



Universidade Federal
de Campina Grande

CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS PARA MONITORAMENTO DE
TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO**

Newton Sávio Souza Marques da Fonsêca

Campina Grande, Paraíba, Brasil
Março de 2015

NEWTON SÁVIO SOUZA MARQUES DA FONSÊCA

**SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS PARA MONITORAMENTO DE
TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO**

*Dissertação apresentada à Coordenação
de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de
Campina Grande, em cumprimento às
exigências para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica*

Área de Concentração: Processamento da Informação

Raimundo Carlos Silvério Freire, D. Sc.
Orientador

Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.
Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil
Março de 2015



F676s	<p>Fonsêca, Newton Sávio Souza Marques da. Sistema de aquisição de dados para monitoramento de transformadores de distribuição / Newton Sávio Souza Marques da Fonsêca. - Campina Grande, 2015. 98 f.</p> <p>Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2015. "Orientação : Prof. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire, Prof. Dr. Tarso Vilela Ferreira". Referências.</p> <p>1. Monitoramento de Transformadores de Distribuição. 2. Aquisição de Dados. 3. Rede de Sensores sem Fio. 4. Instrumentação Eletrônica. 5. Sistemas Embarcados. 6. Dissertação - Engenharia Elétrica. I. Freire, Raimundo Carlos Silvério. II. Ferreira, Tarso Vilela. III. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB). IV. Título CDU 621.314(043)</p>
-------	---

**"SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS PARA MONITORAMENTO DE
TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO"**

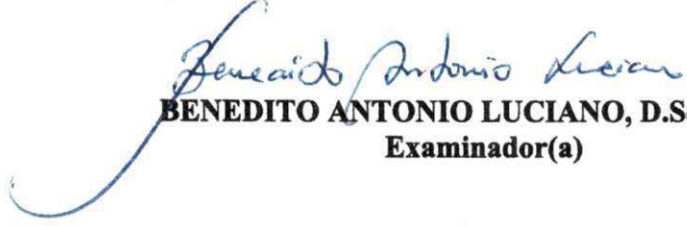
NEWTON SÁVIO SOUZA MARQUES DA FONSECA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 09/03/2015


RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG
Orientador(a)


TARSO VILELA FERREIRA, D.Sc., UFCG
Orientador(a)


EDMAR CANDEIA GURJAO, D.Sc., UFCG
Examinador(a)


BENEDITO ANTONIO LUCIANO, D.Sc., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

Aos meus pais, José Alexandre e Lúcia, que sempre acreditaram no meu potencial e fizeram o possível e o impossível para que eu me desenvolvesse, essa vitória é de vocês.

À minha irmã, Alexandra, meu exemplo de bondade, carácter e fonte de admiração.

Á minha namorada, Vanessa, por todo amor e cumplicidade durante nossa jornada. .

AGRADECIMENTOS

Aos professores Raimundo Carlos Silvério Freire e Tarso Vilela Ferreira pela confiança a mim depositada, pela excelência da orientação que me foi dada, além da amizade construída durante os últimos anos.

Ao professor Euler Cássio Tavares de Macêdo, que desde a minha graduação têm depositado confiança em mim, me orientando em diversos trabalhos. Serei sempre grato.

Ao doutorando Jalberth Fernandes de Araújo, jovem promissor professor, por todo apoio, tanto na execução prática do trabalho quanto na contribuição de material literário.

Ao mestrando Filipe Lucena, pela indispensável ajuda durante os testes e ensaios realizados.

Ao Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas e Laboratório de Alta Tensão por todo apoio estrutural para que esse trabalho fosse realizado.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Ao Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG pelo apoio oferecido e de cujo grupo me orgulho de fazer parte.

Aos meus colegas de pós-graduação que consciente ou inconscientemente ajudaram no meu desenvolvimento acadêmico e pela companhia nesta caminhada.

A persistência é o menor caminho do êxito.
Charles Chaplin

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Técnicas de monitoramento de transformadores [6].	5
Figura 2. Diagrama representativo das vantagens proporcionadas por uma rede inteligente, ou <i>smart grid</i> . [8].	6
Figura 3. Diagrama de blocos de um sistema de aquisição de dados. Fonte: Próprio autor.	8
Figura 4. Topologias das redes Zigbee. Fonte: Adaptado de [20].	10
Figura 5. Distúrbios que afetam à QEE. Adaptado de [24]	11
Figura 6. Tensão e corrente em um retificador de onda completa [31].	15
Figura 7. Variação da tensão devido à presença de harmônicos. Fonte: Próprio autor.	17
Figura 8. Topologia do sistema desenvolvido. Fonte: Próprio autor.	18
Figura 9. Fotografia do protótipo do sistema de aquisição de dados desenvolvido. Fonte: Próprio autor.	19
Figura 10. Topologia da UASPTD. Fonte: Próprio autor.	20
Figura 11. Fotografia da UASPTD. Fonte: Próprio autor.	21
Figura 12. Topologia da UACS. Fonte: Próprio autor.	25
Figura 13. Fotografia da Placa de Circuito Impresso UACS. Fonte: Próprio autor.	25
Figura 14. Circuito de Condicionamento do sinal de tensão. Fonte: Próprio autor.	26
Figura 15. Circuito de Condicionamento da Corrente. (a) Circuito do ACS712 (b) Circuito de condicionamento da resposta do ACS712. Fonte: Próprio autor.	27
Figura 16. Circuito de Retificação da Tensão da Rede Elétrica. Fonte: Próprio autor.	28
Figura 17. Circuito de Regulação de Tensão. Fonte: Próprio autor.	28
Figura 18. Fotografia da Unidade de Alimentação. Fonte: Próprio autor.	28
Figura 19. Apresentação das Formas de Onda Adquiridas. Fonte: Próprio autor.	31
Figura 20. Apresentação dos dados medidos do transformador em forma de quadro. Fonte: Próprio autor.	32
Figura 21. Tela de monitoramento de harmônicos por gráfico de barras. Fonte: Próprio autor.	33
Figura 22. Tela de monitoramento de harmônicos por quadro. Fonte: Próprio autor.	34
Figura 23. Teste experimental com carga resistiva. Fonte: Próprio autor.	36
Figura 24. Formas de onda da tensão na fase A obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo AQEE. Fonte: Próprio autor.	36
Figura 25. Formas de onda da tensão na fase B obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo AQEE. Fonte: Próprio autor.	37
Figura 26. Formas de onda da tensão na fase C obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo AQEE. Fonte: Próprio autor.	37
Figura 27. Formas de onda da corrente na fase A obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo AQEE no teste com carga resistiva. Fonte: Próprio autor.	38
Figura 28. Formas de onda da corrente na fase B obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo AQEE no teste com carga resistiva. Fonte: Próprio autor.	39
Figura 29. Formas de onda da corrente na fase C obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo AQEE no teste com carga resistiva. Fonte: Próprio autor.	39
Figura 30. Gráfico de Harmônicas da Corrente na Fase A. Fonte: Próprio autor.	41
Figura 31. Gráfico de Harmônicas da Corrente na Fase B. Fonte: Próprio autor.	42
Figura 32. Gráfico de Harmônicas da Corrente na Fase C. Fonte: Próprio autor.	42
Figura 33. Gráfico de Harmônicas da Tensão na Fase A. Fonte: Próprio autor.	43
Figura 34. Gráfico de Harmônicas da Tensão na Fase B. Fonte: Próprio autor.	43
Figura 35. Gráfico de Harmônicas da Tensão na Fase C. Fonte: Próprio autor.	44
Figura 36. Arranjo experimental com carga não linear. Fonte: Próprio autor.	45
Figura 37. Formas de onda da tensão na fase A obtidas pelo protótipo desenvolvido e AQEE no teste com carga não linear. Fonte: Próprio autor.	45
Figura 38. Formas de onda da tensão na fase B obtidas pelo protótipo desenvolvido e AQEE no teste com carga indutiva. Fonte: Próprio autor.	46
Figura 39. Formas de onda da tensão na fase A obtidas pelo protótipo desenvolvido e AQEE no teste com carga indutiva. Fonte: Próprio autor.	46
Figura 40. Formas de onda da corrente na fase A obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo AQEE no teste com carga não linear. Fonte: Próprio autor.	47
Figura 41. Formas de onda da corrente na fase B obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo AQEE no teste com carga não linear. Fonte: Próprio autor.	48

Figura 42. Formas de onda da corrente na fase C obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo AQEE no teste com carga não linear. Fonte: Próprio autor.	48
Figura 43. Gráfico de harmônicas da tensão na fase A no teste com carga não linear. Fonte: Próprio autor.	50
Figura 44. Gráfico de harmônicas da tensão na fase B no teste com carga não linear. Fonte: Próprio autor.	51
Figura 45. Gráfico de harmônicas da tensão na fase C no teste com carga não linear. Fonte: Próprio autor.	51
Figura 46. Gráfico de harmônicas da corrente na fase A no teste com carga não linear. Fonte: Próprio autor.	52
Figura 47. Gráfico de harmônicas da corrente na fase B no teste com carga não linear. Fonte: Próprio autor.	52
Figura 48. Gráfico de harmônicas da corrente na fase C no teste com carga não linear. Fonte: Próprio autor.	53
Figura 49. Arranjo experimental para o teste de monitoramento. Fonte: Próprio autor.	54
Figura 50. Conexões no quadro de energia do LAT. Fonte: Próprio autor.	55
Figura 51. TR monitorado. Fonte: Próprio autor.	56
Figura 52. Registro da tensão e corrente RMS e DHT na fase A no dia 06/02/2015. Fonte: Próprio autor.	58
Figura 53. Registro das potências aparente, ativa, reativa e fator de potência na fase A no dia 06/02/2015. Fonte: Próprio autor.	59
Figura 54. Registro da tensão e corrente RMS e DHT na fase B no dia 06/02/2015. Fonte: Próprio autor.	60
Figura 55. Registro das potências aparente, ativa, reativa e fator de potência na fase B no dia 06/02/2015. Fonte: Próprio autor.	61
Figura 56. Registro da tensão e corrente RMS e DHT na fase C no dia 06/02/2015. Fonte: Próprio autor.	62
Figura 57. Registro das potências aparente, ativa, reativa e fator de potência na fase C no dia 06/02/2015. Fonte: Próprio autor.	63
Figura 58. Registro da temperatura na carcaça do transformador. Fonte: Próprio autor.	64
Figura 59. Tensão RMS, Corrente RMS e DHT das tensões e correntes na fase A no dia 28/01/2015. Fonte: Próprio autor.	71
Figura 60. Potências Aparente, ativa, reativa e fator de potência na fase A no dia 28/01/2015. Fonte: Próprio autor.	72
Figura 61. Tensão RMS, Corrente RMS e DHT das tensões e correntes na fase B no dia 28/01/2015. Fonte: Próprio autor.	73
Figura 62. Potências Aparente, ativa, reativa e fator de potência na fase B no dia 28/01/2015. Fonte: Próprio autor.	74
Figura 63. Tensão RMS, Corrente RMS e DHT das tensões e correntes na fase C no dia 28/01/2015. Fonte: Próprio autor.	75
Figura 64. Potências Aparente, ativa, reativa e fator de potência na fase C no dia 28/01/2015. Fonte: Próprio autor.	76
Figura 65. Temperatura na carcaça do transformador no dia 28/01/2015. Fonte: Próprio autor.	77
Figura 66. Tensão RMS, Corrente RMS e DHT das tensões e correntes na fase A no dia 07/02/2015. Fonte: Próprio autor.	79
Figura 67. Potências Aparente, ativa, reativa e fator de potência na fase A no dia 07/02/2015. Fonte: Próprio autor.	80
Figura 68. Tensão RMS, Corrente RMS e DHT das tensões e correntes na fase B no dia 07/02/2015. Fonte: Próprio autor.	81
Figura 69. Potências Aparente, ativa, reativa e fator de potência na fase B no dia 07/02/2015. Fonte: Próprio autor.	82
Figura 70. Tensão RMS, Corrente RMS e DHT das tensões e correntes na fase C no dia 07/02/2015. Fonte: Próprio autor.	83
Figura 71. Potências Aparente, ativa, reativa e fator de potência na fase C no dia 07/02/2015. Fonte: Próprio autor.	84
Figura 72. Temperatura na carcaça do transformador no dia 07/02/2015. Fonte: Próprio autor.	85
Figura 73. Tensão RMS, Corrente RMS e DHT das tensões e correntes na fase A no dia 08/02/2015. Fonte: Próprio autor.	87
Figura 74. Potências Aparente, ativa, reativa e fator de potência na fase A no dia 08/02/2015. Fonte: Próprio autor.	88
Figura 75. Tensão RMS, Corrente RMS e DHT das tensões e correntes na fase B no dia 08/02/2015. Fonte: Próprio autor.	89
Figura 76. Potências Aparente, ativa, reativa e fator de potência na fase B no dia 08/02/2015. Fonte: Próprio autor.	90
Figura 77. Tensão RMS, Corrente RMS e DHT das tensões e correntes na fase C no dia 08/02/2015. Fonte: Próprio autor.	91

Figura 78. Potencias Aparente, ativa, reativa e fator de potência na fase C no dia 08/02/2015. Fonte: Próprio autor.....	92
Figura 79. Temperatura na carcaça do transformador no dia 08/02/2015. Fonte: Próprio autor.	93
Figura 80. Esquema Elétrico da UASPTD	95
Figura 81. Esquema elétrico da UCS.....	97
Figura 82. Esquema Elétrico da UA.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição de harmônicas para a tensão de alimentação nas fases A e C.	35
Tabela 2. Desvios percentuais e coeficientes de correlação inerentes às formas de onda de tensão medidas.	38
Tabela 3. Dados comparativos entre as formas de onda da corrente adquiridas pelo protótipo e AQEE. ...	39
Tabela 4. Dados comparativos das potências medidas pelo protótipo e AQEE.	40
Tabela 5. Distorções harmônicas totais medidas pelo protótipo e AQEE.	44
Tabela 6. Dados comparativos entre as formas de onda da tensão adquiridas pelo protótipo e AQEE.	46
Tabela 7. Dados comparativos entre as formas de onda da corrente adquiridas pelo protótipo e AQEE. ...	49
Tabela 8. Dados comparativos das potências medidas pelo protótipo e AQEE.	49
Tabela 9. Distorções harmônicas totais obtidas no protótipo e AQEE para o teste com carga não linear. .	53

LISTA DE ACRÔNIMOS

A/D	Analógico/Digital
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
RMS	<i>Root Mean Square</i>
LAT	Laboratório de Alta Tensão
LIMC	Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas
SH	<i>Sample and Hold</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Eletronics Engineers</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
FFD	<i>Full Function Device</i>
RFD	<i>Reduced Function Device</i>
EN	<i>European Standard</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
CBEMA	<i>Computer and Business Equipment Manufacturers Association</i>
ITI	<i>Information Technology Industry Council</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
UA	Unidade de Alimentação
UCS	Unidade de Condicionamento de Sinais
UASPTD	Unidade de Aquisição de Sinais, Processamento e Transmissão de Dados
UIA	Unidade de Interface com o Usuário
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
TC	Transformador de Corrente
DHT	Distorção Harmônica Total

RESUMO

Neste trabalho, é apresentado um sistema de aquisição de dados para transformadores trifásicos de distribuição. O sistema é capaz de medir e analisar formas de onda de tensão e corrente, calcular seus valores RMS, valores de harmônicas, distorção harmônica total, potência demandada, fator de potência e temperatura na carcaça do transformador. Os dados medidos são transferidos via rede sem fio, com protocolo ZigBee, para um computador pessoal, no qual um software de interface foi desenvolvido para concentrar e apresentar os dados na forma de valores numéricos e gráficos. O sistema de aquisição de dados utiliza um microcontrolador PIC18LF4520, um medidor de energia trifásico ADE7880 e um transceptor sem fio XBee-Pro. Os dados são medidos e enviados continuamente, permitindo assim que o usuário, a distância, monitore as variáveis elétricas e térmicas presentes no transformador de distribuição, e possa assim, avaliar as características da energia fornecida pelo equipamento. O sistema desenvolvido foi caracterizado e validado em laboratório com cargas lineares e não lineares, sendo posteriormente instalado em um transformador no Laboratório de Alta Tensão. No processo de validação, o sistema desenvolvido foi comparado com um Analisador de Qualidade de Energia Elétrica, e avaliados os desvios percentuais das medições realizadas dos dois equipamentos. O sistema desenvolvido apresentou desvios percentuais, em relação ao Analisador de Qualidade de Energia Elétrica, maiores nas medições dos sinais de corrente de cargas não lineares e menores nas medições dos sinais de tensão. O sistema pode ser utilizado não só para monitorar transformadores de distribuição, mas também qualquer outro equipamento que se adeque nos seus limites de corrente e tensão máximos.

Palavras chaves: Aquisição de dados, monitoramento de transformadores de distribuição, rede de sensores sem fio, instrumentação eletrônica, sistemas embarcados.

ABSTRACT

In this work, a data acquisition system for three-phase transformers distribution is presented. The system is able to measure and analyze waveforms of voltage and current, calculate its RMS values, harmonic values, total harmonic distortion, demanded power, power factor and temperature in the transformer housing. The measured data is transferred via wireless network with ZigBee protocol, to a personal computer, where a software interface was developed to center and present the data in the form of numerical and graphical presentations. The data acquisition system uses a microcontroller PIC18LF4520, a three-phase power meter ADE7880 and a wireless transceiver XBee-Pro. The data is measured and sent continuously, allowing a user, in distance, monitor the electrical variables inherent in the distribution transformer, and can thus evaluate the energy characteristics provided by the equipment. The system was characterized, developed and validated in the laboratory with linear and nonlinear loads, and then installed in a transformer located at Laboratório de Alta Tensão. The developed system has presented percentage deviations relative to the Electric Power Quality Analyzer, higher in measurements of current signals of nonlinear loads and lower in measurements of voltage signals. The system can be used not only to monitor distribution transformers, but also any other equipment that fits in their limits of maximum current and voltages.

Keywords: Data acquisition, distribution transformers monitoring, wireless sensor network, electrical instrumentation, embedded systems.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	Objetivos.....	2
1.1.1	Objetivo Geral.....	2
1.1.2	Objetivos específicos.....	2
1.2	Estrutura do Trabalho.....	3
2	Embasamento Teórico.....	4
2.1	Monitoramento de Transformadores de Distribuição.....	4
2.2	Sistema de Aquisição de Dados.....	7
2.2.1	Especificação de um Sistema de Aquisição de Dados.....	9
2.2.2	Rede de Transmissão Baseada no Padrão ZigBee.....	9
2.3	Fatores Determinantes na QEE Distribuída.....	11
2.3.1	Transitórios.....	13
2.3.2	Variações de tensão de curta duração.....	13
2.3.3	Variações de Tensão de Longa Duração.....	14
2.3.4	Fator de Potência.....	14
2.3.5	Flutuação de Tensão.....	15
2.3.6	Harmônicos e Inter-Harmônicos.....	15
3	Material e Métodos.....	18
3.1	Unidade de Aquisição de Sinais, Processamento e Transmissão de Dados.....	19
3.1.1	Medidor de Energia ADE7880.....	21
3.1.2	Microcontrolador PIC18LF4520.....	22
3.1.3	Módulo Xbee-Pro Series 2.....	23
3.1.4	Sensor de Temperatura LM-35.....	23
3.2	Unidade de Condicionamento de Sinais.....	24
3.2.1	Condicionamento dos Sinais de Tensão.....	25
3.2.2	Condicionamento dos Sinais de Corrente.....	26
3.3	Unidade de Alimentação.....	27
3.4	Unidade de Interface com o Usuário.....	29
4	Resultados.....	30
4.1	Unidade de Interface com o Usuário.....	30
4.2	Validação do Sistema.....	35
4.2.1	Testes com Cargas Lineares.....	35
4.2.2	Testes com Cargas Não Lineares.....	45
4.3	Monitoramento do Quadro de Energia do Laboratório de Alta Tensão.....	54
5	Conclusões e Trabalhos Futuros.....	65
	Referências Bibliográficas.....	67
	Apêndice A – Histórico de Dados Monitorados no Dia 28/01/2015 (Quarta-Feira).....	70

Apêndice B – Histórico de Dados Monitorados no Dia 07/02/2015 (Sábado).....	78
Apêndice C – Histórico de Dados Monitorados no Dia 08/02/2015 (Domingo).....	86
Apêndice D – Esquema Elétrico da UASPTD	94
Apêndice E – Esquema Elétrico da UCS.....	96
Apêndice F – Esquema Elétrico da UA.....	98

1 INTRODUÇÃO

Os transformadores de distribuição são elementos chave nos sistemas de potência, sendo manufaturados com o objetivo de trabalharem de forma satisfatória por longos períodos. Para tanto, é necessário que sejam submetidos às condições de operação que atendam determinados critérios. O funcionamento adequado desses equipamentos está diretamente ligado à Qualidade da Energia Elétrica (QEE) distribuída aos consumidores, a qual tem padrões cada vez mais rigorosos. A QEE distribuída afeta desde os usuários residenciais, refletindo na eficiência de aparelhos domésticos, até as indústrias de grande porte. As indústrias, por exemplo, necessitam de QEE para o correto funcionamento de seus equipamentos de medição cuja exatidão está correlacionada às variações em suas fontes de alimentação. Além disso a confiabilidade da continuidade do fornecimento de energia elétrica em conformidade com os padrões estabelecidos pelas agências regulamentadoras é extremamente desejável, a fim de não causar interrupções nos processos, causando prejuízos econômicos.

Com o avanço da tecnologia da informação, diversas técnicas têm sido desenvolvidas, com o intuito de facilitar a avaliação das condições de operação dos transformadores de distribuição. Por se tratarem de equipamentos com difícil acesso, além de operarem com tensões e correntes elevadas, o deslocamento de equipes para avaliar seu funcionamento, assim como a preservação das pessoas envolvidas nestes procedimentos são fatores importantes que devem ser levados em consideração no projeto dos sistemas de monitoramento.

A utilização de um esquema de manutenção com intervenções agendadas e os desligamentos não programados acarretam o deslocamento de uma equipe de manutenção e a manutenção propriamente dita, seja ela corretiva ou preventiva. Esses procedimentos oneram substancialmente as empresas de distribuição de energia elétrica. Uma forma de reduzir esses custos é o uso de ferramentas de monitoramento, que possibilitem a aquisição de dados que podem ser utilizados para prever uma possível falha do equipamento. Além disso, as ferramentas de monitoramento permitem o acompanhamento gradual das condições operativas do equipamento, proporcionando uma distribuição otimizada das intervenções de manutenção necessárias e a utilização do equipamento até o final de sua vida útil.

Para uma manutenção eficiente e de baixo custo é desejável que as ferramentas de diagnóstico sejam não invasivas e, além disso, que a aquisição da informação seja efetuada à

distância, garantindo a segurança do sistema e dos operadores. Assim, saindo da concepção de manutenção corretiva e preventiva, a manutenção preditiva fornece indicativos das condições reais de funcionamento dos equipamentos, tomando como base a coleta de dados relativos à grandezas que podem fornecer informações a respeito do estado atual, futuro e tempo de vida útil.

Do mesmo modo, destaca-se o valor da correta aplicação de técnicas de monitoramento, levando em consideração fatores que venham a influenciar o resultado de uma inspeção. Por isso, é preciso que tais fatores sejam quantificados e que sua influência nas medições seja explicitada, permitindo o aperfeiçoamento das técnicas de monitoramento atuais e tornando mais enfáticos os resultados apresentados pelos instrumentos, fornecendo assim, um auxílio à tomada de decisão.

