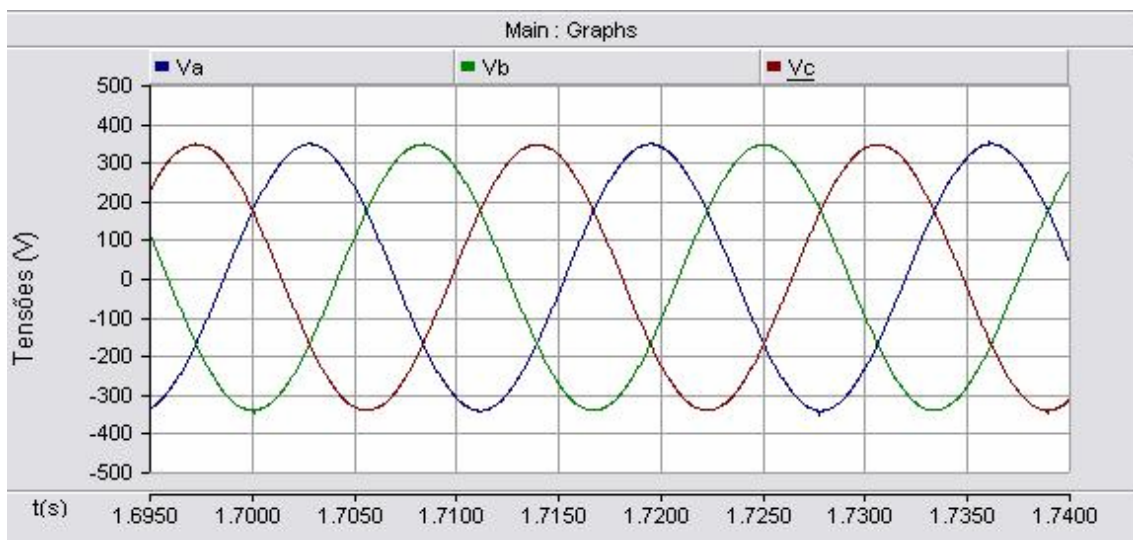


Figura 112: Formas de onda de tensões nas fases.

A Figura 113 mostra as formas de onda de corrente obtidas nas fases.

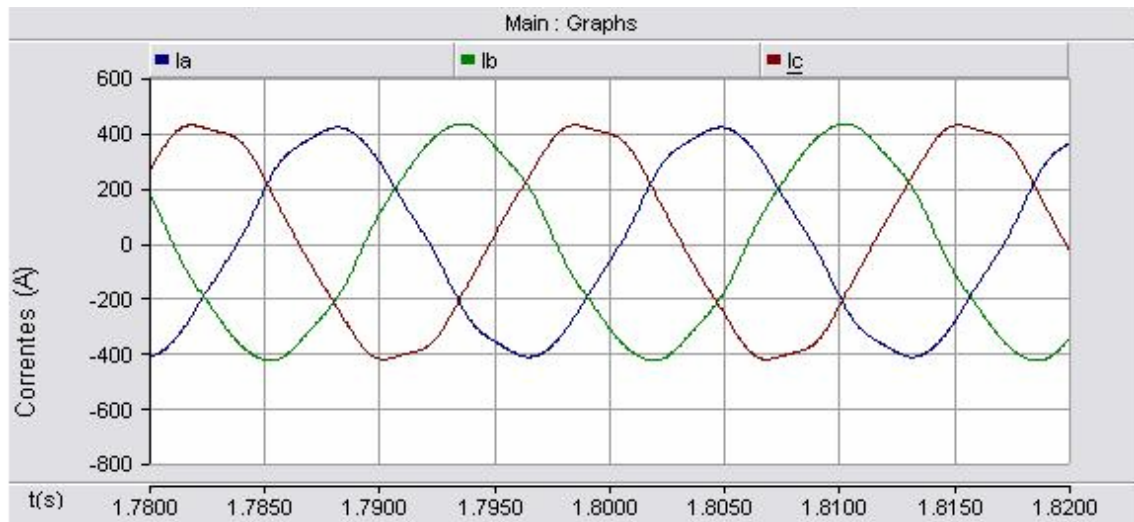


Figura 113: Formas de onda de correntes nas fases.

Na Figura 114 a seguir mostrada a medição do fator de potência trifásico da fundamental com a implementação no PSCAD™ [22].

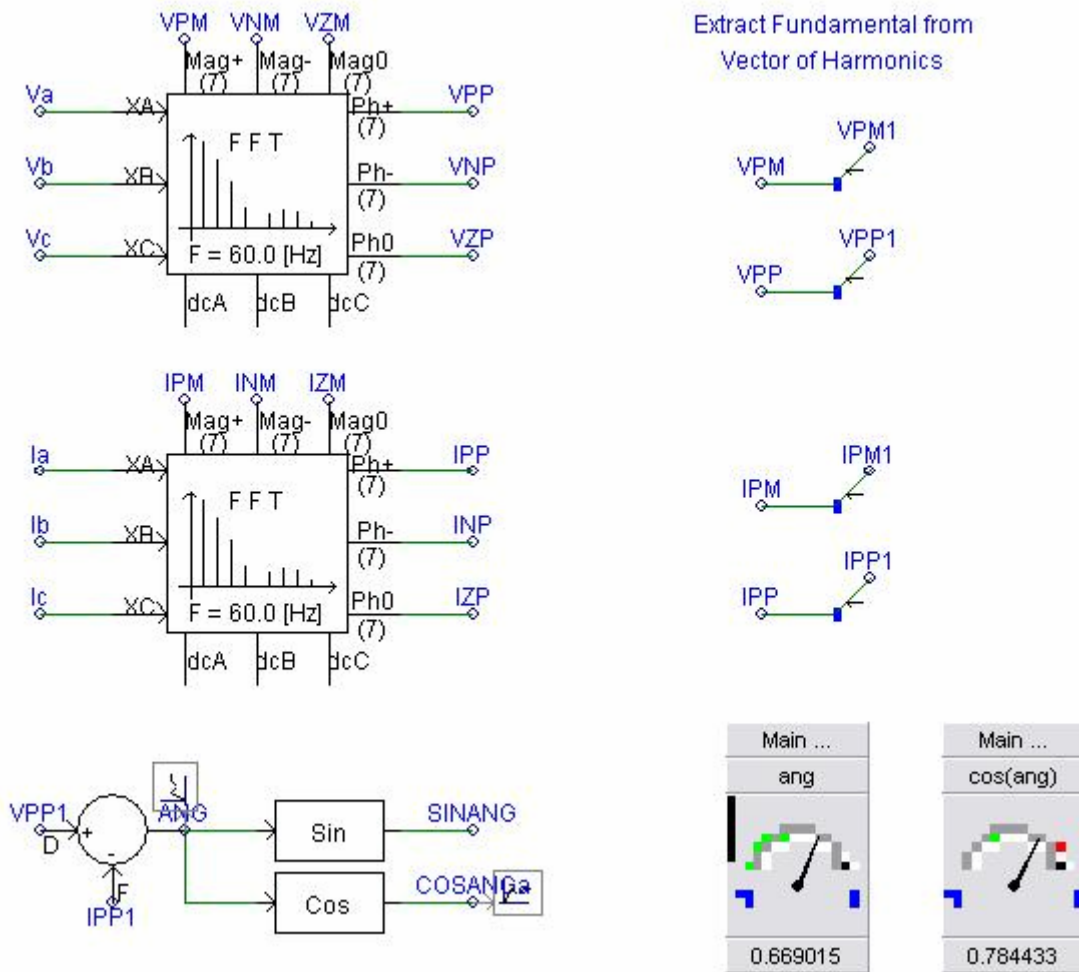


Figura 114: Implementação no PSCAD™ [22] da medição do fator de potência trifásico da fundamental.

A Figura 115 é uma representação esquemática da solução para correção do fator de potência e correção da distorção harmônica de corrente para o transformador 2 da subestação 2.

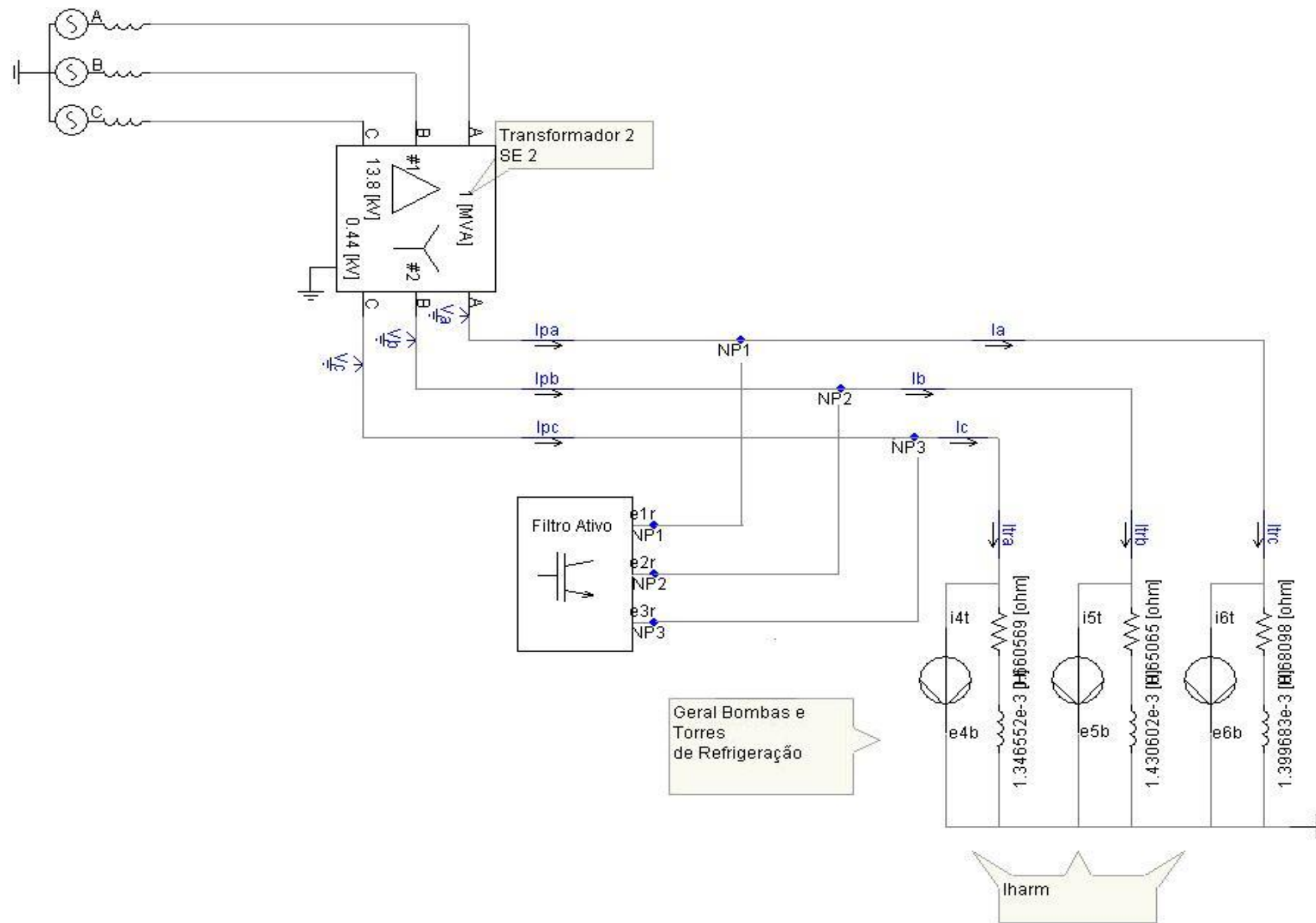


Figura 115: Aplicação de filtro ativo ao transformador 2 da subestação 2.

