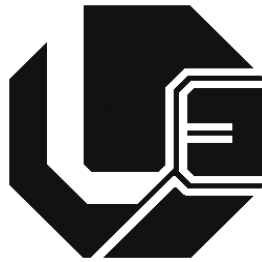


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica
em um Campus Universitário

Laura Chiovato Silva

Uberlândia
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S586a
2014 Silva, Laura Chiovato, 1985-
Avaliação da qualidade da energia elétrica em um campus
universitário / Laura Chiovato Silva. - 2014.
252 f. : il.

Orientador: José Rubens Macedo Júnior.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Instalações elétricas - Teses. 3.
Energia elétrica - Qualidade - Teses. I. Macedo Júnior, José Rubens. II.
Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

**Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica em
um Campus Universitário**

Dissertação apresentada por Laura Chiovato Silva à Universidade Federal de Uberlândia para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Aprovado em 05 de dezembro de 2014.

BANCA EXAMINADORA:

José Rubens Macedo Junior, **Dr – UFU (Orientador)**

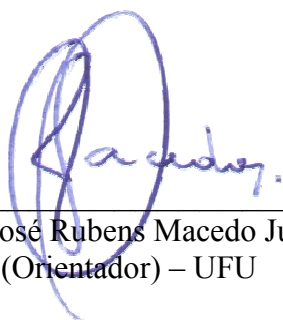
Arnaldo José Pereira Rosentino Júnior, **Dr – UFTM**

Isaque Nogueira Gondim, **Dr – UFU**

Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica em um Campus Universitário

Laura Chiovato Silva

Dissertação apresentada por Laura Chiovato Silva à
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.



Prof. José Rubens Macedo Junior, Dr.
(Orientador) – UFU

Prof. Edgard A. Lamounier Júnior, PhD.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Aglaia e Juvenal, ao meu irmão Lucas, aos meus avós, ao meu esposo William e a todos que de alguma forma contribuíram para esta realização.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a **Deus** pela vida, pela saúde e pelas oportunidades.

Ao meu orientador Prof. **José Rubens Macedo Junior** por todo incentivo, confiança e ensinamentos.

À **minha família** e ao meu esposo **William Bernardes Alves** pelo apoio incondicional, compreensão e incentivo.

Aos engenheiros **Geraldo Toshio Matumoto, Márcio Henrique Bassi e Fernando Dias da Cunha** pelo incentivo, apoio e auxílio.

Aos técnicos **Divino Roberto Silva, Paulo Roberto Aparecido Fernandes, Irandir José Novato e Hildo Divino Bota** pelo auxílio nas medições em campo.

Aos amigos do Laboratório de Qualidade da Energia pelo apoio e auxílio.

Aos professores **Antônio Carlos Delaiba, Arnaldo José Pereira Rosentino Júnior, Isaque Nogueira Gondim, José Carlos de Oliveira, José Wilson Resende, Marcelo Lynce Ribeiro Chaves e Milton Itsuo Samesima** pelo auxílio e conhecimentos transmitidos.

À minha amiga da Pós-Graduação **Larissa Marques Peres** pelo apoio e amizade.

Enfim, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a viabilização desta tese de doutorado.

RESUMO

O crescimento e a modernização da carga das universidades federais ao longo dos últimos anos, em função de seus planos de expansão propostos e financiados com recursos do Programa de Apoio a Planos de Reestruturação e Expansão das Universidades Públicas (REUNI), sugerem a melhoria das instalações elétricas destas instituições para atender as novas demandas de energia elétrica de forma planejada e eficiente. O assunto relacionado aos crescentes custos com a energia elétrica e investimentos nas instalações elétricas em instituições de ensino, diante da sua relevância econômica, representa, na atualidade, tema de extrema importância. Por conseguinte, constata-se, no momento, esforços direcionados para melhor consubstanciar os procedimentos de um diagnóstico de eficiência e qualidade da energia elétrica de um campus universitário. Nesse contexto se insere a presente dissertação de mestrado, a qual se encontra associada a um plano de medição, a métodos para análise e comparação de dados com valores de referência e ao uso de ferramentas para modelagens e simulações computacionais. Nesse sentido, o presente trabalho apresenta quatro contribuições ao estado da arte atual. A primeira contribuição está associada com a obtenção de curvas de carga típicas e de tabelas de análise da modalidade tarifária mais adequada para um campus universitário. A segunda contribuição do trabalho, por sua vez, está vinculada com a metodologia de análise de dados e de diagnóstico da instalação quanto à qualidade da energia elétrica. Na sequência, como terceira contribuição do trabalho, tem-se a modelagem do sistema elétrico da instalação em estudo utilizando-se a ferramenta computacional ATP (*Alternative Transients Program*). Finalmente, propõe-se uma modelagem e simulação computacional para identificar as contribuições harmônicas tanto da concessionária de energia elétrica local quanto das instalações do campus, junto ao ponto de entrega de energia elétrica. Os resultados obtidos mostram que as metodologias utilizadas são de grande utilidade na gestão diária dos processos associados ao uso da energia elétrica nas instalações de uma universidade.

Palavras-Chave: diagnóstico da instalação, eficiência energética, qualidade da energia elétrica, medições de campo, modelagem de componentes elétricos.

ABSTRACT

The development and expansion of the federal universities throughout the past years, due to the plans of expansion implemented with the funds from REUNI (The program of supporting for the restructuring and expansion of Federal Universities), suggest the necessity of improving the electrical installations of these institutions in order to meet the new power demand in a planned and efficient way. The subject which is related to the growing costs of electrical energy and investments in electrical installations in teaching institutions, faced with its economic relevance, represents, nowadays, an extremely relevant theme. Therefore, currently, it is possible to observe efforts directed to enhance the procedure of quality and efficiency diagnosis of the electrical energy of a *campus*. Embedded in this context is this dissertation, which is linked to a measurement plan, analysis methods and data comparison with reference values and the use of tools for modeling and computer simulation. This way, the present work presents four different kinds of contribution to the current state-of-the-art. The first contribution is associated to the obtention of typical charge curves and tax modal analysis chart which seem to be most adequate for a university campus. The second contribution is associated to the methodology of data analysis and the installation diagnosis in terms of power quality. As a third contribution of this work, we have the modeling of the electrical system of installation with the use of the ATP (*Alternative Transients Program*) computer tool. As a final contribution one can highlight the computer modeling and simulation to identify the harmonic contributions both to the local power utility and to the campus installations, together with the point of common coupling. The obtained results show that the methodology in use is very useful in the daily management of the processes associated with the use of the electrical energy in the installations of a university.

Key-words: installation diagnosis, energy efficiency, power quality, field measurements, electrical component modeling.

SUMÁRIO

Capítulo I

Introdução Geral

1.1 – Considerações iniciais	19
1.2 – Contextualização do tema.....	22
1.3 – Estado da arte.....	23
1.4 – Objetivos e contribuições oferecidas por esta tese	27
1.5 – Estrutura da tese.....	29

Capítulo II

Metodologia para Diagnóstico de Eficiência Energética na Instalação Elétrica do Campus

2.1 – Considerações iniciais	31
2.2 – Sistema elétrico e plano de medição.....	32
2.3 – Determinação de curvas de carga típicas diária e semanal.....	44
2.4 – Análise demanda x temperatura	54
2.5 – Curva de carga e fator de carga dos transformadores.....	58
2.6 – Fator de potência	64
2.7 – Gestão de faturas e monitoramento da demanda.....	70
2.8 – Considerações finais	85

Capítulo III

Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

3.1 – Considerações iniciais	89
3.2 – Corrente em regime permanente.....	90
3.3 – Tensão em regime permanente	95
3.4 – Distorções da forma de onda	102
3.5 – Desequilíbrios de tensão	136
3.6 – Flutuações de tensão	143
3.7 – Considerações finais	154

Capítulo IV

Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica no Ponto de Entrega do Campus

4.1 – Considerações iniciais	157
4.2 – Corrente em regime permanente.....	158
4.3 – Tensão em regime permanente	163
4.4 – Distorções harmônicas.....	168
4.5 – Desequilíbrios de tensão	198
4.6 – Flutuações de tensão	202
4.7 – Considerações finais	206

Capítulo V

Análise da Contribuição Harmônica

5.1 – Considerações iniciais	209
5.2 – Modelagem do sistema elétrico no ATP.....	210
5.3 – Simulação	227
5.4 – Considerações finais	237

Capítulo VI

Conclusões

Conclusões.....	239
-----------------	-----

Publicações

Congressos, seminários e conferências internacionais	246
--	-----

Referências Bibliográficas

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	247
----------------------------------	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Diagrama unifilar simplificado das instalações elétricas do Campus Santa Mônica da UFU	33
Figura 2.2 – Foto do medidor da concessionária para faturamento na cabine de entrada do Campus Santa Mônica da UFU	35
Figura 2.3 – Foto do medidor de qualidade da energia e do cubículo de medição para estudo na cabine de entrada do Campus Santa Mônica da UFU	36
Figura 2.4 – Mapa de localização das subestações de energia elétrica e dos caminhos que as interligam do Campus Santa Mônica da UFU	44
Figura 2.5 - Massa de dados inicial normalizada das 42 quartas-feiras letivas do ano de 2013.	48
Figura 2.6 - Número de curvas agrupadas em cada neurônio e Mapa de Kohonen	49
Figura 2.7 - Índice de Davies-Bouldin e da Função do Erro.	50
Figura 2.8 - Clusters.	50
Figura 2.9 - Duas curvas de carga clusters e a curva de carga tipo de uma quarta-feira letiva.	51
Figura 2.10 - Seis curvas de carga clusters e a curva de carga tipo de uma quarta-feira de férias	52
Figura 2.11 - Curva de carga típica de uma semana letiva.....	53
Figura 2.12 - Curva de carga típica de uma semana de férias	54
Figura 2.13 - Relação entre demanda e temperatura em um dia letivo com temperaturas mais elevadas no período da tarde no ano de 2013.....	56
Figura 2.14 - Relação entre demanda e temperatura em um dia letivo com temperaturas mais baixas no período da tarde no ano de 2013	57
Figura 2.15 – Comportamento semanal das potências ativa, aparente e reativa em cada ponto de medição dos Pontos 1 ao 6.....	59
Figura 2.16 – Comportamento semanal das potências ativa, aparente e reativa em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11	60
Figura 2.17 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para cada ponto de medição em relação à potência aparente dos transformadores dos Pontos 1 ao 11	62
Figura 2.18 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para as medições no ponto de entrada em relação ao fator de potência.	66
Figura 2.19 – Comportamento semanal do fator de potência no ponto de entrada para as medições de 1 a 6.....	68
Figura 2.20 – Comportamento semanal do fator de potência no ponto de entrada para as medições de 7 a 11.....	69
Figura 2.21 - Curva dos valores das faturas mensais durante o ano de 2013 para as modalidades tarifárias horária verde e azul.	78
Figura 2.22 – Evolução da demanda máxima anual de 2011 e 2012 e das demandas máximas mensais para 2013	83
Figura 3.1 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para cada ponto de medição em relação à corrente de fase em regime permanente dos Pontos 1 ao 11.....	91
Figura 3.2 – Comportamento semanal da corrente em regime permanente em cada ponto de medição dos Pontos 1 ao 6	93
Figura 3.3 – Comportamento semanal da corrente em regime permanente em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11	94

Figura 3.4 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para cada ponto de medição em relação à tensão em regime permanente dos pontos com tensão fase-neutro nominal de 127V ..	97
Figura 3.5 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para cada ponto de medição em relação à tensão em regime permanente dos pontos com tensão fase-neutro nominal de 220 V ..	98
Figura 3.6 – Comportamento semanal da tensão fase-neutro em regime permanente em cada ponto de medição dos Pontos 1 ao 6.....	100
Figura 3.7 – Comportamento semanal da tensão fase-neutro em regime permanente em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11.....	101
Figura 3.8 – Série de Fourier, decomposição de uma onda distorcida em uma soma de senoides fundamental e harmônicas	103
Figura 3.9 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para cada ponto de medição em relação à distorção harmônica total de corrente dos Pontos 1 ao 11	107
Figura 3.10 – Comportamento semanal da distorção harmônica total de corrente em cada ponto de medição dos Pontos 1 ao 6.....	109
Figura 3.11 – Comportamento semanal da distorção harmônica total de corrente em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11.....	110
Figura 3.12 – Espectro de frequência da corrente em cada ponto de medição dos Pontos 1 ao 6	112
Figura 3.13 – Espectro de frequência da corrente em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11	113
Figura 3.14 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para cada ponto de medição em relação à distorção harmônica individual de corrente de ordem 3 dos Pontos 1 ao 11	115
Figura 3.15 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de corrente de ordem 3 em cada ponto de medição dos Pontos 1 ao 6	116
Figura 3.16 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de corrente de ordem 3 em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11	117
Figura 3.17 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para cada ponto de medição em relação à distorção harmônica individual de corrente de ordem 5 dos Pontos 1 ao 11	118
Figura 3.18 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de corrente de ordem 5 em cada ponto de medição dos Pontos 1 ao 6	119
Figura 3.19 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de corrente de ordem 5 em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11	120
Figura 3.20 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para cada ponto de medição em relação à distorção harmônica total de tensão dos Pontos 1 ao 11	123
Figura 3.21 – Comportamento semanal da distorção harmônica total de tensão em cada ponto de medição dos Pontos 1 ao 6.....	125
Figura 3.22 – Comportamento semanal da distorção harmônica total de tensão em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11.....	126
Figura 3.23 – Espectro de frequência da tensão em cada ponto de medição dos Pontos 1 ao 6	127
Figura 3.24 – Espectro de frequência da tensão em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11	128
Figura 3.25 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para cada ponto de medição em relação à distorção harmônica individual de tensão de ordem 5 dos Pontos 1 ao 11	130
Figura 3.26 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de tensão de ordem 5 em cada ponto de medição dos Pontos 1 ao 6	131
Figura 3.27 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de tensão de ordem 5 em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11	132

Figura 3.28 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para cada ponto de medição em relação à distorção harmônica individual de tensão de ordem 7 dos Pontos 1 ao 11	133
Figura 3.29 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de tensão de ordem 7 em cada ponto de medição dos Pontos 1 ao 6	134
Figura 3.30 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de tensão de ordem 7 em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11	135
Figura 3.31 – Três sistemas equilibrados de fasores (componentes de sequência positiva, negativa e zero).....	136
Figura 3.32 - Três fasores desequilibrados de tensão resultantes da soma gráfica dos três sistemas equilibrados de fasores (componentes de sequência positiva, negativa e zero)	137
Figura 3.33 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para cada ponto de medição em relação ao desequilíbrio de tensão dos Pontos 1 ao 11	140
Figura 3.34 – Comportamento semanal do fator de desequilíbrio de tensão em cada ponto de medição dos Pontos 1 ao 6	141
Figura 3.35 – Comportamento semanal do fator de desequilíbrio de tensão em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11	142
Figura 3.36 – Envelope de modulação superior e inferior da tensão	143
Figura 3.37 – Distribuição acumulada complementar da sensação de cintilação	145
Figura 3.38 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para cada ponto de medição em relação à severidade de flicker de curta duração dos Pontos 1 ao 11, exceto Pontos 6 e 11..	147
Figura 3.39 – Comportamento semanal da severidade de flicker de curta duração em cada ponto de medição dos Pontos 1 ao 6.....	148
Figura 3.40 – Comportamento semanal da severidade de flicker de curta duração em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11.....	149
Figura 3.41 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para cada ponto de medição em relação à severidade de flicker de longa duração dos Pontos 1 ao 11, exceto Pontos 6 e 11.	150
Figura 3.42 – Comportamento semanal da severidade de flicker de longa duração em cada ponto de medição dos Pontos 1 ao 6.....	152
Figura 3.43 – Comportamento semanal da severidade de flicker de longa duração em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11.....	153
Figura 4.1 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para as medições no ponto de entrada em relação à corrente de fase em regime permanente	159
Figura 4.2 – Comportamento semanal da corrente de fase em regime permanente no ponto de entrada para as medições de 1 a 6.....	161
Figura 4.3 – Comportamento semanal da corrente de fase em regime permanente no ponto de entrada para as medições de 7 a 11.....	162
Figura 4.4 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para as medições no ponto de entrada em relação à tensão fase-fase em regime permanente	164
Figura 4.5 – Comportamento semanal da tensão fase-fase em regime permanente no ponto de entrada para as medições de 1 a 6.....	166
Figura 4.6 – Comportamento semanal da tensão fase-fase em regime permanente no ponto de entrada para as medições de 7 a 11.....	167
Figura 4.7 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para as medições no ponto de entrada em relação à distorção harmônica total de corrente.....	169
Figura 4.8 – Comportamento semanal da distorção harmônica total de corrente no ponto de entrada para as medições de 1 a 6.....	171
Figura 4.9 – Comportamento semanal da distorção harmônica total de corrente no ponto de entrada para as medições de 7 a 11.....	172
Figura 4.10 – Espectro de frequência da corrente no ponto de entrada para as medições de 1 a 6	174

Figura 4.11 – Espectro de frequência da corrente no ponto de entrada para as medições de 7 a 11	175
Figura 4.12 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para as medições no ponto de entrada em relação à distorção harmônica individual de corrente de ordem 3.....	176
Figura 4.13 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de corrente de ordem 3 no ponto de entrada para as medições de 1 a 6	178
Figura 4.14 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de corrente de ordem 3 no ponto de entrada para as medições de 7 a 11	179
Figura 4.15 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para as medições no ponto de entrada em relação à distorção harmônica individual de corrente de ordem 5.....	180
Figura 4.16 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de corrente de ordem 5 no ponto de entrada para as medições de 1 a 6	182
Figura 4.17 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de corrente de ordem 5 no ponto de entrada para as medições de 7 a 11	183
Figura 4.18 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para as medições no ponto de entrada em relação à distorção harmônica total de tensão.....	186
Figura 4.19 – Comportamento semanal da distorção harmônica total de tensão no ponto de entrada para as medições de 1 a 6.....	187
Figura 4.20 – Comportamento semanal da distorção harmônica total de tensão no ponto de entrada para as medições de 7 a 11.....	188
Figura 4.21 – Espectro de frequência da tensão no ponto de entrada para as medições de 1 a 6	190
Figura 4.22 – Espectro de frequência da tensão no ponto de entrada para as medições de 7 a 11	191
Figura 4.23 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para as medições no ponto de entrada em relação à distorção harmônica individual de tensão de ordem 5	192
Figura 4.24 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de tensão de ordem 5 no ponto de entrada para as medições de 1 a 6.....	193
Figura 4.25 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de tensão de ordem 5 no ponto de entrada para as medições de 7 a 11.....	194
Figura 4.26 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para as medições no ponto de entrada em relação à distorção harmônica individual de tensão de ordem 7	195
Figura 4.27 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de tensão de ordem 7 no ponto de entrada para as medições de 1 a 6.....	196
Figura 4.28 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de tensão de ordem 7 no ponto de entrada para as medições de 7 a 11.....	197
Figura 4.29 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para as medições no ponto de entrada em relação ao desequilíbrio de tensão	199
Figura 4.30 – Comportamento semanal do fator de desequilíbrio de tensão no ponto de entrada para as medições de 1 a 6.....	200
Figura 4.31 – Comportamento semanal do fator de desequilíbrio de tensão no ponto de entrada para as medições de 7 a 11.....	201
Figura 4.32 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para as medições no ponto de entrada em relação à severidade de flicker de curta duração	203
Figura 4.33 – Comportamento semanal da severidade de flicker de curta duração no ponto de entrada para as medições de 1 a 6.....	204
Figura 4.34 – Comportamento semanal da severidade de flicker de curta duração no ponto de entrada para as medições de 7 a 11.....	205
Figura 5.1 – Diagrama unifilar do sistema elétrico da universidade, com destaque para a rede da concessionária e para o ramal do transformador TR05.1	211

Figura 5.2 – Representação da rede da concessionária de energia elétrica do sistema em estudo no ATP	212
Figura 5.3 – Diagrama unifilar do ramal do transformador TR05.1	213
Figura 5.4 – Representação dos cabos de média e baixa tensão do sistema elétrico em estudo que usa parâmetros concentrados do modelo pi no ATP	217
Figura 5.5 – Representação das chaves do sistema elétrico em estudo no ATP	217
Figura 5.6 – Representação dos elementos que compõem o modelo disjuntor trifásico no ATP	219
Figura 5.7 – Representação do modelo disjuntor trifásico no ATP	219
Figura 5.8 – Representação dos transformadores do sistema elétrico em estudo no ATP	219
Figura 5.9 – Curva de magnetização (BxH) da chapa de aço silício de grãos orientados de 0,3 mm, utilizada na construção do núcleo dos transformadores em estudo.....	222
Figura 5.10 – Representação do ramal do transformador TR05.1 no ATP	225
Figura 5.11 – Representação do sistema elétrico da universidade no ATP.....	226
Figura 5.12 – Representação das fontes de corrente harmônicas por fase do sistema elétrico em estudo no ATP.....	231
Figura 5.13 – Representação completa do ramal do transformador TR05.1 no ATP para simulação, inclusive da carga e da injeção harmônica de corrente	232
Figura 5.14 – Representação completa do sistema no ATP para simulação, inclusive das cargas e das injeções harmônicas de corrente	234
Figura 5.15 – Distorção harmônica individual de tensão medida e simulada no ponto de entrega para cada fase do sistema elétrico em estudo	236

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Características básicas dos transformadores que compõem o sistema elétrico da universidade.....	43
Tabela 2.2 - Tarifas indicadas na Resolução Homologatória ANEEL nº1.507, de 5 de abril de 2013	72
Tabela 2.3 - Demandas registradas e faturadas e energia consumida pela universidade no ano de 2013	76
Tabela 2.4 - Valores que compõem a fatura mensal dos meses de 2013 para as modalidades tarifárias horária verde e azul	77
Tabela 2.5 - Demandas registradas e faturadas e energia consumida pela universidade no ano de 2013 para a demanda contratada sugerida	80
Tabela 2.6 - Valores que compõem a fatura mensal dos meses de 2013 para as modalidades tarifárias horária verde e azul para a demanda contratada sugerida	81
Tabela 2.7 - Valor da fatura anual de 2013 para as modalidades tarifárias horária verde e azul, considerando a demanda contratada real e a sugerida	82
Tabela 2.8 - Demanda máxima anual e respectivos mês e período de registro dos anos de 2011, 2012 e 2013.....	85
Tabela 3.1 – Faixa de variação da tensão de leitura para tensão nominal igual ou inferior a 1kV segundo o módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição	96
Tabela 3.2 –Valores de referência globais das distorções harmônicas totais.....	121
Tabela 3.3 - Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental) para tensões nominais inferiores a 1000 V	122
Tabela 3.4 –Valores de referência para flutuações de tensão.....	146
Tabela 4.1 – Valores permitidos para as variações de tensão nominal superior a 1kV e inferior a 69kV segundo o Prodist, módulo 8, da ANEEL.....	163
Tabela 4.2 - Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão, em percentagem da tensão fundamental, para tensões maiores que 1kV e menores ou iguais a 13,8 kV	185
Tabela 5.1 – Características dos cabos de média tensão e seus respectivos parâmetros de entrada no elemento do ATP	215
Tabela 5.2 – Características dos cabos de baixa tensão e seus respectivos parâmetros de entrada no elemento do ATP	216
Tabela 5.3 – Características dos disjuntores e seus respectivos parâmetros de entrada no elemento do ATP.....	218
Tabela 5.4 – Características dos transformadores do sistema elétrico em estudo	220
Tabela 5.5 – Parâmetros de entrada no elemento transformador do ATP.....	221
Tabela 5.6 – 10 pontos (BxH) extraídos da curva de magnetização da chapa de aço silício de grãos orientados e os respectivos pontos corrente x fluxo concatenado	222
Tabela 5.7 – Pontos corrente x fluxo concatenado do transformador TR05.1	224
Tabela 5.8 – Pontos corrente x fluxo concatenado de todos os transformadores que compõem o sistema elétrico da universidade	224
Tabela 5.9 – Corrente máxima e correspondentes potências ativa e reativa nas três fases do transformador TR05.1 na quinta-feira de medição 09/01/2014	227
Tabela 5.10 – Resistência e indutância da carga máxima do transformador TR05.1 nas três fases na quinta-feira de medição 09/01/2014	228

Tabela 5.11 – Corrente máxima e correspondentes potências ativa e reativa nas três fases de todos os transformadores que compõem o sistema elétrico da universidade na quinta-feira de sua semana de medição.....	229
Tabela 5.12 – Resistência, indutância e capacitância da carga máxima de todos os transformadores que compõem o sistema elétrico da universidade, nas três fases, na quinta-feira de sua semana de medição	230
Tabela 5.13 – Correntes harmônicas máximas nas três fases do transformador TR05.1 na quinta-feira de medição 09/01/2014.....	231
Tabela 5.14 – Correntes harmônicas máximas de pico nas três fases do transformador TR05.1 na quinta-feira de medição 09/01/2014	232
Tabela 5.15 – Correntes harmônicas máximas de pico nas três fases de todos os transformadores que compõem o sistema elétrico da universidade na quinta-feira de suas semanas de medição	233

LISTA DE SÍMBOLOS

P_{Normal}	- Potência normalizada em função da maior potência observada ao longo do período de medição [pu]
P_{Medido}	- Potência ativa medida a cada 15 minutos [kW]
P_{Base}	- Maior potência observada ao longo do período de medição [kW]
$D_{máx}$	- Máximo valor da demanda de potência no intervalo de tempo considerado [kW]
D_{med}	- Valor médio da demanda de potência no mesmo intervalo de tempo considerado [kW]
F_p	- Fator de potência [pu]
P	- Potência ativa [W]
Q	- Potência reativa [VAr]
EA	- Energia ativa [Wh]
ER	- Energia reativa [VArh]
DHT_v	- Distorção Harmônica Total de Tensão [%]
DHT_i	- Distorção Harmônica Total de Corrente [%]
DHI_v	- Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]
DHI_i	- Distorção Harmônica Individual de Corrente [%]
V_h	- Valor eficaz da componente harmônica h da tensão medida [V]
V_1	- Valor eficaz da componente fundamental da tensão medida [V]
I_h	- Valor eficaz da componente harmônica h da corrente medida [A]
I_1	- Valor eficaz da componente fundamental da corrente medida [A]
h	- Ordem harmônica
$h_{máx}$	- Ordem harmônica máxima
V_a, V_b, V_c	- Tensão, respectivamente, nas fases a, b e c
V_{a0}, V_{b0}, V_{c0}	- Componente de sequência zero da tensão, respectivamente, nas fases a, b e c
V_{a1}, V_{b1}, V_{c1}	- Componente de sequência positiva da tensão, respectivamente, nas fases a, b e c
V_{a2}, V_{b2}, V_{c2}	- Componente de sequência negativa da tensão, respectivamente, nas fases a, b e c
a	- Vetor unitário 120°

FD	- Fator de desequilíbrio de tensão [%]
V-	- Magnitude da tensão de sequência negativa (eficaz) [V]
V+	- Magnitude da tensão de sequência positiva (eficaz) [V]
Pst	- Severidade de <i>flicker</i> de curta duração
Pi	- Nível de sensação de cintilação que foi ultrapassado durante i % do tempo
Plt	- Severidade de <i>flicker</i> de longa duração
I _{ipico}	- Corrente de pico do ponto da curva de magnetização referente ao ponto da curva que se quer calcular [A]
I _{0pico}	- Corrente de pico de magnetização do transformador referente ao joelho da curva de magnetização [A]
H _i	- Valor de H no ponto da curva de magnetização que se quer calcular [A/m]
λ _{ipico}	- Fluxo magnetizante do transformador referente ao ponto da curva que se quer calcular [Wb]
λ _{0pico}	- Fluxo magnetizante do transformador referente ao joelho da curva de magnetização [Wb]
B _i	- Valor de B no ponto da curva de magnetização que se quer calcular o fluxo magnetizante [T]
i	- Ponto da curva que se quer calcular.

CAPÍTULO I

Introdução Geral

1.1 – Considerações iniciais

A sociedade moderna é fortemente dependente do uso da energia elétrica e sua demanda pelos setores residencial, comercial e industrial tem crescido rapidamente nestas últimas décadas. Por isso, a questão eletro-energética tem sido amplamente discutida pelos que regulamentam o setor elétrico e definem parâmetros normativos para o funcionamento adequado das redes elétricas, assim como pela sociedade de um modo geral, pois a oferta ampla e segura desta forma de energia é de suma importância para o desenvolvimento da sociedade.

Assim, fica evidente a necessidade da busca pela eficiência energética, ou seja, a busca pela maximização do aproveitamento dos recursos energéticos disponíveis, através da exploração sustentável destes recursos, da otimização dos processos de conversão e distribuição para os consumidores finais e da utilização racional deste importante recurso [1]. Conceitos como conservação de energia, utilização racional de energia, gestão de energia ou gestão da procura de energia, estão associados a eficiência energética [2].

No processo de gestão da energia elétrica, vários aspectos devem ser levados em consideração para apoiar as decisões e ações no que diz respeito ao uso eficiente. Por isso, é necessário conhecer bem as instalações e os processos

que utilizam a energia elétrica, desde os equipamentos até os contratos firmados com as concessionárias de energia elétrica.

Dentre as metodologias utilizadas para a gestão da energia elétrica podem ser citadas a gestão de faturas e o monitoramento do consumo, que criam um histórico da instalação e fundamentam as decisões e estimativas dos responsáveis em relação, por exemplo, à demanda contratada e à modalidade tarifária mais adequada para cada tipo de instalação [3].

Outras metodologias importantes são os indicadores associados ao uso da energia elétrica como o fator de carga e o fator de potência, os quais podem ser obtidos através de medição; assim como o gerenciamento de energia no lado da demanda, o qual consiste na análise da curva de carga com o objetivo de deslocar o horário de funcionamento de algumas cargas para períodos do dia em que ocorrem as menores demandas da instalação [1].

No entanto, as medidas implementadas para a eficiência energética em um sistema elétrico também estão relacionadas com outras áreas de interesse como a qualidade da energia elétrica. Análises de reduções no consumo de energia elétrica em programas de eficiência energética, que incluem o uso de equipamentos eletrônicos, consideram a redução do consumo para o consumidor final mas não a perda adicional energética e econômica causada, por exemplo, pelo aumento da distorção harmônica de corrente [4, 5].

Dessa forma, devido a introdução massiva de componentes eletrônicos nos equipamentos, os distúrbios associados à qualidade da energia elétrica não poderão mais ser negligenciados, pelo contrário, suas perdas deverão ser estimadas, calculadas ou medidas e avaliadas juntamente com as ações para eficiência energética.

Como dito anteriormente, a energia elétrica é uma das fontes de energia secundária mais utilizada em todo o mundo, o que a torna muito importante para a economia e a manutenção de diversos setores, ou seja, ao mesmo tempo que

ela deve ser utilizada de maneira eficiente, seus usuários estão exigindo cada vez mais a confiabilidade e a segurança do sistema que os atendem. Assim, embora o conceito de continuidade do fornecimento de energia não englobe todo o universo de fenômenos associados à qualidade da energia elétrica, ambos se complementam para garantir o fornecimento adequado ao consumidor, isto é, energia elétrica com menores níveis de degradação e de indisponibilidade [1].

Então, pode-se dizer que a avaliação dos níveis de qualidade da energia elétrica é necessária devido à evolução tecnológica da rede elétrica, permeada por dispositivos eletroeletrônicos que degradam a qualidade da energia elétrica fornecida; aos prejuízos financeiros com a interrupção de processos e também com a penalização das concessionárias de energia elétrica, pela não adequação às normas; assim como às perdas patrimoniais, como redução da vida útil de equipamentos ou de cargas sensíveis a distúrbios elétricos; como também à necessidade de adequação dos parâmetros da energia elétrica fornecida aos valores de referência estabelecidos nos documentos normativos vigentes.

Assim, conclui-se que para se alcançar bons resultados com a implementação de medidas de eficiência energética, o problema deve ser abordado não somente em relação aos aspectos de economia de energia tradicionais mas também junto com os aspectos de qualidade da energia elétrica [6]. Isto é, para o funcionamento apropriado do sistema elétrico, deve-se buscar o uso racional da energia e a implantação de ações corretivas e preventivas para mitigar os efeitos degradantes da qualidade da energia elétrica muitas vezes associados com ações de eficiência energética.

1.2 – Contextualização do tema

Acompanhando a tendência global de crescimento da dependência da energia elétrica em todos setores, as universidades federais tiveram um crescimento e uma modernização da carga ao longo dos últimos anos, notadamente em função de seus planos de expansão propostos e financiados com recursos do Programa de Apoio a Planos de Reestruturação e Expansão das Universidades Públicas (REUNI). O referido programa tem como principal objetivo ampliar o acesso e permanência na educação superior, criando condições para que as universidades federais promovam expansão acadêmica, pedagógica e física da rede federal de ensino superior.

Diante dessa situação, para que haja a melhoria das instalações elétricas dessas instituições educacionais, visando atender às novas demandas de energia elétrica de forma planejada e eficiente; surge a necessidade de um diagnóstico de eficiência e qualidade da energia elétrica nessas instalações, através de um plano de medição, de métodos para análise e comparação de dados com valores de referência, assim como da utilização de ferramentas para simulação computacional.

No entanto, apesar de ambos os temas, eficiência energética e qualidade da energia elétrica, serem amplamente discutidos na sociedade e no meio acadêmico; os mesmos, na maioria das vezes, são voltados apenas para definições e métodos de quantificação das grandezas. Adicionalmente, em termos práticos, esses dois temas não são, em geral, abordados de forma simultânea.

Assim, apesar da importância no cenário em foco, esses estudos individualizados não preenchem todos os aspectos da matéria e, com certeza, o tema em pauta carece de maiores investigações com vistas à construção de um diagnóstico de eficiência energética e da qualidade da energia elétrica.

Diante desse contexto, a instalação elétrica do Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia apresenta-se como um adequado local para tal diagnóstico.

1.3 – Estado da arte

Após pesquisas e estudos da bibliografia atual encontrada pelos meios tradicionais de acesso, obteve-se um conjunto de informações sobre os mais distintos trabalhos de pesquisa e avanços do conhecimento no âmbito da área de eficiência energética e qualidade da energia.

De um modo geral, os documentos atrelados com a bibliografia consultada sobre o tema em pauta podem ser reunidos nas seguintes grandes áreas:

- *Documentos e trabalhos realizados simultaneamente na área de qualidade da energia elétrica e de eficiência energética em instituições educacionais*

A publicação [1] apresenta uma descrição da metodologia de análise dos dados coletados a partir de um plano de medição e das etapas da construção de um diagnóstico de qualidade da energia elétrica e de eficiência energética da rede elétrica da Universidade Federal do Ceará. Para isso, são abordados os principais conceitos relativos ao estudo da qualidade da energia elétrica como distorções harmônicas de tensão e de corrente e relativos à eficiência energética como carregamento de transformadores e fator de potência e são abordadas as normas.

O trabalho [6] propõe que para se ter bons resultados com medidas de eficiência energética implementadas tem que se considerar não apenas os aspectos tradicionais de economia de energia mas também os aspectos de

qualidade da energia elétrica. Para isso, o documento analisa o consumo e indicadores de qualidade da energia elétrica em dois prédios de escritórios, através da classificação e distribuição das cargas e da avaliação da curva de carga típica diária, da média de consumo anual e do comportamento da tensão, da corrente, das distorções harmônicas e do fator de potência. Por fim, a referência conclui sobre a possibilidade e as limitações de utilizar equipamentos que economizam energia elétrica mas que deterioram a qualidade desta como medida de eficiência energética.

- *Documentos e trabalhos realizados somente na área de eficiência energética em instituições educacionais*

A referência [7] propõe o acompanhamento do consumo de energia elétrica e do perfil de carga de um Centro Federal de Educação Tecnológica de Leopoldina, Minas Gerais. A evolução do consumo de energia elétrica é obtida por uma inspeção nas contas de energia elétrica, é avaliada mês a mês e anualmente e permite identificar períodos de maiores consumos e fazer uma previsão de aumento desse consumo. Com a curva de demanda medida e contratada, é possível identificar se foram pagas ultrapassagens de demanda, em quais meses isso ocorreu e estipular o melhor valor para a demanda contratada. Através das curvas de carga típica diária, identificam-se os pontos de maior demanda e verifica-se a possibilidade de gerenciamento no lado da demanda para que o perfil da carga fique mais constante, para que se proponha um melhor valor de demanda contratada e um melhor aproveitamento da energia. Somado a tais embasamentos, a referência [8] foca especificamente na utilização da curva de carga da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul para dimensionar grupos geradores e definir quais cargas serão retiradas pelo controlador de demanda quando ocorre falta de energia elétrica oriunda da concessionária e

também no horário de ponta, objetivando a redução dos custos da fatura de energia elétrica.

Complementarmente, em [9] é proposto o desenvolvimento de uma ferramenta, desenvolvida em dois softwares amplamente difundidos, Excel e Access, para gerenciamento do consumo de energia na Universidade Federal do Rio de Janeiro, capaz de fazer o tratamento computacional de dados históricos de consumo e demanda, gerando gráficos e relatórios, os quais ajudem em tomadas de decisão como alteração da demanda contratada e da estrutura tarifária por parte da administração.

O trabalho [3] utiliza indicadores de energia para caracterizar unidades consumidoras da Universidade de São Paulo pelo comportamento no uso da eletricidade e estabelecer prioridades de atuação para gestão dos recursos e ações de eficiência energética. Os indicadores foram aplicados na base de dados de consumo de energia, extraídos das ferramentas de monitoramento de consumo e da gestão de faturas juntamente com as informações físicas, de ocupação, principais usos finais e custos de utilização da energia elétrica. Para a obtenção destes indicadores foram utilizados alguns recursos como curvas de carga típica, gráficos de evolução do consumo anual e relação do consumo com temperatura ambiente. Alguns desses indicadores são fator de carga, fator de potência, indicador de uso da energia por horários de utilização, por usuário da energia, por área edificada e por uso final da energia.

- ***Documentos e trabalhos realizados somente na área de qualidade da energia elétrica em instituições educacionais***

Em [10] são analisados os comportamentos (nível e tipo) de harmônicas e inter-harmônicas geradas por diferentes tipos de cargas, típicas de um sistema elétrico de distribuição de um campus educacional na Índia, as quais são

iluminação, computadores, *nobreaks* e conversores de energia. Tais análises foram possíveis através de medições de analisador de qualidade da energia capaz de armazenar formas de onda e gerar espectros harmônicos de corrente e tensão, e permitiram concluir que as cargas utilizadas em um instituto educacional não podem ser negligenciadas em relação a distorção harmônica.

Ainda com relação a distúrbios na qualidade da energia, a referência [11] traz uma auditoria em vários prédios do campus da Universidade de Córdoba, Espanha, em que foram feitas medições de corrente e tensão para avaliação de distorção harmônica, da existência de variações de tensão de longa e curta duração, de interrupções e de transitórios. Nesta, também foram apresentados um estudo das causas e efeitos dos distúrbios de energia nos computadores ou em outros equipamentos microprocessados; a aplicação da curva ITIC (*Information Technology Industry Council*), que avalia os limites de tensão que alimentam os equipamentos eletrônicos, para as anomalias detectadas e análises sobre a capacidade de auto-proteção dos equipamentos de fornecimento de energia elétrica.

- ***Modelagem computacional de redes de distribuição e simulação de distúrbios de qualidade da energia elétrica***

No que tange aos sistemas elétricos e sua modelagem no domínio do tempo, a referência [12] trata especificamente das características dos recursos computacionais disponibilizados pelo simulador ATP (*Alternative Transients Program*). Tendo em vista que esta ferramenta possibilita simular os distúrbios de qualidade da energia em um sistema elétrico, é importante observar que inúmeros trabalhos foram publicados e que contemplam o emprego desta ferramenta para os fins aqui almejados.

Com relação a programas computacionais, como já destacado anteriormente, a referência [13] apresenta um trabalho de pesquisa de qualidade da energia em um sistema de distribuição do campus da Universidade de Queensland, Austrália. Esse trabalho utiliza o ATP para modelar os componentes do sistema de distribuição e simular distúrbios de qualidade da energia elétrica como distorções harmônicas, transitórios causados por chaveamento de capacitores e afundamentos causados por faltas e partidas de motores. A partir disso, os resultados da simulação são comparados com os limites regulados por normas de qualidade da energia elétrica e avaliados quanto aos seus efeitos em equipamentos sensíveis. O trabalho também sistematiza os procedimentos para a análise da qualidade da energia elétrica em quatro etapas: conceitos fundamentais; monitoramento e medições de grandezas de qualidade da energia; modelagem e análises e, por fim, solução de problemas.

1.4 – Objetivos e contribuições oferecidas por esta dissertação

Esta dissertação de mestrado avança no contexto de procedimentos para o diagnóstico de eficiência energética e da qualidade da energia elétrica de uma instituição acadêmica, trazendo melhorias quanto aos seguintes pontos focais:

- Propor metodologias (curvas de carga típica diária e semanal e tabelas de gestão de faturas) e indicadores (fator de carga e fator de potência) e mostrar como estas podem ser implementadas para o diagnóstico de eficiência energética de uma instalação elétrica;
- Descrever, a partir de medições, uma metodologia de análise de dados e de construção de um diagnóstico de uma instalação quanto à qualidade da energia elétrica;
- Desenvolver a modelagem do sistema elétrico de uma instalação, desde o ponto de entrega, ou seja, de seu suprimento até cada

transformador abaixador, utilizando-se a ferramenta computacional ATP (*Alternative Transients Program*);

- Identificar a contribuição da concessionária de energia elétrica local, assim como de uma instalação, na distorção harmônica de tensão no ponto de entrega, através de uma proposta de simulação harmônica utilizando-se o *software* ATP.

No que se refere à primeira contribuição, são apresentados, respectivamente, os métodos de tratamento de dados de Mapas Auto-Organizáveis de Kohonen (SOM) e de estatística do algoritmo K-means para a obtenção de curvas de carga típica diária e semanal, assim como as equações para cálculo dos montantes mensais associados ao faturamento da energia elétrica em tabelas de gestão de faturas. Estas curvas e tabelas juntamente com indicadores de energia permitem o diagnóstico da instalação em relação à eficiência energética, pois possibilitam o conhecimento da rede e o consequente planejamento de ações técnicas tanto de melhoria física das instalações como de adequação contratual com a concessionária de energia elétrica local.

No que se refere à segunda contribuição, são abordadas as definições dos fenômenos associados com a qualidade da energia elétrica, os indicadores usados para avaliação dos distúrbios, algumas recomendações publicadas por parte dos órgãos que regulam o setor elétrico e os resultados gráficos e estatísticos dos pontos de medição (ponto de entrega e quadro geral de baixa tensão de onze transformadores), referentes a variações de tensão em regime permanente, distorções harmônicas de tensão e de corrente, desequilíbrios de tensão, assim como flutuações de tensão.

Um outro marco relevante para a presente dissertação encontra-se apoiado na modelagem, ou seja, escolha e parametrização dos componentes, desde a fonte de tensão da concessionária de energia elétrica em média tensão como também de todos os elementos que perfazem o sistema elétrico de

distribuição interno da instituição acadêmica, isto é, até os barramentos em baixa tensão dos transformadores.

Concluindo, o trabalho é finalizado através de uma simulação no ATP direcionada às distorções harmônicas para determinar as responsabilidades de cada uma, concessionária e instituição, na produção destes distúrbios de qualidade da energia elétrica. Para isso, foi necessária também a modelagem da carga e da injeção de corrente harmônica de todos os transformadores e o resultado da simulação foi comparado com o espectro de tensão medido neste mesmo ponto.