A proposta central deste trabalho é desenvolver um protótipo de um sistema capaz de medir e registrar parâmetros que possibilitem investigar a QEE entregue por transformadores de distribuição. Para tanto, objetiva-se desenvolver uma unidade de monitoramento microcontrolada capaz de medir os sinais de tensão e corrente de transformadores de distribuição trifásicos, assim como seus valores de pico e *RMS*, valores de componentes harmônicas de tensão e corrente, distorção harmônica total e temperatura em um ponto da carcaça. Ainda objetiva-se desenvolver um *software* com ambiente gráfico de monitoramento em tempo real, de forma que se possam visualizar essas grandezas em um computador pessoal, assim como armazená-las para posterior análise.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados para monitoramento de transformadores de distribuição, capaz de medir e registrar grandezas elétricas e a temperatura de pelo menos um ponto da carcaça do equipamento.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos deste trabalho:

- i. Desenvolver uma unidade de monitoramento microcontrolada capaz de medir os sinais de tensão e corrente de transformadores de distribuição trifásicos, bem como a temperatura em um ponto da carcaça;
- ii. Desenvolver uma rotina computacional capaz de calcular os seguintes parâmetros, a partir das grandezas elétricas registradas: valores de pico e *RMS*, valores de componentes harmônicas de tensão e corrente, distorção harmônica total;
- iii. Desenvolver um *software* com ambiente gráfico de monitoramento em tempo real, de forma que se possam visualizar essas grandezas em um computador, assim como, armazená-las para posterior análise;
- iv. Implementar uma rede ZigBee e avaliar seu desempenho na interface entre o controlador e o computador;
- v. Comparar resultados do seu protótipo com resultados capturados pelo Analisador de Qualidade da Energia Elétrica (AQEE) da Fluke.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além do presente capítulo, de Introdução, este trabalho está estruturado com base em mais 4 capítulos, que serão apresentados a seguir.

No Capítulo 2, são apresentados os conceitos básicos concernentes ao monitoramento de transformadores de distribuição e uma breve revisão bibliográfica sobre o mesmo tema.

No mesmo capítulo, ainda são descritos, de forma breve, os blocos que compõem um sistema de aquisição de dados e o padrão de comunicação sem fio ZigBee. Por fim é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os fatores determinantes na QEE distribuída.

No Capítulo 3, são descritos os materiais e métodos, onde são abordados os módulos e dispositivos utilizados no sistema de aquisição de dados desenvolvido. Neste mesmo capítulo, são descritos os circuitos desenvolvidos e explicados seus princípios de funcionamento.

Os resultados obtidos são descritos no Capítulo 4. Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos processos de validação e testes do sistema de aquisição de dados desenvolvido.

Por fim, as conclusões e propostas de trabalhos futuros são explanadas no Capítulo 5.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Neste capítulo são abordados aspectos concernentes ao monitoramento de transformadores de distribuição, bem como os blocos básicos componentes de sistemas de aquisição de dados e rede transmissão de dados sem fio baseada em protocolo ZigBee. Também são abordados conceitos de qualidade de energia elétrica.

2.1 MONITORAMENTO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO

As interrupções no fornecimento de energia causam perdas financeiras em torno de 100 bilhões de dólares por ano. Uma interrupção momentânea de um segundo de duração ou menos, tem o mesmo impacto financeiro que uma interrupção longa, para indústrias de processo contínuo [1]. As interrupções de energia em um processo industrial podem inutilizar cadeias de processos químicos, por exemplo, resultado na perda de todo um lote de produção.

A diminuição das interrupções do fornecimento de energia pode ser alcançada mediante o monitoramento contínuo dos equipamentos elétricos, o que é desejável frente à economia associada. Usando o monitoramento contínuo é possível avaliar as condições em que o equipamento elétrico está operando, e em muitos casos pode-se realizar o seu diagnóstico.

Desta forma, muitos estudos foram realizados tendo como base a análise das condições operativas do equipamento. Esses estudos estão relacionados a transitórios eletromagnéticos [2], monitoramento e diagnóstico [3], análise de perdas [4], avaliação do comportamento de transformadores quando submetidos a diferentes frequências, em sua tensão de alimentação [5], dentre outros.

Adicionalmente, de acordo com diversas pesquisas, o estudo do monitoramento contínuo pode ser dividido em cinco categorias principais, apresentadas na Figura 1.

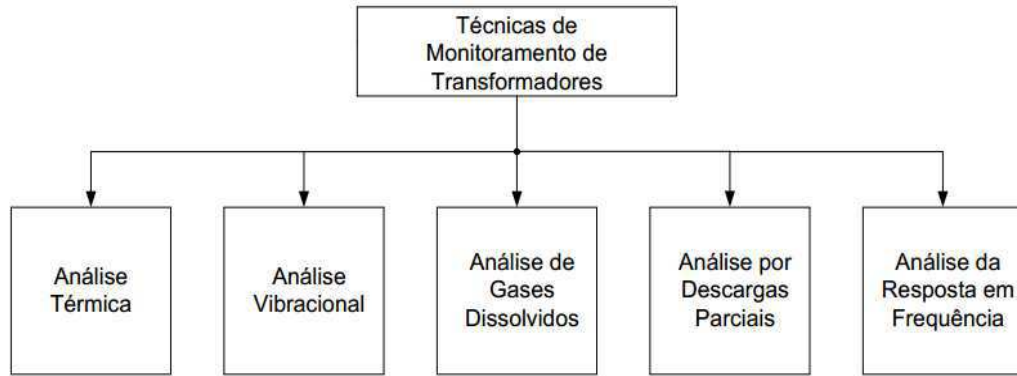


Figura 1. Técnicas de monitoramento de transformadores [6].

Nos trabalhos [6] e [7] foram realizadas pesquisas acerca de algumas técnicas de monitoramento de transformadores, apresentadas na Figura 1. Nessas pesquisas, são destacadas as características principais de cada uma dessas técnicas, que são de fundamental importância no que diz respeito à manutenção preditiva de equipamentos.

Atualmente o monitoramento contínuo de equipamentos está intimamente correlacionado ao uso de *Smart Grid*. Segundo [8], a tecnologia *Smart Grid* baseia-se na utilização intensiva de tecnologias de automação, computação e comunicações de monitoramento e controle da rede elétrica, as quais permitirão a implantação de estratégias de controle e otimização da rede de forma mais eficiente que as atualmente em uso.

Com os avanços da tecnologia, estão surgindo os chamados *Smart Meters*, os quais abrem a possibilidade de inovações importantes, tais como:

- Leitura automática dos dados relativos à consumidores individuais;
- Conexão e desconexão de consumidores;
- Controle coordenado de tensão;
- Monitoramento *on-line* das condições de funcionamento de linhas de transmissão, transformadores, etc.;
- Redução de custos operacionais.

Algumas vantagens no que diz respeito ao monitoramento contínuo, dos *Smart Grids* também são apresentadas na Figura 2.

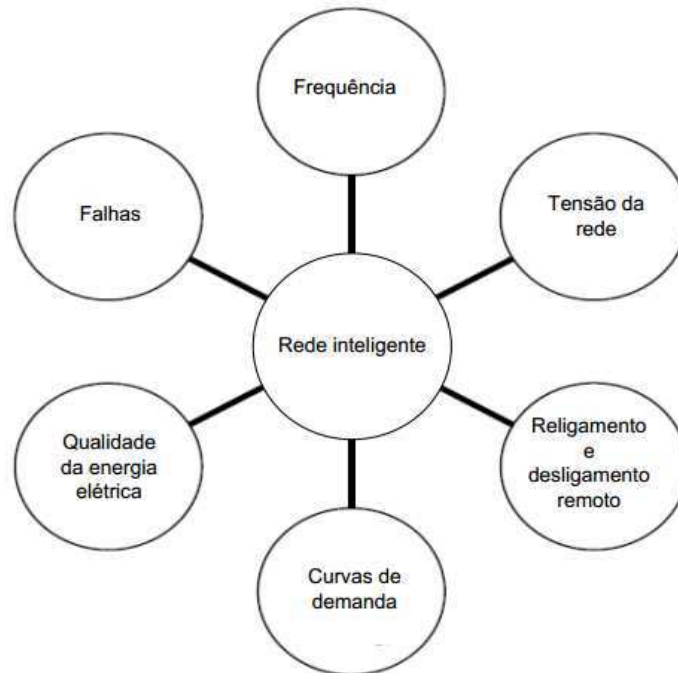


Figura 2. Diagrama representativo das vantagens proporcionadas por uma rede inteligente, ou *smart grid*. [9].

Assim, o desenvolvimento e gestão eficiente de uma *Smart Grid* são considerados, atualmente, importantes temas de pesquisa, tanto na academia quanto na indústria. Esse assunto diz respeito à forma como operar o sistema, sendo pelo uso de sistemas de comunicações, eletrônica de potência, e tecnologias de armazenamento de dados. Desta forma, elas podem ser definidas pelas suas capacidades e características operacionais, e não pelo uso de uma tecnologia específica. Entretanto, a tecnologia é a fundamental nos avanços de um sistema *Smart Grid*, justamente pelas suas características técnicas, como previsão, integração, interatividade, otimização, flexibilidade, acessibilidade, confiabilidade, economia, segurança, monitoramento e sensoriamento [10].

Em [11], foi desenvolvido um sistema para monitorar e gravar parâmetros como temperatura e nível de óleo de transformadores de distribuição. O sistema foi constituído por um sistema microcontrolado, com sensores de estado sólido e transmissão sem fio via ZigBee. Foram utilizados sensores resistivos sensíveis à temperatura do óleo e sensores de nível, com o intuito de prever possíveis falhas devido a eventuais irregularidades dessas variáveis.

Nos trabalhos realizados em [12], foi desenvolvido um sistema de monitoramento de tensão, corrente e temperatura para transformadores de distribuição que detecta o aumento indevido dessas variáveis e desliga o equipamento para evitar maiores danos. O sistema tem conexão direta com uma central, que é informada sobre o desligamento do equipamento e a causa.

Nos trabalhos desenvolvidos em [13], foi elaborado um sistema de monitoramento remoto da temperatura nos contatos externos do transformador de distribuição, de modo a detectar a oxidação dos mesmos durante a vida do equipamento.

Em [14], um sistema para monitoramento de um sensor ótico imerso no óleo do transformador foi desenvolvido. A partir do monitoramento do comprimento de onda refratado pelo óleo, foram feitas caracterizações que permitiram a avaliação da qualidade do mesmo, por meio da análise do isolante do transformador.

Ainda na área de monitoramento de transformadores, pode-se citar [11], o qual descreve um sistema para monitoramento e análise de transformadores de distribuição. Neste trabalho, foi desenvolvido um *hardware* capaz de medir e analisar diversas variáveis de um transformador de distribuição direcionadas à detecção de roubo de energia em tempo real.

Trabalhos na área de desenvolvimento de algoritmos para avaliação de transformadores de distribuição também têm sido foco de estudo. Em [15], foi desenvolvido um algoritmo para análise do óleo de transformadores de distribuição. Este algoritmo é baseado na análise da temperatura do óleo e do ambiente e temperaturas no ponto quente do transformador, resultado em um percentual de vida útil do mesmo.

Desta forma, percebe-se a variedade de aplicações de técnicas para a monitoramento de transformadores de distribuição. Assim, este trabalho procura dar continuidade às contribuições no tema, aplicando tecnologias já difundidas para desenvolver um equipamento embarcado que permita o monitoramento de variáveis que possam fornecer subsídio à avaliação das condições de operação do transformador de distribuição.

2.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O sistema de aquisição de dados é um bloco fundamental no desenvolvimento deste trabalho. Além de efetivamente adquirir os dados, o sistema de aquisição de dados proposto tem o objetivo de possibilitar o acompanhamento em tempo real das variáveis elétricas destes equipamentos. Para tanto, os dados devem ser rapidamente disponibilizados à uma rede de transmissão baseada no padrão ZigBee, e após trafegarem na rede, devem ser armazenados em um computador pessoal, no qual uma interface gráfica permitirá ao usuário visualizá-los.

Os sistemas de aquisição de dados têm o objetivo de adquirir dados sobre um fenômeno elétrico ou físico, tais como: tensão, corrente elétrica e temperatura [16]. Ele deve ser projetado

para atender às especificações exigidas por uma determinada aplicação. Ele é composto por condicionadores de sinais e conversores A/D.

Na Figura 3 é apresentado um diagrama de blocos genérico do sistema de aquisição de dados de n -canais.

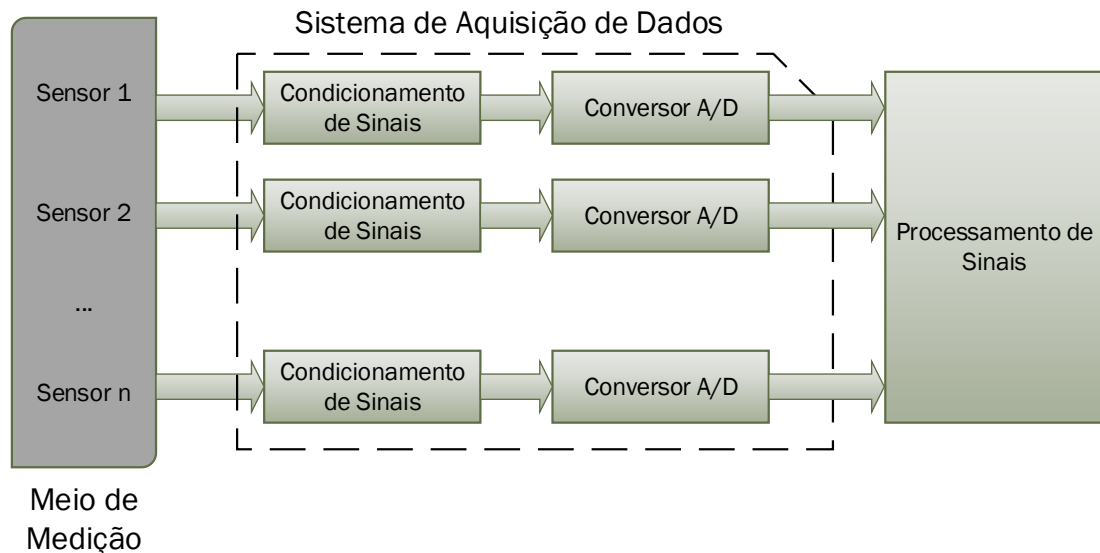


Figura 3. Diagrama de blocos de um sistema de aquisição de dados. Fonte: Próprio autor.

Os sensores são dispositivos que mudam seu comportamento sob a ação de uma grandeza física, podendo fornecer direta, ou indiretamente um sinal que indica os valores desta grandeza. O transdutor é um dispositivo que além de responder a um estímulo, pode converter uma forma de energia em outra. Os sinais adquiridos por meio de sensores ou transdutores apresentam uma grande diversidade de forma, amplitude e frequência [17]. A função do condicionador de sinais é adequar os parâmetros do sinal adquirido para uma posterior etapa de conversão analógico para digital e às condições de segurança necessárias ao processo. Sinais de tensão ou corrente em alta intensidade requerem maior rigor nas condições de segurança em que o sistema deve operar, o que introduz complexidade ao desenvolvimento deste trabalho [18].

O conversor A/D é responsável por converter o sinal analógico em um sinal digital e é formado basicamente por amostrador-segurador SH, do inglês *sample/hold*, quantizador e codificador. Para assegurar que o processo de amostragem satisfaça a condição de Nyquist, é necessário se conhecer a largura de banda do sinal [19]. Considerando-se o sinal com uma banda $[0; f_{max}]$, tem-se que a frequência de amostragem é dado por (1):

$$f_{amostragem} \geq 2f_{max} \quad (1)$$

A etapa de processamento digital de sinais permite a implementação de diversas técnicas tais como: filtragem, análise em frequência, compressão de dados, encriptação, etc.

2.2.1 ESPECIFICAÇÃO DE UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Para se especificar um sistema de aquisição de dados, é necessário considerar, principalmente, os seguintes parâmetros: amplitude e largura de banda do sinal de entrada, número de canais analógicos, duração do evento e resolução das amostras [17].

A faixa dinâmica do sinal de entrada corresponde ao intervalo de valores que o sinal de entrada pode assumir. A largura de banda do sinal de entrada é a faixa de frequências do sinal de entrada a ser efetivamente trabalhada. O número de canais analógicos corresponde ao número de sinais que o sistema vai adquirir. A duração do evento corresponde à janela de tempo para a visualização das características principais do sinal medido. O número de bits que o conversor A/D utiliza para representar o sinal analógico define a resolução das amostras. Quanto maior a resolução, maior o número de divisões em que a faixa do sinal será representada, portanto, quanto maior a resolução mais sensível é o conversor.

2.2.2 REDE DE TRANSMISSÃO BASEADA NO PADRÃO ZIGBEE

Um sistema de transmissão de dados sem fio pode ser composto por uma rede de transmissão de dados utilizando o padrão ZigBee, implementando uma topologia de rede sem fio.

O padrão de comunicação ZigBee IEEE 802.15.4 foi desenvolvido pela ZigBee Alliance em conjunto com o *IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)*. O desenvolvimento engloba várias empresas que compartilham o objetivo de fornecer tecnologias para criar um padrão de baixo consumo de energia, baixo custo, segurança, confiabilidade, com funcionamento em rede sem fios baseado em uma norma aberta global.

Um módulo ZigBee opera na frequência ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), sendo na Europa de 868 MHz (1 canal), 915 MHz (10 canais) nos Estados Unidos. No Brasil, opera na faixa de 2,4 GHz, com uma taxa de transmissão que vai de 20 kbps a 250 kbps e o seu baixo consumo de energia o torna apropriado para aplicações portáteis [20].

Em uma rede ZigBee existem dois tipos de dispositivos: FFD (*Full Functions Device*) ou dispositivos de funções completas e RFD (*Reduced Functions Device*) ou dispositivos de funções reduzidas. Os dispositivos podem desempenhar as funções: coordenador, roteador e dispositivo final.

O coordenador só pode ser implementado por um dispositivo FFD e é responsável pela inicialização, distribuição de endereços, manutenção da rede, reconhecimento dos nós, entre outras funções. Pode ser utilizado como interligador entre redes ZigBee. O roteador só pode ser implementado por um dispositivo FFD, tem as características de um nó normal na rede, podendo também exercer a função de roteador intermediário entre nós, sem precisar do coordenador, o que permite a expansão da rede. O dispositivo final é o ponto da rede onde os atuadores ou sensores serão hospedados e pode ser implementado através de um dos dispositivos FFD ou RFD.

Quanto à topologia, as redes ZigBee podem ser: em estrela, em árvore e em malha. Na Figura 4 são apresentadas as três topologias.

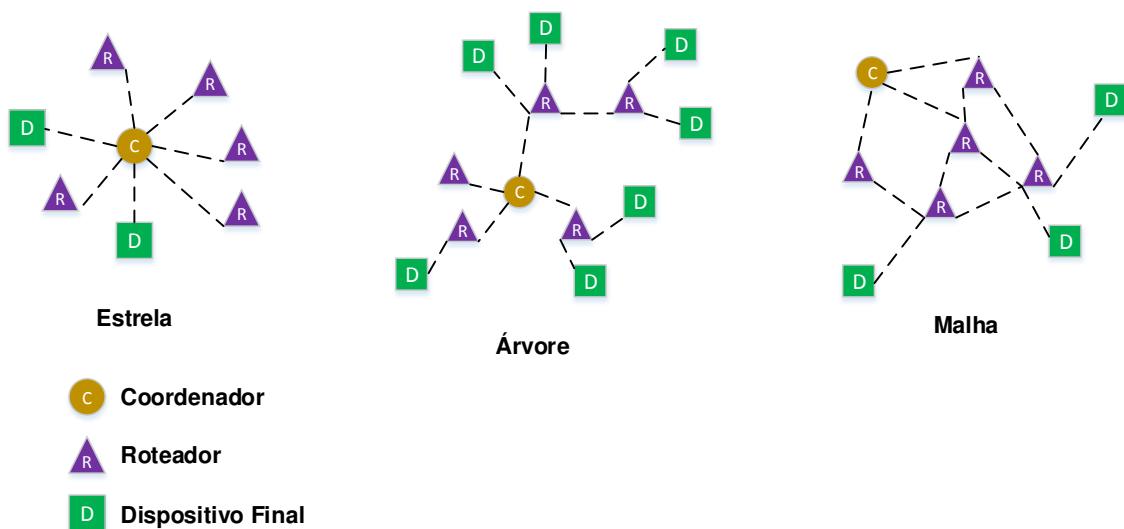


Figura 4. Topologias das redes Zigbee. Fonte: Adaptado de [21].

A rede em estrela é formada por um coordenador central conectado a dispositivos finais ou roteadores. A rede em árvore é formada por topologias em estrela interligadas por roteadores, sob o comando de um coordenador. Na rede em malha todos os dispositivos podem se comunicar entre si e tem apenas um coordenador [21].

O ZigBee tem indicação para diversas aplicações, entre as quais, redes de aquisição de dados, automação de controles residenciais, manutenção em rede elétrica (por exemplo, medidores), aplicação na área de médica (como monitoramento de pacientes).

2.3 FATORES DETERMINANTES NA QEE DISTRIBUÍDA

O termo Qualidade da Energia Elétrica (QEE), que virou jargão no setor elétrico nos últimos anos, tem sido usado *lato-sensu* para expressar as mais variadas características da energia elétrica entregue pelas concessionárias aos consumidores [22].

O termo “qualidade da energia” inclui uma gama de fenômenos, abrangendo áreas de interesse de sistemas da energia elétrica até problemas relacionados com a comunicação em redes de transmissão de dados. Dessa forma, devem ser divulgados e reconhecidos por todos os setores envolvidos com o consumo, transmissão e geração de energia elétrica [23].

De acordo com [24], problema de QEE é qualquer problema de energia manifestado na tensão, corrente ou nas variações de frequência que resulte na falha ou má operação de equipamentos dos consumidores.

Os principais distúrbios que afetam a QEE elétrica são:

- Transitórios;
- Variações de tensão de curta duração (“*sag*”);
- Variações de tensão de longa duração (“*swell*”);
- Desequilíbrios;
- Distorções da forma de onda: harmônicos, cortes de tensão, ruídos, etc.;
- Flutuações de tensão;
- Variações de frequência.

Na Figura 5, são apresentados alguns dos efeitos mais comuns que afetam a QEE.

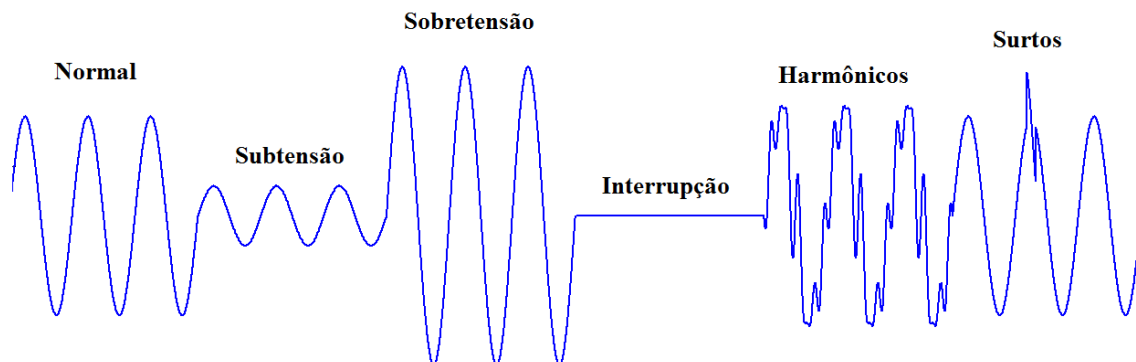


Figura 5. Distúrbios que afetam à QEE. Adaptado de [25]

No contexto mundial, a Europa tem se destacado como sendo a região do planeta com legislação e aplicação de padrões de QEE mais avançados, uma vez que a norma EN 50160

[26] foi implementada em diversos países. Já nos Estados Unidos, a norma IEEE 519 tem sido utilizada apenas como referência, e poucas vezes implementadas nas cláusulas de contrato entre clientes e concessionárias [25]. As normas técnicas que tratam de QEE no mundo são:

- EN 50160: é uma norma que avalia *flicker*, harmônicas e desvios/variações de tensão;
- IEC 61000-4-15: é uma norma de medição de *flicker* que inclui especificações para medidores;
- IEC 61000-4-7: descreve uma técnica de medição padrão para harmônicas;
- IEEE 519 (1992): é uma prática recomendada pela IEEE, utilizada principalmente por concessionárias de energia nos EUA. Descreve níveis aceitáveis de harmônicas para o ponto de entrega de energia pela concessionária;
- IEEE 1159 (1995): é uma prática recomendada pela IEEE para monitoramento e interpretação apropriada dos fenômenos que causam problemas de QEE;
- CBEMA: Computer and Business Equipment Manufacturers Association. A CBEMA virou ITI em 1994. A curva CBEMA define os níveis de suportabilidade de equipamentos, em função da magnitude da tensão e da duração do distúrbio. Distúrbios que caíam for a da curva podem causar danos aos equipamentos;
- ITI: Information Technology Industry Council. Grupo trabalha para defender os interesses da indústria de informática.

