

CAPÍTULO IV

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

4.1 – Considerações iniciais

No Capítulo III foram apresentadas as medições e avaliações de indicadores da qualidade da energia elétrica em onze pontos localizados nos barramentos de baixa tensão dos transformadores que compõem o sistema elétrico da universidade. Neste capítulo, um estudo similar foi realizado para o ponto de entrega da unidade consumidora em 13.800 V.

As medições neste ponto foram simultâneas às medições na baixa tensão dos onze transformadores, ou seja, as medições 1, 2, 3 e assim por diante no ponto de entrega foram registradas, respectivamente, nos mesmos dias e horários das medições na baixa tensão, Ponto 1, Ponto 2, Ponto 3 e assim por diante.

Assim, este capítulo tem por foco:

- Apresentar os resultados das medições realizadas no ponto de entrega ao longo do tempo, 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;

- Apresentar as recomendações, por parte dos órgãos que regulam o setor elétrico, sobre os limites dos indicadores de qualidade da energia neste ponto.

4.2 – Corrente em regime permanente

Conforme explicado no Capítulo III, apesar da variação de corrente em regime permanente não ser um fenômeno associado à qualidade da energia elétrica, esta grandeza também foi avaliada neste ponto.

Em relação à variação de corrente em regime permanente, os valores estatísticos calculados com base nos resultados de medição (valores máximos e médios, assim como máximos percentis diários 95% e percentis semanais 95%) são apresentados na figura 4.1.

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

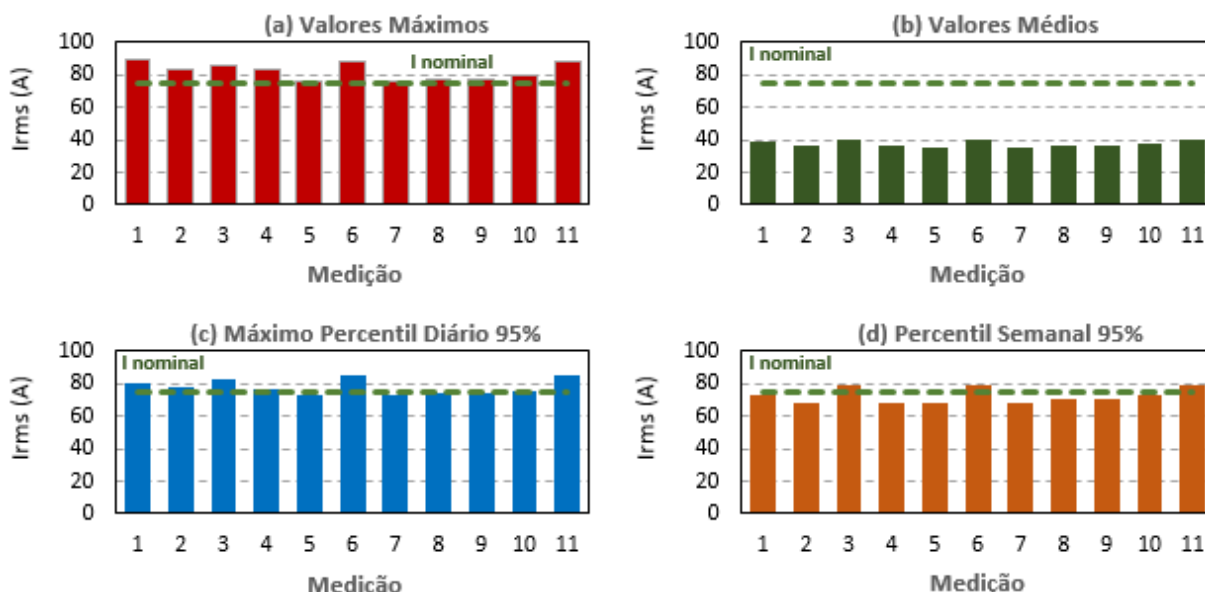


Figura 4.1 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para as medições no ponto de entrada em relação à corrente de fase em regime permanente.

Ao comparar os valores máximos, máximos percentis diários 95% e percentis semanais 95% com os valores médios, devido a diferença entre eles, percebeu-se que há uma variação muito grande na corrente de fase em regime permanente, nos períodos medidos, no ponto de entrega.

Vale ressaltar também que, conforme estudado no Capítulo II, em gestão de faturas, a universidade está ultrapassando a demanda contratada, ou seja, sua corrente está acima da contratada, o que é explicado pelos maiores valores apresentados não apenas no gráfico de valores máximos mas também nos gráficos de valores máximos percentis diários 95% e percentis semanais 95%.

O comportamento da corrente de fase em regime permanente nos dias de semana e de final de semana, em todos os períodos medidos, foi similar à curva de carga típica de uma semana letiva obtida no Capítulo II, em relação à variação e à quantidade de picos registrados durante cada dia, conforme apresentado nas figuras 4.2 e 4.3.

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

Pode-se observar também, em relação ao comportamento semanal da corrente de fase em regime permanente, que em todas as medições foi apresentada uma similaridade nas três fases.

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

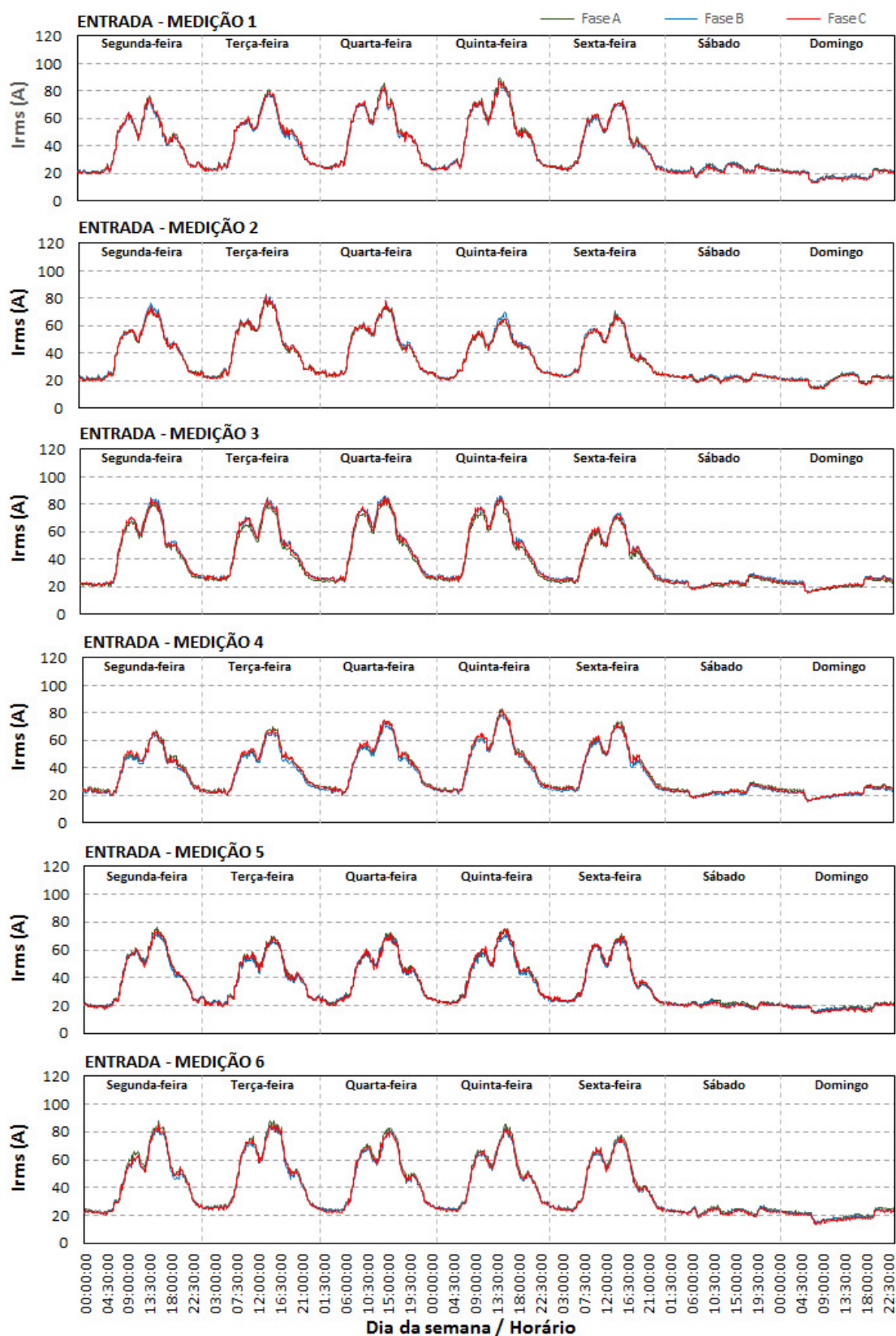


Figura 4.2 – Comportamento semanal da corrente de fase em regime permanente no ponto de entrada para as medições de 1 a 6.

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

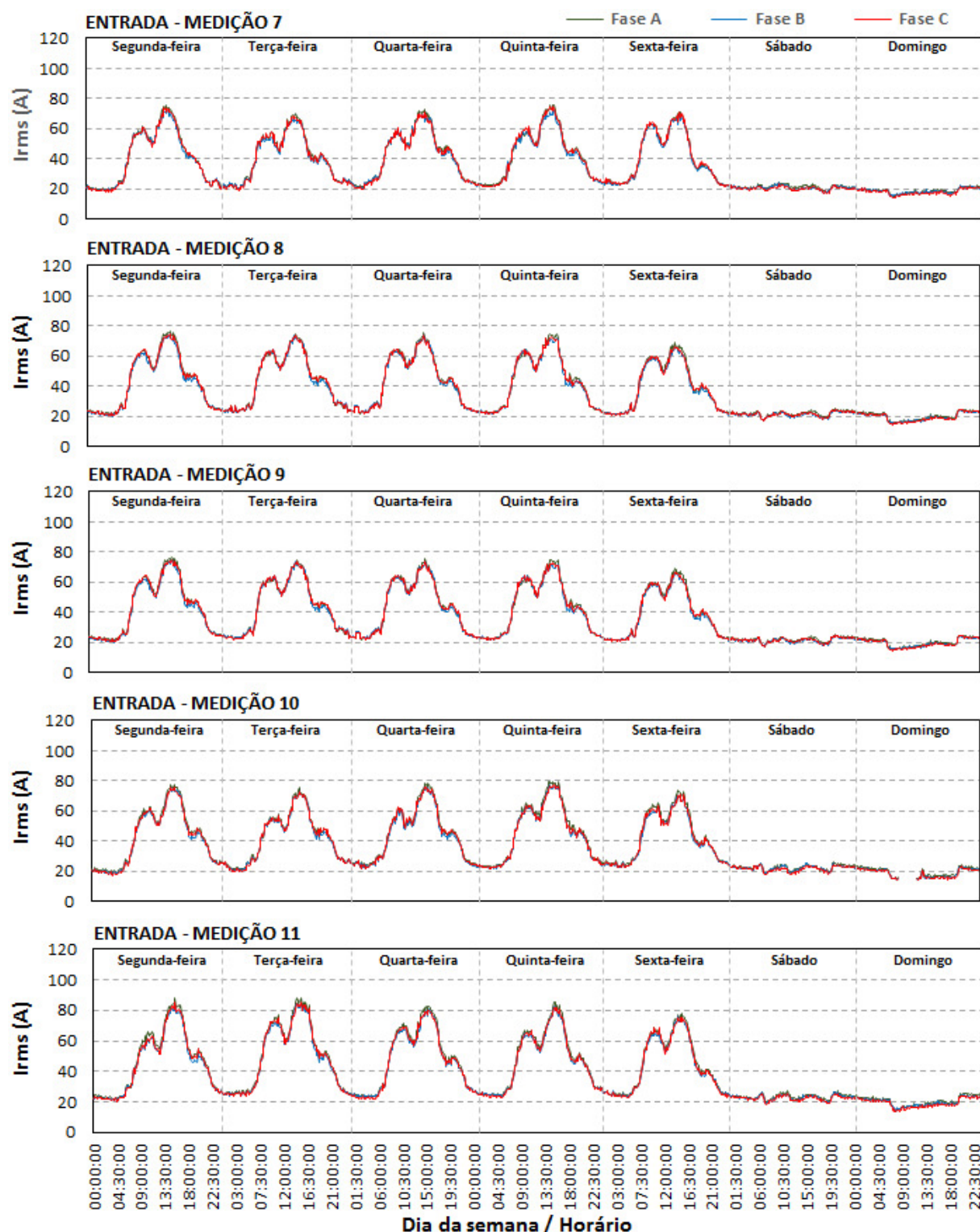


Figura 4.3 – Comportamento semanal da corrente de fase em regime permanente no ponto de entrada para as medições de 7 a 11.

Após a análise dos valores estatísticos calculados e do comportamento obtido, a partir das medições, da corrente de fase em regime permanente no ponto de entrada, tal análise foi realizada também para a tensão.

4.3 – Tensão em regime permanente

O ponto de entrega ou ponto de conexão do sistema elétrico da concessionária com as instalações elétricas da universidade, ou seja, o limite de responsabilidade do atendimento é em 13.800 V.

A tabela 4.1 indica os valores permitidos para as variações de tensão em regime permanente para tensão nominal superior a 1kV e inferior a 69kV segundo o Prodist, da ANEEL [30].

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

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

Conforme indicado na tabela 4.1, a tensão medida é considerada adequada, para tensão fase-fase nominal 13.800 V, se estiver entre os valores 12.834 e 14.490 V.

Na figura 4.4, pode-se observar que todos os valores estatísticos calculados com base nos resultados de medição (valores máximos, médios e mínimos, assim como os máximos percentis diários 95% e os percentis semanais 95%) dos registros de tensão fase-fase em regime permanente no ponto de entrega estão dentro da faixa de valores considerados adequados por esse documento.

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

Para efeito de avaliação dos níveis de tensão em regime permanente no ponto de entrada do campus, apesar da utilização dos limites absolutos de tensão indicados no Módulo 8 do Prodist, conforme tabela 4.1, 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.

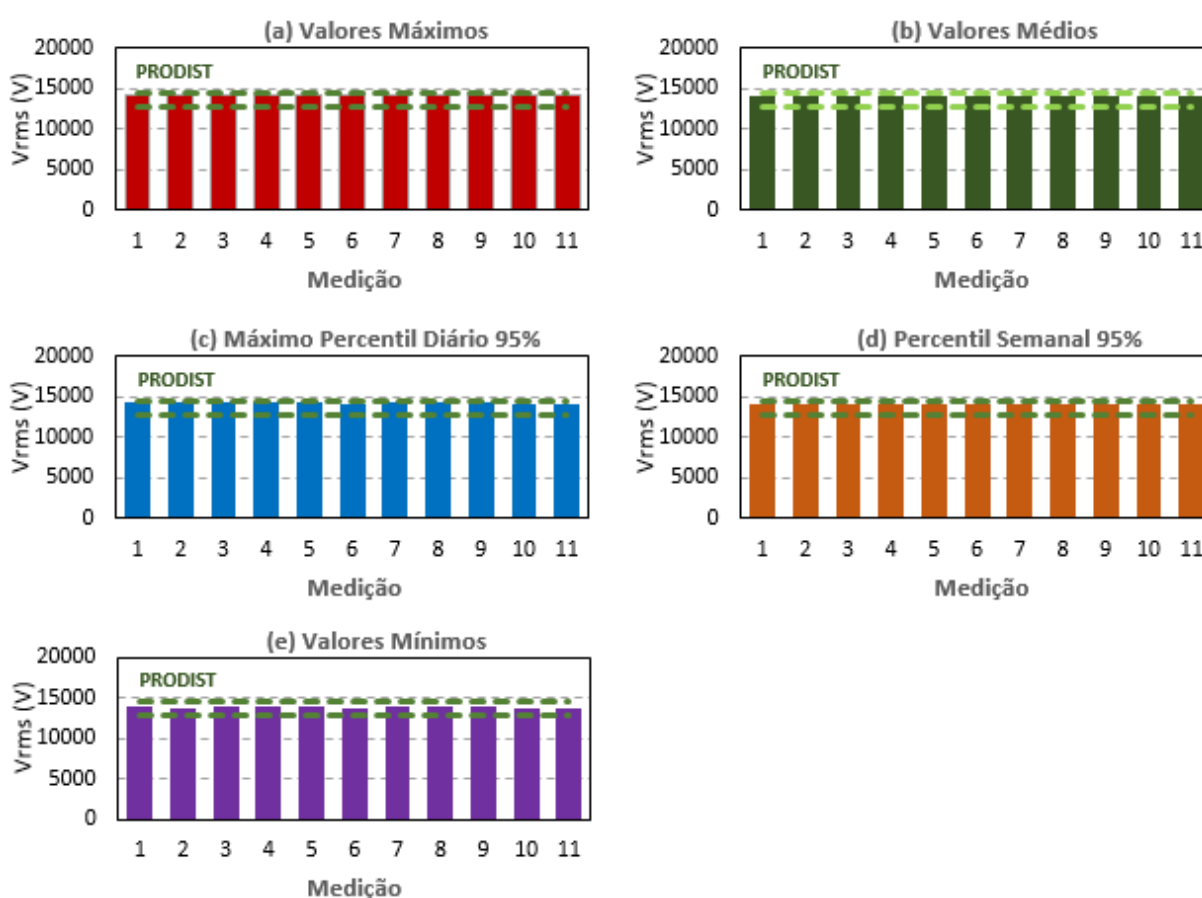


Figura 4.4 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para as medições no ponto de entrada em relação à tensão fase-fase de regime permanente.

O comportamento semanal da tensão fase-fase em regime permanente no ponto de entrega em todos os períodos de medição pode ser visualizado nas figuras 4.5 e 4.6.

Como ocorrido nas medições dos pontos em baixa tensão, as curvas de tensão em regime permanente no ponto de entrega apresentaram um comportamento semelhante ao longo do dia e ao longo da semana e inverso ao comportamento de suas correntes em regime permanente.

Nos dias de semana, o valor eficaz da tensão fase-fase apresentou valores mais baixos nos períodos da manhã e da tarde e apresentou valores mais altos no período noturno. Já o valor eficaz dessa grandeza, no final de semana, é próximo ao valor eficaz dela no período noturno dos dias de semana.

Pode-se observar também que, em relação ao comportamento semanal da tensão fase-fase em regime permanente, em todas as medições, foi apresentada uma similaridade nas três fases.

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

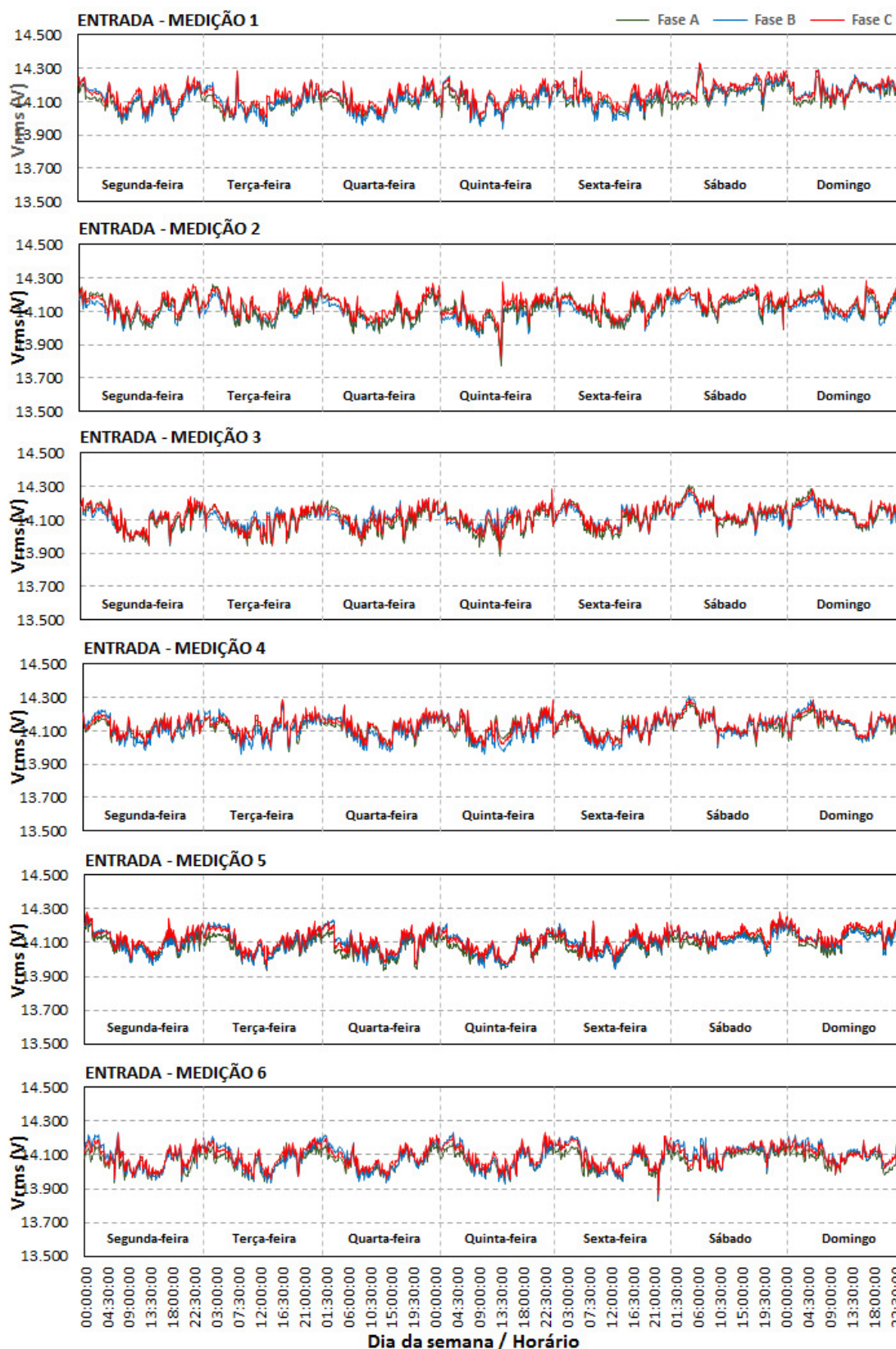


Figura 4.5 – Comportamento semanal da tensão fase-fase em regime permanente no ponto de entrada para as medições de 1 a 6.

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

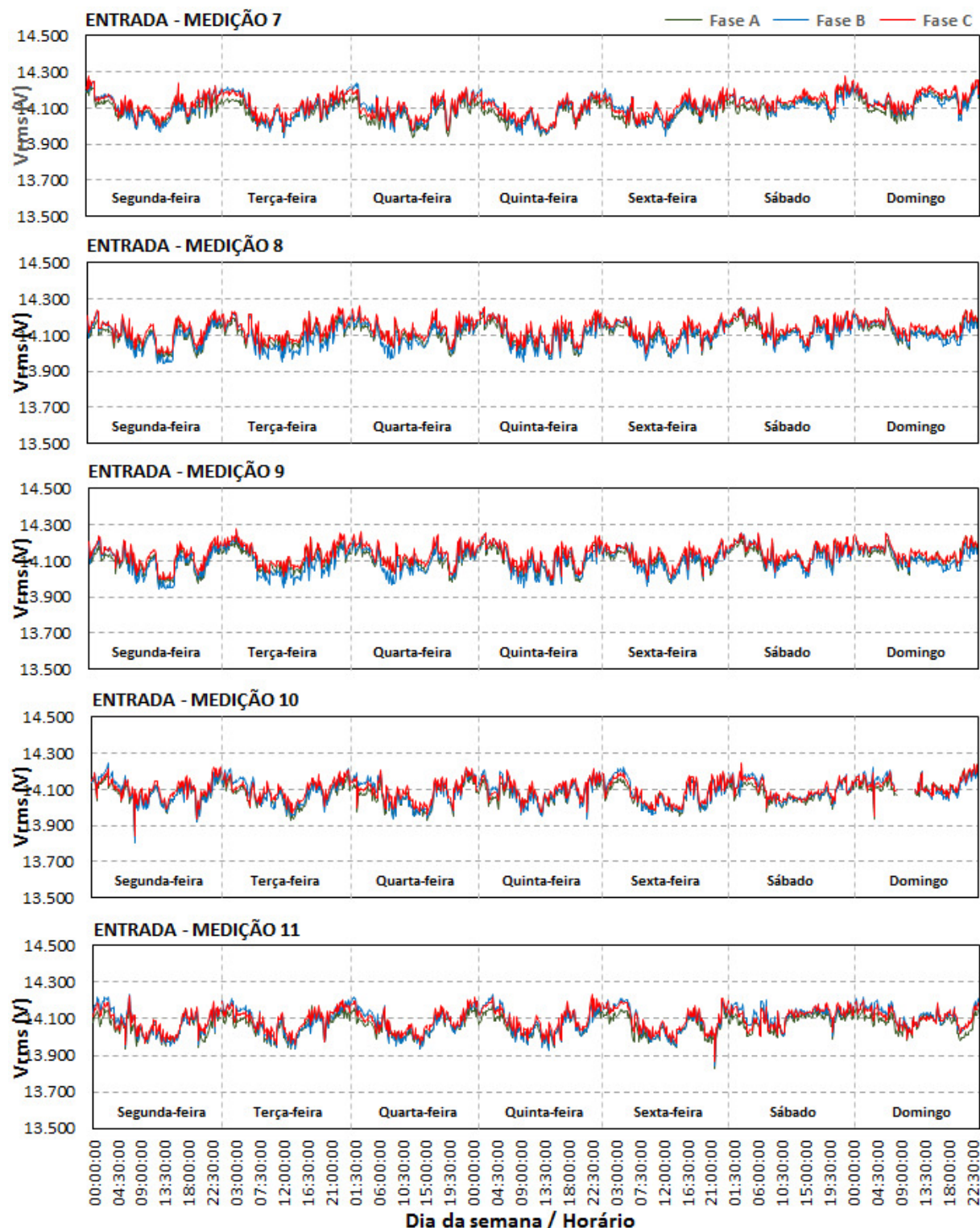


Figura 4.6 – Comportamento semanal da tensão fase-fase em regime permanente no ponto de entrada para as medições de 7 a 11.