Com a aplicação do filtro ativo, as correntes  $i_{pa}$ ,  $i_{pb}$  e  $i_{pc}$ , vistas pelo secundário do transformador 2, tornam-se senoidais e em fase com as  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$ , conforme pode ser observado nas Figuras 116, 117 e 118.

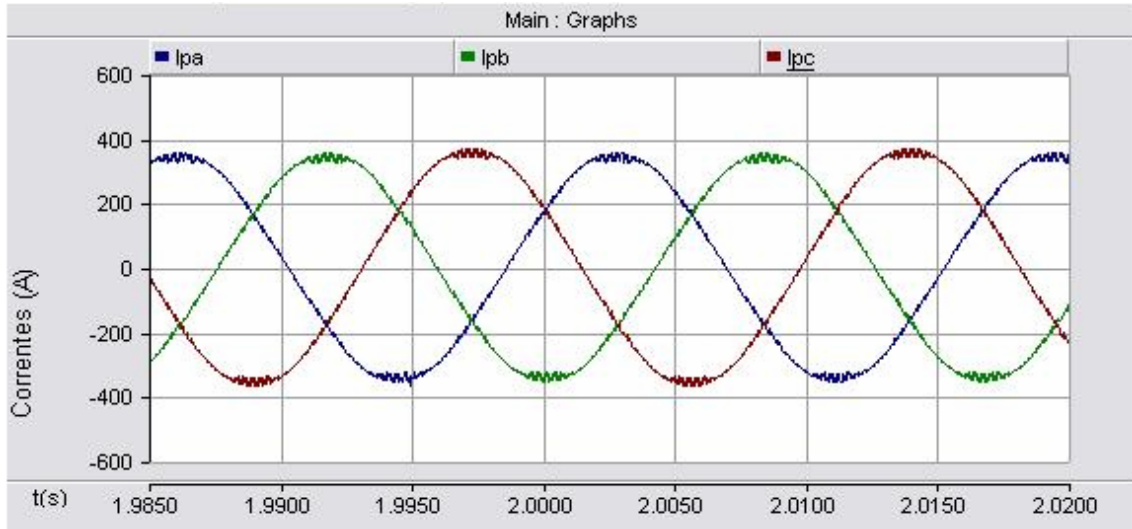


Figura 116: Formas de onda de corrente no secundário do transformador 2 da subestação 2 com a aplicação do filtro ativo.

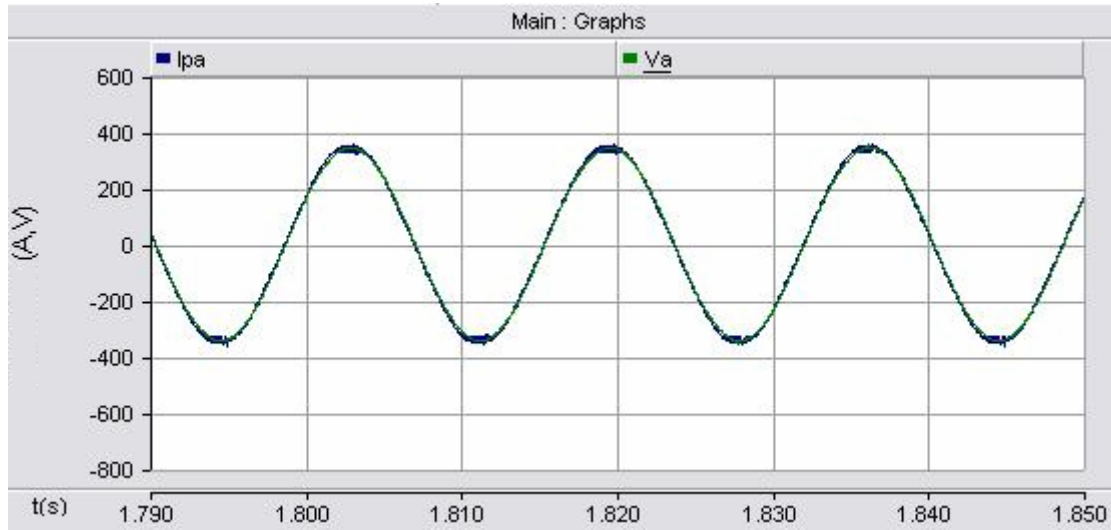


Figura 117: Formas de onda da corrente e de tensão em fase no secundário do transformador 2 da subestação 2, após a aplicação do filtro ativo.

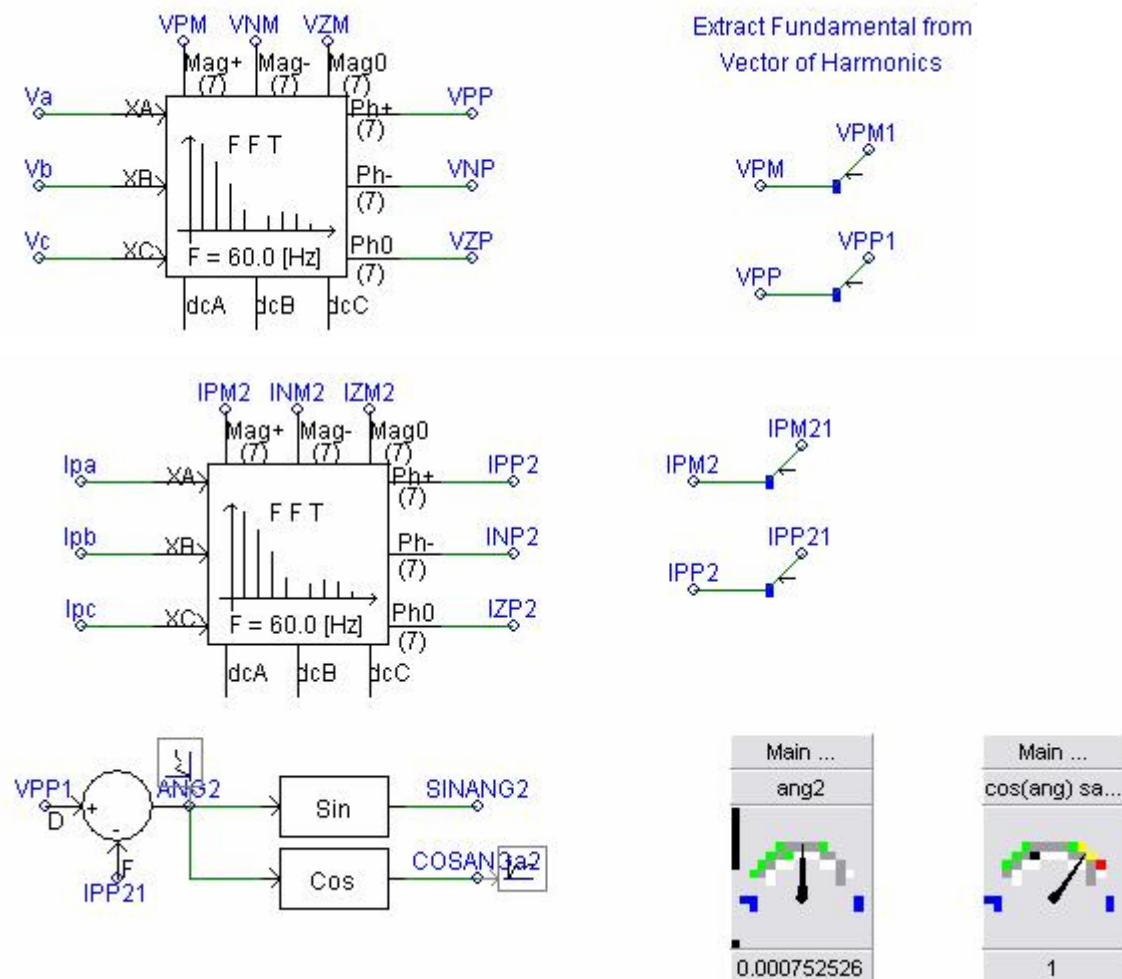


Figura 118: Fator de potência praticamente unitário no secundário do transformador 2, da subestação 2 após a aplicação do filtro ativo.

## 4.7 Simulação do acionamento VVVF do elevador 3 da casa de máquinas do prédio anexo II com solução por filtro ativo paralelo

Para essa simulação buscou-se reproduzir a oscilografia obtida às 16:18:37,00h do dia 18/02/2009 (Figura 119).