No Brasil, o órgão regulamentador do setor elétrico, e conseqüentemente, da QEE distribuída é a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Com o intuito de normatizar e fiscalizar os aspectos de QEE distribuída, a ANEEL criou em 2008 o PRODIST, que são módulos elaborados pela mesma que padronizam as atividades técnicas relacionadas ao sistema de distribuição de energia elétrica. O Módulo 8 [27], trata especificamente sobre de qualidade de serviço e de produto das distribuidoras de energia elétrica. A qualidade do produto, refere-se aos parâmetros normativos de conformidade de tensão em regime permanente, além das perturbação nas formas de onda, estes parâmetros serão brevemente discutidos neste capítulo. A qualidade de serviço, refere-se aos procedimentos relativos aos indicadores de qualidade e dos tempos de atendimento.

O Módulo 8 da ANEEL, estabelece parâmetros de conformidade de qualidade do produto em regime permanente ou transitório, que são:

- Tensão em regime permanente;

- Fator de potência;
- Harmônicos;
- Desequilíbrios de tensão;
- Flutuação de tensão;
- Variações de tensão curta e longa duração;
- Variação de frequência.

Cada um destes parâmetros será rapidamente apresentado nas subseções a seguir.

2.3.1 TRANSITÓRIOS

Um transitório, é qualquer alteração súbita nas características e operação de um sistema de energia elétrica. Na maioria das vezes, os transitórios tem pequena duração, porém merecem atenção pois submetem equipamentos à níveis de tensão e corrente indesejados, podendo resultar em prejuízos financeiros. Os transitórios impulsivos são causados por descargas atmosféricas, e os oscilatórios, por chaveamentos [23].

2.3.2 VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

As variações de tensão de curta duração se caracterizam por apresentarem alterações momentâneas ou instantâneas.

As principais causas de afundamentos de tensão (*sag*) são os chaveamentos de cargas elevadas, partidas de motores e curtos-circuitos em pontos de fornecimento de energia que causam uma redução no valor eficaz da tensão, momentaneamente, para valores abaixo de 0,9 pu e acima de 0,1 pu, na frequência fundamental, com duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto [28]. O curto-circuito causa um significativo aumento de corrente, e conseqüentemente, uma queda na tensão devido às impedâncias do sistema. O chaveamento de cargas elevadas como motores, ou flutuações geradas por cargas, durante sua energização, podem representar efeitos de afundamento de tensão [29].

As principais causas das elevações de tensão (*swell*) são as interrupções de fornecimento de energia elétrica à cargas elevadas, desligamento de banco de capacitores, atuação de reguladores de tensão e descargas atmosféricas induzidas, causando um aumento entre 1,1 a 1,8 pu, com duração entre de 0,5 ciclo e 1 minuto [28]. Os efeitos das elevações de tensão causam sobretensões nos equipamentos, causando danos como queima de

componentes eletrônicos, danificação de banco de capacitores, além de provocar o acionamento de dispositivos de proteção (fusíveis, disjuntores, relés de proteção) [30].

2.3.3 VARIAÇÕES DE TENSÃO DE LONGA DURAÇÃO

As variações de tensão de longa duração se caracterizam por apresentarem alterações com um período de tempo maior que 1 minuto. Na literatura, estes efeitos são frequentemente denotados de sobretensão, ou em inglês “*overvoltage*”, e subtensão, ou em inglês “*undervoltage*”.

A sobretensão é caracterizada pelo aumento da tensão em valores maiores de 1,1 pu, com durações maiores que minuto [28]. As principais causas destes efeitos são: desenergização de faltas nos sistemas de distribuição e transmissão, variações de impedância na rede, *taps* de transformadores conectados inadequadamente [30]. Os efeitos das sobretensões são similares aos *sags*, porém com problemas adicionais, tais como: aquecimento substancial de equipamentos e condutores, danificação de máquinas e interrupções em processos industriais.

A subtensão, é caracterizada pela redução da tensão em valores menores que 0,9 pu com uma duração maior que um minuto [28]. As principais causas que contribuem para estes fenômenos são: conexões de cargas excessivas à rede elétrica, desligamento de banco de capacitores, e conseqüentemente, o excesso de reativos na rede elétrica, limitando a capacidade do sistema de distribuição de fornecer potência ativa [31]. Os principais problemas das sobretensões são: redução da iluminação de lâmpadas, interrupção de máquinas, processos industriais e residenciais, dentre outros.

2.3.4 FATOR DE POTÊNCIA

O fator de potência, para circuitos lineares, é definido como a razão entre a potência ativa (P) e a potência reativa (S), de acordo com (2).

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2)$$

Ao se tratar de um circuito não linear, como por exemplo, um retificador, cujas formas de onda de tensão e corrente na entrada desse circuito são representadas pela Figura 6, deve-se levar em consideração a taxa de distorção harmônica total da corrente. Desta maneira, o fator de potência é dado por (3), onde ϕ é a defasagem entre a tensão e corrente [32].

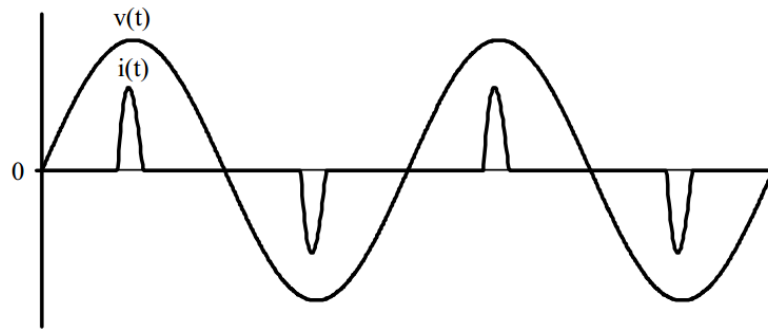


Figura 6. Tensão e corrente na entrada de um circuito retificador de onda completa [32].

$$FP = \frac{\cos(\phi)}{\sqrt{1 + DHT^2}} \quad (3)$$

O fator de potência é um importante indicativo de QEE, pois infere diretamente na capacidade do sistema de distribuição de energia elétrica de suprir potência ativa em cargas, uma vez que a demanda de carga reativa pode ser suprida localmente por meio de bancos de capacitores e reatores fixos ou controlados. As normas estabelecidas por [28], definem que consumidores com certos níveis de consumo controlem seus fatores de potência para um valor mínimo de 0,92.

2.3.5 FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

A flutuação de tensão compreende as variações aleatórias, repetitivas ou esporádicas no valor eficaz da tensão entre 0,95 à 1,05 pu. Estas flutuações são geralmente causadas por cargas de potência elevada operando em regimes intermitentes, como: fornos a arco, partidas simultâneas de motores, máquinas de solda, etc.

Os principais efeitos da flutuação de tensão são a instabilidade de dispositivos eletrônicos. O problema do cintilamento de luz, do inglês *flicker*, por exemplo, tem sido fonte de preocupação especial devido aos seus efeitos à saúde humana. As cintilações de luz podem causar desconforto fisiológico significativo, fadiga física e psicológica dentre outros efeitos patológicos para seres humanos [33].

2.3.6 HARMÔNICOS E INTER-HARMÔNICOS

Harmônicos e inter-harmônicos são a origem de muitos efeitos indesejados no sistema elétrico. Podem causar interferências em sistemas de comunicação, provocar perdas adicionais

por efeito Joule na rede elétrica e em motores, causar mau funcionamento de dispositivos de estado sólido e provocar ressonância em bancos de capacitores.

O acoplamento magnético entre os circuitos da rede elétrica e os circuitos de comunicação pode causar problemas de interferência nos últimos. Uma corrente no circuito da rede elétrica produz um campo magnético que induz uma corrente nos condutores de comunicação circunvizinhos. O nível de interferência depende da magnitude e frequências das correntes induzidas e da blindagem dos condutores de comunicação [34].

As perdas por efeito Joule são expressas pelo produto do quadrado da corrente pela resistência que ela atravessa. Quando existem harmônicos ou inter-harmônicos nas formas de onda de corrente, perdas adicionais surgirão. As perdas podem ser expressas por (4).

$$I^2R = I_{60Hz}^2R_{60Hz} + I_{300Hz}^2R_{300Hz} + I_{420Hz}^2R_{420Hz} + \dots \quad (4)$$

As distorções nas tensões que alimentam motores podem criar correntes harmônicas significativas que não resultam em torque e geram perdas adicionais que aumentam a temperatura interna dos motores. O aumento da temperatura pode causar a redução da vida útil do motor. Alguns equipamentos de controle partem do pressuposto que a tensão fornecida pela rede elétrica é perfeitamente senoidal. O cruzamento de zero dessa tensão é utilizado como referência temporal. Se a tensão da rede contiver distorções harmônicas, o tempo entre dois cruzamentos pode variar e desse modo, o sistema de controle não funcionará adequadamente.

Correntes harmônicas também podem causar problemas de ressonância em circuitos capacitivos e indutivos. Em redes elétricas que utilizam bancos de capacitores para correção de fator de potência, tanto a ressonância em paralelo como a ressonância em série podem ocorrer. Na ressonância em série, as impedâncias dos indutores e capacitores se anulam e correntes de amplitudes elevadas surgirão na frequência de ressonância. Na ressonância em paralelo, a impedância é teoricamente infinita na frequência de ressonância, originando sobretensões de amplitude elevada.

Um dos efeitos mais conhecidos dos inter-harmônicos é a oscilação da intensidade da luz elétrica (*flicker*). Os inter-harmônicos também podem causar interferências nas transmissões em baixas frequências de equipamentos que utilizam tecnologia de portadora por linha de energia (*Power Line Carrier, PLC*), e podem prejudicar o desempenho de filtros aplicados para limitar harmônicos de baixa frequência [35]. Inter-harmônicos também afetam de maneira significativa a operação de equipamentos eletrônicos conectados ao sistema elétrico. A interface destes equipamentos eletrônicos conectados ao sistema elétrico é realizada por

fontes CC compostas de retificadores, capacitores e reguladores de tensão. Quando as ondas de tensão da rede elétrica são compostas apenas pela fundamental e seus harmônicos, os seus picos ocorrem sempre nas mesmas posições angulares do ciclo de onda e sempre com a mesma amplitude. Isto garante que o regulador de tensão corrija a flutuação de tensão nos terminais do capacitor [36]. Quando as ondas de tensão da rede possuem inter-harmônicos, os picos de tensão ocorrem de maneira irregular, conforme ilustrado na Figura 7 (e).

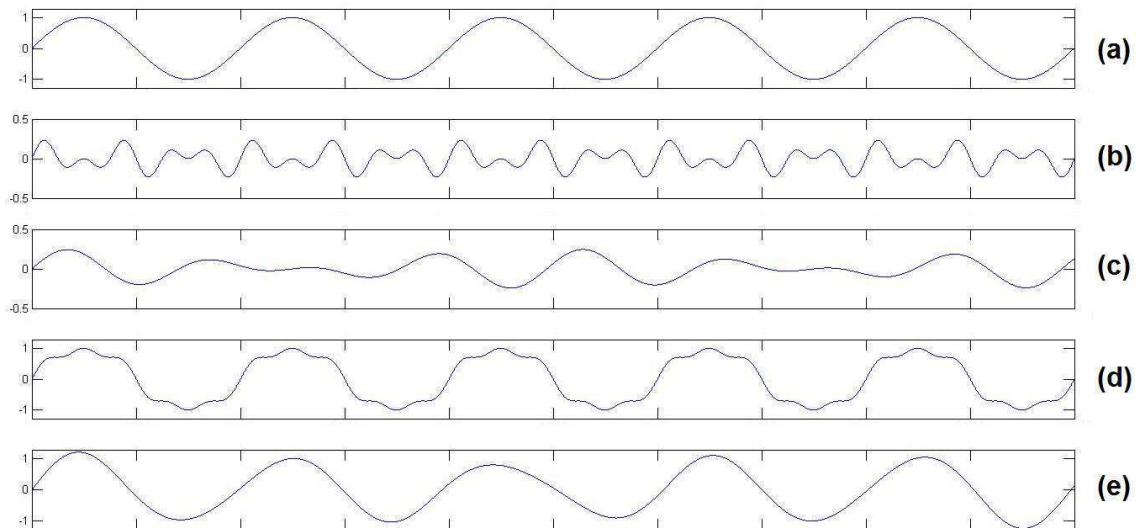


Figura 7. Variação da tensão devido à presença de harmônicos. Fonte: Próprio autor.

Na Figura 7 (a), é apresentado o gráfico da componente fundamental do sinal. Na Figura 7 (b), é apresentado um sinal composto por harmônicos pares e ímpares da fundamental. Na Figura 7 (c), é apresentado um sinal composto por inter-harmônicos. Os sinais da Figura 7 (d) e Figura 7 (e), são as composições do sinal da fundamental com harmônicos pares e ímpares, e fundamental com inter-harmônicos, respectivamente

3 MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo trata da apresentação do material e dos métodos utilizados no desenvolvimento e validação do sistema de aquisição de dados para transformadores de distribuição aqui proposto. Inicialmente, são apresentadas algumas partes constituintes do sistema proposto, assim como suas principais características. O sistema foi modulado em quatro unidades: unidade de alimentação (UA), unidade de condicionamento de sinais (UCS), unidade de aquisição de sinais, processamento e transmissão de dados (UASPTD) e unidade de interface com o usuário (UIU).

Os módulos UA, UCS, UASPTD são as partes físicas do sistema, compostos por microcontroladores, dispositivos de processamento de sinal, amplificadores operacionais dentre outros componentes eletrônicos. De forma integrada, estes módulos são responsáveis por adequar os níveis de tensão e corrente ao conversor analógico digital do processador de sinais, estabelecer um protocolo de comunicação via ZigBee e transmitir estes dados para um computador pessoal.

O módulo UIU é composto por um *software* de monitoramento desenvolvido como ferramenta de interação entre o sistema de aquisição de dados e o usuário. Neste *software* é possível visualizar todos os dados medidos pelo sistema na forma de gráficos e relatórios.

De forma ilustrativa, a topologia do sistema foi desenvolvida de acordo com a exposta na Figura 8.

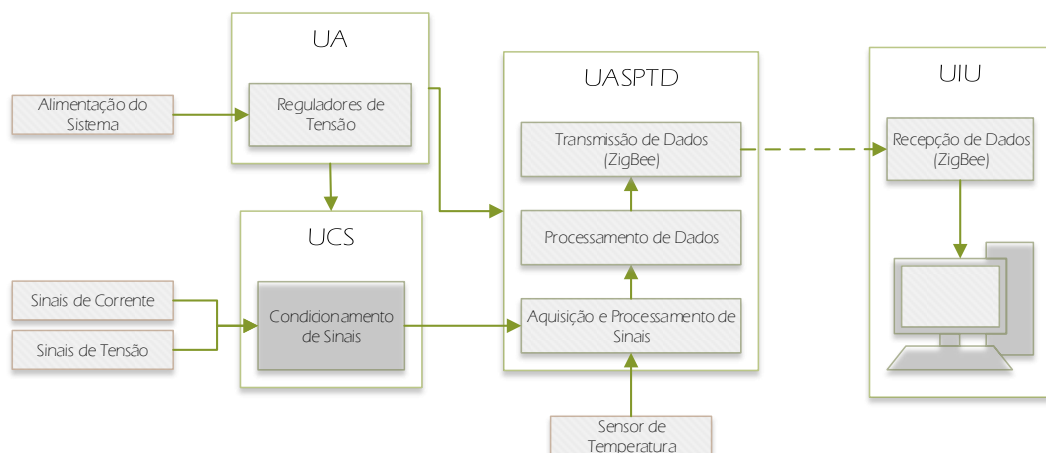


Figura 8. Topologia do sistema desenvolvido. Fonte: Próprio autor.

Na Figura 9 é mostrada a fotografia da versão final do protótipo do sistema de aquisição desenvolvido.

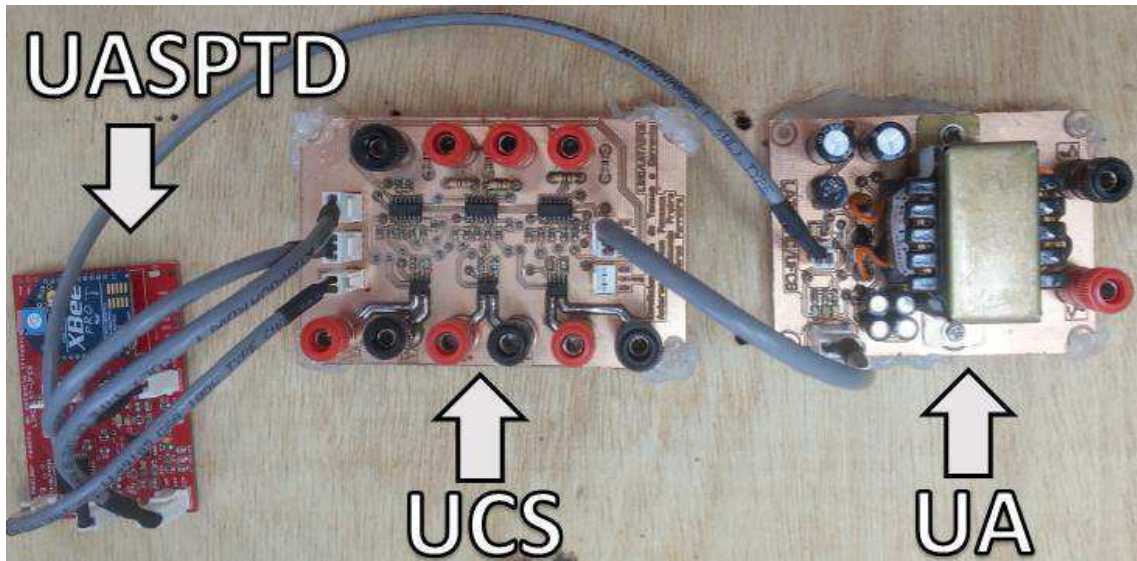


Figura 9. Fotografia do protótipo do sistema de aquisição de dados desenvolvido. Fonte: Próprio autor.

Ainda neste capítulo será descrito o procedimento realizado para a validação do sistema desenvolvido. Com o intuito de validar o sistema, de forma a conhecer o nível de confiabilidade de suas medições, foram realizados testes em laboratório com cargas conhecidas e instrumentos comerciais de análise da QEE foram utilizados como referência. Em um dos testes, foram comparadas as formas de onda de tensão e corrente medidos pelo sistema desenvolvido com as registradas por um AQEE. Ambas as medições foram exportadas para o software Matlab® [37], onde as devidas análises foram realizadas.

3.1 UNIDADE DE AQUISIÇÃO DE SINAIS, PROCESSAMENTO E TRANSMISSÃO DE DADOS

A unidade que realiza a aquisição dos sinais e o processamento e transmissão dos dados é baseada em um processador digital de sinais, um microcontrolador e um transceptor sem fio ZigBee. A função principal desta unidade é discretizar as formas de onda das tensões e correntes trifásicas, realizar o processamento local destes dados e transmitir via rede sem fio as variáveis:

- Tensão e corrente *RMS*;
- Máximos e mínimos;
- Harmônicas;

- Distorção harmônica total;
- Potências: aparente, ativa e reativa;
- Fator de potência;
- Temperatura na carcaça do transformador.

Para realizar a aquisição e processamento dos sinais de tensão e corrente trifásicos, foi utilizado o circuito integrado ADE7880 [38], desenvolvido pela Analog Devices®. Para implementar a comunicação entre o ADE7880 e o transceptor sem fio, executar o protocolo de comunicação de dados e consultar as medições do sensor de temperatura, foi utilizado o microcontrolador PIC18LF4520 [39], desenvolvido pela Microchip®. A comunicação sem fio foi desenvolvida na plataforma Xbee-Pro Series 2 [40], que é um transceptor sem fio fabricado pela Maxstream®, que implementa o protocolo ZigBee. A medição de temperatura foi realizada utilizando-se o sensor de temperatura LM-35 [41]. De uma maneira mais objetiva, a UASPTD pode ser ilustrada conforme a Figura 10.

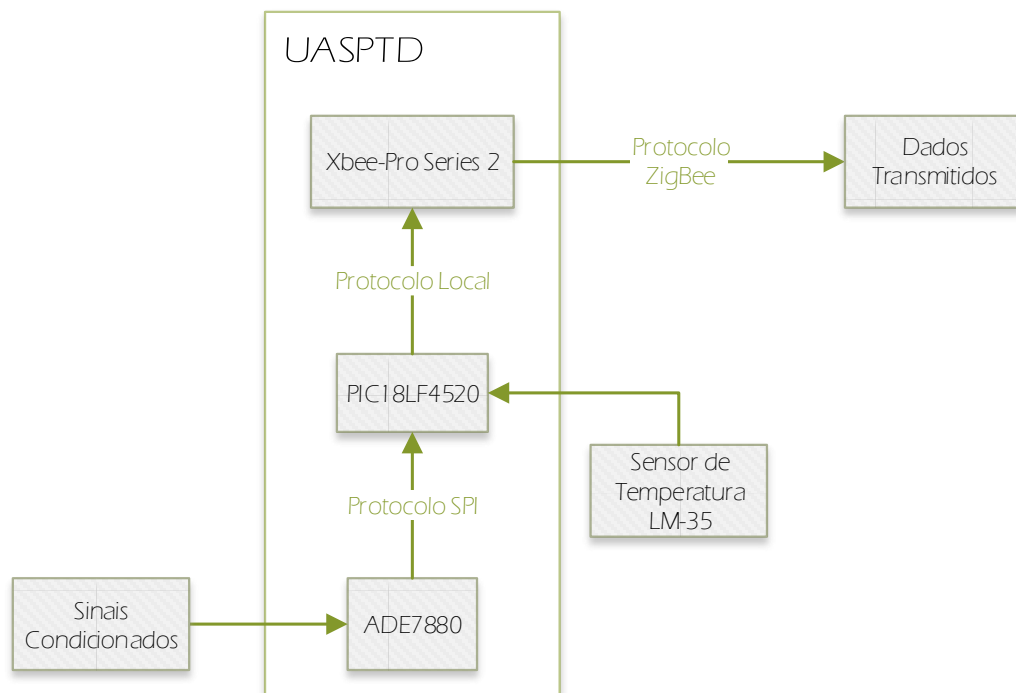


Figura 10. Topologia da UASPTD. Fonte: Próprio autor.

A placa de circuito impresso desenvolvida para a execução da UASPTD é ilustrada pela Figura 11. O esquemático do circuito elétrico, assim como o leiaute da placa desenvolvida encontram-se nos apêndices desta dissertação.



Figura 11. Fotografia da UASPTD. Fonte: Próprio autor.

3.1.1 MEDIDOR DE ENERGIA ADE7880

O circuito integrado ADE7880 é um medidor de energia trifásico de elevada exatidão com uma interface serial, dispõe de conversores digitais-analógicos sigma-delta de segunda ordem, integradores digitais, circuitos de referência, e todos os processamentos de sinais necessários para calcular a potência ativa, reativa e aparente (fundamental e harmônicas), cálculo *RMS*, e distorções harmônicas totais de correntes e tensões. Este circuito integrado dispõe ainda de registradores nos quais são possíveis consultar valores instantâneos das formas de onda de tensão e corrente de qualquer uma das fases. O ADE7880 dispõe de registradores que podem ser configurados para realizar o monitoramento de harmônicas de ordem até a 53, porém, para cada harmônica que se deseja monitorar, é necessário reconfigurar o registrador de monitoramento e aguardar um tempo de estabelecimento de 800 ms, para que os cálculos sejam realizados [38].

No que diz respeito a exatidão de medição, este circuito integrado apresenta uma resolução de 16 bits e uma exatidão de $\pm 0,5\%$. Estas especificações atendem os requisitos de monitoramento de qualidade de energia, conforme o módulo 8 da PRODIST/ANEEL [27].

A leitura das saídas do ADE7880 deve ser feita por meio de comunicação *Serial Peripheral Interface* (SPI), na qual uma série de registradores podem ser lidos ou escritos. Para isso, foi utilizado um microcontrolador responsável por realizar os processos de leitura e escrita, respeitando o padrão de comunicação estabelecido.

O circuito de interface do ADE7880, especificado no *datasheet* do fabricante conta com filtros passa baixa e divisores de tensão, de forma a adequar os sinais de tensão e corrente à entrada dos seus conversores A/D, que podem operar com tensões máximas e mínimas de +/-

0,5V. Ainda é necessário prover um cristal oscilador de 16,834 MHz para fornecer o *clock* necessário para sua operação.