Após a análise da variação da corrente e da tensão em regime permanente no ponto de entrada, 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 distúrbios associados à qualidade da energia elétrica.

4.4 – Distorções harmônicas

4.4.1 – Distorções harmônicas de corrente

a) Distorção harmônica total de corrente

Como não existe uma regulamentação nacional indicando valores de referência para a distorção harmônica total de corrente, as figuras 4.7, 4.8 e 4.9 foram apresentadas apenas com o intuito de mostrar valores estatísticos calculados com base nos resultados de medição (valores máximos e médios, assim como os máximos percentis diários 95% e os percentis semanais 95%) e o comportamento semanal da distorção harmônica total de corrente no ponto de entrega.

Pelos valores máximos e médios, percebeu-se que há uma variação da distorção harmônica total de corrente em uma faixa de valores grande no ponto de entrega em todos os períodos de registro.

Em todos os períodos de medição no ponto de entrada, os valores máximos percentis diários 95% ficaram próximos dos valores máximos, cerca de 8%. Apenas na medição 1, o ponto de entrega apresentou um valor maior para a distorção harmônica total de corrente.

Comparando o maior valor dos máximos percentis diários 95% da distorção harmônica total de corrente resultantes das medições no ponto de entrega (9% na medição 1) com este mesmo valor resultante das medições nos

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

pontos de baixa tensão dos transformadores (acima de 50%), é possível afirmar que a ligação delta-estrela contribuiu para bloquear algumas correntes harmônicas de entrarem no lado de 13,8 kV, que são as harmônicas de terceira ordem e suas múltiplas (porém, apenas aquelas de sequência zero), reduzindo assim significativamente distorção harmônica total de corrente no ponto de entrada.

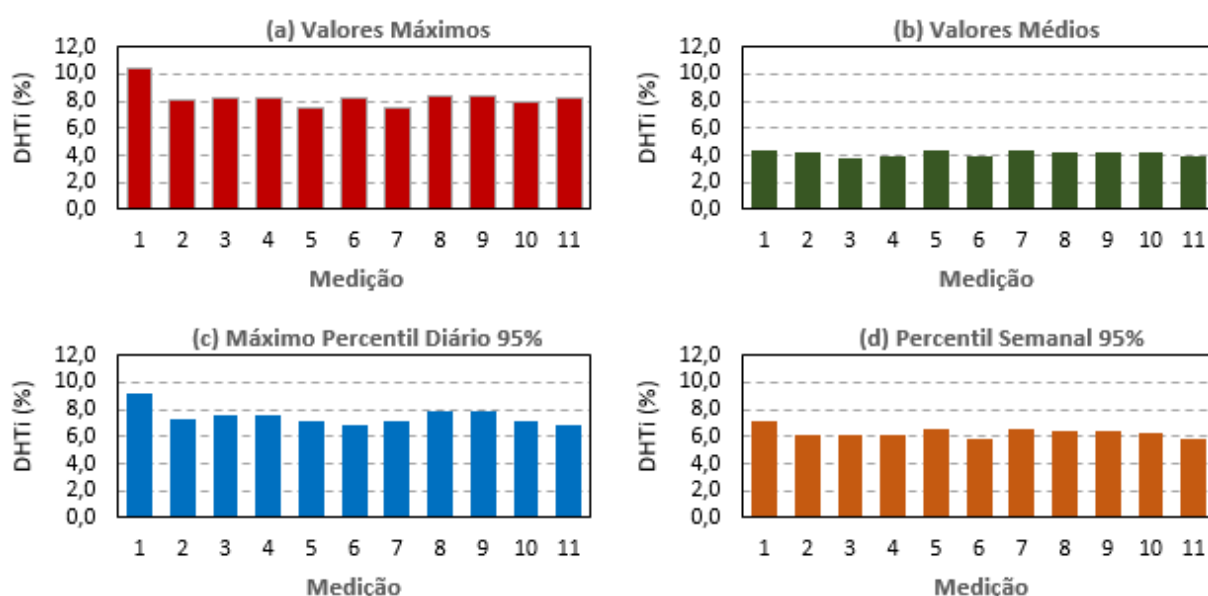


Figura 4.7 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para as medições no ponto de entrada em relação à distorção harmônica total de corrente.

O comportamento semanal da distorção harmônica total de corrente no ponto de entrega, em vários períodos de medição, pode ser visualizado nas figuras 4.8 e 4.9 e foi inverso ao comportamento das curvas de corrente em regime permanente.

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.

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

Pode-se observar também, em relação ao comportamento semanal da distorção harmônica total de corrente, que em todas as medições foi apresentada uma similaridade nas três fases.

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

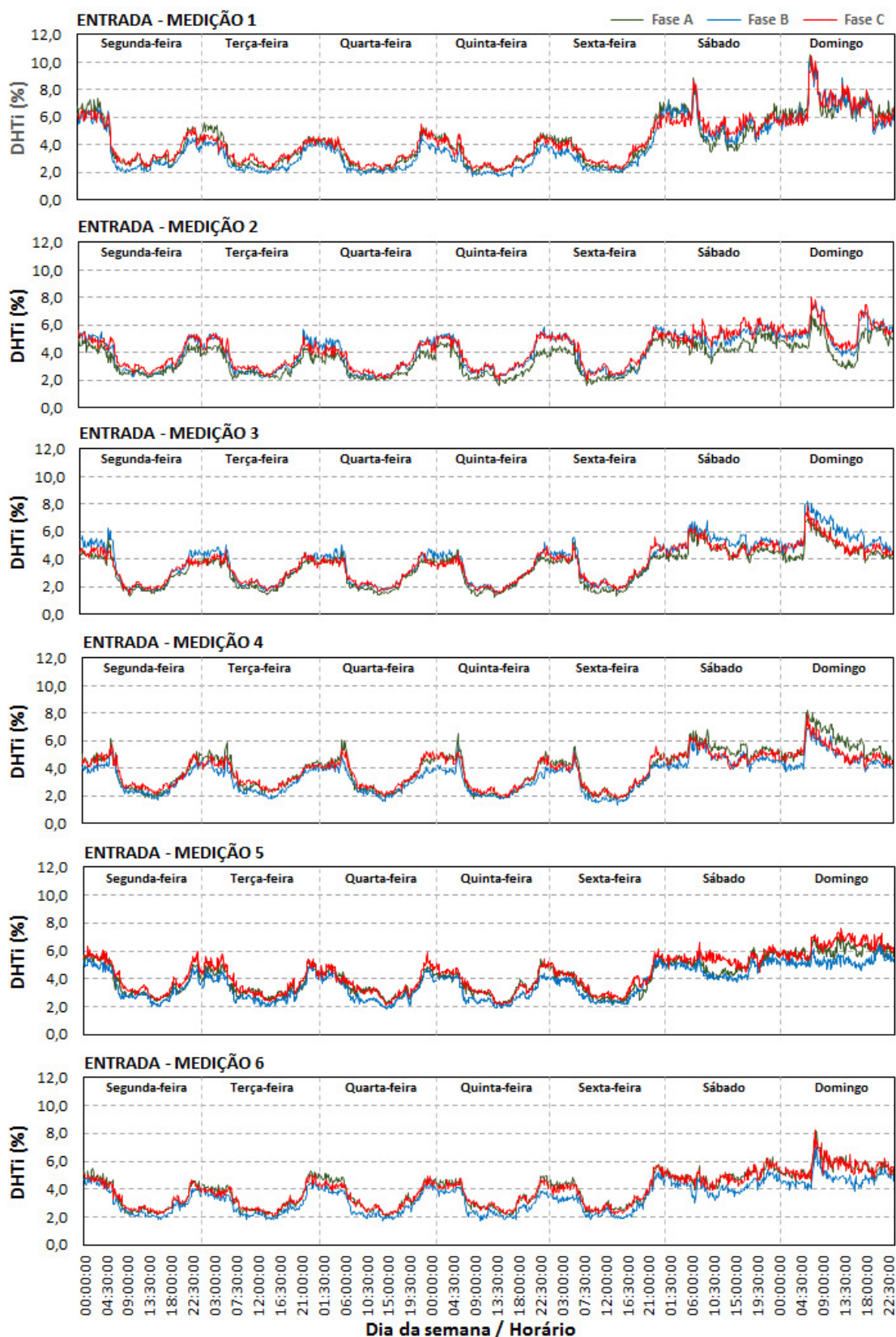


Figura 4.8 – Comportamento semanal da distorção harmônica total de corrente no ponto de entrada para as medições de 1 a 6.

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

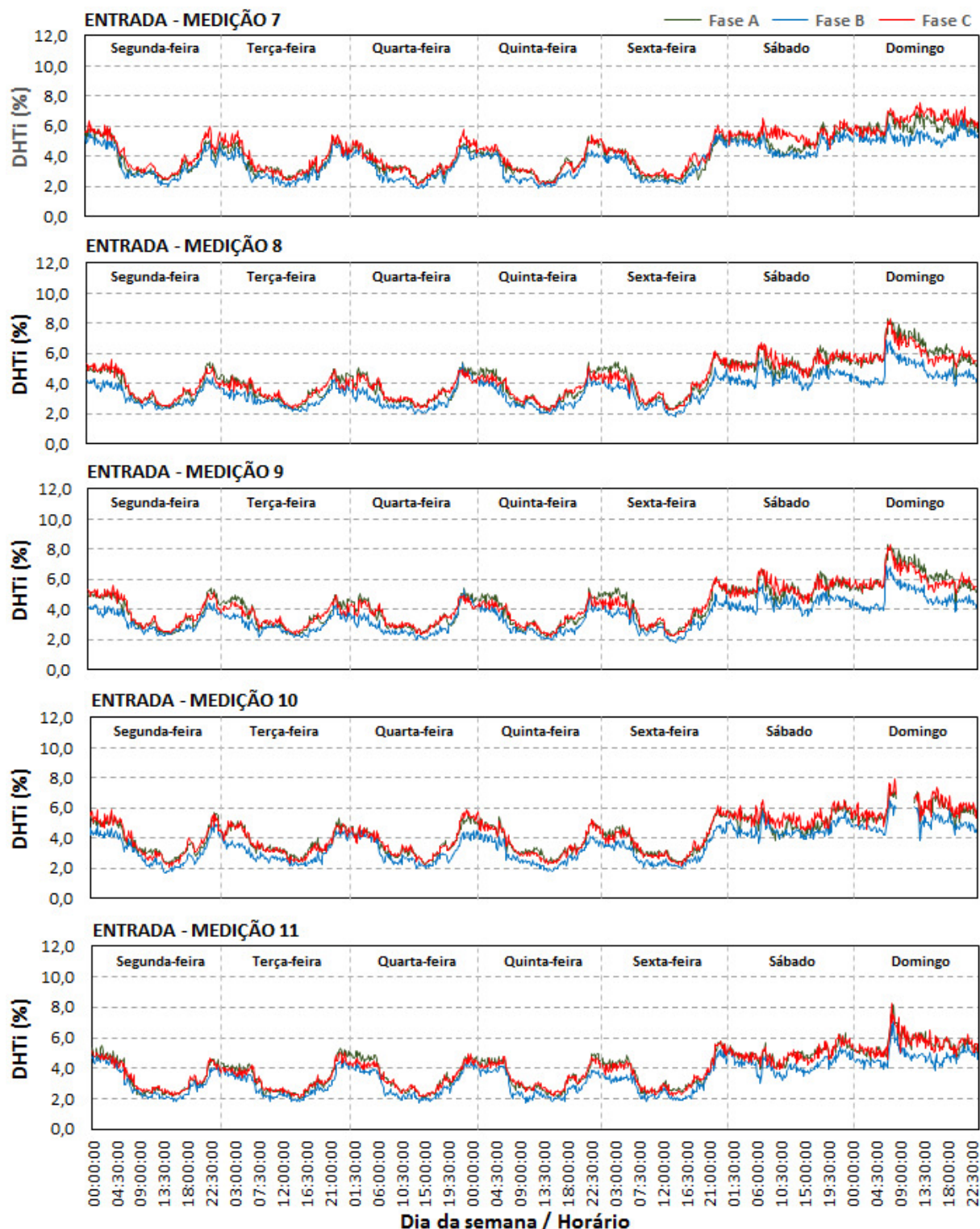


Figura 4.9 – Comportamento semanal da distorção harmônica total de corrente no ponto de entrada para as medições de 7 a 11.

A partir da avaliação do ponto de entrada da 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 neste ponto de conexão com a concessionária de energia elétrica.

b) Espectro harmônico de corrente

Nas medições realizadas no ponto de entrada, foram medidas harmônicas até a vigésima quinta ordem, entretanto, foram representadas em espectro apenas harmônicas até a décima quinta ordem.

A fim de se conhecer a distorção harmônica mais significativa no ponto de entrega, foi apresentado, nas figuras 4.10 e 4.11, um espectro de frequência para as três fases em cada período de medição.

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

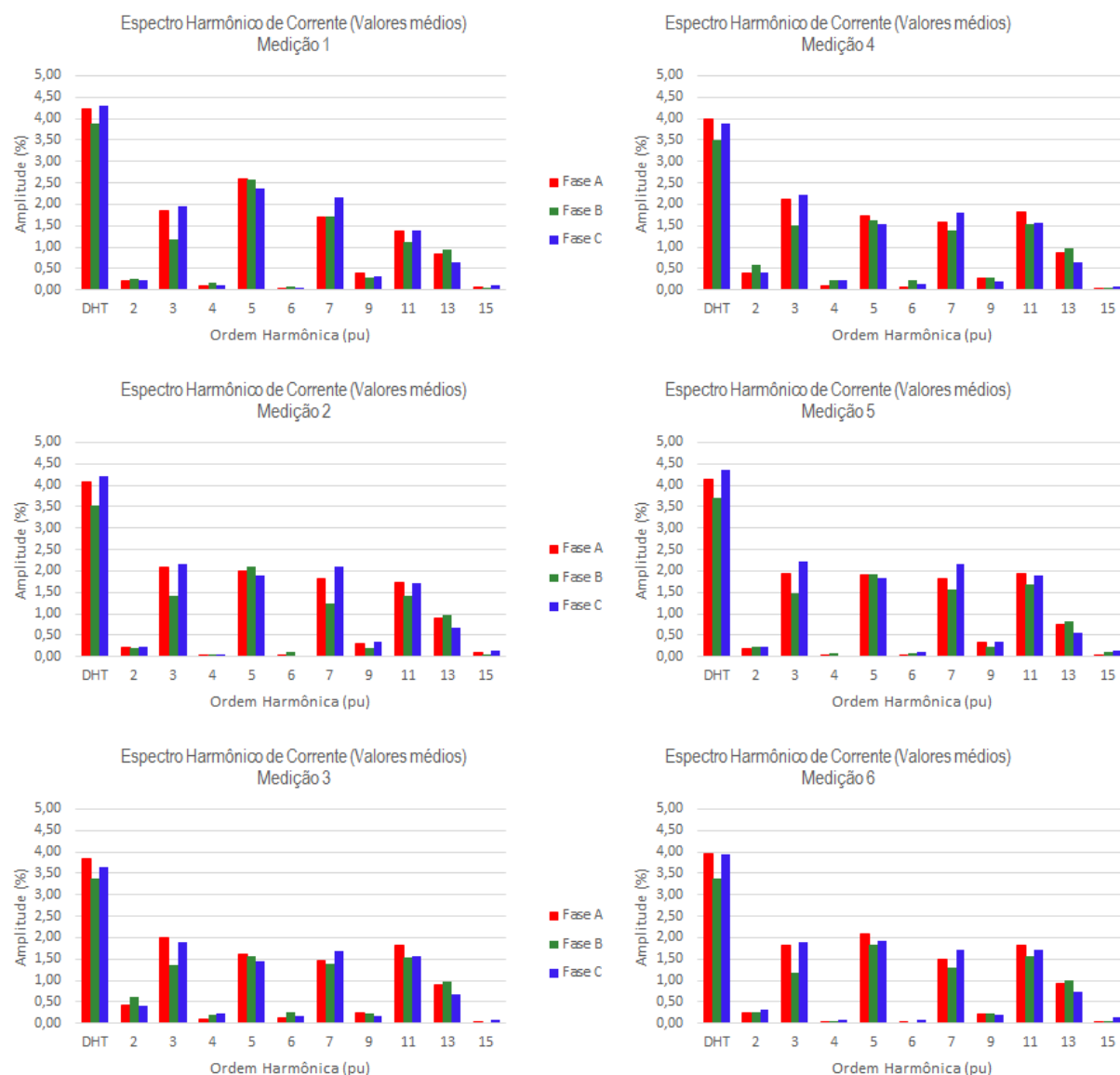


Figura 4.10 – Espectro de frequência da corrente no ponto de entrada para as medições de 1 a 6.

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

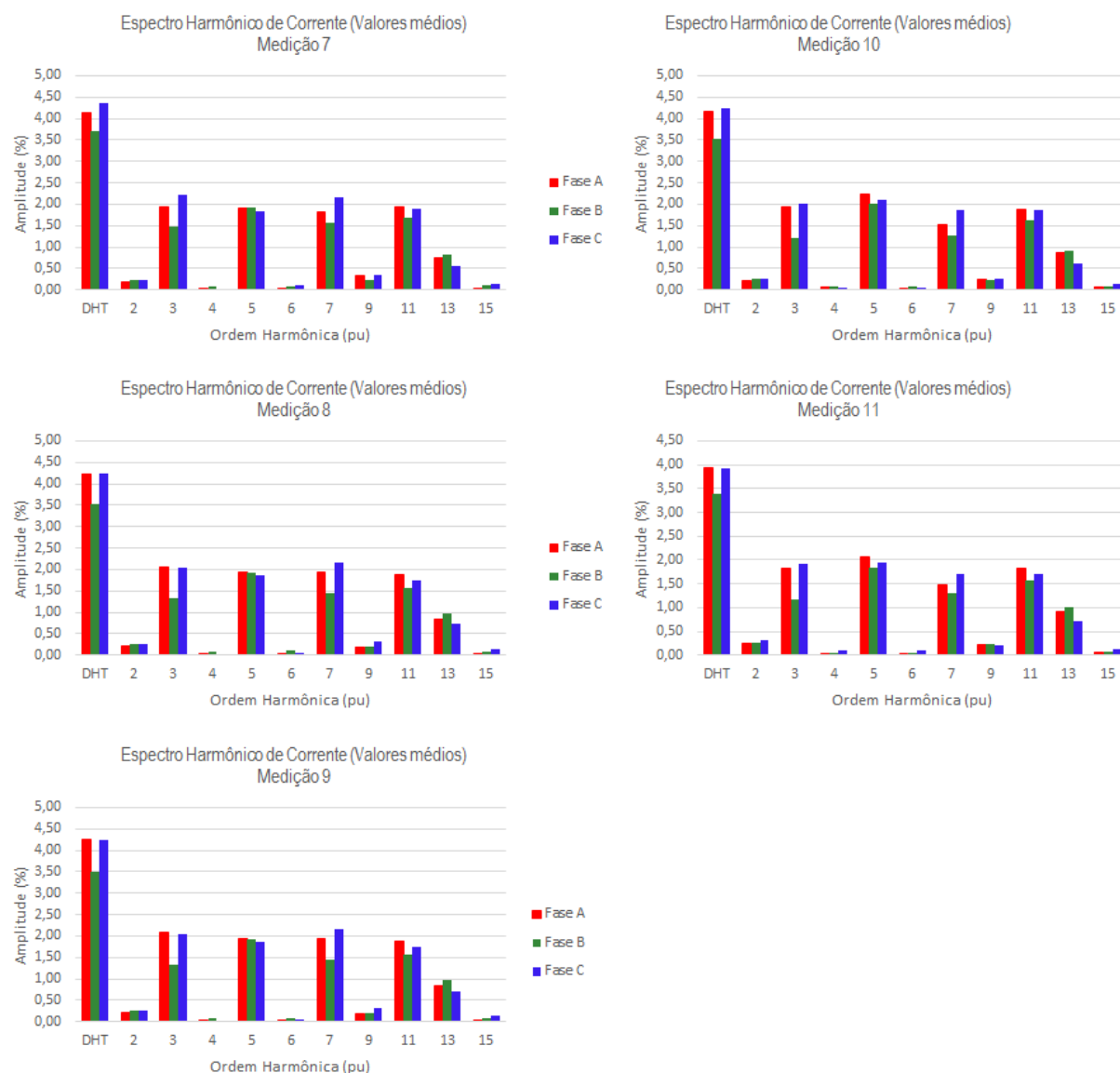


Figura 4.11 – Espectro de frequência da corrente no ponto de entrada para as medições de 7 a 11.

Pela análise dos espectros de frequência, as correntes harmônicas mais significativas no ponto de entrega foram as de ordens 3 e 5, no entanto, as de ordem 7 e 11 apresentaram valores muito próximos a primeiras.

Portanto, fez-se uma análise mais detalhada das distorções harmônicas individuais de corrente de ordem 3 e 5.

c) Distorção harmônica individual de corrente

A distorção harmônica individual de corrente de ordem 3, mais significativa na maioria dos períodos de medição do ponto de entrega, teve seus valores estatísticos calculados com base nos resultados de medição (máximo, médio, máximo percentil diário 95% e percentil semanal 95%) apresentados na figura 4.12.

Como ocorrido na distorção harmônica total de corrente, a distorção harmônica individual de corrente de ordem 3 variou em uma faixa de valores grande, ao observar seus gráficos de valores máximos e médios. Na maioria dos períodos de medição, seus valores máximos ficaram próximos de 5%. Este valor é bem inferior se comparado com o maior valor dos máximos da distorção harmônica individual de corrente de ordem 3, resultante das medições nos pontos de baixa tensão dos transformadores, que é de 50%.

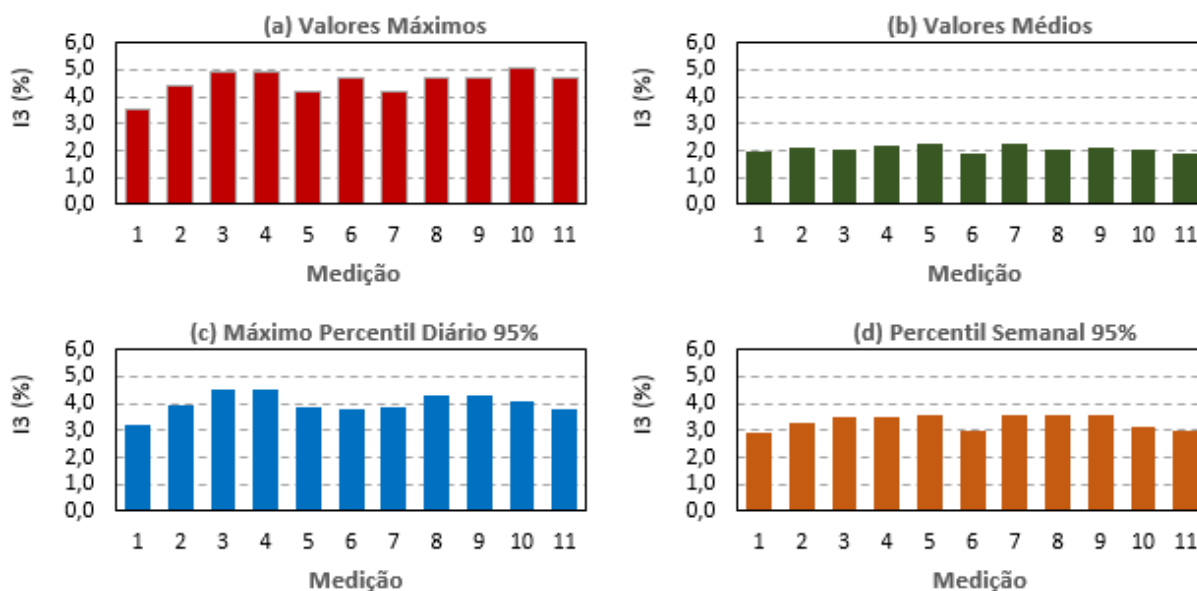


Figura 4.12 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para as medições no ponto de entrada em relação à distorção harmônica individual de corrente de ordem 3.

O comportamento semanal da distorção harmônica individual de corrente de ordem 3 no ponto de entrega, em cada período de medição, pode ser

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

visualizado nas figuras 4.13 e 4.14 e foi similar ao comportamento da distorção harmônica total de corrente.

Observou-se em todos os períodos de medição uma similaridade do perfil da distorção harmônica individual de corrente de ordem 3 nas três fases.