1.5 – Estrutura da tese

Diante do exposto, além do presente capítulo introdutório, esta pesquisa será desenvolvida dentro da estrutura organizacional que se segue:

Capítulo II – Metodologia para Diagnóstico de Eficiência Energética na Instalação Elétrica do Campus

Este capítulo contempla a descrição do sistema elétrico do Campus Santa Mônica e das metodologias utilizadas para análise da eficiência energética do mesmo.

Capítulo III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

Esta unidade da pesquisa encontra-se voltada para a abordagem dos principais conceitos, indicadores e valores de referência determinados por normas e para a análise dos dados de medição relativos ao estudo da qualidade da energia elétrica nas subestações do campus.

Capítulo IV – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica no Ponto de Entrega do Campus

Esta unidade encontra-se voltada para a análise dos dados de medição relativos ao estudo da qualidade da energia elétrica no ponto de entrega do campus.

Capítulo V – Análise da Contribuição Harmônica

Esta unidade encontra-se voltada para a análise da contribuição harmônica no ponto de entrega do campus através da modelagem do sistema elétrico e simulação da distorção harmônica no programa ATP.

Capítulo VI – Conclusões

Por fim, apresenta-se uma síntese dos principais pontos e conclusões relacionados com o trabalho como um todo. Além disso, serão ressaltadas questões vinculadas às principais contribuições deste trabalho, bem como sugestões para futuros desenvolvimentos.

CAPÍTULO II

Metodologia para Diagnóstico de Eficiência Energética na Instalação Elétrica do Campus

2.1 – Considerações iniciais

O crescimento da carga de um campus universitário, sem o devido controle e acompanhamento, gera uma série de consequências indesejáveis, sendo a primeira delas o pagamento de ultrapassagens de demanda à concessionária de energia local em determinadas situações. Caso estas ultrapassagens persistam por um tempo superior ao programado no relé de proteção contra sobrecorrente da instalação, interrupções de energia não previstas irão ocorrer podendo ocasionar a perda de processos, experiências, arquivos digitais, amostras mantidas sob refrigeração, entre outras perdas relevantes. Outra consequência é a demora das adequações nas instalações elétricas para a nova realidade. Para o aumento de demanda contratada entre uma unidade consumidora e a concessionária de energia, passa-se por três etapas específicas, a saber: (i) elaboração de projeto elétrico; (ii) aprovação da liberação de nova demanda e (iii) contratação de empresa para adequação da instalação física da unidade consumidora, quando esta não vem precedida de

obra de melhoria na rede de distribuição da concessionária. Junto a isso, existem processos administrativos públicos e prazos limites que devem ser respeitados.

A fim de possibilitar o diagnóstico de eficiência energética da instalação elétrica do Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia e o consequente planejamento de ações técnicas tanto de melhoria física das instalações como de adequação contratual com a concessionária local, algumas metodologias e indicadores foram propostos: modelagem da curva de carga típica, estudo da demanda diária, máxima anual e contratada e dos fatores que as influenciam, carregamento dos transformadores que compõem o sistema, fator de potência no ponto de entrega e análise da modalidade tarifária em que a instalação está enquadrada.

No entanto, a dificuldade, muitas vezes encontrada, é de analisar e obter conclusões relevantes a partir de grandes massas de dados. Assim, para se cumprir tal propósito, este capítulo tem por foco:

- Propor metodologias e indicadores para o diagnóstico de eficiência energética de uma instalação elétrica;
- Mostrar como estas podem ser implementadas e, por fim, como podem auxiliar no planejamento desta instalação.

2.2 – Sistema elétrico e plano de medição

Para o conhecimento da condição atual de uma rede e a construção de um diagnóstico de eficiência e qualidade da energia elétrica, os primeiros passos executados foram a atualização completa do diagrama unifilar e a elaboração do plano de medição do sistema elétrico em estudo.

O Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia possui uma área aproximada de 261.000 m², com 71 blocos construídos. O sistema

CAPITULO II – Metodologia para Diagnóstico de Eficiência Energética na Instalação Elétrica do Campus

elétrico do campus constitui sistema radial de distribuição. Dessa forma, a construção de tal sistema é relativamente econômica, mas do ponto de vista da confiabilidade, deixa muito a desejar, pois a perda da única fonte de suprimento acarreta a falta de energia elétrica para todos os usuários.

O sistema em estudo é composto por 9 (nove) subestações, sendo duas cabines de derivação, das quais uma é a cabine de entrada principal (onde se encontra instalada a medição de faturamento), e sete cabines de transformação distribuídas pelo campus e nomeadas por UFU01, UFU02, UFU03, UFU04, UFU05, UFU 06 e UFU07.

No diagrama simplificado indicado na figura 2.1 estão indicadas as nove subestações, assim como os principais parâmetros que caracterizam os elementos que compõem o referido sistema elétrico.

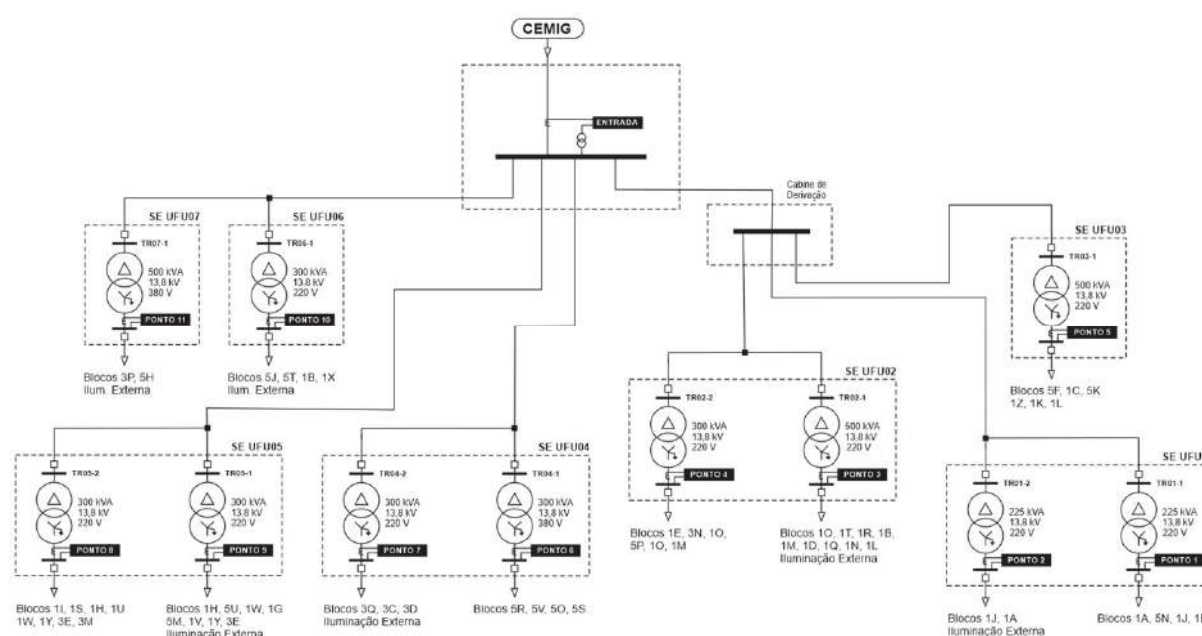


Figura 2.1 - Diagrama unifilar simplificado das instalações elétricas do Campus Santa Mônica da UFU.

Para o registro das grandezas elétricas foi elaborado um plano de medição segundo o qual foram escolhidos pontos estratégicos da rede, um intervalo de

tempo para agregação de dados, assim como os equipamentos adequados para a tarefa.

O monitoramento ideal da rede elétrica seria a coleta simultânea de dados nos pontos de interesse, para que o diagnóstico da rede fosse mais preciso, ou seja, fosse demonstrado o desempenho da rede com eventos e distúrbios simultâneos. No entanto, devido a limitação da quantidade de equipamentos de medição adquiridos, o monitoramento foi feito com um medidor fixo no ponto de entrega e dois aparelhos, que mediram de forma isolada ou simultaneamente os outros onze pontos estratégicos.

2.2.1 – Ponto de entrega

O ponto de entrega é a conexão do sistema elétrico da distribuidora com a unidade consumidora e situa-se no limite da via pública com a propriedade onde esteja localizada a unidade consumidora [14].

A cabine de entrada é a primeira após o ponto de entrega da concessionária de energia. O fornecimento da energia elétrica é feito em 13.800 V e a corrente de curto-circuito deste ponto é de $3.516\angle -75,85^\circ$ A. Esta cabine possui um cubículo de medição para faturamento da concessionária, um cubículo de proteção a montante de todo o sistema elétrico em estudo, um outro cubículo de medição para este estudo e quatro cubículos de chaves distribuidoras destinadas às outras subestações.

Para a determinação das curvas de carga típica, a análise tarifária e o estudo da evolução da demanda máxima do campus universitário, foram utilizados os dados da memória de massa de faturamento dos anos de 2011, 2012 e 2013, com intervalos de agregação de 15 minutos, fornecidos pela concessionária de energia. Já para a avaliação de diversas grandezas elétricas no ponto de entrega, foram utilizados transformadores de potencial e corrente e um

CAPITULO II – Metodologia para Diagnóstico de Eficiência Energética na Instalação Elétrica do Campus

analisador de qualidade da energia elétrica Multi-K NG, fabricado pela Kron Medidores, o qual realiza as medições conforme as normas IEC61000-4-30 Classe S [15], IEC61000-4-7 [16] e IEC61000-4-15 [17]; com precisão de tensão, corrente e potências de 0,5%; taxa de amostragem de 128 amostras/ciclo; memória de agregação não volátil e circular de 163 parâmetros a cada 10 minutos com autonomia de 14 dias e alimentação auxiliar de 85-265Vca, 50/60 Hz e 100-375Vcc.

Nas figuras 2.2 e 2.3 são visualizadas, respectivamente, as fotos do medidor da concessionária para faturamento e do medidor e do cubículo de medição para este estudo.



Figura 2.2 – Foto do medidor da concessionária para faturamento na cabine de entrada do Campus Santa Mônica da UFU.



Figura 2.3 – Foto do medidor de qualidade da energia e do cubículo de medição para estudo na cabine de entrada do Campus Santa Mônica da UFU.

2.2.2 – Medições na baixa tensão

Além do ponto de entrega, foram realizadas medições nos barramentos de baixa tensão de todos os transformadores do sistema em estudo, denominados aqui de Ponto 1, Ponto 2, Ponto 3, Ponto 4, Ponto 5, Ponto 6, Ponto 7, Ponto 8, Ponto 9, Ponto 10 e Ponto 11, conforme destaca figura 2.1. Todas essas medições foram realizadas em períodos letivos e para viabilizar tais registros foram utilizados os seguintes equipamentos: registradores de qualidade da energia elétrica portáteis Fluke 1744 (IP65) e 1745 (IP50), com memória EPROM flash de 8 MB, taxa de amostragem de 10,24 kHz, tensão de alimentação de 88 V a 660 V absolutos, 50 Hz / 60 Hz e 100 V a 350 V DC e precisão da tensão medida em conformidade com a norma IEC61000-4-30 Classe A (0,1%) [15].

Os posicionamentos das medições realizadas na cabine de entrada, para faturamento e qualidade da energia elétrica, e das medições nas cabines de transformação (Ponto 1, Ponto 2, Ponto 3, Ponto 4, Ponto 5, Ponto 6, Ponto 7, Ponto 8, Ponto 9, Ponto 10 e Ponto 11) estão também indicados na figura 2.1.

A subestação abrigada UFU01 deriva da cabine de distribuição/derivação com um cabo de 25 mm² classe 8,7/15 kV e possui dois transformadores delta-estrela a óleo de 225 kVA, tensão 13.800/220V, ligação delta-estrela e impedância de 4,75% (TR01.1 e TR01.2). O transformador TR01.1 é ligado ao seu quadro geral de baixa tensão por dois cabos de 120 mm² por fase, onde foi denominado o Ponto 1 de medição e atende aos Blocos 1A, 1F, 1J e 5N. As medições realizadas no Ponto 1 ocorreram entre os dias 03/12/2013 a partir das 2 hs e 10/12/2013 até as 1:59 hs. O transformador TR01.2 é ligado ao seu quadro geral de baixa tensão por dois cabos de 240 mm² por fase, onde foi denominado o Ponto 2 de medição e atende aos Blocos 1A, 1J e iluminação externa. As medições realizadas no Ponto 2 ocorreram entre os dias 12/12/2013 a partir das 2 hs e 19/12/2013 até as 1:59 hs.

Os blocos atendidos pela subestação UFU01 são destinados para os seguintes setores:

- Bloco 1A – Coordenações, Prograd, Copev, Diren, Dirac, Banco do Brasil;
- Bloco 1F – Coordenações (Ciências Contábeis, Administração, Matemática), salas de aula;
- Bloco 1J – Economia, Cepes, Nupro, salas de aula;
- Bloco 5N – Centro de Convivência.

A subestação abrigada UFU02 deriva da cabine de distribuição/derivação com um cabo de 25 mm² classe 8,7/15 kV e possui dois transformadores delta-estrela a óleo (TR02.1 e TR02.2). O transformador TR02.1 é de 500 kVA, tensão 13.800/220V, ligação delta-estrela, impedância de 5,1%, ligado ao seu quadro geral de baixa tensão por dois cabos de 240 mm² por fase, onde foi denominado o Ponto 3 de medição e atende aos Blocos 1B, 1D, 1L, 1M, 1N, 1O,

1Q, 1R, 1T e iluminação externa. As medições realizadas no Ponto 3 ocorreram entre os dias 29/09/2014 a partir das 0 hs e 05/10/2014 até as 23:59 hs. O transformador TR02.2 é de 300 kVA, tensão 13.800/220V, ligação delta-estrela, impedância de 4,46%, ligado ao seu quadro geral de baixa tensão por três cabos de 240 mm² por fase, onde foi denominado o Ponto 4 de medição e atende aos Blocos 1E, 1M, 1O, 1P, 3N e 5P. As medições realizadas no Ponto 4 ocorreram entre os dias 03/10/2014 a partir das 0 hs e 09/10/2014 até as 23:59 hs.

Os blocos atendidos pela subestação UFU02 são destinados para os seguintes setores:

- Bloco 1B – Ar condicionado anfiteatro;
- Bloco 1D – Química;
- Bloco 1E – Engenharia Elétrica;
- Bloco 1L – Cantina;
- Bloco 1M – Engenharia Mecânica;
- Bloco 1N – Laboratório de Engenharia Elétrica;
- Bloco 1O – Laboratório de Engenharia Mecânica;
- Bloco 1P – Laboratório de Engenharia Elétrica;
- Bloco 1Q – CDHIS, Museu Minerais e Rochas, Laboratório de Química, docentes geografia;
- Bloco 1R – Laboratório de Engenharia Mecânica (Resistência dos Materiais);
- Bloco 1T – Almoxarifado Engenharia Mecânica;
- Bloco 3N – Engenharia Elétrica;
- Bloco 5P – Laboratórios de Engenharia Mecânica.

A subestação desabrigada UFU03 deriva da cabine de distribuição/derivação com um cabo de 35 mm² classe 8,7/15 kV e possui um

transformador delta-estrela a óleo (TR03.1). O transformador TR03.1 é de 500 kVA, tensão 13.800/220V, ligação delta-estrela, impedância de 3,5%, ligado ao seu quadro geral de baixa tensão por três cabos de 240 mm² por fase, onde foi denominado o Ponto 5 de medição e atende aos Blocos 1C, 1K, 1L, 1Z, 5F e 5K. As medições realizadas no Ponto 5 ocorreram entre os dias 17/01/2014 a partir das 9:16 hs e 24/01/2014 até as 9:15 hs.

Os blocos atendidos pela subestação UFU03 são destinados para os seguintes setores:

- Bloco 1C – Salas de aula;
- Bloco 1K – Laboratório e docentes da Engenharia Química;
- Bloco 1L – Cantina;
- Bloco 1Z – Laboratório da Engenharia Química (Processamento de Alimentos);
- Bloco 5F – Galpão de Testes da Engenharia Mecânica;
- Bloco 5K – Laboratórios Tecnologia.

A subestação abrigada UFU04 deriva da cabine de entrada com um cabo de 35 mm² classe 8,7/15 kV e possui dois transformadores delta-estrela (TR04.1 e TR04.2). O transformador a seco TR04.1 é de 300 kVA, tensão 13.800/380V, ligação delta-estrela, impedância de 6,28%, ligado ao seu quadro geral de baixa tensão por dois cabos de 240 mm² por fase, onde foi denominado o Ponto 6 de medição e atende aos Blocos 5O, 5R, 5S e 5V. As medições realizadas no Ponto 6 ocorreram entre os dias 05/02/2014 a partir das 8:13 hs e 12/02/2014 até as 8:12 hs. O transformador a óleo TR04.2 é de 300 kVA, tensão 13.800/220V, ligação delta-estrela, impedância de 4,43%, ligado ao seu quadro geral de baixa tensão por quatro cabos de 120 mm² por fase, onde foi denominado o Ponto 7 de medição e atende aos Blocos 3C, 3D, 3Q e iluminação externa. As medições

CAPITULO II – Metodologia para Diagnóstico de Eficiência Energética na Instalação Elétrica do Campus

realizadas no Ponto 7 ocorreram entre os dias 17/01/2014 a partir das 8:43 hs e 24/01/2014 até as 8:42 hs.

Os blocos atendidos pela subestação UFU04 são destinados para os seguintes setores:

- Bloco 3C – Biblioteca;
- Bloco 3D – Direito, salas de aula;
- Bloco 3Q – Salas de aula, anfiteatro, praça coberta;
- Bloco 5O – Bloco salas de aula;
- Bloco 5R – Bloco salas de aula;
- Bloco 5S – Bloco salas de aula;
- Bloco 5V – Assistência Judiciária.

A subestação abrigada UFU05 deriva da cabine de entrada com um cabo de 35 mm² classe 8,7/15 kV e possui dois transformadores delta-estrela (TR05.1 e TR05.2). O transformador a seco TR05.1 é de 300 kVA, tensão 13.800/220V, ligação delta-estrela, impedância de 5,62%, ligado ao seu quadro geral de baixa tensão por dois cabos de 240 mm² por fase, onde foi denominado o Ponto 8 de medição e atende aos Blocos 1H, 1I, 1S, 1U, 1W, 1Y, 3E e 3M. As medições realizadas no Ponto 8 ocorreram entre os dias 07/01/2014 a partir das 2 hs e 14/01/2014 até as 2 hs. O transformador a óleo TR05.2 é de 300 kVA, tensão 13.800/220V, ligação delta-estrela, impedância de 3,43%, ligado ao seu quadro geral de baixa tensão por dois cabos de 240 mm² por fase, onde foi denominado o Ponto 9 de medição e atende aos Blocos 1G, 1H, 1V, 1W, 1Y, 3E, 5M, 5U e iluminação externa. As medições realizadas no Ponto 9 ocorreram entre os dias 07/01/2014 a partir das 9:13 hs e 14/01/2014 até as 9:12 hs.

Os blocos atendidos pela subestação UFU05 são destinados para os seguintes setores:

- Bloco 1G – Letras, Pedagogia, salas de aula;
- Bloco 1H – Geografia, História, Ciências Sociais;
- Bloco 1I – Artes, Arquitetura, Design de Interiores;
- Bloco 1S – Gráfica, Rádio, TV, Nead;
- Bloco 1U – Letras, Linguística, Filosofia;
- Bloco 1W – Restaurante Universitário;
- Bloco 1V – Coordenação Música, Artes Cênicas, Dança, Teatro;
- Bloco 1Y – Engenharia Civil, Laboratórios, Docentes;
- Bloco 3E – Administrativo, Proex, Dicult, Diase, Dica, Dirap;
- Bloco 3M – Música, Artes Cênicas;
- Bloco 5M – Laboratório de Humanas;
- Bloco 5U – Laboratório Dança, Teatro, Música.

A subestação desabrigada UFU06 deriva da cabine de entrada com um cabo de 35 mm² classe 8,7/15 kV e possui um transformador delta-estrela a óleo (TR06.1). O transformador TR06.1 é de 300 kVA, tensão 13.800/220V, ligação delta-estrela, impedância de 4,51%, ligado ao seu quadro geral de baixa tensão por três cabos de 240 mm² por fase, onde foi denominado o Ponto 10 de medição e atende aos Blocos 1B, 1X, 5J, 5T e iluminação externa. As medições realizadas no Ponto 10 ocorreram entre os dias 28/01/2014 a partir das 2 hs e 04/02/2014 até as 2 hs.

Os blocos atendidos pela subestação UFU06 são destinados para os seguintes setores:

- Bloco 1B – Computação, Proex, salas de aula, anfiteatro, unidades estudantis;
- Bloco 1X – Instituto de Física, Anfiteatro;

- Bloco 5J – Laboratório de Química (Centro de Reciclagem de Resíduos);
- Bloco 5T – Laboratório de Química e Física.

A subestação desabrigada UFU07 deriva da cabine de transformação UFU06 com um cabo de 35 mm² classe 8,7/15 kV e possui um transformador delta-estrela a óleo (TR07.1). O transformador TR07.1 é de 500 kVA, tensão 13.800/380V, ligação delta-estrela, impedância de 4,79%, ligado ao seu quadro geral de baixa tensão por três cabos de 240 mm² por fase, onde foi denominado o Ponto 11 de medição e atende aos Blocos 3P, 5H e iluminação externa. As medições realizadas no Ponto 11 ocorreram entre os dias 05/02/2014 a partir das 8:52 hs e 12/02/2014 até as 8:51 hs.

Os blocos atendidos pela subestação UFU07 são destinados para os seguintes setores:

- Bloco 3P – Reitoria;
- Bloco 5H – Galpão Mecânica.

As características básicas dos transformadores que compõem o sistema elétrico da universidade foram resumidas na tabela 2.1.

CAPITULO II – Metodologia para Diagnóstico de Eficiência Energética na Instalação Elétrica do Campus

Tabela 2.1 – Características básicas dos transformadores que compõem o sistema elétrico da universidade

Subestação	Transformadores	Ponto de medição	Potência dos transformadores kVA	Tensão dos transformadores V	Blocos atendidos
UFU01	TR01.1	Ponto 1	225	13.800/220	1A, 1F, 1J, 5N
	TR01.2	Ponto 2	225	13.800/220	1A, 1J, Iluminação externa
UFU02	TR02.1	Ponto 3	500	13.800/220	1B, 1D, 1L, 1M, 1N, 1O, 1Q, 1R, 1T, iluminação externa
	TR02.2	Ponto 4	300	13.800/220	1E, 1M, 1O, 1P, 3N, 5P
UFU03	TR03.1	Ponto 5	500	13.800/220	1C, 1K, 1L, 1Z, 5F, 5K
UFU04	TR04.1	Ponto 6	300	13.800/380	5O, 5R, 5S, 5V
	TR04.2	Ponto 7	300	13.800/220	3C, 3D, 3Q, iluminação externa
UFU05	TR05.1	Ponto 8	300	13.800/220	1H, 1I, 1S, 1U, 1W, 1Y, 3E, 3M
	TR05.2	Ponto 9	300	13.800/220	1G, 1H, 1V, 1W, 1Y, 3E, 5M, 5U, iluminação externa
UFU06	TR06.1	Ponto 10	300	13.800/220	1B, 1X, 5J, 5T, iluminação externa
UFU07	TR07.1	Ponto 11	500	13.800/380	3P, 5H, iluminação externa

A figura 2.4 ilustra a distribuição das duas cabines de derivação e das sete subestações de transformação (UFU01, UFU02, UFU03, UFU04, UFU05, UFU06 E UFU07) do Campus Santa Mônica.



Figura 2.4 – Mapa de localização das subestações de energia elétrica e dos caminhos que as interligam do Campus Santa Mônica da UFU.

Com a descrição e a visualização em diagrama unifilar dos componentes básicos do sistema elétrico do campus em estudo, foi possível identificar os pontos estratégicos onde o monitoramento seria necessário e o tipo de medidor, de acordo com seu índice de proteção (IP), para que, a partir dos dados medidos, o diagnóstico da rede fosse iniciado.

2.3 – Determinação de curvas de carga típicas diária e semanal

Em um diagnóstico que avalia o grau de desempenho do sistema com relação à eficiência energética, uma das metodologias utilizadas é a curva de carga. A curva de carga é uma representação da demanda em função do tempo para um dado período [18], ou seja, representa o perfil de solicitação das cargas da instalação ao longo do dia [19].

A análise da curva de carga permite conhecer o comportamento da demanda ao longo de um período, conhecer os horários de maiores e menores demandas, correlacionar a variação da demanda com outra grandeza como por

exemplo a temperatura, estimar e determinar o valor da demanda contratada com a concessionária, dimensionar fontes alternativas de suprimento de energia e também gerenciar a energia no lado da demanda através do remanejamento de carga quando este é possível.

Entretanto, cada tipo de consumidor apresenta um tipo de curva de demanda padrão, isto é, o formato destas curvas depende dos hábitos de consumo da população que compõe a demanda. Exemplos típicos de curvas são as de consumidor residencial, comercial e industrial. O presente estudo foi direcionado para as curvas de carga de uma instituição acadêmica.

Para modelar a curva de carga típica diária da instalação, considerou-se sua memória de massa de faturamento do ano de 2013 fornecida pela concessionária local, na qual está registrada a potência ativa de todo este ano com tempos de agregação de 15 minutos. Após isso, cada data foi identificada pelo dia da semana que representava (segunda, terça, quarta-feira etc) e cada dia da semana foi classificado como dia de aula ou dia de férias. As datas associadas a feriados foram desconsideradas. Assim, para cada dia da semana, sendo dia letivo ou de férias, das 00:00 as 23:45hs, foram consideradas uma série de leituras.

No entanto, objetivando obter uma curva típica a partir dessa massa de dados para cada dia da semana, foi necessário o uso de metodologias iterativas destacando-se características comuns, através de técnicas de mineração de dados, e obtendo-se agrupamentos semelhantes, ou clusters, aos quais pudessem ser aplicados métodos estatísticos [20].

Dessa forma, a metodologia adotada consistiu na combinação dos métodos de mineração de dados por redes neurais, ou Mapas Auto-Organizáveis de Kohonen (SOM) e de estatística, Algoritmo K-means, fazendo uso ainda do Índice de Davies-Bouldin e a Função de Erro. Vale ressaltar que o primeiro

método respondeu pela redução inicial da massa de dados, enquanto o segundo fez o agrupamento das curvas em clusters. Enquanto isso, o Índice de Davies-Bouldin e a Função de Erro auxiliaram na determinação do número ideal desses agrupamentos K [21].

Para isso utilizou-se uma rotina desenvolvida no aplicativo computacional MatLab utilizando a ferramenta “som_toolbox”.

2.3.1 – Fundamentação da metodologia para a modelagem das curvas de carga típicas

- **Método de SOM**

O método SOM é uma Rede Neural Artificial (RNA) com treinamento competitivo e não supervisionado, ou seja, que é capaz de estabelecer relações complexas entre os dados sem a necessidade de fornecer as regras sobre as funções que as relacionam e, ainda, decidir quais critérios serão utilizados para agrupar os dados, processo conhecido como auto-organização [22].

Tal método pode realizar a formação de um mapa topográfico de duas camadas sendo uma a camada de entrada e a outra a camada de Kohonen, na qual as localizações dos neurônios seguem características intrínsecas dos padrões de entrada que caracteriza a auto-organização [23]. Um neurônio apresenta grande similaridade com neurônios próximos a ele e também uma grande distinção entre neurônios que estejam mais afastados [21].

- **Algoritmo K-means**

O algoritmo K-means é um método clássico para construção K grupos a partir de uma massa de dados [24].

Com a massa de dados e o número de centróides (K), que deve ser definido a priori [25, 26, 27], o algoritmo procura minimizar a distância euclidiana entre cada curva de carga e as curvas centróides, curvas de referência, de forma iterativa [21].

2.3.2 – Determinação de uma curva de carga típica diária

Considerando a massa de dados de todas as quartas-feiras letivas do ano 2013, o primeiro passo para determinação de sua curva de carga típica foi a normalização das potências ativas com a equação (2.1):

$$P_{Normal} = \frac{P_{Medido}}{P_{Base}} [pu] \quad (2.1)$$

Onde:

- P_{Normal} - potência normalizada em função da maior potência observada ao longo do período de medição [pu];
- P_{Medido} - potência ativa medida a cada 15 minutos [kW];
- P_{Base} - maior potência observada ao longo do período de medição [kW].

Neste caso a P_{Base} foi 2.026,08 kW e a normalização foi feita em uma planilha de dados.

As próximas etapas deste processo foram desenvolvidas na rotina desenvolvida no MatLab já citada.

Na figura 2.5, pode-se observar a massa de dados inicial normalizada das 42 quartas-feiras letivas do ano de 2013.

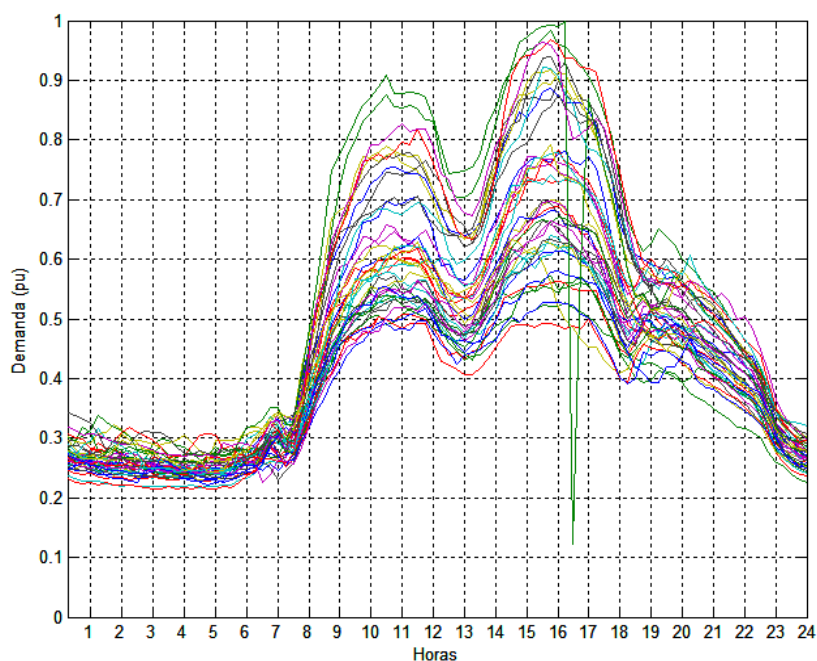


Figura 2.5 - Massa de dados inicial normalizada das 42 quartas-feiras letivas do ano de 2013.

Ao aplicar o método de SOM a essa massa de dados inicial, ele reduziu a massa de curvas iniciais a um grupo de unidades vencedoras, os neurônios, que são mostradas em um espaço bidimensional [28], conforme visualizado na figura 2.6.

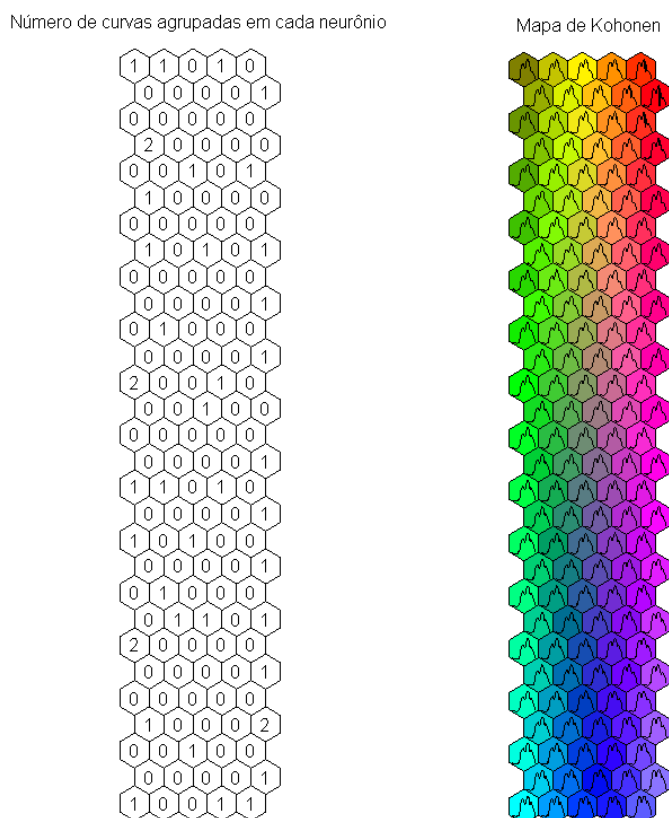


Figura 2.6 - Número de curvas agrupadas em cada neurônio e Mapa de Kohonen.

A partir dos gráficos de Índice de Davies-Bouldin e da Função do Erro apresentados na figura 2.7 e utilizando as heurísticas [21], determinou-se o valor dos K agrupamentos, para este estudo, que, neste caso, é dois.

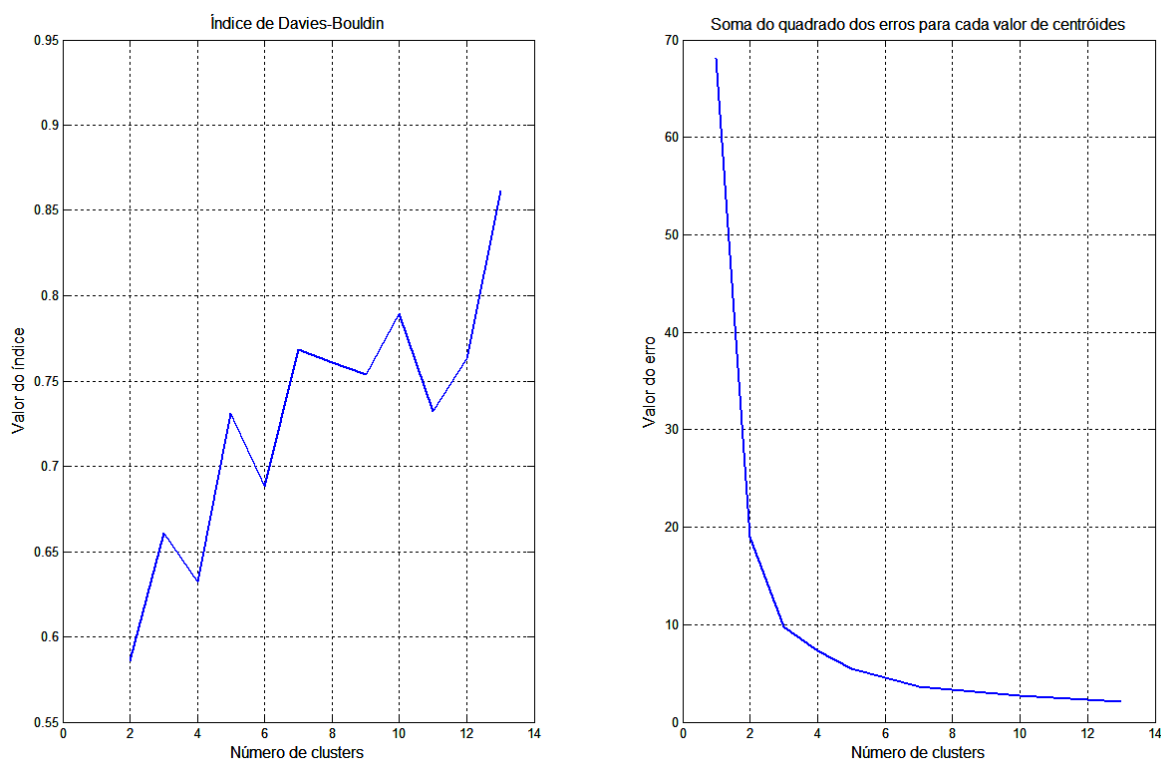


Figura 2.7 - Índice de Davies-Bouldin e da Função do Erro.

Assim, com a massa de dados e o número de centróides K igual a dois, o método K-means foi utilizado no agrupamento dos vetores de saída do SOM para a obtenção dos clusters observados na figura 2.8.

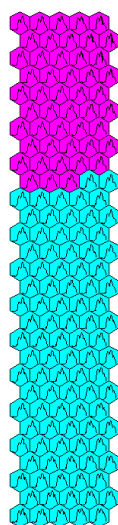


Figura 2.8 - Clusters.

Por fim, a partir das duas curvas que representam esses clusters, a curva de carga típica da quarta-feira letiva pode, sem grandes prejuízos, ser obtida fazendo a média aritmética das mesmas no K-means, conforme mostrado na figura 2.9.

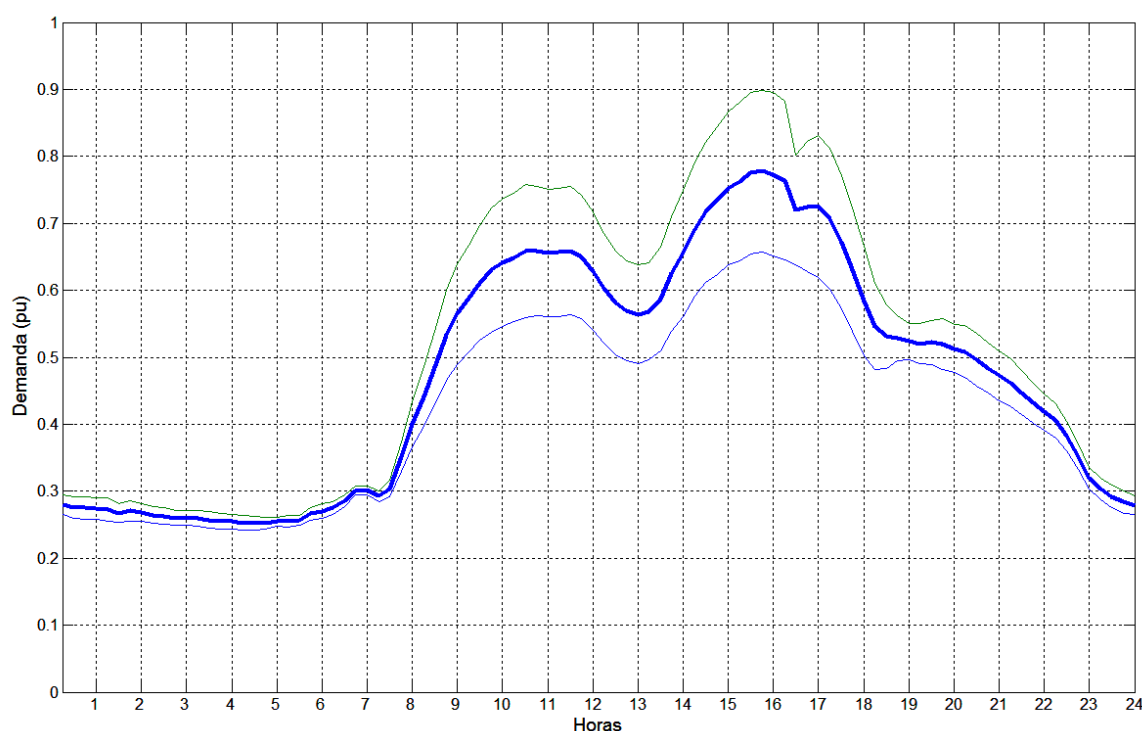


Figura 2.9 - Duas curvas de carga clusters e a curva de carga típica de uma quarta-feira letiva.

Considerando que a maior potência observada ao longo do período de medição para os dias de quarta-feira letiva foi 2.026,08 kW e através da figura 2.9, pode-se dizer que a carga que, tipicamente, foi próxima de 607 kW às 0hs, iniciou um crescimento a partir das 5:30hs e atingiu um pico próximo a 1.317 kW às 10:30hs; após este horário, decresceu para um valor cerca de 1.135 kW até às 13hs; quando iniciou um novo crescimento e atingiu o pico máximo do dia perto de 1.580 kW às 15:30hs e, a partir de então, decresceu até o final do dia, quando ficou novamente em 607 kW.

Entendeu-se que, entre 6:30 e 7:30hs da manhã, o crescimento da carga foi rapidamente interrompido devido ao desligamento da iluminação externa do campus. Por volta das 18:30hs, quando ocorreu a transição do período vespertino para o noturno, o decrescimento da carga tornou-se menos acentuado, provavelmente pela ligação da iluminação externa do campus e pelo consumo de carga do período noturno.

Dessa maneira, utilizando as metodologias descritas anteriormente na massa de dados de todas as quartas-feiras de férias do ano 2013, foram geradas seis curvas clusters e a sua curva de carga típica conforme mostrado na figura 2.10.

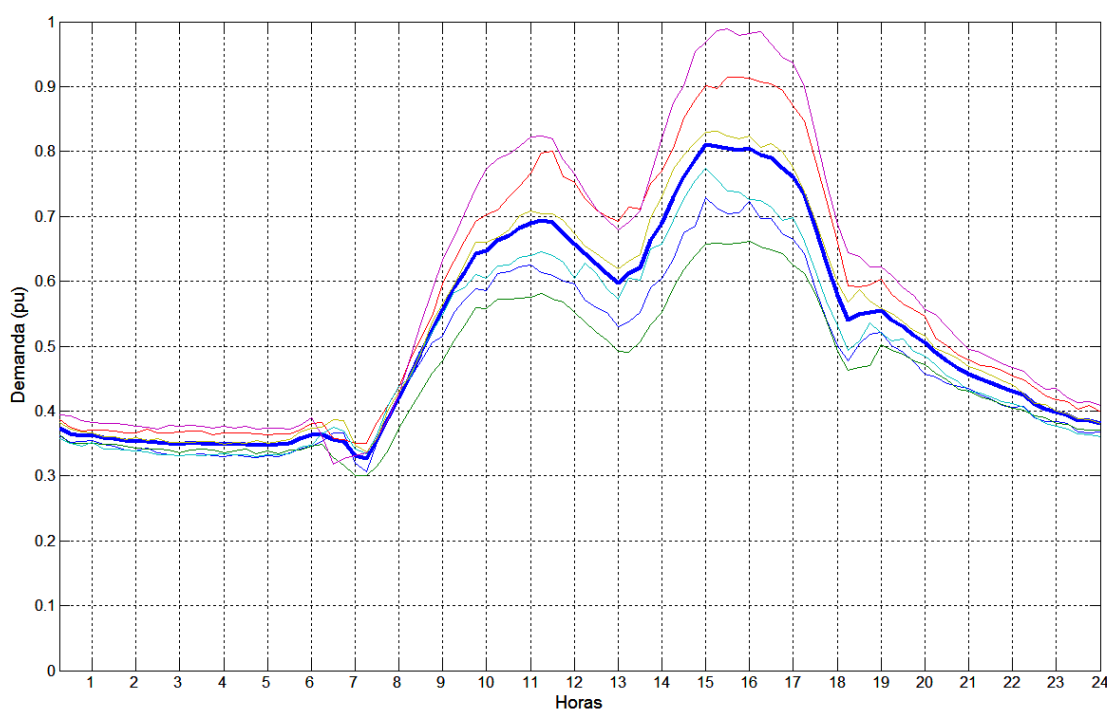


Figura 2.10 - Seis curvas de carga clusters e a curva de carga típica de uma quarta-feira de férias.

Considerando que a maior potência observada ao longo do período de medição para os dias de quarta-feira de férias foi 1.318,8 kW e através da figura 2.10, o pico máximo de demanda do período da manhã foi próximo de 923 kW;

a carga perto de 791 kW às 13hs e o pico máximo de demanda do período da tarde, cerca de 1.068 kW.