3.1.2 MICROCONTROLADOR PIC18LF4520

Para realizar a leitura dos dados medidos e processados pelo ADE7880, é necessário de um microprocessador capaz de implementar o protocolo SPI. Também é necessário estabelecer a comunicação com o transceptor sem fio, de forma a estabelecer um protocolo de dados entre a UASPTD e o computador que estará recebendo estes dados. Outra função necessária para o microprocessador é ser dotado de um conversor A/D para realizar a leitura do sensor de temperatura LM-35, o qual fornece uma resposta em tensão proporcional à temperatura na qual é submetido.

Para a realização deste projeto, foi escolhido como unidade de processamento o microcontrolador PIC18LF4520 [39], devido às características funcionais que este possui, como: baixo custo de aquisição, grande disponibilidade no mercado, porta serial, conversor analógico-digital, portas digitais, memória de programação de 32 KB, interrupções e *timers*.

O PIC18LF4520 é um dispositivo de 40 pinos, 18 fontes de interrupção, 5 portas de comunicação, 4 *timers*, 2 módulos geradores de sinais PWM e um conjunto de instruções de 75 palavras.

Quanto às características elétricas, pode-se destacar a faixa de operação da tensão de alimentação, 2-5,5V, e seu baixo consumo de energia:

- < 1,6 mA típico com uso à 5V, 4 MHz;
- < 25 μ A típico com uso à 3V, 32 kHz;
- < 0,2 μ A típico no modo *stand-by*.

Diante estas características, o PIC18LF452 demonstrou ser uma escolha viável para o projeto, pois supre as necessidades de comunicação serial, para interagir com o ZigBee e uma porta SPI para comunicar com o ADE7880.

3.1.3 MÓDULO XBEE-PRO SERIES 2

Os módulos Xbee-Pro *Series 2* [40] são transceptores sem fio, fabricados pela Digi International®, que foram projetados para implementar o protocolo ZigBee e apresentar uma solução para projetos de baixo fluxo de dados e baixo consumo para redes de sensores sem fio.

Atualmente, existem diferentes modelos que tem como fatores distintivos a distância máxima de comunicação do dispositivo, potência consumida, opções de configuração, dentre outros. Como exemplo, pode-se citar o Xbee *Series 2* que possui uma distância máxima de comunicação de 120 metros, e o Xbee-PRO *Series 2* que pode transmitir até 1600 metros em campo aberto. Estes módulos são interconectáveis, e por isso, podem ser utilizados em uma mesma rede sem fio, denominada ZNET.

Esta tecnologia de comunicação sem fio permite a implementação relativamente rápida e com baixo consumo de energia de uma rede de sensores sem fio, podendo-se utilizar diversas topologias para isso (árvore, estrela e malha).

Os módulos Xbee suportam dois modos de operação, AT e API. No modo AT, os módulos se comunicam simulando uma transmissão de dados via cabo, no qual uma conexão serial (Tx e Rx) é efetuada. O modo API é um protocolo mais complexo que apresenta vantagens em relação ao controle da rede, reconhecimento de destino de pacotes de dados recebidos, além de controle de erro de dados. Neste trabalho, foi utilizado o modo AT pelo fato de ter sido implementado uma comunicação direta entre apenas um nó sensor e a central de monitoramento, sem a necessidade de tráfego intenso de dados.

Desta forma, justificou-se a escolha desses módulos transceptores, visto que todas as características citadas são favoráveis a execução do projeto.

3.1.4 SENSOR DE TEMPERATURA LM-35

Existem diversas formas de medir a temperatura indiretamente. Dentre as mais usuais, pode-se citar os sensores baseados em resistências sensíveis a temperatura, baseados em diodo, termopares, etc. Atualmente, muitos fabricantes integram essas técnicas conjuntamente com condicionadores de sinais para adequar a dinâmica de saída destes sensores às mais diversas necessidades do mercado.

O circuito integrado LM35 [41] é um sensor de precisão, fabricado pela National Semiconductor, que apresenta uma saída de tensão linear proporcional à temperatura

de seu ambiente. O LM35 não necessita de qualquer calibração externa ou *trimming* para fornecer os dados com exatidão. Sabendo que este sensor tem uma resolução de 10 mV por cada 1°C, é possível deduzir uma expressão para a temperatura em função do valor lido [42]. As principais características deste sensor são:

- Calibrado diretamente em graus Celsius (Centígrados);
- Linear 10,0 mV / °C (fator de escala);
- Exatidão de 0,5°C (a 25 °C);
- Faixa de Operação de -55°C até 150 ° C;
- Adequado para aplicações remotas;
- Baixo custo / Não necessita de calibração no circuito;
- Alimentação 4V-30V;
- Menos de 60 µA corrente de consumo;
- Baixo auto-aquecimento, 0,08 ° C em ar ambiente;
- Não-linearidade de apenas $\pm 1/4$ ° C típica;
- Baixa impedância de saída, 0,1 Ω por 1 mA de carga.

Devido às características supracitadas, este sensor representa uma escolha viável para o projeto. As leituras do LM-35 foram feitas com o PIC18LF4520 utilizando diretamente o conversor A/D integrado no mesmo, uma vez que as características esperadas do sinal de resposta são compatíveis com as limitações do A/D do microcontrolador.

3.2 UNIDADE DE CONDICIONAMENTO DE SINAIS

Os sinais provenientes da rede elétrica precisam ser submetidos a um processo de adequação aos níveis de operação permitidos pelos conversores analógico-digital do ADE7880. Foram desenvolvidos circuitos de condicionamento de sinais para cada uma das fases de tensão e corrente. Os sinais de tensão da rede elétrica foram atenuados com divisores resistivos. Os sinais de corrente foram condicionados com o sensor de corrente ACS712, baseado em efeito Hall condicionados com circuitos de atenuação e subtração de nível DC. A topologia UACS é ilustrada pela Figura 12.

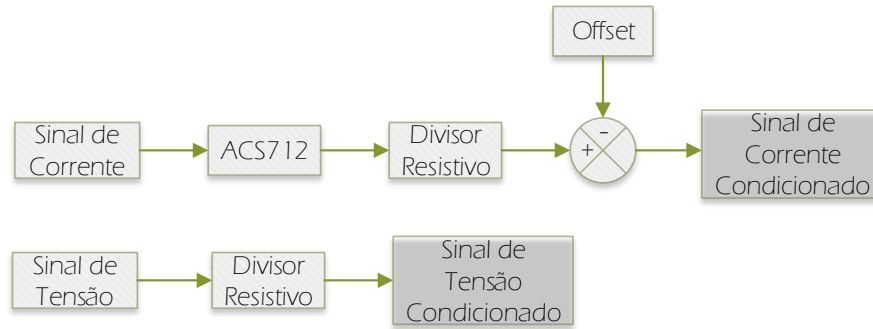


Figura 12. Topologia da UACS. Fonte: Próprio autor.

A placa de circuito impresso desenvolvida para a UACS é apresentada na Figura 13. O esquema do circuito elétrico implementado encontra-se nos apêndices deste trabalho.

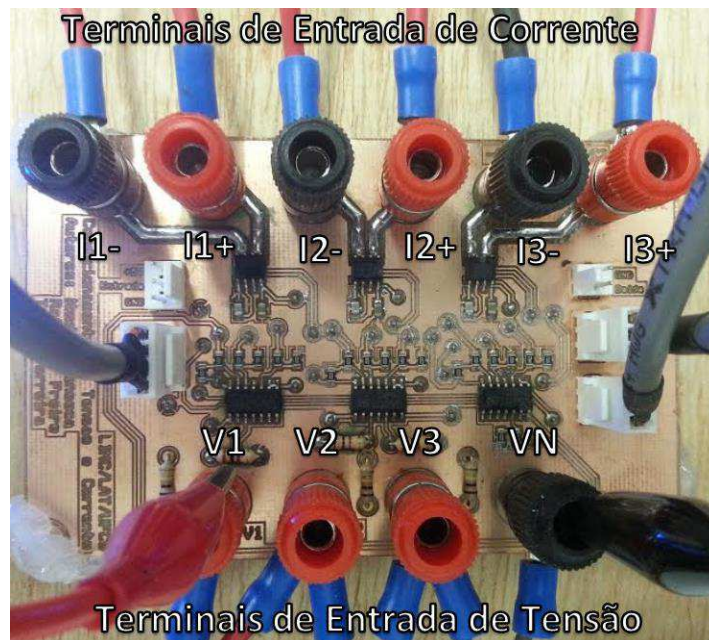


Figura 13. Fotografia da Placa de Circuito Impresso UACS. Fonte: Próprio autor.

3.2.1 CONDICIONAMENTO DOS SINAIS DE TENSÃO

A amplitude máxima dos sinais suportados no conversor A/D do ADE7880 são $\pm 0,5$ V, desta forma, é necessário adequar os sinais provenientes da rede para medi-los. O procedimento de condicionamento do sinal de tensão da rede deve, além de atenuar o sinal de entrada, proporcionar uma saída de baixa impedância para a entrada dos filtros passa-baixas presentes no conversor A/D.

Conforme a nota de aplicação AN-564 [43], é recomendada a utilização de um indutor antes do circuito de atenuação do sinal, com o intuito de bloquear ruídos de alta frequência

provenientes da rede elétrica. Desta forma, o circuito da Figura 14 foi implementado para o condicionamento dos sinais de tensão das fases.

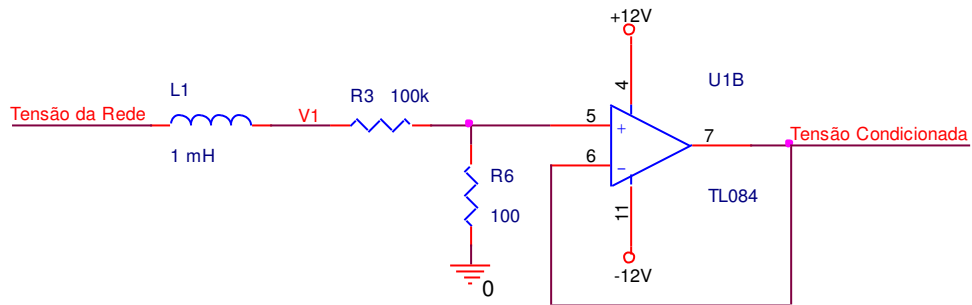


Figura 14. Circuito de Condicionamento do sinal de tensão. Fonte: Próprio autor.

O circuito de atenuação da Figura 14 utiliza uma razão no divisor resistivo de tal forma que para um sinal de 220 V RMS, com picos de $\pm 311,12$ V, tenha-se na saída um sinal com amplitude de $\pm 0,31$ V. Desta forma permite-se uma faixa de segurança para variações de tensão de entrada. O amplificador operacional utilizado foi o TL084 [44].

3.2.2 CONDICIONAMENTO DOS SINAIS DE CORRENTE

A medição de corrente é uma atividade que requer cuidados especiais. Existem diversas maneiras de medir corrente, dentre as quais pode-se citar, transformadores de corrente (TC), bobinas de Rogowski, resistores shunt e efeito Hall. Neste projeto, optou-se por utilizar o efeito hall para medição de corrente, por razões que serão elencadas a seguir.

A principal vantagem do uso de sensores de efeito Hall é a possibilidade de fabricação com o próprio material usado na manufatura de circuitos integrados. Isto significa que esses dispositivos podem ser embarcados em diversos circuitos analógicos, até mesmo em conversores digitais-analógicos, que permitem interconectar diretamente o sensor com microprocessadores e microcontroladores, tudo isso no próprio *chip*.

Foi feita uma pesquisa dos sensores no mercado e chegou-se ao circuito integrado ACS712 [45], fabricado pela Allegro®. O ACS712 consiste em um circuito linear de transdução de corrente por efeito Hall que apresenta uma saída de tensão que tem relação linear com a corrente estabelecida entre seus terminais, os quais apresenta uma resistência de $1,2\text{ m}\Omega$, dissipando baixa potência. Esta baixa resistência o torna bom transdutor de corrente, visto que muitas vezes sua impedância é menor que o próprio condutor no qual está presente a corrente a ser medida. Este circuito suporta correntes de até 30 A, além de suportar até 5 vezes impulsos de sobrecorrente em relação ao valor máximo nominal de medição.

A resposta de saída do ACS712 consiste em um sinal com *offset* de 2,5 V, no qual será replicado o sinal de entrada com o mesmo formato de onda com um incremento de 66 mV/A. Como a entrada de sinal do ADE7880 suporta apenas sinais de $\pm 0,5V$, foi necessário desenvolver um circuito condicionador para adequar este sinal no formato necessário. Este circuito é ilustrado pela Figura 15.

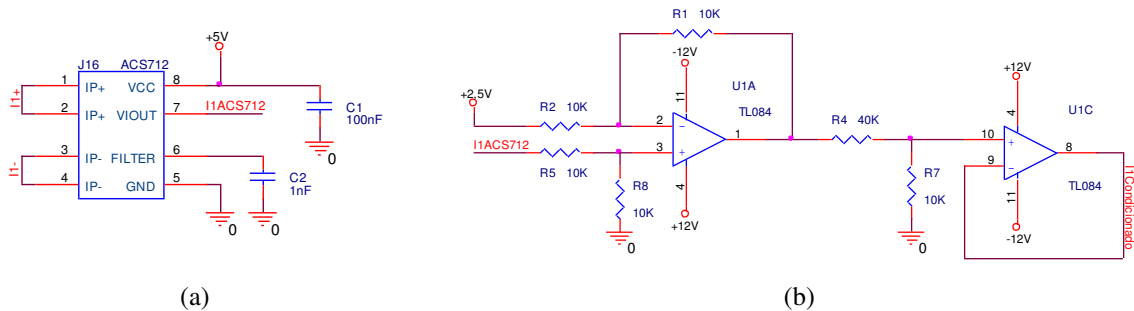


Figura 15. Circuito de Condicionamento da Corrente. (a) Circuito do ACS712 (b) Circuito de condicionamento da resposta do ACS712. Fonte: Próprio autor.

No circuito da Figura 15(a), para uma corrente de entrada equivalente à 30 A, o sinal de resposta do ACS712, terá uma amplitude 4,48 V, valor este que está além da tensão máxima de operação do ADE7880. Desta forma, foi necessário desenvolver um circuito de condicionamento adicional.

O circuito de condicionamento para o sinal da resposta do ACS712 foi desenvolvido utilizando um subtrator de tensão com ganho unitário, desta forma, subtraiu-se do sinal o valor de *offset*, equivalente à 2,5 V, proveniente da resposta padrão do ACS712. Uma vez subtraído o *offset* do sinal de corrente, procedeu-se com a atenuação do sinal, de acordo com o circuito da Figura 15(b), que neste estágio, tem uma amplitude de 1,98 V, para uma entrada de 30 A. Desta forma projetou-se o divisor resistivo para que esta tensão seja atenuada para uma amplitude de 0,396 V, permitindo-se uma margem de segurança para possíveis excursões da corrente acima do valor máximo admitido.

3.3 UNIDADE DE ALIMENTAÇÃO

A unidade de alimentação consiste em circuitos reguladores de tensão com a finalidade de adequar a tensão proveniente da rede elétrica para a alimentação dos circuitos que compõem o *hardware* do sistema de aquisição.

Primeiramente, a tensão proveniente da rede elétrica, com valor eficaz de 220 V RMS, é atenuada e isolada do circuito por meio de um transformador de potencial com relação de

220V/18V. Depois de atenuada, a tensão é retificada por uma ponte de diodos, e por fim, filtrada por capacitores, de acordo com a Figura 16.

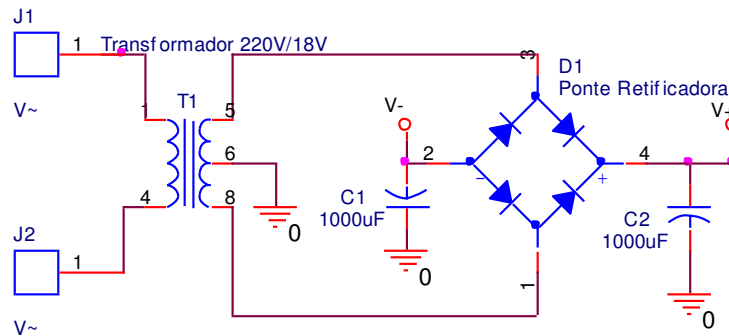


Figura 16. Circuito de Retificação da Tensão da Rede Elétrica. Fonte: Próprio autor.

Depois de retificada e filtrada a tensão, foram utilizados reguladores de tensão com o objetivo de obter tensões de ± 12 V, +5 V e 3,3 V contínuas. Sendo assim, utilizou-se reguladores LM7812, LM7912, LM7805 e LM1117 para obter as tensões necessárias. O circuito de regulação de tensão é ilustrado pela Figura 17.

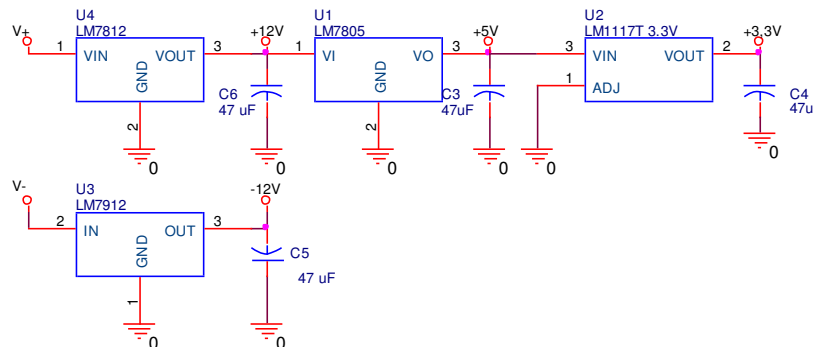


Figura 17. Circuito de Regulação de Tensão. Fonte: Próprio autor.

A fotografia da placa de circuito impresso desenvolvida para a unidade de alimentação é ilustrada pela Figura 18.

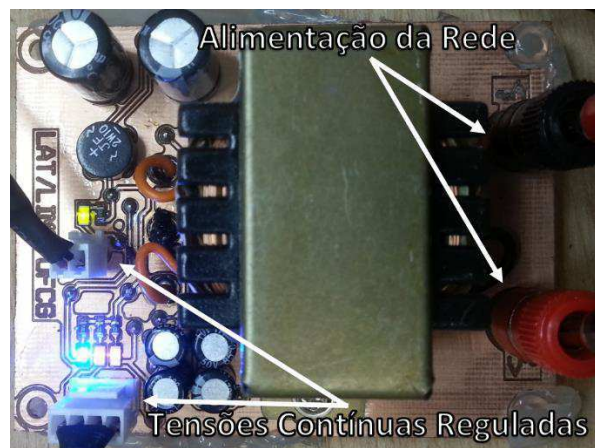


Figura 18. Fotografia da Unidade de Alimentação. Fonte: Próprio autor.

3.4 UNIDADE DE INTERFACE COM O USUÁRIO

Para proporcionar um meio prático no qual fosse possível visualizar os dados adquiridos pelo sistema, foi desenvolvido um *software* com interface gráfica, desenvolvido em linguagem de programação C#. Este *software* sintetiza as informações transmitidas por uma ou mais UASPTD em forma de gráficos, relatórios, tabelas e proporciona algumas possibilidades de visualização destas informações na própria UIU ou por meio da exportação da base de dados gerada para outros ambientes. Outra funcionalidade implementada na UIU é a geração de um relatório informando quando e em que UASPTD houve algum tipo de desvio de QEE como:

- Variações de tensão de longa e curta duração;
- Desconformidade fator de potência;
- Desconformidade de frequência;
- Flutuação de tensão;
- Desconformidade de distorção harmônica total;
- Sobreaquecimento no transformador.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são expostos e discutidos os resultados obtidos da implementação do *software* de monitoramento e validação e teste do sistema desenvolvido. As telas do *software* desenvolvido são apresentadas e comentadas. Em relação aos testes de validação, no primeiro momento, foi realizada a validação do sistema com utilização de cargas lineares e não lineares, determinando as incertezas obtidas nas medições das grandezas, quando comparadas com um AQEE. No segundo momento foi realizado um teste de monitoramento com o intuito de gerar uma base de dados que pudesse ser exportada para outros softwares de análise matemática.

4.1 UNIDADE DE INTERFACE COM O USUÁRIO

Conforme exposto nas subseções anteriores, foi desenvolvido um *software* para implementar a unidade de interface com o usuário. Neste capítulo são apresentadas as telas que compõem o *software* desenvolvido.

Na Figura 19 pode-se observar uma das telas do *software* desenvolvido, na qual é possível visualizar as formas de onda de tensão, seus valores de pico positivo e negativo, valor eficaz e frequência. As tensões monitoradas para a exemplificação da tela do programa, apresentaram saturação nos picos máximos e mínimos, efeito este que se deve à saturação do núcleo do transformador observado. Estes efeitos foram observados em todos os testes realizados durante este trabalho.

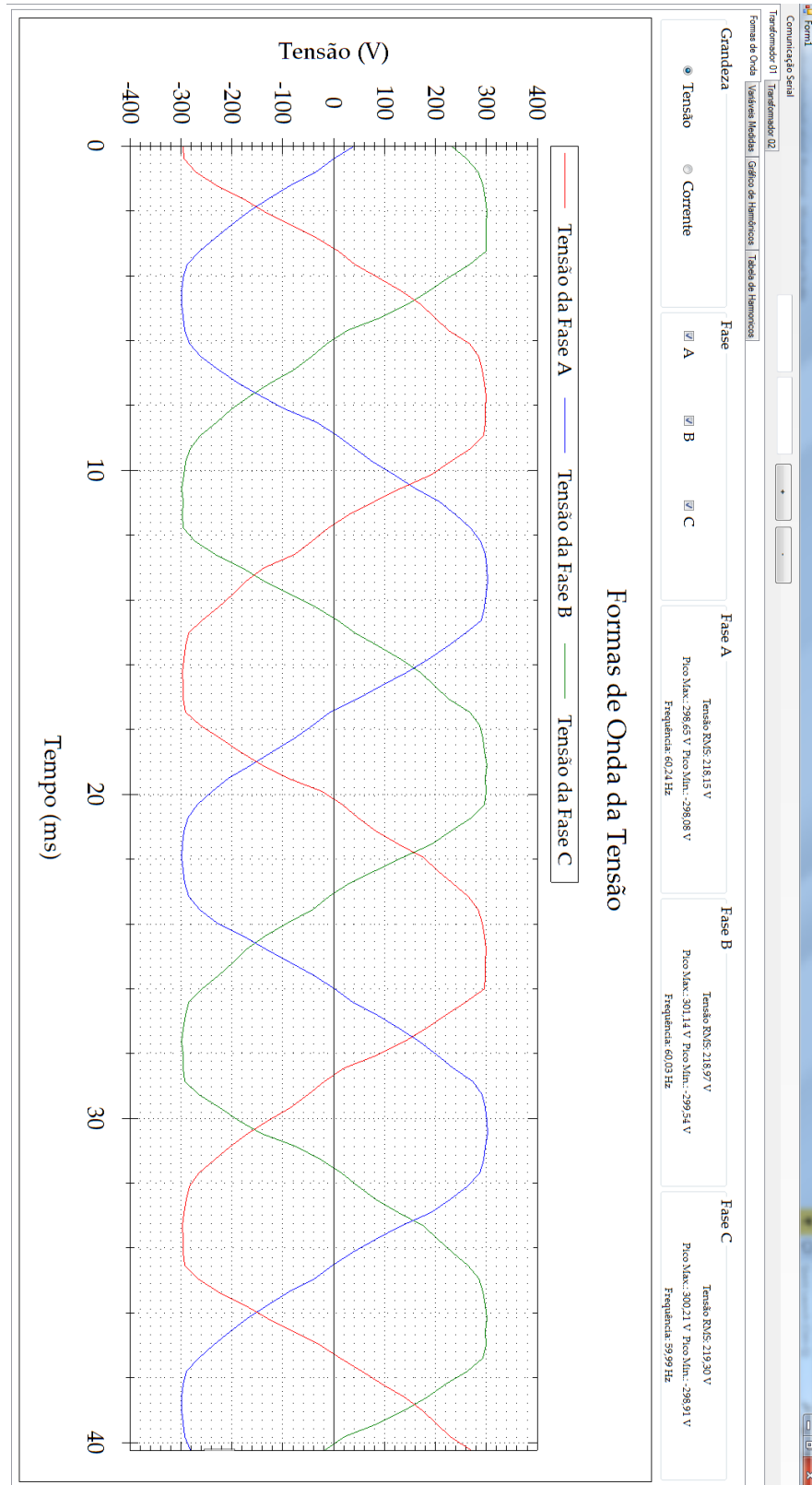


Figura 19. Apresentação das Formas de Onda Adquiridas. Fonte: Próprio autor.