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

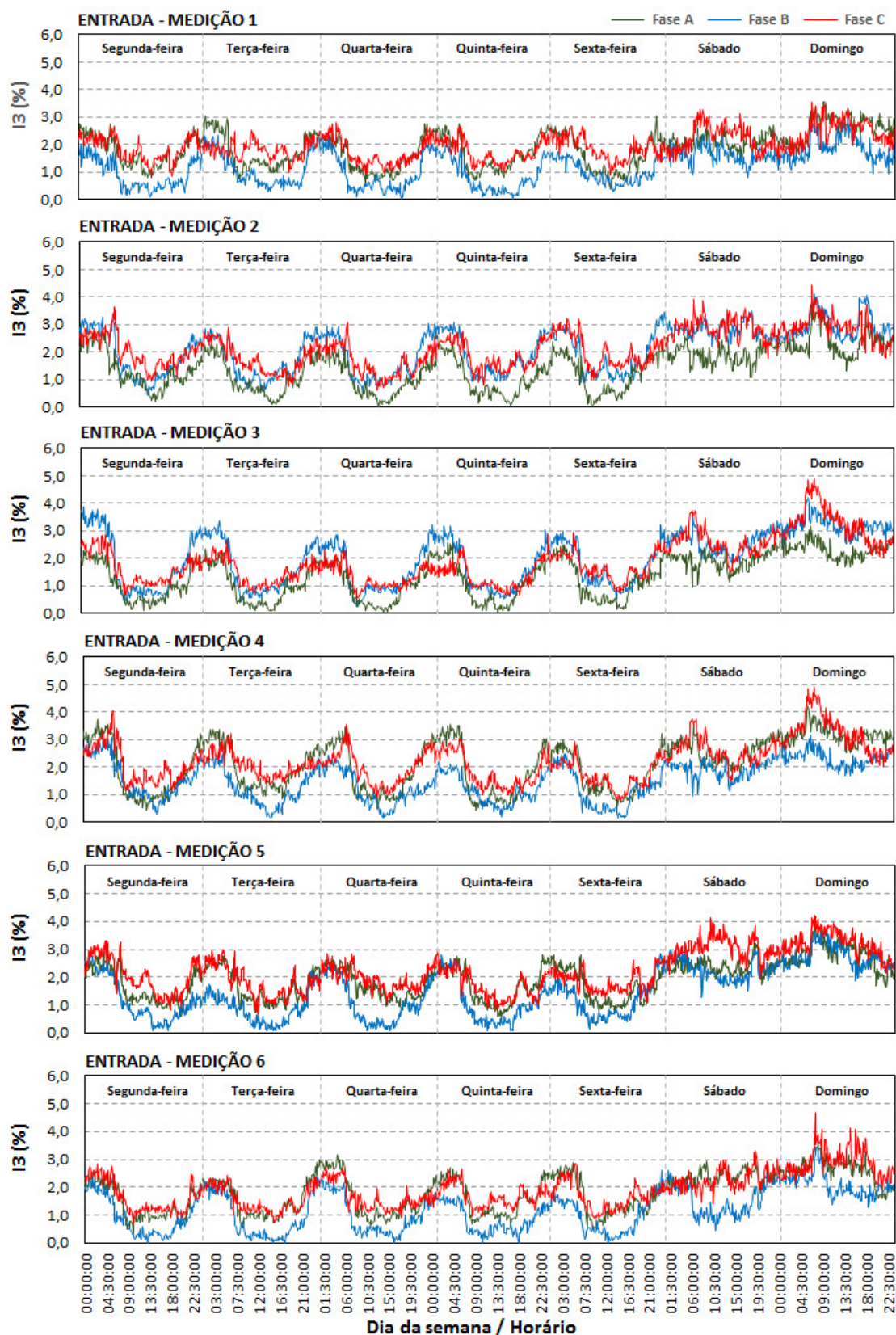


Figura 4.13 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de corrente de ordem 3 no ponto de entrada para as medições de 1 a 6.

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

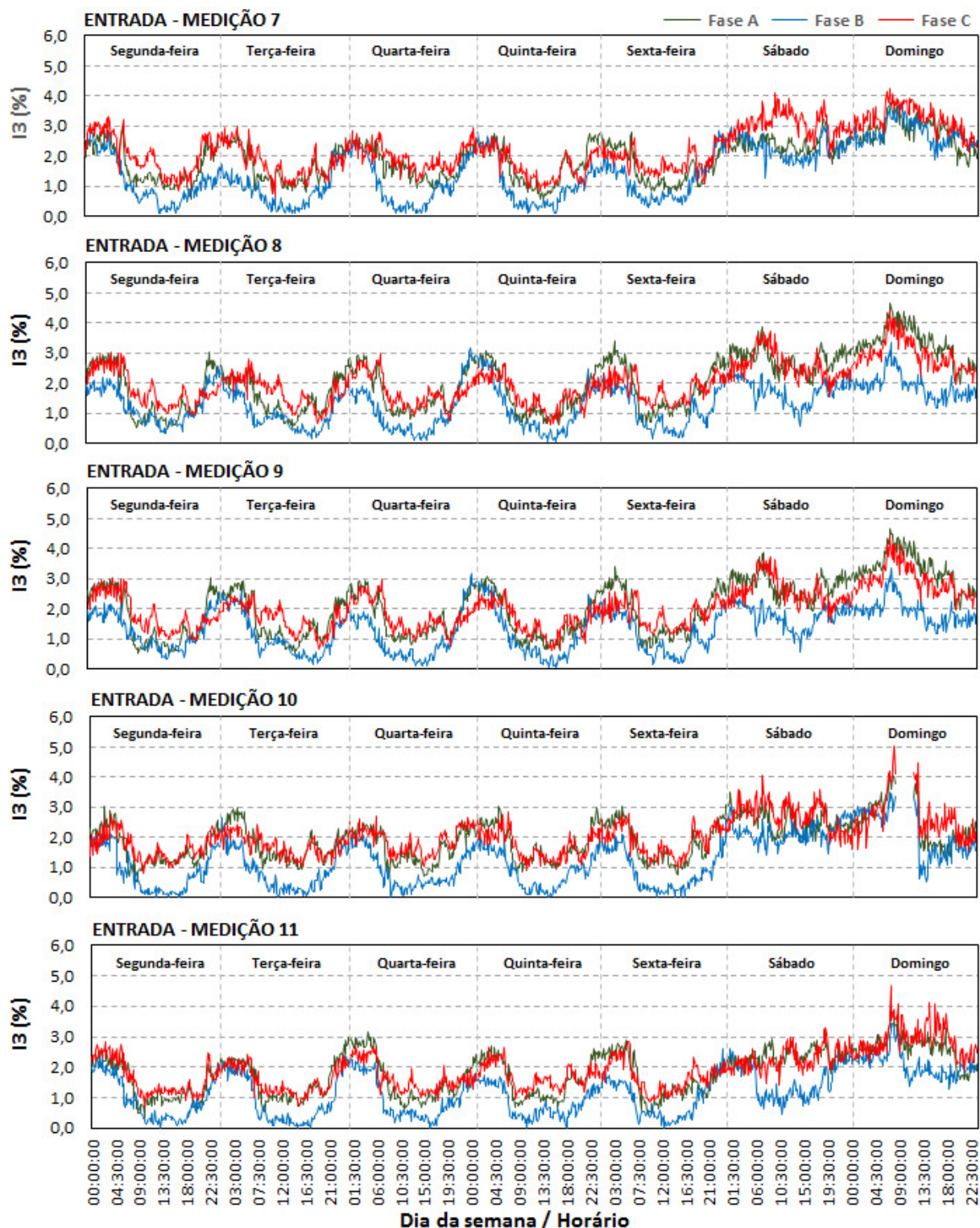


Figura 4.14 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de corrente de ordem 3 no ponto de entrada para as medições de 7 a 11.

No que se refere à distorção harmônica individual de corrente de ordem 5, a figura 4.15 apresenta seus valores estatísticos calculados com base nos resultados de medição (valores máximos e médios, assim como os máximos percentis diários 95% e os percentis semanais 95%) em todos os períodos de medição.

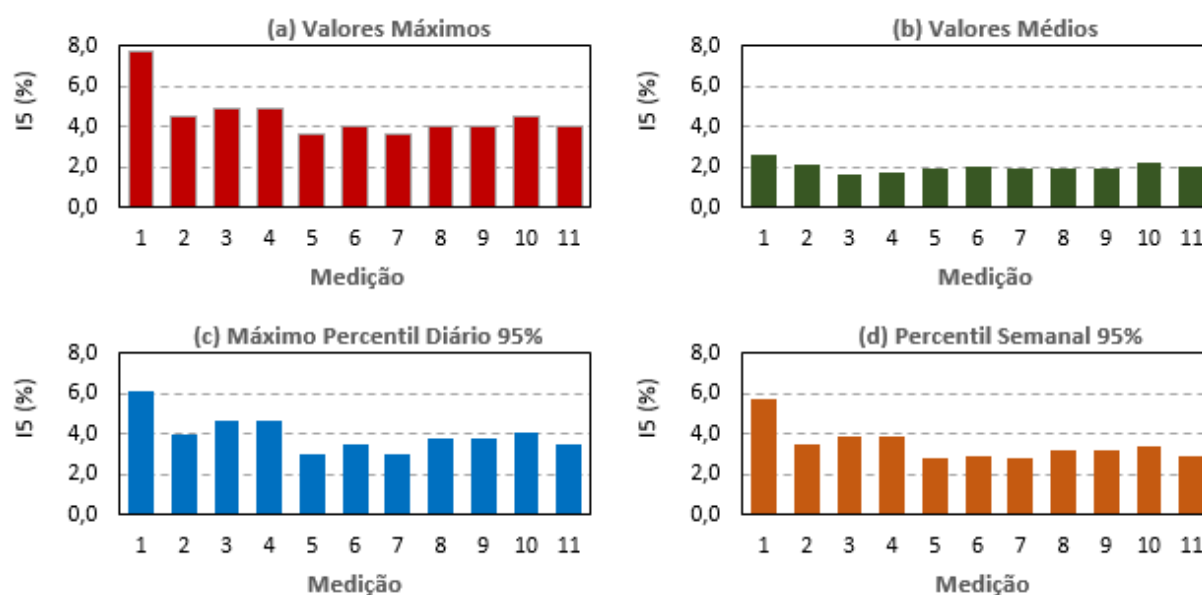


Figura 4.15 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para as medições no ponto de entrada em relação à distorção harmônica individual de corrente de ordem 5.

Como ocorrido na distorção harmônica total de corrente, o período em que o ponto de entrega apresentou maior distorção harmônica individual de corrente de ordem 5 foi na medição 1, com valor máximo próximo de 8% e valor máximo percentil diário 95% próximo de 6%. Nos outros períodos de medição, estes valores apresentaram-se próximos de 4%.

Estes valores são bem inferiores se comparados com o maior valor dos máximos da distorção harmônica individual de corrente de ordem 5, resultantes das medições nos pontos de baixa tensão dos transformadores, que é de 40%.

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

O comportamento semanal da distorção harmônica individual de corrente de ordem 5 no ponto de entrega em cada período de medição pode ser visualizado nas figuras 4.16 e 4.17.

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

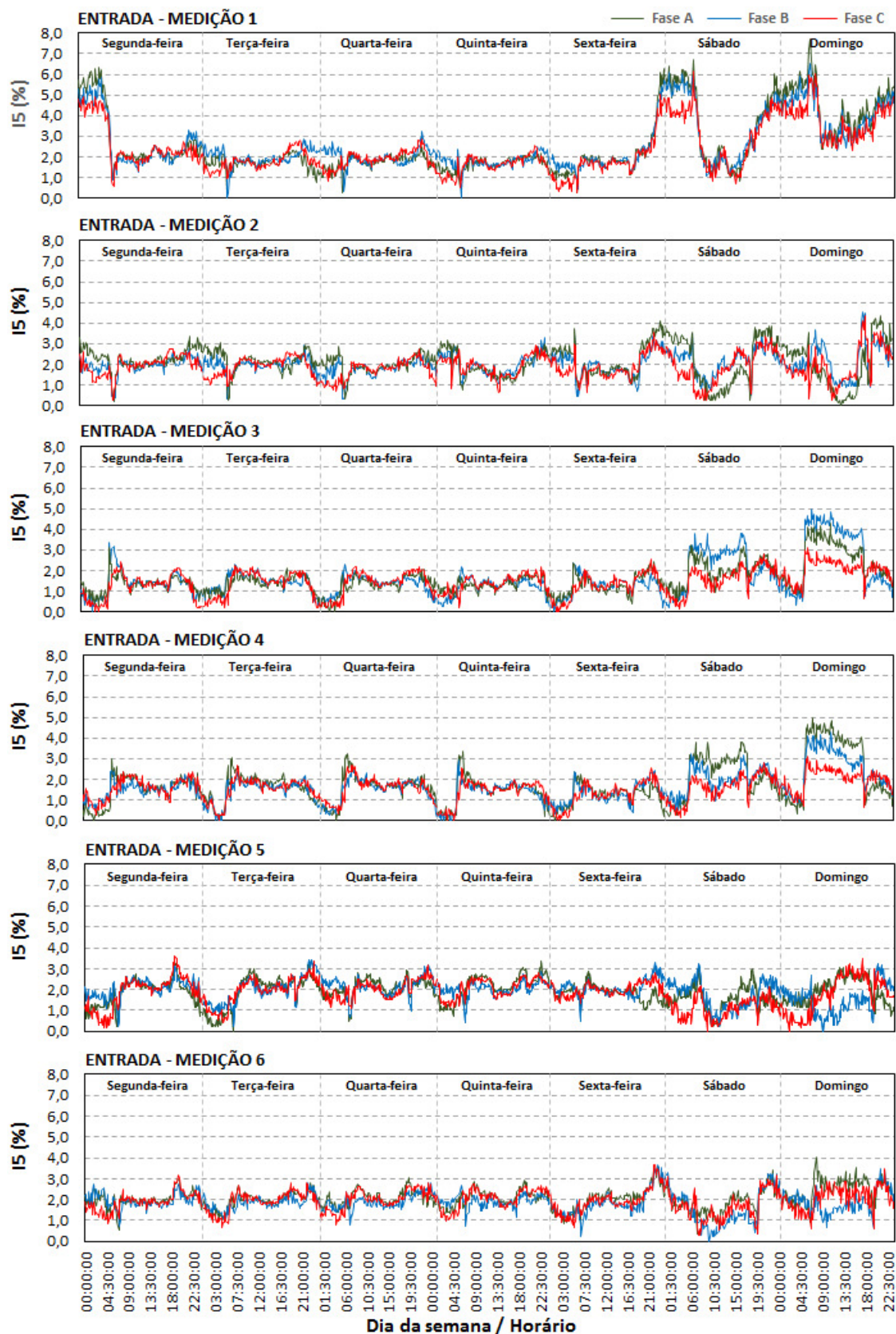


Figura 4.16 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de corrente de ordem 5 no ponto de entrada para as medições de 1 a 6.

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

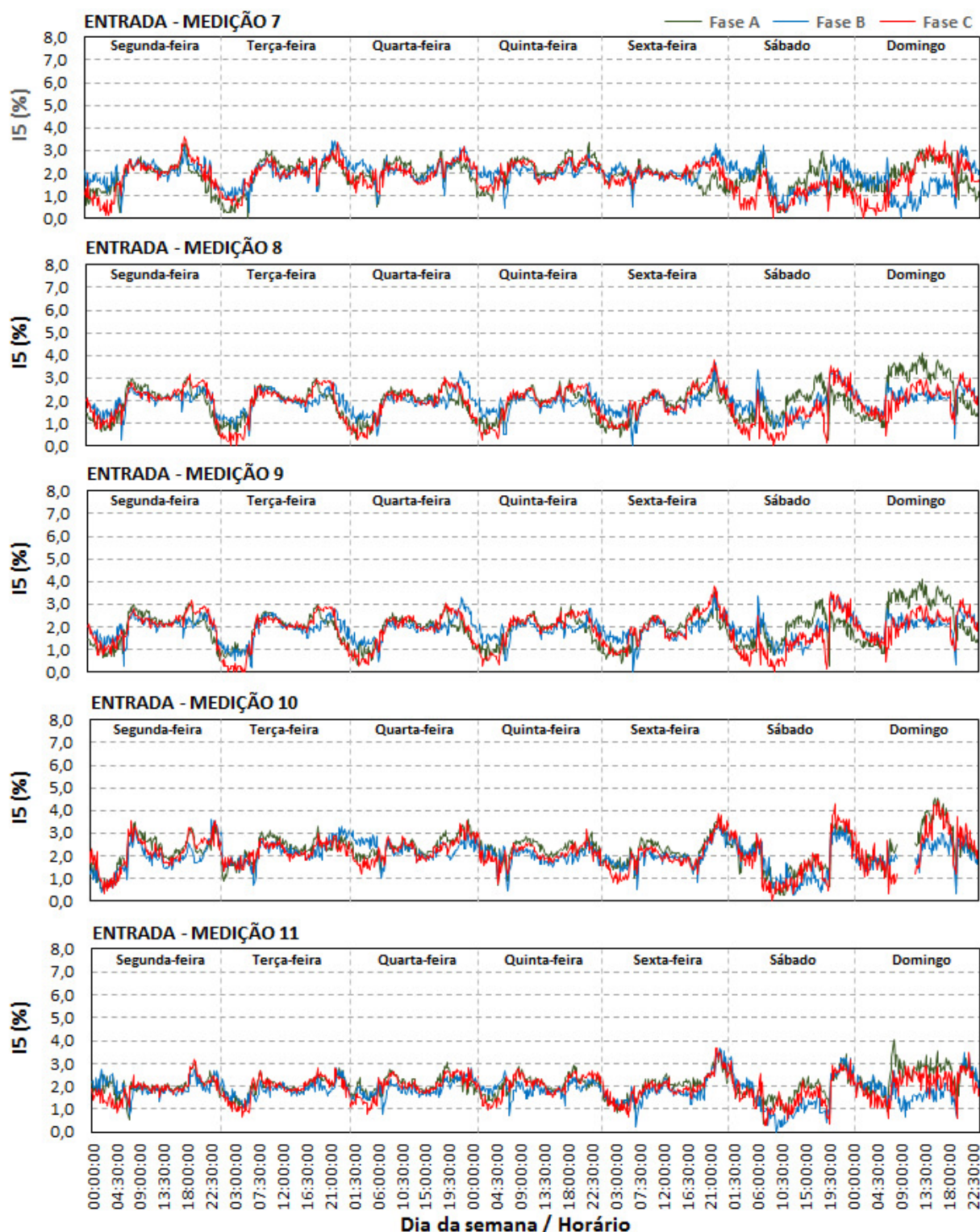


Figura 4.17 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de corrente de ordem 5 no ponto de entrada para as medições de 7 a 11.

Para dar continuidade à análise dos valores estatísticos e do comportamento, no ponto de entrada, dos indicadores das distorções harmônicas na forma de onda, considerou-se a tensão.

4.4.2 – Distorções harmônicas de Tensão

As distorções harmônicas totais e individuais de tensão máximas registradas em um sistema com tensão nominal de 13.800 V devem ser, respectivamente, iguais ou inferiores a 8 % e aos valores indicados na tabela 4.2, retirada do documento Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (Prodist), no Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, da ANEEL [30].

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

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

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]	
	1 kV < VN ≤ 13,8 kV	
Ímpares não múltiplas de 3	5	6
	7	5
	11	3,5
	13	3
	17	2
	19	1,5
	23	1,5
	25	1,5
	>25	1
Ímpares múltiplas de 3	3	5
	9	1,5
	15	0,5
	21	0,5
	>21	0,5
Pares	2	2
	4	1
	6	0,5
	8	0,5
	10	0,5
	12	0,5
	>12	0,5

a) Distorção harmônica total de tensão

Os valores estatísticos de distorção harmônica total de tensão (máximos, médios, máximos percentis diários 95% e percentis semanais 95%) no ponto de entrega foram inferiores ao valor de referência de 8% indicado pelo Prodist, mais precisamente, ficaram abaixo de 3,3% e ficaram com valores muito próximos nas quatro estatísticas, o que mostra que essa distorção variou em uma faixa estreita de valores, como pode ser visto na figura 4.18.

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

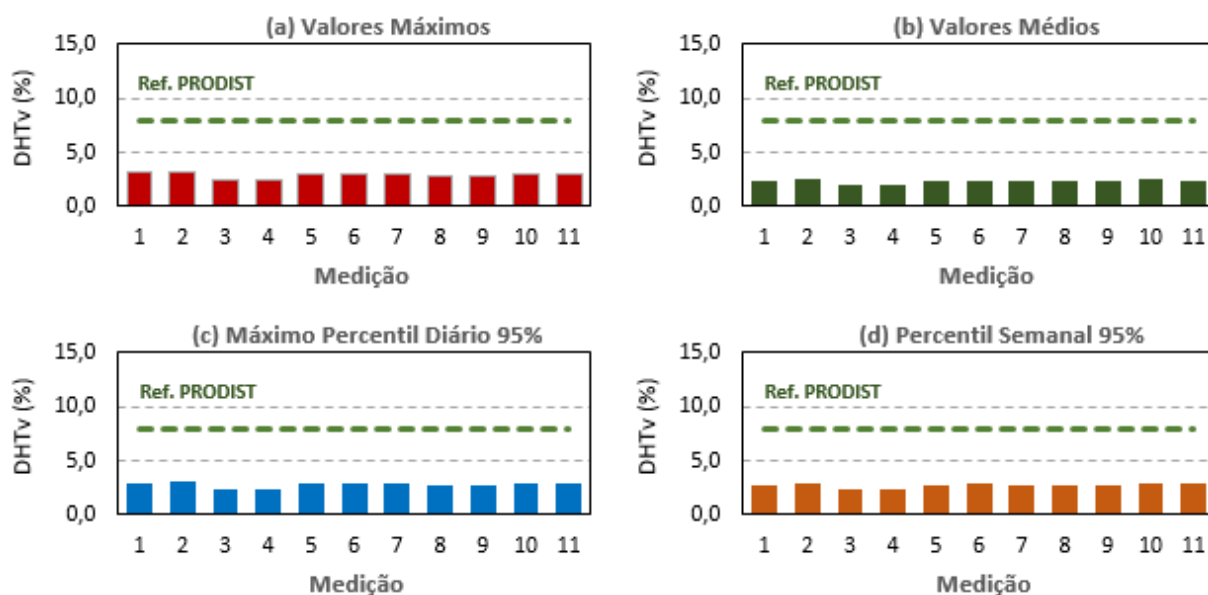


Figura 4.18 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para as medições no ponto de entrada em relação à distorção harmônica total de tensão.

Conforme mostrado nas figuras 4.19 e 4.20, o comportamento semanal da distorção harmônica total de tensão no ponto de entrega, em cada período de medição, comprovou a afirmação de que essa distorção variou em uma faixa estreita de valores, apresentou uma similaridade nas três fases e mostrou que seus valores permaneceram os mesmos ou um pouco maiores nos finais de semana, mesmo com a redução brusca das correntes neste período, como ocorrido nas medições em baixa tensão. Isso sugere que a distorção harmônica de tensão do campus tenha uma maior contribuição da concessionária de energia, que atende, além da universidade, um bairro residencial em que o maior consumo se dá no final de semana.

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

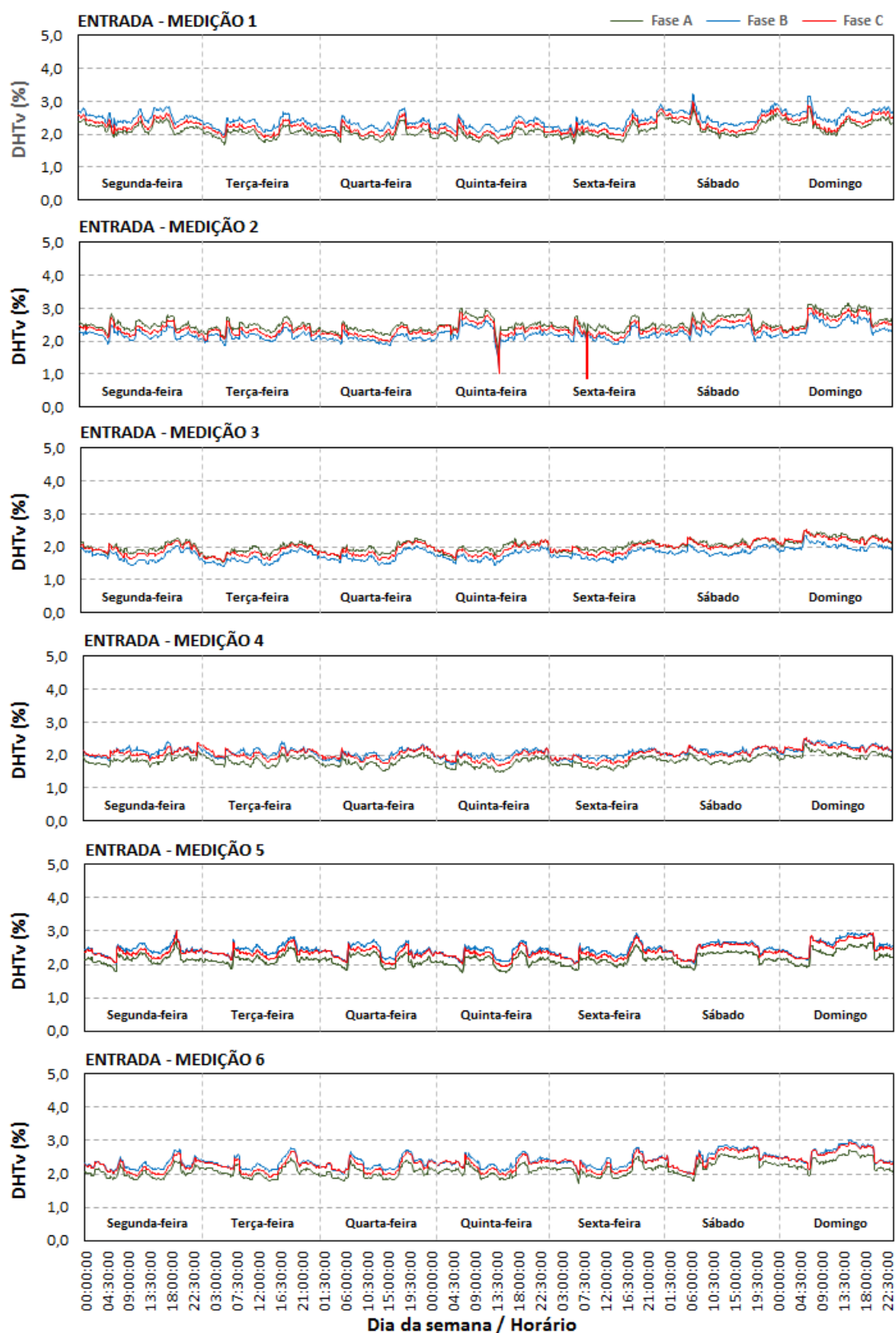


Figura 4.19 – Comportamento semanal da distorção harmônica total de tensão no ponto de entrada para as medições de 1 a 6.