Ao comparar as curvas de carga típicas diárias das figuras 2.9 e 2.10, pode-se dizer que apresentaram uma modelagem muito próxima. Já quando se comparou os valores de demanda entre a curva de carga típica de dias de aula e com de férias, de um modo geral, os primeiros foram superiores aos segundos, como era esperado.

2.3.3 – Determinação de uma curva de carga típica semanal

A partir da composição de sete curvas de carga típicas diárias, foi obtida a modelagem da curva de carga típica semanal da instalação, como visto nas figuras 2.11 e 2.12, respectivamente, para uma semana letiva e uma semana de férias.

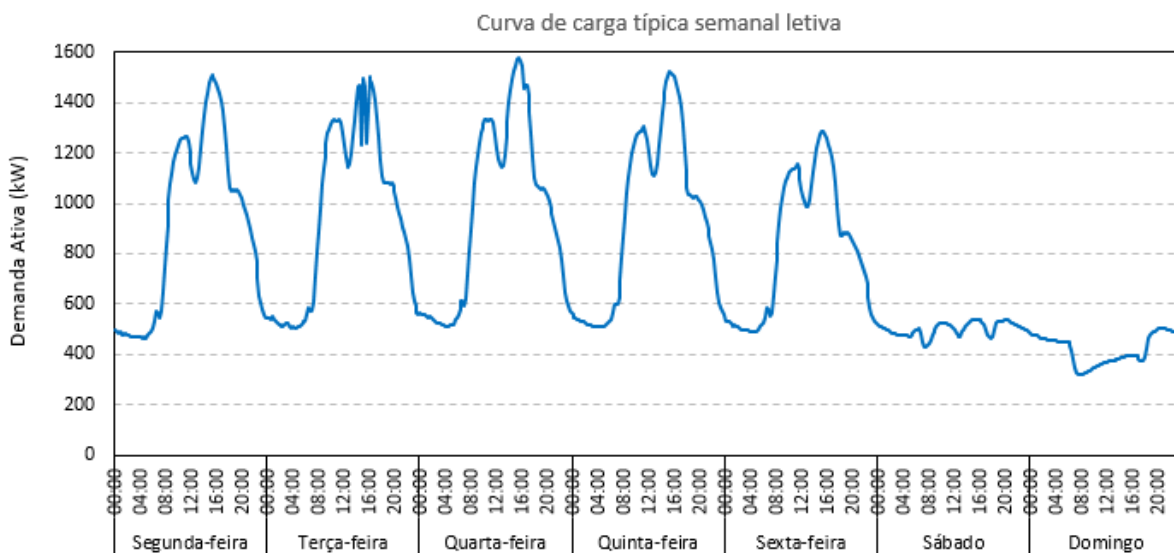


Figura 2.11 - Curva de carga típica de uma semana letiva.

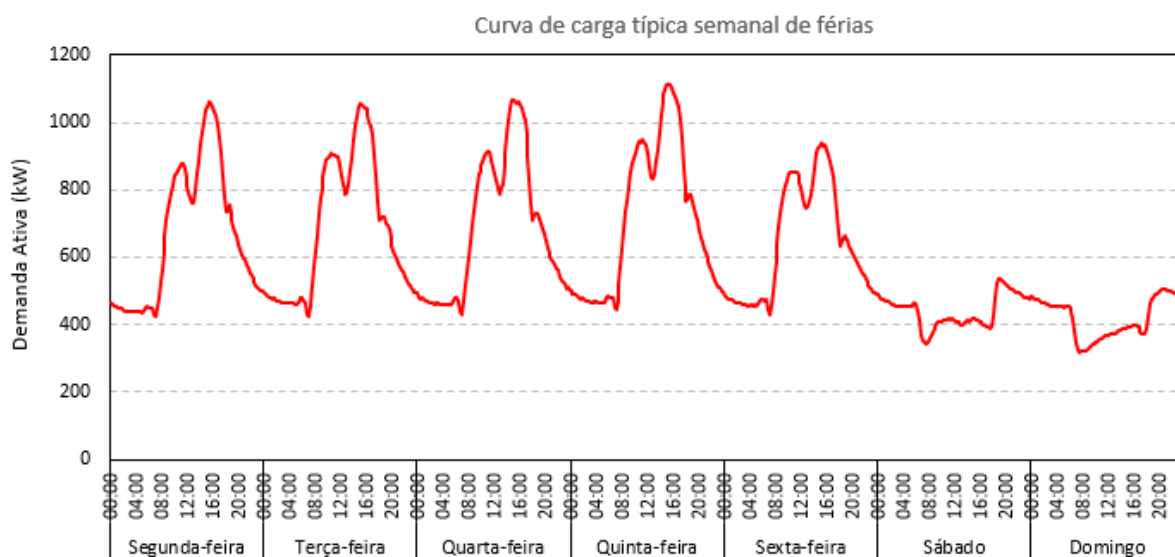


Figura 2.12 - Curva de carga típica de uma semana de férias.

Assim como na modelagem da curva de carga típica para quarta-feira de aula e de férias, percebeu-se que a demanda segue o mesmo formato, mas com valores diferentes para cada uma destas situações; o mesmo ocorre para os outros dias da semana.

A curva de carga típica semanal da instalação é uma ferramenta de comparação para as medições atuais e, conseqüentemente, permite uma avaliação do sistema de suprimento que atende à unidade consumidora.

2.4 – Análise demanda x temperatura

Na seção anterior, com a modelagem das curvas de carga típicas do Campus Santa Mônica, pôde-se conhecer o comportamento e os valores médios de demanda desta unidade. No entanto, não se tem uma discriminação da porcentagem de cada tipo de carga instalada, devido a sua grande diversidade. Porém, é notável que, com o passar dos anos, além da grande quantidade de cargas como computadores e iluminação, existe um crescimento constante de solicitações para a instalação de equipamentos de ar condicionado.

Desta maneira, o intuito desta seção foi verificar, através da curva de carga e de temperatura, se existe correlação entre a demanda medida pela concessionária de energia com a temperatura aferida pelo Instituto Nacional de Meteorologia na cidade de Uberlândia, que possui sua estação meteorológica neste campus em estudo. Para isto, foram considerados dois momentos no ano de 2013, o dia letivo em quem foi registrada a temperatura mais elevada no período da tarde do ano e o dia letivo em quem foi registrada a temperatura mais baixa no período da tarde do ano.

O dia letivo em que foi registrada a temperatura mais elevada no período da tarde do ano de 2013 tem esta grandeza e suas demandas representadas através das curvas da figura 2.13. Este dia foi uma segunda-feira e apresentou uma temperatura máxima de 33,8 °C as 16 horas. Ao analisar a figura 2.13, pôde-se observar através da curva azul que a variação da demanda ao longo do dia está relacionada diretamente às atividades acadêmicas, isto é, das 0 até as 7 horas apresentou demanda aproximadamente constante, a partir de então se iniciaram as atividades do período matutino e também o crescimento da demanda; entre as 11:20 e 13:10 horas houve uma redução da demanda devido ao intervalo de almoço; após isso, com o início das atividades vespertinas, a demanda retomou seu crescimento até as 15:00hs quando decresceu até as 19 horas e a partir desse horário, com o início do período noturno, houve um crescimento da demanda até as 20:15hs. Os valores de demandas registrados no período noturno são bem inferiores aos alcançados no período da manhã e da tarde e isso se deve ao volume de atividades desenvolvidas em cada período.

CAPITULO II – Metodologia para Diagnóstico de Eficiência Energética na Instalação Elétrica do Campus

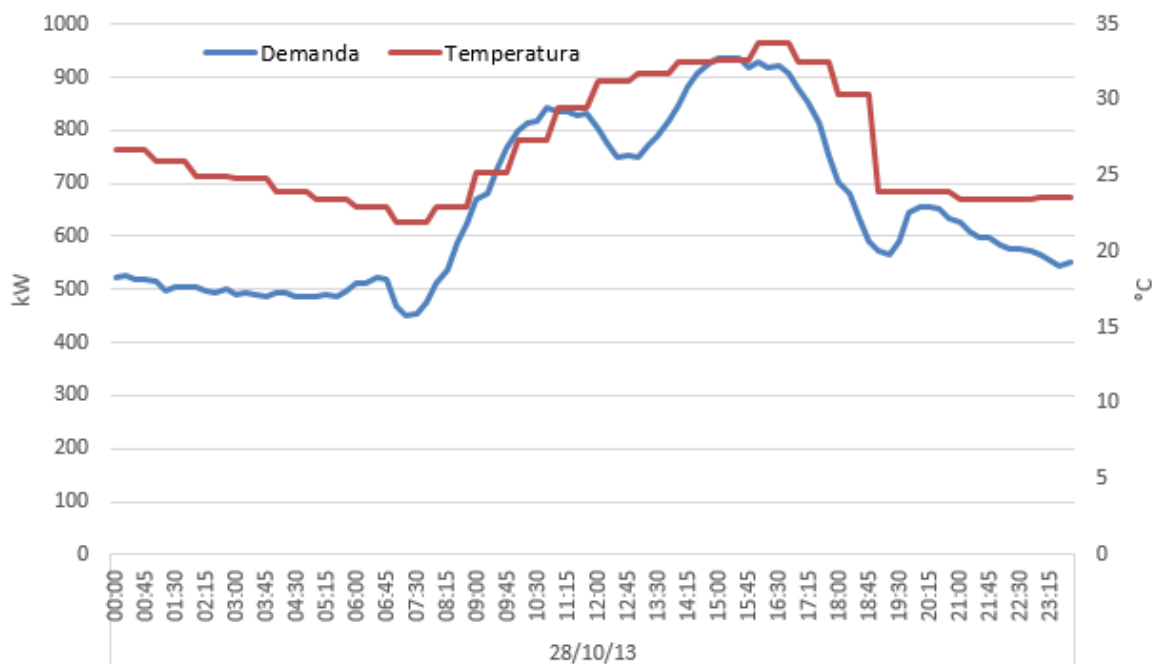


Figura 2.13 - Relação entre demanda e temperatura em um dia letivo com temperaturas mais elevadas no período da tarde no ano de 2013.

Ao comparar as duas curvas da figura 2.13, pode-se dizer que a variação da demanda ao longo do dia também está relacionada à temperatura pois, exceto no intervalo das 11:20 as 13:10 hs, a curva de demanda parece acompanhar a curva de temperatura. Inclusive foi feito o cálculo do coeficiente de correlação para estas duas grandezas, o qual indica a força e a direção do relacionamento linear entre duas variáveis, e o resultado obtido de 0,85 indicou uma forte correlação.

No entanto, para verificar se essa forte correlação entre a variação de demanda e temperatura existe ou trata-se apenas de uma coincidência de comportamento entre as atividades acadêmicas e o aumento da temperatura ao longo do dia, fez-se necessário a realização da mesma análise em um dia com baixas temperaturas. Assim, a figura 2.14 mostra a variação dessas mesmas grandezas no dia letivo em que foi registrada a temperatura mais baixa no período da tarde do ano de 2013 (uma terça-feira com temperatura de 14,6°C as 15 horas).

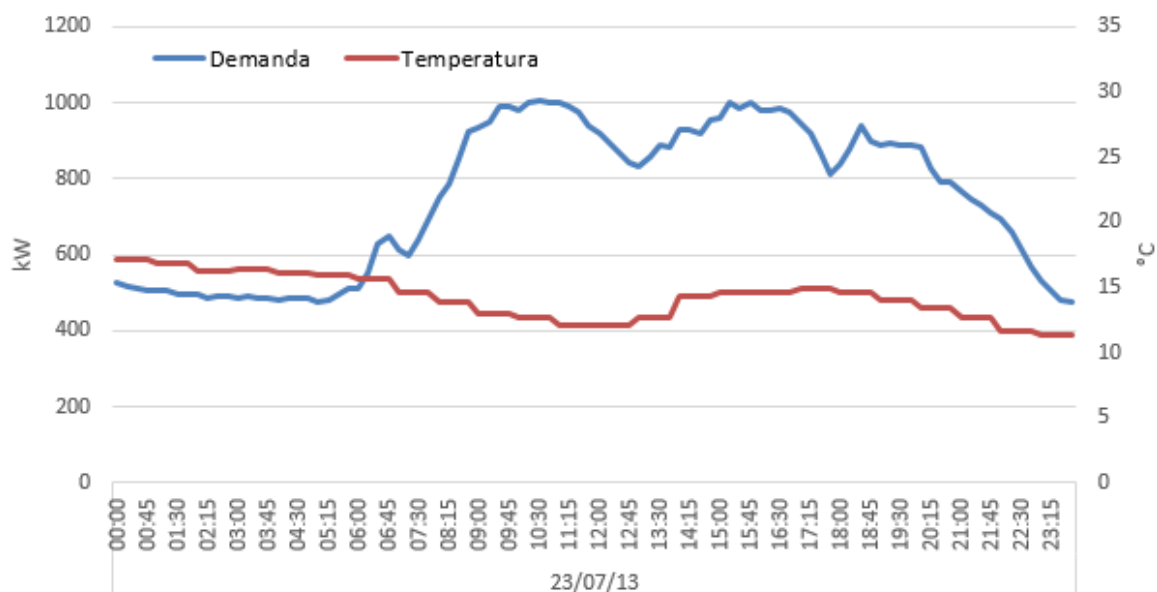


Figura 2.14 - Relação entre demanda e temperatura em um dia letivo com temperaturas mais baixas no período da tarde no ano de 2013.

A curva de temperatura da figura 2.14, diferentemente da figura 2.13, apresenta um formato mais constante e com temperaturas mais baixas, o que, segundo o coeficiente de correlação calculado anteriormente, provocaria uma alteração no contorno da curva de demanda e uma redução nos seus valores.

No entanto, apesar de a curva de demanda da figura 2.14 apresentar um contorno mais suave, sem um pico agudo a tarde; as curvas azuis das figuras 2.13 e 2.14, possuem o mesmo formato, já descrito anteriormente e diretamente relacionado às atividades acadêmicas diárias, e também apresentam valores de demanda máximos muito próximos. O valor de demanda máximo no dia de temperaturas mais baixas (1.000 kW) é inclusive maior que o valor de demanda máximo no dia de temperaturas mais altas (940 kW). O cálculo do coeficiente de correlação foi repetido, agora considerando os valores da figura 2.14 e o resultado obtido foi próximo de zero, o que indicou uma fraca correlação entre as grandezas.

Os resultados acima permitiram concluir que a variação da demanda ao longo do dia está mais fortemente relacionada ao volume das atividades acadêmicas desenvolvidas em cada período do que com a variação da temperatura, ou seja, apesar de ser crescente a instalação de equipamentos de ar condicionado, estes ainda não representam uma porcentagem significativa da carga para indicar grandes diferenças de valores de demanda entre dias quentes e frios. Alternativamente, pode-se concluir que independente da variação da temperatura ambiente entre dias quentes e frios, o uso de aparelhos de ar condicionado é constante devido a necessidade de temperatura controlada em laboratórios que possuem equipamentos e executam procedimentos específicos.

2.5 – Curva de carga e fator de carga dos transformadores

A curva de carga semanal modelada para o ponto de entrega (para dias letivos e de férias) representa a curva de carga típica semanal desta instalação elétrica como um todo. No entanto, o sistema elétrico deste campus universitário é composto por onze transformadores que alimentam vários blocos onde são desenvolvidas diferentes atividades, por isso, concluiu-se que seria importante o conhecimento do comportamento semanal das potências ativa, aparente e reativa em cada ponto de medição da baixa tensão, do Ponto 1 ao Ponto 11, como pode ser observado nas figuras 2.15 e 2.16.

CAPITULO II – Metodologia para Diagnóstico de Eficiência Energética na Instalação Elétrica do Campus

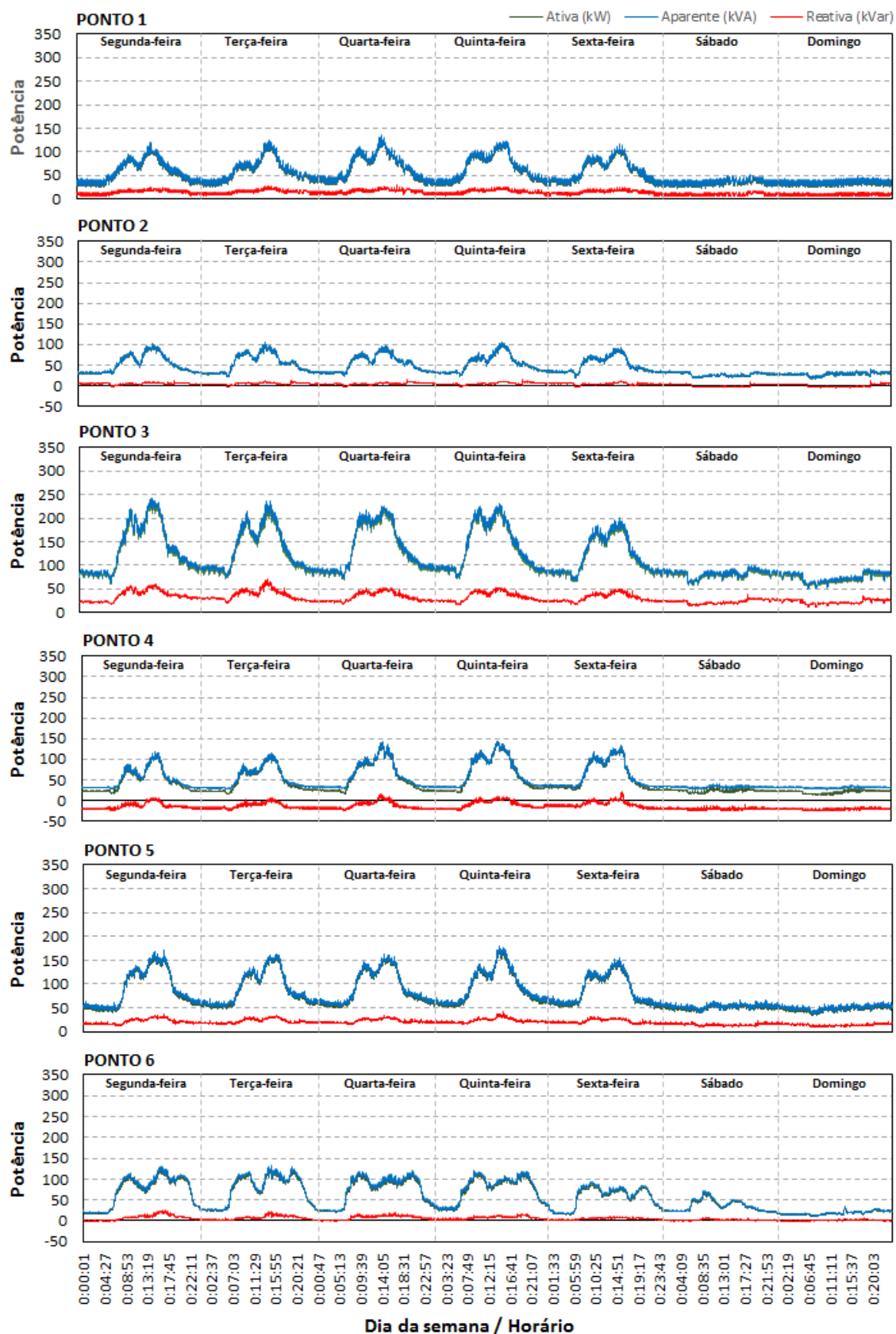


Figura 2.15 – Comportamento semanal das potências ativa, aparente e reativa em cada ponto de medição dos Pontos 1 ao 6.

CAPITULO II – Metodologia para Diagnóstico de Eficiência Energética na Instalação Elétrica do Campus

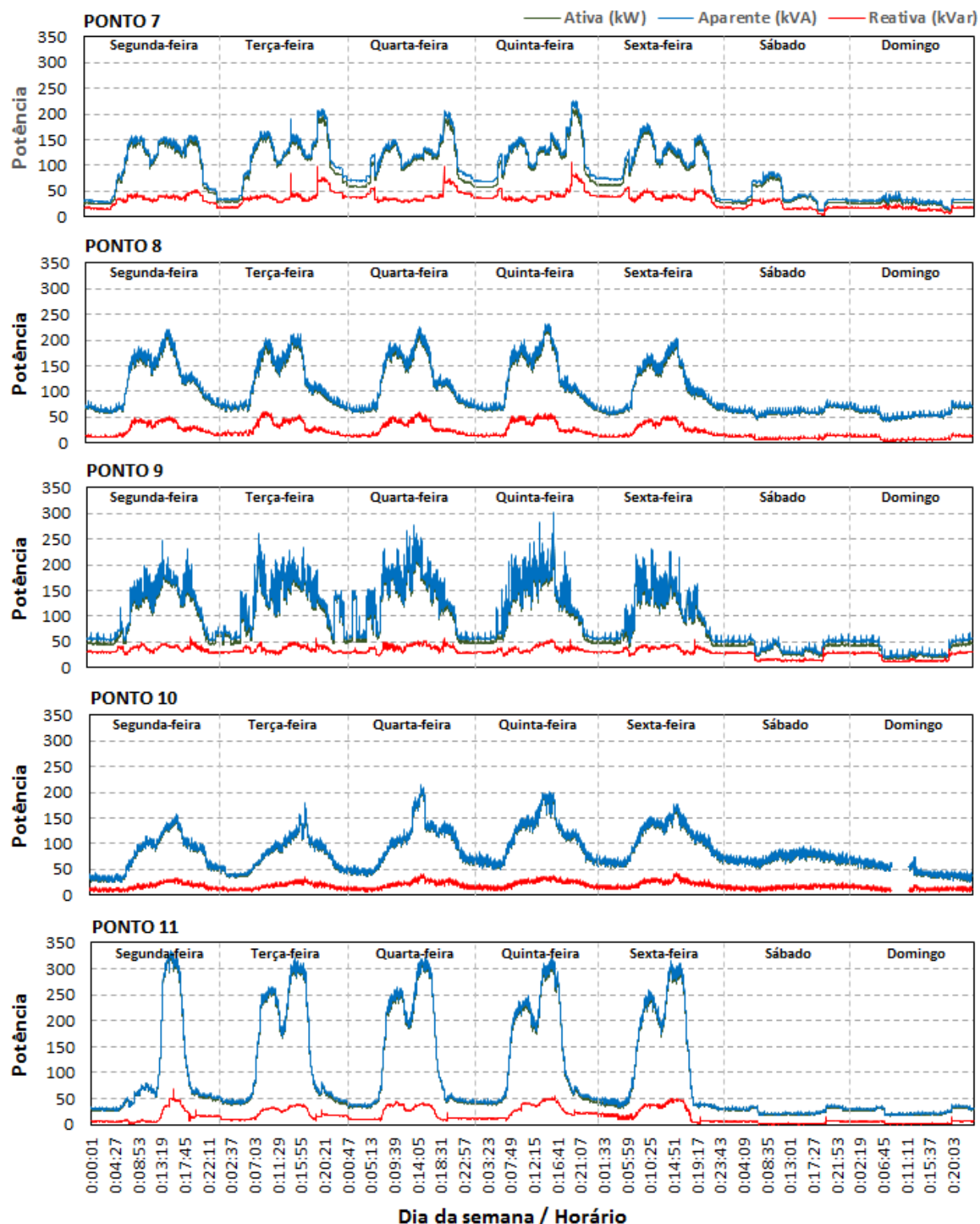


Figura 2.16 – Comportamento semanal das potências ativa, aparente e reativa em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11.

O comportamento da potência ativa e aparente nos dias de semana é caracterizado por: nos Pontos 1, 3, 4, 5 e principalmente 11, atingir dois picos, um no período da manhã e outro no período da tarde, por se tratar de blocos destinados a laboratórios e divisões administrativas que tem suas atividades desenvolvidas, na sua maioria, no período diurno; nos Pontos 6 e 7, atingir três picos, um na manhã, tarde e noite, por se tratar de blocos destinados a salas de aula que são ocupadas nos três períodos do dia; nos Pontos 2, 8 e 10, atingir dois picos maiores, um na manhã e outro à tarde, e ter uma carga relevante a noite, por se tratar de blocos destinados a atividades administrativas e cursos noturnos e por fim, no Ponto 9, variar abruptamente desde o início da manhã até o meio do período noturno, por possuir como uma das principais cargas o restaurante universitário do campus. O comportamento da potência ativa e aparente nos dias de final de semana é caracterizado por registrar valores baixos e que variam em uma faixa pequena.

Com o intuito também de verificar o nível de carregamento destes transformadores, estas medições de potência aparente foram estatisticamente tratadas, isto é, seus valores máximos, médios, máximos percentis diários 95% e percentis semanais 95%, foram obtidos e comparados com a potência nominal dos equipamentos, conforme figura 2.17.

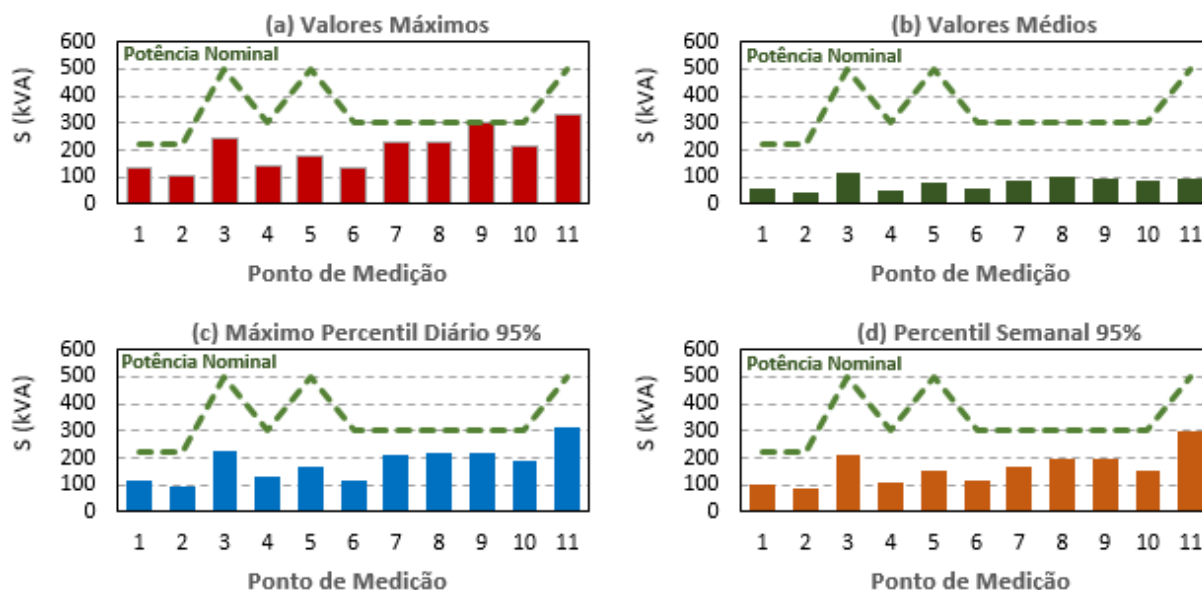


Figura 2.17 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para cada ponto de medição em relação à potência aparente dos transformadores dos Pontos 1 ao 11.

Ao comparar os valores máximos com os valores médios, devido a diferença entre eles, percebeu-se que há uma variação muito grande das potências aparentes ao longo período de monitoração em todos os pontos de medição; mas que, na média, o carregamento destes transformadores é baixo em relação a potência nominal dos mesmos. Mesmo considerando o máximo percentil diário 95% e o percentil semanal 95%, existe uma faixa de potência que pode ser aumentada no consumo em todos os pontos. O único transformador que chega atingir sua potência nominal é o TR05.2, identificado como Ponto 9, no seu valor máximo e que atende aos Blocos 1G, 1H, 1V, 1W, 1Y, 3E, 5M, 5U e iluminação externa.

A comparação entre valores máximos e médios é feita através do indicador de energia denominado fator de carga, que mostra como a energia elétrica é utilizada em uma determinada instalação no que diz respeito à demanda de potência para um determinado intervalo de tempo considerado. O fator de carga é calculado através da equação (2.2).

$$fc = \frac{D_{méd}}{D_{máx}}[pu] \quad (2.2)$$

Onde:

$D_{máx}$ – máximo valor da demanda de potência no intervalo de tempo considerado [kW];

D_{med} – valor médio da demanda de potência no mesmo intervalo de tempo considerado [kW].

O fator de carga semanal dos transformadores dos Pontos 1 ao 11 são, sequencialmente, 0,42; 0,43; 0,49; 0,36; 0,45; 0,45; 0,40; 0,44; 0,32; 0,40 e 0,29 pu; isto é, estão todos abaixo de 0,5 pu. Estes valores obtidos de fator de carga representam exatamente o comportamento da potência ativa nos pontos de medição das figuras 2.15 e 2.16, pois este fator representa quantitativamente quão bem distribuído é o consumo de energia da instalação ao longo do período analisado, ou seja, quanto mais tender a unidade, mais suave será o perfil da curva de carga e mais bem distribuída será a demanda da instalação ao longo do período e quanto menor, mais a demanda tende a se localizar em curtos períodos.

A partir da avaliação do carregamento dos transformadores da rede elétrica do Campus Santa Mônica verificou-se, na maioria dos equipamentos, a disponibilidade de ampliação da carga conectada a eles e o consequente aumento de seus graus de utilização. Isto representa uma economia para a instituição no processo de expansão patrimonial, pois não será necessário a instalação de novos transformadores até que o carregamento ideal dos existentes seja alcançado.

2.6 – Fator de potência

O fator de potência é outro indicador de energia elétrica que caracteriza unidades consumidoras pelo comportamento no uso da eletricidade e permite estabelecer prioridades de atuação para gestão dos recursos e ações de eficiência energética [3].

O valor do fator de potência é calculado a partir dos valores registrados das potências ativa e reativa ou das respectivas energias, utilizando as equações (2.3) e (2.4) [30].

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} [pu] \quad (2.3)$$

$$fp = \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} [pu] \quad (2.4)$$

Onde:

Fp – fator de potência [pu];

P – potência ativa [W];

Q – potência reativa [VAr];

EA – energia ativa [Wh];

ER – energia reativa [VArh].

Para unidade consumidora ou conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00 pu indutivo ou 1,00 e 0,92 pu capacitivo segundo o documento Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, da ANEEL [30]. Aos montantes de energia elétrica e demanda de potência reativas que excederem o limite permitido, aplicam-se as cobranças, a serem adicionadas ao faturamento regular de unidades consumidoras [31].

De maneira que a elevação dos níveis de fator de potência é importante para a instalação elétrica por motivos técnicos, de eficiência energética e econômicos, pois reduz o aquecimento de equipamentos e eleva sua vida útil, evitando gastos operacionais com perdas de energia e queda de tensão no sistema elétrico e evita o pagamento de multas à concessionária por não adequação aos valores de referência de fator de potência das normas vigentes.

Por estes motivos, o indicador fator de potência foi analisado no ponto de entrega do Campus Santa Mônica. No entanto, apesar de, normalmente, a redução do fator de potência ser causada pela operação de cargas lineares indutivas e não lineares, ou seja, não apenas devido ao aumento da defasagem angular entre tensão e corrente, mas também devido à presença de correntes harmônicas na rede [32]; os dados medidos e analisados referentes ao fator de potência desta instalação em estudo levaram em consideração apenas a frequência fundamental.

Na figura 2.18 pode-se visualizar que todos os valores estatísticos calculados com base nos resultados de medição (máximo, médio, máximo percentil diário 95%, percentil semanal 95% e mínimo) dos registros de fator de potência no ponto de entrega estão dentro da faixa de valores considerada adequada pelo Prodist. Os valores máximos, máximos percentis diários 95% e percentis semanais 95% ficaram próximos de 0,98 pu; na média, os valores de fator de potência registraram cerca de 0,95 pu e seus menores valores foram muito próximos de 0,92 pu.

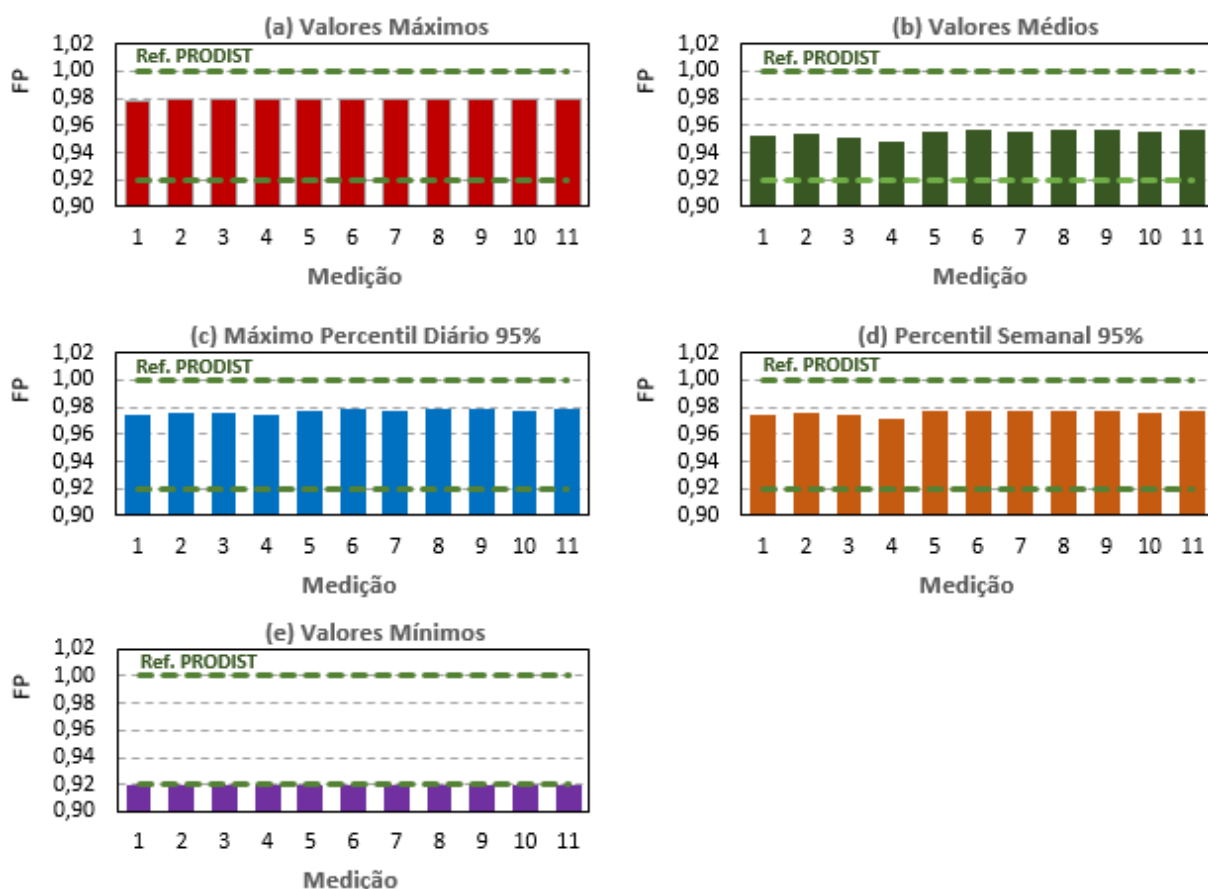


Figura 2.18 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para as medições no ponto de entrada em relação ao fator de potência.

O fator de potência no ponto de entrega em todos os períodos de medição apresentou um comportamento semanal uniforme, tanto nos dias de semana quanto nos dias de final de semana, os quais são valores elevados durante o dia e valores sensivelmente reduzidos no período noturno, como pode ser visualizado nas figuras 2.19 e 2.20. Tal comportamento pode ser explicado pelo baixo fator de potência dos transformadores que trabalham com uma carga muito baixa no período noturno.

O fato de os valores de fator de potência no ponto de entrega estarem sempre dentro da faixa de valores considerada adequada é conseguido devido medidas de correção de fator de potência, no caso, a instalação de três bancos de

CAPITULO II – Metodologia para Diagnóstico de Eficiência Energética na Instalação Elétrica do Campus

capacitores no quadro geral de distribuição de dois transformadores, um de 10 kVAr no transformador TR01.2 e dois de 20 kVAr no transformador TR02.2.

CAPITULO II – Metodologia para Diagnóstico de Eficiência Energética na Instalação Elétrica do Campus

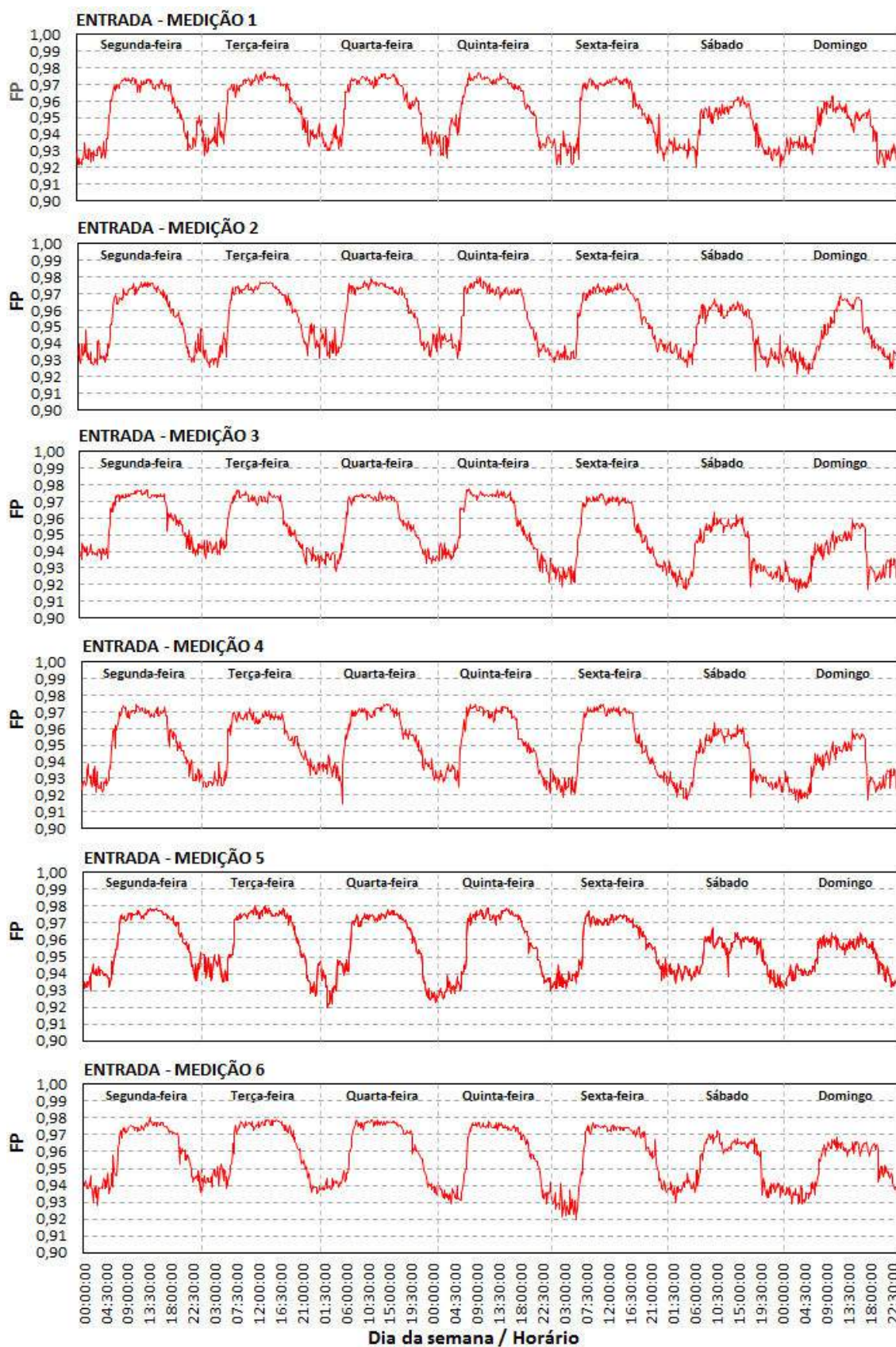


Figura 2.19 – Comportamento semanal do fator de potência no ponto de entrada para as medições de 1 a 6.

CAPITULO II – Metodologia para Diagnóstico de Eficiência Energética na Instalação Elétrica do Campus

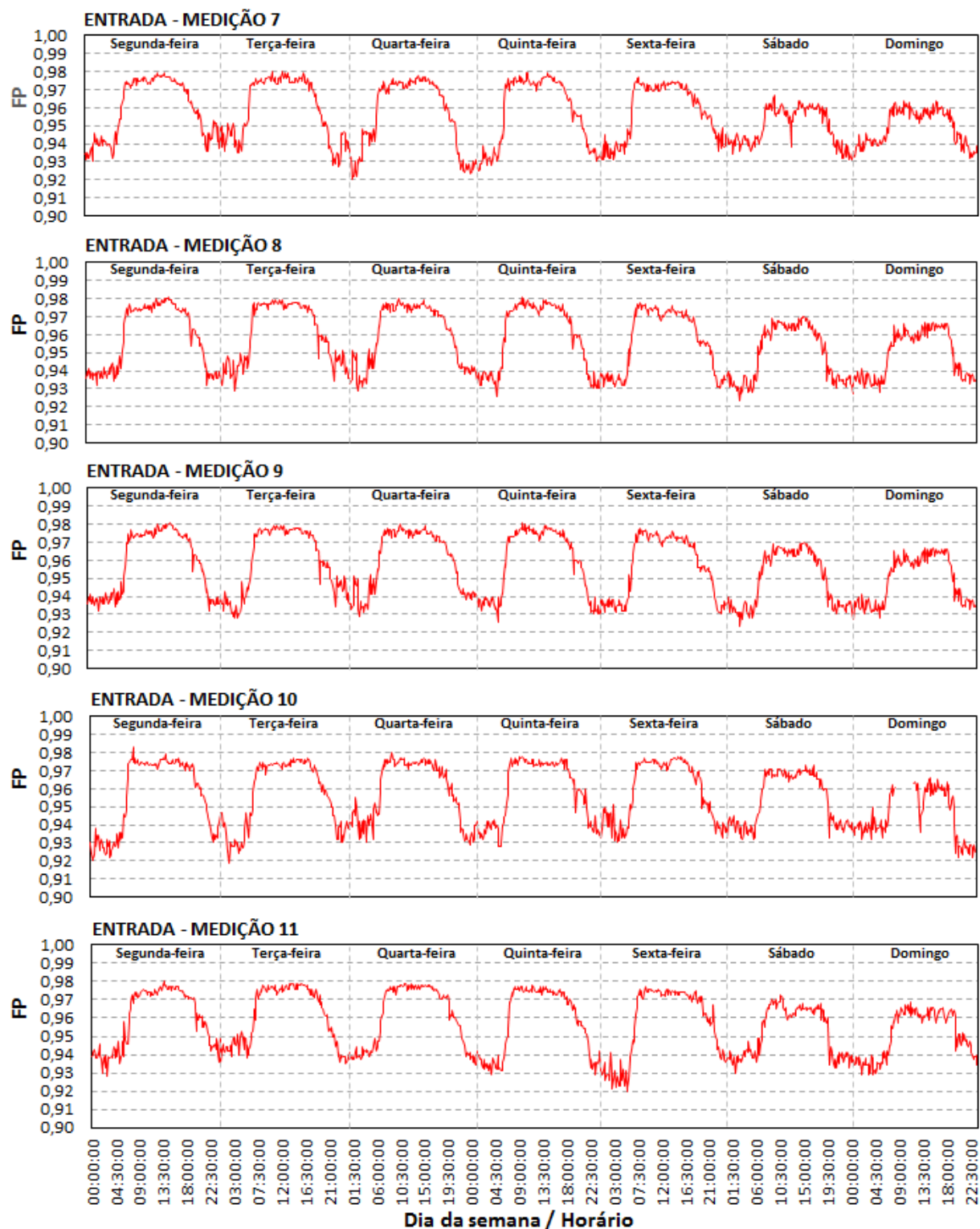


Figura 2.20 – Comportamento semanal do fator de potência no ponto de entrada para as medições de 7 a 11.