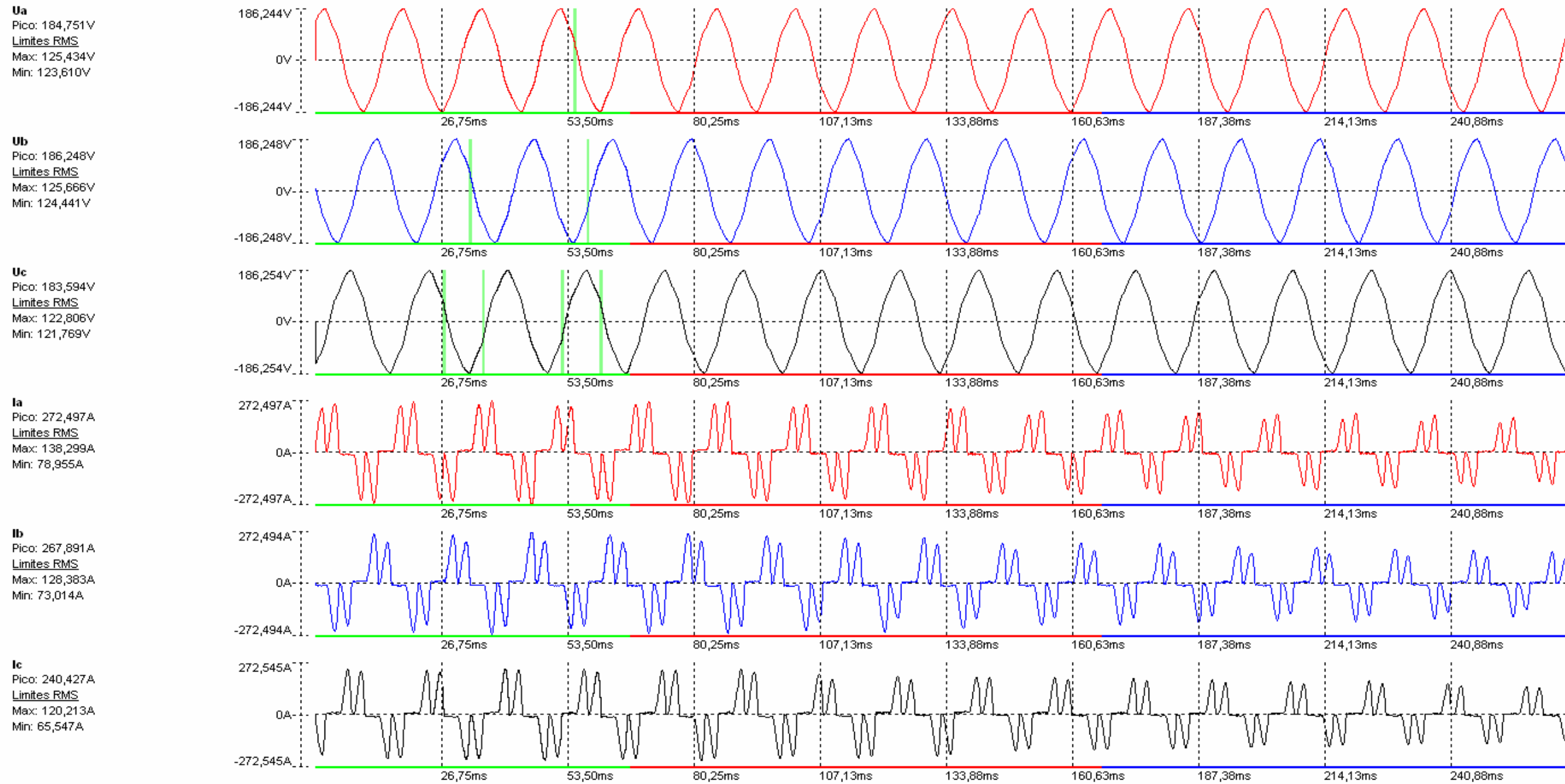


Figura 119: Oscilografia do acionamento VVVF do elevador 3 do prédio anexo II

O motor do elevador de passageiros é um motor de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo com potência nominal de 40 kW e corrente nominal de 80 A para uma tensão de linha de 380V.

O drive VVVF simulado é de seis pulsos.

Para essa simulação foi montado um modelo de drive com retificador, inversor, motor de indução trifásico e controle escalar v/f.

Segundo NG *et al* [31] e BOSE [32], a implementação do controle escalar de velocidade para o motor de indução trifásico é conforme a Figura 120.

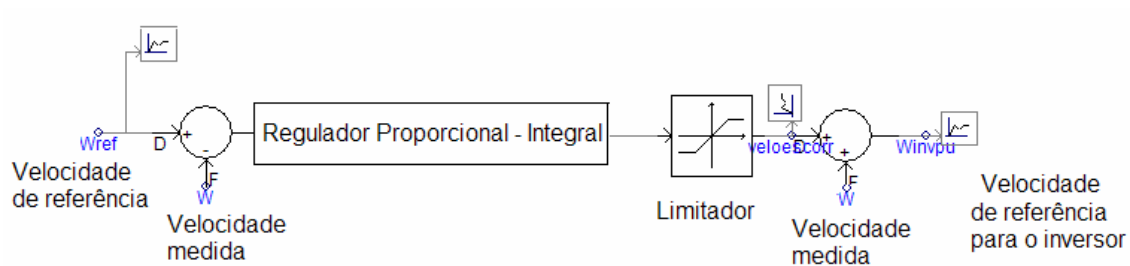


Figura 120: Implementação do controle escalar (v/f) para motor de indução trifásico.

A velocidade de referência utilizada na simulação consiste em uma rampa de subida (aceleração), patamar constante (velocidade constante) e descida (desaceleração).

O regulador proporcional- integral deve ter a funcionalidade *anti-reset-wind-up*, ou seja, o integrador deve cessar de integrar toda vez que a velocidade de escorregamento na saída do limitador atingir 5%.

Na simulação utilizando o PSCAD-EMTDC™ [22] o *anti-reset-wind-up* foi construído conforme a Figura 121.

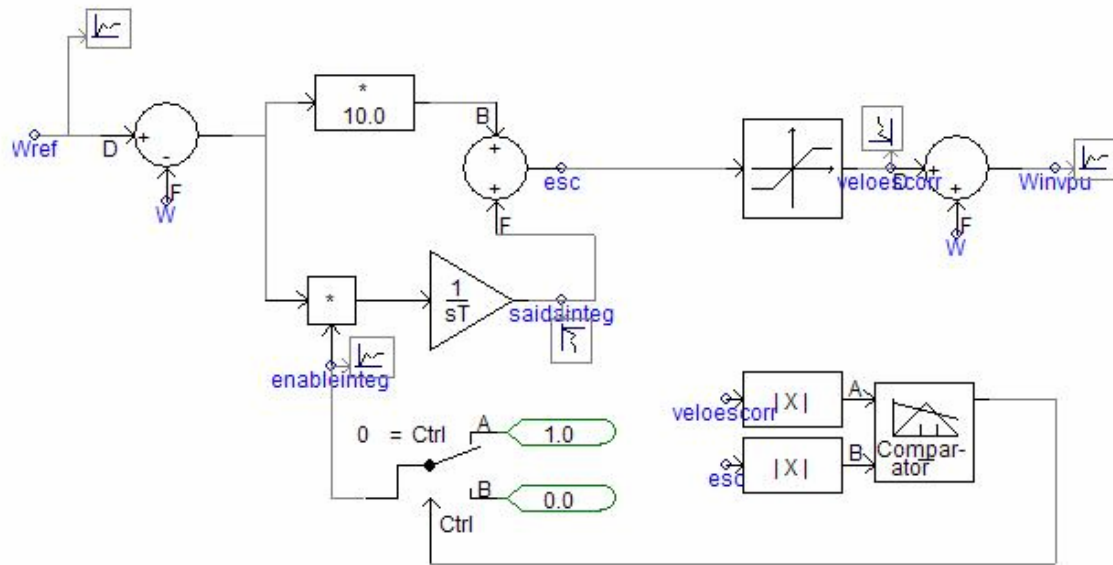


Figura 121: Regulador proporcional-integral com anti-reset-windup no PSCAD-EMTDC™ [21]

Segundo a Figura 121, quando a velocidade de escorregamento exceder 0,05 pu, o integrador deverá integrar o valor 0 (zero), o que equivale a desabilitá-lo nessa condição.

O modelo de acionamento (*drive*) simulado é mostrado na Figura 122.

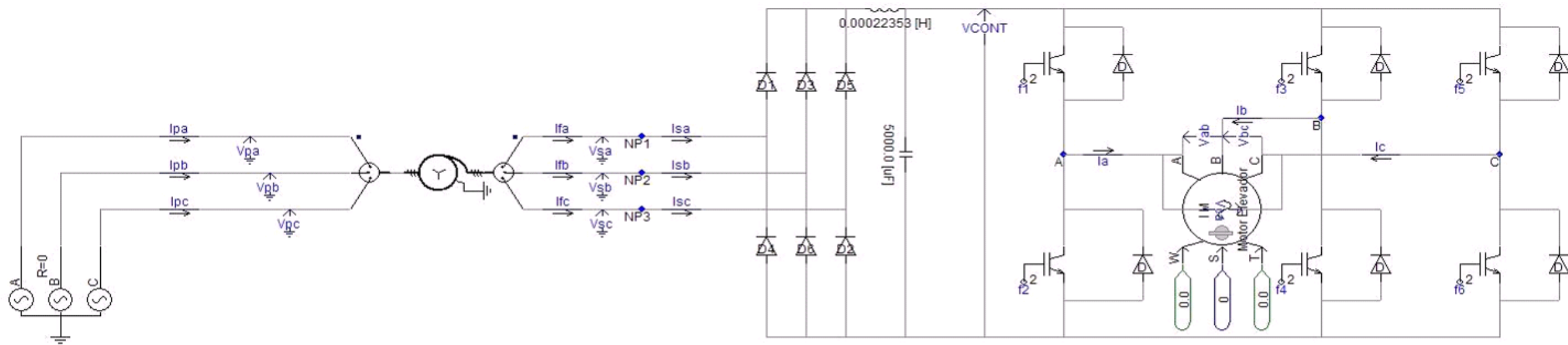


Figura 122: Modelo do acionamento VVVF simulado no PSCAD-EMTDC.

O autotransformador mostrado na Figura 122 eleva a tensão de linha de 220V para 380V e possui impedância de 5%.

Os diodos do lado retificador possuem a parametrização da Figura 123 abaixo.

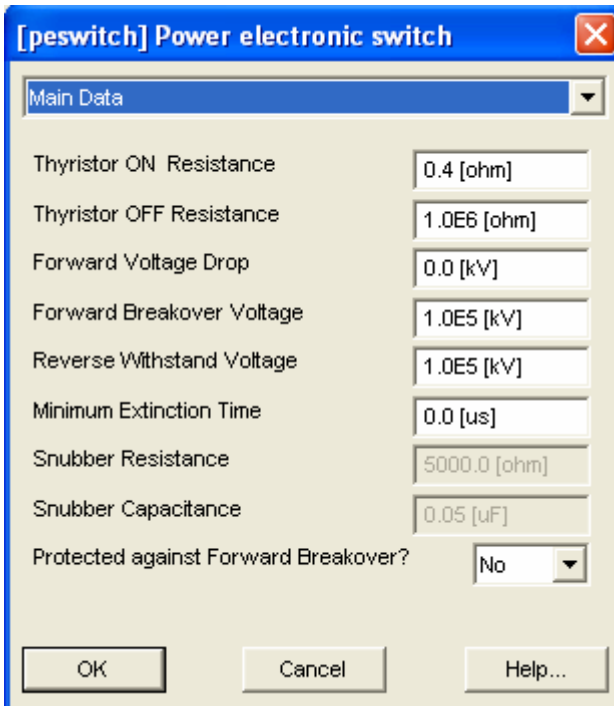


Figura 123: Parametrização dos diodos do retificador do acionamento VVVF.