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

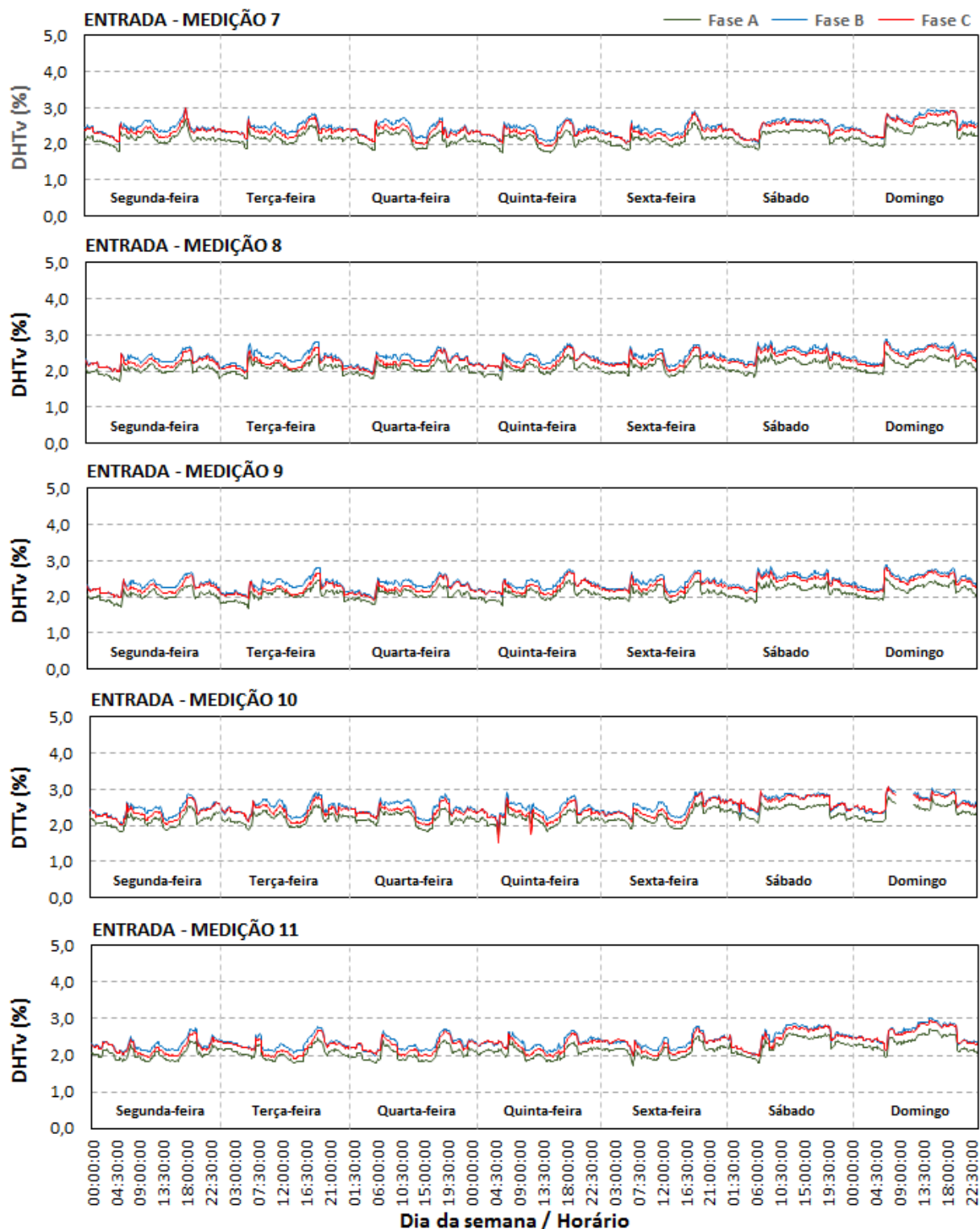


Figura 4.20 – Comportamento semanal da distorção harmônica total de tensão no ponto de entrada para as medições de 7 a 11.

A partir da avaliação do ponto de entrada da 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 neste ponto de conexão com a concessionária de energia elétrica.

b) Espectro harmônico de tensão

As figuras 4.21 e 4.22 apresentam uma síntese dos valores das distorções harmônicas totais e individuais de tensão das três fases no ponto de entrega nos períodos de medição, na forma de espectro de frequência. Pela análise desses espectros, a tensão harmônica mais significativa no ponto de entrada é de ordem 5, seguida da ordem 7. Tal fato já era esperado pois também ocorreu para os onze pontos de medição na baixa tensão.

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

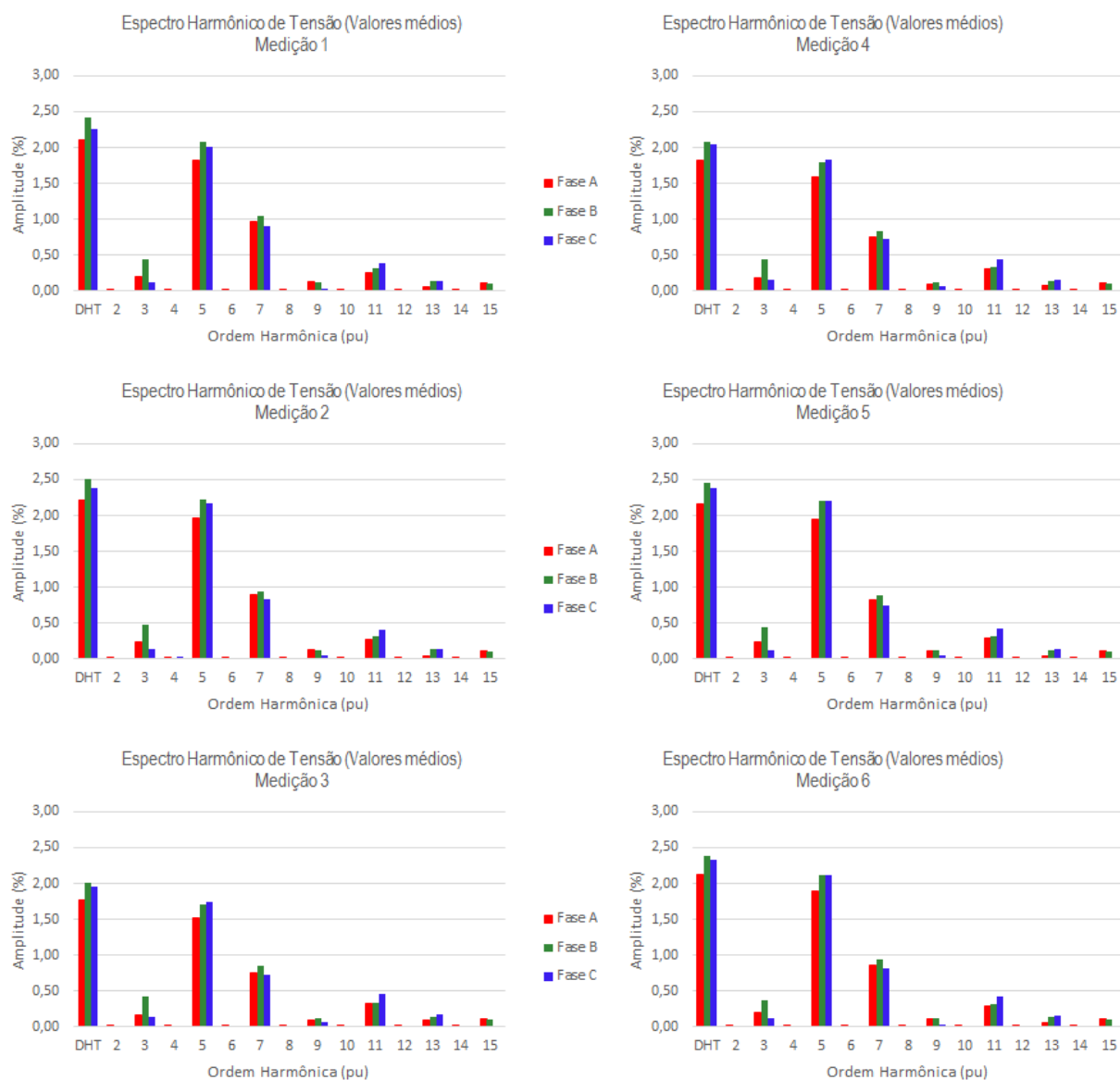


Figura 4.21 – Espectro de frequência da tensão no ponto de entrada para as medições de 1 a 6.

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

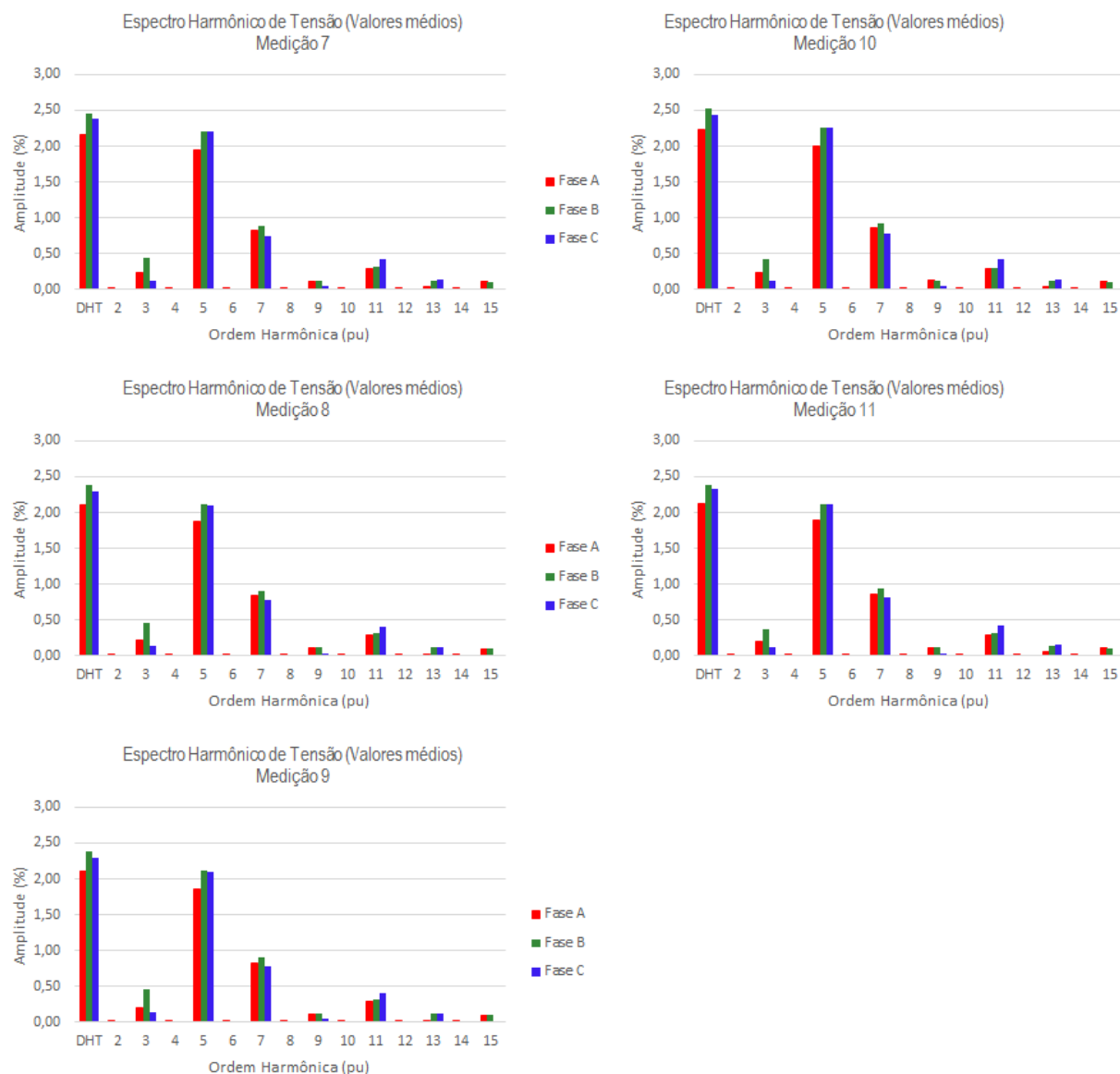


Figura 4.22 – Espectro de frequência da tensão no ponto de entrada para as medições de 7 a 11.

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

c) Distorção harmônica individual de tensão

A tensão harmônica de ordem 5, que é a mais significativa no ponto de entrega, em todos os períodos de medição, deve ser inferior a 6%, segundo os

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

valores de referência determinados pelo Prodist para tensões nominais maiores que 1.000 V e menores ou iguais a 13.800 V.

Na figura 4.23, os valores estatísticos (valores máximos e médios, assim como os máximos percentis diários 95% e os percentis semanais 95%) de distorção harmônica individual de tensão de ordem 5, no ponto de entrega, em todos os períodos de medição, foram inferiores ao valor de referência, mais precisamente, ficaram abaixo de 3%, mesmo valor de distorção harmônica de tensão de ordem 5 na baixa tensão dos transformadores.

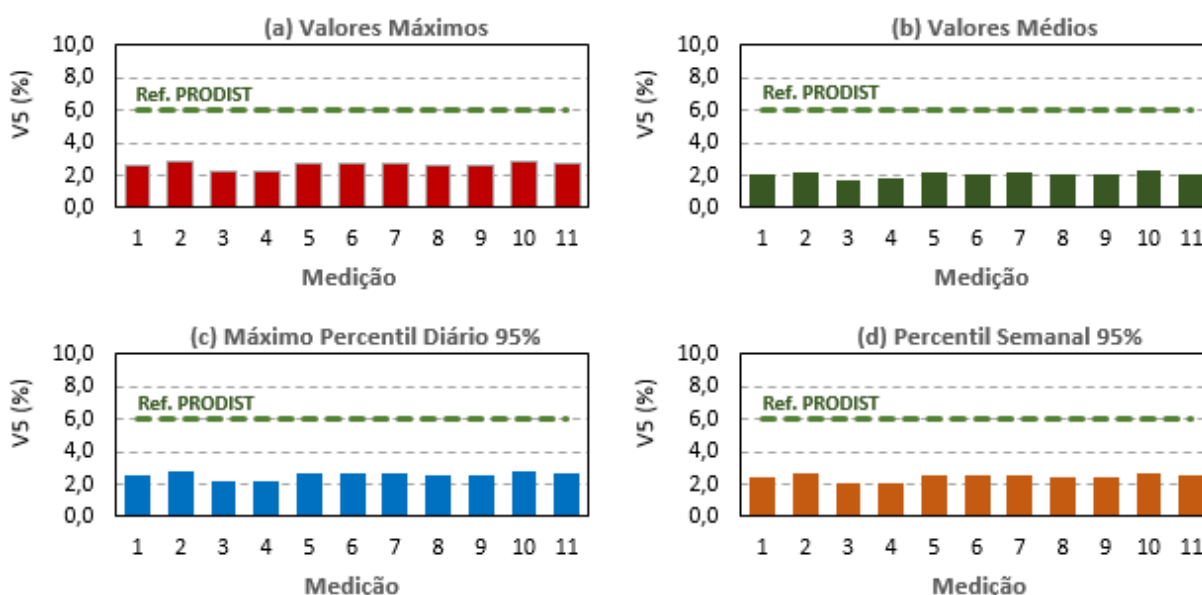


Figura 4.23 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para as medições no ponto de entrada em relação à distorção harmônica individual de tensão de ordem 5.

O comportamento semanal da distorção harmônica individual de tensão de ordem 5 no ponto de entrega, em cada período de medição, pode ser visualizado nas figuras 4.24 e 4.25. As curvas apresentaram valores um pouco mais elevados nos finais de semana em relação aos dias de semana como nas curvas de distorção harmônica total de tensão.

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

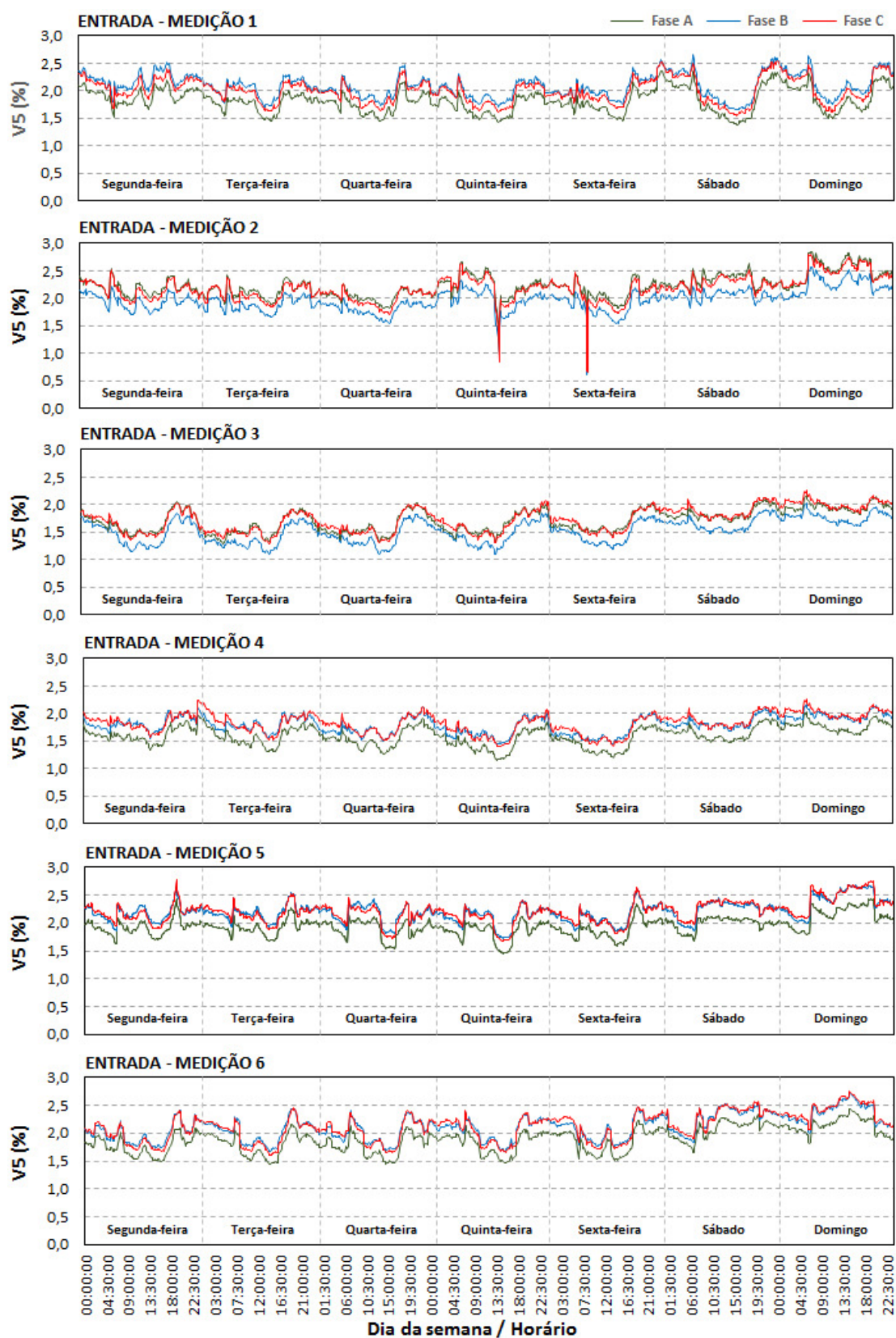


Figura 4.24 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de tensão de ordem 5 no ponto de entrada para as medições de 1 a 6.

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

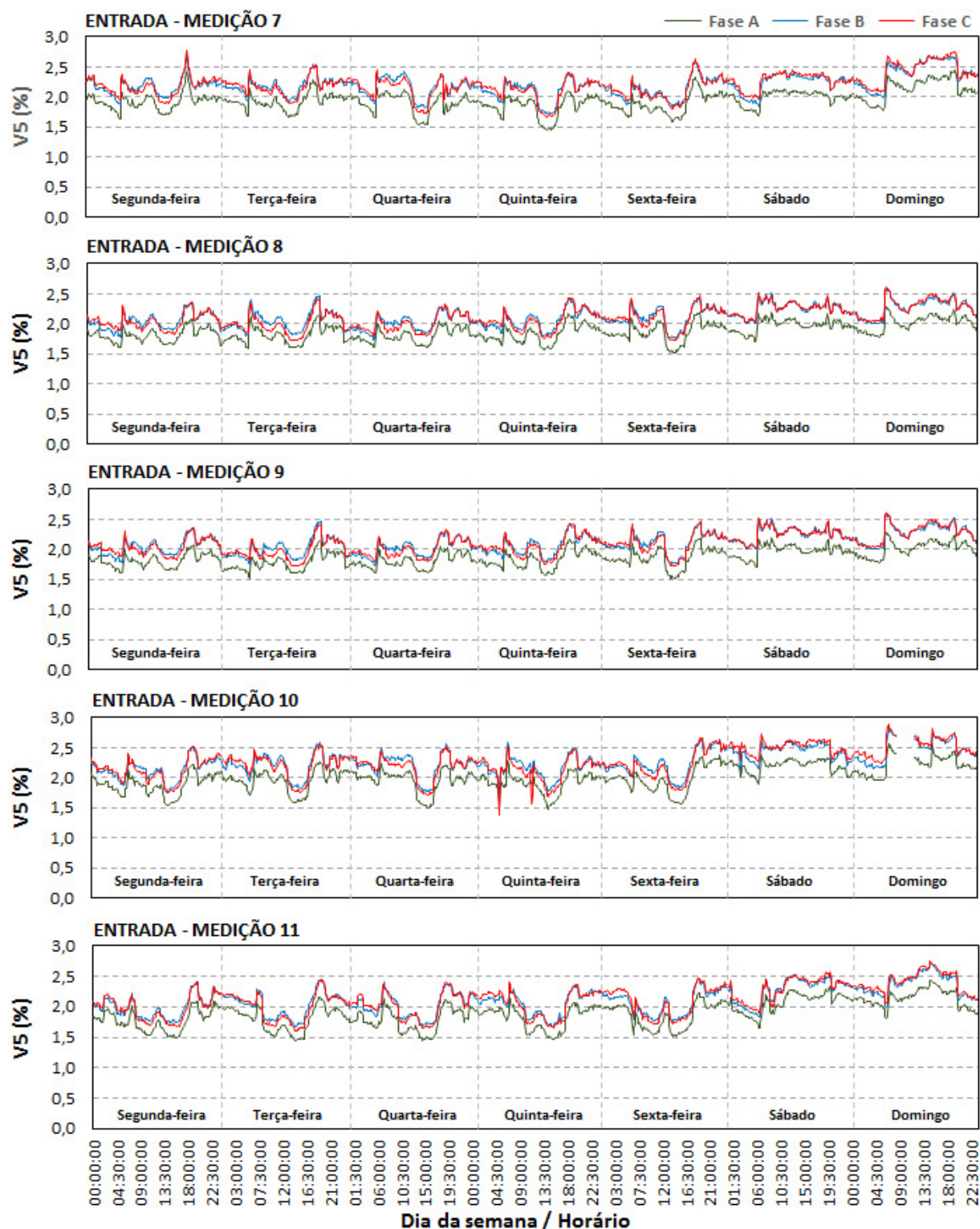


Figura 4.25 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de tensão de ordem 5 no ponto de entrada para as medições de 7 a 11.

Para a distorção harmônica individual de tensão de ordem 7, conforme destaca a figura 4.26, o valor de 5% determinado pelo Prodist para tensões nominais iguais a 13.800 V também não foi ultrapassado por nenhum dos valores estatísticos calculados no ponto de entrega, em todos os períodos de medição. Todos os valores de distorção de tensão nessa ordem ficaram abaixo de 2%, mesmo valor de distorção harmônica de tensão de ordem 7 na baixa tensão dos transformadores.

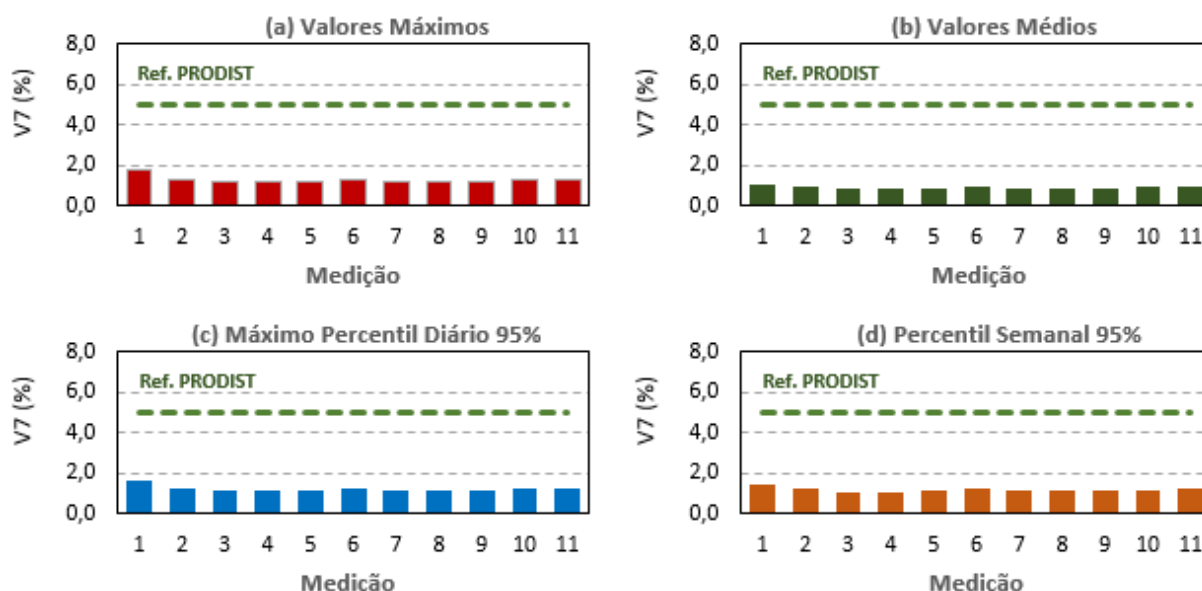


Figura 4.26 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para as medições no ponto de entrada em relação à distorção harmônica individual de tensão de ordem 7.

O comportamento semanal da distorção harmônica individual de tensão de ordem 7 no ponto de entrada, em cada período de medição, pode ser visualizado nas figuras 4.27 e 4.28 e foi bem característico conforme ocorrido também nos barramentos de baixa tensão. 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 também apresentou uma similaridade de perfil nas três fases.