A partir da avaliação do indicador de energia fator de potência, no ponto de entrega do Campus Santa Mônica, verificou-se que, em nenhum momento, a energia elétrica e demanda de potência reativos excederam o limite permitido, o que torna desnecessário o investimento em redimensionar os equipamentos alimentadores devido sobrecarga e na aquisição de equipamentos corretivos de fator de potência e também evita gastos com perdas de energia e pagamento de multas à concessionária.

2.7 – Gestão de faturas e monitoramento da demanda

Também relacionada ao conceito de eficiência energética está a definição de gestão de energia, que tem como principais metodologias a gestão de faturas e o monitoramento da demanda, para que sejam possíveis tomadas de decisões e feitas estimativas de forma planejada, eficiente e fundamentada.

O pagamento de ultrapassagens de demanda à concessionária de energia e de montantes referentes ao inadequado enquadramento de modalidade tarifária são algumas das consequências indesejáveis da falta de controle e acompanhamento da evolução de um sistema elétrico. Por isso, neste estudo, foram realizados a gestão de faturas do ano de 2013, em que a modalidade tarifária e a demanda contratada do Campus Santa Mônica foram reavaliadas através de planilhas implementadas, e também o acompanhamento da evolução da demanda máxima da instalação nos anos de 2011, 2012 e 2013.

2.7.1 – Análise da modalidade tarifária

A instalação elétrica dessa universidade possui tensão de fornecimento de 13,8 kV e, no ano de 2013, possuía demanda contratada de 1.800 kW no horário fora de ponta e de 1.450 kW no horário de ponta.

Segundo a Resolução Normativa ANEEL nº 414, de 9 de setembro de 2010, esta instalação está enquadrada no grupo A e no subgrupo A4, pois sua tensão de fornecimento é inferior a 69kV e está entre 2,3 kV e 25 kV. O grupo A é caracterizado pela tarifa binômica composta pela tarifa de consumo de energia elétrica e pela tarifa de demanda de potência [31].

Para tensão de fornecimento inferior a 69 kV e demanda contratada superior a 300 kW, esta resolução permite que a unidade consumidora se enquadre, apenas, ou na modalidade tarifária horária verde ou azul.

Na modalidade tarifária horária verde, as tarifas de consumo de energia elétrica são diferenciadas, de acordo com as horas de utilização do dia, mas a tarifa de demanda de potência é única. Já na modalidade tarifária horária azul, as tarifas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência são diferenciadas de acordo com as horas de utilização do dia [31].

O posto tarifário desta instalação, ou seja, o período de tempo em horas para aplicação das tarifas de forma diferenciada ao longo do dia, é composto pelo posto tarifário ponta que, no ano de 2013, era das 17 às 20 horas (nos meses em que não se aplicava o horário de verão) e das 18 às 21 horas (nos meses em que se aplicava o horário de verão) e pelo posto tarifário fora de ponta, período composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas nos postos ponta.

Dessa forma, para verificar qual das duas modalidades tarifárias a universidade melhor se enquadraria, calculou-se o valor de todas as faturas mensais do ano de 2013 para ambas. Para isso, foram implementadas tabelas de análise de modalidade tarifária, que utilizaram: os dados como a energia elétrica consumida e a demanda de potência registrada obtidos através de registros do medidor da concessionária de energia elétrica durante os doze ciclos de faturamento do ano de 2013; as equações para cálculos de faturas indicadas na

CAPITULO II – Metodologia para Diagnóstico de Eficiência Energética na Instalação Elétrica do Campus

Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010; assim como as tarifas indicadas na Resolução Homologatória nº 1.507, de 5 de abril de 2013, ambas da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e o aplicativo computacional Excel. As tarifas aplicadas foram representadas na tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Tarifas indicadas na Resolução Homologatória ANEEL nº1.507, de 5 de abril de 2013

Modalidade tarifária	Tarifas (R\$)			
	Demanda Fora de Ponta	Demanda Ponta	Energia Fora de Ponta	Energia Ponta
TH Verde	R\$ 7,00	x	R\$ 0,18	R\$ 0,91
TH Azul	R\$ 7,00	R\$ 26,44	R\$ 0,18	R\$ 0,28

Apesar de ter sido calculado o valor de todas as faturas mensais do ano de 2013 para as duas modalidades tarifárias, apenas serão demonstrados os cálculos para dois meses, um em que não houve registro de ultrapassagem de demanda e outro em que houve, respectivamente, janeiro e março.

a) Cálculos – mês de janeiro

Os dados registrados pelo medidor da concessionária de energia elétrica no mês de janeiro foram:

- Demanda Registrada no Horário Fora de Ponta: 1.820 kW;
- Demanda Registrada no Horário de Ponta: 1.134 kW;
- Energia Consumida no Horário Fora de Ponta: 427.000 kWh;
- Energia Consumida no Horário de Ponta: 42.000 kWh.

Os valores de demanda faturada no mês de janeiro foram:

- Demanda Faturada no Horário Fora de Ponta: 1.820 kW, pois o valor da demanda registrada é maior do que a contratada;

- Demanda Faturada no Horário de Ponta: 1.450 kW, pois o valor da demanda registrada é menor do que a contratada.

Como nenhuma das demandas registradas excedeu em mais do que 5% das suas respectivas demandas contratadas, não houve cobrança de ultrapassagem de demanda.

- **Modalidade Tarifária Horária Verde**

Valor pago pela Demanda = 1.820 (kW) x 7,00 (R\$/kW) = R\$ 12.740,00
(Como nesta modalidade, a demanda independe da hora de utilização do dia, considerou-se a demanda faturada de maior valor.);

Valor pago pela Energia no Horário Fora de Ponta = 427.000 (kW) x 0,18052 (R\$/kWh) = R\$ 77.082,04;

Valor pago pela Energia no Horário de Ponta = 42.000 (kW) x 0,91464 (R\$/kWh) = R\$ 38.414,88;

Valor total da fatura = R\$ 128.236,92.

- **Modalidade Tarifária Horária Azul**

Valor pago pela Demanda no Horário Fora de Ponta = 1.820 (kW) x 7,00 (R\$/kW) = R\$ 12.740,00;

Valor pago pela Demanda no Horário de Ponta = 1.450 (kW) x 26,44 (R\$/kW) = R\$ 38.338,00;

Valor pago pela Energia no Horário Fora de Ponta = 427.000 (kW) x 0,18052 (R\$/kWh) = R\$ 77.082,04;

Valor pago pela Energia no Horário de Ponta = 42.000 (kW) x 0,27873 (R\$/kWh) = R\$ 11.706,66;

Valor total da fatura = R\$ 139.866,70.

Após os cálculos anteriores, verificou-se que, para o mês de janeiro, a modalidade tarifária que esta instalação melhor se enquadraria seria a horária verde.

Vale ressaltar que neste mês as demandas contratadas entre a universidade e a concessionária de energia elétrica local estavam de acordo, pois não foram faturados valores de ultrapassagem de demanda.

b) Cálculos – mês de março

Os dados registrados pelo medidor da concessionária de energia elétrica no mês de março foram:

- Demanda Registrada no Horário Fora de Ponta: 1.988 kW;
- Demanda Registrada no Horário de Ponta: 1.708 kW;
- Energia Consumida no Horário Fora de Ponta: 519.400 kWh;
- Energia Consumida no Horário de Ponta: 71.400 kWh.

Os valores de demanda faturada no mês de março foram:

- Demanda Faturada no Horário Fora de Ponta: 1.988 kW, pois o valor da demanda registrada foi maior do que a contratada, e como excedeu em mais do que 5% da contratada (1.890 kW), cobrou-se Ultrapassagem de Demanda no Horário Fora de Ponta de 188 kW;
- Demanda Faturada no Horário de Ponta: 1.708 kW, pois o valor da demanda registrada foi maior do que a contratada, e como excedeu em mais do que 5% da contratada (1.522,5 kW), cobrou-se Ultrapassagem de Demanda no Horário de Ponta de 258 kW.

- **Modalidade Tarifária Horária Verde**

Valor pago pela Demanda = $1.988 \text{ (kW)} \times 7,00 \text{ (R\$/kW)} = \text{R\$ } 13.916,00$
(Como nesta modalidade, a demanda independe da hora de utilização do dia, considerou-se a demanda faturada de maior valor.);

Valor pago pela Ultrapassagem de Demanda = $188 \text{ (kW)} \times 2 \times 7,00 \text{ (R\$/kW)} = \text{R\$ } 2.632,00$;

Valor pago pela Energia no Horário Fora de Ponta = $519.400 \text{ (kW)} \times 0,18052 \text{ (R\$/kWh)} = \text{R\$ } 93.762,09$;

Valor pago pela Energia no Horário de Ponta = $71.400 \text{ (kW)} \times 0,91464 \text{ (R\$/kWh)} = \text{R\$ } 65.305,30$;

Valor total da fatura = $\text{R\$ } 175.615,39$.

- **Modalidade Tarifária Horária Azul**

Valor pago pela Demanda no Horário Fora de Ponta = $1.988 \text{ (kW)} \times 7,00 \text{ (R\$/kW)} = \text{R\$ } 13.916,00$;

Valor pago pela Ultrapassagem de demanda no Horário Fora de Ponta = $188 \text{ (kW)} \times 2 \times 7,00 \text{ (R\$/kW)} = \text{R\$ } 2.632,00$;

Valor pago pela Demanda no Horário de Ponta = $1.708 \text{ (kW)} \times 26,44 \text{ (R\$/kW)} = \text{R\$ } 45.159,52$;

Valor pago pela Ultrapassagem de demanda no Horário de Ponta = $258 \text{ (kW)} \times 2 \times 26,44 \text{ (R\$/kW)} = \text{R\$ } 13.643,04$;

Valor pago pela Energia no Horário Fora de Ponta = $519.400 \text{ (kW)} \times 0,18052 \text{ (R\$/kWh)} = \text{R\$ } 93.762,09$;

Valor pago pela Energia no Horário de Ponta = $71.400 \text{ (kW)} \times 0,27873 \text{ (R\$/kWh)} = \text{R\$ } 19.901,32$;

Valor total da fatura = $\text{R\$ } 189.013,97$.

CAPITULO II – Metodologia para Diagnóstico de Eficiência Energética na Instalação Elétrica do Campus

Após os cálculos anteriores, verificou-se que, para o mês de março, a modalidade tarifária que esta instalação melhor se enquadraria também seria a horária verde.

Vale ressaltar que neste mês as demandas contratadas entre a universidade e a concessionária de energia elétrica, tanto para o horário fora de ponta quanto para o de ponta, não estavam de acordo, pois foram faturados valores de ultrapassagem de demanda para ambas.

c) Ano de 2013

Os dados registrados pelo medidor de faturamento da concessionária de energia elétrica, mês a mês, durante todo o ano de 2013 e os valores de demanda faturada e ultrapassagem de demanda calculados, estão apresentados na tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Demandas registradas e faturadas e energia consumida pela universidade no ano de 2013

Mês	Demanda Horário Fora de Ponta (kW)			Demanda Horário de Ponta (kW)			Energia (kWh)	
	Registrado	Faturado	Ultra passagem	Registrado	Faturado	Ultra passagem	Horário Fora de Ponta	Horário de Ponta
Jan	1.820	1.820	x	1.134	1.450	x	427.000	42.000
Fev	1.568	1.800	x	1.078	1.450	x	478.800	56.000
Mar	1.988	1.988	188	1.708	1.708	258	519.400	71.400
Abr	1.764	1.800	x	1.484	1.484	x	491.400	64.400
Mai	1.498	1.800	x	1.288	1.450	x	389.200	47.600
Jun	1.386	1.800	x	1.176	1.450	x	450.800	60.200
Jul	1.442	1.800	x	1.260	1.450	x	449.400	60.200
Ago	1.526	1.800	x	1.344	1.450	x	473.200	70.000
Set	1.652	1.800	x	1.386	1.450	x	463.400	65.800
Out	1.974	1.974	174	1.568	1.568	118	446.600	57.400
Nov	2.044	2.044	244	1.316	1.450	x	546.000	65.800
Dez	2.030	2.030	230	1.330	1.450	x	536.200	63.000

CAPITULO II – Metodologia para Diagnóstico de Eficiência Energética na Instalação Elétrica do Campus

Estendendo o método de cálculo dos valores da fatura dos meses de janeiro e de março para os demais meses, implementou-se a tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Valores que compõem a fatura mensal dos meses de 2013 para as modalidades tarifárias horária verde e azul

Mês	Modalidade Tarifária	Valor da Fatura Mensal (R\$)						TOTAL
		Demanda Fora de Ponta	Demanda Ponta	Consumo Fora de Ponta	Consumo Ponta	Ultrapassagem de Demanda Fora de Ponta	Ultrapassagem de Demanda Ponta	
Jan	TH Verde	12.740,00		77.082,04	38.414,88	x		128.236,92
	TH Azul	12.740,00	38.338,00	77.082,04	11.706,66	x	x	139.866,70
Fev	TH Verde	12.600,00		86.432,98	51.219,84	x		150.252,82
	TH Azul	12.600,00	38.338,00	86.432,98	15.608,88	x	x	152.979,86
Mar	TH Verde	13.916,00		93.762,09	65.305,30	2.632,00		175.615,38
	TH Azul	13.916,00	45.159,52	93.762,09	19.901,32	2.632,00	13.643,04	189.013,97
Abr	TH Verde	12.600,00		88.707,53	58.902,82	x		160.210,34
	TH Azul	12.600,00	39.236,96	88.707,53	17.950,21	x	x	158.494,70
Mai	TH Verde	12.600,00		70.258,38	43.536,86	x		126.395,25
	TH Azul	12.600,00	38.338,00	70.258,38	13.267,55	x	x	134.463,93
Jun	TH Verde	12.600,00		81.378,42	55.061,33	x		149.039,74
	TH Azul	12.600,00	38.338,00	81.378,42	16.779,55	x	x	149.095,96
Jul	TH Verde	12.600,00		81.125,69	55.061,33	x		148.787,02
	TH Azul	12.600,00	38.338,00	81.125,69	16.779,55	x	x	148.843,23
Ago	TH Verde	12.600,00		85.422,06	64.024,80	x		162.046,86
	TH Azul	12.600,00	38.338,00	85.422,06	19.511,10	x	x	155.871,16
Set	TH Verde	12.600,00		83.652,97	60.183,31	x		156.436,28
	TH Azul	12.600,00	38.338,00	83.652,97	18.340,43	x	x	152.931,40
Out	TH Verde	13.818,00		80.620,23	52.500,34	2.436,00		149.374,57
	TH Azul	13.818,00	41.457,92	80.620,23	15.999,10	2.436,00	6.239,84	160.571,09
Nov	TH Verde	14.308,00		98.563,92	60.183,31	3.416,00		176.471,23
	TH Azul	14.308,00	38.338,00	98.563,92	18.340,43	3.416,00	x	172.966,35
Dez	TH Verde	14.210,00		96.794,82	57.622,32	3.220,00		171.847,14
	TH Azul	14.210,00	38.338,00	96.794,82	17.559,99	3.220,00	x	170.122,81

Assim, como a quantidade de meses que cada modalidade tarifária foi mais adequada não foi determinante para ajudar na definição desta, foram

CAPITULO II – Metodologia para Diagnóstico de Eficiência Energética na Instalação Elétrica do Campus

utilizados os valores da fatura anual, resultantes da soma das faturas mensais, conforme a seguir:

- Tarifa Horária Verde = R\$ 1.854.713,56;
- Tarifa Horária Azul = R\$ 1.885.221,18.

Os valores indicados confirmam, portanto, a preferência pela modalidade tarifária horária verde devido uma economia anual de R\$ 30.507,62.

Através da figura 2.21, pode-se visualizar, com maior clareza, qual modalidade tarifária seria mais vantajosa para cada mês do ano de 2013.

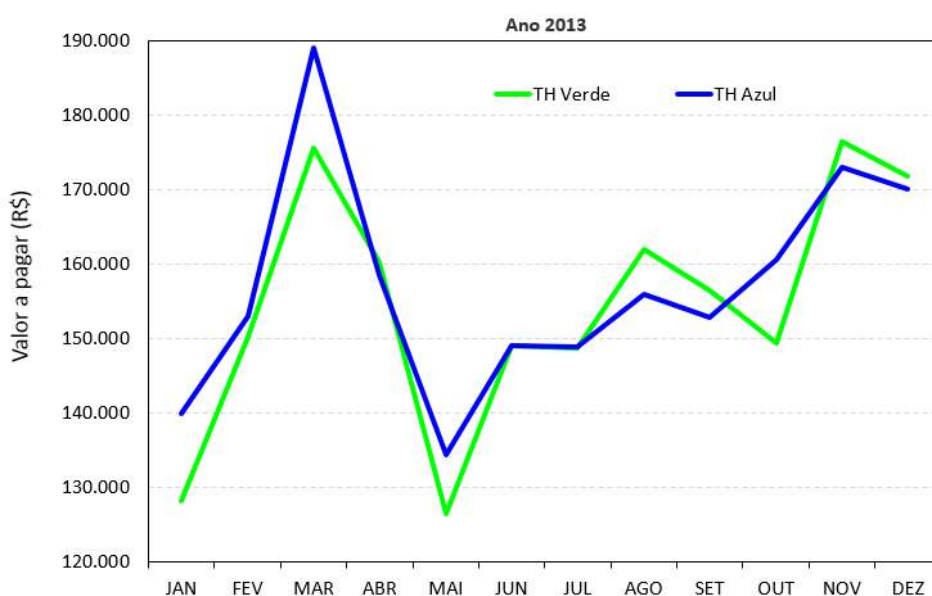


Figura 2.21 - Curva dos valores das faturas mensais durante o ano de 2013 para as modalidades tarifárias horária verde e azul.

A curva referente aos valores das faturas mensais considerando a modalidade tarifária horária verde se encontrou, na maioria dos meses, abaixo da curva que considera a modalidade tarifária horária azul.

2.7.2 – Análise da demanda contratada

A gestão de faturas também permite a reavaliação da Demanda Contratada pela unidade consumidora, a partir dos dados registrados pelo medidor de faturamento da concessionária e pela consequente, cobrança ou não, de ultrapassagem de demanda nas faturas mensais. Neste ano de 2013, a Demanda Fora de Ponta registrada ultrapassou a contratada nos meses de março, outubro, novembro e dezembro e a Demanda de Ponta registrada ultrapassou a contratada nos meses de março e outubro. A saber, no ano de 2013, a universidade teve três períodos letivos devido à greve de servidores no ano de 2012 e estas ultrapassagens de demanda ocorreram aproximadamente no meio do primeiro e do terceiro período letivo, que são épocas de maior consumo.

Com o intuito de verificar se as ultrapassagens de demanda influenciam, de alguma maneira, a avaliação sobre qual modalidade tarifária é mais vantajosa; outros valores de Demanda Contratada Fora de Ponta e de Ponta foram considerados para todo este ano de 2013. Estas novas Demandas Contratadas foram obtidas a partir das maiores demandas registradas no ano de 2013 divididas por 1,05, conforme a seguir:

Demanda máxima registrada (kW) $\leq 1,05 * \text{Demanda Contratada sugerida (kW)}$;

Demanda Contratada sugerida (kW) = Demanda máxima registrada (kW) / 1,05;

Demanda Contratada Fora de Ponta sugerida = 2.044 kW / 1,05 $\approx$ 1.950 kW;

Demanda Contratada de Ponta sugerida = 1.708 kW / 1,05 $\approx$ 1.630 kW.

CAPITULO II – Metodologia para Diagnóstico de Eficiência Energética na Instalação Elétrica do Campus

Com os novos valores adotados para os cálculos das faturas mensais, não houve registro ultrapassagem de demanda em nenhum mês, como apresentado na tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Demandas registradas e faturadas e energia consumida pela universidade no ano de 2013 para a demanda contratada sugerida

Mês	Demanda Horário Fora de Ponta (kW)		Demanda Horário de Ponta (kW)		Energia (kWh)	
	Registrado	Faturado	Registrado	Faturado	Horário Fora de Ponta	Horário de Ponta
Janeiro	1.820	1.950	1.134	1.630	427.000	42.000
Fevereiro	1.568	1.950	1.078	1.630	478.800	56.000
Março	1.988	1.950	1.708	1.630	519.400	71.400
Abril	1.764	1.950	1.484	1.630	491.400	64.400
Maiο	1.498	1.950	1.288	1.630	389.200	47.600
Junho	1.386	1.950	1.176	1.630	450.800	60.200
Julho	1.442	1.950	1.260	1.630	449.400	60.200
Agosto	1.526	1.950	1.344	1.630	473.200	70.000
Setembro	1.652	1.950	1.386	1.630	463.400	65.800
Outubro	1.974	1.950	1.568	1.630	446.600	57.400
Novembro	2.044	1.950	1.316	1.630	546.000	65.800
Dezembro	2.030	1.950	1.330	1.630	536.200	63.000

Com os valores das faturas mensais de todo o ano, para a modalidade tarifária horária verde e azul, considerando os valores de Demanda Contratada sugeridos, foi implementada a tabela 2.6.

CAPITULO II – Metodologia para Diagnóstico de Eficiência Energética na Instalação Elétrica do Campus

Tabela 2.6 - Valores que compõem a fatura mensal dos meses de 2013 para as modalidades tarifárias horária verde e azul para a demanda contratada sugerida

Mês	Modalidade Tarifária	Valor da Fatura Mensal (R\$)				
		Demanda Fora de Ponta	Demanda Ponta	Consumo Fora de Ponta	Consumo Ponta	TOTAL
Janeiro	TH Verde	13.650,00		77.082,04	38.414,88	129.146,92
	TH Azul	13.650,00	43.097,20	77.082,04	11.706,66	145.535,90
Fevereiro	TH Verde	13.650,00		86.432,98	51.219,84	151.302,82
	TH Azul	13.650,00	43.097,20	86.432,98	15.608,88	158.789,06
Março	TH Verde	13.650,00		93.762,09	65.305,30	172.717,38
	TH Azul	13.650,00	43.097,20	93.762,09	19.901,32	170.410,61
Abril	TH Verde	13.650,00		88.707,53	58.902,82	161.260,34
	TH Azul	13.650,00	43.097,20	88.707,53	17.950,21	163.404,94
Maio	TH Verde	13.650,00		70.258,38	43.536,86	127.445,25
	TH Azul	13.650,00	43.097,20	70.258,38	13.267,55	140.273,13
Junho	TH Verde	13.650,00		81.378,42	55.061,33	150.089,74
	TH Azul	13.650,00	43.097,20	81.378,42	16.779,55	154.905,16
Julho	TH Verde	13.650,00		81.125,69	55.061,33	149.837,02
	TH Azul	13.650,00	43.097,20	81.125,69	16.779,55	154.652,43
Agosto	TH Verde	13.650,00		85.422,06	64.024,80	163.096,86
	TH Azul	13.650,00	43.097,20	85.422,06	19.511,10	161.680,36
Setembro	TH Verde	13.650,00		83.652,97	60.183,31	157.486,28
	TH Azul	13.650,00	43.097,20	83.652,97	18.340,43	158.740,60
Outubro	TH Verde	13.650,00		80.620,23	52.500,34	146.770,57
	TH Azul	13.650,00	43.097,20	80.620,23	15.999,10	153.366,53
Novembro	TH Verde	13.650,00		98.563,92	60.183,31	172.397,23
	TH Azul	13.650,00	43.097,20	98.563,92	18.340,43	173.651,55
Dezembro	TH Verde	13.650,00		96.794,82	57.622,32	168.067,14
	TH Azul	13.650,00	43.097,20	96.794,82	17.559,99	171.102,01

Ao observar a última coluna da tabela 2.6, percebeu-se que quatro dos cinco meses, em que anteriormente a modalidade tarifária azul se enquadraria melhor, passaram a ter a tarifa verde como opção mais econômica. Apenas no mês de março ocorreu o inverso. Ou seja, a predominância da vantagem da modalidade tarifária verde aumentou significativamente.

Assim, verificou-se que o valor escolhido para a Demanda Contratada influencia a avaliação sobre qual modalidade tarifária é mais vantajosa para uma instalação.

Como, tanto nos cálculos com Demanda Contratada real quanto com a sugerida, a modalidade tarifária mais vantajosa foi a horária verde; surgiu o questionamento sobre qual opção seria mais econômica: contratar uma demanda menor, mesmo que em alguns meses fossem cobrados valores de ultrapassagens de demanda ou contratar uma demanda maior que a média e que fosse faturada mesmo não sendo atingida na maioria dos meses.

Os valores da fatura anual, resultantes da soma das faturas mensais, apresentados na tabela 2.7, mostraram que seria mais econômico para esta unidade consumidora se ela estivesse no ano de 2013 enquadrada na modalidade verde e ajustasse suas Demandas Contratadas.

Tabela 2.7 - Valor da fatura anual de 2013 para as modalidades tarifárias horária verde e azul, considerando a demanda contratada real e a sugerida

Modalidade Tarifária	Valor da Fatura Anual (R\$)	
	Dados com Demanda Contratada Real	Dados com Demanda Contratada Sugerida
THS Verde	R\$ 1.854.713,56	R\$ 1.849.617,56
THS Azul	R\$ 1.885.221,18	R\$ 1.906.512,30

2.7.3 – Evolução da demanda máxima

O monitoramento da evolução de qualquer grandeza cria um histórico e fundamenta as decisões e estimativas da mesma, o que é fundamental no planejamento de um sistema elétrico com constantes alterações de solicitações de demanda.

Nesta seção, através dos arquivos de memória de massa da medição de faturamento dos anos de 2011, 2012 e 2013 da instalação elétrica em estudo,

fornechos pela Companhia Energética de Minas Gerais, nos quais estão registrados os seguintes dados (com tempos de agregação de 15 minutos): data, hora, potência ativa, potência reativa, tensão e fator de potência; fez-se um estudo da evolução da demanda máxima e os fatores que a influenciam. Estes mesmos valores de demanda foram utilizados na seção anterior para o cálculo da Demanda Contratada sugerida entre a universidade e a concessionária de energia elétrica local.

A figura 2.22 apresenta a evolução da demanda máxima registrada entre os anos de 2011 e 2013, sendo que para o ano de 2013, especificamente, tal evolução é apresentada de forma mensal.

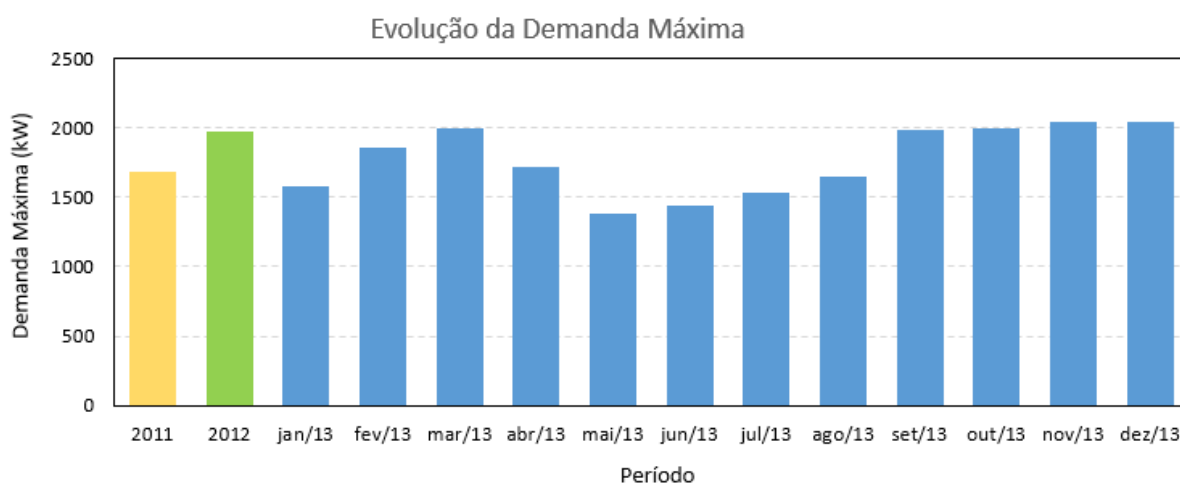


Figura 2.22 – Evolução da demanda máxima anual de 2011 e 2012 e das demandas máximas mensais para 2013.

O ano de 2011 foi um ano letivo típico, ou seja, não teve greve, teve três períodos de férias distribuídos no início (de 01/01 a 20/02), meio (de 08/07 a 07/08) e fim (a partir de 20/12) do ano e dois períodos regulares de aula (de 21/02 a 07/07 e de 08/08 a 19/12). A demanda máxima anual de 2011 de aproximadamente 1.680 kW mostrada na figura 2.22 foi registrada no mês de setembro, ou seja, no segundo semestre, letivo e do ano.

O ano de 2012 foi um ano letivo atípico pois houve greve dos servidores (de 17/05 a 16/09). Este ano iniciou-se normalmente com um período de férias (de 01/01 a 26/02), mas o seu primeiro período de aulas foi particionado em dois momentos (de 27/02 a 16/05 e de 17/09 a 09/11), em consequência da greve. O período de férias do meio do ano foi de 10/11 a 25/11 e o segundo período de aulas iniciou-se apenas em 26/11 com término no ano seguinte. A demanda máxima anual de 2012 de aproximadamente 1.970 kW mostrada na figura 2.22 foi registrada no mês de outubro, ou seja, no primeiro semestre letivo e segundo semestre do ano. A diferença de demanda máxima anual entre 2011 e 2012 foi de aproximadamente 290 kW.

O ano de 2013, apesar de não ter tido greve, foi um ano letivo atípico pois foi um ano subsequente a um ano de greve (2012). Deste modo, 2013, após o recesso de 01/01 a 06/01, teve a reposição de parte do segundo período de aulas do ano de 2012 (de 07/01 a 17/04), seus dois períodos de aula (de 20/05 a 29/09 e 21/10 a 14/03/2014) e dois períodos de férias (de 18/04 a 19/05 e de 30/09 a 20/10).

Na figura 2.22, a evolução da demanda máxima mensal de 2013 é marcada por um pico no segundo semestre letivo de 2012 no mês de março com aproximadamente 1.990 kW; uma queda no primeiro período de férias no mês de março que registrou aproximadamente 1.380 kW e um crescimento, a partir do primeiro semestre letivo de 2013, que registrou a demanda máxima anual de 2013 de aproximadamente 2.050 kW no mês de novembro, ou seja, no segundo semestre letivo e do ano. A diferença de demanda máxima anual entre 2012 e 2013 foi de aproximadamente 80 kW.

A tabela 2.8 sintetiza a demanda máxima anual e respectivos mês e período de registro dos anos de 2011, 2012 e 2013.

Tabela 2.8 – Demanda máxima anual e respectivos mês e período de registro dos anos de 2011, 2012 e 2013

Ano	Demanda máxima kW	Mês em que registrou demanda máxima	Período em que registrou demanda máxima
2011	1.680	setembro	Período de aulas
2012	1.970	outubro	Período de aulas
2013	2.050	novembro	Período de aulas

Assim, através da análise dos dados elétricos registrados e fornecidos pela CEMIG durante os anos de 2011, 2012 e 2013 desta instalação elétrica em estudo, pode-se concluir que a demanda registrada tem ligação direta com os períodos acadêmicos anuais, marcando picos no meio dos semestres letivos e baixos valores nas férias; com a temperatura pois nos três anos a demanda máxima anual foi registrada no segundo semestre e também com a inserção de novas grandes cargas (blocos) no sistema elétrico como deve ter ocorrido no ano de 2012.

2.8 – Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados metodologias e indicadores de energia para diagnosticar a instalação do campus universitário em relação à eficiência energética como, por exemplo, curvas de carga típicas, curvas de evolução da demanda diária e anual e os fatores que as influenciam, fator de carga, fator de potência e gestão de faturas.

Pelas curvas de carga típicas obtidas, baseando-se em uma quarta-feira letiva, pode-se concluir que o comportamento da carga de um campus universitário está diretamente relacionado com as atividades acadêmicas e administrativas nele desenvolvidas ao longo do dia e com o número de pessoas que as executam em cada período e que, quando esta análise é estendida para períodos anuais diferentes, letivo e de férias, esta relação também é encontrada.

Através da comparação de curvas de demanda diária com curvas de temperatura, verificou-se que apesar de ser crescente a instalação de equipamentos de ar condicionado, estes ainda não representam uma porcentagem significativa da carga ou que são utilizados independentemente da temperatura ambiente para o controle da temperatura em determinados locais, por isso não foram registradas grandes diferenças de valores de demanda entre dias quentes e frios. No entanto, quando se avaliou a evolução das demandas máximas mensais registradas ao longo dos anos, pode-se dizer que seus maiores valores apresentaram relação com as maiores temperaturas medidas em determinados meses do ano.

A partir da avaliação da curva de carga e do fator de carga dos transformadores que compõem a rede elétrica deste campus, verificou-se que a demanda é concentrada em certos horários, ou seja, a curva de carga apresenta picos e o fator de carga possui um baixo valor (inferior a 0,5 pu) e que o perfil da curva de cada transformador está relacionado ao tipo e ao horário das atividades desenvolvidas nos blocos que ele atende, como, por exemplo, atividades de laboratório, de divisão administrativa e/ou de sala de aula. Em relação ao carregamento, pode-se afirmar que nenhum equipamento está trabalhando sobrecarregado, pelo contrário, quase na totalidade, há disponibilidade de ampliação da carga.

A partir da avaliação do indicador de fator de potência, no ponto de entrega do Campus Santa Mônica, verificou-se que, em nenhum momento, a energia elétrica e demanda de potência reativos excederam o limite permitido, ou seja, a instalação de bancos de capacitores para correção desse fator está sendo eficiente para seu objetivo. Os valores de fator de potência variaram entre 0,92 e 0,98 pu, o que justifica o não pagamento para a concessionária de excedentes de reativos.

Já pela gestão de faturas implementada através de tabelas de análise, conclui-se que para avaliar o contrato firmado entre a instituição e a concessionária de energia elétrica, é necessário verificar se a demanda de potência contratada está adequada e se a modalidade tarifária em que a instalação está enquadrada é a mais vantajosa, através do cálculo do montante das faturas dos últimos doze ciclos de faturamento e dos respectivos valores pagos com energia consumida, demanda de potência atingida e ultrapassagem de demanda. Desta maneira, a demanda de potência contratada será considerada adequada se não for gasto valores com ultrapassagem de demanda e a modalidade tarifária mais vantajosa será indicada mês a mês e também através do valor anual. Verificou-se também que um valor da demanda de potência contratada adequado tem uma influência determinante na escolha da modalidade tarifária e econômica no montante pago anualmente.

Neste estudo de caso, verificou-se que o contrato entre a instituição de ensino e a concessionária de energia elétrica deveria ser ajustado, pois, no ano de 2013, foram cobradas ultrapassagens de demanda de potência contratada e a modalidade tarifária que se apresentou mais vantajosa foi a verde na maioria dos doze meses avaliados e também no montante anual. A título de ilustração, caso, no ano de 2013, a demanda contratada fosse 1950 kW e a modalidade tarifária escolhida fosse a verde, a universidade teria tido uma economia de aproximadamente R\$ 35.000,00.

Portanto, as metodologias como curvas e tabelas de gestão e indicadores de energia como fator de carga e fator de potência propostos e as fundamentações utilizadas para implementá-las neste trabalho (Método de SOM e K-means, Resolução Normativa ANEEL nº 414 e definições de indicadores) são fundamentais para a construção de um diagnóstico de eficiência energética desta e de qualquer outra instalação elétrica, visando o conhecimento da rede e

CAPITULO II – Metodologia para Diagnóstico de Eficiência Energética na Instalação Elétrica do Campus

possibilitando planejamento de ações técnicas tanto de melhoria física das instalações como de adequação contratual com a concessionária de energia elétrica local.

CAPÍTULO III

Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

3.1 – Considerações iniciais

O termo Qualidade da Energia Elétrica está relacionado com qualquer desvio que possa ocorrer na magnitude, forma de onda ou na frequência da tensão e/ou corrente elétrica [35].

Esse assunto tem grande importância no estudo de um sistema elétrico, pois é crescente a quantidade de equipamentos que possuem componentes eletrônicos, como fontes chaveadas, fontes ininterruptas de energia elétrica, conversores, entre outros, os quais são muito sensíveis aos distúrbios elétricos da rede, apesar do fato de que, em muitas ocasiões, serem eles mesmos os causadores de tais distúrbios. Uma baixa qualidade da energia elétrica pode provocar perda de produção nas indústrias e também inúmeras reclamações dos consumidores devido a uma interrupção no fornecimento de energia elétrica.

Os fenômenos associados à qualidade da energia elétrica são classificados nas seguintes categorias: transitórios, variações de tensão de curta duração,

variações de tensão de longa duração, desequilíbrios de tensão, distorções na forma de onda, flutuações de tensão e variações da frequência do sistema [35].

A fim de possibilitar a avaliação de indicadores da qualidade da energia elétrica nas subestações do Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia, e o consequente planejamento de ações técnicas para sua melhoria, foram realizadas medições no lado de baixa tensão dos onze transformadores que compõem o referido sistema, aqui denominados de Ponto 1, Ponto 2, Ponto 3 e assim por diante. Tais medições foram realizadas durante o período letivo compreendido entre os dias 3 de dezembro de 2013 e 12 de fevereiro de 2014 e 29 de setembro de 2014 a 9 de outubro de 2014.

Com base nessas informações, o presente capítulo tem como base os seguintes objetivos:

- Apresentar as definições dos fenômenos associados com a qualidade da energia elétrica, os indicadores usados para avaliação dos distúrbios e algumas recomendações publicadas por parte dos órgãos que regulam o setor elétrico;
- Apresentar os resultados das medições realizadas nos onze pontos de monitoramento, abrangendo: variações de tensão em regime permanente, distorções harmônicas de tensão e de corrente, desequilíbrios de tensão, flutuações de tensão e também variações de corrente em regime permanente, mesmo esta última não sendo caracterizada como um fenômeno associado à qualidade da energia elétrica.

3.2 – Corrente em regime permanente

Apesar da variação de corrente em regime permanente não ser um fenômeno associado à qualidade da energia elétrica, esta foi a primeira grandeza

escolhida para ser avaliada, pelo fato de que o comportamento da carga pode esclarecer alguns resultados observados nos fenômenos.

Em relação à variação da corrente de fase em regime permanente, os valores estatísticos calculados com base nos resultados de medição (valores máximos, médios, assim como máximos percentis diários 95% e percentis semanais 95%) são apresentados na figura 3.1.

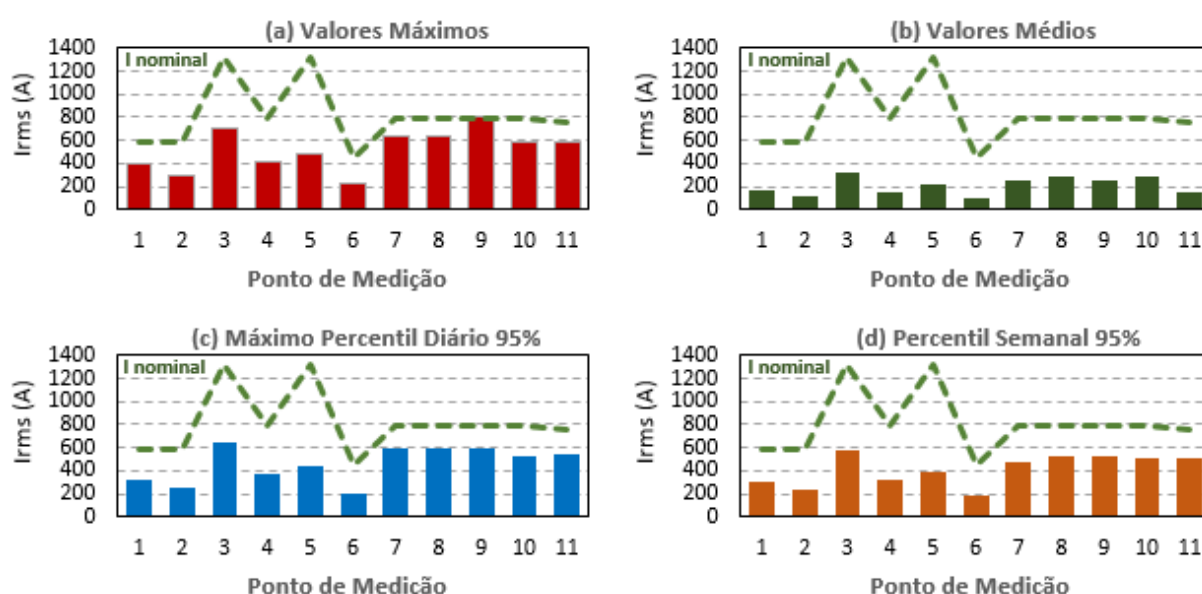


Figura 3.1 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para cada ponto de medição em relação à corrente de fase em regime permanente dos Pontos 1 ao 11.

Como ocorreu com a potência aparente avaliada no Capítulo II, ao comparar os valores máximos com os valores médios, devido a diferença entre eles, percebeu-se que há uma variação muito grande na corrente de fase em regime permanente, ao longo período, em todos os pontos de medição; mas que, na média, essa corrente registrada foi baixa em relação a corrente nominal dos transformadores. Mesmo considerando o máximo percentil diário 95% e o percentil semanal 95%, existe uma faixa de corrente que pode ser aumentada no consumo em todos os pontos. O único transformador que chegou atingir sua

corrente nominal foi o TR05.2, identificado como Ponto 9, no seu valor máximo e que atende aos Blocos 1G, 1H, 1V, 1W, 1Y, 3E, 5M, 5U e iluminação externa.

O comportamento da corrente de fase em regime permanente nos dias de semana e de final de semana foi similar ao da potência aparente, em relação à variação, à quantidade de picos registrados durante um dia e aos valores medidos comparados com os nominais, em cada ponto, conforme suas diferentes atividades desenvolvidas e apresentado nas figuras 3.2 e 3.3. Tal fato é explicado pela pequena faixa variação da tensão comparativamente às faixas de variação da corrente.

Observou-se em todos os pontos uma similaridade do comportamento da corrente nas três fases, exceto no Ponto 10, em que o comportamento da corrente na fase B foi bem discrepante das outras duas.