Os IGBTs do lado inverso possuem a seguinte parametrização:

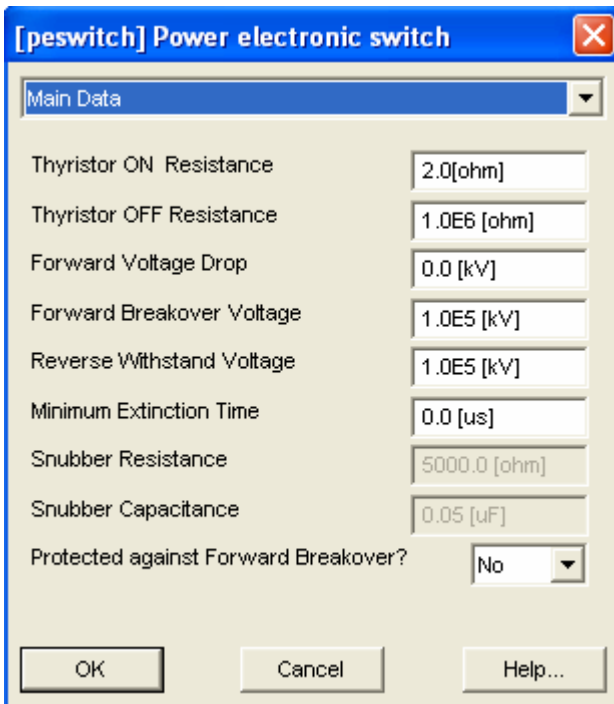


Figura 124: Parametrização dos IGBTs do inversor do acionamento VVVF.

O disparo dos IGBTs do inversor do drive segue a lógica mostrada a Figura 125. Essa lógica já foi utilizada para disparo da ponte de IGBTs do filtro ativo, de acordo com as Figuras 83 a 89.

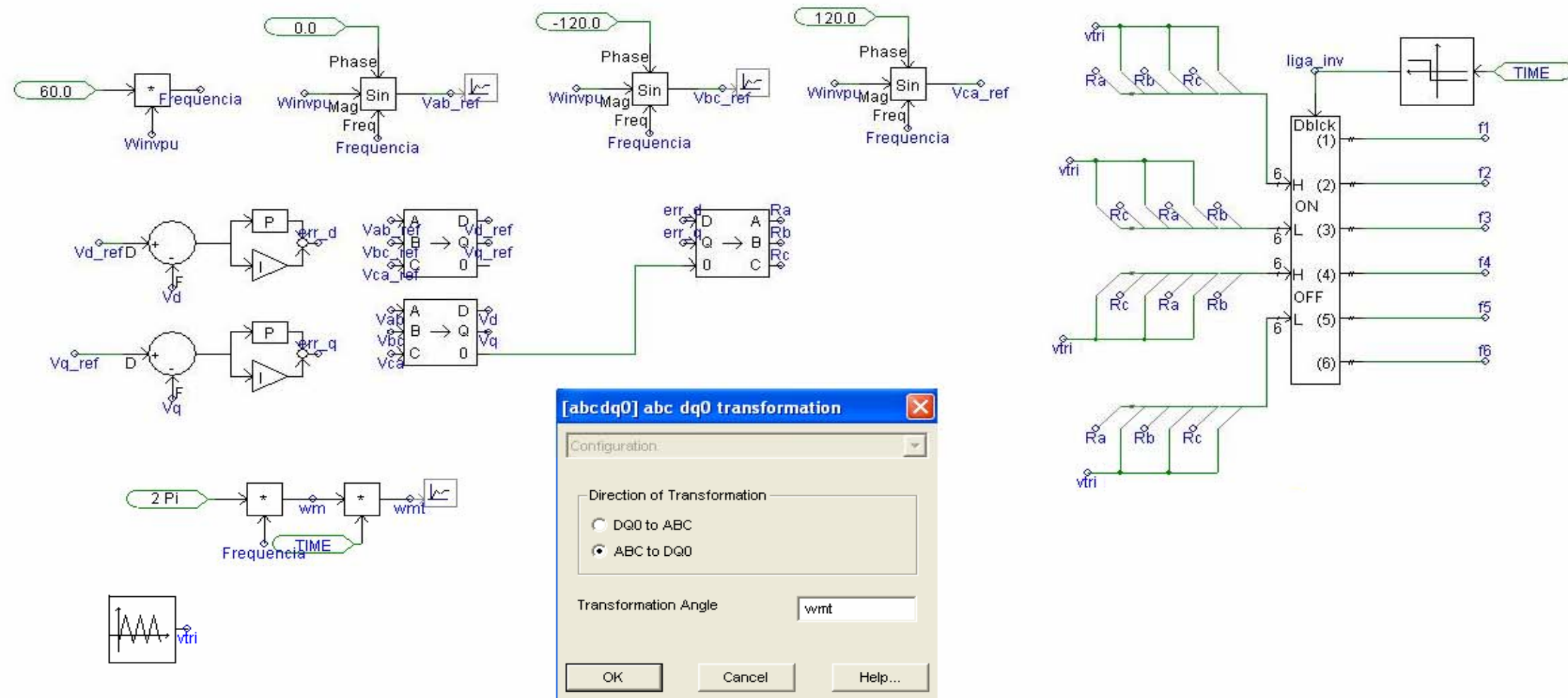


Figura 125: Lógica para disparo dos IGBTs do inversor do acionamento VVVF.

A velocidade  $\omega_{invpu}$  da Figura 121 deve gerar referências para as tensões proporcionais as frequências.

As tensões de referência então calculadas e as tensões de linha medidas no motor sofrem uma conversão de coordenadas abc para dq. Essa conversão foi feita para tirar proveito da disponibilidade de um bloco de conversão de coordenadas existente na biblioteca de componentes do PSCAD-EMTDC™ [22] que transforma tensões ou correntes das coordenadas abc para dq0 e de dq0 para abc, bastando selecionar a transformação desejada na janela de parametrização do bloco.

Com as correntes convertidas para o sistema dq0 é realizado um controle linear através de reguladores do tipo PI (proporcional – integral), de acordo com a Figura 125, para assegurar que as tensões medidas nos terminais do motor de indução ( $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  e  $V_{ca}$ ) sejam as tensões de linha de referência calculadas ( $V_{ab\_ref}$ ,  $V_{bc\_ref}$  e  $V_{ca\_ref}$ ) que são proporcionais a velocidade angular  $\omega_{invpu}$ , obtida segundo a Figura 121.

Conforme a Figura 125, as funções de controle  $err_d$  e  $err_q$ , obtidas sofrem então conversão para as coordenadas abc, onde irão gerar os sinais de referência  $R_a$ ,  $R_b$  e  $R_c$ , que serão comparados com a onda triangular  $v_{tri}$  no bloco de pulsos interpolados para disparo dos IGBTs.

Na Figura 126 serão mostradas as correntes na entrada do retificador para os lados - primário e secundário - do autotransformador de entrada, respectivamente.



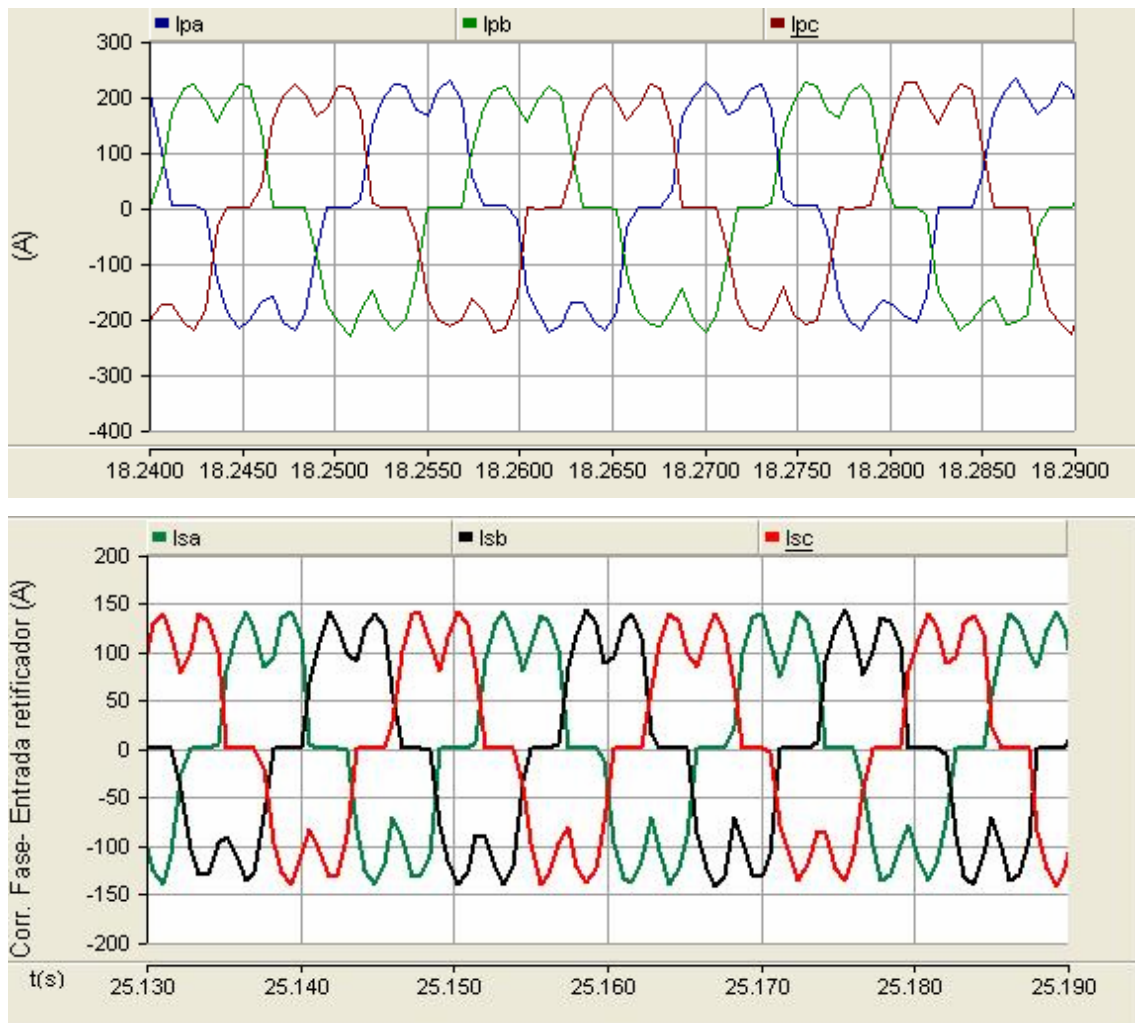


Figura 126: Correntes na entrada do retificador do acionamento VVVF.