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

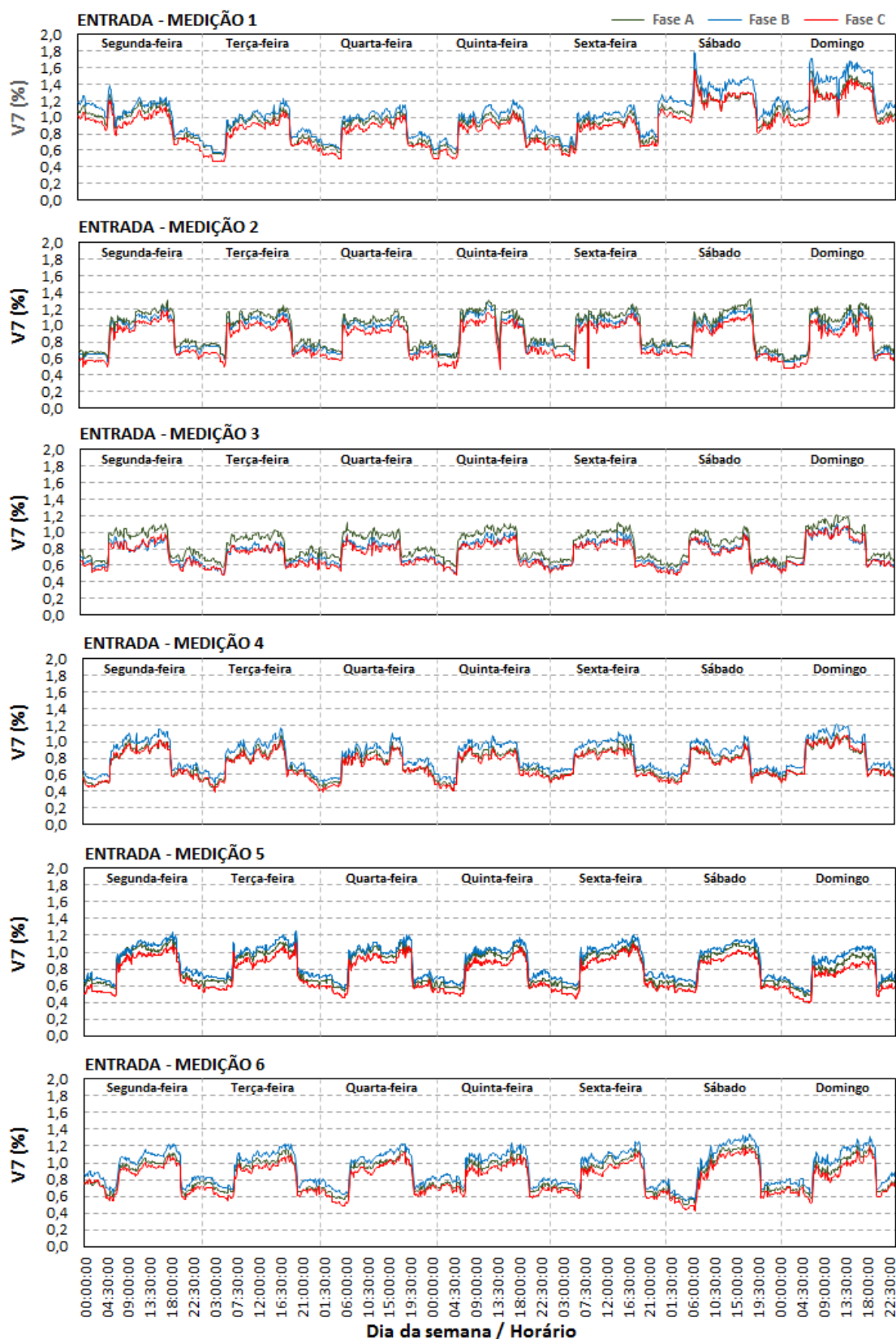


Figura 4.27 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de tensão de ordem 7 no ponto de entrada para as medições de 1 a 6.

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

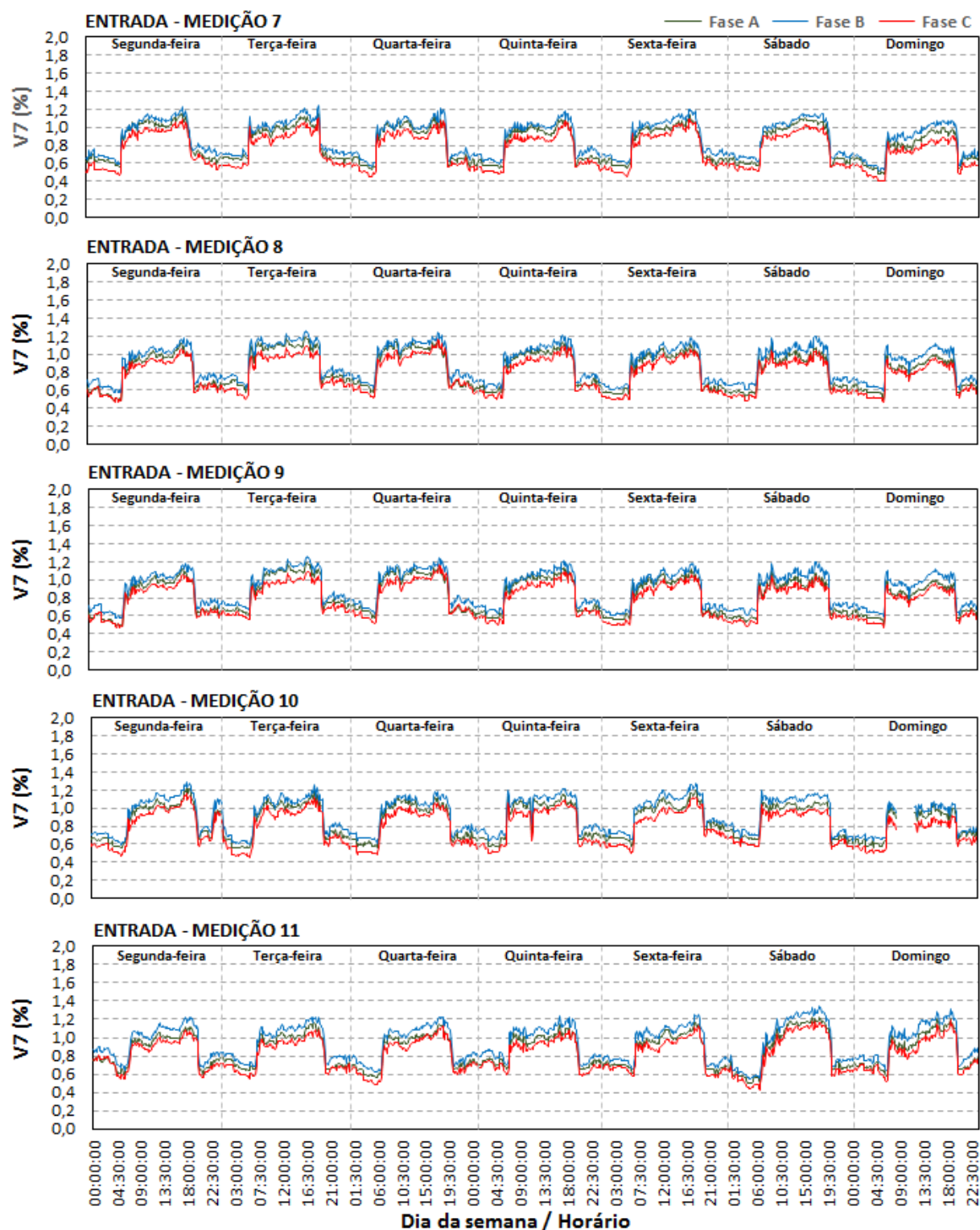


Figura 4.28 – Comportamento semanal da distorção harmônica individual de tensão de ordem 7 no ponto de entrada para as medições de 7 a 11.

Após a verificação dos indicadores de distorção harmônica de tensão, tanto total como individuais, no ponto de entrada, foi avaliado o distúrbio conhecido como desequilíbrios de tensão.

4.5 – Desequilíbrios de tensão

Em relação ao valor de referência do indicador fator de desequilíbrio, o Prodist indica para os barramentos do sistema de distribuição, com exceção da baixa tensão, que este deve ser igual ou inferior a 2%.

Os valores estatísticos calculados com base nos resultados de medição (valores máximos e médios, assim como os máximos percentis diários 95% e os percentis semanais 95%) do fator de desequilíbrio de tensão no ponto de entrada em todos os períodos de medição, foram inferiores ao valor de referência de 2% indicado, mais precisamente, ficaram abaixo de 1,2%, conforme apresentado na figura 4.29. Se os registros de valores máximos forem desconsiderados por serem momentos isolados, o fator de desequilíbrio é ainda mais baixo, inferior a 0,5%.

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

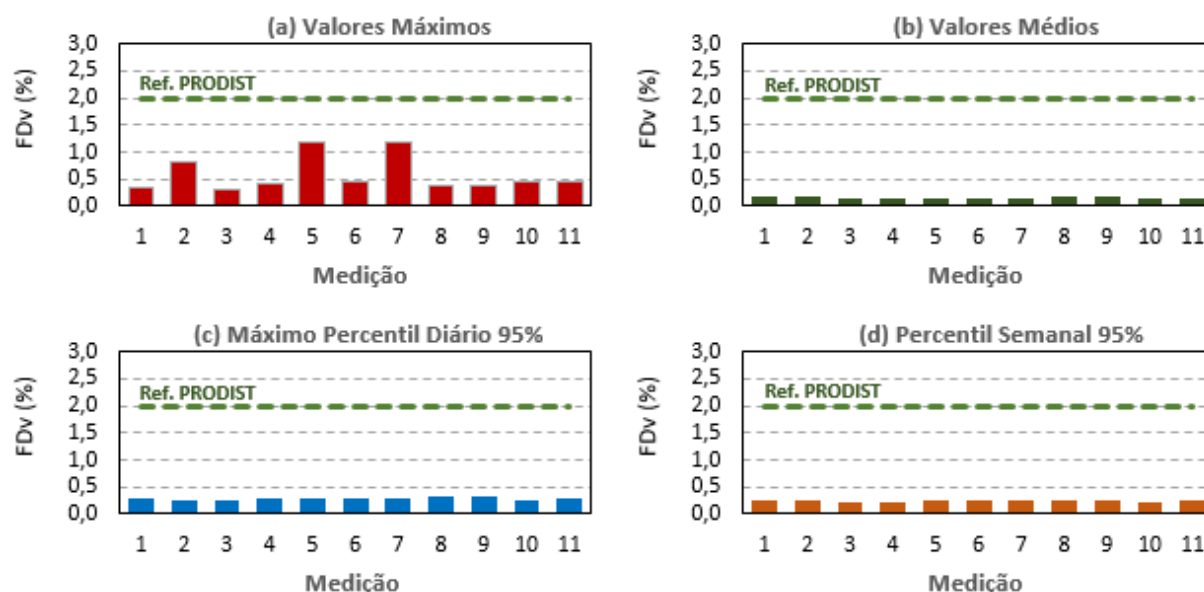


Figura 4.29 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para as medições no ponto de entrada em relação ao desequilíbrio de tensão.

O comportamento semanal do fator de desequilíbrio de tensão, no ponto de entrada, em cada período de medição, pode ser visualizado nas figuras 4.30 e 4.31.

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

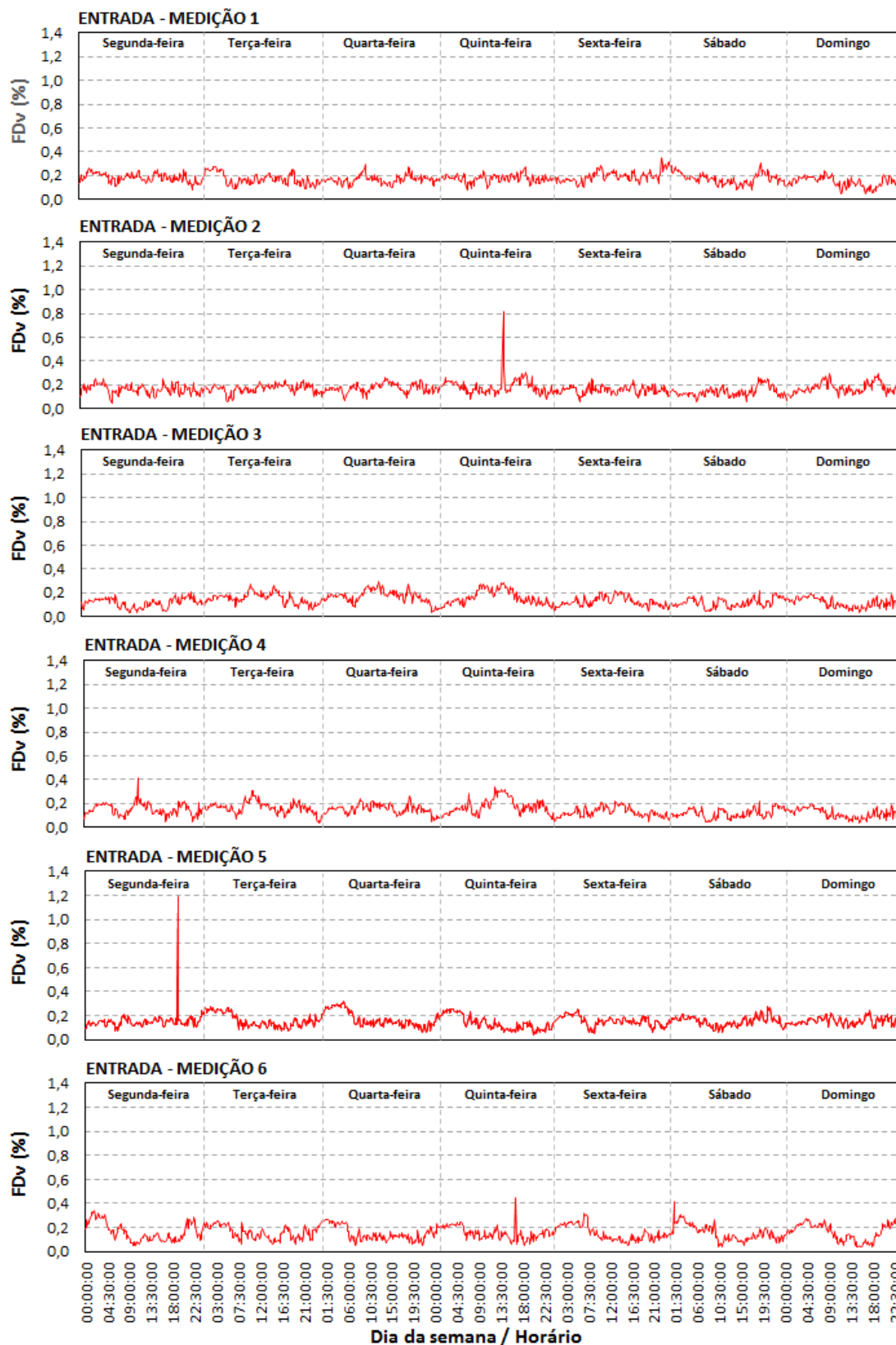


Figura 4.30 – Comportamento semanal do fator de desequilíbrio de tensão no ponto de entrada para as medições de 1 a 6.

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

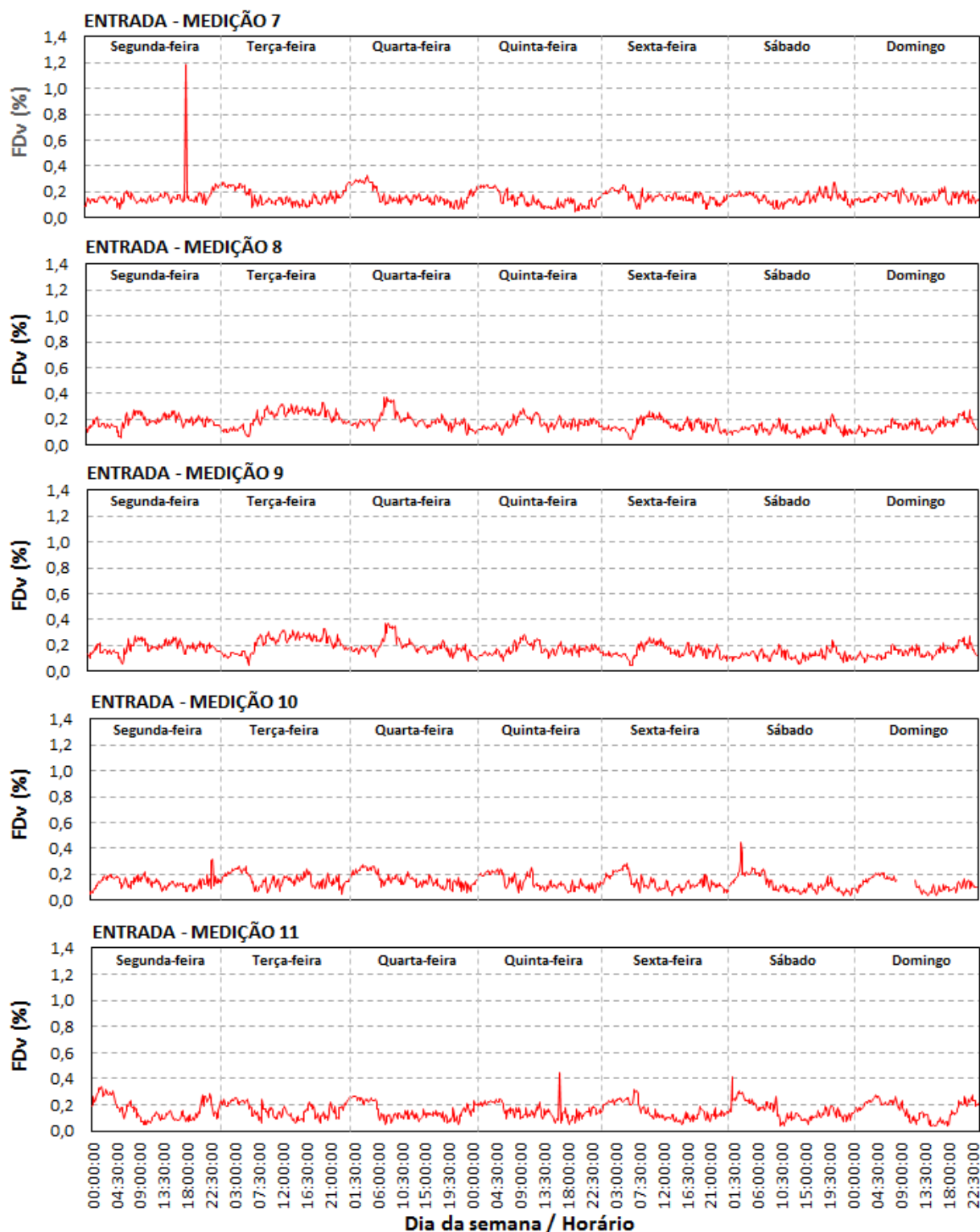


Figura 4.31 – Comportamento semanal do fator de desequilíbrio de tensão no ponto de entrada para as medições de 7 a 11.

4.6 – Flutuações de tensão

Nas medições no ponto de entrega, o analisador de qualidade da energia elétrica forneceu apenas os valores do indicador severidade de *flicker* de curta duração (Pst) e, como visto no Capítulo III, o Prodist classifica o desempenho do sistema quanto às flutuações de tensão como adequado quando este apresenta PstD95% menor do que 1 pu. Nesta medição em 13.800 V, o fator de transferência foi considerado 1, pois a tensão é menor do que 69.000 V.

Na figura 4.32, os valores estatísticos calculados com base nos resultados de medição (valores máximos e médios, assim como os máximos percentis diários 95% e os percentis semanais 95%) do indicador severidade de *flicker* de curta duração no ponto de entrega, em todos os períodos de medição, foram inferiores ao valor de referência.

Se analisados separadamente os valores médios, máximos percentis diários 95% e percentis semanais 95%, o indicador severidade de *flicker* de curta duração foi ainda mais baixo, inferior a 0,6 pu. Comparando-se estes valores com os mesmos resultantes das medições em baixa tensão, inferior a 0,39 pu; verifica-se que a flutuação de tensão é maior no sistema da distribuidora local do que nas instalações da UFU. A atenuação da média para a baixa tensão deve-se sobretudo à impedância dos transformadores.

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

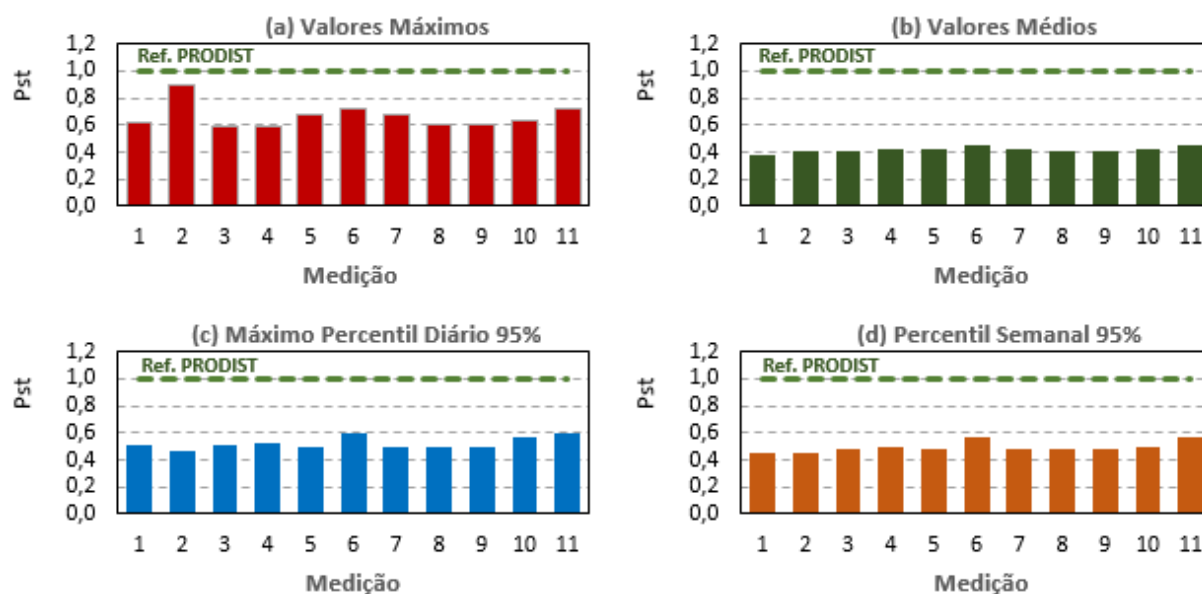


Figura 4.32 – Valores comparativos das estatísticas obtidas para as medições no ponto de entrada em relação à severidade de flicker de curta duração.

O comportamento semanal do indicador severidade de flicker de curta duração no ponto de entrega, em cada período de medição, pode ser visualizado nas figuras 4.33 e 4.34. A fase C apresentou valores de Pst inferiores aos das fases A e B em todos os períodos de medição.

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



Figura 4.33 – Comportamento semanal da severidade de flicker de curta duração no ponto de entrada para as medições de 1 a 6.

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



Figura 4.34 – Comportamento semanal da severidade de flicker de curta duração no ponto de entrada para as medições de 7 a 11.

A avaliação das flutuações de tensão no ponto de entrada encerra o diagnóstico global da instalação elétrica do campus em relação à qualidade da energia elétrica.

4.7 – Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados os gráficos contendo os valores estatísticos e os perfis de grandezas elétricas e indicadores usados para avaliação dos distúrbios associados à qualidade da energia e medidos no ponto de entrega desta universidade, que comparados aos valores de referência recomendados por órgãos que regulam o setor elétrico, permitiram avaliar este sistema elétrico de forma global.

Apesar da variação de corrente em regime permanente não ser um indicador da qualidade da energia elétrica, esta grandeza foi avaliada e tomando-se a corrente de carga de toda a universidade em relação a corrente contratada e parametrizada no relé de proteção de entrada, esta ultrapassou seu limite em várias medições, o que sugere a avaliação das instalações elétricas e a solicitação do aumento da demanda contratada.

Em relação ao nível de tensão fase-fase observado no ponto de entrega, em todos os períodos de medição, este apresentou variações em seu valor eficaz dentro dos limites considerados como adequados pelo Prodist, Módulo 8, da ANEEL [30], ou seja, variações entre 12.834 e 14.490 V.

No que se refere à distorção harmônica total de corrente neste ponto, de uma forma geral, esta apresentou valores próximos de 8%. A comparação entre a distorção harmônica total de corrente no ponto de entrega com a mesma distorção nos pontos em baixa tensão, avaliada no Capítulo III, permite concluir que a ligação delta-estrela contribuiu para bloquear algumas correntes harmônicas de entrarem no lado de 13,8 kV. Em relação a distorção harmônica

individual de corrente, as ordens harmônicas que apresentaram valores mais significativos foram a terceira e a quinta, como ocorreu também nas medições nos onze pontos em baixa tensão. Os valores estatísticos máximos da distorção harmônica individual de corrente de terceira ordem foram próximos de 5% e de quinta ordem, cerca de 4%.

No que tange ao nível de distorção harmônica total de tensão manifestado no ponto de entrada em 13.800 V, este ficou dentro do limite admissível e recomendado pelo Prodist que é de 8%, mais precisamente abaixo de 3,3%. Já em relação a distorção harmônica individual de tensão, as ordens harmônicas que apresentaram valores mais significativos foram a quinta e a sétima, como ocorreu também nas medições nos onze pontos em baixa tensão. Os valores estatísticos, em todos os períodos de medição, da distorção harmônica individual de tensão de quinta ordem ficaram abaixo de 3% (limite de 6%) e de sétima ordem, abaixo de 2% (limite de 5%).

Um fato importante constatado no perfil da distorção harmônica de tensão foi que seus valores permaneceram os mesmos ou um pouco maiores nos finais de semana, mesmo com a redução brusca das correntes neste período, como ocorrido também nas medições desse indicador em baixa tensão, o que sugere um estudo mais detalhado da contribuição nesse distúrbio da concessionária de energia elétrica e da universidade.

Em relação ao nível de desequilíbrio de tensão observado no ponto de entrega, em todos os períodos de registro, este ficou abaixo do valor de referência de 2% sugerido por [30]. O desequilíbrio máximo registrado foi de 1,2%.