Em relação a corrente de neutro em regime permanente, esta atingiu valores muito baixos em relação a suas correntes de fase, nos pontos em que a tensão fase-neutro nominal é 127 V e nos pontos em que a tensão fase-neutro nominal é 220V, ela apresentou valores mais próximos ou até iguais a sua corrente de fase, como verificado nos Pontos 6 e 11.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

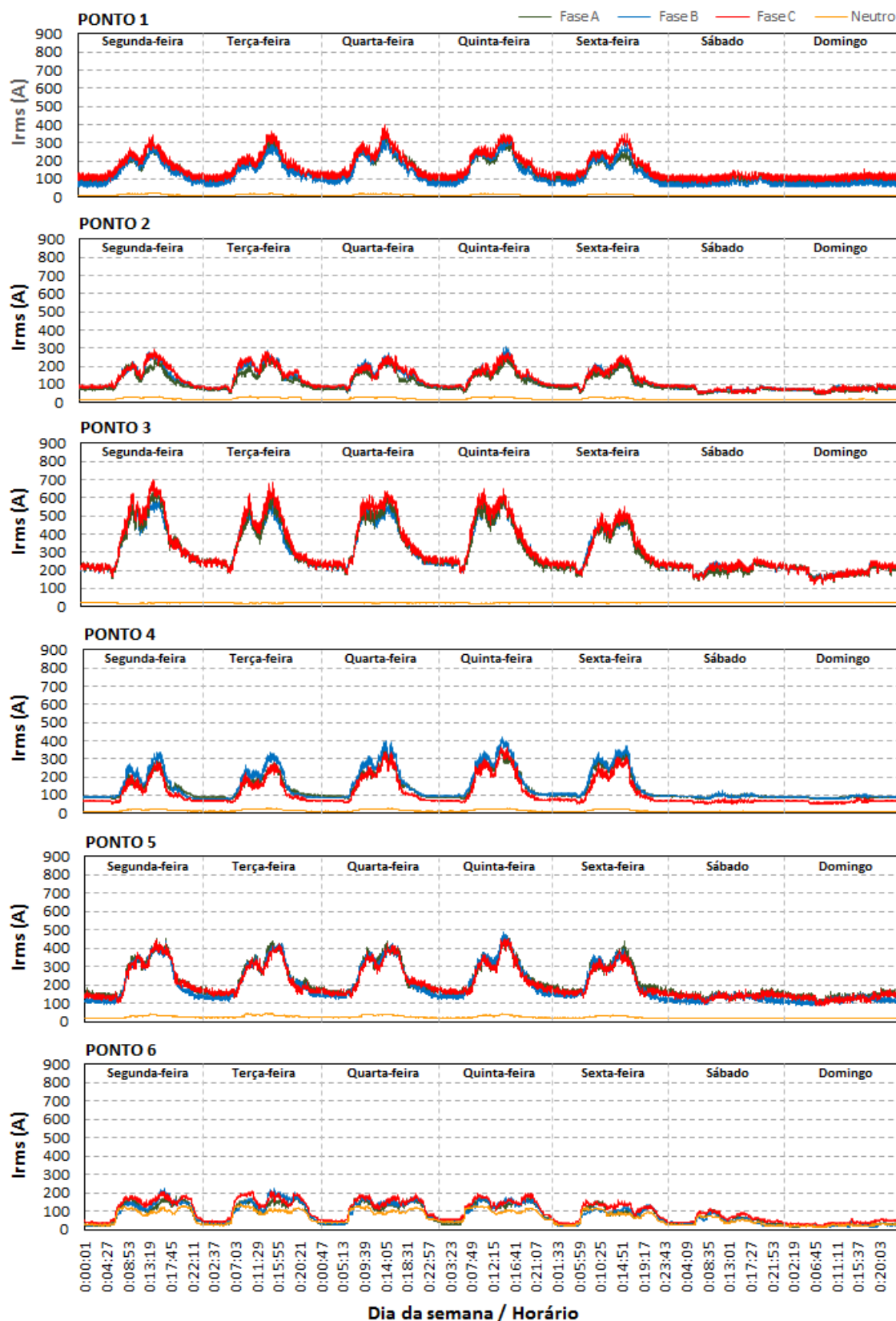


Figura 3.2 – Comportamento semanal da corrente em regime permanente em cada ponto de medição dos Pontos 1 ao 6.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

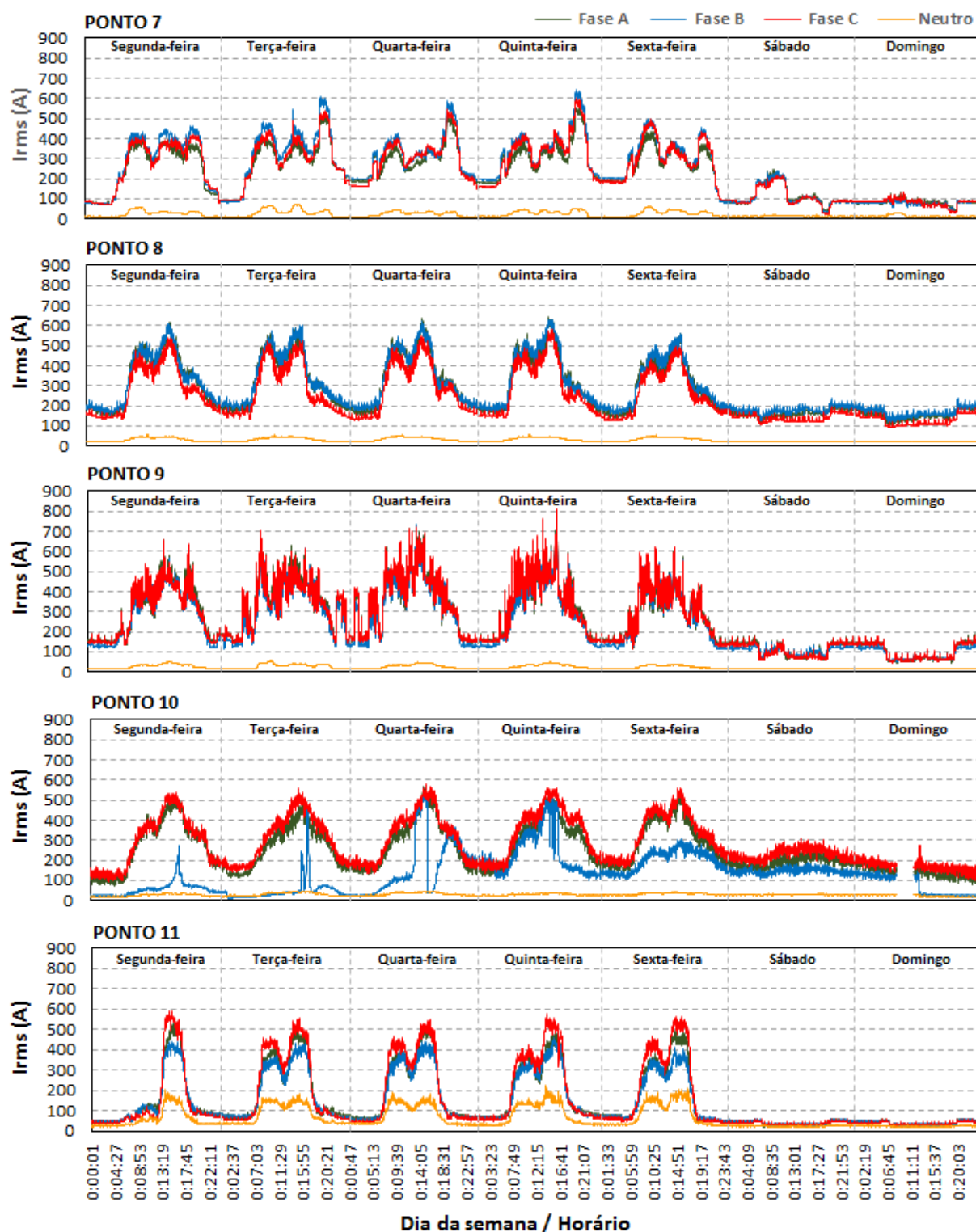


Figura 3.3 – Comportamento semanal da corrente em regime permanente em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11.

Após a análise dos valores estatísticos calculados e do comportamento obtido da corrente em regime permanente, tal análise foi realizada também para a tensão.

3.3 – Tensão em regime permanente

O módulo 8 do documento Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, em sua seção 8.1, estabelece as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente, segundo as quais todas as unidades consumidoras devem ser atendidas pela concessionária de distribuição local.

O ponto de conexão do sistema elétrico da concessionária com as instalações elétricas da universidade, ou seja, o limite de responsabilidade do atendimento é em 13,8 kV, a montante da cabine de entrada do campus universitário. No entanto, para a verificação das variações de tensão em regime permanente medidas nos barramentos de baixa tensão dos transformadores do sistema elétrico do campus (Pontos 1 a 11), ou seja, na instalação elétrica de responsabilidade da universidade; utilizou-se também os valores permitidos por essa resolução para cada tensão nominal correspondente.

Todos os pontos de medição são caracterizados por uma tensão fase-fase nominal de 220 V e fase-neutro nominal de 127 V, exceto os Pontos 6 e 11 que possuem uma tensão fase-fase nominal de 380V e fase-neutro nominal de 220 V.

A título de ilustração, a tabela 3.1 indica os valores permitidos para as variações de tensão em regime permanente conforme indicado no módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

Tabela 3.1 – Faixa de variação da Tensão de Leitura (TL) para tensão nominal igual ou inferior a 1kV segundo o módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição

Tensão Nominal (TN)	Tensão de Atendimento (TA)		
	Adequada	Precária	Crítica
(220)/(127)	$(202 \leq TL \leq 231)/$ $(117 \leq TL \leq 133)$	$(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)/$ $(110 \leq TL < 117 \text{ ou } 133 < TL \leq 135)$	$(TL < 191 \text{ ou } TL > 233)/$ $(TL < 110 \text{ ou } TL > 135)$
(380)/(220)	$(350 \leq TL \leq 399)/$ $(202 \leq TL \leq 231)$	$(331 \leq TL < 350 \text{ ou } 399 < TL \leq 403)/$ $(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403)/$ $(TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

Conforme indicado na tabela 3.1, a tensão medida é considerada adequada para tensão fase-neutro nominal 127 V, se estiver entre os valores 117 e 133 V e para tensão fase-neutro nominal 220 V, se estiver entre os valores 202 e 231 V.

Na figura 3.4 pode-se observar que todos os valores estatísticos calculados com base nos resultados de medição (máximo, médio, máximo percentil diário 95%, percentil semanal 95% e mínimo) dos registros de tensão fase-neutro em regime permanente, nos pontos com tensão fase-neutro nominal 127 V, estão dentro da faixa de valores considerados adequados por essa resolução.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

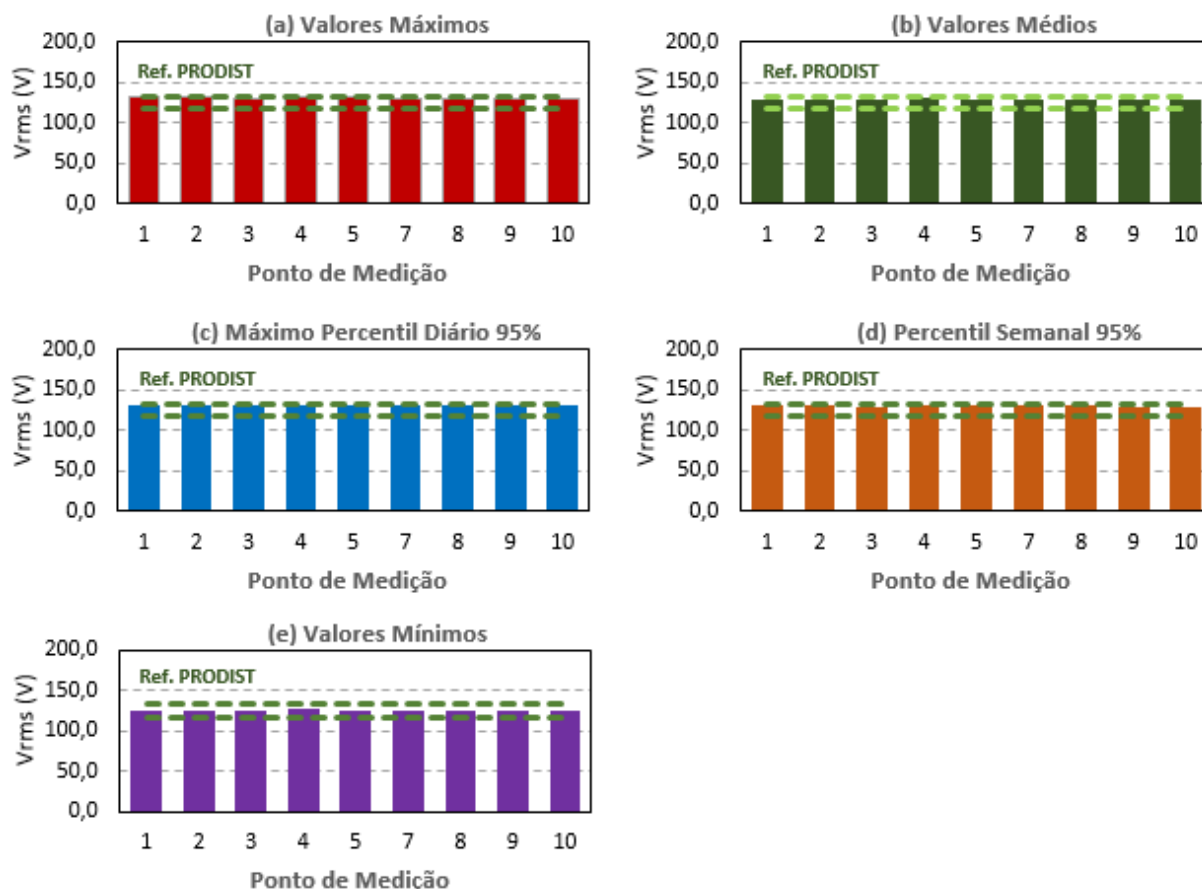


Figura 3.4 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para cada ponto de medição em relação à tensão em regime permanente dos pontos com tensão fase-neutro nominal de 127V.

Tal constatação também pode ser feita nos pontos de medição com tensão fase-neutro nominal 220V, Pontos 6 e 11, ao observar a figura 3.5 e a faixa de valores entre 202 e 231 V.

Para efeito de avaliação dos níveis de tensão em regime permanente nas subestações do campus, apesar da utilização dos limites absolutos de tensão indicados no módulo 8 do Prodist, conforme tabela 3.1, não foram aqui calculados os indicadores estatísticos DRP e DRC, representativos das durações relativas das transgressões de tensão precária e crítica, por não ser objetivo deste estudo.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

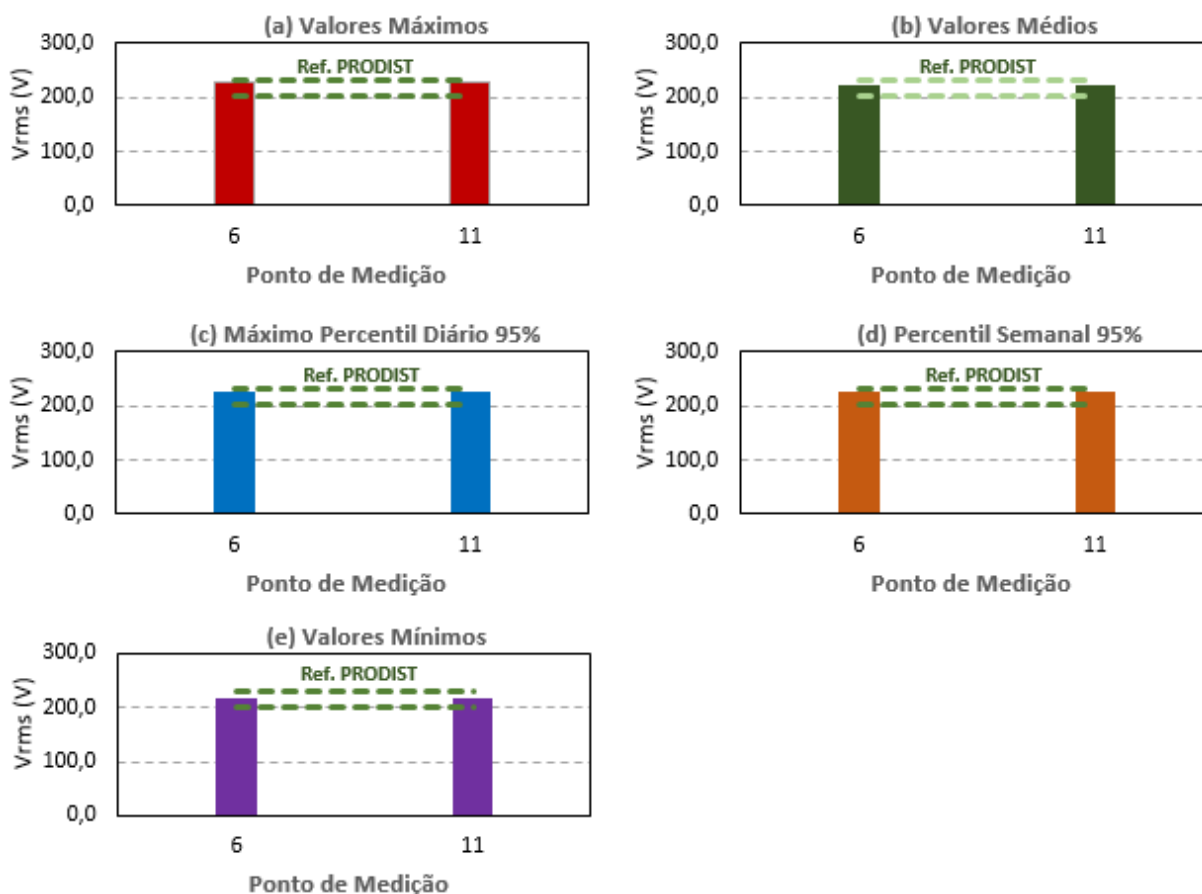


Figura 3.5 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para cada ponto de medição em relação à tensão em regime permanente dos pontos com tensão fase-neutro nominal de 220 V.

O comportamento semanal da tensão fase-neutro em regime permanente em cada ponto de medição, do Ponto 1 ao 11, pode ser visualizado nas figuras 3.6 e 3.7. Independente da tensão fase-neutro nominal de cada ponto, as curvas apresentaram um comportamento semelhante ao longo do dia e ao longo da semana e inverso ao comportamento de suas correntes em regime permanente. Isso ocorre porque a queda de tensão em um sistema é diretamente proporcional a corrente da carga que circula por ele, ou seja, quanto maior a corrente de carga maior será a queda de tensão e menor será a tensão nos terminais da carga.

Nos dias de semana, a tensão fase-neutro variou constantemente seu valor eficaz, apresentou seus valores mais baixos nos picos de carga do período da manhã e da tarde e apresentou seus valores mais altos no período noturno. Já nos

sábados e domingos, o valor eficaz da tensão fase-neutro também variou constantemente, mas não foram variações tão abruptas quando comparadas com as variações que ocorrem entre o dia e a noite de um dia de semana. O valor eficaz da tensão fase-neutro no final de semana é próximo ao valor eficaz da tensão fase-neutro do período noturno dos dias de semana, devido à carga mínima usada nestes momentos.

Pode-se observar também, em relação ao comportamento semanal da tensão fase-neutro em regime permanente, que, em todos os pontos, foi apresentada uma similaridade nas três fases.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

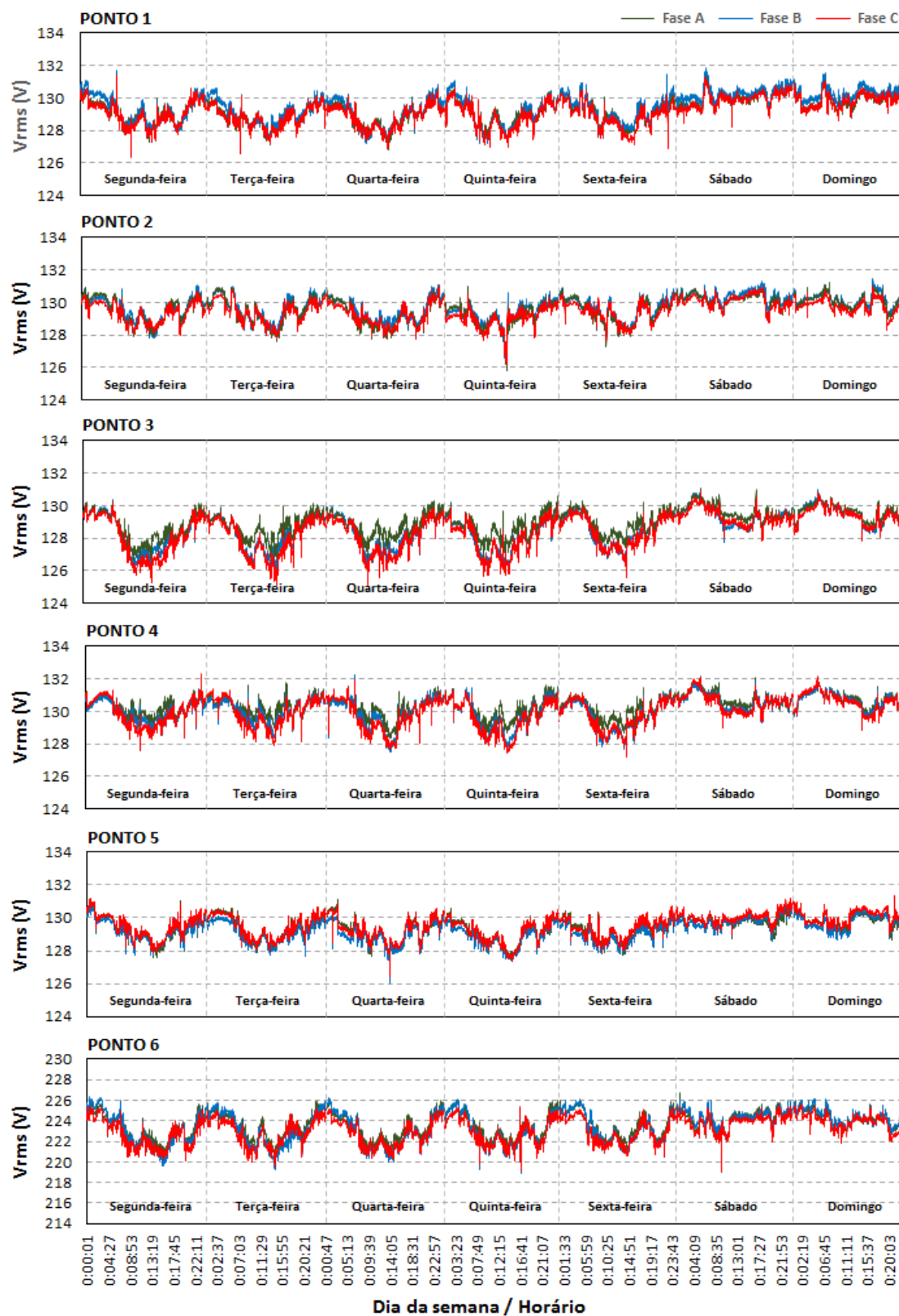


Figura 3.6 – Comportamento semanal da tensão fase-neutro em regime permanente em cada ponto de medição dos Pontos 1 ao 6.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

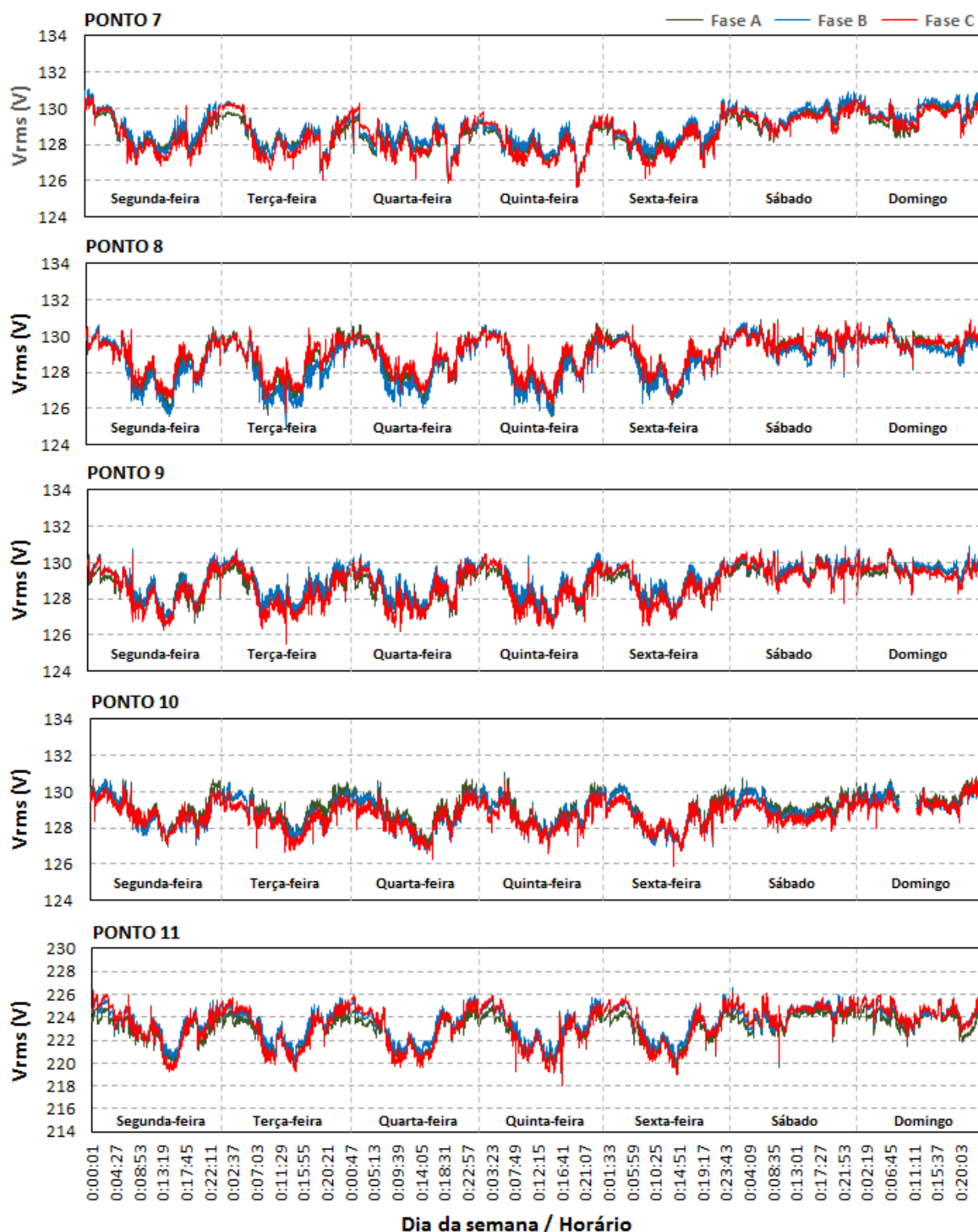


Figura 3.7 – Comportamento semanal da tensão fase-neutro em regime permanente em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11.

Após a análise das variações de corrente e de tensão em regime permanente, analisou-se os valores estatísticos e o comportamento dos indicadores de distorções harmônicas na forma de onda de corrente e de tensão, as quais são fenômenos associados à qualidade da energia elétrica.

3.4 – Distorções da forma de onda

Apenas alguns fenômenos associados à qualidade da energia elétrica, como desequilíbrios de tensão, distorções da forma de onda e flutuações de tensão foram avaliados no sistema elétrico desta universidade, ou seja, foram definidos e tiveram seus indicadores demonstrados.

As distorções da forma de onda são fenômenos permanentes e caracterizam desvios da forma de onda senoidal original. Os tipos de distorções da forma de onda são desvio cc, efeito *notching*, inter-harmônicas e harmônicas [35]. Dentre essas distorções, apenas as distorções harmônicas foram avaliadas.

3.4.1 – Distorções harmônicas

As harmônicas são ondas senoidais de tensão e/ou corrente cujas frequências são múltiplas inteiras da frequência fundamental. As ondas distorcidas devido às harmônicas podem ser decompostas em uma soma de senoides fundamental e harmônicas, denominada Série de Fourier, conforme figura 3.8 [35].

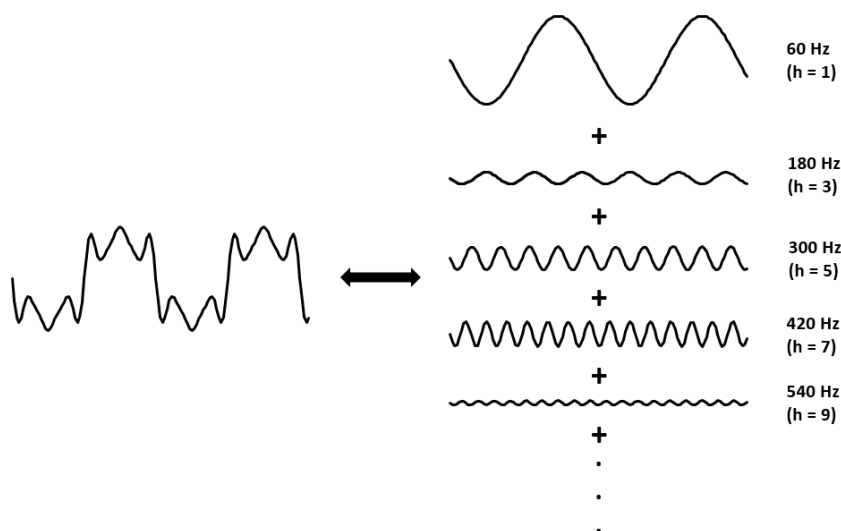


Figura 3.8 – Série de Fourier, decomposição de uma onda distorcida em uma soma de senóides fundamental e harmônicas.

De uma maneira geral, as tensões geradas pelas centrais elétricas possuem formas de ondas praticamente senoidais. Entretanto, a medida que os pontos de medições se distanciam das centrais geradoras e se encaminham para as cargas elétricas, as distorções harmônicas de tensão aumentam e as formas de onda de corrente também são bastante distorcidas [35].

A distorção harmônica de tensão é, em geral, uma consequência da passagem de uma corrente harmônica através de uma impedância série. Embora uma central elétrica gere tensão praticamente senoidal pura, as correntes harmônicas fluindo através da impedância do sistema causarão quedas de tensão para cada ordem harmônica [35].

De maneira geral, pode-se afirmar que o fluxo das correntes harmônicas causa o surgimento de tensões harmônicas no barramento da carga; a dimensão da distorção harmônica de tensão depende da impedância da rede e da corrente harmônica gerada pela carga e a mesma carga gerando a mesma corrente harmônica, porém instalada em uma segunda barra, causará uma distorção harmônica de tensão diferente daquela da primeira, pois a impedância do sistema varia de uma barra para outra [35].

As correntes não senoidais são geradas por equipamentos que operam de maneira não linear como conversores, reatores e transformadores saturados. A maioria das cargas não-lineares podem ser reunidas dentro de um grupo denominado conversores eletrônicos de potência que compreendem, além dos retificadores/inversores, as fontes reguladas eletrônicas, os acionamentos e os controladores de velocidades dos motores, carregadores de bateria, entre outros [35].

Os conversores monofásicos são uma fonte de tensão leve, compacta, eficiente, que pode tolerar uma grande variação da tensão ca de alimentação e muito usada em microcomputadores, impressoras, fotocopiadoras, entre outros. No entanto, geram altos valores de correntes harmônicas de terceira ordem. Já os conversores trifásicos usados em reguladores de velocidade de motores, em condições normais, apesar de não gerarem correntes harmônicas de terceira ordem, geram muitas outras harmônicas [35].

Os equipamentos a arco possuem características de tensão versus corrente não lineares, pois após a ignição do arco, a tensão decresce enquanto a corrente do arco, limitada apenas pela impedância do alimentador, cresce [35].

Os equipamentos saturáveis são aqueles que apresentam uma curva tensão versus corrente com uma região de não-linearidade. Caso o equipamento esteja operando nesta região, serão geradas correntes harmônicas. Nesta categoria estão os transformadores e outros equipamentos eletromagnéticos possuidores de núcleo de aço como os motores [35].

Os efeitos das distorções harmônicas podem ser classificados em solicitação de isolamento devido as distorções de tensão e solicitação térmica devido a circulação de correntes harmônicas, que resultam em perda de vida útil de transformadores, máquinas rotativas, bancos de capacitores, entre outros; e

também em operação indevida de diversos equipamentos como torques oscilatórios nos motores e atuação indevida dos controles [35].

Alguns dos parâmetros usados para indicar o conteúdo harmônico de uma onda elétrica são Distorção Harmônica Total de Tensão e de Corrente, calculadas através das equações (3.1) e (3.2).

$$DHTv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{máx}} V_h^2}}{V_1} \times 100[\%] \quad (3.1)$$

$$DHTi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{máx}} I_h^2}}{I_1} \times 100[\%] \quad (3.2)$$

Para analisar uma ordem harmônica em particular, tem-se a Distorção Harmônica Individual de Tensão e de Corrente, obtidas pelas equações (3.3) e (3.4).

$$DHIv = \frac{V_h}{V_1} \times 100[\%] \quad (3.3)$$

$$DHIi = \frac{I_h}{I_1} \times 100[\%] \quad (3.4)$$

Onde:

DHTv - Distorção Harmônica Total de Tensão [%];

DHTi - Distorção Harmônica Total de Corrente [%];

DHIv - Distorção Harmônica Individual de Tensão [%];

DHIi - Distorção Harmônica Individual de Corrente [%];

V_h – valor eficaz da componente harmônica h da tensão medida [V];
V₁ – valor eficaz da componente fundamental da tensão medida [V];
I_h – valor eficaz da componente harmônica h da corrente medida [A];
I₁ – valor eficaz da componente fundamental da corrente medida [A];
h – ordem harmônica;
h_{máx} – ordem harmônica máxima.

a) Distorções harmônicas de corrente

- **Distorção harmônica total de corrente**

Como não existe uma regulamentação nacional indicando valores de referência para a distorção harmônica total de corrente, as figuras 3.9, 3.10 e 3.11 foram apresentadas apenas com o intuito de mostrar valores estatísticos calculados com base nos resultados de medição (máximo, médio, máximo percentil diário 95% e percentil semanal 95%) e o comportamento semanal da distorção harmônica total de corrente nos onze pontos de medição.

Pelos valores máximos e médios, percebeu-se que há uma variação muito grande da distorção harmônica total de corrente ao longo do período de registro em todos os pontos de medição, mas que, na média, estas distorções possuem valores mais baixos. Em relação aos máximos percentis diários 95%, os valores ficaram próximos dos valores máximos. O Ponto 6 chegou a registrar um valor máximo de quase 60% de distorção harmônica total de corrente, porém, na média, esse distúrbio foi inferior a 40% e em 95% dos pontos do dia mais crítico da fase mais crítica, atingiu um valor acima de 50%.

O ponto que apresentou maior distorção harmônica total de corrente foi o Ponto 6, seguido do Ponto 4, e o que apresentou menor valor para este indicador de distúrbio foi o Ponto 3. Tais características nos Pontos 6 e 3 se justificaram

pelo fato destes pontos apresentarem, respectivamente, a menor e a maior corrente de regime permanente. Já a característica do Ponto 4 é justificada por seu transformador atender os laboratórios de solda da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU. O Ponto 6 possui os seguintes blocos como carga 5O, 5R, 5S e 5V; o Ponto 4, os blocos 1E, 1M, 1O, 1P, 3N e 5P e o Ponto 3, os blocos 1B, 1D, 1L, 1M, 1N, 1O, 1Q, 1R, 1T e iluminação externa.

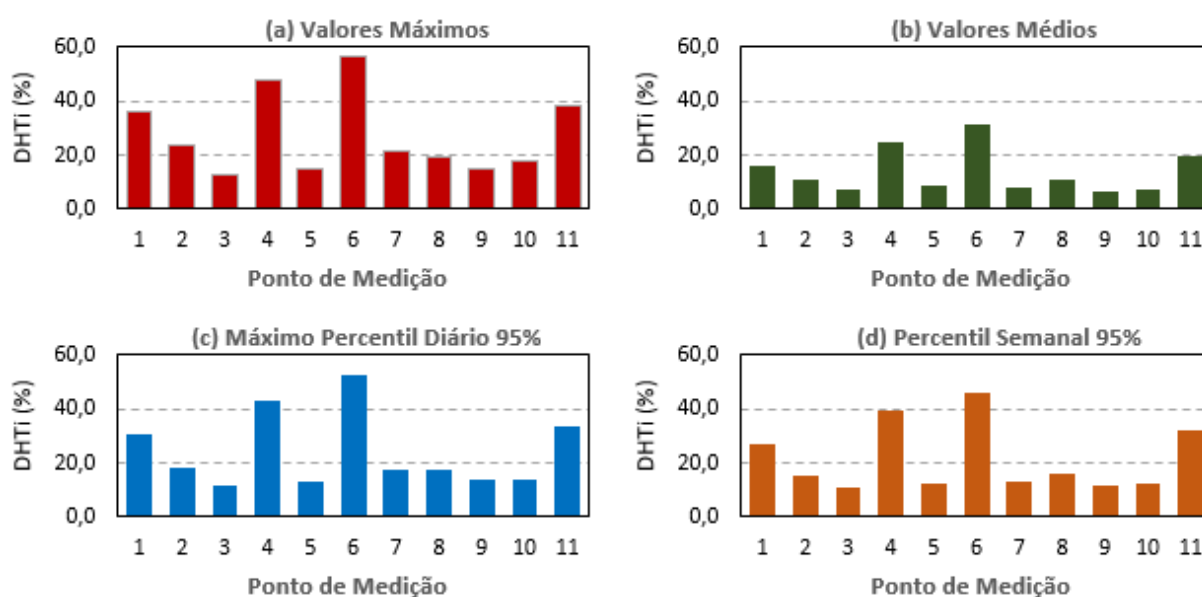


Figura 3.9 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para cada ponto de medição em relação à distorção harmônica total de corrente dos Pontos 1 ao 11.

O comportamento semanal da distorção harmônica total de corrente em cada ponto de medição, do Ponto 1 ao 11, pode ser visualizado nas figuras 3.10 e 3.11. Em todos os pontos de medição, exceto no Ponto 6, as curvas de distorção harmônica total de corrente apresentaram um comportamento inverso ao comportamento das curvas de corrente em regime permanente, pois como essa distorção é uma porcentagem entre o valor eficaz das correntes harmônicas em relação a corrente fundamental, que varia muito, quanto maior a corrente fundamental, menor será a distorção total de corrente, considerando-se,

evidentemente, que não haja uma variação muito expressiva nas correntes harmônicas.

Essa distorção apresentou, nos dias de semana, valores mais baixos nos picos de carga e valores mais altos no período noturno. Já nos sábados e domingos, os registros de distorção harmônica total de corrente tiveram valores próximos aos valores do período noturno dos dias de semana.

Em relação à similaridade nas três fases do comportamento semanal da distorção harmônica total de corrente, a ausência desta foi evidente nos Pontos 4, 6 e 11.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

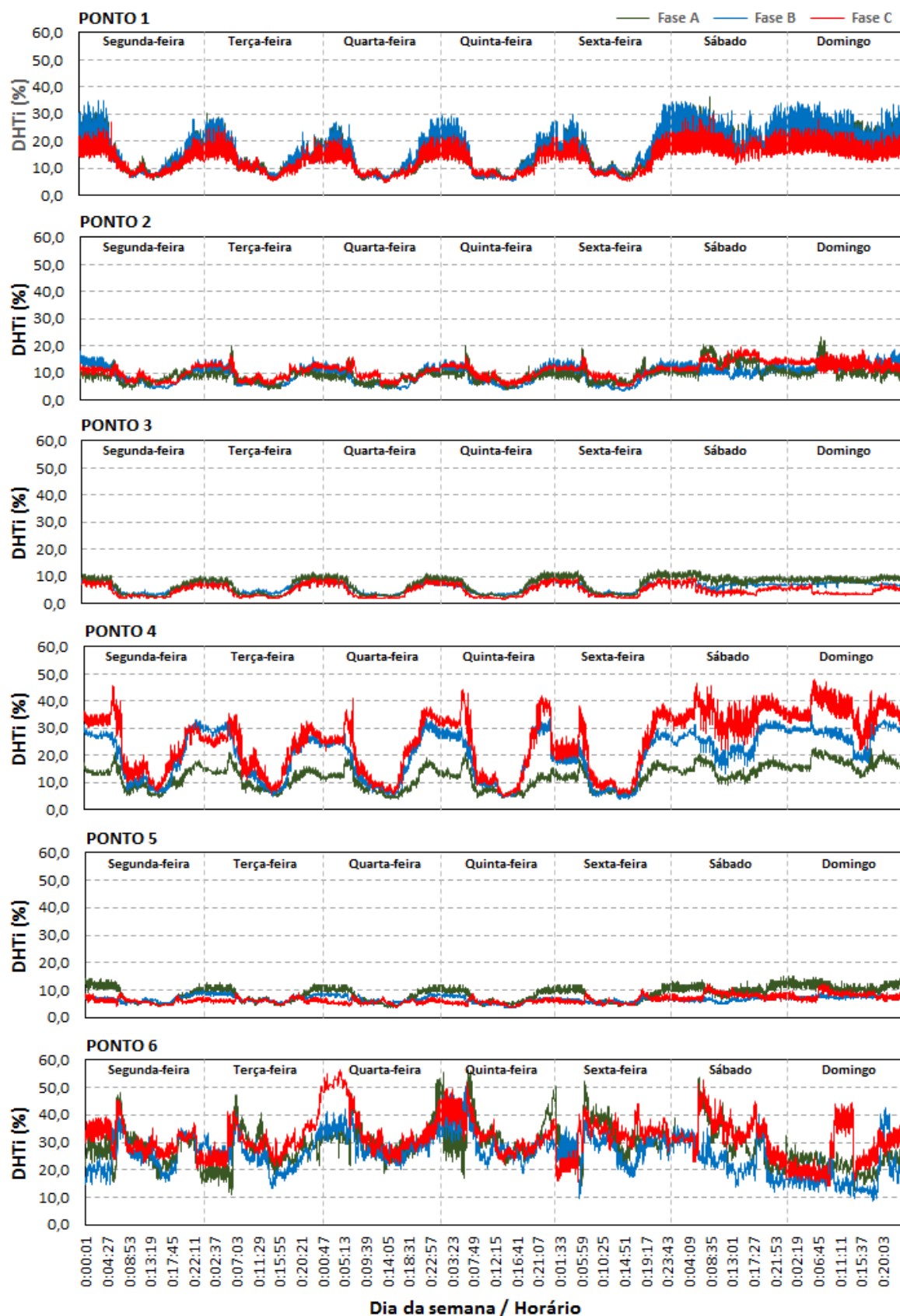


Figura 3.10 – Comportamento semanal da distorção harmônica total de corrente em cada ponto de medição dos Pontos 1 ao 6.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

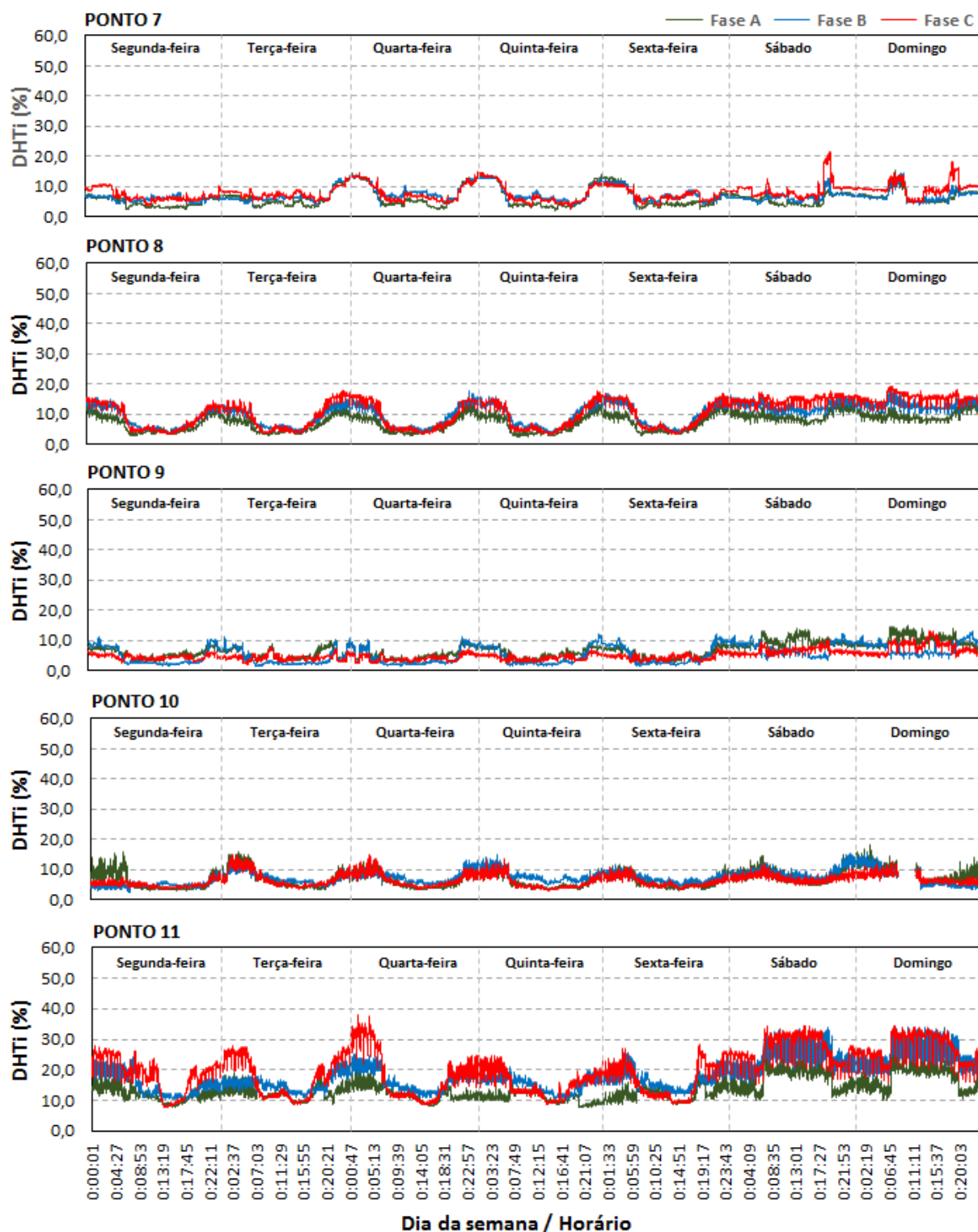


Figura 3.11 – Comportamento semanal da distorção harmônica total de corrente em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11.