A tela ilustrada pela Figura 20, expõe os valores de tensão e corrente RMS, distorção harmônica total, valores de potência ativa, reativa e aparente, fator de potência em cada uma das fases, além da temperatura medida na carcaça do transformador.

Comunicação Serial

Transformador 01 | Transformador 02

Formas de Onda | Variáveis Medidas | Gráfico de Harmônicas | Tabela de Harmônicas

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensão RMS (V)	215,44	216,09	216,27
DHT Tensão (%)	2,15	2,13	2,12
Corrente RMS (A)	2,27	2,26	2,26
DHT Corrente (%)	2,12	2,12	2,13
Potência Ativa (W)	-488,22	-487,42	-488,12
Potência Reativa (var)	29,34	31,39	31,81
Potência Aparente (VA)	489,10	488,43	489,16
Fator de Potência	-1,00	-1,00	-1,00
Temperatura	--	--	--

Atualizado em: 19/01/15 às 11:39:45

Figura 20. Apresentação dos dados medidos do transformador em forma de quadro. Fonte: Próprio autor.

No que diz respeito ao monitoramento de harmônicos, foram desenvolvidas 3 meios de visualização dessas variáveis: gráfico de barras, quadro de informações e geração de banco de dados. A Figura 21, ilustra a tela para o monitoramento de harmônicos em gráfico de barras. A Figura 22, ilustra o quadro de harmônicos gerado pelo *software*.

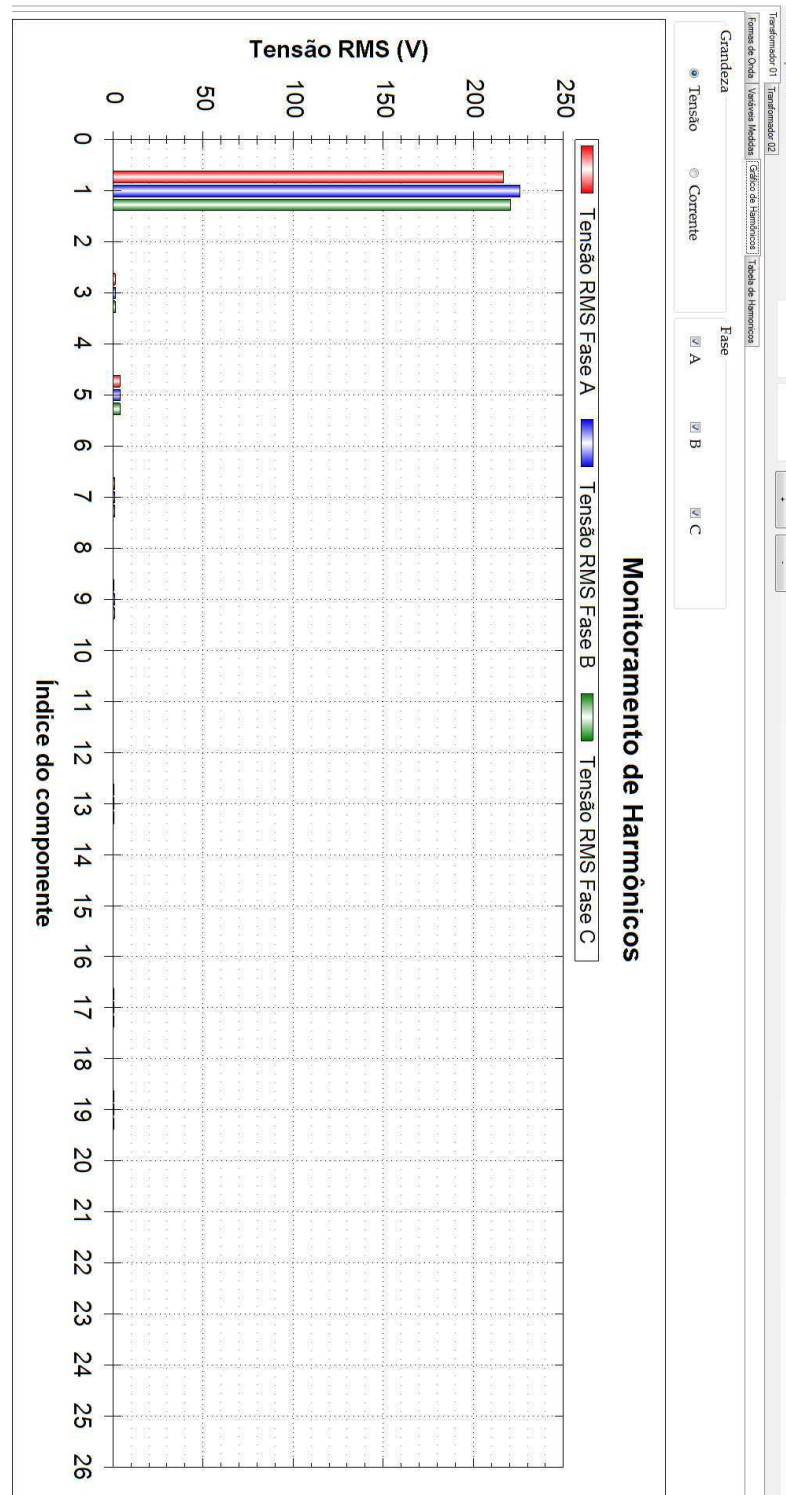


Figura 21. Tela de monitoramento de harmônicos por gráfico de barras. Fonte: Próprio autor.



Figura 22. Tela de monitoramento de harmônicos por quadro. Fonte: Próprio autor.

4.2 VALIDAÇÃO DO SISTEMA

Para realizar a validação do sistema de aquisição de dados desenvolvido, com o objetivo de determinar as incertezas das medições efetuadas, foram executados dois testes. Em um primeiro teste, foi utilizado um banco de cargas com fatores de potência quase unitários e um segundo teste com cargas com fatores de potência indutivos. Em todos os testes, os dados medidos e obtidos com o protótipo desenvolvido foram comparados com os resultados obtidos a partir de um AQEE, da marca Fluke®, modelo 434. Para a alimentação das cargas, foi utilizada uma fonte de tensão programável, marca California Instruments®, modelo 3000Lx, com parâmetros de amplitude, frequência, tensão RMS e harmônicos que pudessem ser controlados e apresentassem valores confiáveis e estáveis.

Em todos os dois testes, a tensão de alimentação foi composta com harmônicas de amplitude e fase acordo com a Tabela 1. As combinações de harmônicas foram baseados em [46], cujos valores são, de forma aproximada, tipicamente encontrados em sistemas de distribuição de energia elétrica.

Tabela 1. Composição de harmônicas para a tensão de alimentação nas fases A e C.

Harmônica	Alimentação (Fase A e C)		Alimentação (Fase B)	
	Amplitude (V)	Fase em Graus	Amplitude (V)	Fase em Graus
1	220	0	220	0
3	2,0	86	4,0	86
5	2,9	168	5,8	168
7	0,3	-49	0,6	-49
9	0,6	160	1,2	160
11	0,5	173	1,0	173
13	0,2	-1	0,4	-1
15	0,1	86	0,2	86

4.2.1 TESTES COM CARGAS LINEARES

O primeiro teste foi realizado com o intuito de avaliar o desempenho do sistema de aquisição de dados desenvolvido para cargas com o fator de potência elevados. Para tanto, foram analisados os níveis de similaridade das formas de onda de tensão e corrente adquiridos e comparados com os resultados obtidos pelo AQEE. Também foram comparados os valores eficazes de tensão e corrente, coeficientes harmônicos e potências. O arranjo experimental é ilustrado pela Figura 23.

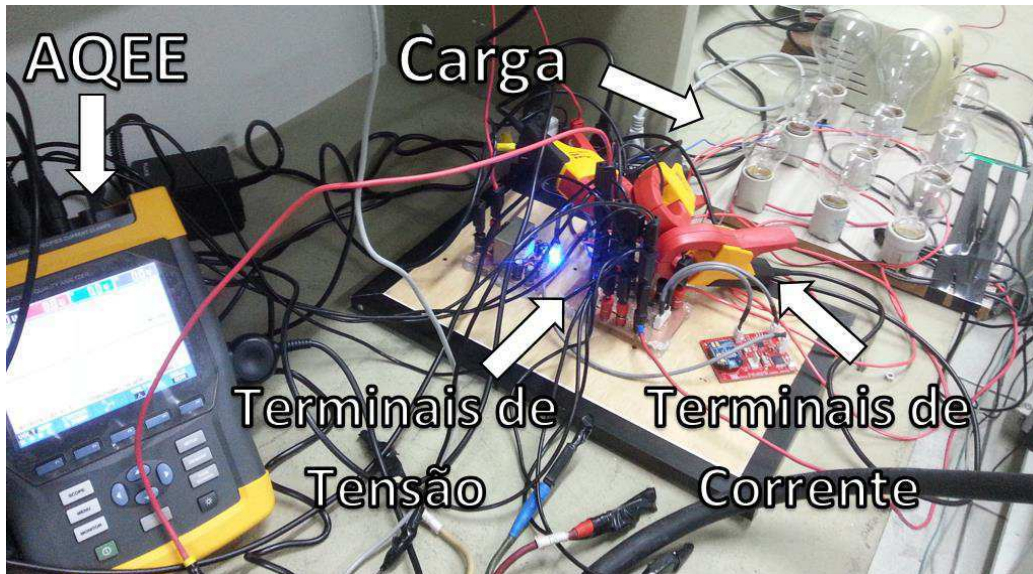


Figura 23. Teste experimental com carga resistiva. Fonte: Próprio autor.

Os dados obtidos tanto pelo AQEE quanto pelo protótipo desenvolvido foram exportados para o Matlab®, onde as análises foram feitas. Para comparar a consistência das formas de onda de corrente e tensão adquiridas, foram considerados o grau de correlação e valores de pico máximo e mínimo. Com o procedimento experimental realizado, não foi possível sincronizar as formas de onda para garantir que as amostragens fossem feitas no mesmo instante, porém, ao se tratar de sinais periódicos, nos quais não há variação de carga, os sinais foram deslocados no tempo e sobrepostos. As formas de ondas obtidas podem ser observadas nas Figuras 24 a 26.

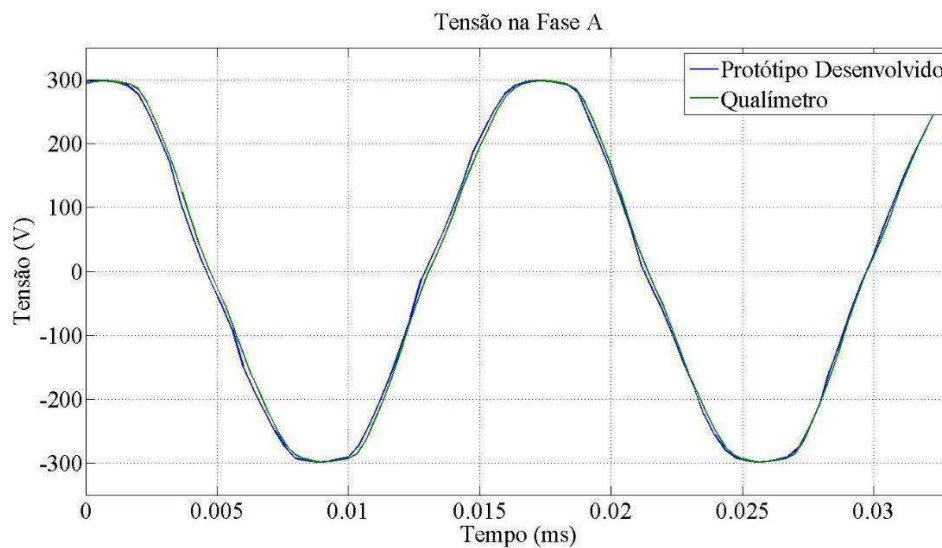


Figura 24. Formas de onda da tensão na fase A obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo AQEE. Fonte: Próprio autor.

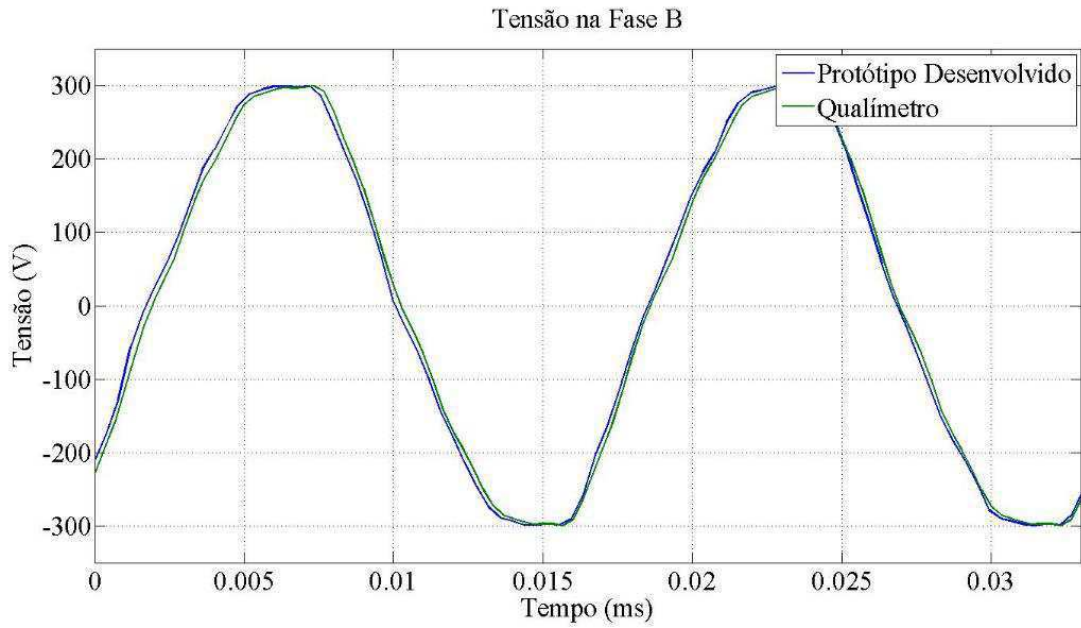


Figura 25. Formas de onda da tensão na fase B obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo AQEE. Fonte: Próprio autor.

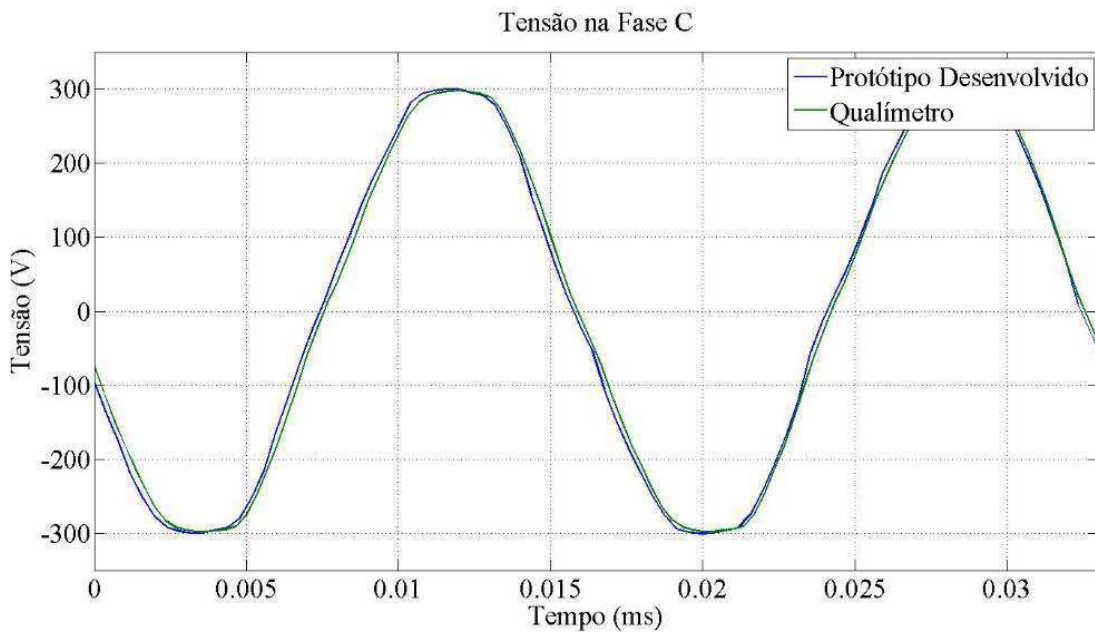


Figura 26. Formas de onda da tensão na fase C obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo AQEE. Fonte: Próprio autor.

Comparativamente, os resultados obtidos pela aquisição das formas de onda de tensão entre os dois equipamentos apresentaram resultados satisfatórios. Os desvios percentuais obtidos das medições realizadas do protótipo desenvolvido em relação ao AQEE são expressos na Tabela 2.

Tabela 2. Desvios percentuais e coeficientes de correlação inerentes às formas de onda de tensão medidas.

Fase A			
Grandeza	AQEE	Protótipo	Desvio Percentual (%)
Tensão RMS (V)	220,00	220,23	0,10
Tensão de Pico Positiva (V)	298,73	299,53	0,27
Tensão de Pico Negativa (V)	-298,69	-298,63	0,02
Correlação das Formas de Onda		0,99	
Fase B			
Grandeza	AQEE	Protótipo	Desvio Percentual (%)
Tensão RMS (V)	219,18	219,72	0,24
Tensão de Pico Positiva (V)	299,52	299,43	0,03
Tensão de Pico Negativa (V)	-299,72	-298,98	-0,25
Coef. Correlação das Formas de Onda		0,99	
Fase C			
Grandeza	AQEE	Protótipo	Desvio Percentual (%)
Tensão RMS (V)	220,00	219,84	-0,07
Tensão de Pico Positiva (V)	298,73	300,77	0,68
Tensão de Pico Negativa (V)	-298,36	-300,46	0,70
Coef. Correlação das Formas de Onda		0,99	

Da mesma maneira, as formas de onda de corrente adquiridas com o protótipo desenvolvido apresentaram um grau de exatidão satisfatório para o teste com carga linear. Os gráficos das Figuras 27 a 29, expõem de maneira comparativa as formas de onda de corrente obtidas com o sistema desenvolvido e com o AQEE.

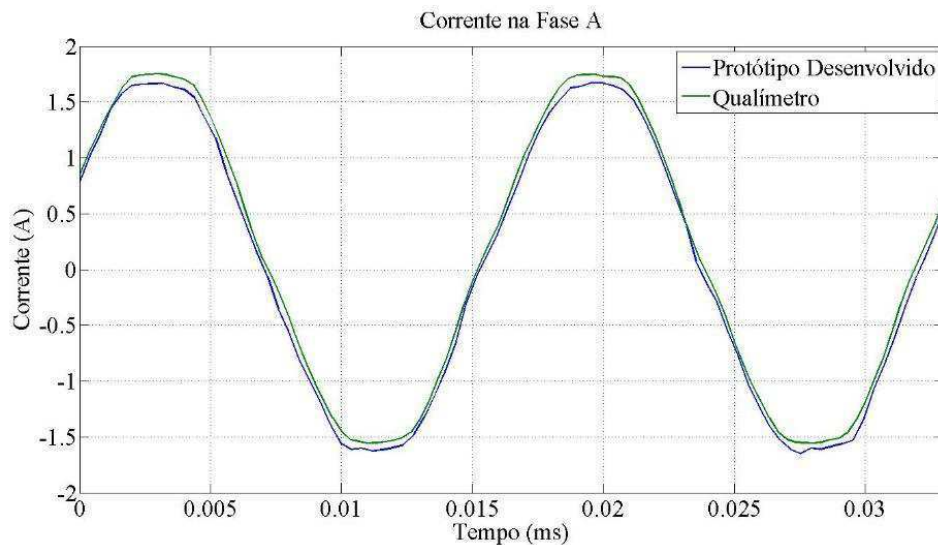


Figura 27. Formas de onda da corrente na fase A obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo AQEE no teste com carga resistiva. Fonte: Próprio autor.

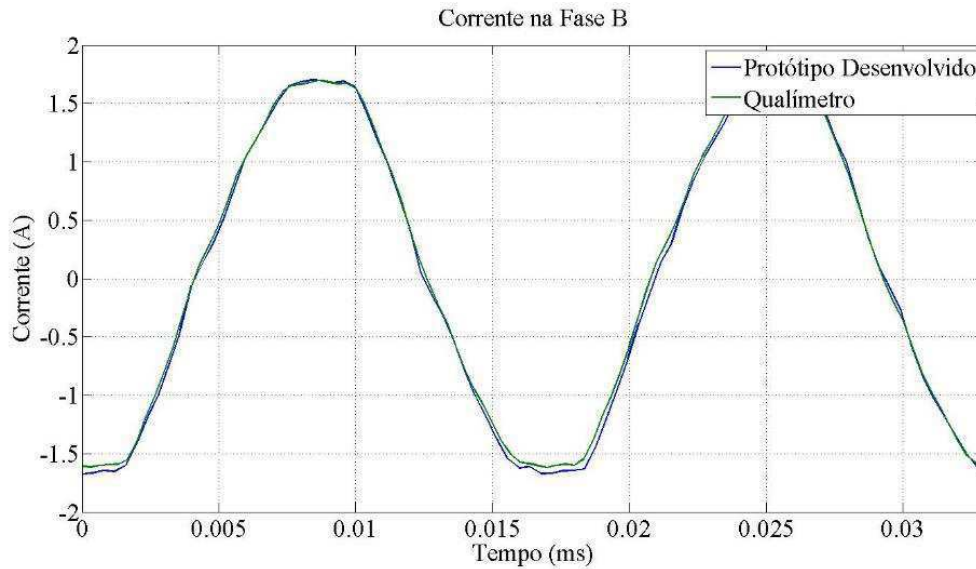


Figura 28. Formas de onda da corrente na fase B obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo AQEE no teste com carga resistiva. Fonte: Próprio autor.

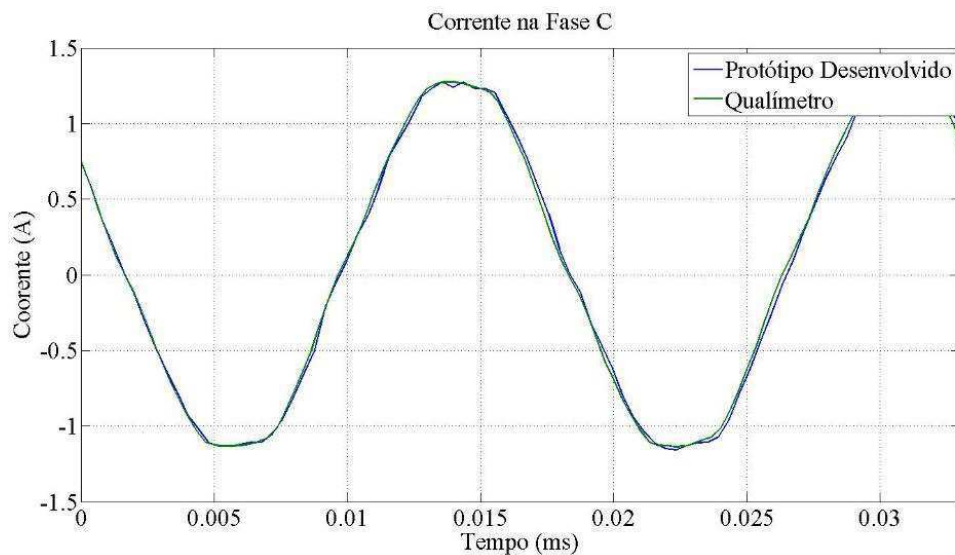


Figura 29. Formas de onda da corrente na fase C obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo AQEE no teste com carga resistiva. Fonte: Próprio autor.

Analogamente, na Tabela 3, são expostos os resultados obtidos na avaliação das formas de onda de corrente adquiridos.

Tabela 3. Dados comparativos entre as formas de onda da corrente adquiridas pelo protótipo e AQEE.