Por fim, o nível de flutuação de tensão (Pst) apresentado no ponto em estudo, para todos os valores estatísticos, ficou abaixo do valor de referência de 1 pu sugerido pelo Prodist, mais precisamente inferior a 0,6 pu se analisados

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

apenas os valores médios, máximos percentis diários 95% e percentis semanais 95%.

Portanto, as grandezas elétricas e os indicadores analisados, no Capítulo III, a partir de um plano de medição para o diagnóstico da qualidade da energia elétrica da instalação de forma distribuída; foram também utilizados, neste capítulo, para avaliação do ponto de entrega do campus, o que permitiu um conhecimento global da rede do Campus Santa Mônica da UFU.

CAPÍTULO V

Análise da Contribuição Harmônica

5.1 – Considerações iniciais

No Capítulo IV foram apresentadas as medições e feitas as avaliações de indicadores da qualidade da energia elétrica no ponto de entrega da universidade. Em relação à distorção harmônica total de tensão neste ponto, foi verificado que seu indicador estava dentro dos limites de referência do Prodist [30], mas, nos finais de semana, seus valores permaneceram os mesmos ou um pouco maiores, mesmo com a redução brusca das correntes neste período. Isso sugere que a distorção harmônica de tensão do campus tenha uma maior contribuição da concessionária de energia, que atende, além da universidade, um bairro residencial em que o maior consumo se dá no final de semana.

Assim, com o intuito de verificar a contribuição da concessionária de energia elétrica e da universidade na distorção harmônica de tensão neste ponto, as medições feitas foram comparadas com os resultados da simulação deste sistema, considerando-se a injeção das correntes harmônicas medidas nos barramentos de baixa tensão dos transformadores das subestações do campus. Para tanto, fez-se o uso da ferramenta computacional ATP (*Alternative Transients Program*) a qual reproduziu a fonte de tensão da concessionária, a rede de distribuição da universidade e a injeção de correntes harmônicas, e, por fim, gerou um espectro de tensão.

Assim, este capítulo tem por foco:

Propor uma ferramenta e mostrar como esta pode ser utilizada para modelagem e simulação harmônica de um sistema elétrico.

5.2 – Modelagem do sistema elétrico no ATP

O ATP é um programa computacional que consiste em uma versão do EMTP (*Eletromagnetic Transients Program*) adaptada para a utilização em microcomputadores. Este programa permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, com configurações arbitrárias, por um método que utiliza a matriz de admitância de barras. A formulação matemática é baseada no método das características (método de Bergeron) para elementos com parâmetros distribuídos e na regra de integração trapezoidal para parâmetros concentrados. Durante a solução, são utilizadas técnicas de esparsidade e de fatorização triangular otimizada de matrizes. Os seus valores calculados são em intervalos de tempo discretos, pois um programa digital não permite obter uma solução contínua no tempo [41].

Assim, a modelagem do sistema elétrico da universidade foi baseada no diagrama unifilar apresentado na figura 5.1 e composto pelos seguintes elementos: fonte de tensão, impedâncias, cabos de média e baixa tensão, chaves, disjuntores e transformadores. Devido à dimensão do sistema, os cálculos dos parâmetros de entrada de cada componente do sistema foram apresentados apenas para a modelagem da rede da concessionária e do ramal do transformador TR05.1, como em destaque na figura 5.1.

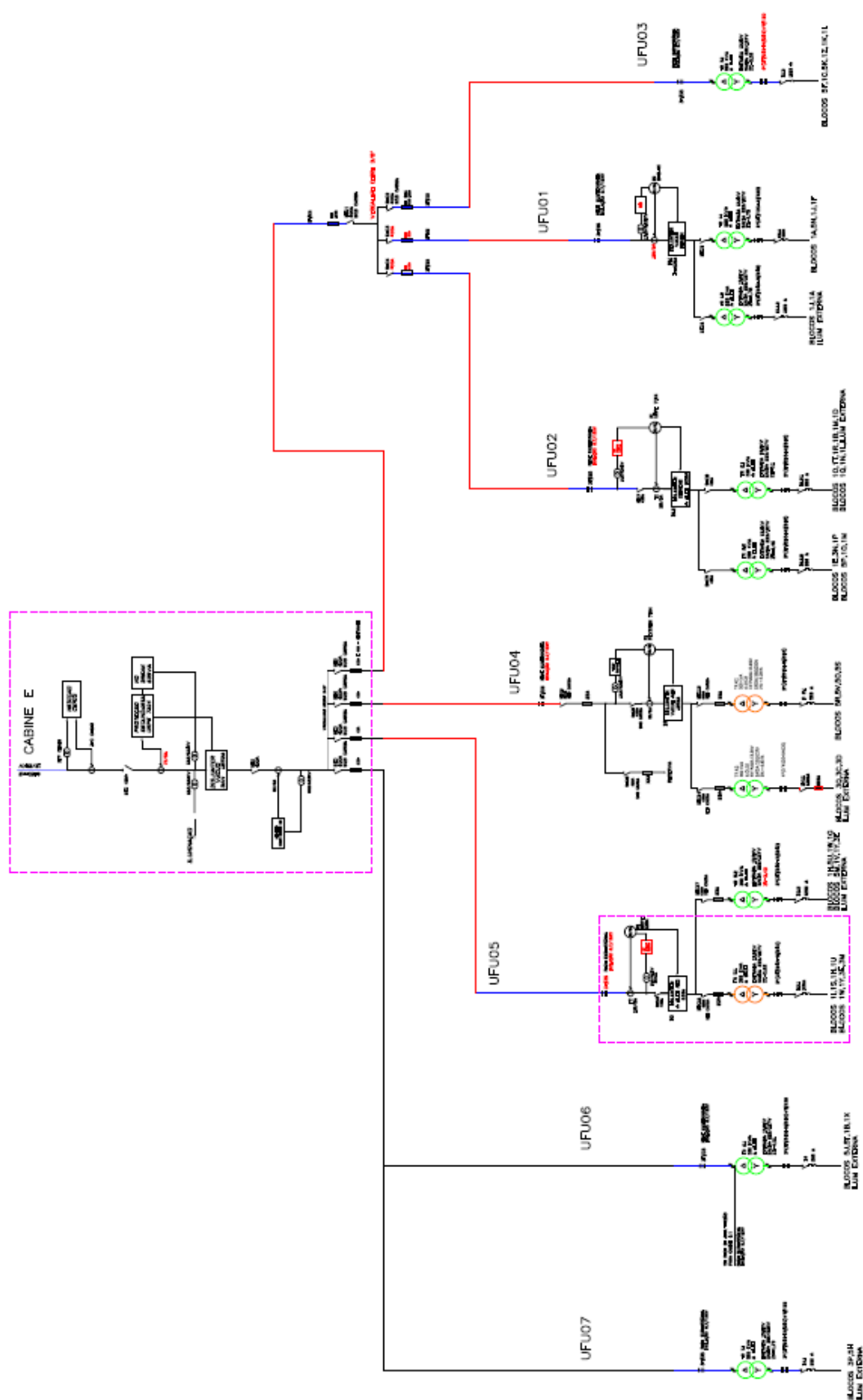


Figura 5.1 – Diagrama unifilar do sistema elétrico da universidade, com destaque para a rede da concessionária e para o ramal do transformador TR05.1.

5.2.1 – Componentes do sistema elétrico

a) Rede da concessionária

No sistema elétrico em estudo, a rede da concessionária de energia elétrica foi representada por uma fonte de tensão e uma impedância. A fonte de tensão é representada no ATP pelo elemento *AC 3-ph type14*, que é alternada e trifásica. Para a parametrização deste elemento é necessário o conhecimento da tensão de fase primária de pico e da frequência do sistema elétrico.

A frequência do sistema é 60 Hz e com a tensão de linha primária igual a 13.800V, tem-se a tensão de fase primária de pico igual a 11.267,65 V.

Já a impedância da fonte é representada no ATP pelo elemento *RLC 3-ph*, que é trifásica. Para a parametrização deste elemento é necessário o conhecimento da resistência e indutância da fonte, obtidos a partir do nível de curto-circuito fornecido pela concessionária de energia elétrica.

A corrente de curto-circuito fornecida pela Cemig foi de $3.516 \angle -75,85^\circ$ A e a resistência e indutância da fonte de tensão calculadas possuem os seguintes valores:

Resistência = 0,553961 Ω ;

Indutância = 5,828372 mH.

Os elementos do ATP fonte de tensão e impedância podem ser visualizados na figura 5.2.

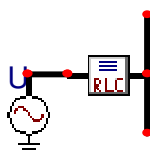


Figura 5.2 – Representação da rede da concessionária de energia elétrica do sistema em estudo no ATP.

b) Ramal do transformador TR05.1

Para melhor visualização, a figura 5.3 mostra apenas o diagrama unifilar do ramal do transformador TR05.1.

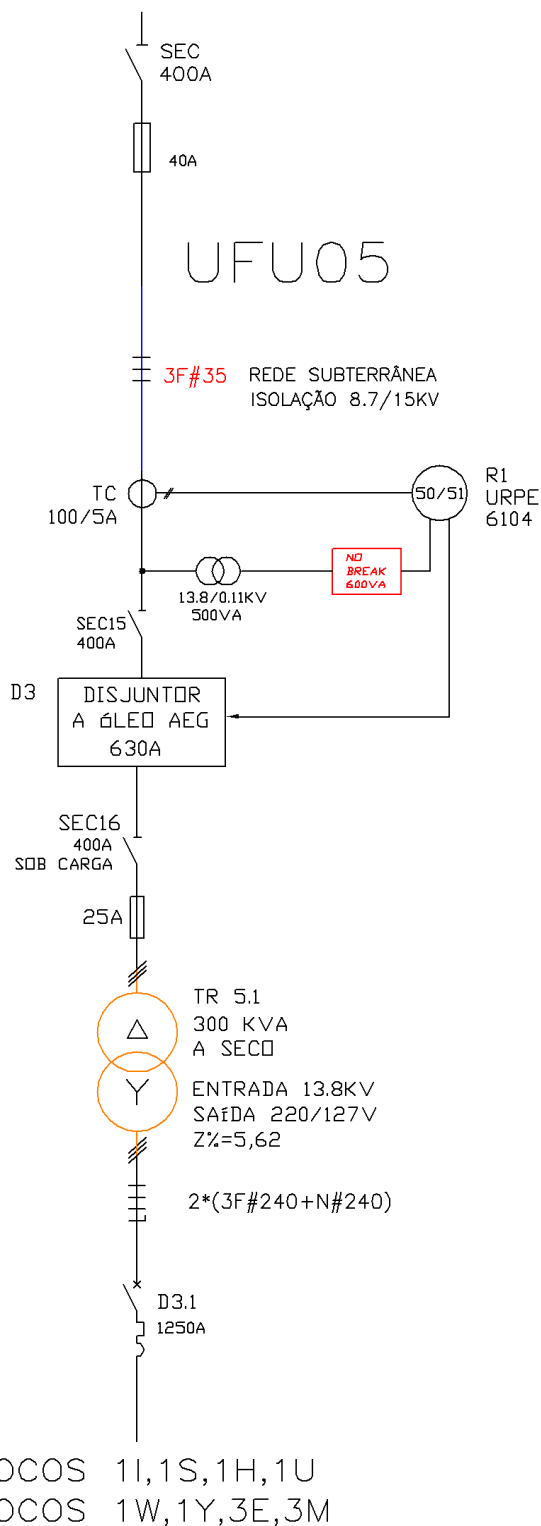


Figura 5.3 – Diagrama unifilar do ramal do transformador TR05.1.

- **Cabos de média e baixa tensão**

Os cabos subterrâneos de média tensão do ramal do transformador TR05.1 e de todo o sistema elétrico em estudo foram modelados pelo elemento *RLC PI-equiv.1-3phase*, que é a representação de uma linha usando parâmetros concentrados do modelo pi, a qual apresenta valores satisfatórios apenas para linhas de curta distância. Para a parametrização deste elemento é necessário o conhecimento da resistência, indutância e capacitância da linha, obtidos a partir da multiplicação dos parâmetros elétricos distribuídos, fornecidos pelos catálogos de cabos de média tensão, pelo comprimento dos cabos.

Conforme figura 5.3, catálogo do fabricante do cabo e informações de técnicos, o cabo de média tensão da rede subterrânea que liga uma das chaves fusíveis da cabine de entrada até a chave seccionadora da subestação UFU05 possui as seguintes características:

Tipo: eprotenax;

Marca: Prysmian;

Isolação: 8,7/15 kV;

Seção: 35 mm²;

Unipolar;

Disposição: trifólio;

Número de condutores por fase: 1;

$X_c = 13151 \Omega \cdot \text{km}$;

$R_{ca} = 0,67 \Omega/\text{km}$;

$X_l = 0,162 \Omega/\text{km}$;

$l = 0,441 \text{ km}$.

Através de cálculos, foram obtidos os seguintes valores para os parâmetros de entrada do cabo de média tensão que chega na subestação UFU05:

Resistência = 0,29547 Ω ;

Capacitância = 0,088949 μF ;

Indutância = 0,189501 mH.

A tabela 5.1 resume as características dos cabos de média tensão que ligam a subestação de entrada a cada uma das subestações de derivação e transformação e seus respectivos parâmetros de entrada no elemento do ATP. Todos estes cabos são classe 8,7/15 kV, unipolares e estão dispostos de forma trifólio.

Tabela 5.1 – Características dos cabos de média tensão e seus respectivos parâmetros de entrada no elemento do ATP

Subestação	Comprimento (km)	Tipo do Cabo	Marca	Seção (mm ²)	Xc ($\Omega \cdot \text{km}$)	Rca (Ω/km)	Xl (Ω/km)	Rca (Ω)	C (μF)	L (mH)
Poste-Entrada	0,017	Eprotenax	Prysmian	35	13151	0,67	0,162	0,01139	0,00342885	0,00730504
Entrada-Derivação	0,308	Eprotenax	Prysmian	25	14412	0,928	0,17	0,285824	0,05668721	0,13888594
UFU01	0,016	Eprotenax	Prysmian	25	14412	0,928	0,17	0,014848	0,00294479	0,00721485
UFU02	0,251	Eprotenax	Prysmian	25	14412	0,928	0,17	0,232928	0,0461964	0,11318302
UFU03	0,169	Eprotenax	Prysmian	35	13151	0,67	0,162	0,11323	0,03408683	0,07262069
UFU04	0,098	Eprotenax	Prysmian	35	13151	0,67	0,162	0,06566	0,01976633	0,04211141
UFU05	0,441	Eprotenax	Prysmian	35	13151	0,67	0,162	0,29547	0,08894847	0,18950133
UFU06	0,477	Eprotenax	Prysmian	35	13151	0,67	0,162	0,31959	0,09620957	0,20497082
UFU07	0,171	Epr dry 105	Ficap	35	8992	0,7006	0,1513	0,119803	0,05044272	0,06862679

Os cabos de baixa tensão deste sistema também foram modelados utilizando este mesmo elemento, no entanto, seus parâmetros elétricos distribuídos foram obtidos nos catálogos de cabos de baixa tensão.

Conforme figura 5.3, catálogo do fabricante do cabo e informações de técnicos, o cabo de baixa tensão que liga a saída do transformador TR05.1 ao disjuntor geral de baixa tensão possui as seguintes características:

Tipo: eprotenax;

Isolação: 0,6/1 kV;

Seção: 240 mm²;

Unipolar;

Disposição: trifólio;

Número de condutores por fase: 2;

$R_{ca} = 0,045 \text{ } \Omega/\text{km}$;

$X_l = 0,05 \text{ } \Omega/\text{km}$;

$l = 0,007 \text{ km}$.

Assim, foram obtidos os seguintes valores para os parâmetros de entrada do cabo de baixa tensão:

Resistência = $0,000315 \text{ } \Omega$;

Indutância = $0,0009284 \text{ mH}$.

A tabela 5.2 resume as características dos cabos de baixa tensão que ligam a saída dos transformadores aos disjuntores gerais de baixa tensão e seus respectivos parâmetros de entrada no elemento do ATP.

Tabela 5.2 – Características dos cabos de baixa tensão e seus respectivos parâmetros de entrada no elemento do ATP

Trafo	Nº condutores	Seção (mm²)	Comprimento (km)	R_{ca} (Ω/km)	X_l (Ω/km)	R_{ca} (Ω)	L (mH)
TR01.1	2	120	0,005	0,19	0,1	0,000475	0,00066313
TR01.2	2	240	0,005	0,09	0,1	0,000225	0,00066313
TR02.1	2	240	0,013	0,09	0,1	0,000585	0,001724138
TR02.2	3	240	0,013	0,09	0,1	0,00039	0,00114931
TR03.1	3	240	0,005	0,09	0,1	0,00015	0,000442042
TR04.1	2	240	0,015	0,09	0,1	0,000675	0,00198939
TR04.2	4	120	0,015	0,19	0,1	0,0007125	0,000895225
TR05.1	2	240	0,007	0,09	0,1	0,000315	0,000928382
TR05.2	2	240	0,007	0,09	0,1	0,000315	0,000928382
TR06.1	3	240	0,007	0,09	0,1	0,00021	0,000618859
TR07.1	3	240	0,007	0,09	0,1	0,00021	0,000618859

O elemento do ATP cabo que usa parâmetros concentrados do modelo pi pode ser visualizado na figura 5.4.



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.

- **Chaves e disjuntores**

Todas as chaves de abertura em média tensão do sistema elétrico em estudo foram modeladas no ATP pelo elemento *Switch time 3-ph*, que é trifásica e cujos parâmetros são apenas o tempo de fechamento e abertura das mesmas. No ramal do transformador TR05.1 existem três chaves, uma chave fusível na subestação de entrada, uma chave seccionadora anterior ao disjuntor de média tensão da subestação UFU05 e uma chave fusível anterior ao transformador TR05.1. Os tempos de fechamento e abertura das chaves foram considerados tais que, durante a simulação, elas permaneceram fechadas.

O elemento do ATP chave pode ser visualizado na figura 5.5.

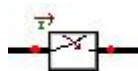


Figura 5.5 – Representação das chaves do sistema elétrico em estudo no ATP.

Já os disjuntores trifásicos foram modelados a partir de um recurso denominado DBM – *Data Base Modules* oferecido pelo ATP. Este recurso permite a criação de bibliotecas de modelos a partir de modelos já existentes, expandindo e melhorando o uso do programa em várias aplicações. Na criação destes módulos, alguns parâmetros podem ser explicitados tais como os nomes das barras de conexão e valores numéricos dos componentes, os quais são

especificados pelo usuário como se fossem os argumentos de uma sub-rotina [41].

O modelo de disjuntor trifásico foi criado a partir de dois modelos de elementos existentes: o ramo *RLC 3-ph* utilizado em paralelo de cada pólo do disjuntor, representando a capacitância de fuga das buchas de conexão e a chave *Switch time 3-ph* que representa os contatos do disjuntor. Assim, para a parametrização do disjuntor trifásico é necessário o conhecimento de sua capacitância de fuga, tempo de fechamento e abertura e corrente de ruptura.

Os disjuntores de média tensão das subestações e os disjuntores de baixa tensão dos transformadores foram parametrizados com corrente de ruptura e capacitância de fuga conforme valores da tabela 5.3. Como nas chaves, os tempos de fechamento e abertura dos disjuntores foram considerados tais que, durante a simulação, eles permaneceram fechados.

Tabela 5.3 – Características dos disjuntores e seus respectivos parâmetros de entrada no elemento do ATP

Tipo de disjuntor	Localização	Corrente de ruptura (A)	Capacitância de fuga (μF)
Média tensão	UFU01, UFU04, UFU05	20.000	0,00018
Média tensão	UFU02	16.000	0,00018
Não possui	UFU06, UFU07	-	-
Baixa tensão	Após TR01.1, TR01.2, TR02.1, TR02.2, TR03.1, TR04.1, TR04.2 e TR07.1	42.000	10^{-7}
Baixa tensão	TR05.1, TR05.2 e TR06.1	65.000	10^{-7}

A figura 5.6 representa os elementos ramo e chave utilizados para a criação do modelo do disjuntor trifásico, representado na figura 5.7.

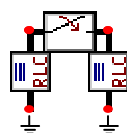


Figura 5.6 – Representação dos elementos que compõem o modelo disjuntor trifásico no ATP.



Figura 5.7 – Representação do modelo disjuntor trifásico no ATP.

- **Transformadores**

O transformador de dois enrolamentos do ramal do transformador TR05.1 e os de todo o sistema elétrico em estudo foram modelados no ATP pelo elemento *Saturable 3 phase*, que é trifásico e saturável. Seus parâmetros de entrada são: corrente a vazio de pico, resistência do primário e secundário, indutância do primário e secundário, resistência de magnetização e fluxo no ramo magnetizante.

O elemento transformador pode ser visualizado na figura 5.8.

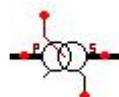


Figura 5.8 – Representação dos transformadores do sistema elétrico em estudo no ATP.

Conforme figura 5.3, o transformador TR05.1 da subestação UFU05 possui as seguintes características:

Frequência: 60 Hz;

Potência nominal: 300.000 VA;

Tensões nominais de linha: 13.800/220 V;

Impedância $Z\%$: $Z_{cc} = 5,62 \%$;

Ligação delta-estrela aterrado.

Na ausência dos valores de corrente a vazio I_0 e da resistência $R_{cc}\%$, estimou-se um valor igual a 2 % e 1 %, respectivamente.

Desta maneira, os seguintes valores foram obtidos para os parâmetros de entrada do transformador TR05.1 da subestação UFU05:

Corrente de pico a vazio $I_{opico} = 0,205$ A;

Resistência do primário $R_1 = 9,522 \Omega$;

Resistência do secundário $R_2 = 0,000806667 \Omega$;

Indutância do primário $L_1 = 139,680831$ mH;

Indutância do secundário $L_2 = 0,01183321$ mH;

Resistência de magnetização $R_{mag} = 158.700 \Omega$;

Fluxo de magnetização $\lambda_0 = 51,8018018$ Wb-espira.

A tabela 5.4 resume as características dos onze transformadores que compõem o sistema elétrico da universidade e a tabela 5.5, seus respectivos parâmetros de entrada no elemento do ATP.

Tabela 5.4 – Características dos transformadores do sistema elétrico em estudo

SE	Trafo	Potência nominal S (VA)	Tensão de linha primária (V)	Tensão de linha secundária (V)	Tensão de fase secundária (V)	Frequência (Hz)	Impedância Z_{cc} (%)	Resistência R_{cc} (%)	Corrente a vazio I_0 (%)
UFU01	TR01.1	225000	13.800	220	127	60	4,75	1	2
	TR01.2	225000	13.800	220	127	60	4,75	1	2
UFU02	TR02.1	500000	13.800	220	127	60	5,1	1	2
	TR02.2	300000	13.800	220	127	60	4,46	1	2
UFU03	TR03.1	500000	13.800	220	127	60	3,5	1	2
UFU04	TR04.1	300000	13.800	380	219	60	6,28	1	2
	TR04.2	300000	13.800	220	127	60	4,43	1	2
UFU05	TR05.1	300000	13.800	220	127	60	5,62	1	2
	TR05.2	300000	13.800	220	127	60	3,43	1	2
UFU06	TR06.1	300000	13.800	220	127	60	4,51	1	2
UFU07	TR07.1	500000	13.800	380	219	60	4,79	1	2

Tabela 5.5 – Parâmetros de entrada no elemento transformador do ATP

SE	Trafo	Tensão de linha primária (V)	Tensão de fase secundária (V)	Corrente a vazio de pico Iopico (A)	Resistência do primário (Ω)	Resistência do secundário (Ω)	Indutância do primário L1 (mH)	Indutância do secundário L2 (mH)	Resistência de magnetização Rmag (Ω)	Fluxo de magnetização λ opico (Wb-espira)
UFU01	TR01.1	13.800	127	0,154	12,696	0,001075556	156,377807	0,01324772	211600	51,8018018
	TR01.2	13.800	127	0,154	12,696	0,001075556	156,377807	0,01324772	211600	51,8018018
UFU02	TR02.1	13.800	127	0,342	5,7132	0,000484	75,7870362	0,00642038	95220	51,8018018
	TR02.2	13.800	127	0,205	9,522	0,000806667	109,779487	0,00930009	158700	51,8018018
UFU03	TR03.1	13.800	127	0,342	5,7132	0,000484	50,8293245	0,00430606	95220	51,8018018
UFU04	TR04.1	13.800	219	0,205	9,522	0,002406667	156,591966	0,03957831	158700	51,8018018
	TR04.2	13.800	127	0,205	9,522	0,000806667	109,001833	0,00923421	158700	51,8018018
UFU05	TR05.1	13.800	127	0,205	9,522	0,000806667	139,680831	0,01183321	158700	51,8018018
	TR05.2	13.800	127	0,205	9,522	0,000806667	82,8689482	0,00702033	158700	51,8018018
UFU06	TR06.1	13.800	127	0,205	9,522	0,000806667	111,074965	0,00940984	158700	51,8018018
UFU07	TR07.1	13.800	219	0,342	5,7132	0,001444	70,9899653	0,01794257	95220	51,8018018

Para finalizar a parametrização do elemento transformador no ATP, são necessários pares de pontos de corrente versus fluxo concatenado, que representam a curva de saturação do transformador. Para calcular estes pares de pontos, além da corrente de magnetização de pico e do seu respectivo fluxo, relacionados ao ponto de joelho da curva de saturação do transformador e anteriormente calculados; é necessário conhecer a curva B x H do tipo de material magnético utilizado na construção do núcleo do equipamento [42].

Nesse caso, como a maioria dos transformadores de distribuição existente no Brasil utilizam chapas de aço-silício da fornecedora “Acesita”, a curva de material magnético que foi utilizada como base para os cálculos será a curva B x H da chapa de aço-silício da Acesita de 0,3 mm, apresentada na figura 5.9 [42].