A partir da avaliação dos pontos localizados na baixa tensão dos transformadores que compõem a rede do Campus Santa Mônica em relação à distorção harmônica de corrente total, foi gerado um espectro harmônico para verificar quais as ordens harmônicas mais se destacam em cada um destes pontos.

- **Espectro harmônico de corrente**

O espectro harmônico é a representação da decomposição de um sinal em suas componentes harmônicas na forma de um gráfico de barras, onde cada barra representa uma harmônica com sua frequência, valor eficaz e defasagem, ou seja, é a representação da forma de onda no domínio da frequência.

Nas medições realizadas nos Pontos 1 ao 11, foram medidas harmônicas até a quinquagésima ordem, entretanto, foram representadas em espectro apenas harmônicas até a décima quinta ordem.

A fim de se conhecer a distorção harmônica individual de corrente mais significativa em cada ponto de medição, foi apresentado um espectro de frequência para as três fases dos onze pontos de registro nas figuras 3.12 e 3.13.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

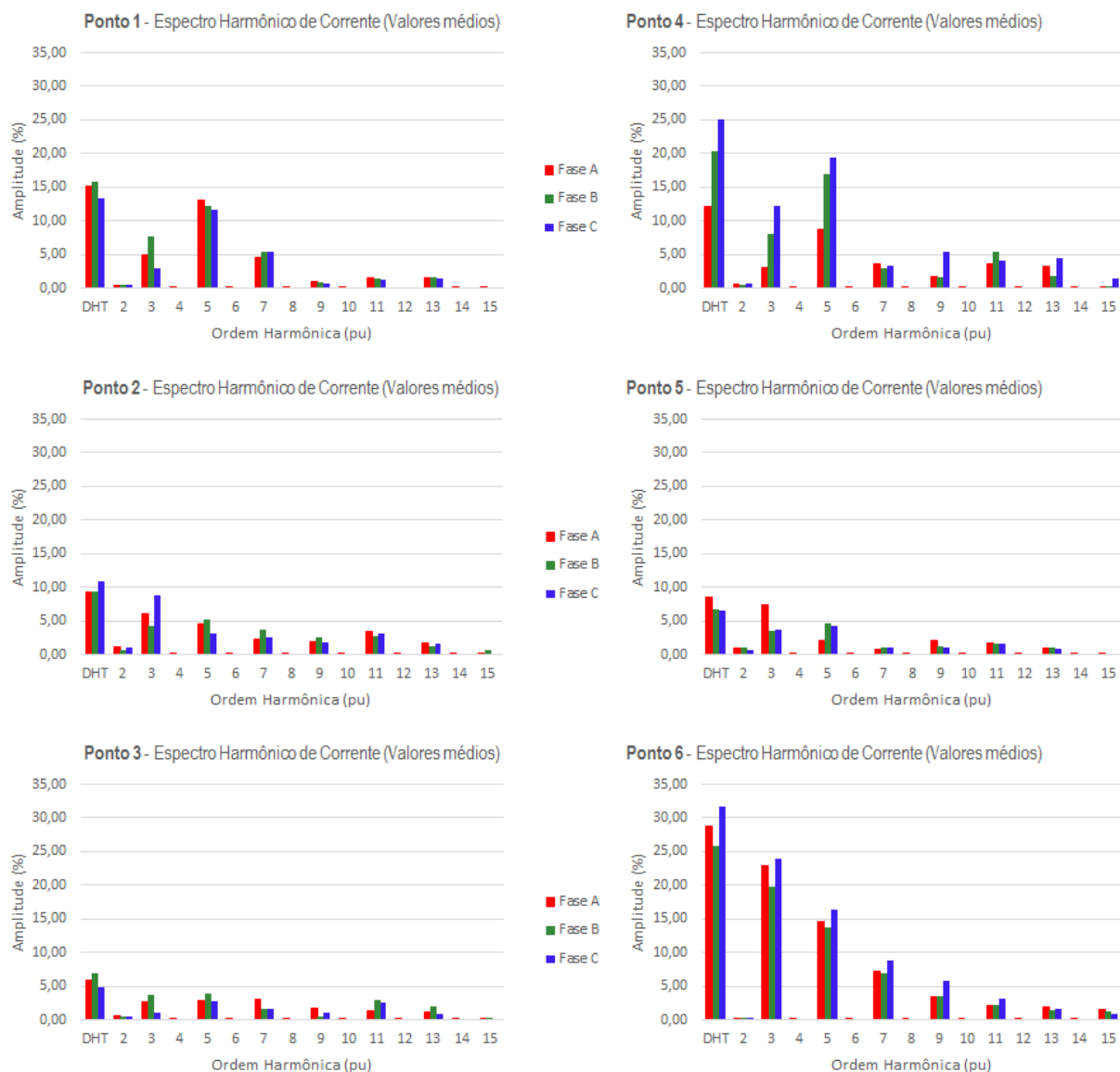


Figura 3.12 – Espectro de frequência da corrente em cada ponto de medição dos Pontos 1 ao 6.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

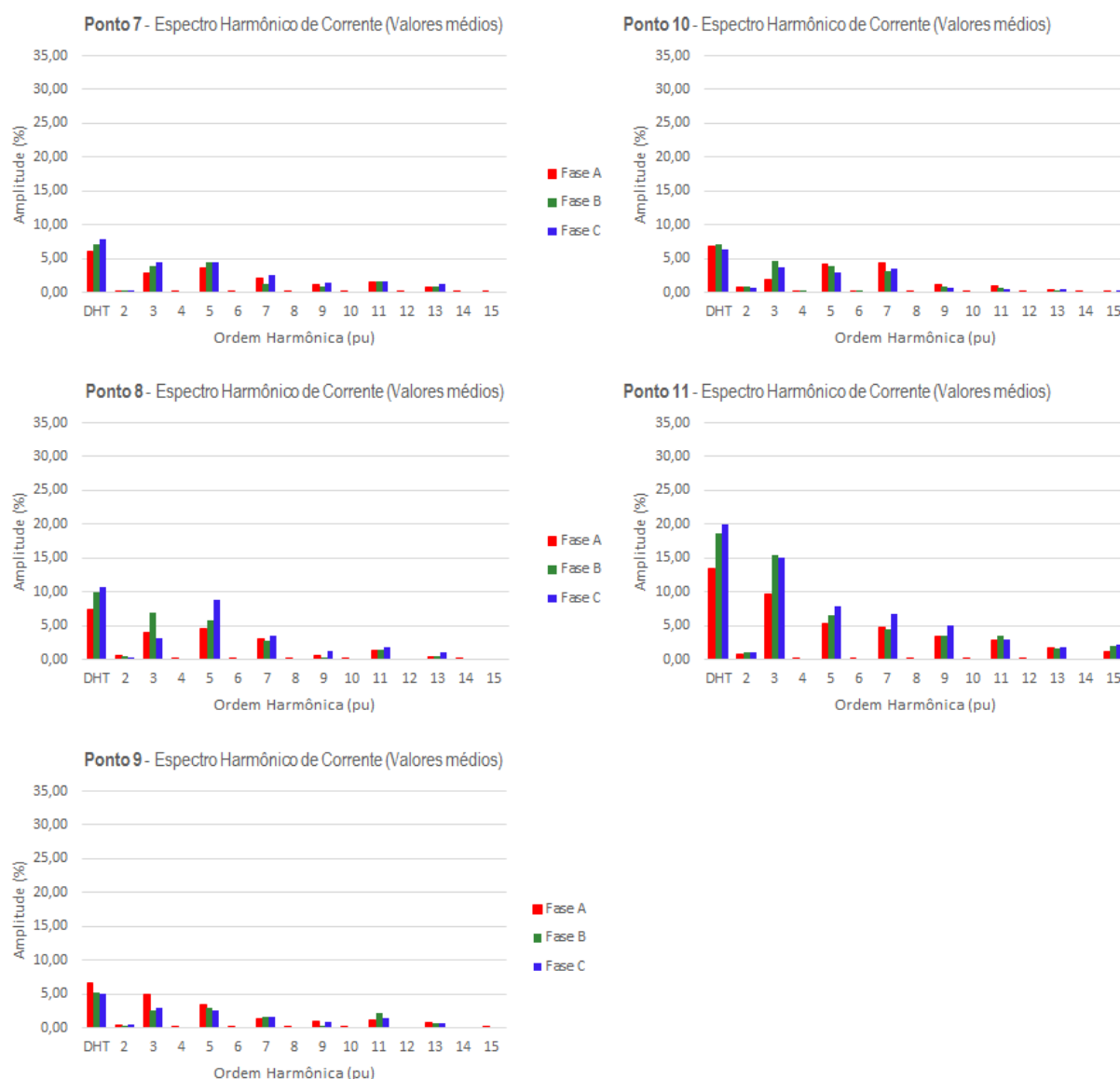


Figura 3.13 – Espectro de frequência da corrente em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11.

Pela análise dos espectros de frequência, a corrente harmônica mais significativa nos Pontos 2, 5, 6, 9, 10 e 11 é de ordem 3, seguida da de ordem 5 nos Pontos 1, 3, 4, 7 e 8. Tal fato já era esperado, já que algumas referências [6, 10 e 11] apresentaram estudos em prédios comerciais e educacionais, onde as principais cargas eram iluminação e equipamentos eletrônicos como computadores pessoais, impressoras, copiadoras, cromatógrafos, espectrômetros, espectrofotômetros ultravioletas, entre outros equipamentos de controle e

instrumentação microprocessados; em que as harmônicas de corrente que mais se destacaram foram a de terceira e quinta ordens.

Portanto, foi necessária uma análise mais detalhada destas duas distorções harmônicas individuais de corrente.

- **Distorção harmônica individual de corrente**

A distorção harmônica individual de corrente de ordem 3, mais significativa na maioria dos pontos de medição, teve seus valores estatísticos com base nos resultados de medição (máximo, médio, máximo percentil diário 95% e percentil semanal 95%) de todos os pontos de registro apresentados na figura 3.14.

O ponto que apresentou maior distorção harmônica individual de corrente de ordem 3 foi o Ponto 6 que atingiu um valor máximo de quase 50% e médio próximo a 25%, seguido do Ponto 11 que atingiu um valor máximo de quase 30% e médio próximo a 15%.

Assim, o fato destes pontos possuírem corrente de neutro com valores mais próximos ou até iguais a sua corrente de fase, como verificado na avaliação da variação da corrente em regime permanente, não é justificado somente por suas tensões nominais serem fase-fase 380 V e fase-neutro 220 V, mas também pelas cargas não lineares com forte presença de corrente de terceira harmônica medida em cada fase, as quais são predominantemente de sequência zero e, portanto, se somam para composição da corrente de neutro.

O Ponto 6 atende três blocos de sala de aula e um bloco administrativo, nos quais a principal carga é a iluminação, seguida de computadores. Já o Ponto 11 atende os blocos 3P (Reitoria), 5H e iluminação externa como carga.

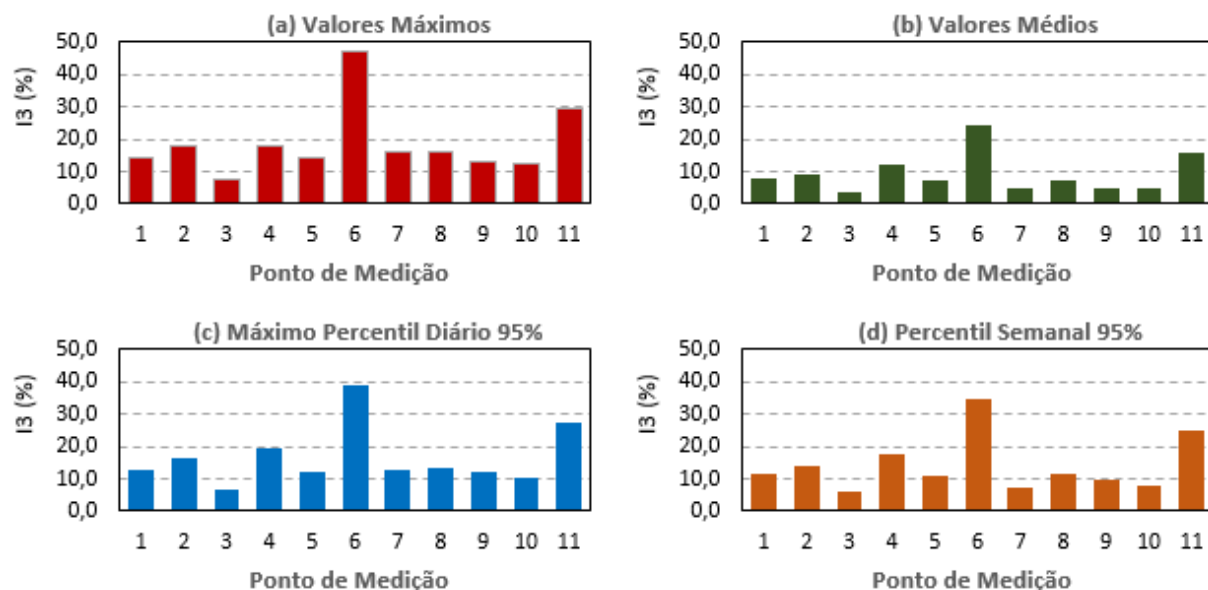


Figura 3.14 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para cada ponto de medição em relação à distorção harmônica individual de corrente de ordem 3 dos Pontos 1 ao 11.

O comportamento semanal da distorção harmônica individual de corrente de ordem 3 em cada ponto de medição, do Ponto 1 ao 11, pode ser visualizado nas figuras 3.15 e 3.16.

Em relação à similaridade nas três fases do comportamento semanal da distorção harmônica individual de corrente de ordem 3, apesar de alguns pontos apresentarem uma similaridade de perfil, não verificou-se similaridade de valores e, na maioria dos pontos, não havia proximidade de perfil nem de valor nas 3 fases.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

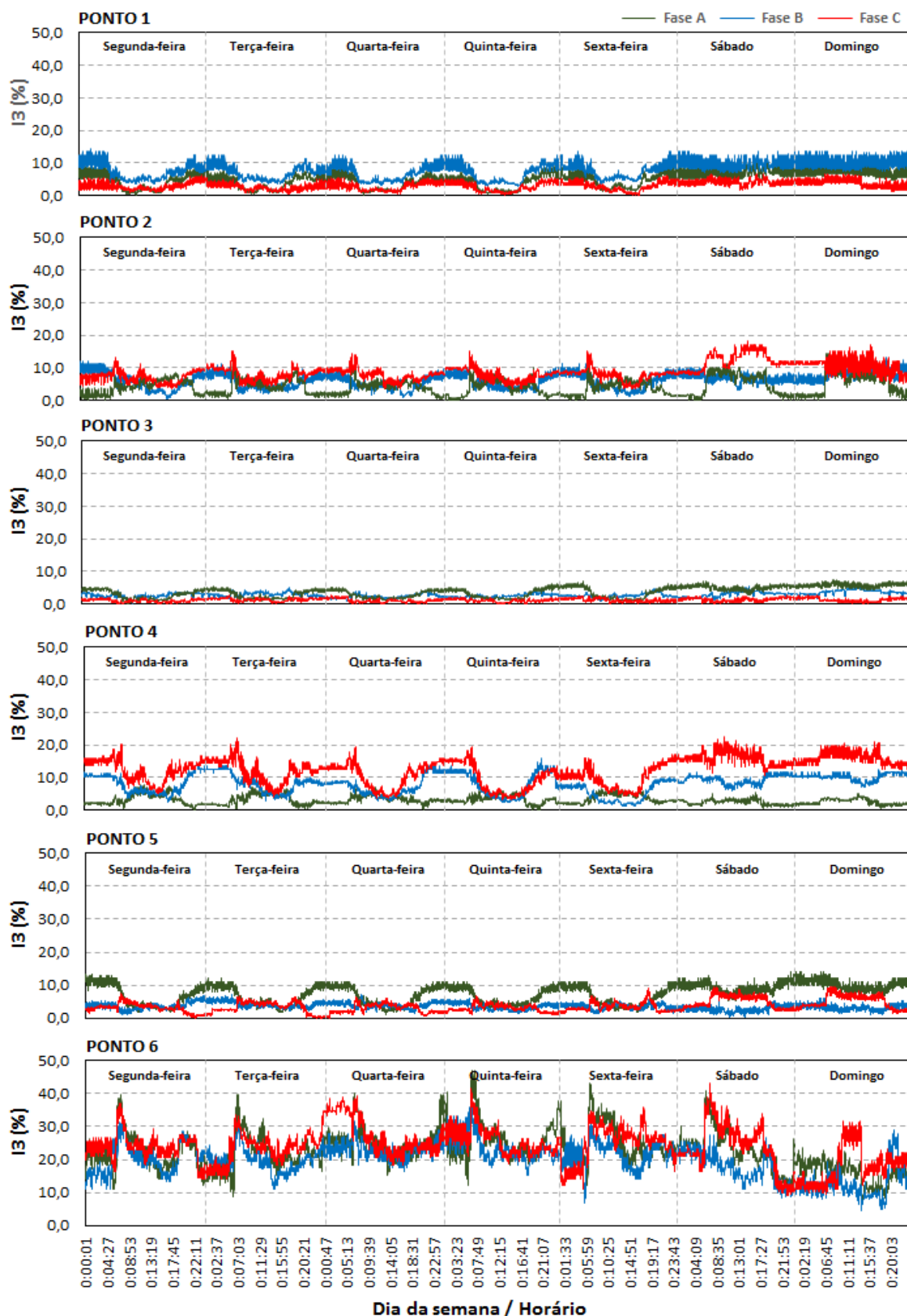


Figura 3.15 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de corrente de ordem 3 em cada ponto de medição dos Pontos 1 ao 6.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

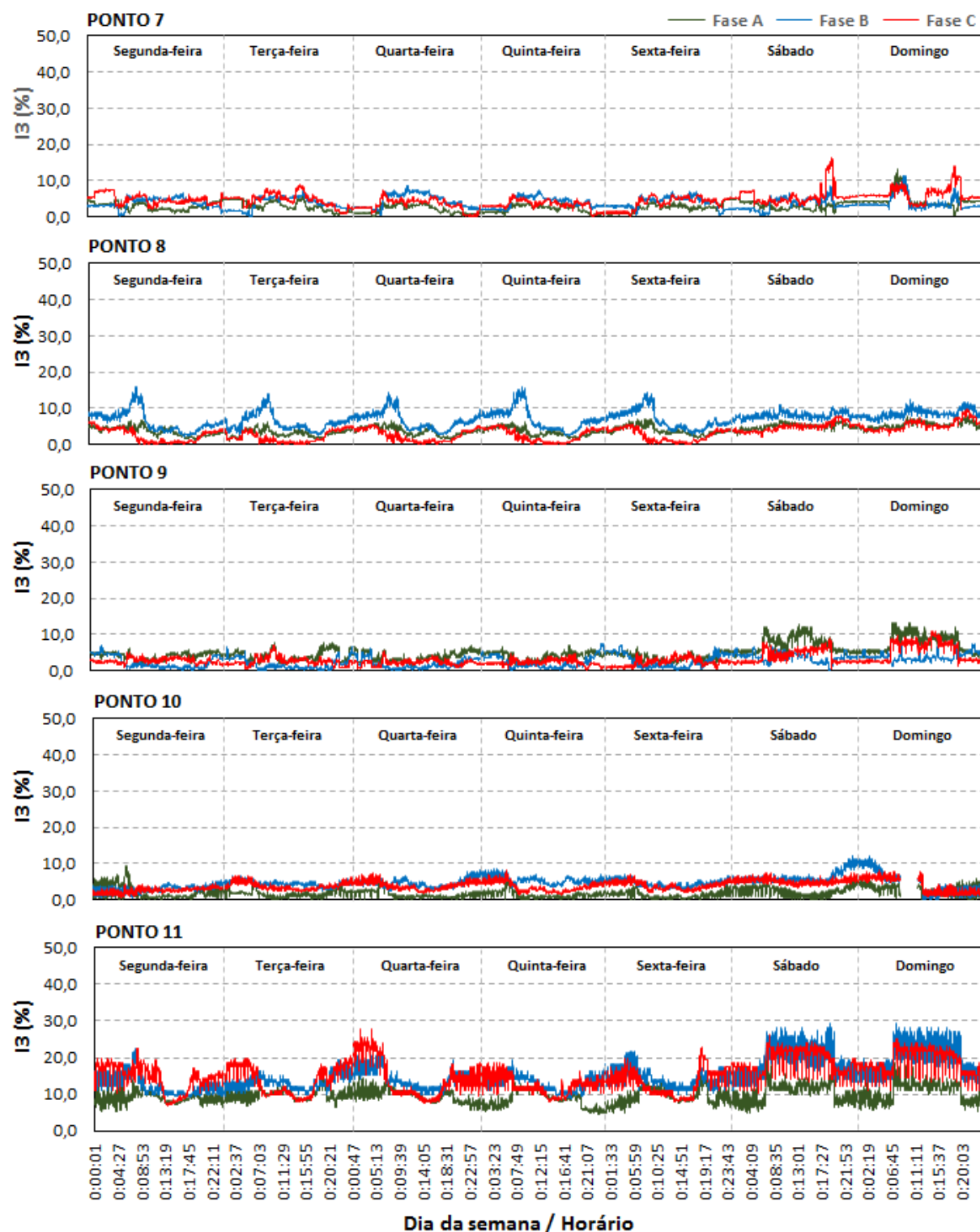


Figura 3.16 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de corrente de ordem 3 em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11.

Para a outra distorção harmônica individual de corrente mais significativa (5ª ordem), os valores estatísticos calculados com base nos resultados de

medição (máximo, médio, máximo percentil diário 95% e percentil semanal 95%), nos onze pontos de medição, podem ser vistos na figura 3.17.

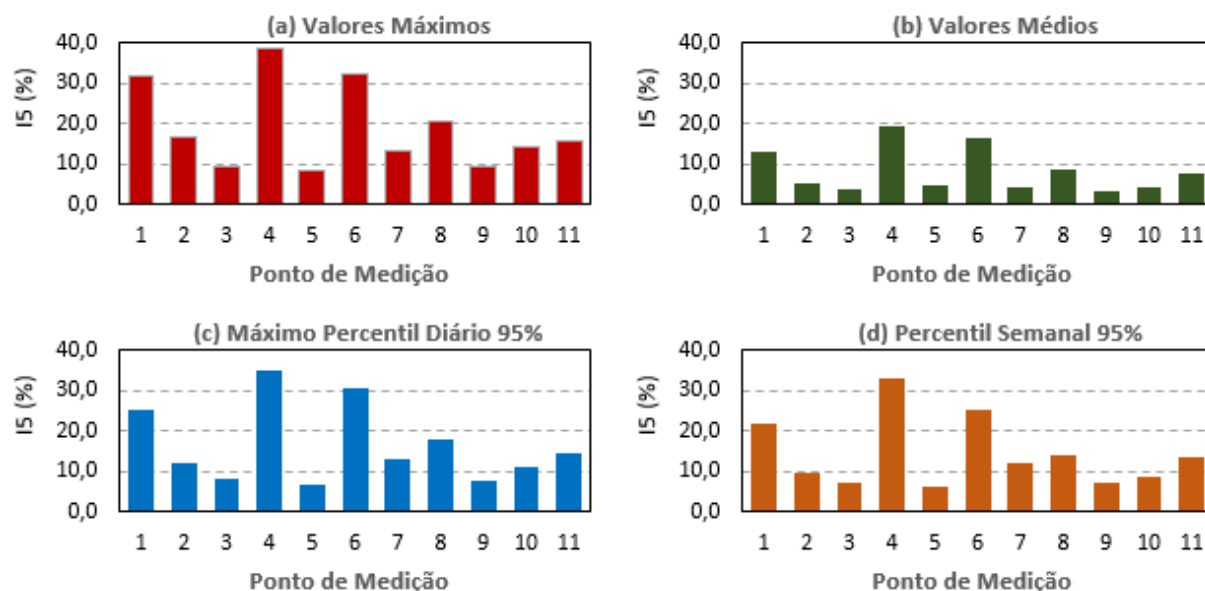


Figura 3.17 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para cada ponto de medição em relação à distorção harmônica individual de corrente de ordem 5 dos Pontos 1 ao 11.

O ponto que apresentou maior distorção harmônica individual de corrente de ordem 5 foi o Ponto 4 que atingiu um valor máximo de quase 40% e médio próximo a 20%, seguido dos Pontos 6 e 1.

Como dito anteriormente, o Ponto 4 atende os laboratórios de solda da Faculdade de Engenharia Mecânica, o Ponto 6 atende três blocos sala de aula e um bloco administrativo e o Ponto 1 possui os blocos 1A (Administrativo), 1F, 1J e 5N como carga.

O comportamento semanal da distorção harmônica individual de corrente de ordem 5 em cada ponto de medição, do Ponto 1 ao 11, pode ser visualizado nas figuras 3.18 e 3.19 e em relação a sua similaridade nas três fases, a ausência desta foi evidente nos Pontos 4, 5, 6 e 11.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

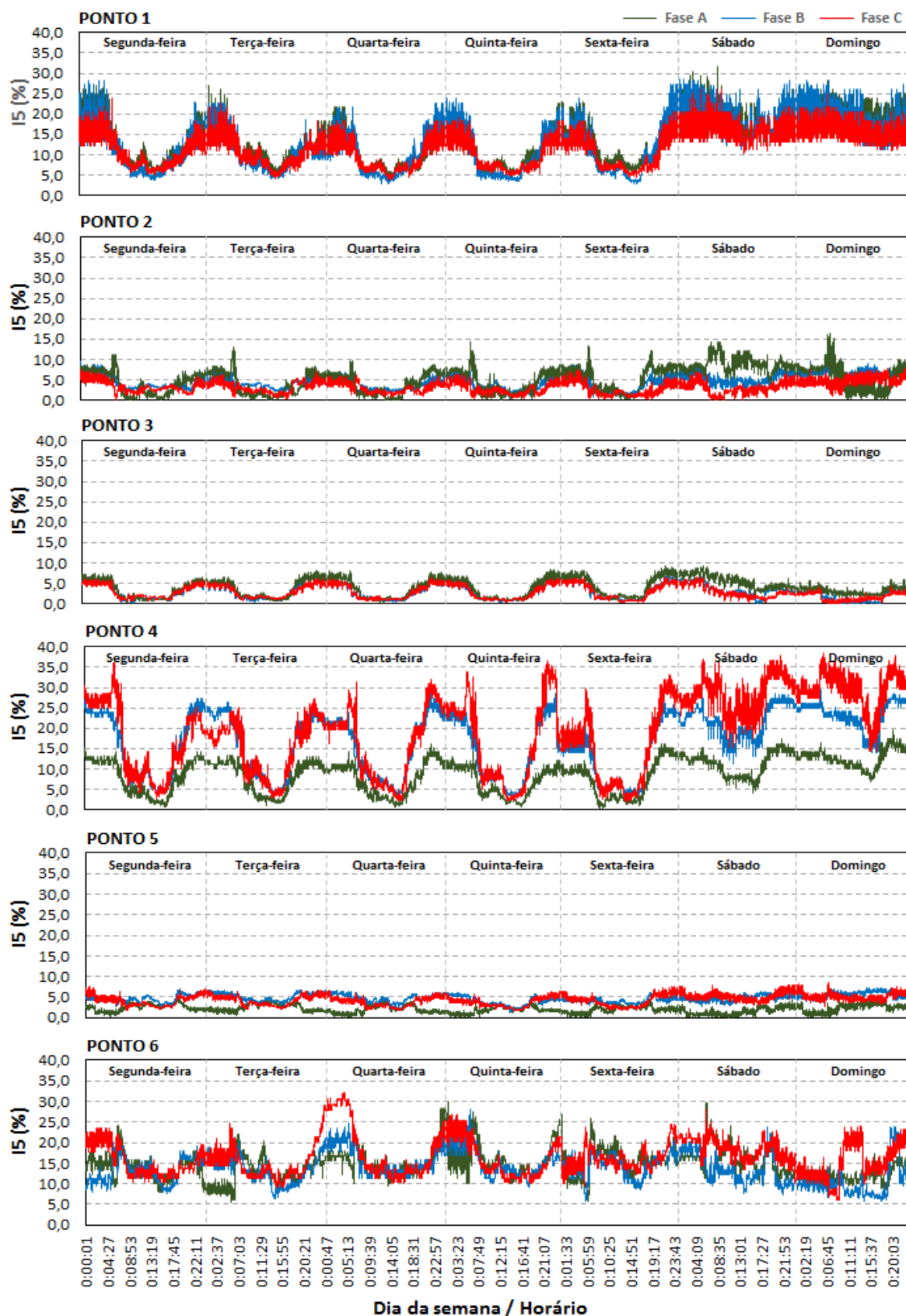


Figura 3.18 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de corrente de ordem 5 em cada ponto de medição dos Pontos 1 ao 6.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

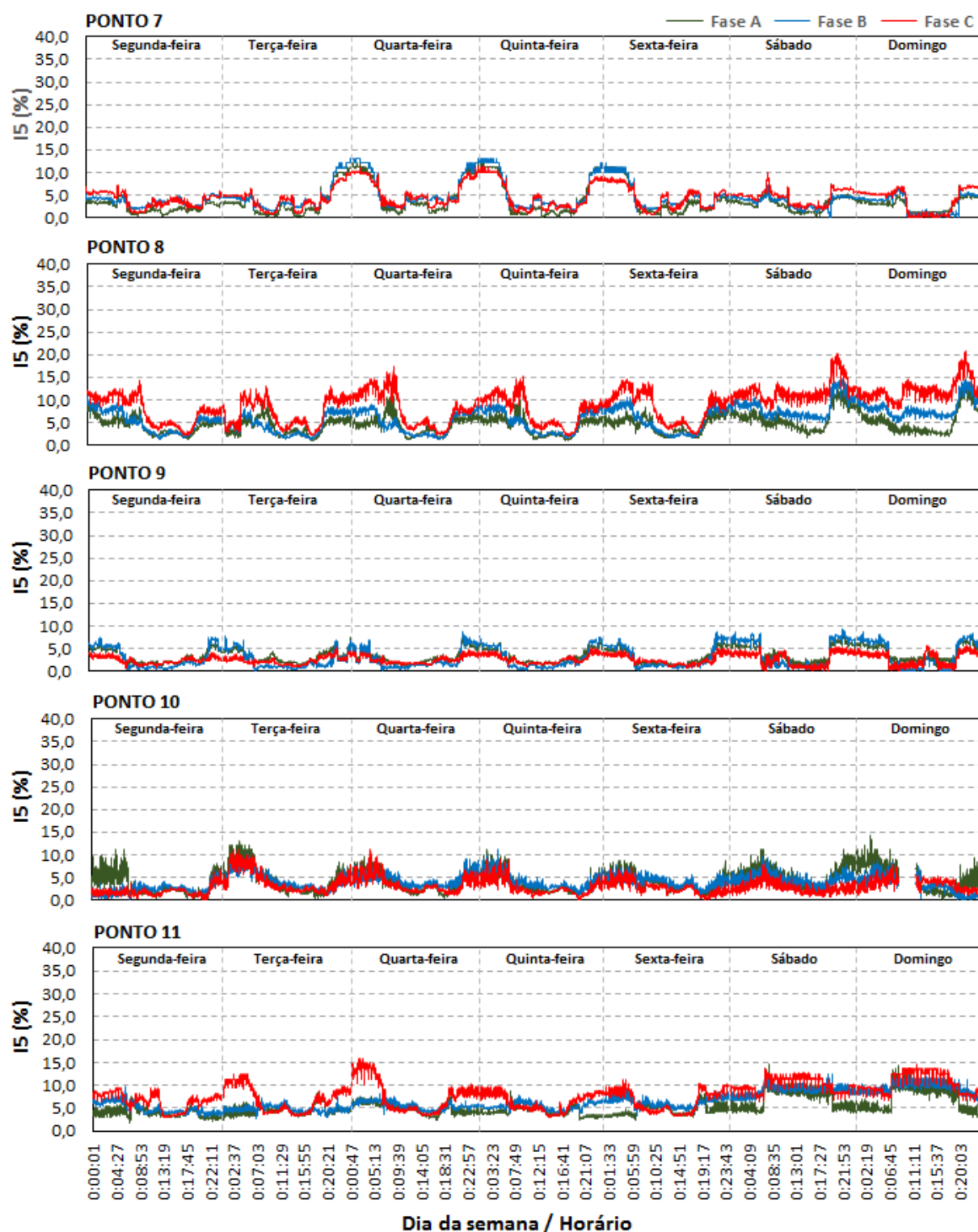


Figura 3.19 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de corrente de ordem 5 em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11.

Para dar continuidade à análise dos valores estatísticos calculados e do comportamento obtido, a partir das medições, dos indicadores das distorções harmônicas na forma de onda, considerou-se a tensão.

b) Distorções harmônicas de tensão

As distorções harmônicas totais e individuais de tensão máximas registradas, no limite de responsabilidade do atendimento da concessionária com o consumidor, devem ser iguais ou inferiores aos valores indicados, respectivamente, nas tabelas 3.2 e 3.3, retiradas do documento Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, da ANEEL [30].

No entanto, apesar das medições nos Pontos de 1 a 11 terem sido realizadas nos barramentos de baixa tensão dos transformadores do sistema elétrico do campus, ou seja, em pontos da instalação elétrica de responsabilidade do consumidor, e não existir norma que determine valores de referência de distorção harmônica total e individuais de tensão para tais pontos; considerou-se os valores de referência determinados pelo Prodist para tensões nominais inferiores a 1000 V.

Tabela 3.2 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais

Tensão Nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (%)
$VN \leq 1kV$	10
$1kV \leq VN \leq 13,8kV$	8
$13,8kV \leq VN \leq 69kV$	6
$69kV \leq VN \leq 138kV$	3

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

Tabela 3.3 - Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental) para tensões nominais inferiores a 1000 V

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]	
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5
	7	6,5
	11	4,5
	13	4
	17	2,5
	19	2
	23	2
	25	2
	>25	1,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5
	9	2
	15	1
	21	1
	>21	1
Pares	2	2,5
	4	1,5
	6	1
	8	1
	10	1
	12	1
	>12	1

- **Distorção harmônica total de tensão**

Em relação à distorção harmônica total de tensão, os valores estatísticos calculados com base nos resultados de medição (máximo, médio, máximo percentil diário 95% e percentil semanal 95%), nos onze pontos de medição em baixa tensão, foram inferiores ao valor de referência de 10% indicado pelo Prodist, mais precisamente, ficaram abaixo de 5% e com valores muito próximos nas quatro estatísticas, o que mostra que essa distorção variou em uma faixa estreita de valores, conforme apresentado na figura 3.20.

Ao comparar os valores estatísticos das distorções harmônicas totais de tensão com os de corrente, percebeu-se como as porcentagens referentes ao

primeiro indicador são bem inferiores e variam bem menos do que as porcentagens do segundo.

O ponto que apresentou maior distorção harmônica total de tensão foi o Ponto 6 e o que apresentou menor valor para este indicador de distúrbio foi o Ponto 3, igual ao ocorrido para a distorção harmônica total de corrente. Apesar disso, ao comparar um ponto com outro, as distorções harmônicas totais de tensão ficaram muito próximas, ao contrário do ocorrido para as distorções harmônicas totais de corrente.

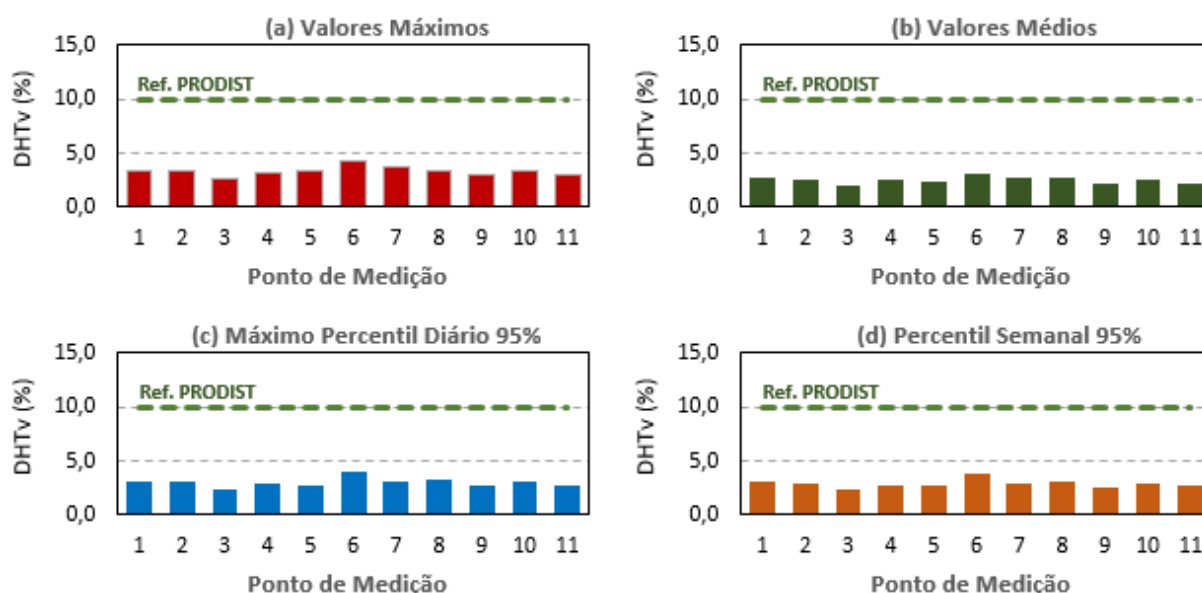


Figura 3.20 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para cada ponto de medição em relação à distorção harmônica total de tensão dos Pontos 1 ao 11.