Grandeza	Fase A		
	AQEE	Protótipo	Desvio Percentual (%)
Corrente RMS (A)	1,23	1,26	2,43
Corrente de Pico Máxima (A)	1,75	1,67	-4,57
Corrente de Pico Mínima (A)	-1,56	-1,65	5,76
Correlação das Formas de Onda		0,98	

Fase B			
Grandeza	AQEE	Protótipo	Desvio Percentual (%)
Corrente RMS (A)	1,24	1,23	-0,81
Corrente de Pico Máxima (A)	1,69	1,70	0,59
Corrente de Pico Mínima (A)	-1,62	-1,69	4,32
Correlação das Formas de Onda		0,99	
Fase C			
Grandeza	AQEE	Protótipo	Desvio Percentual (%)
Corrente RMS (A)	0,92	0,91	-1,09
Corrente de Pico Máxima (A)	1,27	1,28	0,78
Corrente de Pico Mínima (A)	-1,14	-1,16	1,75
Correlação das Formas de Onda		0,99	

Percebe-se que os desvios percentuais obtidos na medição dos sinais de corrente foram superiores as obtidas na tensão. Esta diferença pode ter origem no número de circuitos de condicionamento de corrente, que possui mais estágios de tratamento, quando comparado ao da tensão. A presença destes vários estágios podem inserir não linearidades no sinal. Para evitar maiores desvios, todos os estágios de ganho e atenuação foram caracterizados, porém, o desvio percentual no pior dos casos, durante os testes, permaneceu em 5,76%

Foram calculados também os desvios percentuais inerentes às medições de potência realizadas, que são expostas no Tabela 4.

Tabela 4. Dados comparativos das potências medidas pelo protótipo e AQEE.

Fase A			
Grandeza	AQEE	Protótipo	Desvio Percentual (%)
Potência Aparente (VA)	271,86	277,48	-2,06
Potência Ativa (W)	271,82	276,95	-1,79
Potência Reativa (var)	4,66	17,14	267,81
Fator de Potência	1,00	1,00	0,00
Fase B			
Grandeza	AQEE	Protótipo	Desvio Percentual (%)
Potência Aparente (VA)	273,25	270,25	-1,09
Potência Ativa (W)	272,75	269,45	-1,21
Potência Reativa (var)	16,52	20,78	25,78
Fator de Potência	1,00	1,00	0,00
Fase C			
Grandeza	AQEE	Protótipo	Desvio Percentual (%)
Potência Aparente (VA)	201,47	200,05	-0,70
Potência Ativa (W)	201,37	199,35	-1,00
Potência Reativa (var)	6,34	16,72	163,72
Fator de Potência	1,00	1,00	0,00

As medições de potência, quando comparadas às realizadas pelo AQEE apresentaram resultados satisfatórios na medição da potência ativa, aparente e fator de potência. Contudo, houve divergências de até 267% na medição da potência reativa. O protótipo desenvolvido,

realiza o cálculo da potência reativa a partir dos valores recebidos de potência ativa e aparente. Desta maneira, pequenos erros na medição destas duas últimas podem gerar desvios consideráveis no cálculo da potência reativa, quando o fator de potência é significativamente elevado, no caso da situação experimentada, considerado pelo sistema unitário.

Para finalizar os testes, foram comparadas as medições das harmônicas de corrente e tensão e a distorção harmônica total em cada uma das fases. Foram consideradas as harmônicas até a 26ª ordem, uma vez que a exigência mínima da ANEEL [27] para monitoramento de harmônicos na rede elétrica exige no mínimo a consideração dos harmônicos até a 25ª ordem. A decisão sobre a quantidade de harmônicas a serem monitoradas foi baseada nas exigências da ANEEL e também no tempo de estabelecimento dos registradores de configuração do ADE7880, conforme já explicados. Para realizar o monitoramento de 26 harmônicas, processar os dados e enviá-los, o sistema desenvolvido leva em torno de 25 segundos, sendo este o tempo de atualização dos dados na interface desenvolvida. O gráfico de harmônicas das tensões e correntes são expostos nas Figuras 30 à 35.

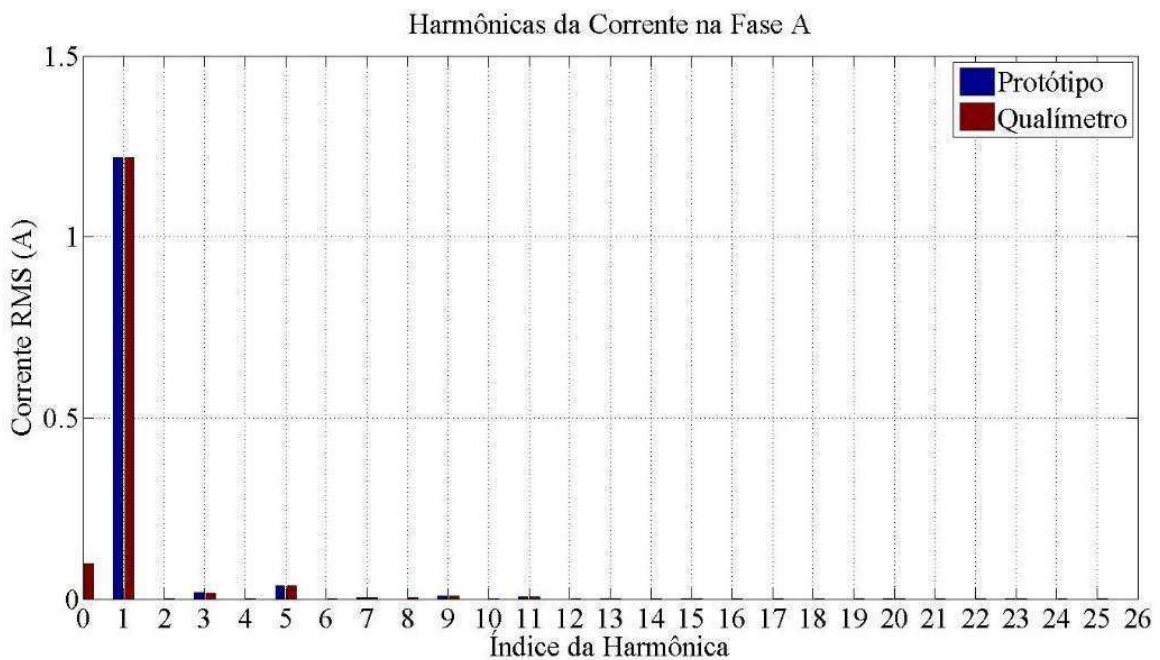


Figura 30. Gráfico de Harmônicas da Corrente na Fase A. Fonte: Próprio autor.

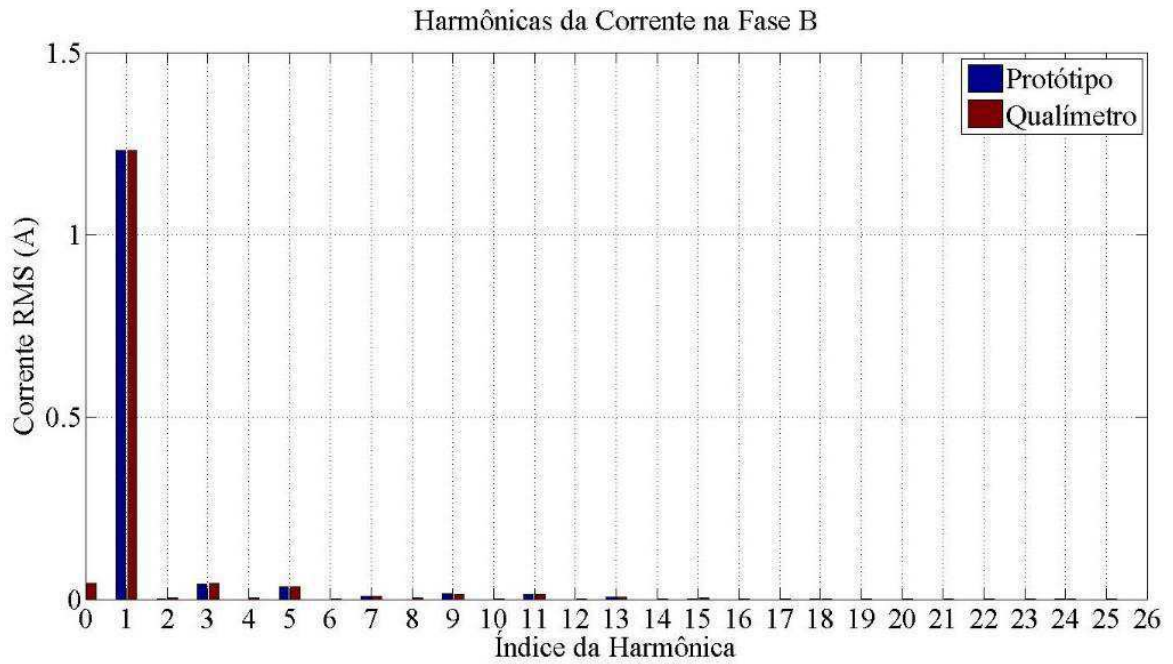


Figura 31. Gráfico de Harmônicas da Corrente na Fase B. Fonte: Próprio autor.

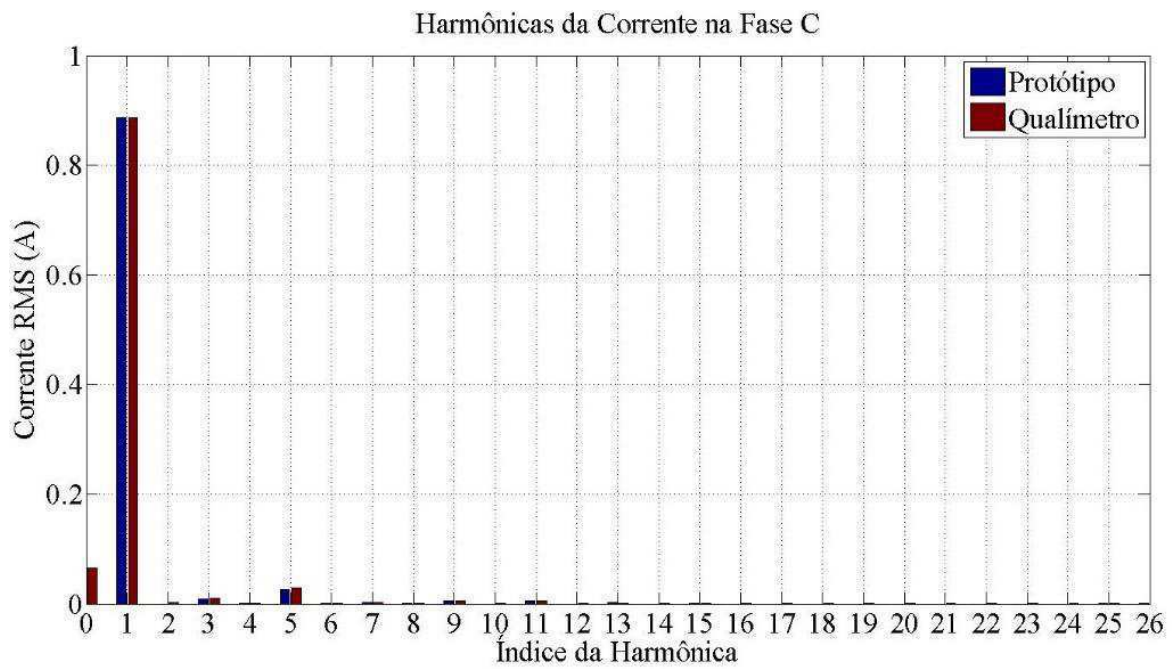


Figura 32. Gráfico de Harmônicas da Corrente na Fase C. Fonte: Próprio autor.

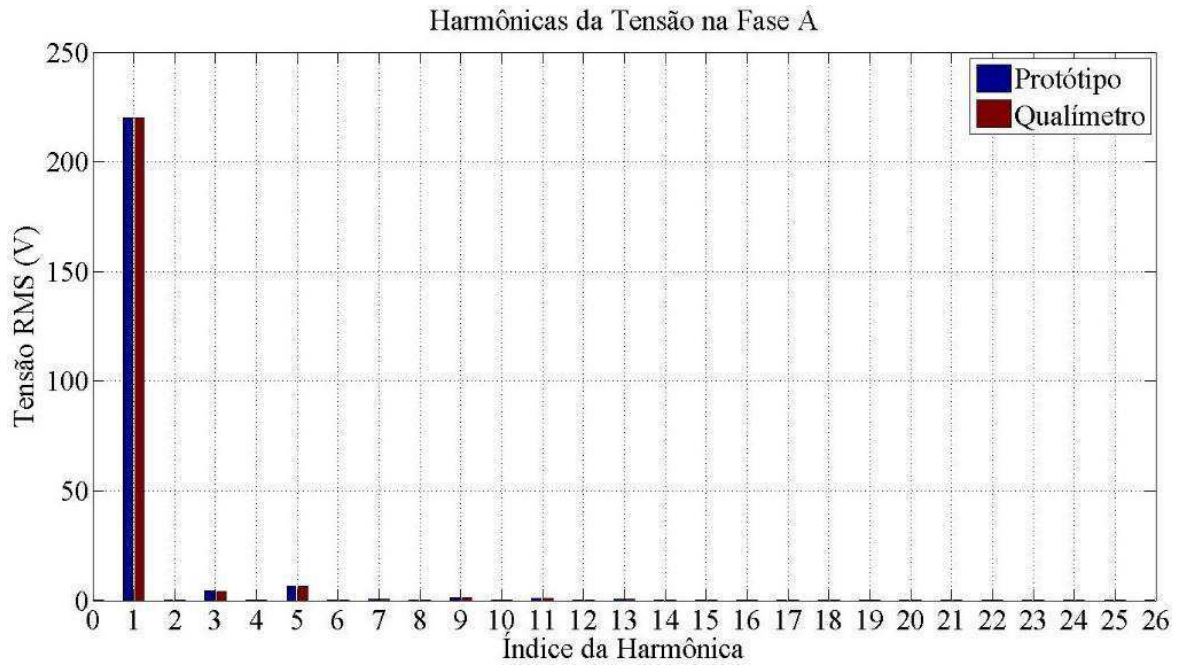


Figura 33. Gráfico de Harmônicas da Tensão na Fase A. Fonte: Próprio autor.

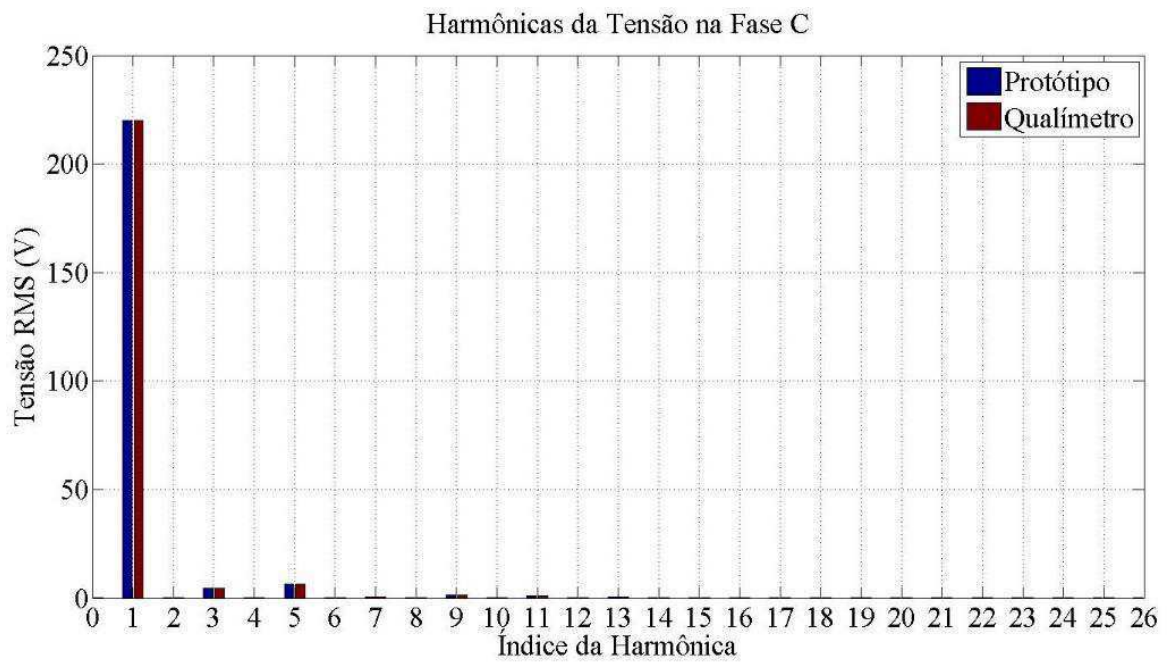


Figura 34. Gráfico de Harmônicas da Tensão na Fase B. Fonte: Próprio autor.

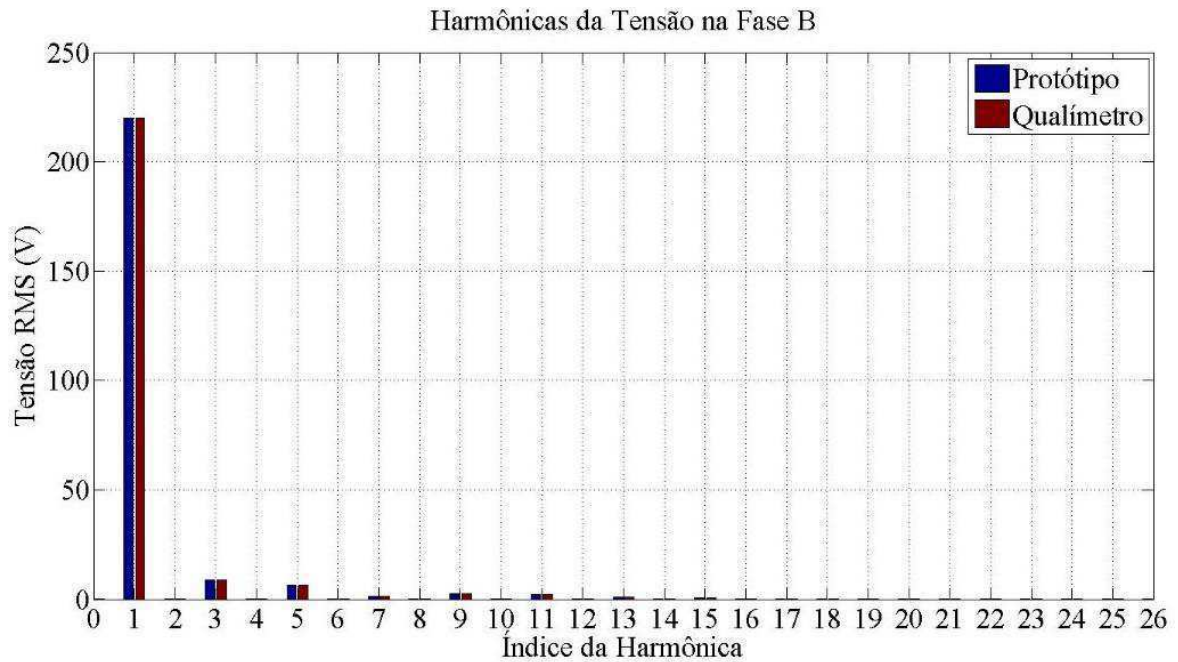


Figura 35. Gráfico de Harmônicas da Tensão na Fase C. Fonte: Próprio autor.

Pelos gráficos dos harmônicos apresentados nas Figuras 30 a 35, é possível observar a similaridade dos índices harmônicos para o teste com carga resistiva realizado. As DHT obtidas, são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Distorções harmônicas totais medidas pelo protótipo e AQEE.

Fase A			
	AQEE	Protótipo	Desvio Percentual (%)
DHT Tensão (%)	3,65	3,67	0,54
DHT Corrente (%)	3,45	3,37	-2,31
Fase B			
	AQEE	Protótipo	Desvio Percentual (%)
DHT Tensão (%)	5,21	5,24	0,57
DHT Corrente (%)	4,76	4,68	-1,68
Fase C			
	AQEE	Protótipo	Desvio Percentual (%)
DHT Tensão (%)	3,63	3,67	1,10
DHT Corrente (%)	3,56	3,25	-8,7

Os valores das DHT obtidas apresentaram desvios percentuais de no máximo -8,7% em relação aos medidos pelo AQEE. Diferentemente do protótipo desenvolvido, o AQEE realiza o cálculo das DHT considerando harmônicas até a ordem 50, sendo este um dos fatores consideráveis para o desvio obtido nas medições.

4.2.2 TESTES COM CARGAS NÃO LINEARES

De forma análoga aos testes realizados com cargas lineares, foram realizadas medições com o AQEE e o protótipo desenvolvido para cargas com fator de potência indutivo e com correntes com valores de harmônicas não fundamentais consideráveis. Desta maneira, foram instaladas na fases A e C cargas compostas por uma combinação de lâmpadas fluorescentes e incandescentes e na fase B uma carga composta apenas por lâmpadas fluorescentes. O arranjo experimental é ilustrado pela Figura 36.

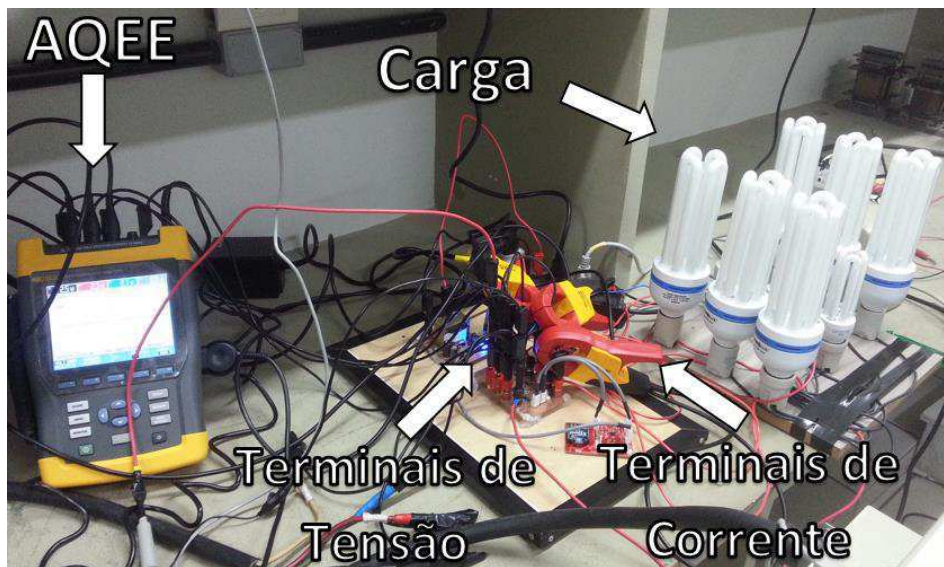


Figura 36. Arranjo experimental com carga não linear. Fonte: Próprio autor.

As formas de onda de tensão foram adquiridas tanto com o protótipo desenvolvido quanto pelo AQEE e ambas foram exportadas para o Matlab® [37], onde as análises foram realizadas. As Figuras 37 a 39 ilustram as formas de onda de tensão adquiridas e sobrepostas para comparação.

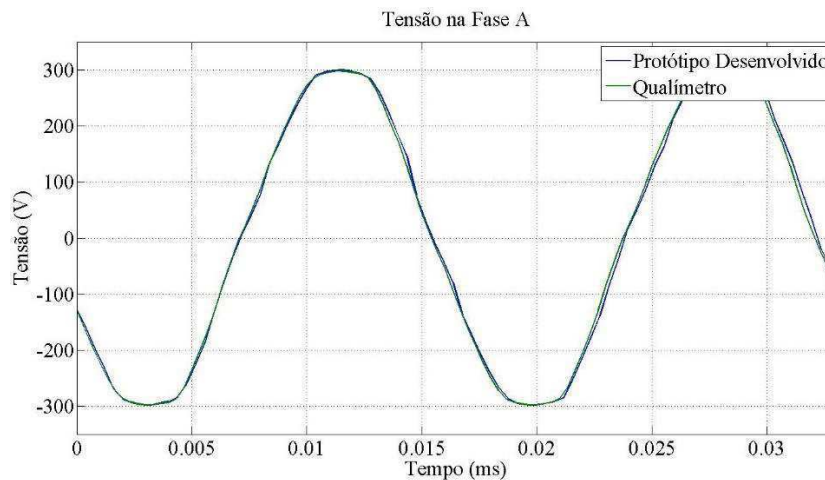


Figura 37. Formas de onda da tensão na fase A obtidas pelo protótipo desenvolvido e AQEE no teste com carga não linear. Fonte: Próprio autor.