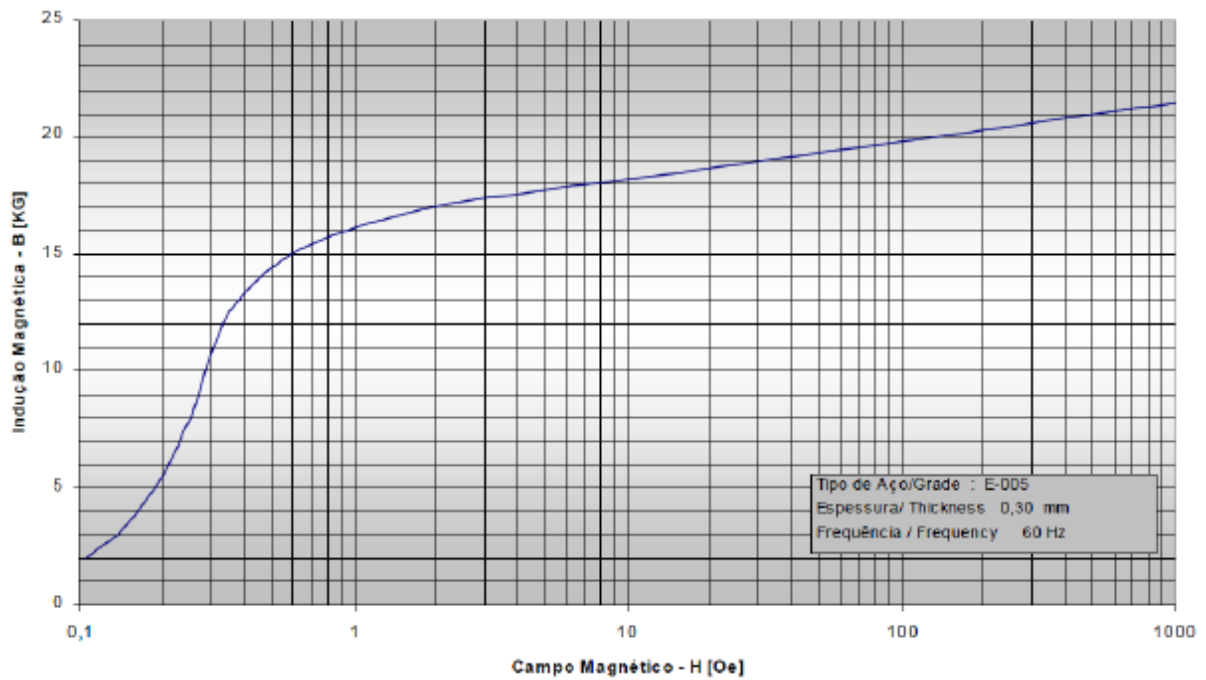


Figura 5.9 – Curva de magnetização (BxH) da chapa de aço silício de grãos orientados de 0,3 mm, utilizada na construção do núcleo dos transformadores em estudo.

Extraindo 10 pontos (BxH) da curva de magnetização da figura 5.9, conforme tabela 5.6, os outros pontos, corrente versus fluxo concatenado, podem ser calculados a partir das equações (5.1) e (5.2).

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

Ponto i	H [A/m]	B [T]	I _{pico} [A]	λ _{pico} [Wb]
1	6,684	0,2	I ₁	λ ₁
2	11,099	0,4	I ₂	λ ₂
3	17,729	0,8	I ₃	λ ₃
4	23,805	1,2	I ₄	λ ₄
5	31,495	1,4	I ₅	λ ₅
6	64,166	1,6	I _{0pico}	λ _{0pico}
7	136,311	1,7	I ₇	λ ₇
8	946,842	1,85	I ₈	λ ₈
9	7419,427	2,0	I ₉	λ ₉
10	30000,00	2,1	I ₁₀	λ ₁₀

$$I_{ipico} = \frac{I_{0pico}}{64,166} x H_i [A] \quad (5.1)$$

$$\lambda_{ipico} = \frac{\lambda_{0pico}}{1,6} \times B_i [Wb] \quad (5.2)$$

Onde:

i – ponto da curva que se quer calcular;

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].

Desta maneira foram obtidos os valores da tabela 5.7 para pontos de corrente versus fluxo concatenado, que representam a curva de saturação do transformador TR05.1 da subestação UFU05.

Tabela 5.7 – Pontos corrente x fluxo concatenado do transformador TR05.1

Transformador 5.1	
Ipico (A)	λpico (Wb)
0,02134998	6,475225225
0,03545233	12,95045045
0,05662982	25,9009009
0,07603773	38,85135135
0,10060106	45,32657658
0,20495849	51,8018018
0,43540343	55,03941441
3,0243946	59,89583333
23,6990701	64,75225225
95,8257429	67,98986486

A tabela 5.8 resume os parâmetros de entrada (corrente x fluxo concatenado), que representam a curva de saturação dos onze transformadores que compõem o sistema elétrico da universidade no elemento do ATP.

Tabela 5.8 – Pontos corrente x fluxo concatenado de todos os transformadores que compõem o sistema elétrico da universidade

Trafos TR0 1.1, 1.2		Trafos TR0 2.1, 3.1, 7.1		Trafos TR0 2.2, 4.1, 4.2, 5.1, 5.2, 6.1	
Ipico (A)	λpico (Wb)	Ipico (A)	λpico (Wb)	Ipico (A)	λpico (Wb)
0,01601248	6,475225225	0,035583293	6,47522523	0,021349976	6,475225225
0,02658925	12,95045045	0,059087218	12,9504505	0,035452331	12,95045045
0,04247236	25,9009009	0,094383033	25,9009009	0,05662982	25,9009009
0,0570283	38,85135135	0,126729545	38,8513514	0,076037727	38,85135135
0,07545079	45,32657658	0,167668432	45,3265766	0,100601059	45,32657658
0,15371887	51,8018018	0,341597479	51,8018018	0,204958487	51,8018018
0,32655257	55,03941441	0,72567238	55,0394144	0,435403428	55,03941441
2,26829595	59,89583333	5,04065767	59,8958333	3,024394602	59,89583333
17,7743026	64,75225225	39,49845023	64,7522523	23,69907014	64,75225225
71,8693072	67,98986486	159,7095715	67,9898649	95,8257429	67,98986486

Assim, com a definição de todos os elementos que compõem o ramal do transformador TR05.1 (cabos de média e baixa tensão, chaves, disjuntores e transformador) e seus parâmetros de entrada, este ramal foi representado no ATP conforme a figura 5.10.

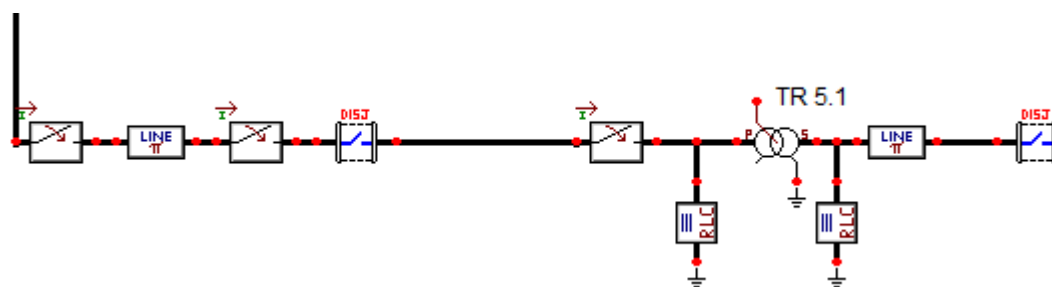


Figura 5.10 – Representação do ramal do transformador TR05.1 no ATP.

c) Sistema elétrico modelado

Ao estender a definição de todos os elementos que compõem o ramal do transformador TR05.1 (cabos de média e baixa tensão, chaves, disjuntores e transformador) e seus parâmetros de entrada para todos os ramaís que formam o sistema elétrico, juntamente com os elementos que compõem a concessionária de energia (fonte de tensão e impedância) e seus parâmetros; o sistema da universidade foi representado no ATP conforme a figura 5.11.

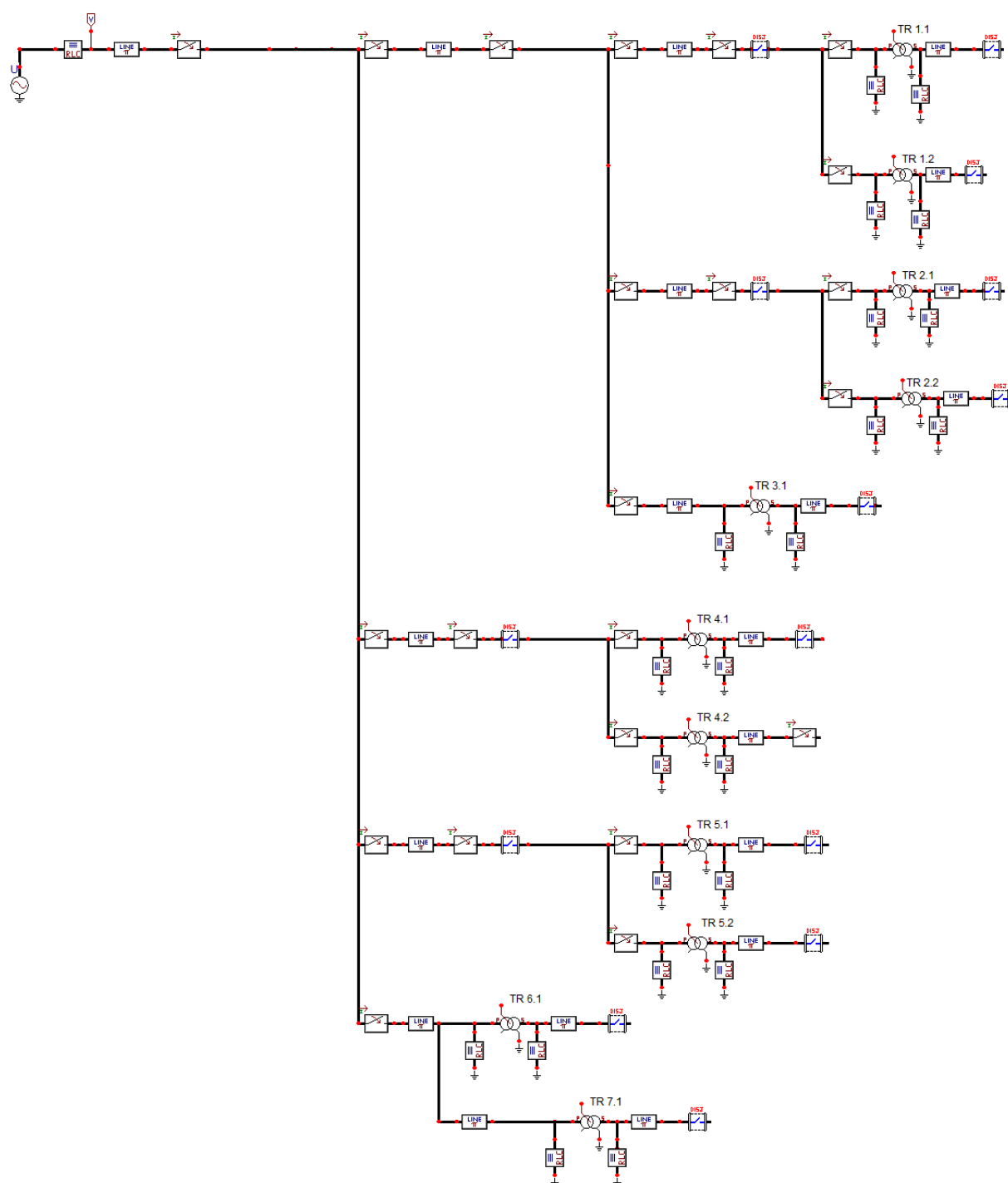


Figura 5.11 – Representação do sistema elétrico da universidade no ATP.

5.3 – Simulação

5.3.1 – Modelagem de elementos em condições específicas

A simulação feita no ATP com sistema elétrico da universidade tem o intuito de verificar a contribuição da concessionária e da universidade na distorção harmônica de tensão no ponto de entrega. Para isso, além da representação dos elementos já citados, é necessário modelar a carga de cada transformador e a injeção de correntes harmônicas geradas por essas cargas. Com essa modelagem completa, os resultados da simulação, ou seja, o espectro de tensão resultante no ponto de entrega será comparado com o espectro de tensão medido neste mesmo ponto para que seja feita a análise da contribuição harmônica.

Com a intenção de simular a pior situação, para cada transformador, foi considerada a maior carga atingida e a maior injeção de corrente harmônica, em uma quinta-feira, que é um dos dias da semana de maiores registros de carga.

Assim, tomando o ramal do transformador TR05.1, este equipamento teve seu carregamento máximo, em cada fase, na quinta-feira da sua semana de medição, dia 09/01/2014, conforme tabela 5.9.

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

Fase	I_{max} [A]	P [W]	Q [VAr]
A	643,6	79.075,57	17.074
B	632,7	76.409,66	21.778
C	583,3	71.842,33	16.407

A carga do transformador é modelada por uma impedância, representada no ATP pelo elemento *RLC 3-ph*, que é trifásica. Para a parametrização deste elemento é necessário o conhecimento da resistência, indutância e capacitância

da carga, para cada uma das fases. A carga considerada está conectada em estrela série aterrada.

Desta maneira, foram obtidos os valores da tabela 5.10 para os parâmetros de entrada da impedância da carga máxima do transformador TR05.1 nas três fases na quinta-feira de sua semana de medição, dia 09/01/2014.

Tabela 5.10 – Resistência e indutância da carga máxima do transformador TR05.1 nas três fases na quinta-feira de medição 09/01/2014

Fase	R [Ω]	L [mH]
A	0,190902	0,109336
B	0,190877	0,144309
C	0,211153	0,127914

A tabela 5.11 resume a 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 suas semanas de medição.

CAPITULO V – Análise da Contribuição Harmônica

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 suas semanas de medição

Transformador	Fase	I _{max} [A]	P [W]	Q [Var]
TR01.1	A	306,50	36.969,89	12.643,47
	B	325,10	41.360,80	5.018,18
	C	352,10	43.869,89	9.330,68
TR01.2	A	305,20	38.988,92	4.802,56
	B	250,00	32.010,51	3.057,95
	C	273,00	35.186,08	254,83
TR02.1	A	601,80	73.018,47	20.700,00
	B	615,80	77.330,97	13.603,98
	C	652,50	80.251,70	19.641,48
TR02.2	A	358,70	46.124,15	-2.038,64
	B	418,60	53.337,78	3.606,82
	C	367,10	46.241,76	6.743,18
TR03.1	A	476,30	59.767,33	10.742,05
	B	488,40	61.198,30	10.996,88
	C	456,30	56.728,98	13.466,76
TR04.1	A	190,80	40.745,45	4.254,55
	B	181,40	38.863,64	3.968,18
	C	201,70	42.627,27	3.845,45
TR04.2	A	567,30	67.980,68	23.189,49
	B	641,10	76.272,44	26.521,88
	C	603,90	68.255,11	33.284,66
TR05.1	A	643,60	79.075,57	17.073,58
	B	632,70	76.409,66	21.778,13
	C	583,30	71.842,33	16.407,10
TR05.2	A	797,30	99.207,10	21.836,93
	B	753,40	94.757,39	16.877,56
	C	811,90	102.559,10	13.603,98
TR06.1	A	513,90	64.315,06	13.231,53
	B	512,20	64.609,09	8.899,43
	C	562,20	70.234,94	11.565,34
TR07.1	A	498,20	107.795,50	19.022,73
	B	463,40	100.800,00	14.400,00
	C	579,90	125.345,50	18.859,09

A tabela 5.12 resume os parâmetros de entrada do elemento do ATP que representa a carga dos onze transformadores do sistema elétrico.

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 suas semanas de medição

Transformador	Fase	R [Ω]	L [mH]	C [μF]
TR01.1	A	0,393538	0,357005	x
	B	0,391341	0,125945	x
	C	0,353862	0,199641	x
TR01.2	A	0,418574	0,136764	x
	B	0,512168	0,129783	x
	C	0,472113	0,009070	x
TR02.1	A	0,201618	0,151612	x
	B	0,203927	0,095160	x
	C	0,188492	0,122372	x
TR02.2	A	0,358481	x	-167413,74
	B	0,304394	0,054600	x
	C	0,343135	0,132729	x
TR03.1	A	0,263453	0,125602	x
	B	0,256559	0,122289	x
	C	0,272461	0,171566	x
TR04.1	A	1,119238	0,310003	x
	B	1,181052	0,319879	x
	C	1,047794	0,250729	x
TR04.2	A	0,211232	0,191132	x
	B	0,185574	0,171168	x
	C	0,187157	0,242093	x
TR05.1	A	0,190902	0,109336	x
	B	0,190877	0,144309	x
	C	0,211153	0,127914	x
TR05.2	A	0,156063	0,091121	x
	B	0,166941	0,078873	x
	C	0,155585	0,054743	x
TR06.1	A	0,243532	0,132899	x
	B	0,246272	0,089981	x
	C	0,222214	0,097061	x
TR07.1	A	0,434303	0,203299	x
	B	0,469406	0,177877	x
	C	0,372737	0,148759	x

Observou-se que apenas a carga da fase A do transformador TR02.2 apresentou características capacitivas, isso porque existem dois bancos de capacitores fixos de 20 kVAr cada instalados na baixa tensão deste equipamento para a correção do fator de potência.

Em relação a injeção de corrente harmônica, da segunda até a nona harmônica, o ramal do transformador TR05.1 registrou em cada fase, na quinta-feira 09/01/2014, os valores máximos conforme tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Correntes harmônicas máximas nas três fases do transformador TR05.1 na quinta-feira de medição 09/01/2014

Fase/Ih (A)	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9
A	2,52	17,8	0,44	20,9	0,38	13,6	0,38	3,78
B	2,77	29,2	0,76	23,9	0,32	11	0,5	3,15
C	2,08	11,5	0,44	23,7	0,19	11	0,38	4,73

A injeção de corrente harmônica pela carga é modelada por uma fonte de corrente, representada no ATP pelo elemento *HFS Source*, que é monofásico, por isso a necessidade de três elementos por transformador. Para a parametrização deste elemento é necessário o conhecimento da frequência harmônica e da amplitude e ângulo da corrente harmônica. O elemento fonte de corrente pode ser visualizado na figura 5.12.



Figura 5.12 – Representação das fontes de correntes harmônicas por fase do sistema elétrico em estudo no ATP.

Neste estudo, foram inseridas apenas as frequências múltiplas de 60 Hz e entre 120 e 540 Hz e todas as correntes foram consideradas em fase, ou seja, ângulo zero. A amplitude da corrente harmônica é em valor de pico, para cada fase.

Desta maneira foram obtidos os valores da tabela 5.14 para os parâmetros de entrada das fontes de corrente harmônica do transformador TR05.1 nas três fases na quinta-feira de medição 09/01/2014.

CAPITULO V – Análise da Contribuição Harmônica

Tabela 5.14 – Correntes harmônicas máximas de pico nas três fases do transformador TR05.1 na quinta-feira de medição 09/01/2014

Fase/Ihpico (A)	I2pico	I3pico	I4pico	I5pico	I6pico	I7pico	I8pico	I9pico
A	3,563818	25,173001	0,622254	29,557063	0,537401	19,233304	0,537401	5,345727
B	3,917372	41,295036	1,074802	33,799704	0,452548	15,556349	0,707107	4,454773
C	2,941564	16,263456	0,622254	33,516861	0,268701	15,556349	0,537401	6,689230

A representação completa dos elementos que compõem o ramal do transformador TR05.1 no ATP para a simulação, ou seja, inclusive da carga e da injeção harmônica de corrente foi ilustrada pela figura 5.13.

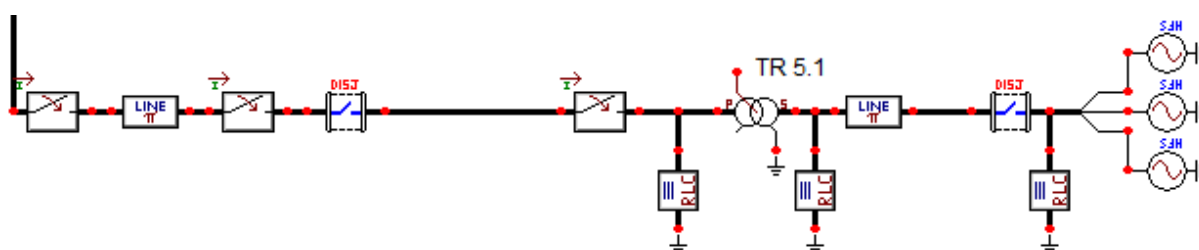


Figura 5.13 – Representação completa do ramal do transformador TR05.1 no ATP para simulação, inclusive da carga e da injeção harmônica de corrente.

A tabela 5.15 resume os parâmetros de entrada das fontes de corrente harmônica dos onze transformadores do sistema elétrico, nas três fases, na quinta-feira de suas semanas de medição.

CAPITULO V – Análise da Contribuição Harmônica

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

Trafo	Fase	I2pico	I3pico	I4pico	I5pico	I6pico	I7pico	I8pico	I9pico
TR01.1	A	3,379970414	14,42498	0,806102	26,72864	0,183848	9,8005	0,353553	3,210265
	B	4,016366517	21,07178	0,975807	22,62742	0,183848	10,8753	0,353553	2,588011
	C	3,210264787	11,49756	1,074802	28,28427	0,183848	13,27947	0,353553	3,026417
TR01.2	A	3,478965363	20,08183	0,707107	14,70782	0,707107	8,640845	0,353553	6,957931
	B	2,94156421	20,36468	0,806102	17,67767	0,353553	8,909545	0,183848	5,077027
	C	3,648670991	22,91026	0,890955	10,8753	0,806102	9,178246	0,452548	5,176022
TR02.1	A	4,638620485	20,78894	1,697056	20,64752	0,622254	17,96051	0,452548	8,471139
	B	5,260874452	20,22325	1,697056	25,45584	0,707107	13,46331	0,537401	5,798276
	C	5,176021638	15,13209	1,428356	20,22325	0,707107	11,22886	0,183848	7,848885
TR02.2	A	3,832518754	23,05168	0,890955	24,04163	1,074802	10,15405	0,707107	5,176022
	B	3,832518754	27,86001	0,707107	39,31514	0,890955	9,446947	0,537401	6,066976
	C	3,832518754	23,05168	0,806102	39,31514	0,806102	10,69145	0,452548	11,49756
TR03.1	A	6,151828996	30,68843	0,622254	17,67767	0,353553	12,38851	0,353553	8,202439
	B	5,699280656	22,486	0,806102	20,64752	0,353553	12,11981	0,353553	6,858936
	C	5,077026689	26,72864	0,622254	17,25341	0,268701	11,144	0,353553	6,590235
TR04.1	A	0,890954544	64,34672	0,268701	35,35534	0,268701	18,95046	0,183848	9,531799
	B	2,050609665	51,76022	0,353553	30,26417	0,268701	17,39483	0,183848	7,48119
	C	1,159655121	71,27636	0,622254	35,0725	0,622254	23,61737	0,452548	18,24335
TR04.2	A	2,94156421	21,2132	0,707107	39,45656	0,707107	29,1328	0,452548	5,176022
	B	3,2951176	35,49676	0,452548	46,10336	0,452548	13,90172	0,452548	5,883128
	C	3,2951176	33,23402	0,537401	36,48671	0,622254	28,84996	0,707107	7,396337
TR05.1	A	3,563818177	25,173	0,622254	29,55706	0,537401	19,2333	0,537401	5,345727
	B	3,917371568	41,29504	1,074802	33,7997	0,452548	15,55635	0,707107	4,454773
	C	2,94156421	16,26346	0,622254	33,51686	0,268701	15,55635	0,537401	6,68923
TR05.2	A	4,186072145	36,48671	0,806102	21,07178	0,268701	12,92591	0,268701	5,345727
	B	3,917371568	13,27947	0,806102	14,84924	0,268701	11,49756	0	2,489016
	C	4,454772721	26,44579	1,074802	21,92031	0,268701	17,53625	0	4,454773
TR06.1	A	4,808326112	12,84106	0,537401	20,93036	0,268701	21,07178	0,268701	6,321535
	B	7,042783541	32,95118	3,026417	21,2132	1,965757	17,81909	1,697056	4,186072
	C	8,287291476	23,47595	3,917372	20,5061	2,05061	16,68772	1,697056	5,614428
TR07.1	A	4,808326112	61,37687	0,975807	27,43574	0,452548	9,178246	0,353553	8,909545
	B	5,345727266	67,17514	0,890955	30,97128	0,806102	12,57236	0,622254	9,362094
	C	5,43058008	67,17514	0,707107	29,83991	0,622254	10,69145	0,452548	8,471139

A representação completa dos elementos que compõem o sistema no ATP para a simulação, ou seja, inclusive das cargas e das injeções harmônicas de corrente, foi mostrada na figura 5.14.