O comportamento semanal da distorção harmônica total de tensão, em cada ponto de medição, visualizado nas figuras 3.21 e 3.22, comprovou a afirmação de que essa distorção variou em uma faixa estreita de valores e mostrou que seus valores permaneceram os mesmos ou um pouco maiores nos finais de semana, mesmo com a redução brusca da carga do campus neste período.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

Pode-se observar também, em relação ao comportamento semanal da distorção harmônica total de tensão, que em todos os pontos foi apresentada uma similaridade nas três fases.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

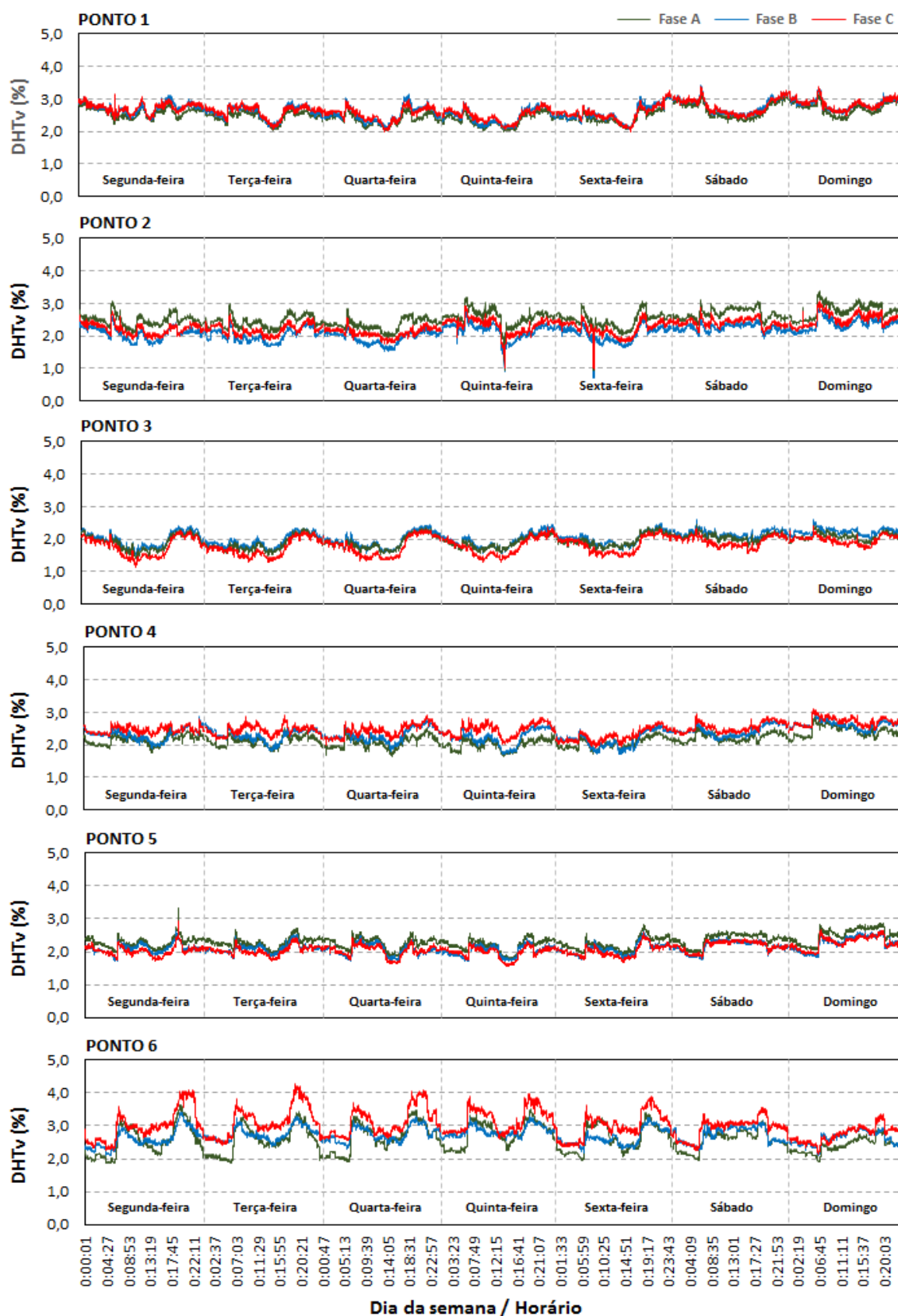


Figura 3.21 – Comportamento semanal da distorção harmônica total de tensão em cada ponto de medição dos Pontos 1 ao 6.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

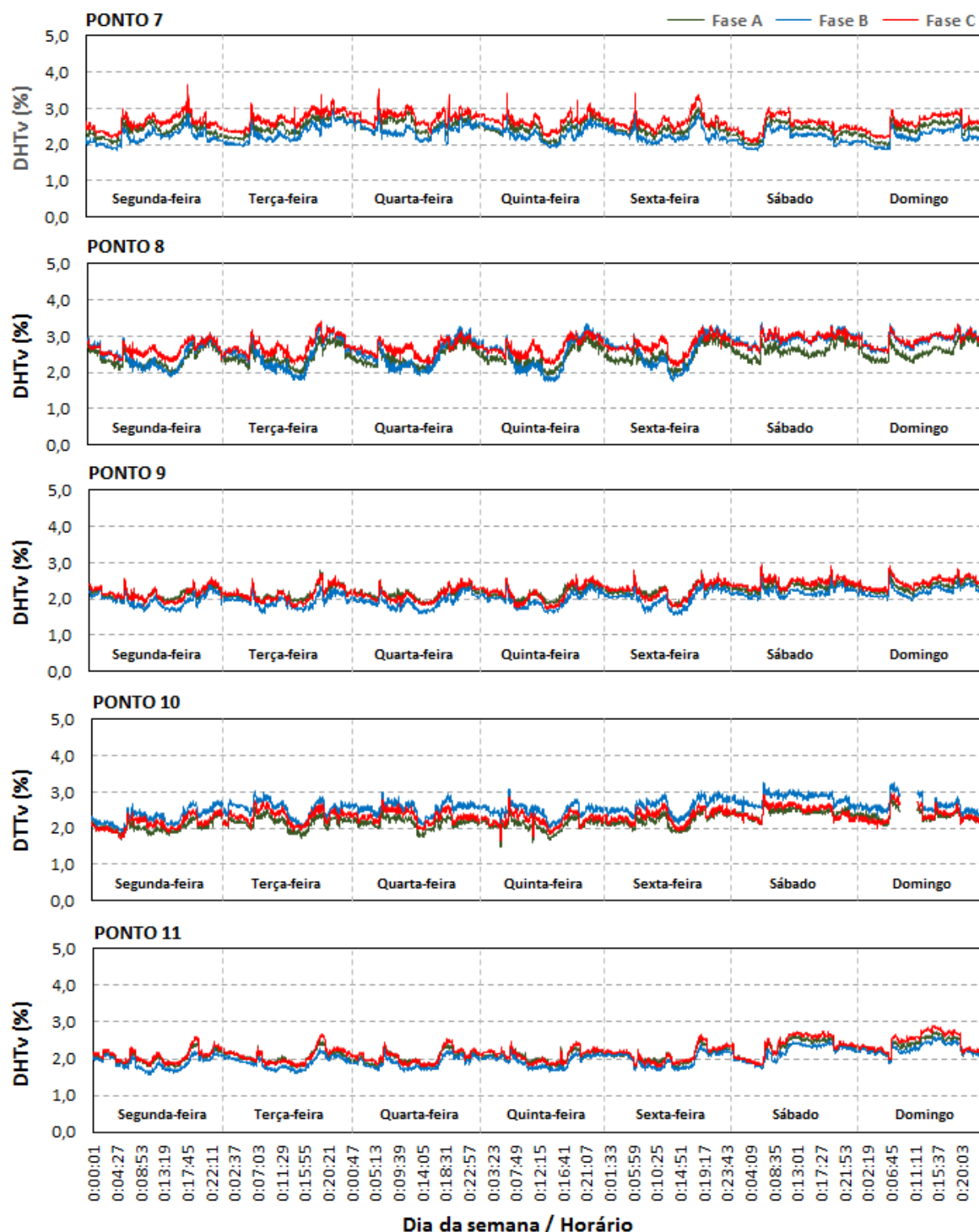


Figura 3.22 – Comportamento semanal da distorção harmônica total de tensão em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11.

A partir da avaliação dos pontos localizados nos barramentos de baixa tensão dos transformadores que compõem a rede do Campus Santa Mônica em

relação à distorção harmônica de tensão total, foi gerado um espectro harmônico para verificar quais as ordens harmônicas mais se destacam em cada um destes pontos.

- **Espectro harmônico de tensão**

As figuras 3.23 e 3.24 apresentaram uma síntese dos valores das distorções harmônicas totais e individuais de tensão nas três fases, obtidas ao longo do tempo de monitoração, nos onze pontos de medição, na forma de espectro de frequência.

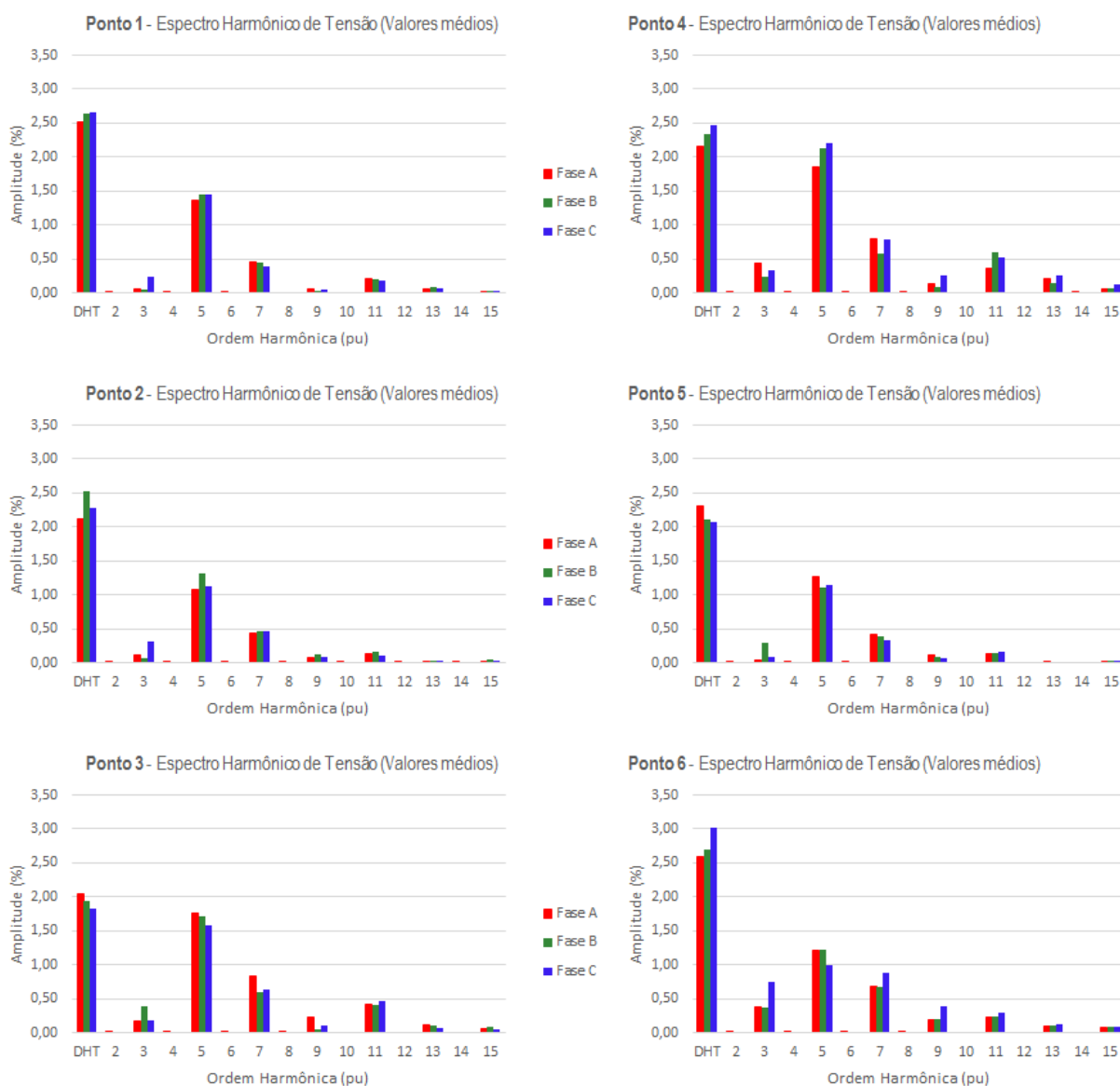


Figura 3.23 – Espectro de frequência da tensão em cada ponto de medição dos Pontos 1 ao 6.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

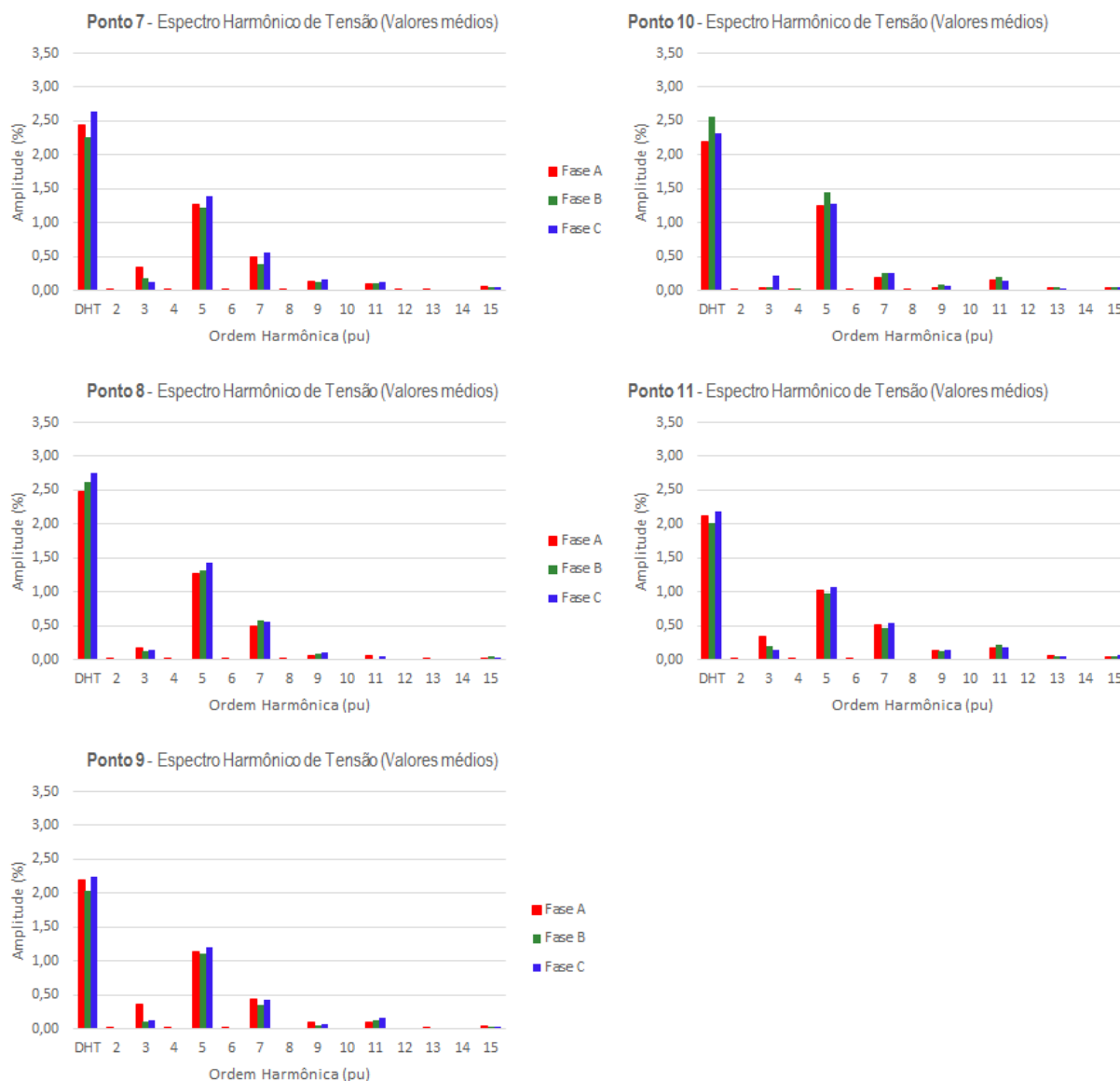


Figura 3.24 – Espectro de frequência da tensão em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11.

Pela análise dos espectros de frequência, a tensão harmônica mais significativa em todos os pontos é de ordem 5, seguida da ordem 7. Tal fato já era esperado, já que algumas referências como [6], [10] e [11], que apresentaram estudos em instalações que desenvolvem atividades e/ou possuem cargas predominantes iguais às atividades executadas e às cargas existentes neste campus acadêmico, tiveram as distorções harmônicas individuais de tensão de quinta e sétima ordem como as que mais se destacaram.

Portanto, foi necessária uma análise mais detalhada das distorções harmônicas individuais de tensão de 5ª e 7ª ordem.

- **Distorção harmônica individual de tensão**

A tensão harmônica de ordem 5, que é a mais significativa em todos os pontos de medição, deve ser inferior a 7,5%, segundo os valores de referência determinados pelo Prodist para tensões nominais inferiores a 1000V.

Em relação à distorção harmônica individual de tensão de ordem 5, os valores estatísticos calculados com base nos resultados de medição (máximo, médio, máximo percentil diário 95% e percentil semanal 95%), nos onze pontos de medição em baixa tensão, foram inferiores ao valor de referência, mais precisamente, ficaram abaixo de 3% e são apresentados na figura 3.25.

O ponto que apresentou maior distorção harmônica individual de tensão de ordem 5 foi o Ponto 4. Conforme verificações anteriores, tal ponto também apresentou maior distorção harmônica individual de corrente de ordem 5. Do mesmo modo como ocorreu com a distorção harmônica total de tensão, ao comparar os pontos de medição entre si, verificou-se que as distorções individuais de tensão de ordem 5 ficaram muito próximas.

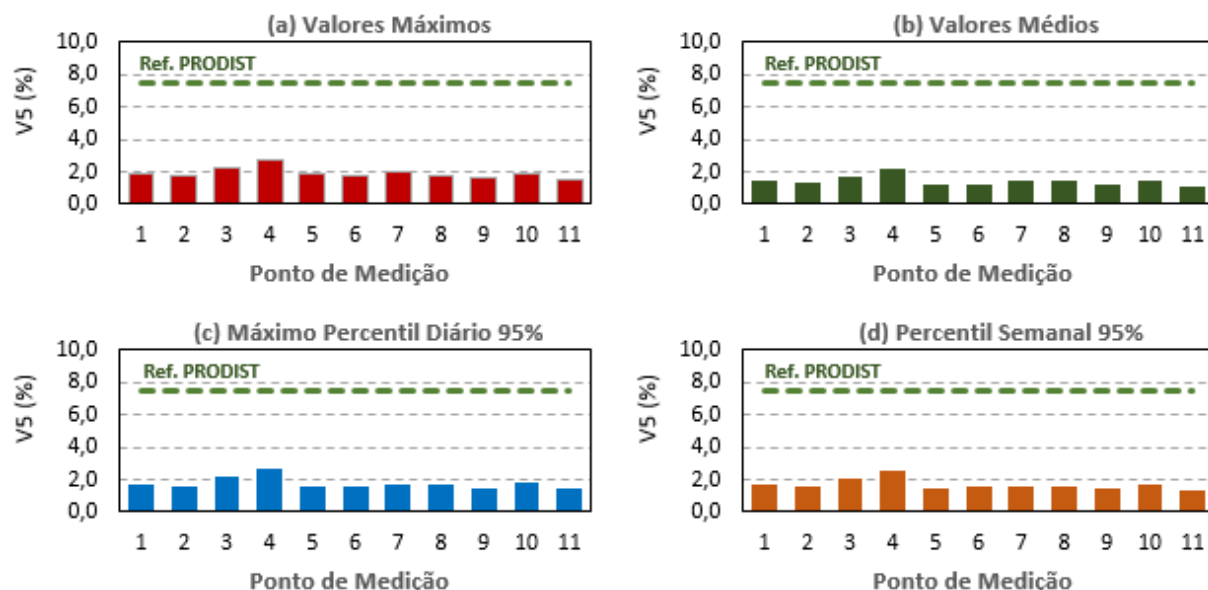
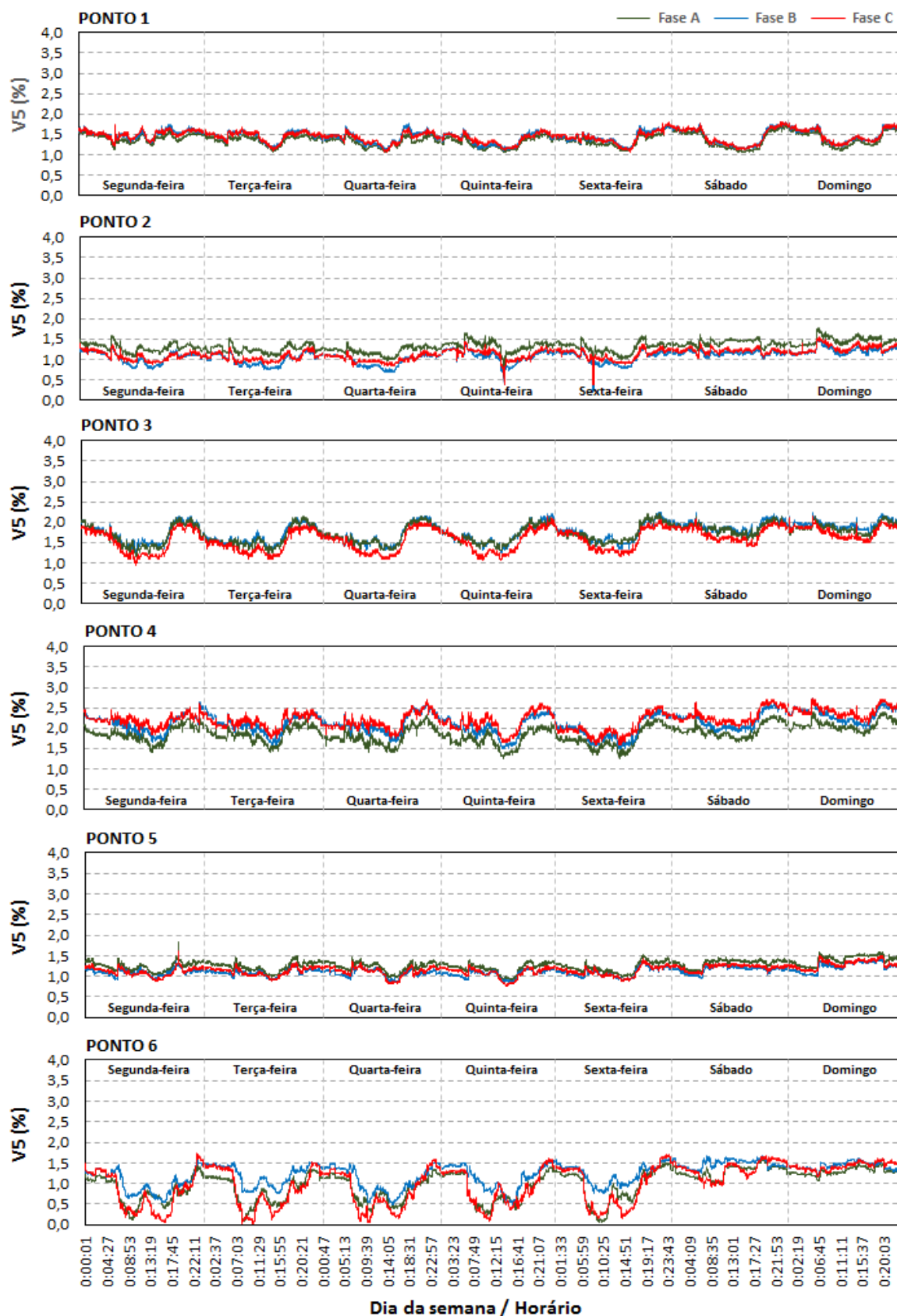


Figura 3.25 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para cada ponto de medição em relação à distorção harmônica individual de tensão de ordem 5 dos Pontos 1 ao 11.

O comportamento semanal da distorção harmônica individual de tensão de ordem 5 em cada ponto de medição, do Ponto 1 ao 11, pode ser visualizado nas figuras 3.26 e 3.27 e foi similar ao comportamento da distorção harmônica total de tensão.

Observou-se em todos os pontos uma similaridade do comportamento da distorção harmônica individual de tensão de ordem 5 nas três fases. Apenas no Ponto 6, os valores dessa distorção na fase B foram um pouco diferentes das outras duas.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus



CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

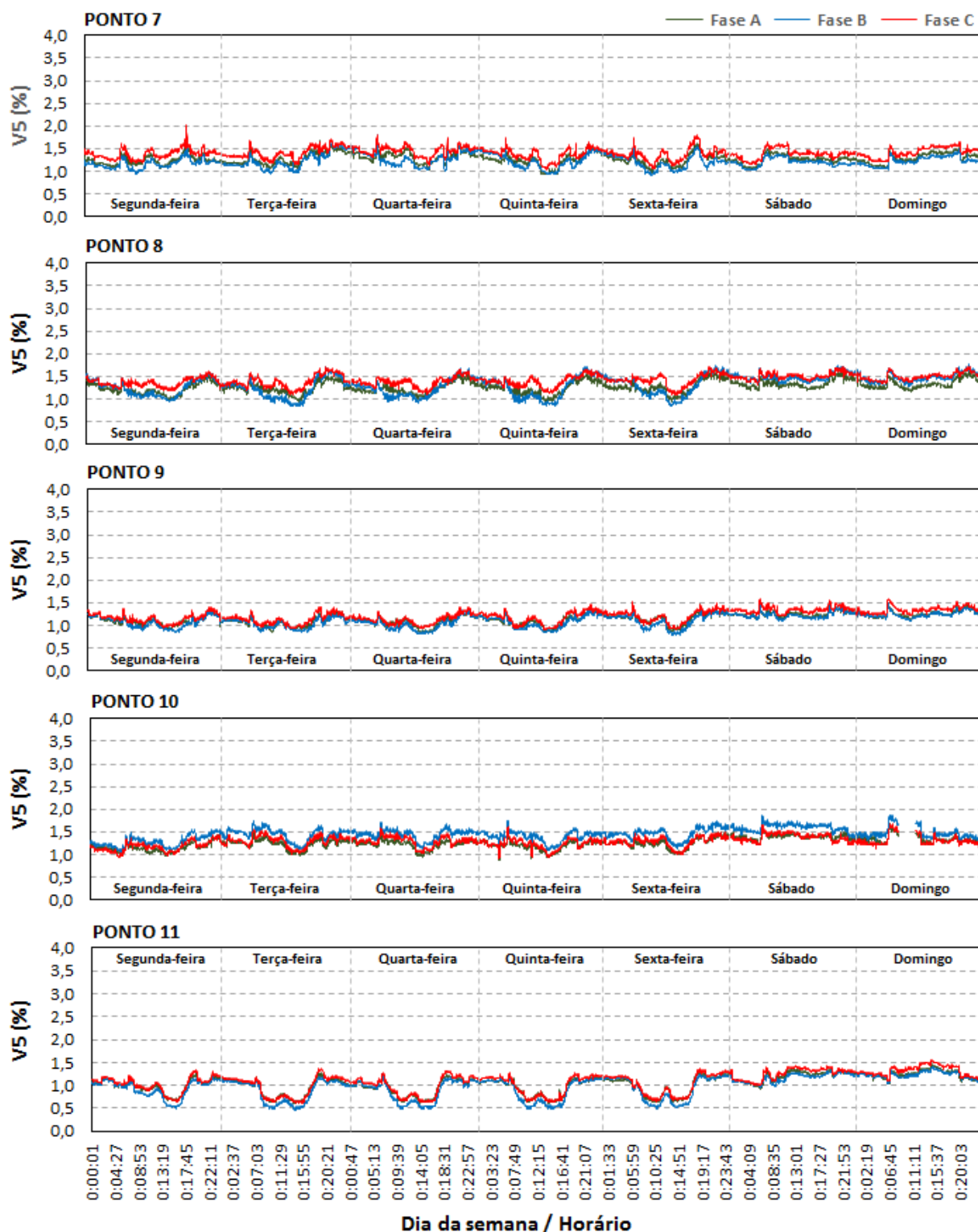


Figura 3.27 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de tensão de ordem 5 em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11.

No que se refere à distorção harmônica individual de tensão de ordem 7, os valores estatísticos, em todos os pontos de medição, não ultrapassaram o valor de 6,5%, determinado pelo Prodlist, ficando abaixo de 2%, conforme visualizado na figura 3.28.

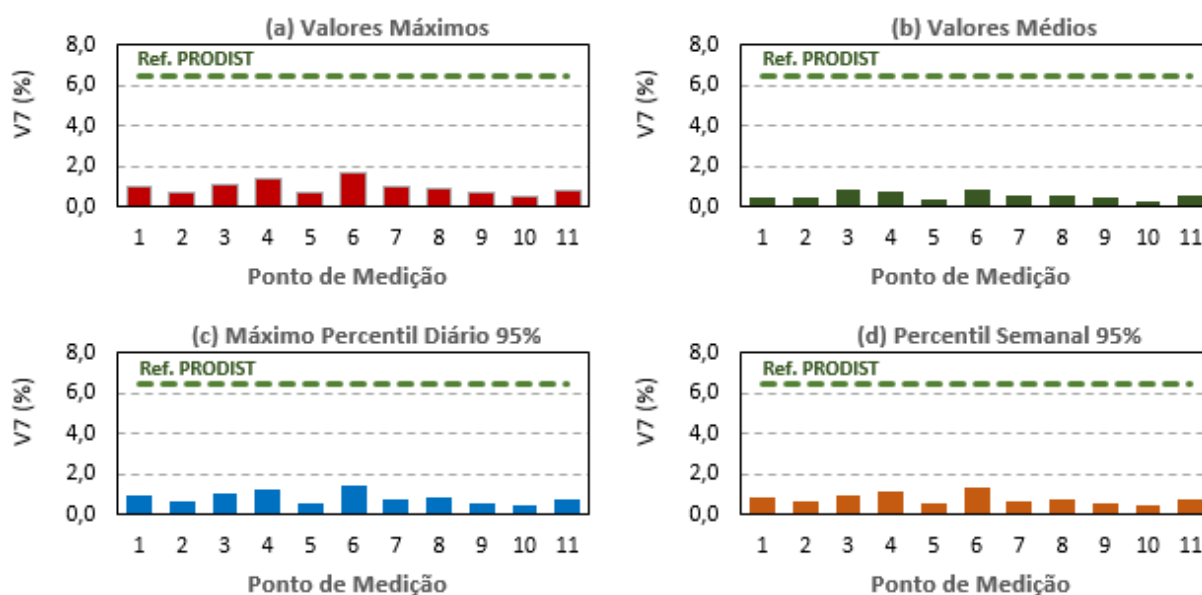


Figura 3.28 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para cada ponto de medição em relação à distorção harmônica individual de tensão de ordem 7 dos Pontos 1 ao 11.

O ponto que apresentou maior distorção harmônica individual de tensão de ordem 7 foi o Ponto 6.

O comportamento semanal da distorção harmônica individual de tensão de ordem 7 em cada ponto de medição pode ser visualizado nas figuras 3.29 e 3.30 e foi diferente do comportamento observado na ordem 5. De uma forma geral, durante toda a semana, inclusive nos dias de final de semana, a distorção harmônica individual de tensão de ordem 7 apresentou valores mais altos durante o dia e valores mais baixos no período noturno, com uma variação brusca na passagem desses períodos e seu comportamento foi similar nas três fases.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

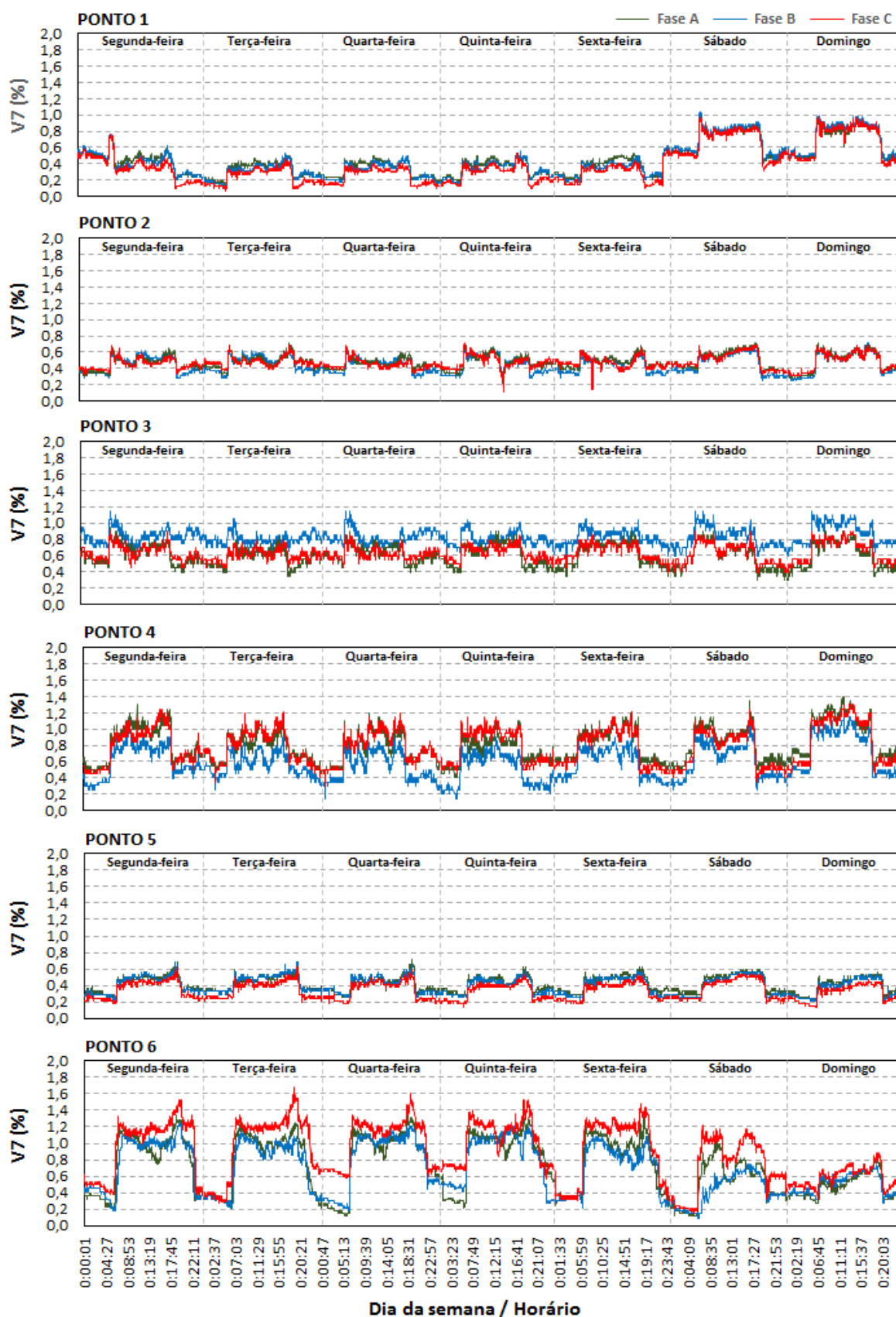


Figura 3.29 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de tensão de ordem 7 em cada ponto de medição dos Pontos 1 ao 6.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

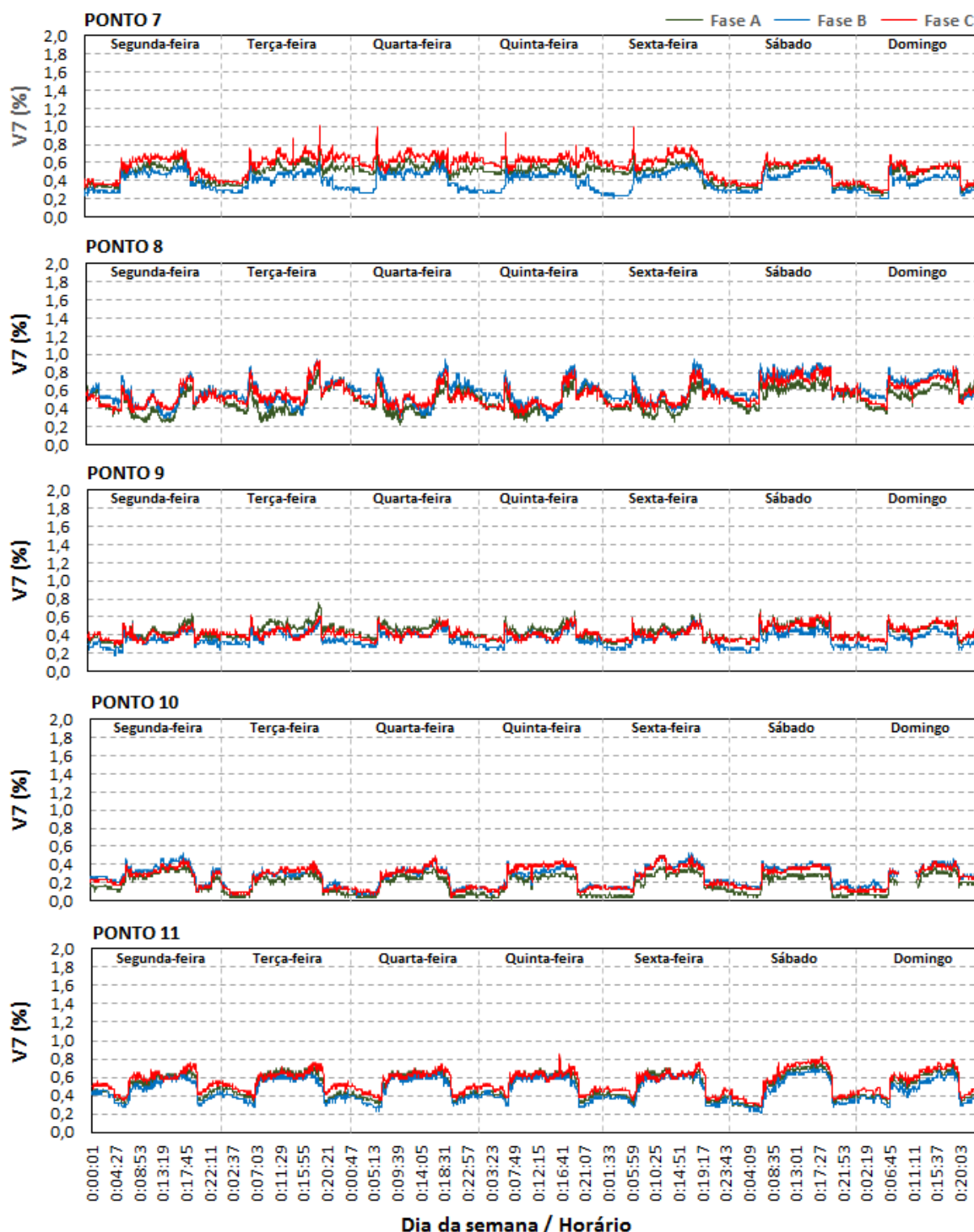


Figura 3.30 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de tensão de ordem 7 em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11.

Após a verificação dos indicadores de distorção harmônica de tensão, tanto total como individuais, os pontos de baixa tensão do sistema elétrico desta

universidade foram avaliados em relação a outro fenômeno associado à qualidade da energia elétrica, desequilíbrios de tensão.

3.5 – Desequilíbrios de tensão

Um sistema elétrico está desequilibrado quando suas correntes ou tensões nas três fases não são iguais em módulo e/ou não estão defasadas de 120 graus. Os causadores desse distúrbio são, por exemplo, cargas desbalanceadas como fornos a arco, cargas monofásicas mal distribuídas nas três fases, abertura de uma única fase etc [35].

De acordo com o Teorema de Fortescue, três fasores desequilibrados de um sistema podem ser substituídos por três sistemas equilibrados de fasores que são os componentes de sequência positiva, negativa e zero. Os componentes de sequência positiva consistem em 3 fasores iguais em módulo, defasados de 120 graus e com a mesma sequência de fase dos fasores originais. Os componentes de sequência negativa consistem em 3 fasores iguais em módulo, defasados de 120 graus e com sequência de fase oposta a dos fasores originais. Os componentes de sequência zero consistem em 3 fasores iguais em módulo com defasagem de 0 graus entre si. Desta maneira, três fasores originais de tensão V_a , V_b e V_c são decompostos em três sistemas conforme figura 3.31 [35].

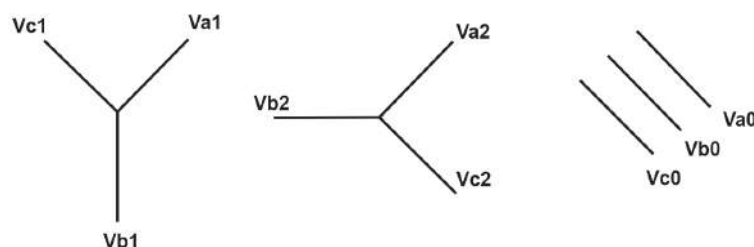


Figura 3.31 – Três sistemas equilibrados de fasores (componentes de sequência positiva, negativa e zero).

A figura 3.32 mostra que os três fasores desequilibrados de tensão são resultantes da soma gráfica dos três sistemas equilibrados de fasores (componentes de sequência positiva, negativa e zero) [35].

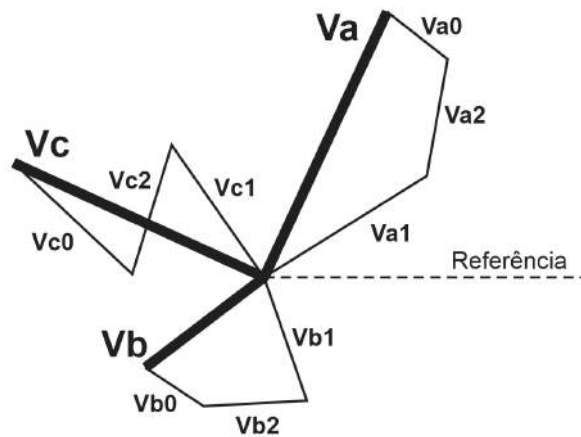


Figura 3.32 - Três fasores desequilibrados de tensão resultantes da soma gráfica dos três sistemas equilibrados de fasores (componentes de sequência positiva, negativa e zero).

As tensões V_a , V_b e V_c representadas na figura 3.32 podem ser equacionadas através das equações (3.5), (3.6) e (3.7).

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (3.5)$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \quad (3.6)$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad (3.7)$$

E cada componente de sequência é obtida pelas equações (3.8) a (3.16).

$$V_{a0} = 1/3(V_a + V_b + V_c) \quad (3.8)$$

$$V_{a1} = 1/3(V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (3.9)$$

$$Va2 = 1/3(Va + a^2Vb + aVc) \quad (3.10)$$

$$Vb0 = Va0 \quad (3.11)$$

$$Vb1 = a^2Va1 \quad (3.12)$$

$$Vb2 = aVa2 \quad (3.13)$$

$$Vc0 = Va0 \quad (3.14)$$

$$Vc1 = aVa1 \quad (3.15)$$

$$Vc2 = a^2Va2 \quad (3.16)$$

Onde:

Va, Vb, Vc – tensão, respectivamente, nas fases a, b e c;

Va0, Vb0, Vc0 – componente de sequência zero da tensão, respectivamente, nas fases a, b e c;

Va1, Vb1, Vc1 – componente de sequência positiva da tensão, respectivamente, nas fases a, b e c;

Va2, Vb2, Vc2 – componente de sequência negativa da tensão, respectivamente, nas fases a, b e c;

a – vetor unitário 120°.

Assim, o grau de desbalanceamento de uma tensão é calculado através da divisão da tensão de sequência negativa pela tensão de sequência positiva conforme equação (3.17) [35].

$$FD = \frac{V_-}{V_+} * 100[\%] \quad (3.17)$$

Onde:

FD – fator de desequilíbrio de tensão [%];

V- – magnitude da tensão de sequência negativa (eficaz) [V];

V+ – magnitude da tensão de sequência positiva (eficaz) [V].

A consequência de um sistema operando com tensões desbalanceadas é o funcionamento inadequado dos equipamentos trifásicos como os motores de indução e os conversores. Os primeiros ficarão submetidos a dois torques, o que provocará uma sobrecarga e aquecimento superior ao esperado e reduzirá a vida útil dos motores. Já os conversores poderão gerar além das ordens harmônicas já esperadas, outras de ordens diferentes, inclusive de ordem par, o que poderá leva-los a instabilidade harmônica e os impedirá de operar [35].

Em relação ao indicador fator de desequilíbrio, o Prodist [30] indica valores de referência apenas para os barramentos de média tensão, por isso, este estudo segue as orientações contidas no documento CENELEC EN50160:1999 [37]. Segundo este documento, o valor de referência nos barramentos do sistema trifásico de baixa tensão, deve ser igual ou inferior a 2% e em sistemas onde há predominância de cargas monofásicas e bifásicas, o valor de referência de 3% pode ser aplicado.

Os valores estatísticos calculados com base nos resultados de medição (máximo, médio, máximo percentil diário 95% e percentil semanal 95%) do fator de desequilíbrio de tensão nos onze pontos de medição em baixa tensão

foram inferiores ao valor de referência de 3% indicado pelo CENELEC, mais precisamente, ficaram abaixo de 1,05%, como pode ser visto na figura 3.33. Se analisados separadamente os valores médios, máximos percentis diários 95% e percentis semanais 95%, o fator de desequilíbrio é ainda mais baixo pois os registros de valores máximos foram isolados.