Nota-se que as formas de onda acima reproduzem com boa fidelidade as oscilografias da Figura 119.

Na Figura 127 será mostrado o perfil de velocidade de referência em azul, comparado a velocidade obtida pelo acionamento (*drive*) VVVF simulado em verde. Pode-se constatar que o regulador PI simulado (conforme Figura 121) faz a velocidade do motor seguir o perfil de referência.



Figura 127: Velocidade do motor seguindo perfil de velocidade de referência.

Na figura 128 é mostrada a variação de tensão ao longo do tempo aplicada às fases do motor .

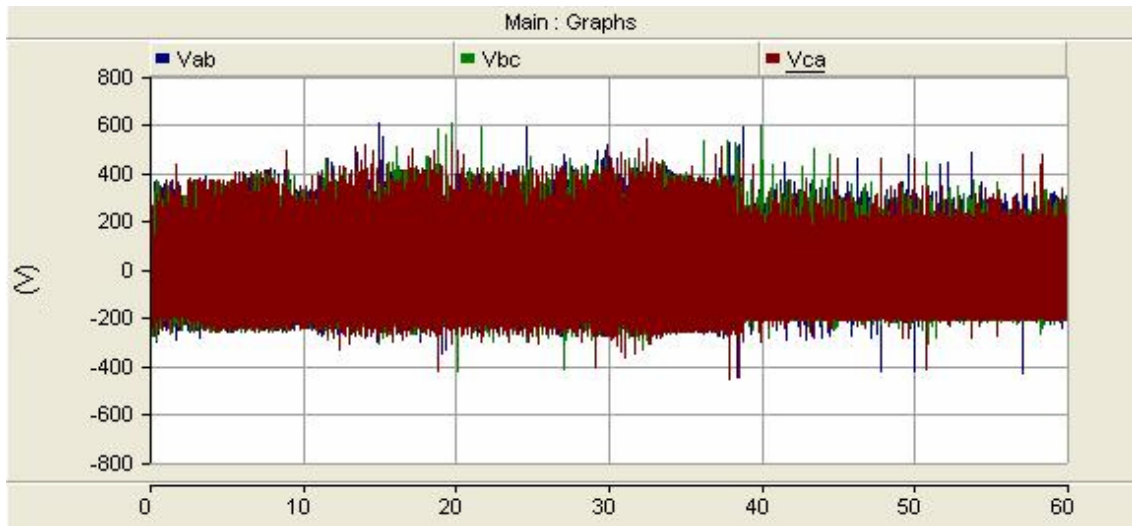


Figura 128: Tensões aplicadas ao motor.

Na Figura 129 é mostrada a tensão DC na saída do retificador (vide Figura 122).

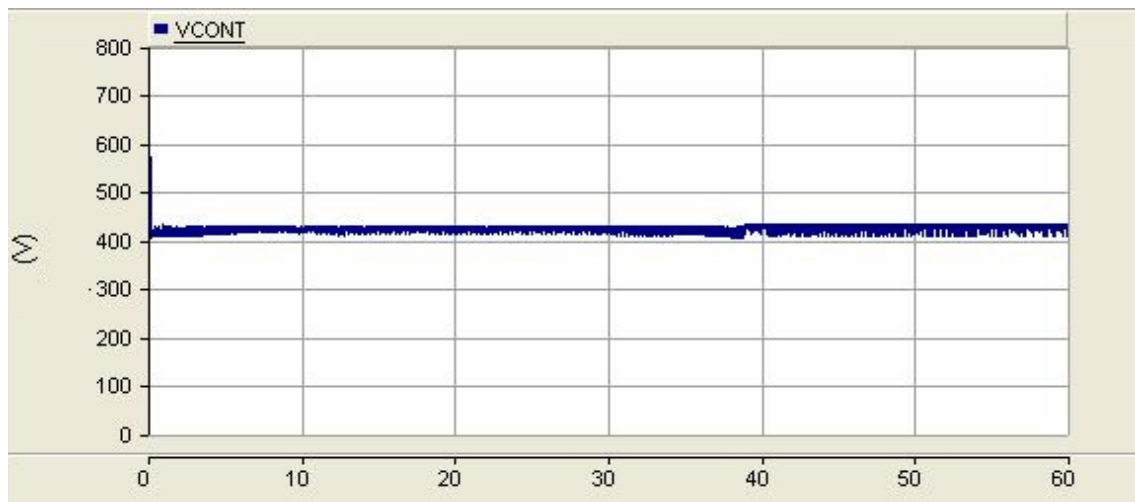


Figura 129: Tensão DC na saída do retificador.

Com a aplicação do filtro ativo (Figura 130) no secundário do autotransformador, as correntes  $i_{pa}$ ,  $i_{pb}$  e  $i_{pc}$ , vistas pelo lado primário, tornam-se senoidais e em fase com as tensões do lado primário  $V_{pa}$ ,  $V_{pb}$  e  $V_{pc}$ , conforme pode ser observado na Figura 131.

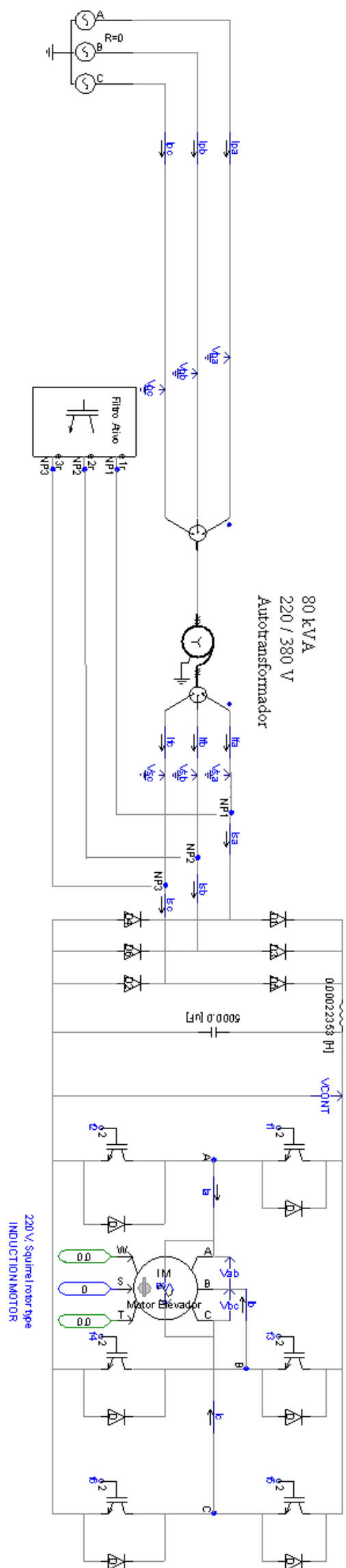


Figura 130: Aplicação do filtro ativo à entrada do acionamento VVVF.

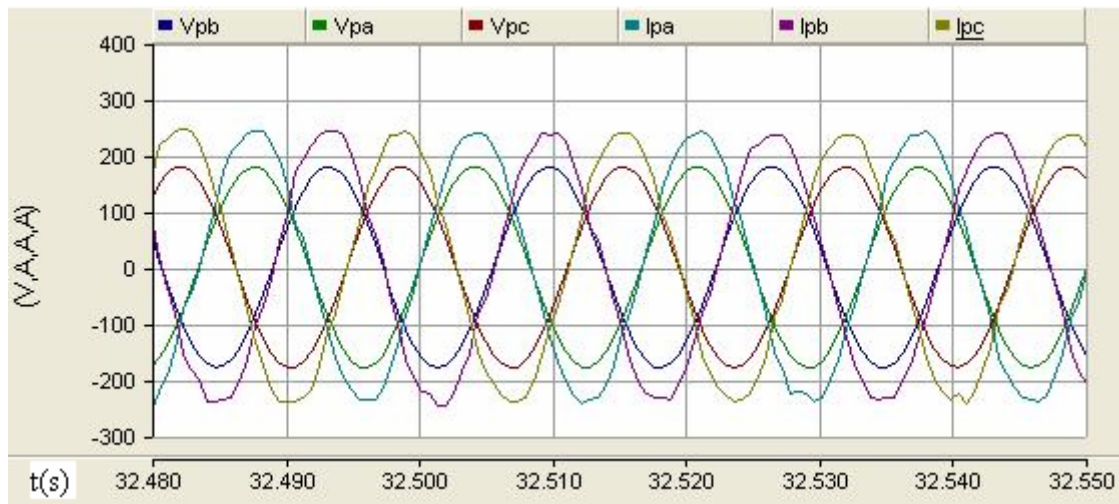


Figura 131: Formas de onda no lado de baixa (220V) do autotransformador após a aplicação de filtro ativo no lado de alta (380V)

## Capítulo 5

### Análise Econômico-Financeira

A implantação de soluções de qualidade de energia para os casos levantados nos Capítulos 3 e 4 envolve um projeto completo, ou seja, um aprofundamento muito maior do que o estudo preliminar realizado nesse trabalho.

Procedeu-se à tomada de preços no mercado visando-se obter uma estimativa de custo para soluções convencionais (bancos de capacitores e filtros passivos) e para filtros ativos.

Tal custo refere-se tão somente aos equipamentos. A instalação obviamente abrange custos de mão de obra, infra-estrutura, cablagem e proteções elétricas.

No Brasil ainda não é muito difundida a utilização de filtragem ativa na indústria.

A fabricação de filtros ativos de potência é, em grande parte, estrangeira. Em boa parte dos casos em que são aplicados, os projetos são customizados.

Não há normas da ABNT a discorrer sobre limites para distorções harmônicas em instalações. Todavia o mercado nacional tende a adotar a IEEE 519-1992 [19].

## 5.1 Solução utilizando bancos de capacitores e filtros passivos de potência

### 5.1.1 Bancos de capacitores

Para correção do fator de potência de transformadores é sempre necessário instalar um banco fixo para corrigir o transformador em vazio e um banco automático para corrigir as cargas. Isto se deve ao fato de o analisador de energia da concessionária regional, para o sistema analisado, estar instalado na média tensão, medindo a potência dos transformadores.

No caso do medidor do banco automático de capacitores é necessário instalá-lo na baixa tensão. Desta forma, quando todas as cargas forem desligadas, o controlador

do banco irá retirar todos os capacitores. Todavia, o transformador, que é uma carga, ficará sem a correção de fator de potência.