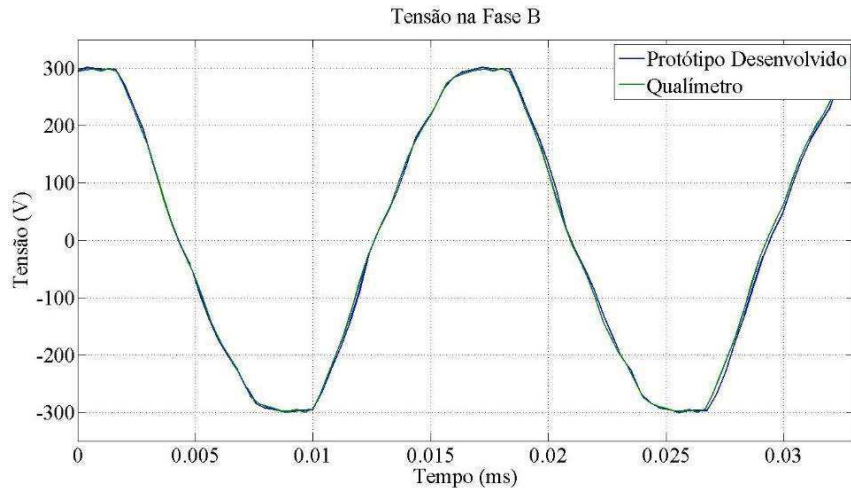


Figura 38. Formas de onda da tensão na fase B obtidas pelo protótipo desenvolvido e AQEE no teste com carga indutiva. Fonte: Próprio autor.

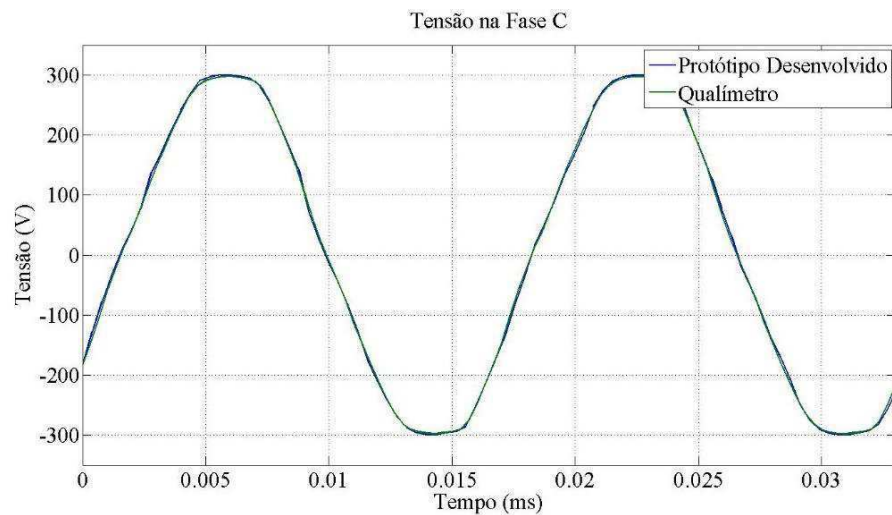


Figura 39. Formas de onda da tensão na fase A obtidas pelo protótipo desenvolvido e AQEE no teste com carga indutiva. Fonte: Próprio autor.

A análise das formas de onda de tensão foram feitas em função de seus valores de pico positivos e negativos, RMS e a correlação entre a forma de onda medida pelo protótipo e pelo AQEE. Os dados são dispostos na Tabela 6.

Tabela 6. Dados comparativos entre as formas de onda da tensão adquiridas pelo protótipo e AQEE.

Fase A			
Grandeza	AQEE	Protótipo	Desvio Percentual (%)
Tensão RMS (V)	220,00	220,21	0,09
Tensão de Pico Máxima (V)	298,00	299,91	0,64
Tensão de Pico Mínima (V)	-297,99	-298,56	0,19
Correlação das Formas de Onda		0,99	

Fase B			
Grandeza	AQEE	Protótipo	Desvio Percentual (%)
Tensão RMS (V)	219,98	220,26	0,13
Tensão de Pico Máxima (V)	299,37	301,38	0,67
Tensão de Pico Mínima (V)	-299,83	-300,25	0,14
Coef. Correlação das Formas de Onda		0,99	
Fase C			
Grandeza	AQEE	Protótipo	Desvio Percentual (%)
Tensão RMS (V)	220,00	220,01	0,00
Tensão de Pico Máxima (V)	298,14	300,60	0,82
Tensão de Pico Mínima (V)	-298,05	-299,43	0,46
Coef. Correlação das Formas de Onda		0,99	

As medições realizadas com o protótipo desenvolvido apresentaram desvios percentuais semelhantes aos testes realizados com cargas lineares. Este resultado já era esperado, uma vez que a potência da fonte é capaz de suprir cargas de até 3 kVA, ou seja, até este limite de potência não há alterações significativas na forma de onda da tensão fornecida.

O intuito principal do teste com cargas não-lineares foi avaliar o comportamento do sistema ao medir formas de onda com coeficientes harmônicos significativos, desta forma, neste teste realizado, esperavam-se obter formas de onda de corrente deformadas, em relação a uma onda senoidal pura, que pudessem apresentar maiores dificuldades para o sistema no quesito de exatidão. As formas de onda de corrente obtidas pelo AQEE e pelo protótipo desenvolvido são apresentadas nas Figuras 40 a 42.

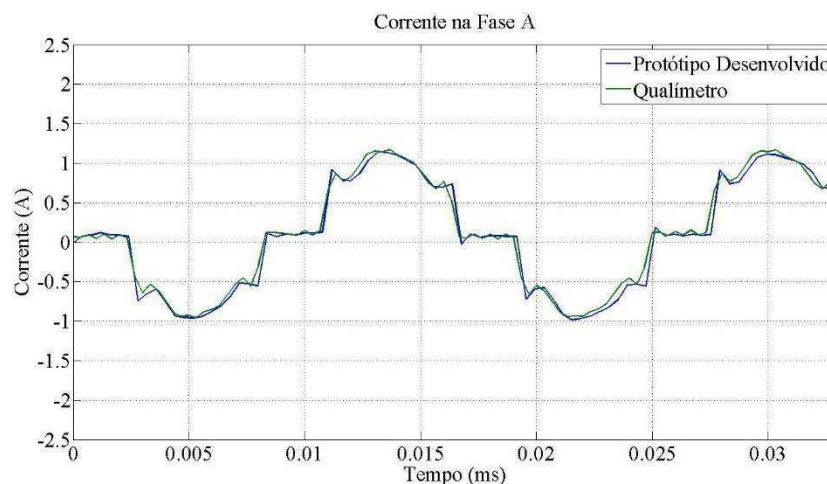


Figura 40. Formas de onda da corrente na fase A obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo AQEE no teste com carga não linear. Fonte: Próprio autor.

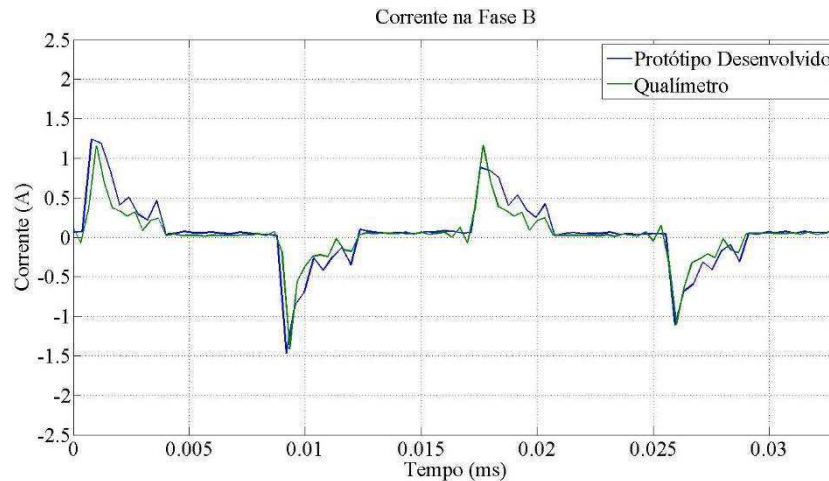


Figura 41. Formas de onda da corrente na fase B obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo AQEE no teste com carga não linear. Fonte: Próprio autor.

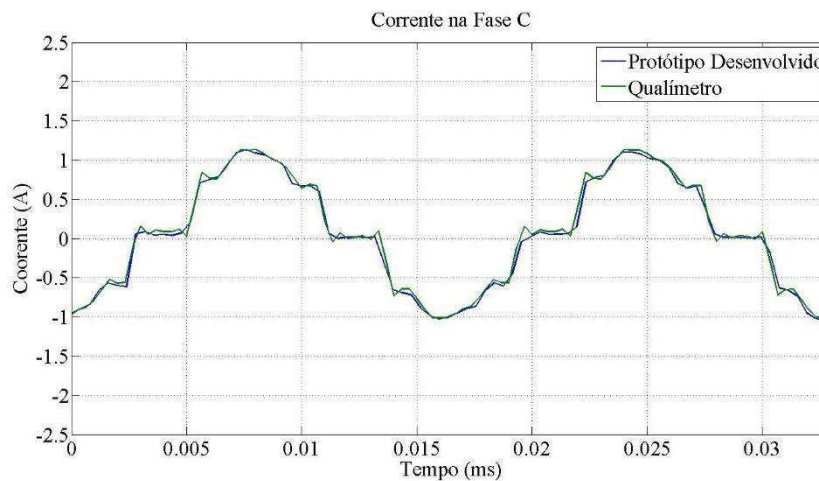


Figura 42. Formas de onda da corrente na fase C obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo AQEE no teste com carga não linear. Fonte: Próprio autor.

Analisando as formas de onda obtidas pelas fases A, B e C é possível observar um grau de similaridade menos significativo na fase B, quando comparado as outras duas. Claramente, o sinal da corrente na fase B apresenta uma forma mais distorcida, quando comparado com os experimentados pelas fases A e C, por apresentar uma composição de harmônicos maiores gerados pela não-linearidade presente no circuito do reator da lâmpada. Na composição total do sinal, os efeitos das harmônicas nas fases A e C são menores, pois a corrente drenada pela lâmpada incandescente aumenta o valor da componente fundamental, diminuindo a importância das harmônicas na corrente geradas pela lâmpada de descarga, resultando em DHT menores. Na Tabela 7 são expostos os valores das correntes RMS, máximo e mínimo e coeficiente de correlação entre as formas de onda da corrente na fases A, B e C.

Tabela 7. Dados comparativos entre as formas de onda da corrente adquiridas pelo protótipo e AQEE.

Fase A			
Grandeza	AQEE	Protótipo	Desvio Percentual (%)
Corrente RMS (A)	0,65	0,70	7,69
Corrente de Pico Positiva (A)	1,17	1,14	-2,56
Corrente de Pico Negativa (A)	-0,95	-0,98	3,15
Coef. Correlação das Formas de Onda		0,99	
Fase B			
Grandeza	AQEE	Protótipo	Desvio Percentual (%)
Corrente RMS (A)	0,49	0,52	6,12
Corrente de Pico Positiva (A)	1,16	1,57	35,34
Corrente de Pico Negativa (A)	-1,41	-1,47	4,25
Coef. Correlação das Formas de Onda		0,96	
Fase C			
Grandeza	AQEE	Protótipo	Desvio Percentual (%)
Corrente RMS (A)	0,68	0,70	2,94
Corrente de Pico Positiva (A)	1,12	1,13	0,89
Corrente de Pico Negativa (A)	-1,01	-1,04	2,97
Coef. Correlação das Formas de Onda		0,99	

Conforme exposto na Tabela 7, os erros permaneceram semelhantes aos apresentados com os testes realizados com cargas resistivas, com exceção do apresentado no valor de pico máximo de corrente na fase B. Este desvio percentual é devido à incapacidade do sistema de amostrar picos de corrente significativamente rápidos, penalizando também o coeficiente de correlação das formas de onda amostradas.

As medições de potências e fator de potência foram comparadas, conforme exposto na Tabela 8.

Tabela 8. Dados comparativos das potências medidas pelo protótipo e AQEE.

Fase A			
Grandeza	AQEE	Protótipo	Desvio Percentual (%)
Potência Aparente (VA)	144,11	154,43	7,16
Potência Ativa (W)	139,43	146,85	5,32
Potência Reativa (var)	36,43	47,79	31,19
Fator de Potência	0,97	0,95	1,72
Fase B			
Grandeza	AQEE	Protótipo	Desvio Percentual (%)
Potência Aparente (VA)	107,69	114,12	5,97
Potência Ativa (W)	63,45	65,12	2,63
Potência Reativa (var)	87,01	93,72	7,70
Fator de Potência	0,59	0,57	3,15

Fase C			
Grandeza	AQEE	Protótipo	Desvio Percentual (%)
Potência Aparente (VA)	149,47	155,39	3,96
Potência Ativa (W)	144,58	148,59	2,77
Potência Reativa (var)	37,92	45,46	19,90
Fator de Potência	0,97	0,96	1,14

Analisando a Tabela 8, é possível perceber que o desvio percentual da medição de potência reativa diminuiu quando o fator de potência apresentou um valor inferior ao do teste anterior. O desvio percentual de 31,19% na medição da potência reativa ainda caracteriza-se elevado. Os desvios percentuais obtidos nas medições das potências são majoritariamente consequências dos erros obtidos na medição das correntes.

Por fim, foram analisadas as harmônicas de tensão e corrente, assim como as DHT associadas. Os gráficos de harmônicas obtidos pelo protótipo e AQEE, das tensões e correntes são apresentados nas Figuras 43 à 48.

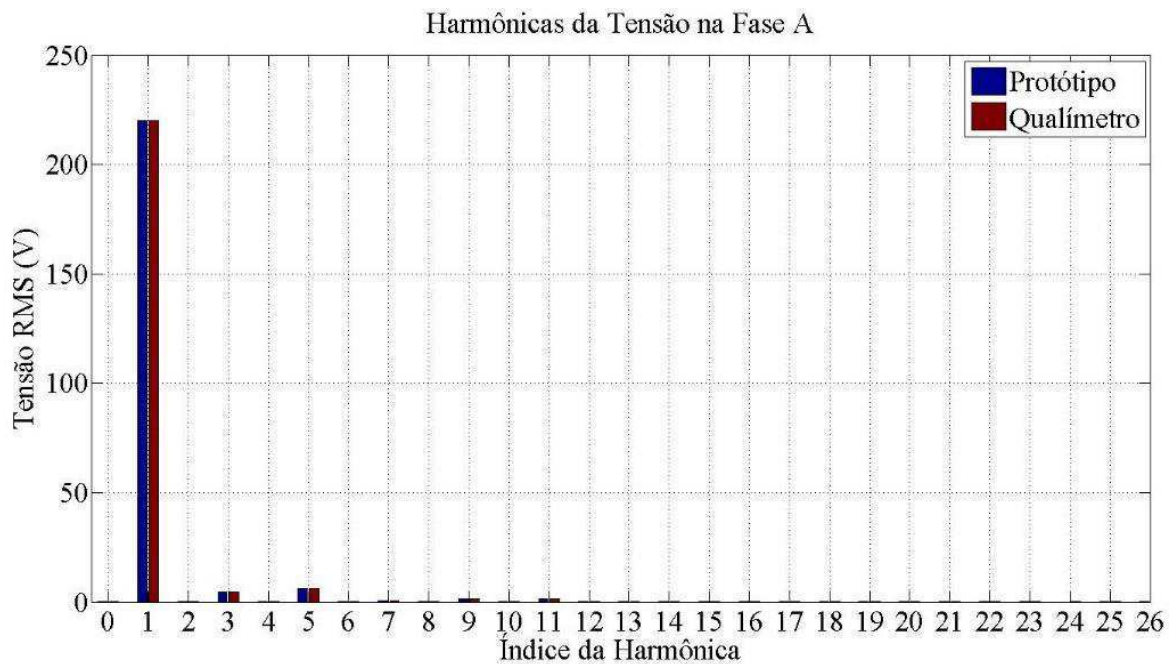


Figura 43. Gráfico de harmônicas da tensão na fase A no teste com carga não linear. Fonte: Próprio autor.

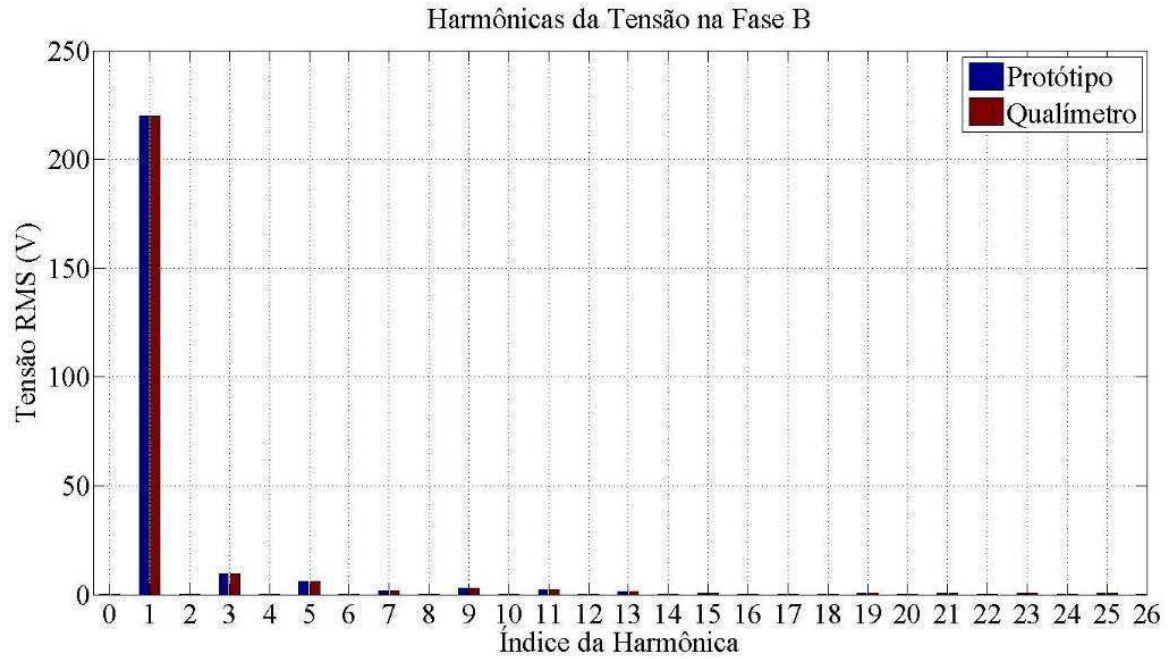


Figura 44. Gráfico de harmônicas da tensão na fase B no teste com carga não linear. Fonte: Próprio autor.

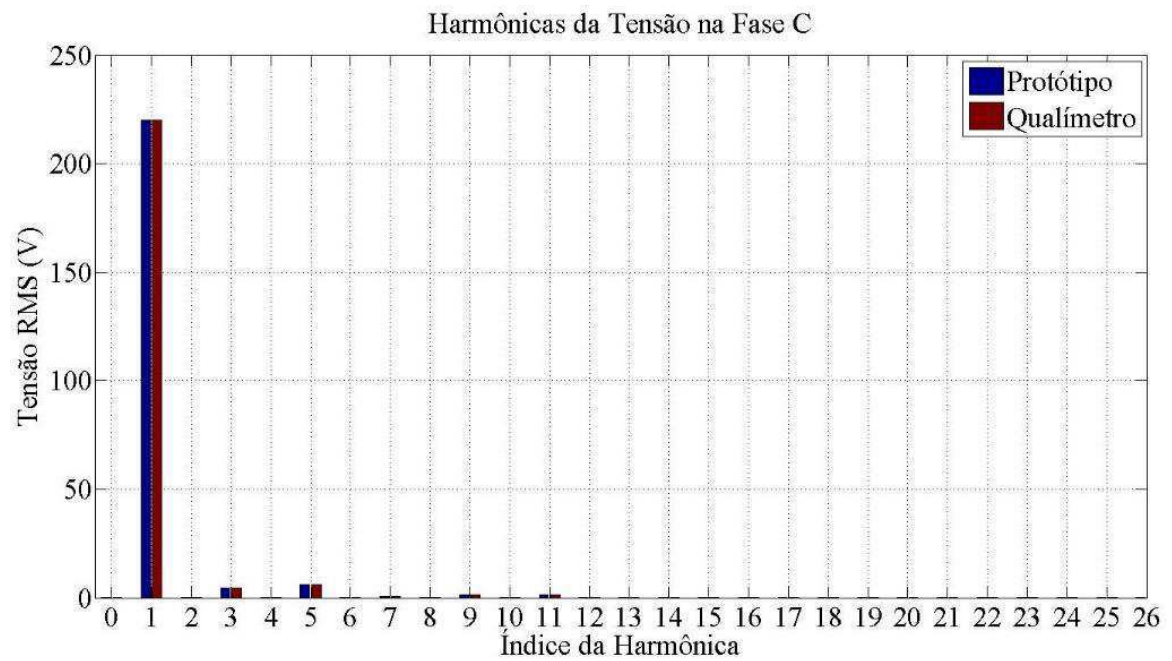


Figura 45. Gráfico de harmônicas da tensão na fase C no teste com carga não linear. Fonte: Próprio autor.

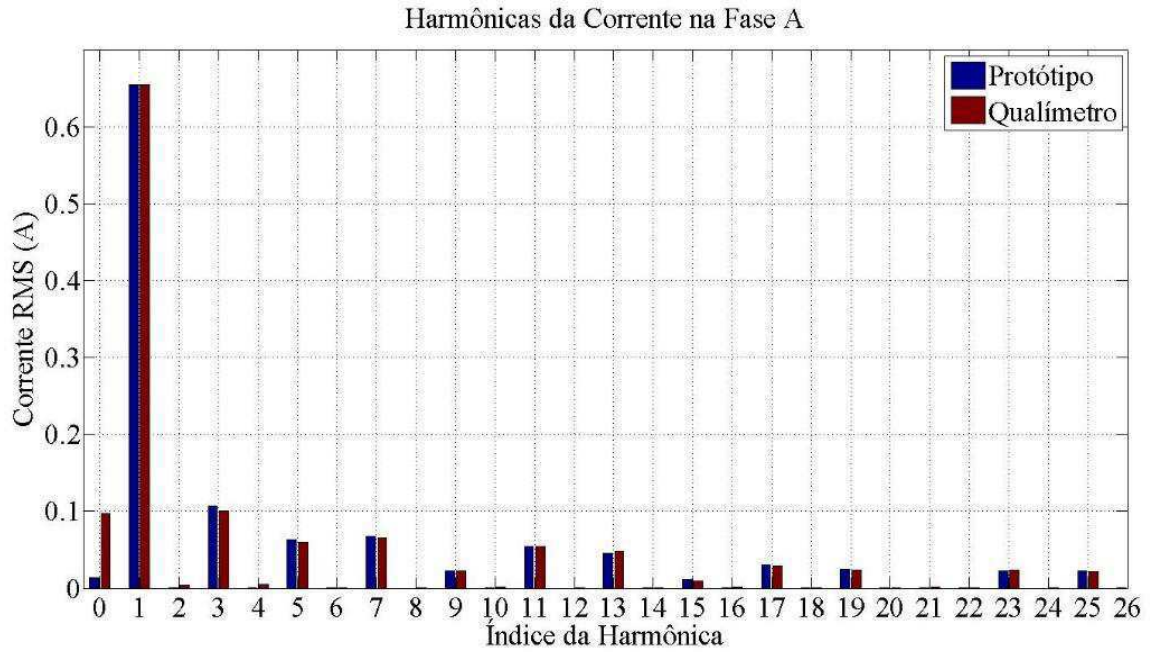


Figura 46. Gráfico de harmônicas da corrente na fase A no teste com carga não linear. Fonte: Próprio autor.