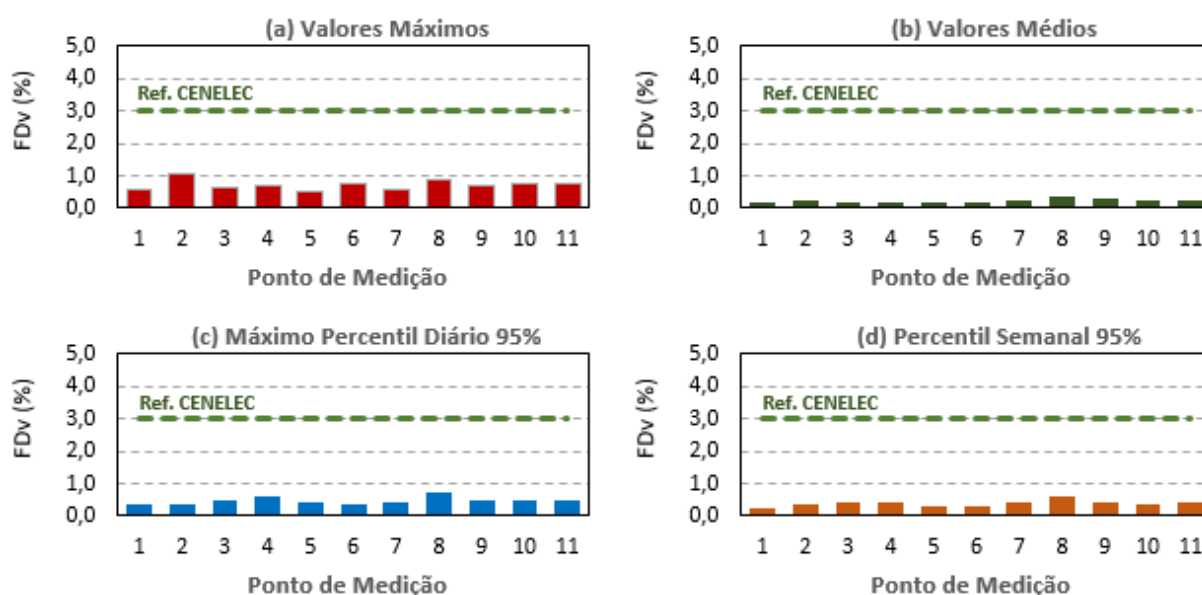


Figura 3.33 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para cada ponto de medição em relação ao desequilíbrio de tensão dos Pontos 1 ao 11.

Em relação aos valores máximos registrados, o ponto que apresentou maior desequilíbrio de tensão foi o Ponto 2. Já para os outros valores estatísticos calculados com base nos resultados de medição (médio, máximo percentil diário 95% e percentil semanal 95%), foi o Ponto 8. O Ponto 2 possui os blocos 1A, 1J e iluminação externa como carga e o Ponto 8, os blocos 1H, 1I, 1S, 1U, 1W, 1Y, 3E e 3M.

O comportamento semanal do fator de desequilíbrio de tensão em cada ponto de medição, do Ponto 1 ao 11, pode ser visualizado nas figuras 3.34 e 3.35.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

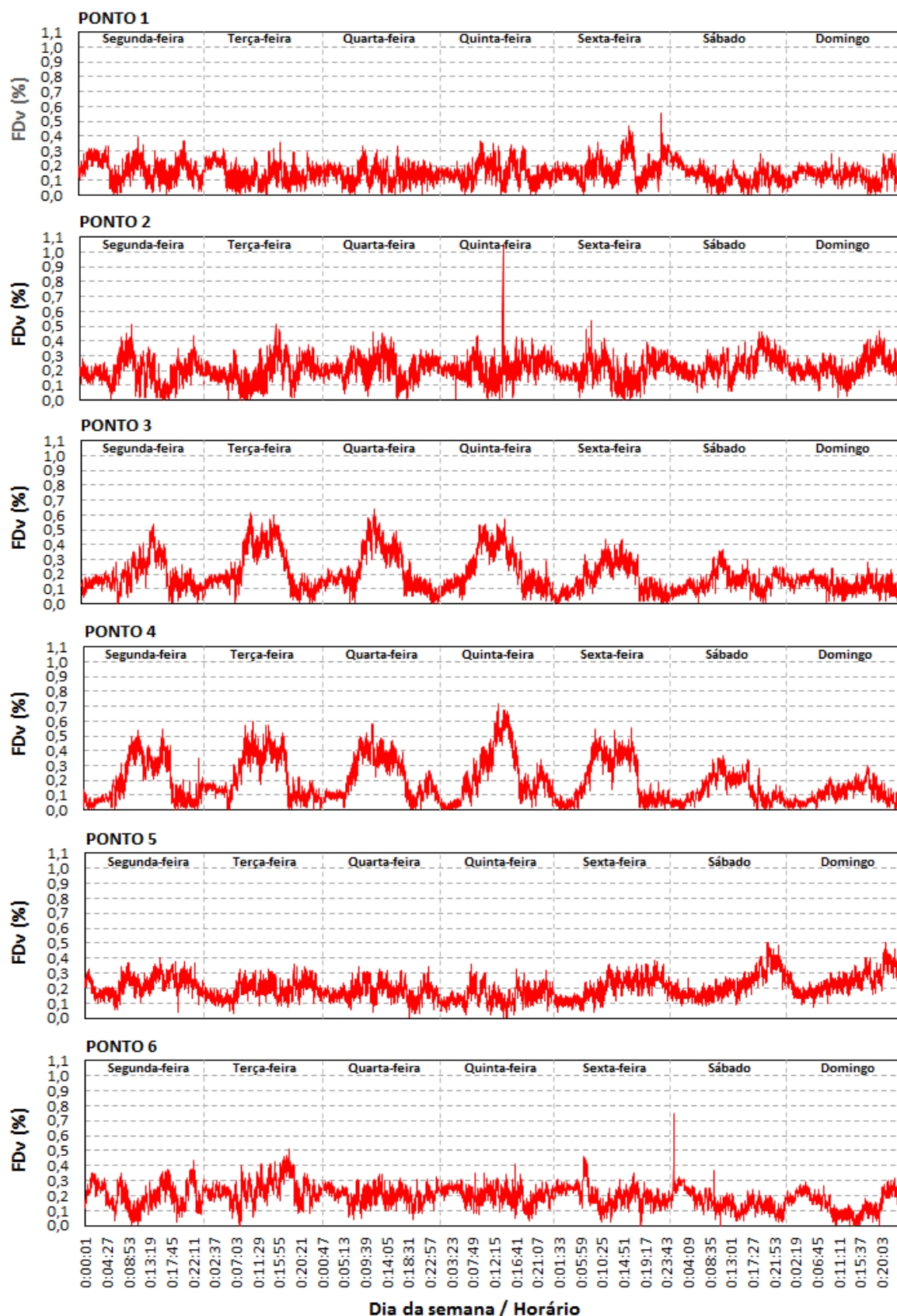


Figura 3.34 – Comportamento semanal do fator de desequilíbrio de tensão em cada ponto de medição dos Pontos 1 ao 6.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

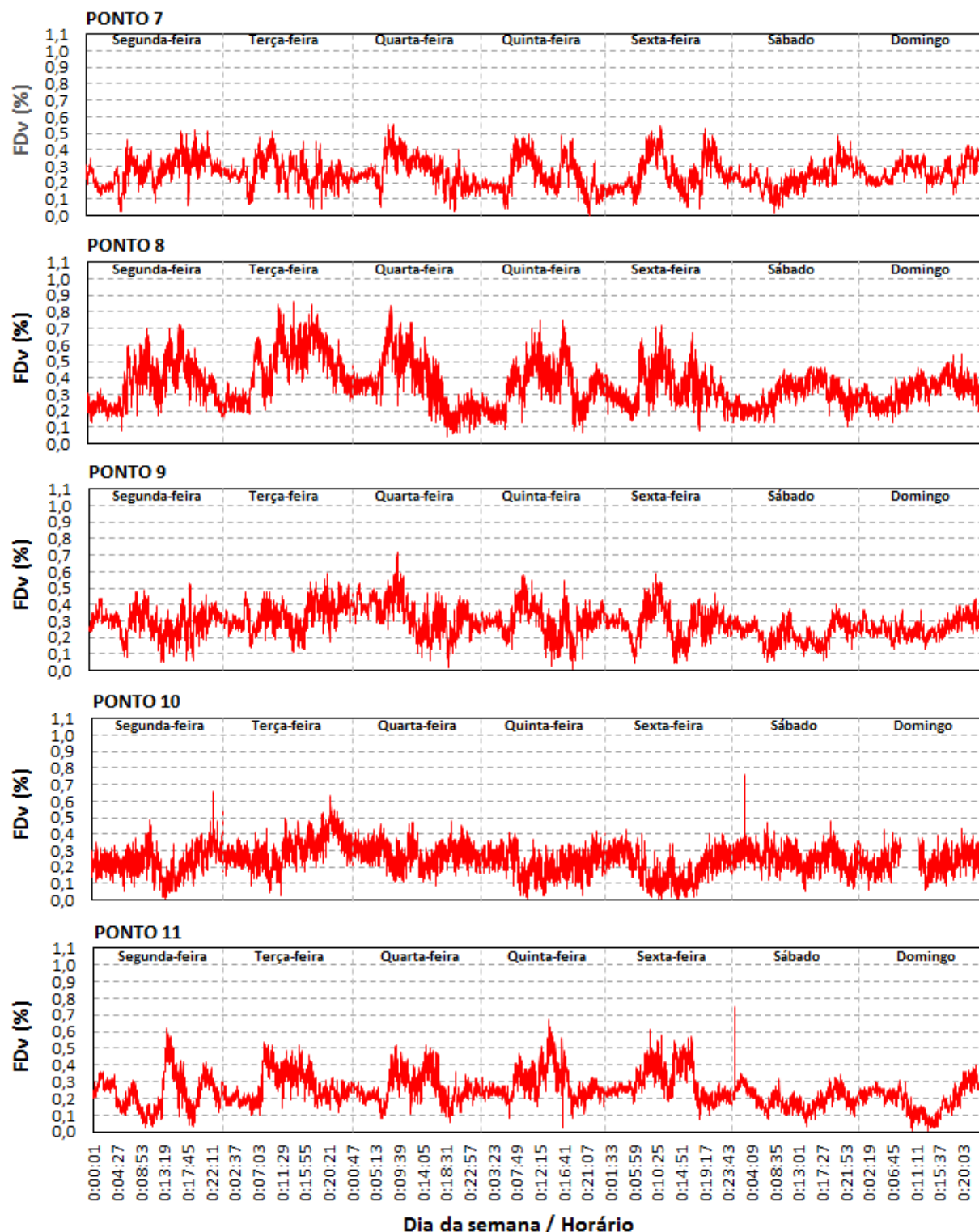


Figura 3.35 – Comportamento semanal do fator de desequilíbrio de tensão em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11.

Após a verificação do fator de desequilíbrio de tensão, os pontos de baixa tensão do sistema elétrico desta universidade foram avaliados em relação a outro fenômeno associado à qualidade da energia elétrica, as flutuações de tensão.

3.6 – Flutuações de tensão

O último distúrbio avaliado associado à qualidade da energia elétrica no sistema elétrico da universidade foram as flutuações de tensão que são variações repetitivas, aleatórias ou esporádicas do valor eficaz da tensão de fornecimento, provocadas pela operação de cargas com características de alterações rápidas e bruscas nas magnitudes das potências ativa e reativa, como verificado nos fornos elétricos a arco e nos laminadores; e de cargas capazes de produzir componentes de frequências inter-harmônicas que se superposicionam aos sinais de tensão na frequência fundamental das redes de energia elétrica, como verificado nos cicloconversores e demais cargas de dupla conversão [38]. Essas variações são de pequeno valor, de 0,1% a 7% do valor eficaz da tensão [35] e são representadas pela figura 3.36.

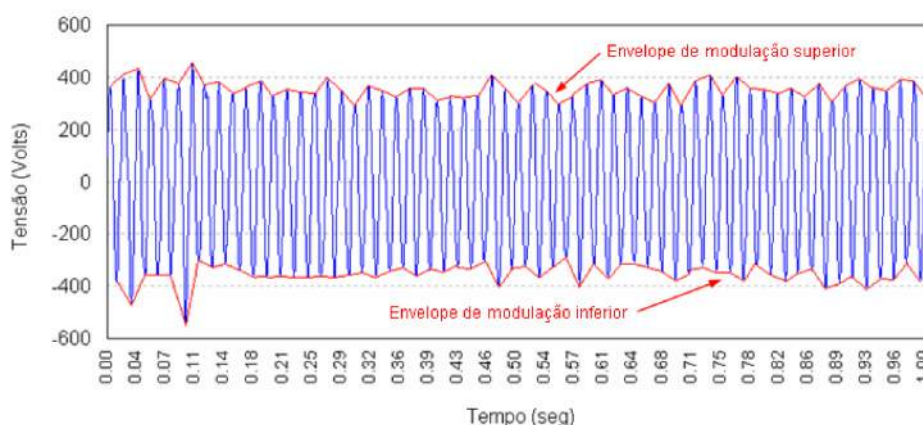


Figura 3.36 – Envelope de modulação superior e inferior da tensão.

As flutuações de tensão podem causar uma série de efeitos indesejáveis nas redes elétrica como: falhas de sensores e equipamentos de comando elétrico que operam através da identificação da passagem por zero ou de pico dos valores instantâneos da tensão e/ou corrente; aquecimento adicional em máquinas e condutores devido ao incremento de parcelas de perdas joulicas; saturação de transformadores de corrente; interferência em sistemas de telecomunicação; incremento de vibrações mecânicas e ruídos audíveis; ocasionando falhas e interrupção de processos e o efeito denominado de cintilação luminosa, ou *flicker*. Este último efeito representa o principal fenômeno associado às flutuações de tensão e está relacionado à sensibilidade do olho humano em perceber as oscilações luminosas de baixa frequência nas lâmpadas [38].

O indicador Severidade de *Flicker* de Curta Duração (Pst) representa a severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 10 (dez) minutos em um determinado barramento elétrico [30]. O indicador é calculado através da equação (3.18).

$$Pst = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}} \quad (3.18)$$

Onde:

Pi (i = 0,1; 1; 3; 10; 50) corresponde ao nível de sensação de cintilação que foi ultrapassado durante i % do tempo, obtido a partir da função de distribuição acumulada complementar, representada pela figura 3.37, de acordo com o procedimento estabelecido nas Normas IEC (*International Electrotechnical Commission*): IEC 61000-4-15. *Flickermeter – Functional and Design Specifications* [30].

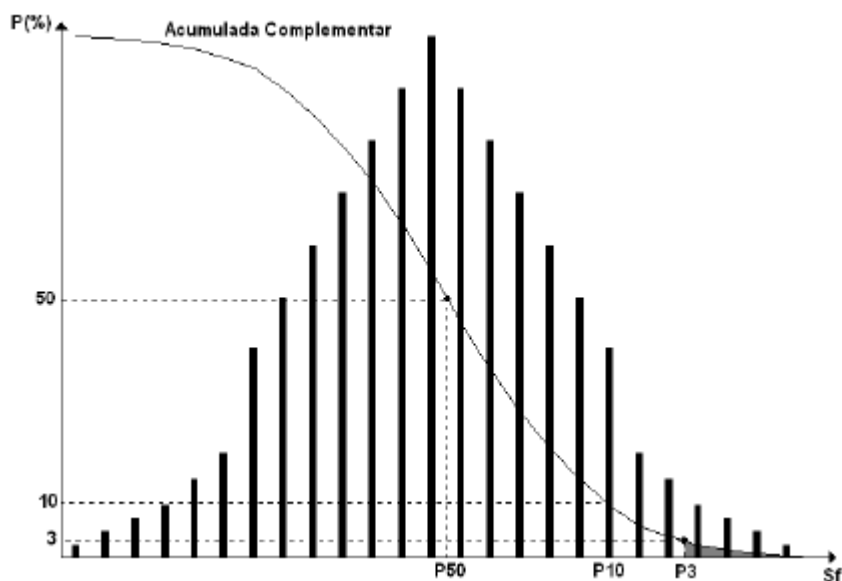


Figura 3.37 – Distribuição acumulada complementar da sensação de cintilação.

De modo semelhante, a grandeza Severidade de *Flicker* de Longa Duração (Plt) expressa a severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 2 (duas) horas, através da composição de 12 valores consecutivos de Pst [30], calculada através da equação (3.19).

$$Plt = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{Pst^3}{12}} \quad (3.19)$$

O indicador PstD95% representa o valor diário do indicador Pst que foi superado em apenas 5 % dos registros obtidos no período de 24 hs, já o indicador PltS95% representa o valor semanal do indicador Plt que foi superado em apenas 5 % dos registros obtidos no período de sete dias completos e consecutivos.

O documento Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (Prodint), Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica,

da ANEEL [30] fornece os valores de referência a serem utilizados para a avaliação do desempenho do sistema quanto às flutuações de tensão, conforme indicado na tabela 3.4. Observa-se a delimitação de três faixas para classificação dos indicadores estabelecidos: valor adequado, valor precário e valor crítico.

Tabela 3.4 –Valores de referência para flutuações de tensão

Valor de Referência	PstD95%	PltS95%
Adequado	$< 1 \text{ pu} / \text{FT}$	$< 0,8 \text{ pu} / \text{FT}$
Precário	$1 \text{ pu} - 2 \text{ pu} / \text{FT}$	$0,8 \text{ pu} - 1,6 \text{ pu} / \text{FT}$
Crítico	$> 2 \text{ pu} / \text{FT}$	$> 1,6 \text{ pu} / \text{FT}$

Onde, FT é Fator de Transferência deve ser calculado pela relação entre o valor do PltS95% do barramento do sistema de distribuição e o valor do PltS95% do barramento da tensão secundária de baixa tensão de distribuição eletricamente mais próximo [30]. Neste estudo, como as medições foram feitas em barramentos de baixa tensão ($< 69 \text{ kV}$), esse fator é considerado 1.

Na figura 3.38, os valores do indicador severidade de *flicker* de curta duração calculados com base nos resultados de medição (médio, máximo percentil diário 95% e percentil semanal 95%), nos onze pontos de medição em baixa tensão, foram inferiores ao valor de referência de 1 pu, mais precisamente, todos esses ficaram abaixo de 0,39 pu. Já os valores máximos de Pst ultrapassaram o valor de referência em todos os pontos, porém, estes estão associados a eventos de variações de tensão de curta duração e não a flutuações de tensão propriamente ditas.

O ponto que apresentou maior percentil diário 95% (PstD95%) foi o Ponto 8, que possui os seguintes blocos como carga 1H, 1I, 1S, 1U, 1W, 1Y, 3E e 3M.

Neste estudo não se teve acesso aos valores do indicador severidade de *flicker* de curta duração dos Pontos 6 e 11.

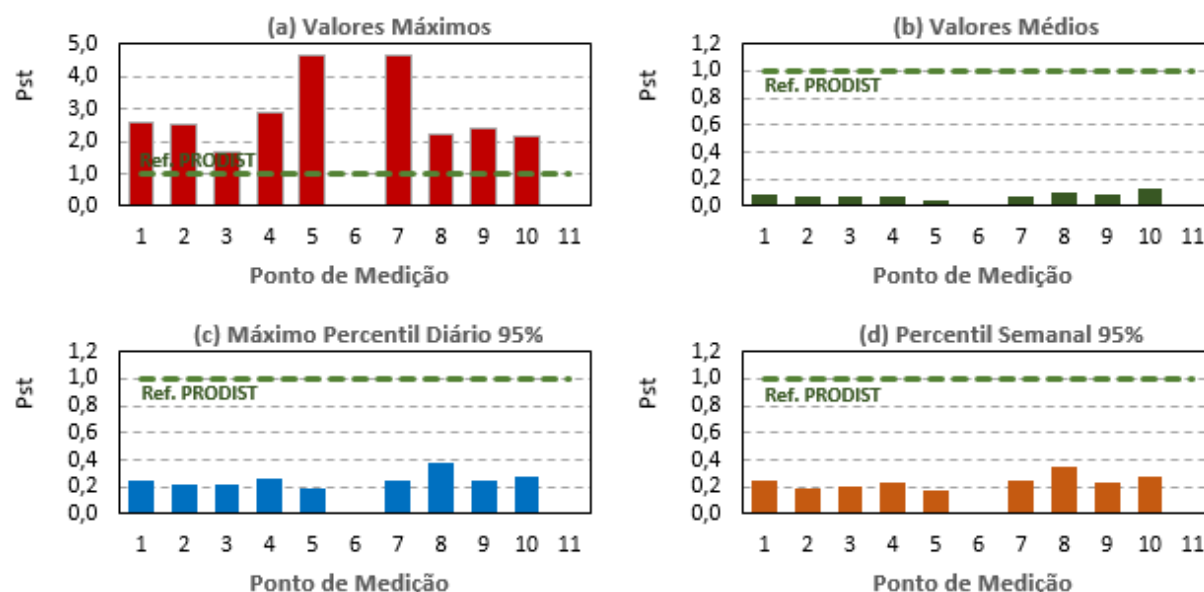


Figura 3.38 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para cada ponto de medição em relação à severidade de flicker de curta duração dos Pontos 1 ao 11, exceto Pontos 6 e 11.

O comportamento semanal do indicador severidade de flicker de curta duração em cada ponto de medição, do Ponto 1 ao 11, pode ser visualizado nas figuras 3.39 e 3.40.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

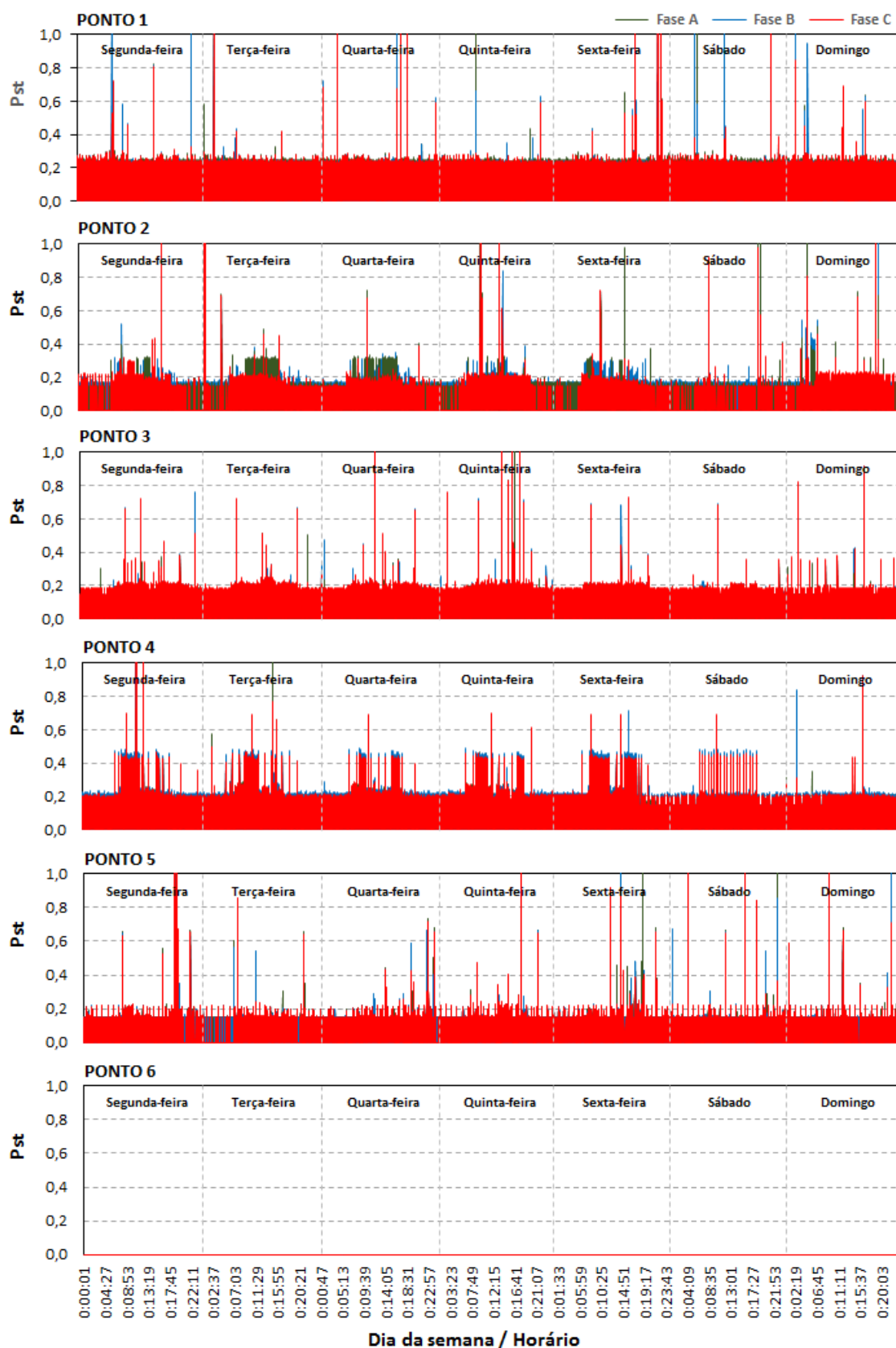


Figura 3.39 – Comportamento semanal da severidade de flicker de curta duração em cada ponto de medição dos Pontos 1 ao 6.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

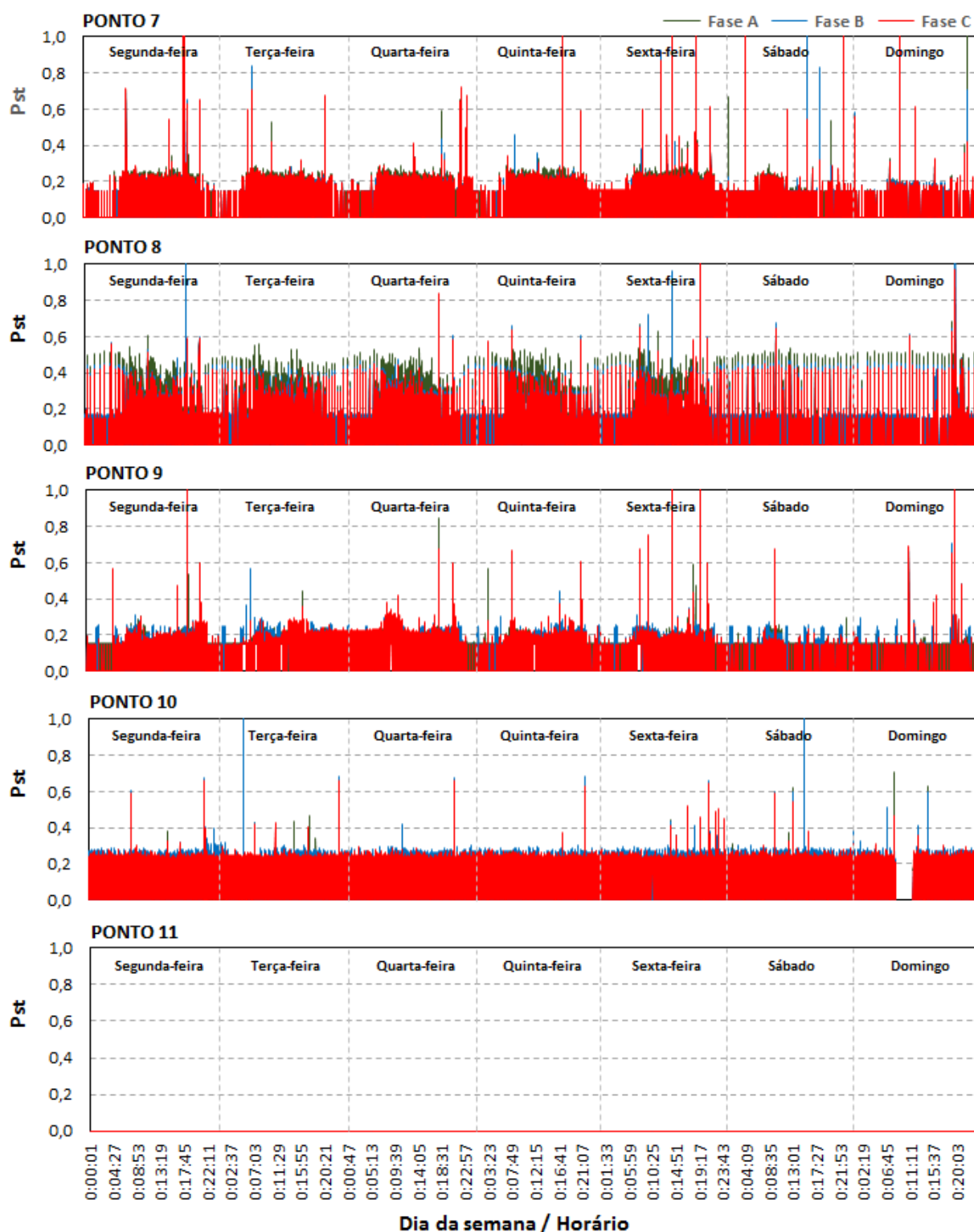


Figura 3.40 – Comportamento semanal da severidade de flicker de curta duração em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11.

Já os valores do indicador severidade de *flicker* de longa duração calculados com base nos resultados de medição (médio, máximo percentil diário 95% e percentil semanal 95%), nos onze pontos de medição em baixa tensão, foram inferiores ao valor de referência de 0,8 pu, mais precisamente, todos esses ficaram abaixo de 0,33 pu, como mostrado na figura 3.41. No entanto, esse valor de referência foi ultrapassado pelos registros máximos nos Pontos 1, 2, 4, 5, 7, 8, 9 e 10, os quais estão associados a eventos de variações de tensão de curta duração e não a flutuações de tensão propriamente ditas.

O ponto que apresentou maior percentil semanal 95% (PltS95%) foi o Ponto 8, o que já era esperado, por este ponto também ter apresentado o maior percentil diário 95% de Pst (PstD95%).

Neste estudo também não se teve acesso aos valores do indicador severidade de *flicker* de longa duração dos Pontos 6 e 11.

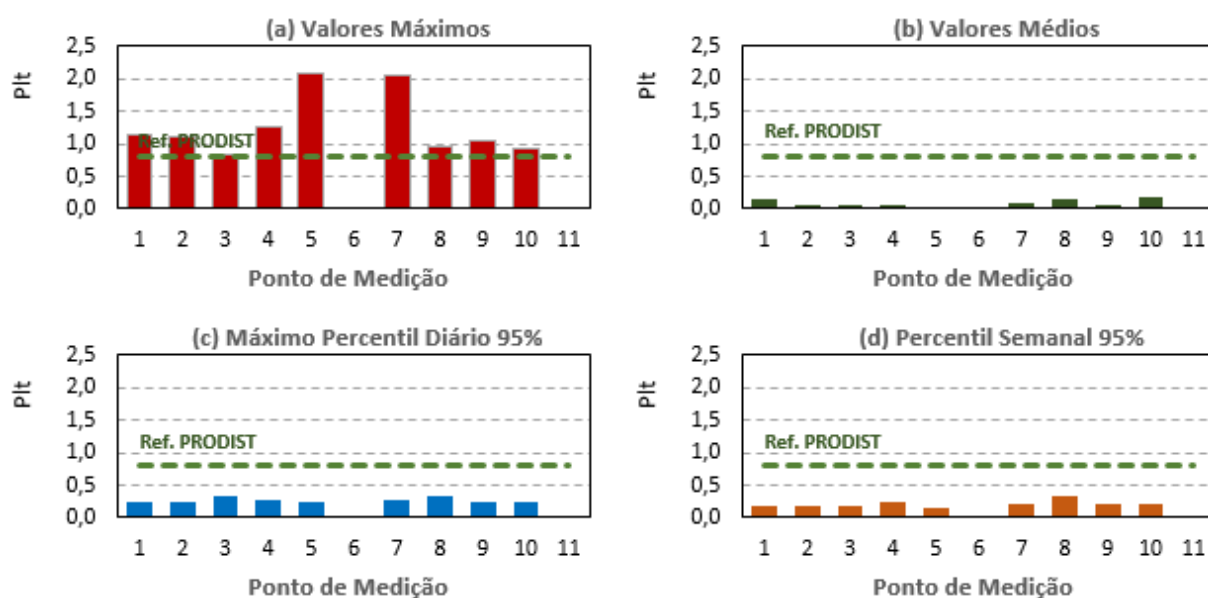


Figura 3.41 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para cada ponto de medição em relação à severidade de flicker de longa duração dos Pontos 1 ao 11, exceto Pontos 6 e 11.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

O comportamento semanal do indicador severidade de *flicker* de longa duração em cada ponto de medição, do Ponto 1 ao 11, pode ser visualizado nas figuras 3.42 e 3.43.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

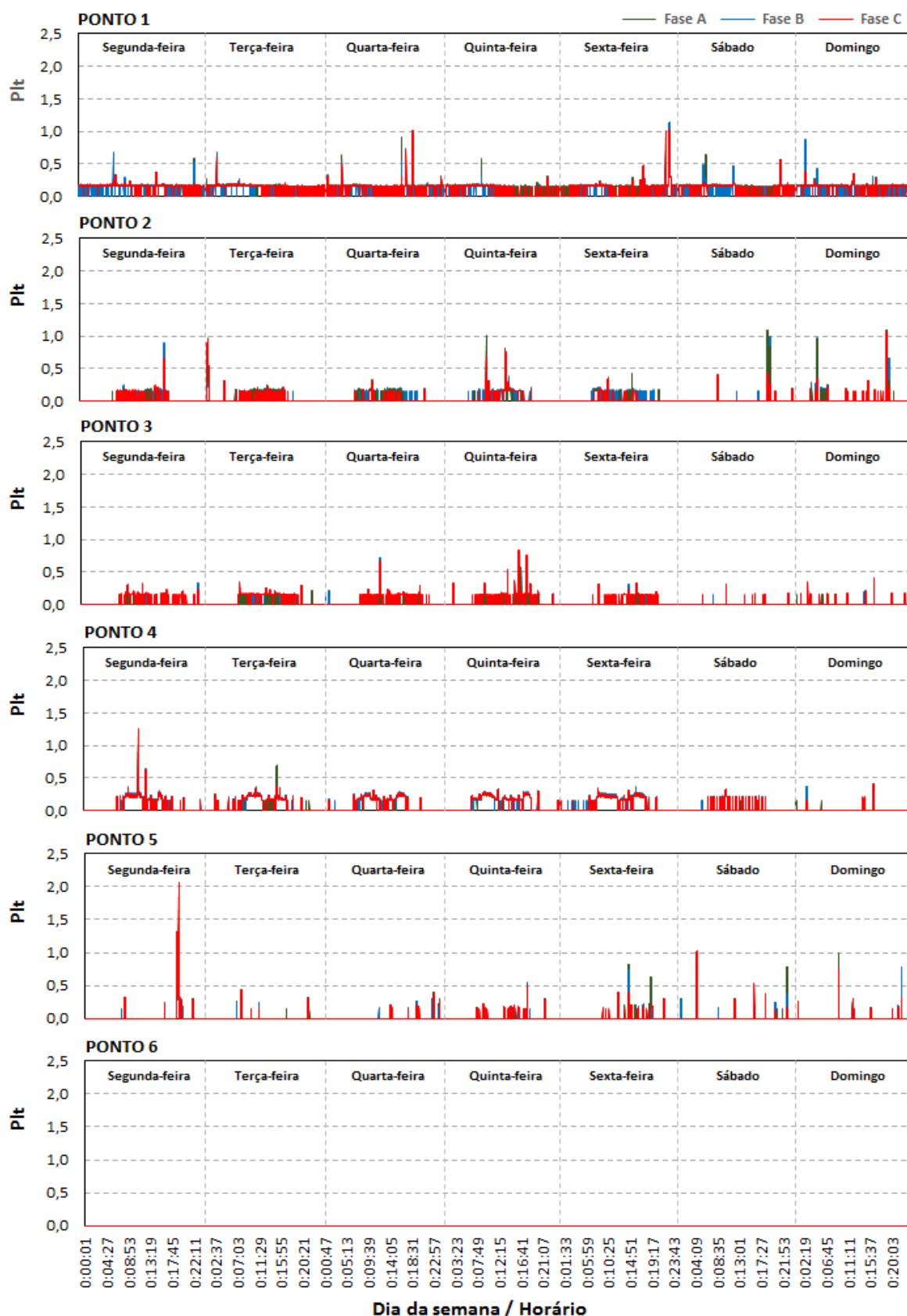


Figura 3.42 – Comportamento semanal da severidade de flicker de longa duração em cada ponto de medição dos Pontos 1 ao 6.

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

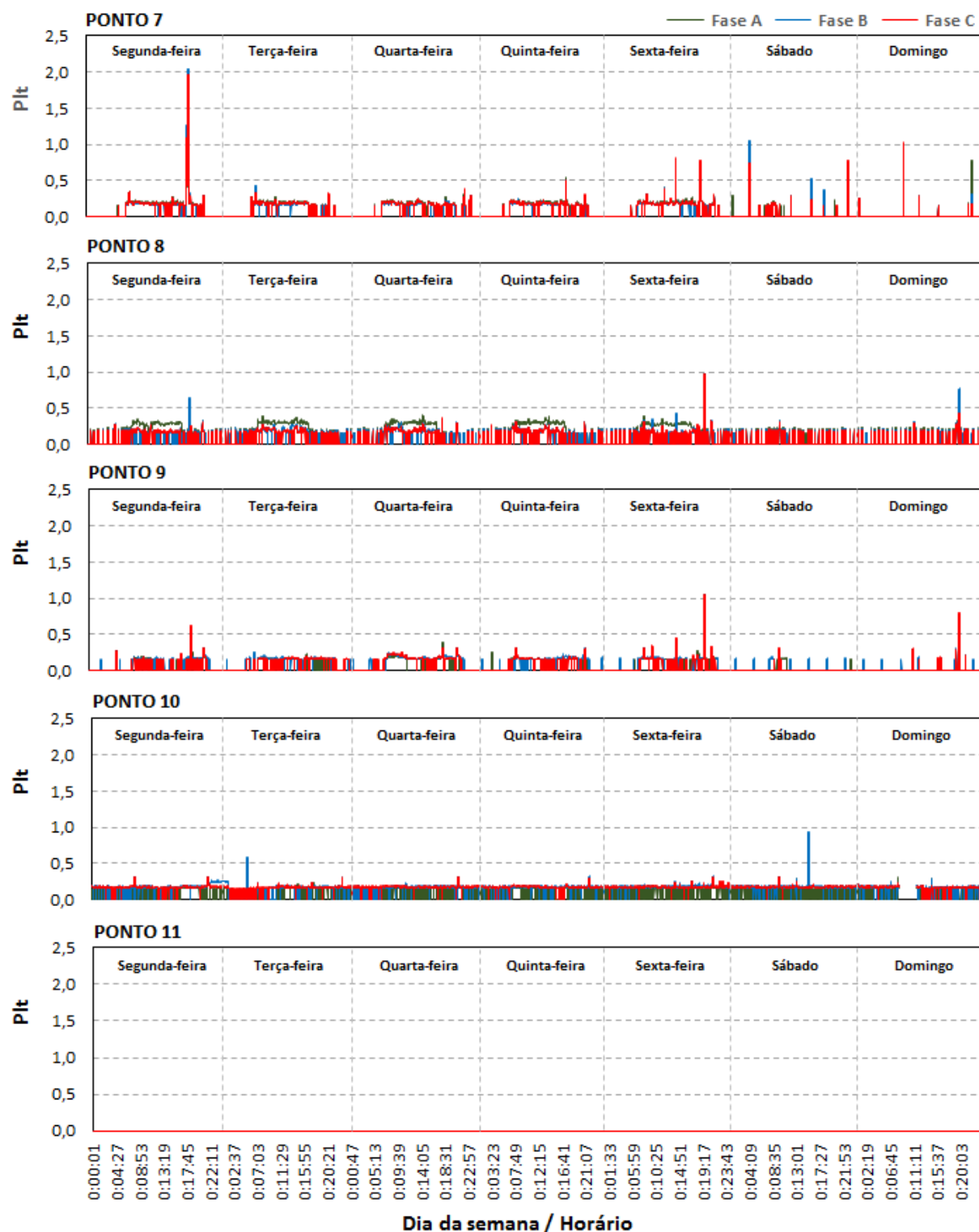


Figura 3.43 – Comportamento semanal da severidade de flicker de longa duração em cada ponto de medição dos Pontos 7 ao 11.

A avaliação das flutuações de tensão nos Pontos 1 ao 11 encerra o diagnóstico em relação à qualidade da energia elétrica dos pontos de medição localizados nos barramentos de baixa tensão dos transformadores. Tal diagnóstico foi realizado também na cabine de entrada do campus e será mostrado no capítulo subsequente.

3.7 – Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados os gráficos contendo os valores estatísticos calculados e os perfis de grandezas elétricas e indicadores usados para avaliação dos fenômenos associados à qualidade da energia elétrica e medidos nos barramentos de baixa tensão dos onze transformadores que compõem o sistema elétrico desta universidade, que comparados aos valores de referência recomendados por órgãos que regulam o setor elétrico, permitiram diagnosticar de forma distribuída este sistema.

Conforme dito no início deste capítulo, apesar da variação de corrente em regime permanente não ser um indicador da qualidade da energia elétrica, esta grandeza foi avaliada e seu comportamento está relacionado ao tipo e ao horário das atividades desenvolvidas nos blocos que cada transformador atende.

No que se refere aos níveis de tensão, observados nos onze pontos de medição na baixa tensão, verificou-se que os mesmos apresentaram variações em seus valores eficazes dentro dos limites considerados como adequados pelo Prodist da ANEEL [30]. Ressalta-se que as curvas de variação da tensão em regime permanente apresentaram um comportamento inverso ao comportamento de suas correntes em regime permanente, ou seja, nos momentos em que a corrente de carga era maior, foram registrados menores valores de tensão.

No que tange à distorção harmônica total de corrente, a maior distorção ocorreu no ponto onde encontra-se a menor corrente de regime permanente e no

ponto onde atende-se laboratórios de soldagem. Em análise à distorção harmônica individual de corrente, as harmônicas que apresentaram valores mais significativos foram a terceira e a quinta, o que era esperado, pois algumas referências com estudos em instalações que desenvolvem atividades e/ou possuem cargas predominantes iguais às atividades executadas e às cargas existentes neste campus acadêmico, apresentaram estes resultados.

Em relação aos níveis de distorções harmônicas totais de tensão manifestados nos pontos monitorados, verificou-se que os valores estavam dentro do limite admissível e recomendado pelo Prodist [30] que é de 10%, mais precisamente, seus valores estatísticos foram abaixo de 5%. A distorção harmônica total de tensão dos pontos de medição foi maior no ponto onde a distorção harmônica total de corrente foi maior. As ordens harmônicas que apresentaram valores mais significativos foram a quinta e a sétima. Todavia, os valores estatísticos em todos os pontos da distorção harmônica individual de tensão de quinta ordem ficaram abaixo de 3 % (limite de 7,5%) e de sétima ordem, abaixo de 2% (limite de 6,5 %).

No que se refere aos níveis de desequilíbrio de tensão observados nos Pontos 1 ao 11, verificou-se que os resultados ficaram abaixo do valor de referência de 3% sugerido pela CENELEC EN50160:1999 [37]. O fator de desequilíbrio de tensão máximo registrado foi de 1,05%.

Por fim, os níveis de flutuações de tensão apresentados nos pontos de medição aqui avaliados, Pst e Plt, em relação à média, ao máximo percentil diário 95% e ao percentil semanal 95%, ficaram abaixo de 0,39 e 0,33 pu, respectivamente, isto é, abaixo dos valores de referência de 1 e 0,8 pu sugeridos pelo Prodist [30]. Porém, ressalta-se que em alguns momentos essas referências foram ultrapassadas pelos valores máximos registrados, os quais estão

CAPITULO III – Análise de Indicadores da Qualidade da Energia Elétrica nas Subestações de Transformação do Campus

associados a eventos de variações de tensão de curta duração e não a flutuações de tensão propriamente ditas.

Portanto, as análises realizadas nesse capítulo são de extrema importância para o diagnóstico e consequentemente implementação de ações corretivas e/ou preventivas para mitigar os efeitos degradantes da qualidade da energia elétrica na instalação elétrica sob estudo.