Para a correção do transformador em vazio é usual considerar de 3 a 5% da potência nominal do transformador.

No caso do banco automático, além de se calcular sua potência para a correção do fator de potência no entorno de 0,95, faz-se um dimensionamento de 30% a maior na potência reativa de correção necessária para se obter estágios vazios, no caso de uma mudança rápida de fator de potência.

Dadas essas considerações, para as cargas dos transformadores 1 e 2 da subestação 1 com disjuntores TIE abertos e a carga do transformador 2 da subestação 1 foi obtida a Tabela 34, com bancos fixos, automáticos e preços obtidos junto ao mercado.

**Tabela 34: Orçamento de bancos de capacitores**

		Preços
Transformador 1 da subestação 1		
Banco fixo para correção do fator de potência do transformador	35,1kvar, 220V, 60Hz	R\$ 5.643,50
Banco automático para correção de cargas	105,2kvar, 220V, 60Hz	R\$ 28.525,00
Subtotal		R\$ 34.168,50
Transformador 2 da subestação 1		
Banco fixo para correção do fator de potência do transformador	35,1kvar, 220V, 60Hz	R\$ 5.643,50
Banco automático para correção de cargas	70,2kvar, 220V, 60Hz	R\$ 23.871,11
Subtotal		R\$ 29.514,61
Transformador 2 da subestação 2		
Banco fixo para correção do fator de potência do transformador	35,1kvar, 440V, 60Hz	R\$ 3.233,34
Banco automático para correção de cargas	85,8kvar, 440V, 60Hz	R\$ 11.456,65
Subtotal		R\$ 14.689,99

## 5.1.2 Filtro passivo com banco de capacitores para correção de fator de potência e harmônicos de motores

Conforme já mencionada no capítulo anterior, a correção do fator de potência do acionamento *VVVF* exige um banco de capacitores com acionamento de capacitores em tempo real, o que é feito através de módulos a tiristor.

Na Tabela 35, é mostrado orçamento obtido junto ao mercado para banco de capacitores automático com filtro de harmônicos para o acionamento *VVVF*.

**Tabela 35: Orçamento de banco de capacitores com filtro de harmônicos para o acionamento *VVVF*.**

		Preços
Drive <i>VVVF</i>		
Banco fixo para correção do fator de potência do transformador em vazio	2,5kvar, 380V, 60Hz	R\$ 1.145,56
Banco automático para correção de fator de potência de motores com filtro de harmônicos	21,9kvar, 380V, 60Hz	R\$ 11.456,65

Valor unitário: R\$ 12.602,21

O custo total estimado da implementação de bancos de capacitores (casos da Tabela 34) e filtros passivos (Tabela 35), considerando apenas o custo dos equipamentos, é de R\$ 141384,15, ou R\$289,42 por kVA.

## 5.2 Solução utilizando filtros ativos de potência paralelos

Considerando-se que os filtros ativos simulados utilizam a Teoria das Potências Instantâneas e levando-se em conta que não há uma normatização relativa à como especificar filtros ativos a um fabricante, foi utilizada como critério de especificação da potência do filtro, a potência de compensação máxima requerida, acrescida de 20%.



A potência de compensação máxima foi obtida nas simulações, como consequência da aplicação da Transformada de Clarke [23].

Em todos os casos de simulação de filtragem com filtros ativos, foi compensada a potência ativa oscilante ( $\tilde{p}$ ) e a potência reativa ( $q$ ), de forma que, a potência de compensação ( $S^*$ ) é dada por  $S^* = \tilde{p} + jq$  (5.2.1)

Adicionalmente, tendo-se por base as considerações acima, foram adotadas, para efeito de obtenção de orçamentos, topologias em ponte a 6(seis) IGBTs para os filtros ativos de potência, a quatro condutores ou a três condutores, conforme o caso. Para as cargas dos transformadores 1 e 2 da subestação 1 com disjuntores *TIE* abertos e para a carga do transformador 2 da subestação 2, a topologia considerada é a da Figura 132 abaixo (a quatro condutores). Para o acionamento (*drive*) *VVVF* de elevador, a topologia em consideração é conforme a Figura 90 (a três condutores). Baseando-se nessas topologias, foi obtida a Tabela 36. Os valores da Tabela 36 foram resultado da consulta a um fabricante nacional de filtros ativos, bem como a fabricantes de UPS de potência nacionais que possuem conhecimento dos custos dos componentes necessários à construção dos filtros ativos de potência segundo as topologias adotadas, tais como: *drivers* (disparadores) de IGBTs, proteções elétricas, interface homem-máquina e outros componentes presentes em um equipamento comercial.

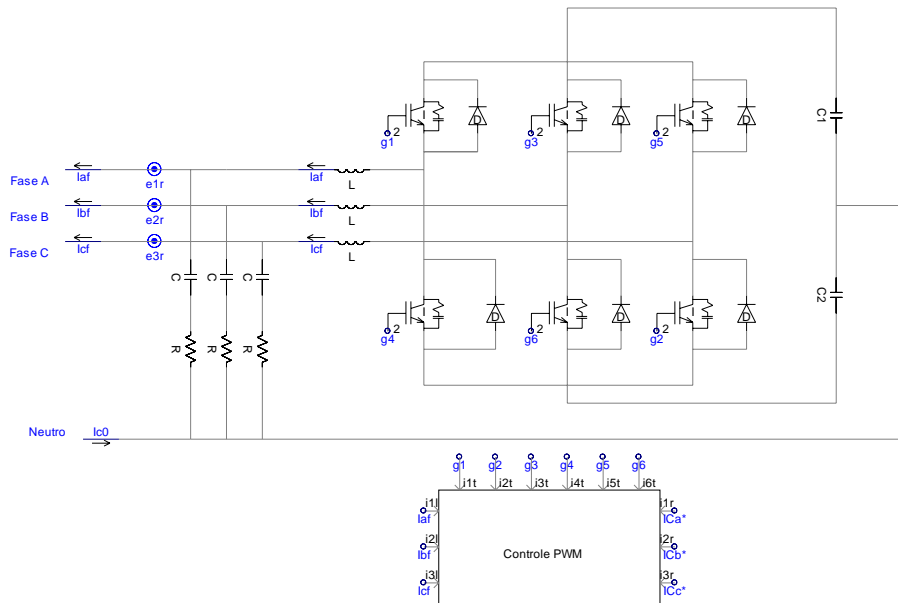


Figura 132: Topologia *Split-Capacitor* para filtro ativo a quatro condutores. [23]

**Tabela 36: Orçamento de filtros ativos.**

		Preços
Transformador 1 da subestação 1	530 kVA, 220V	R\$ 250.000,00
Transformador 2 da subestação 1	225 kVA, 220V	R\$ 120.000,00
Transformador 2 da subestação 2	315 kVA, 220V	R\$ 200.000,00
Drive VVVF	30 kVA, 380V	R\$ 125.000,00
Total de drives VVVF = 5	Valor unitário: R\$ 25.000,00	

O custo total estimado da implementação de filtros ativos de potência paralelos, considerando apenas o custo dos equipamentos, é de R\$ 695000,00 ou R\$569,67 por kVA.

No trabalho dos autores DÁVILA FILHO et al [28] foram levantados os custos de R\$264,00 por kVA para filtros ativos e R\$ 152,00 por kVA para filtros passivos. No presente trabalho, R\$569,97 por kVA para filtros ativos e R\$289,42 por kVA para filtros passivos.

A razão entre o custo do filtro ativo para o custo do filtro passivo, para o caso do trabalho dos autores DÁVILA FILHO et al [28] resultou aproximadamente 1,73. Neste trabalho, o valor encontrado foi 1,96. Tais valores são coerentes, visto que,

desconsiderando diferenças na metodologia de pesquisa de preços e dos valores observados, constatou-se que o custo da implementação de filtros ativos é aproximadamente o dobro do verificado para filtros passivos.

Foi também verificado pelos autores DÁVILA FILHO et al [28] que as potências especificadas para filtros ativos resultam maiores que para filtros passivos.

Tal diferença decorre da diferença nas premissas de projeto e do comportamento elétrico de cada filtro no sistema elétrico.

Em filtros passivos ou bancos de capacitores, corrigir o fator de potência da fundamental ao valor unitário não é viável economicamente, sendo mais usual adotar uma injeção de reativos capacitivos para atingir o fator 0,95 indutivo. A escolha do valor 0,95 para o fator de potência para fundamental, bem como a formulação do princípio que rege o projeto de filtros passivos, estão contidos no Tópico 4.1 do Capítulo 4.

No caso de filtros ativos, a compensação de fator de potência da fundamental ao valor unitário é viável e factível, pois depende do algoritmo de controle do filtro, desenvolvido em DSP ou processadores dedicados.

O filtro ativo de potência paralelo atua como uma fonte de corrente controlada que não somente corrige o fator de potência da fundamental ao valor unitário, mas também elimina harmônicos na corrente.

## Capítulo 6

### Conclusões e Trabalhos Futuros

#### 6.1 Conclusões finais

Esse trabalho constitui um estudo preliminar visando à elaboração de um projeto básico da correção do fator de potência e filtragem de harmônicos para as cargas do sistema elétrico predial do Tribunal Regional Federal da 2<sup>a</sup> Região.

Constatou-se que a conjuntura de mercado atual do Brasil ainda não contempla a fabricação de filtros ativos em escala competitiva com os produtos estrangeiros.

Há pouca oferta de filtros ativos padronizados sendo oferecidos por fabricantes e empresas nacionais e estrangeiras no Brasil. Muitos projetos de filtros ativos até o momento tendem a ser customizados a clientes industriais.

A aplicação de filtros ativos possui a vantagem de produzir uma filtragem muito mais eficaz, comparada a soluções passivas tradicionais. Mesmo diante de alterações no perfil espectral das cargas não lineares, como nas instalações prediais em análise, a qualidade da filtragem não se altera, pois esta se dá através de um algoritmo de controle que tem como variáveis de entrada as tensões e correntes medidas no sistema. Desta forma, o equipamento responde instantaneamente à carga.

Os preços de filtros ativos adicionados ao custo de infra-estrutura são demasiadamente altos para um bom custo-benefício desse investimento para as instalações estudadas. Todavia, o custo maior do filtro ativo se justifica pela correção total do fator de potência e pela filtragem harmônica, ao passo de que, nas soluções a filtros passivos, é adotada uma correção parcial do fator de potência da fundamental para 0,95 (conforme Tópico 4.1 do Capítulo 4) e ocorre uma filtragem que pode não se revelar eficaz diante de alterações no perfil espectral das cargas.