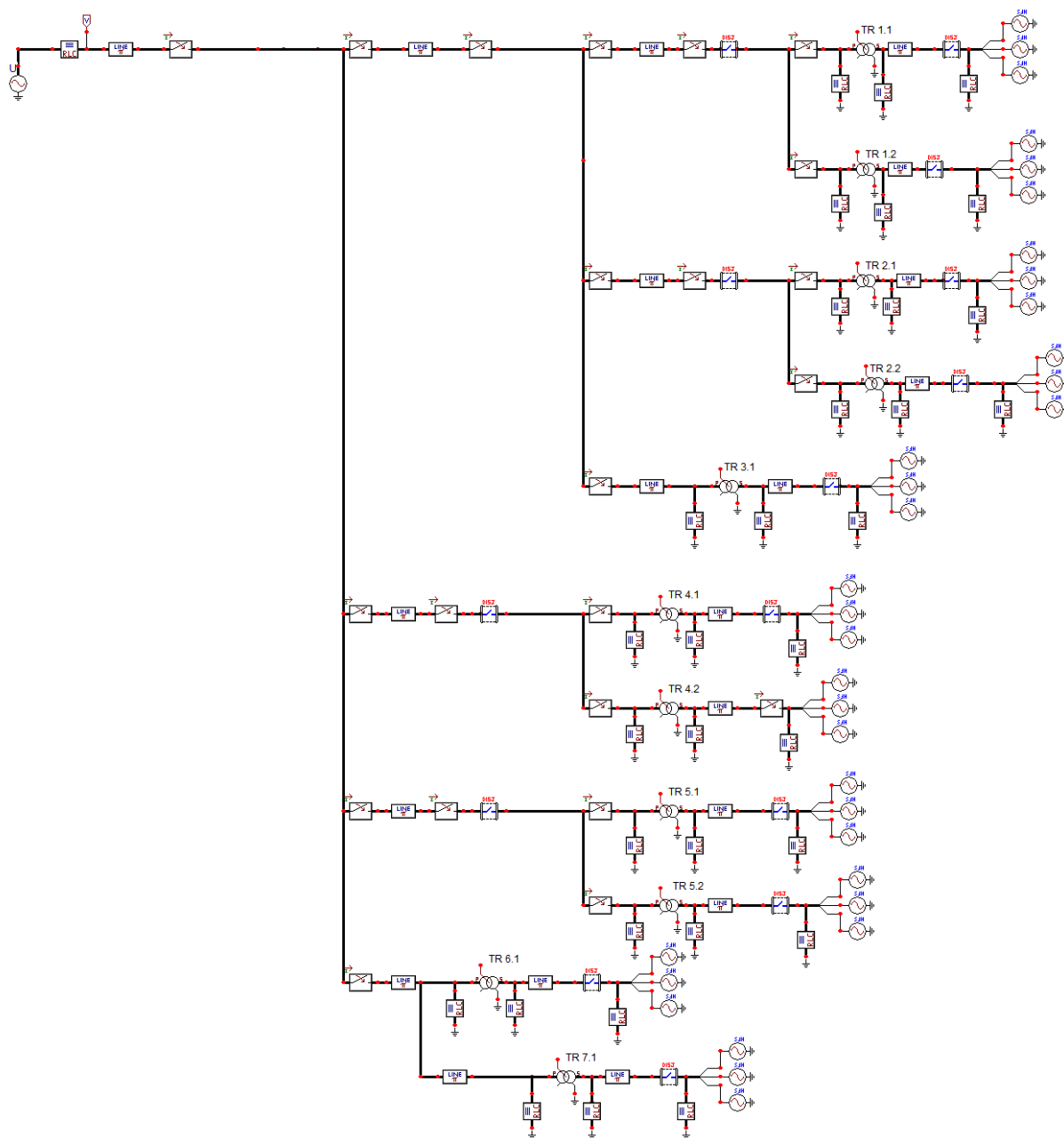


Figura 5.14 – Representação completa do sistema no ATP para simulação, inclusive das cargas e das injeções harmônicas de corrente.

Assim, com a modelagem da maior carga atingida e da maior injeção de corrente harmônica, em uma quinta-feira, de todos os transformadores que compõem o sistema elétrico da universidade; a última consideração a ser observada, em relação à simulação para a análise da contribuição harmônica, é o fato de que a fonte de tensão que representou a concessionária de energia, foi uma fonte ideal, ou seja, não apresentou distorções harmônicas de tensão. Essas

distorções harmônicas de tensão originadas exclusivamente da rede da concessionária só poderiam ser medidas com o desligamento de todo sistema elétrico interno da universidade ou através de métodos mais complexos de responsabilidade harmônica.

No entanto, como tal ação é inviável em qualquer dia da semana devido à importância de atividades desenvolvidas (processos, experiências etc) e cargas instaladas (refrigeradores, ultra freezers etc) permanentemente; não será possível validar completamente o modelo no ATP do sistema elétrico da universidade, isto é, verificar a proximidade da distorção harmônica de tensão medida no ponto de entrega com toda rede da universidade em funcionamento com a distorção harmônica de tensão resultante da simulação no ponto de entrega, considerando fonte de tensão distorcida da concessionária de energia elétrica e fontes de correntes harmônicas provenientes das cargas.

5.3.2 – Análise de resultados

Diante das condições da simulação expostas, o resultado da simulação permitiu a definição da contribuição da universidade na distorção harmônica de tensão no ponto de entrega e a comparação dessa distorção provocada somente pela universidade com a distorção provocada pela concessionária e pela universidade juntas.

A contribuição da universidade na distorção harmônica total de tensão simulada no ponto de entrega foi de aproximadamente 0,12 % nas três fases e a contribuição da mesma na distorção harmônica individual de tensão simulada no ponto de entrega na fase A é ilustrada pelo gráfico da figura 5.15 (a). Assim como esta, as outras fases apresentaram valores maiores de distorção harmônica individual de tensão de quinta ordem, entre 0,06 e 0,09 %.

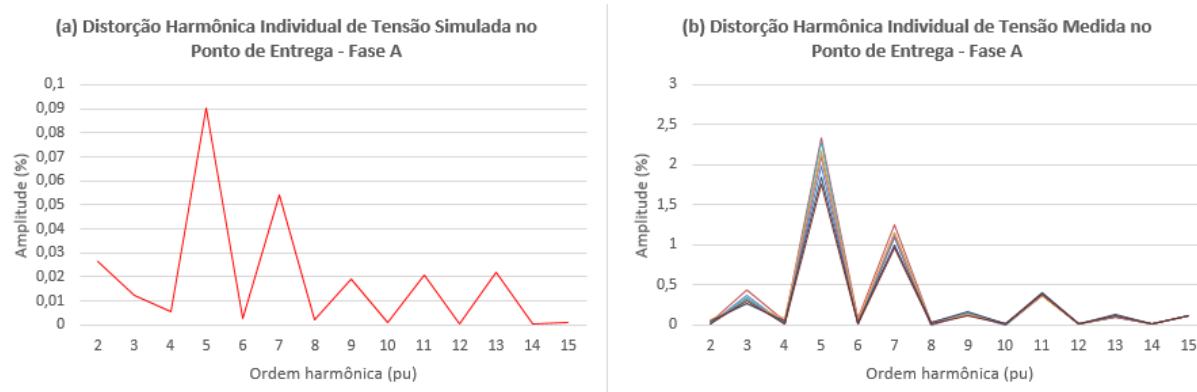


Figura 5.15 – Distorção harmônica individual de tensão simulada e medida no ponto de entrega para fase a do sistema elétrico em estudo.

Já a contribuição da universidade e concessionária juntas na distorção harmônica total de tensão medida no ponto de entrega, em oito quintas-feiras diferentes, foi cerca de 2,52 % nas três fases e a contribuição das mesmas na distorção harmônica individual de tensão medida no ponto de entrega na fase A, em oito quintas-feiras diferentes, é ilustrada pelo gráfico da figura 5.15 (b). Assim como esta fase, as outras apresentaram valores maiores de distorção harmônica individual de tensão de quinta e sétima ordem, respectivamente, cerca de 2,25 e 1,12 %.

Os valores que representam a contribuição da universidade, tanto na distorção harmônica total quanto individual de tensão, no ponto de entrega, foram bem menores em relação aos valores que representam a distorção provocada pela concessionária e pela universidade juntas. A diferença entre esses valores pode ser representativa da contribuição da concessionária de energia e justifica os valores das distorções harmônicas de tensão mais elevados registrados nos finais de semana, quando as cargas dos transformadores da universidade são menores.

Entretanto, apesar da contribuição da universidade na distorção harmônica de tensão no ponto de entrega ser pequena, o comportamento do espectro harmônico foi similar, como visto na comparação dos gráficos da figura

5.15, em que tanto a distorção harmônica individual de tensão medida quanto a simulada tiveram como harmônica mais significativa a quinta e sétima ordem. Tal fato valida, parcialmente, o modelo do sistema elétrico da universidade no ATP, pois não foi possível a realização da medição da tensão pré-distorcida disponibilizada pela concessionária local.

5.4 – Considerações finais

Após a avaliação de alguns indicadores da qualidade da energia no ponto de entrega da universidade no capítulo anterior, neste, utilizou-se a ferramenta computacional ATP (*Alternative Transients Program*) para um estudo mais aprofundado das distorções harmônicas de tensão. Para propósitos de modelagem do sistema elétrico e simulação para análise da contribuição harmônica, considerou-se a maior carga de cada transformador e a maior injeção de correntes harmônicas geradas por essas cargas em uma quinta-feira.

Isso permitiu comprovar que a contribuição da concessionária de energia na distorção harmônica de tensão no ponto de entrega é maior e por isso, este indicador apresenta valores, nos finais de semana, iguais ou até maiores, mesmo com a redução da carga na rede da universidade. E também foi possível verificar que a contribuição da universidade na distorção harmônica de tensão no ponto de entrega possui um espectro harmônico similar à distorção provocada pela concessionária e pela universidade juntas.

Só não foi possível validar totalmente o modelo do sistema elétrico da universidade no ATP, isto é, verificar a proximidade da distorção harmônica de tensão medida com a simulada no ponto de entrega, considerando também a fonte de tensão da concessionária distorcida; devido a inviabilidade do desligamento de todo sistema elétrico interno da universidade ou da execução de métodos mais complexos de responsabilidade harmônica.

Portanto, a ferramenta computacional ATP (*Alternative Transients Program*) proposta mostrou-se eficiente para a modelagem do sistema elétrico e simulação com o intuito de analisar a contribuição harmônica na rede do Campus Santa Mônica da UFU.

CAPÍTULO VI

Conclusões

Muito embora ao longo de cada capítulo tenha-se explorado aspectos relacionados com as constatações próprias aos desenvolvimentos feitos, é conveniente, neste momento, apresentar uma síntese dos principais pontos associados com os desenvolvimentos realizados, metodologias e indicadores propostos, simulação computacional, assim como outros aspectos gerais e conclusivos sobre os trabalhos até então elaborados. Nesse contexto, pode-se reconhecer que a presente pesquisa, nos termos atuais, evidencia significativas contribuições ao estabelecimento de um procedimento para o diagnóstico de eficiência energética e da qualidade da energia elétrica em um campus universitário.

Como constatado ao longo do texto, o diagnóstico de eficiência energética e da qualidade da energia elétrica de uma instalação, passa, a partir de agora, a contar com os seguintes avanços:

a) Quanto a metodologias e indicadores para diagnóstico de eficiência energética

Nesta fase inicial da pesquisa foram realizados trabalhos voltados para apresentação de algumas metodologias e indicadores utilizados para diagnosticar a instalação elétrica da universidade em relação à

eficiência energética como, principalmente, as curvas de carga típicas e as tabelas de gestão de faturas, e também os indicadores fator de carga e fator de potência. De fato, a importância do assunto se reveste de que as universidades federais tiveram um crescimento e uma modernização da carga ao longo dos últimos anos, em função de seus planos de expansão, e o diagnóstico de suas instalações se faz necessário para que as melhorias para atender as novas demandas de energia elétrica sejam feitas de forma planejada e eficiente. Ao término dos trabalhos, ficou evidenciado que a análise das curvas de carga permitiu concluir que o comportamento da carga deste campus universitário, de forma global (no ponto de entrada) e distribuída (nos transformadores), 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. Verificou-se também que, através da comparação de curvas de demanda diária com curvas de temperatura, 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, porém, 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. Também ficou evidenciado que a gestão de faturas, implementada através de tabelas de análise, permitiu concluir que é necessário um ajuste contratual entre a instituição de ensino e a concessionária de energia devido às ultrapassagens de

demanda de potência contratada e a modalidade tarifária em que está enquadrada não ser a mais vantajosa, o que reduziria os gastos da instituição. Por fim, ficou evidenciado que a análise dos indicadores de energia como o fator de carga e o fator de potência permitiu concluir, respectivamente, que nenhum transformador está trabalhando sobrecarregado, pelo contrário, quase na totalidade, há disponibilidade de ampliação da carga e que, em nenhum momento, a energia elétrica e a demanda de potência reativas excederam o limite permitido. Diante destas constatações ficou evidenciado que uma primeira contribuição desta investigação foi sugerir metodologias e fundamentações teóricas e normativas para implementá-las como Método de SOM e K-means, disposições da Resolução Normativa ANEEL nº 414 e definições de indicadores, que fossem úteis para o diagnóstico de eficiência energética desta e de qualquer outra instalação elétrica;

b) Quanto aos meios para diagnóstico de qualidade da energia elétrica

Esta fase do trabalho foi direcionada à proposição de uma metodologia para diagnosticar a instalação elétrica da universidade em relação à qualidade da energia elétrica através da abordagem dos principais conceitos, indicadores e valores de referência determinados por normas, assim como pela análise estatística e gráfica dos dados de medição registrados nas subestações e no ponto de entrada do campus. O conhecimento dos níveis da qualidade da energia elétrica de uma instalação é importante para que prejuízos associados à interrupção de processos, redução da vida útil dos equipamentos da rede elétrica, mal funcionamento das cargas e penalização das concessionárias de

energia, pela não adequação às normas, sejam evitados através da implantação de ações corretivas e preventivas para mitigação dos distúrbios da qualidade da energia elétrica. Como resultado dos trabalhos realizados nesta etapa, tem-se as seguintes conclusões. Os níveis de tensão observados no ponto de entrega e nos pontos de medição em baixa tensão apresentaram variações em seu valor eficaz dentro dos limites considerados como adequados pelo Prodist, Módulo 8, da ANEEL [30]. A máxima distorção harmônica total de corrente no ponto de entrega foi próxima de 10% e nos pontos de medição em baixa tensão foi 56,6%, o que permite concluir que a ligação delta-estrela dos transformadores contribuiu para bloquear algumas correntes harmônicas de entrarem no lado de 13,8 kV. Em relação a distorção harmônica individual de corrente, as harmônicas que apresentaram valores mais significativos, tanto no ponto de entrada como também nos pontos em baixa tensão, foram de terceira e quinta ordem. Os níveis de distorção harmônica total de tensão manifestados no ponto de entrega e nos pontos em baixa tensão ficaram dentro dos limites admissíveis e recomendados pelo Prodist que é, respectivamente, de 8% e 10%, mais precisamente ficaram abaixo de 3,3% e 5%. Já em relação a distorção harmônica individual de tensão, as harmônicas que apresentaram valores mais significativos, tanto no ponto de entrada como também nos pontos em baixa tensão, foram de quinta e sétima ordem. Os níveis de desequilíbrio de tensão observados no ponto de entrega e nos pontos em baixa tensão ficaram abaixo dos valores de referência sugeridos, respectivamente, pelo Prodist [30] e CENELEC EN50160:1999 [37], que são 2% e 3% e registraram valores máximos de 1,2% e 1,05%. Os níveis de flutuação de tensão de curta duração apresentados no ponto de entrega e nos

pontos em baixa tensão ficaram abaixo do valor de referência de 1,0 pu sugerido por [30], somente em alguns momentos essas referências foram ultrapassadas nos pontos em baixa tensão pelos valores máximos registrados, os quais estão associados a eventos de variações de tensão de curta duração e não a flutuações de tensão propriamente ditas. Verificou-se também que houve uma atenuação do indicador severidade de *flicker* de curta duração da média para a baixa tensão. O nível de flutuação de tensão de longa duração apresentado nos pontos em baixa tensão também ficou abaixo do valor de referência de 0,8 pu sugerido pelo Prodist [30]. Com isto fica evidenciado que estes indicadores propostos e obtidos a partir de um plano de medição para o diagnóstico da qualidade da energia elétrica no ponto de entrega e em vários pontos em baixa tensão da instalação elétrica deste campus, permite o conhecimento de forma global e distribuída da rede e o planejamento para implementar ações corretivas e/ou preventivas.

c) Quanto à modelagem do sistema elétrico e a simulação da distorção harmônica no programa ATP

Uma vez feito o levantamento de todo o diagrama unifilar do sistema elétrico da universidade e a construção de um diagnóstico de eficiência e qualidade da energia elétrica a partir de um plano de medição, fez-se necessário a modelagem desta rede, desde seu suprimento até cada transformador, para que sempre que necessário seja feita uma avaliação em meio computacional das grandezas elétricas e seus distúrbios em regime permanente e esporádicos, com o intuito prever resultados diante, por exemplo, da inserção de uma nova e significativa carga no sistema; da troca de um equipamento ou reconfiguração da rede de distribuição da universidade; de uma ação

corretiva; entre outras coisas. Para isso, descreveu-se a modelagem (escolha e parametrização) de todos os componentes do sistema elétrico da universidade na ferramenta computacional ATP (*Alternative Transients Program*). A utilidade deste modelo, neste trabalho, foi direcionada para um estudo da qualidade da energia do sistema elétrico da universidade, através de uma simulação em que foram modeladas a carga e a injeção de correntes harmônicas de todos os transformadores para que, através da análise do espectro de tensão gerado no ponto de entrada, fosse identificada a contribuição da concessionária energia elétrica e da instalação da universidade na distorção harmônica de tensão neste mesmo ponto. Como resultado desta simulação, comprovou-se que a contribuição da concessionária de energia na distorção harmônica de tensão no ponto de entrega é maior do que a contribuição da universidade, mas que esta última possui um espectro harmônico similar à distorção provocada pela concessionária e pela universidade juntas. Com isto fica evidenciado que o modelo do sistema elétrico desenvolvido em ferramenta computacional é fundamental para ações de conhecimento e planejamento do mesmo através desta e de outras simulações.

d) Sugestões para trabalhos futuros

Através dos avanços atingidos, ficou evidenciado que as metodologias, indicadores e ferramenta propostos para o diagnóstico da eficiência energética e da qualidade da energia elétrica da instalação elétrica deste campus permitem o conhecimento de uma rede elétrica e o planejamento para implementar ações técnicas nela. Não obstante a isto, é importante reconhecer que estudos complementares, certamente, ainda se fazem necessários. Dentro

destes aspectos destacam-se, na sequência, alguns pontos considerados relevantes para investigações futuras:

- Aprimorar o monitoramento da rede elétrica através da coleta simultânea de dados nas subestações e no ponto de entrega, para que seja possível um diagnóstico mais completo e preciso, no qual seriam identificados os eventos e distúrbios simultâneos. Assim como realizar medições da tensão pré-distorcida disponibilizada pela concessionária local, de forma a validar completamente a simulação em ferramenta computacional que permite avaliar a contribuição desta e da universidade na distorção harmônica de tensão no ponto de entrega.
- Maiores levantamentos voltados para classificação da carga (iluminação, refrigeração, equipamentos de escritório entre outros) e análise da porcentagem que cada uma representa no consumo elétrico total da instalação.
- Estender o uso do sistema elétrico modelado para outras simulações, por exemplo, em que sejam inseridas cargas variáveis ou que permitam a análise de variações de tensão de curta duração (vtcd) ou da susceptibilidade do sistema.

PUBLICAÇÕES

- [1] SILVA L. C., BARBOSA JR. J. A., SILVA F. D., MACEDO JR. J. R., “Determinação da tipologia de curvas de carga e análise tarifária em um campus universitário”, International Conference on Industry Applications – INDUSCON, Juiz de Fora/MG, Brasil, dezembro de 2014.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LOURENÇO T. G. M., “Avaliação da qualidade de energia elétrica no Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará”, dissertação de mestrado, UFC, Fortaleza/CE, 2012.
- [2] FERREIRA J. J., Indicadores de Eficiência Energética (Portugal): Projeto SAVE/EnR “Cross Country Comparison on Energy Efficiency Indicators”, Junho/1995 64p.
- [3] MORALES C., “Indicadores de consumo de energia elétrica como ferramenta de apoio à gestão: Classificação por prioridades de atuação na Universidade de São Paulo”, dissertação de mestrado, USP, São Paulo/SP, 2007.
- [4] DUARTE C. E., SCHAEFFER R., “Economic impacts of power electronics on electricity distribution systems”, *Energy*, vol. 35, no. 10, pp. 4010-4015, October, 2010.
- [5] NIITSOO J., PALU I., “Distorted load impacts on distribution grid”, in *Proc. 12th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2011*, Kouty nad Desnou, Czech Republic, 2011.
- [6] DROVTAR I., NIITSOO J., ROSIN A., KILTER J., PALU I., “Electricity consumption analysis and power quality monitorin in comercial buildings”, *IEEE*, Universidade de Tecnologia de Tallinn, Tallinn, Estonia, 2012.
- [7] MACHADO A. T., TOLEDO O. M., LANES M. M., “Análise e gerenciamento de curva de carga visando a eficiência energética – estudo de caso”, CEFET-MG, Leopoldina/MG, 2011.
- [8] MOREIRA S. G., ARAÚJO W. R., JÚNIOR A. R. S., LARA G. S., OKUMOTO J. C., NISHIMURA R., MARTOS E. A., KARMOUCHE A. R., “Utilização de controlador de demanda e gerador diesel em uma universidade”, CBEE/ABEE, UFMS, Campo Grande/MS, 2007.

-
-
- [9] OLIVEIRA G. F., BRUNONI R. E., “Criação de uma ferramenta para gerenciamento do consumo da energia contratada na Universidade Federal do Rio de Janeiro”, UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 2007.
- [10] KUMAR V. S., KANNAN P. S., SUDHAKAR T. D., KUMAR B. A., “Harmonics and interharmonics in the distribution system of an educational institution – a case study”, IEEE, International Conference on Power System Technology – Powercon, Singapore, India, 2004.
- [11] MUÑOZ A. M., REDEL M. D., PRIETO A. L., PLAZA A., GONZÁLEZ M., LUNA J., “Power quality in a university campus: the user’s perspective”, ICREPQ, Barcelona, 2004.
- [12] Leuven EMTP Center, “ATP - Alternative Transient Program - Rule Book”, Herverlee, Belgium, July 1987.
- [13] JUN W., SAHA T. K., “Simulation of power quality problems on a university distribution system”, IEEE, 2000.
- [14] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica - Resolução Normativa N^o 418, de 23 de novembro de 2010.
- [15] IEC 61000-4-30 (“Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and Measurements Techniques – Power Quality Measurement Methods”), 2008.
- [16] IEC 61000-4-7 (“Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and Measurements Techniques – General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation, for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto”), 2002.
- [17] IEC 61000-4-15 (“Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-15: Testing and Measurements Techniques – Flickermeter – Functional and Design Specifications”), 2010.
- [18] COTRIM A. M. B., “Instalações elétricas”, 4^a ed., São Paulo/SP, 2003.

-
-
- [19] RIBEIRO, S. P., “Ferramenta computacional para análise e gestão de indicadores de eficiência e qualidade da energia elétrica”, 57f., monografia (conclusão do curso), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2011.
- [20] VERDÚ S. V., GARCÍA M. O., SENABRE C., MARÍN A. G., FRANCO F. J., “Classification, filtering, and identification of electrical customer load patterns through the use of self-organizing maps”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21, nº 4, novembro de 2006.
- [21] SILVA F. D., BARBOSA JR J. A. F., TAVARES C. E., “Determinação de curvas típicas de carga através das técnicas de mineração de dados Som e K-médias”, Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, 2013.
- [22] PAULA G. M. de F., “Curvas típicas de carga para o planejamento operacional do sistema de distribuição”, dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2006.
- [23] KOHONEN T., “The Self-Organizing Map (SOM)”. Disponível em: <http://www.cis.hut.fi/projects/somtoolbox/theory/somalgorithm.shtml>. Acessado em 17 de dezembro de 2012.
- [24] GEMIGNANI M. M. F., “Proposição e análise comparativa de métodos alternativos de seleção e classificação de curvas de carga para definição de tipologias de estudos tarifários”, dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2009.
- [25] ZUCHINI M. H., “Aplicação de mapas auto-organizáveis em mineração de dados e recuperação de informação”, dissertação de mestrado, Unicamp, Campinas/SP, 2003.
- [26] LINDEN R., “Técnicas de agrupamento, revista de sistemas de informação FSMA”, Rio de Janeiro, p.18-36, 2009.
- [27] PINHEIRO L. C., “Método de representação espacial de clustering”, dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, 2006.

-
-
- [28] ALVES E. R., “Mineração de dados baseada em inteligência computacional: uma aplicação à determinação da tipologia de curvas de carga”, dissertação de mestrado, UFPA, Belém/PA, 2011.
- [29] INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>. Acessado em: 16 de janeiro de 2014.
- [30] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica – “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica”, de 11 de fevereiro de 2014.
- [31] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica - Resolução Normativa N^o 414, de 9 de setembro de 2010.
- [32] MARTINS A. S., BONAN G., FLORES G. C., “Entendendo o fator de potência”. Disponível em: http://www.cp.com.br/upl/artigo_4.pdf. Acessado em 21 de fevereiro de 2012.
- [33] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica - Resolução Homologatória N^o 1.507, de 5 de abril de 2013.
- [34] DUGAN R. C., MCGRANAGHAN M. F., SANTOSO S., BEATY H. W., “Electrical power systems quality”, 2nd ed., McGraw-Hill, Nova York, 2003.
- [35] RESENDE J. W., apostila de aula Cargas Elétricas não Convencionais em Redes Elétricas, Núcleo de Qualidade e Racionalização da Energia Elétrica, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, 2011.
- [36] OLIVEIRA J. C., apostila de aula Qualidade da Energia II, Núcleo de Qualidade e Racionalização da Energia Elétrica, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, 2011.
- [37] CENELEC, EN 50160, “Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems”, 1999.

-
-
- [38] MACEDO JR, J. R., “Uma contribuição à análise das componentes inter-harmônicas e seus efeitos nos indicadores de flutuação de tensão”, tese de doutorado, Vitória/ES, 2009.
- [39] PRYSMIAN, “Tabelas Dimensionamento Baixa Tensão NBR5410/2004,”. Disponível em: <http://www.prysmian.com.br/energy/downloads.html>. Acessado em: maio de 2013.
- [40] PRYSMIAN, “Tabelas Dimensionamento Média Tensão NBR14039/2003,”. Disponível em: <http://www.prysmian.com.br/energy/downloads.html>. Acessado em: maio de 2013.
- [41] CHAVES M. L. R., “Introdução ao Programa ATP”, apostila de Transitórios Eletromagnéticos, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, 2000.
- [42] REIS A., ROSENTINO JR. A. J. P., CAIXETA D., SANTILIO F. P., CUNHA G. H. B., GONDIM I. N., BARBOSA JUNIOR J. A. F. B., REZENDE P. H. O., SILVA T. V., “Curso de ATPDraw”, Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica e Dinâmica de Sistemas Elétricos, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, março de 2012.