A dificuldade de obter dados técnicos sobre filtros ativos ou outros equipamentos de eletrônica de potência se deve a questões de segredo industrial e patente.

A obtenção de orçamentos foi outra dificuldade desse trabalho. Muito dificilmente as empresas se dispõem a cotar equipamentos que, em um primeiro momento, não serão comprados, haja vista tratar-se de um estudo acadêmico.

Em termos de Brasil, até o momento da presente pesquisa, foi encontrado apenas um fabricante de filtros ativos. Por meio desse, foi possível obter folhetos técnicos, manual de filtros ativos e um dos orçamentos utilizados na composição de preços do capítulo anterior.

Foram também consultados fabricantes de UPS de potência para estimar o preço final de filtros ativos baseados nas topologias apresentadas nas Figuras 90 e 132 e nas potências dimensionadas. Essas empresas conhecem o custo de fabricação de equipamentos de eletrônica de potência e lidam com fornecedores de *drivers*, controladores, capacitores, reatores, IGBTs e outros. Cabe notar que o produto final deve vir com proteções elétricas, alarmes e placa de rede ou porta serial RS-485 para supervisão remota, dentre outras características que costumam constar de equipamentos comerciais.

Nas instalações estudadas, as distorções harmônicas de tensão, na maior parte dos casos, nos pontos de acoplamento comum, excetuando-se os alimentadores de acionamentos (*drives*) de elevadores, não superam o patamar de 5%. Outro ponto importante de se considerar é que os valores de pico da carga estão em torno de 40% abaixo dos valores nominais, mesmo considerando conteúdos de distorção harmônica das correntes.

Em resumo, para os casos levantados neste trabalho, a despeito da presença de harmônicos, ainda não é viável econômica e tecnicamente aplicar soluções de filtragem, em virtude de os critérios da norma internacional (IEEE 519-1992 [19]) serem atendidos na maior parte dos casos. Todavia, num futuro próximo, com o aumento da utilização de cargas não lineares na planta e com o aumento da distorção harmônica de tensão para as proximidades de 5%, soluções de filtragem terão que ser consideradas.

Dessa forma, a realização do projeto real tenderá para as soluções convencionais.

## **6.2 Sugestões de trabalhos futuros**

Esta dissertação de mestrado tratou de estudo sobre a qualidade de energia em uma instalação elétrica predial.

Dado o caráter prático e experimental do presente trabalho, que empregou medições e simulações, constatou-se a necessidade de desenvolvimento de simuladores de sistemas elétricos que tratem de cargas variantes no tempo e que aceitem, como entrada de dados, medições obtidas em analisadores de energia elétrica de campo.

O desenvolvimento de tal ferramenta possibilitará a otimização do projeto de filtros para melhora da qualidade de energia de sistemas elétricos reais.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SIAHKALI, H., 2008, “Power Quality Indexes for Continue and Discrete Disturbances in a Distribution Area”, *2<sup>nd</sup> IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08)*, pp. 678-683, Johor Baharu, Malaysia, 2008.
- [2] SAEED, El., TANTAWI, M.,YOUSSEF, K., 2001, “Power Quality Phenomena In Academic Building”, *2001 IEEE Porto Power Tech Conference*, Porto, Portugal, 2001.
- [3] DU, Y., BURNETT, J., FU, Z., “Harmonic characteristics, limits and design strategies for compliance in office buildings”, *Industry Applications Conference, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting*, Volume 3, pp.2313-2320, St. Louis,MO,USA,1998.
- [4] SALEM, M., MOHAMED, A., SAMAD, A., MOHAMED, R., “Development of a DSP-Based Power Quality Monitoring Instrument for Real-Time Detection of Power Disturbances”, *International Conference on Power Electronics and Drives Systems – PEDS 2005*, Volume 1, pp. 304-307, Kuala Lumpur, 2005.
- [5] GRADY, M., SANTOSO, S., “Understanding Power System Harmonics”, *Power Engineering Review*, IEEE Volume 21, Issue 11, pp. c2, 2001.
- [6] DOUGLAS, J., “Power Quality Solutions”, *Power Engineering Review*, IEEE Volume 14, Issue 3, pp.3-7,1994.
- [7] ATAIDE, M., *Contribuição ao Projeto de Filtros Ativos Monofásicos de Potência*. Dissertação de M.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP,Brasil,1997.
- [8] VILLALVA,M., *Estudo e Aplicação de Filtros Ativos Paralelos para Sistemas Trifásicos com Quatro Fios*. Dissertação de M.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP,Brasil,2005.
- [9] YIN, S., LU, C., LIU, E, HUANG, Y., HUANG,C., “A Survey on High Tech Industry Power Quality Requirements”, *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, IEEE/PES Volume 1, pp.:548 – 553, 2001.
- [10] LIMONGI, L., *Filtros Ativos de Potência para Compensação de Harmônicos de Corrente e Potência Reativa*. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Pernambuco, Recife,PE, Brasil,2006.
- [11] ORTMANN, M., MUSSA, S., “Filtro Ativo Trifásico Paralelo com

Controle no Sistema de Referência Síncrona”, *VII Conferência Internacional de Aplicações Industriais - INDUSCON*, Poços de Caldas, MG, Brasil, 2008.

[12] HAFNER, A., *Estudo e Simulação dos Módulos Lógicos de Um Medidor de Qualidade de Energia Elétrica*. Dissertação de M.Sc., Curitiba, PR, Brasil, 2006.

[13] AKAGI, H., KANAZAWA, Y., NABAE, A., “Principles and Compensation Effectiveness of Instantaneous Reactive Power Compensator Devices”, *Meeting of the Power Semiconductor Researchers*, SPC-82-16, IEEE-Japan, 1982.

[14] AKAGI, H., KANAZAWA, Y., NABAE, A., “Generalized Theory of Instantaneous Reactive Power And its Applications”, *Transactions of the IEE-Japan*, Part B, pp.483-490, vol.103, no.7, 1983.

[15] AKAGI, H., KANAZAWA, Y., NABAE, A., “Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits”, *IPEC’83 – International Power Electronics Conference*, pp.1375-1386, Tokyo, Japan, 1983.

[16] AKAGI, H., KANAZAWA, Y., NABAE, A., “Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-20, no.3, pp. 625-630, 1984.

[17] MAMEDE FILHO, JOÃO, “Instalações Elétricas Industriais”, 7 ed., Rio de Janeiro, LTC - Livros Técnicos e Científicos S.A., 2007.

[18] GABIATTI, G., BONAN, G., “Paralelismo Ativo”. Disponível em: [http://www.cp.com.br/upl/artigo\\_11.pdf](http://www.cp.com.br/upl/artigo_11.pdf). Acesso em 14 jul. 2009, 16:50:45.

[19] IEEE Std 519-1992, 1993, “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”

[20] IEEE Std 1159-1995, 1995, “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”

[21] Resolução nº 505, de 26 de novembro de 2001, do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE; ANEEL – níveis de conformidade tensão de energia elétrica em regime permanente.

[22] PSCAD/EMTDC Version 4.2, Manitoba HVDC Research Center Inc.

[23] AKAGI, H., WATANABE, E., AREDES, M., *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. , 2007.

[24] BORRÉ, A., *Bidirecionamento de Potência no Tap HVDC*. Dissertação de



- M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.
- [25] MONTEIRO, L., *Algumas Contribuições para Controle de Filtros Ativos*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- [26] SALGADO, E., *Estudo Comparativo de Teorias de Potências Instantâneas*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- [27] TAVARES, P., SILVA, J., *Compensação de Reativos e Filtragem de Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência*, Target Engenharia e Consultoria Ltda, 2009.
- [28] D'ÁVILA FILHO, R. ; BRAGA, M. ; SILVA, S., “Aplicação de Filtros ativos e Passivos de Potência: Estudo de Caso.” , *VIII Induscon - Conferência Internacional de Aplicações Industriais*, Poços de Caldas, 2008.
- [29] ETAP Enterprise Solution for Electrical Power Systems, Version 7.0, Operation Technology, Inc.
- [30] MERÇON, A., *Filtros Ativos para Estações Conversoras de Corrente Contínua em Alta Tensão*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- [31] NG, K., POON, C., “Computer Simulation On a Typical VVVF Elevator Drive – Scalar Versus Vector” , *Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-97*, Hong Kong, 1997.
- [32] BOSE, B., *Modern Power Electronics and AC Drives*, Prentice Hall PTR, 2002.

## **Apêndice A**

**Folhas de dados do analisador de energia elétrica utilizado.**

# Analizador de Energia

# RE 6000



- Funções completas para análise de sistemas elétricos
- Curva de carga de motores, geradores e transformadores
- Medição e diagnóstico de distorções harmônicas
- Registro e avaliação de perturbações e transientes
- Estudos de eficiência energética
- Dimensionamento de bancos para correção do FP.



**EMBRASUL**

[www.embrasul.com.br](http://www.embrasul.com.br)



O Analisador de grandezas elétricas RE6000 é o produto da pesquisa, desenvolvimento e produção de registradores pela Embrasul por mais de 20 anos. Agregando alta performance e robustez à ergonomia e fácil manuseio do instrumento, este equipamento se torna uma poderosa ferramenta no estudo e diagnóstico de sistemas elétricos.

Sua confiabilidade e precisão são sustentadas pelo uso da tecnologia de processamento em DSP e conversores A/D de alta resolução.

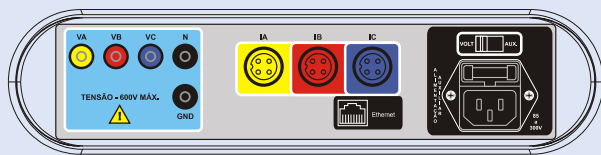
Aliado ao moderno software ANL6000, desenvolvido para análise e estudo dos registros, habilita-se a manipulação dos dados e configuração destes de acordo com as preferências do usuário.

## MODELOS



O RE6000 é disponibilizado em dois modelos distintos, diferenciados pela estrutura de aquisição dos sinais de tensão e corrente:

### RE 6000/B

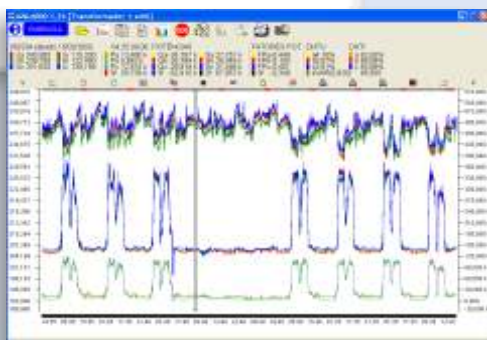


**RE6000/B** – modelo básico, dimensionado para atender os mais variados sistemas elétricos. Dotado de entradas trifásicas de corrente e tensão, este equipamento permite que se efetuem registros de diversas grandezas em intervalos de integração que variam de 100ms a 30min.

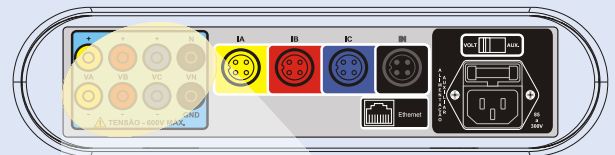
Geração automática de relatórios e curvas de carga, que oferecem a leitura trifásica ou individualizada de cada grandeza no intervalo de tempo desejado pelo usuário.

Análise dos registros em conformidade com a resolução 505 da ANEEL.

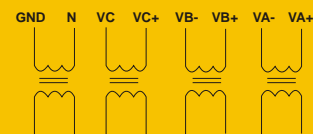
Simulação da correção do FP em instalações com excesso reativo.



### RE 6000/N



#### Medição - 600Vac



**RE6000/N** – este modelo, em virtude da sua particular configuração de entradas, dispõe ao usuário uma ferramenta completa para análise de sistemas desequilibrados. Caracterizado pelas mesmas funções de diagnóstico e registro do modelo básico, este módulo oferece ao usuário a leitura de corrente e tensão (Neutro - Terra) do condutor neutro.

Aliado aos modernos conceitos de qualidade de energia, onde o condutor neutro assume significativa importância, oferece ainda a possibilidade de registro de sistemas paralelos, dotados de neutros distintos. As entradas de tensão são individualizadas, possuindo cada fase um referencial separado para a aquisição do sinal de tensão.

### Grandezas Registradas

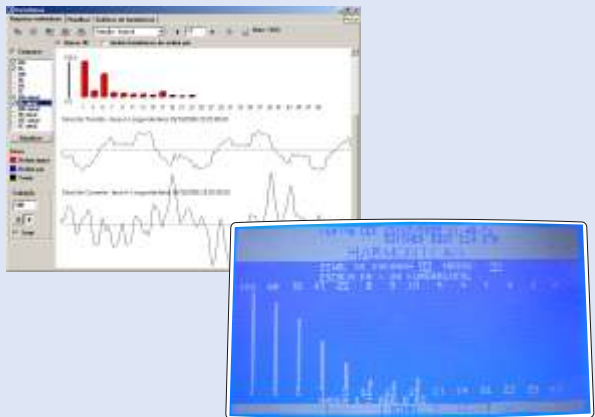
(Para toda linha RE6000)

VRMS, ARMS, Hz, W, VAR, VA,  
FP, DHT, Kwh, KVARh, KVAh.



O RE6000 permite que se agreguem às funções básicas de medição de grandezas, duas ferramentas específicas para o estudo e diagnóstico da qualidade de energia. Estes módulos visam atender às necessidades específicas de cada usuário.

### MÓDULO H



Com este módulo, o equipamento permite a medição e registro de harmônicas de tensão e corrente até a 50ª ordem. A medição é feita numa janela de 128ms, em cada um dos canais de aquisição, através de modernas rotinas de tratamento do sinal e decomposição espectral.

Os registros são facilmente manipulados pelo usuário, identificando o momento de ocorrência, ordem, amplitude e forma de onda de cada uma das fases de tensão e corrente do sistema em análise.

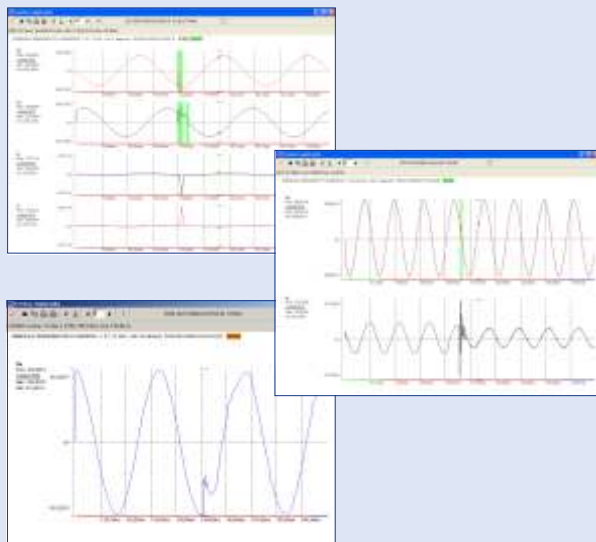
### MÓDULO T

O módulo de transientes transforma o RE6000 numa ferramenta capaz de registrar formas de onda de tensão e corrente na frequência de 8kHz (resolução).

Isto permite que o usuário visualize perturbações e distorções capazes de desestabilizar sistemas eletrônicos e importantes setores de uma indústria, classificando SAG's e SWELL's de acordo com a IEEE1159.

Além disso, este recurso permite que se observem as correntes de partida de motores e distúrbios no sinal de alimentação, causados pela entrada de grandes cargas na rede.

Este módulo é amplamente configurável, permitindo que o "trigger" seja dimensionado de acordo com a exigência do usuário.



### ACESSÓRIOS DO CONJUNTO RE 6000



RE 6000



Cabo de Alimentação Auxiliar



Cabo de Tensão



Sensor de corrente TI3000 (opcional)



Maleta



Cabo de Comunicação



Software ANL 6000



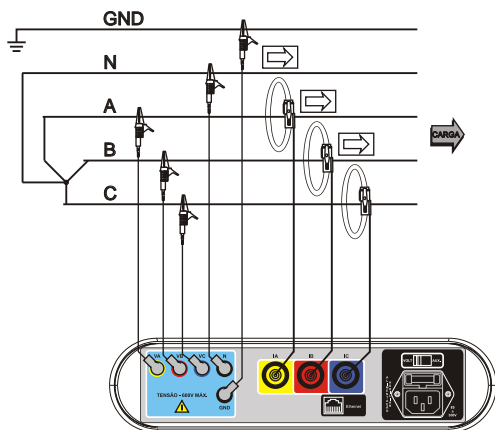
Manuais



Alicate EB100 (opcional)



RE6000/B TRIFÁSICO ESTRELA:



RE6000/B TRIFÁSICO DELTA

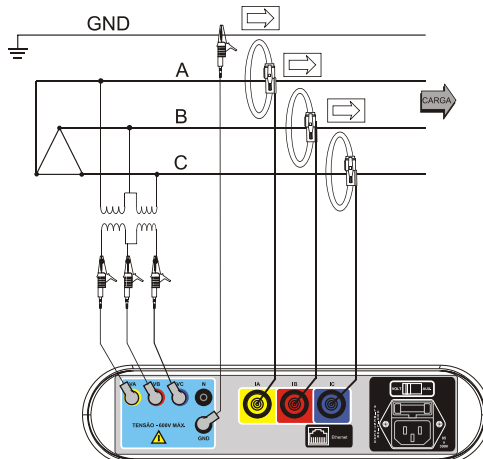


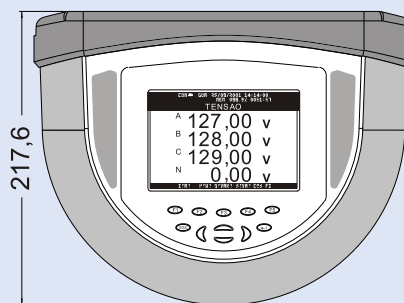
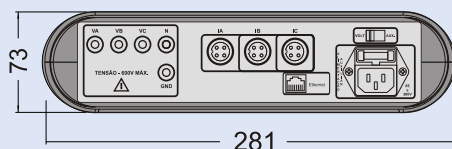
DIAGRAMA FASORIAL



FORMAS DE ONDA



## DIMENSÕES



## ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

Medição de Tensão	30 à 600 V <sub>AC</sub>
Classe de exatidão de Tensão	0,5% - 30 a 100 V 0,2% - 100 a 500 V 0,5% - 500 a 600 V
Medição de Corrente	Através de Sensor Flexível ou Alicates de Corrente
Classe de exatidão para Corrente	0,2% entre 5% a 100% da Escala de Corrente
Erro de Ângulo de Fase	< 0,3 Graus
Harmônicas	1ª a 50ª ordem, pares e ímpares, simultaneamente para 3 canais de tensão e 3 canais de corrente a partir de 100 ms.
Transientes	Duração mínima para detecção: 130 us (amostragem de 8kHz)
Frequência	50/60 Hz

Alimentação	85 à 300 V
Consumo Máximo	10 VA
Isolação	2,5 kV - CAT III
Peso	1,9 Kg
Dimensões	281x217,6x73
Comunicação	Protocolo TCP/IP - Ethernet
Período de Integração	100 ms a 30 min
Amostragem	A/D de 16 bits 133 amostras por ciclo (8 khz) Simultaneamente em todos canais
Memória de massa	8MB à 256MB



**EMBRASUL**

Embrasul Indústria Eletrônica Ltda  
Av. Bahia, 684 - Porto Alegre - RS - Brasil  
90240.551  
Fone: 51 3358.4000 - Fax: 51 3358.4022  
Vendas: 51 3358.4006  
E-mail: [embrasul@embrasul.com.br](mailto:embrasul@embrasul.com.br)  
[www.embrasul.com.br](http://www.embrasul.com.br)

Agente Técnico

Para mais informações contate-nos:

[www.embrasul.com.br](http://www.embrasul.com.br)

## **Apêndice B**

**Documento de autorização e atestado de autoria emitido pelo Diretor Geral do Tribunal Regional Federal da 2ª Região acerca das medições elétricas realizadas.**



PODER JUDICIÁRIO  
TRIBUNAL REGIONAL FEDERAL DA 2ª REGIÃO

## DECLARAÇÃO

O signatário declara, para os devidos fins, que o servidor ROBERTO ALEXANDRE VITORIA DE MORAES FILHO, matrícula nº 11.669, técnico judiciário/telecomunicações e eletricidade, do quadro de pessoal permanente do Tribunal Regional Federal – 2ª Região, com sede na Rua Acre, nº 80, Centro, Rio de Janeiro, Estado do RJ, é o autor das medições efetuadas com analisador de energia elétrica nas instalações elétrica deste órgão, que constam em sua dissertação de mestrado para a Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, com o título *Estudo de Qualidade de Energia em Um Prédio Comercial*, e que essas medições foram devidamente autorizadas pela direção da Divisão de Administração Predial, da estrutura organizacional administrativa desta Corte de Justiça.

Rio de Janeiro, 9 de outubro de 2009.

  
**Luiz Carlos Carneiro da Paixão**  
**Diretor Geral**