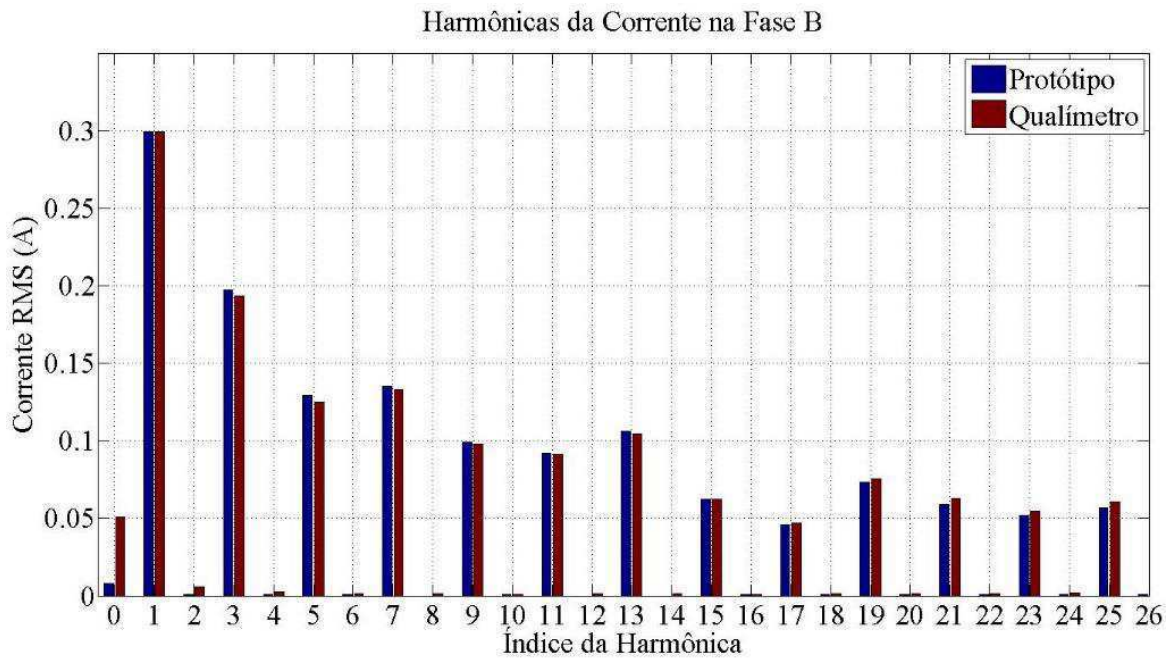


Figura 47. Gráfico de harmônicas da corrente na fase B no teste com carga não linear. Fonte: Próprio autor.

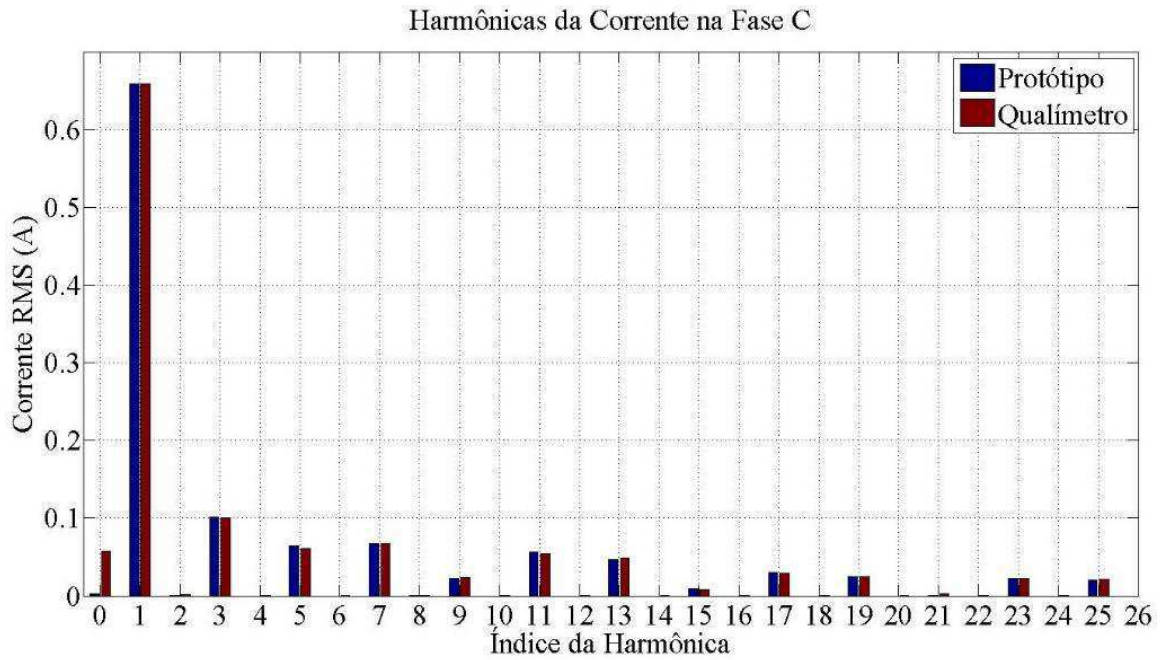


Figura 48. Gráfico de harmônicas da corrente na fase C no teste com carga não linear. Fonte: Próprio autor.

Observando os gráficos de harmônicas é possível notar a similaridade no cálculo dos valores do protótipo em relação ao AQEE. As distorções harmônicas totais obtidas são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9. Distorções harmônicas totais obtidas no protótipo e AQEE para o teste com carga não linear.

Fase A			
	AQEE	Protótipo	Desvio Percentual (%)
DHT Tensão (%)	3,62	3,65	0,83
DHT Corrente (%)	24,72	25,59	3,52
Fase B			
	AQEE	Protótipo	Desvio Percentual (%)
DHT Tensão (%)	5,48	5,53	0,91
DHT Corrente (%)	116,82	117,73	0,78
Fase C			
	AQEE	Protótipo	Desvio Percentual (%)
DHT Tensão (%)	3,65	3,62	0,82
DHT Corrente (%)	24,78	25,12	1,37

Os cálculos realizados das DHT a partir dos valores das harmônicas medidas pelo sistema apresentaram consistência satisfatória quando comparados aos acusados pelo AQEE, uma vez que o maior erro obtido foi de 3,52%. Desta forma, comprovou-se a eficácia do sistema desenvolvido para a medição e análise de harmônicas.

4.3 MONITORAMENTO DO QUADRO DE ENERGIA DO LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO

O segundo teste realizado com o sistema de aquisição de dados desenvolvido consiste na avaliação de seu potencial em monitoramento e armazenamento de dados. Desta forma, o protótipo desenvolvido foi instalado no quadro de energia do Laboratório de Alta Tensão (LAT), localizado na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Neste quadro de energia, a tensão na fase A é regulada por meio de um Transformador de Regulação (TR) e as fases B e C são conectadas diretamente da rede elétrica. Durante cinco dias, foram monitoradas as tensões e correntes, assim como as potências demandadas e as distorções harmônicas totais nas três fases da rede elétrica que abastecem a energia do laboratório. Também foi monitorada a temperatura na carcaça do TR. O arranjo experimental é apresentado na Figura 49.

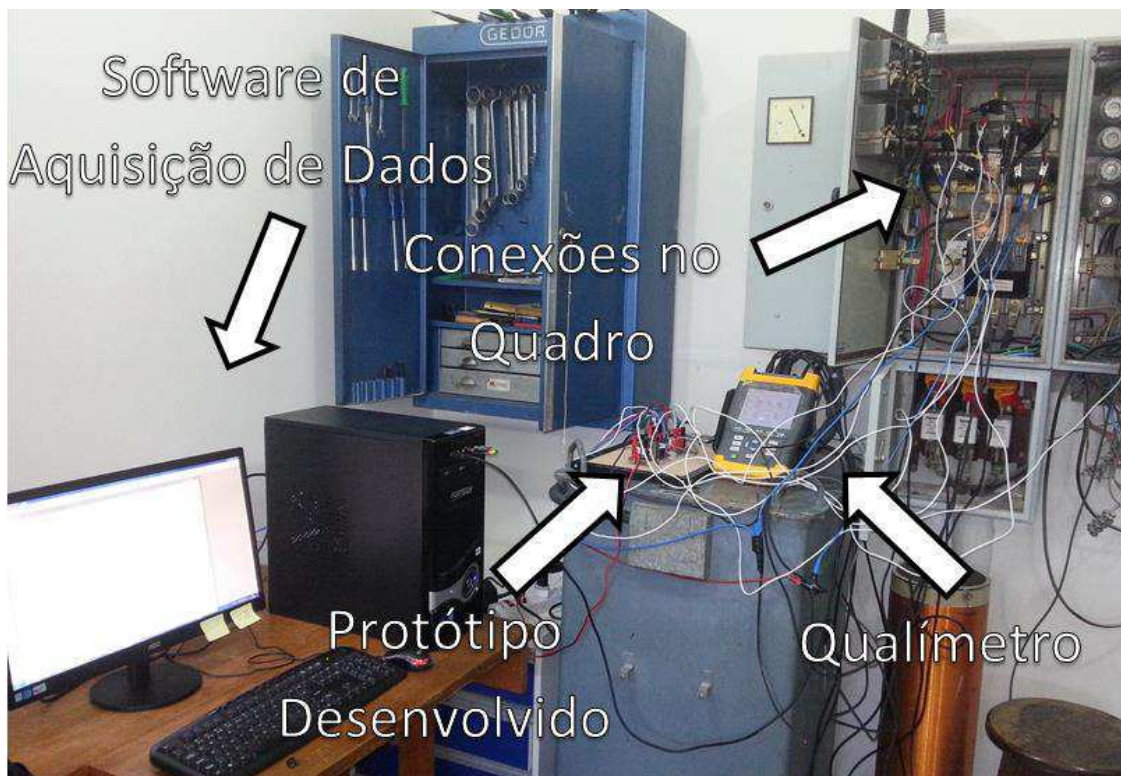


Figura 49. Arranjo experimental para o teste de monitoramento. Fonte: Próprio autor.

Para realizar o monitoramento da energia elétrica, foi feito uso das conexões acessíveis presentes no quadro de distribuição do LAT. Como a corrente nas fases poderiam exceder o valor máximo mensurável pelo ACS712, o sistema foi conectado ao secundário dos três Transformadores de Corrente (TC) presentes no quadro, cujos fatores de relação são 100/5. Todos os demais instrumentos conectados aos secundários dos referidos TC foram

desconectados e seu atraso de fase foi registrado para posterior consideração durante o processamento de dados. As conexões realizadas no quadro de distribuição são apresentadas na Figura 50.

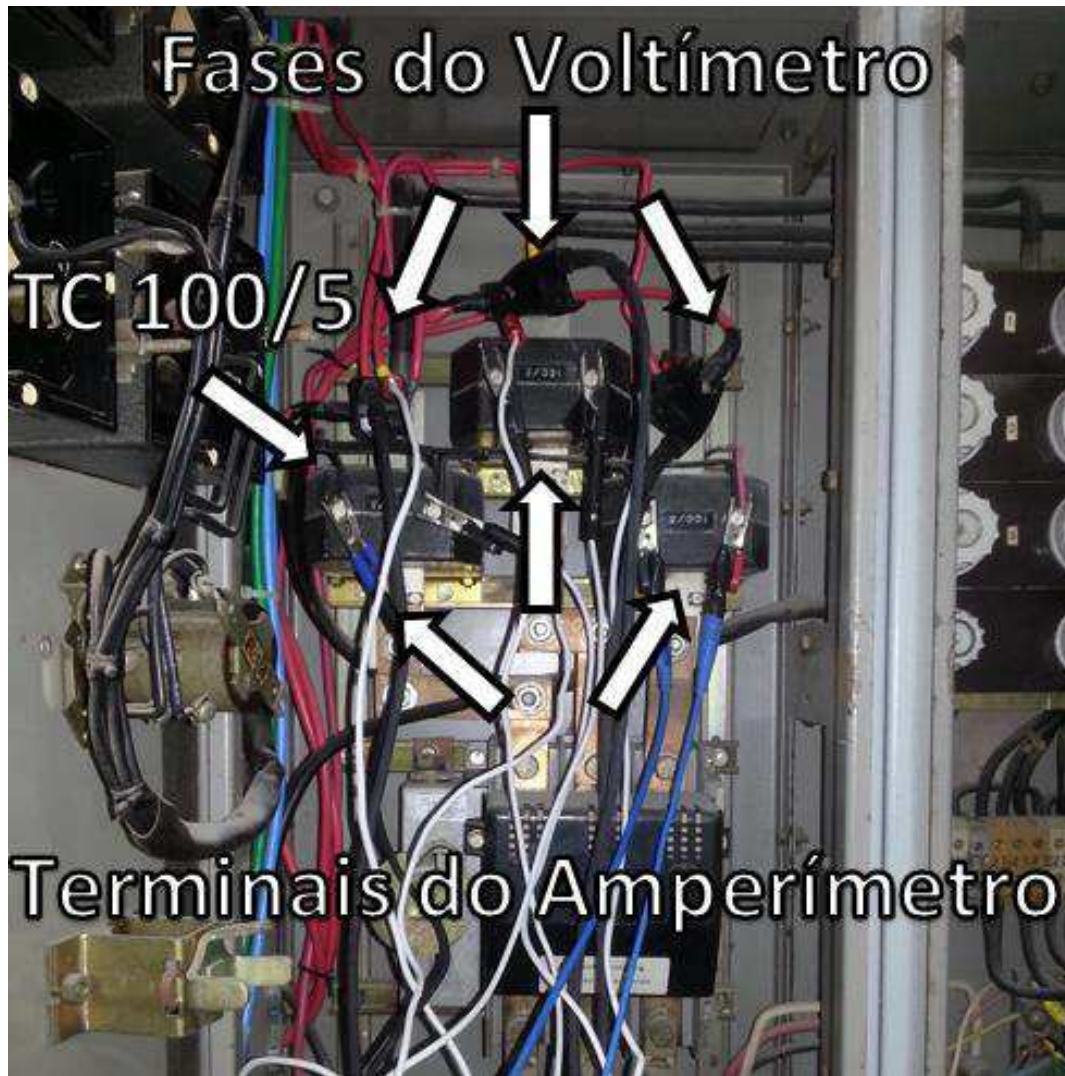


Figura 50. Conexões no quadro de energia do LAT. Fonte: Próprio autor.

O TR conectado na fase A utilizado no teste de monitoramento é apresentado na Figura 51(a) e seus dados de placa são apresentado na Figura 51(b).



Figura 51. TR monitorado. Fonte: Próprio autor.

Os dados obtidos durante os dias de monitoramento foram exportados para o Matlab®, onde foram traçados gráficos das grandezas de tensão e corrente RMS, potências (aparente, ativa e reativa), fator de potência, DHT e temperatura em função do tempo.

O sistema foi posto em operação gerando uma base de dados referente aos dias:

- Quinta-Feira: 29/01/2015;
- Sexta-Feira: 30/01/2015;
- Sexta-Feira: 06/02/2015;
- Sábado: 07/02/2015;
- Domingo: 08/02/2015.

Neste capítulo, serão apresentados e discutidas as medições realizadas em 06/02/2015. Os demais gráficos podem ser encontrados nos apêndices desta dissertação.

Analisando o histórico de dados das tensões RMS no dia 06/02/2015 nas fases A, B e C, representado pelas Figuras 52, 54 e 56, é possível observar que as tensões RMS não registraram valores fora dos padrões especificados por [27], que variam de 0,95 pu a 1,05 pu, ou 209 V a 231 V. As pequenas variações observadas nas tensões das fases são provavelmente uma combinação dos seguintes fatores: excursões oriundas do sistema de distribuição, nível de carregamento local, incerteza inerente ao equipamento de medição, e especificamente para a fase A, a atenuação do próprio TR. Ainda em relação à DHT da tensão, não foram registradas inconformidades aos padrões estabelecidos por [27], ou seja, em nenhum momento foram registrados DHT com valores maiores que 10% em alguma das fases. Concluiu-se então, que

em relação à tensão, a energia fornecida pela distribuidora está nos conformes estabelecidos pela ANEEL.

Em relação ao monitoramento da corrente, os padrões de demanda de energia em todas as fases resultaram no esperado. Durante os horários comerciais foram observados maiores intensidades de corrente em todas as fases, e durante a noite, foi observado um consumo em menor escala. Na fase A, observa-se que durante o período não comercial, não há variações acentuadas de carga e DHT na corrente, logo, esta fase pode estar suprindo uma parte do sistema de iluminação noturna do LAT. As cargas das fases B e C, nos períodos não comerciais, apresentam um regime de variações periódicas, tanto no nível de corrente quanto na DHT. Um exemplo de equipamento que opera com estes regimes de cargas intermitentes é o ar-condicionado. Durante todo o período de monitoramento, foi observado nos horários de pico, dentre as três fases, um consumo superior na fase B.

Analisando o histórico de dados das potências aparente, ativa e reativa, representados pelas Figuras 53, 55 e 57, é possível observar a predominância da potência ativa sobre a reativa durante os horários de pico em todas as fases. Nas fases B e C, nota-se um fator de potência elevado durante o horário comercial, enquanto durante a noite o mesmo é afetado drasticamente. Isso acontece pelo fato de que nos horários não comerciais, as cargas de maior influência nessas fases são os equipamentos de ar-condicionado que operam em regime de ativação e desativação, de acordo com as condições climáticas do ambiente, dessa maneira, o fator de potência é majoritariamente influenciado pelas condições de operação destes equipamentos.

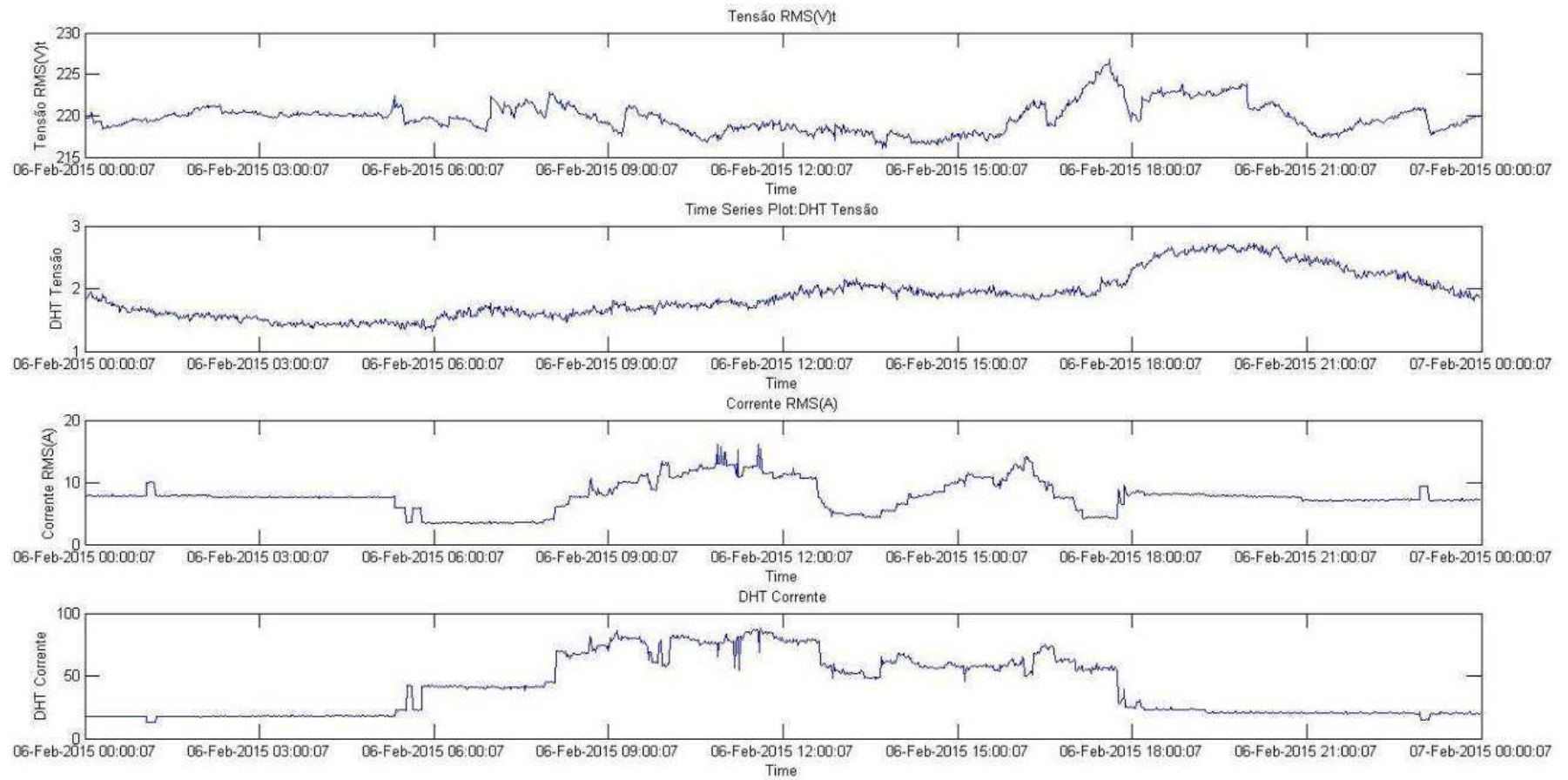


Figura 52. Registro da tensão e corrente RMS e DHT na fase A no dia 06/02/2015. Fonte: Próprio autor.

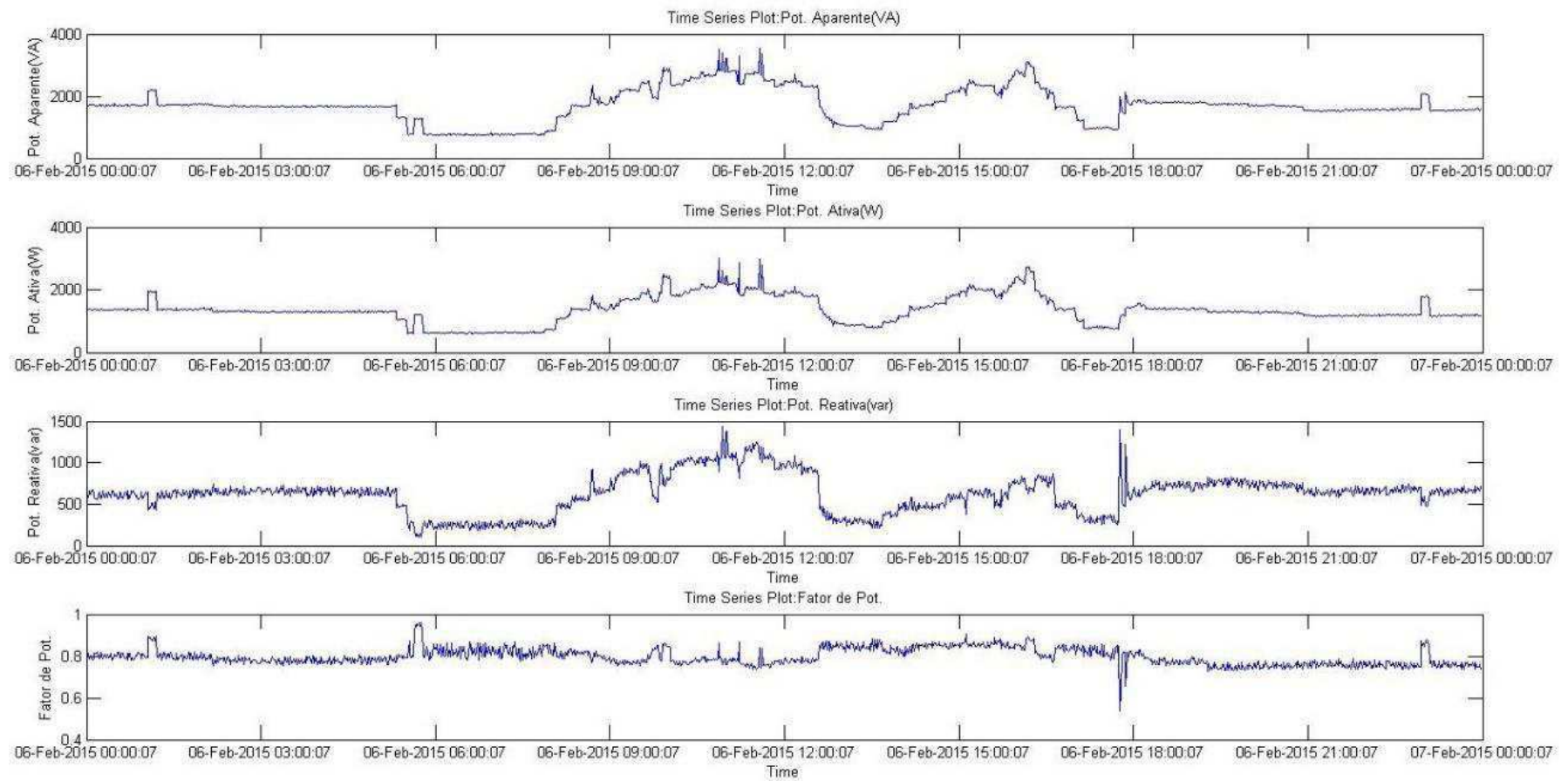


Figura 53. Registro das potências aparente, ativa, reativa e fator de potência na fase A no dia 06/02/2015. Fonte: Próprio autor.

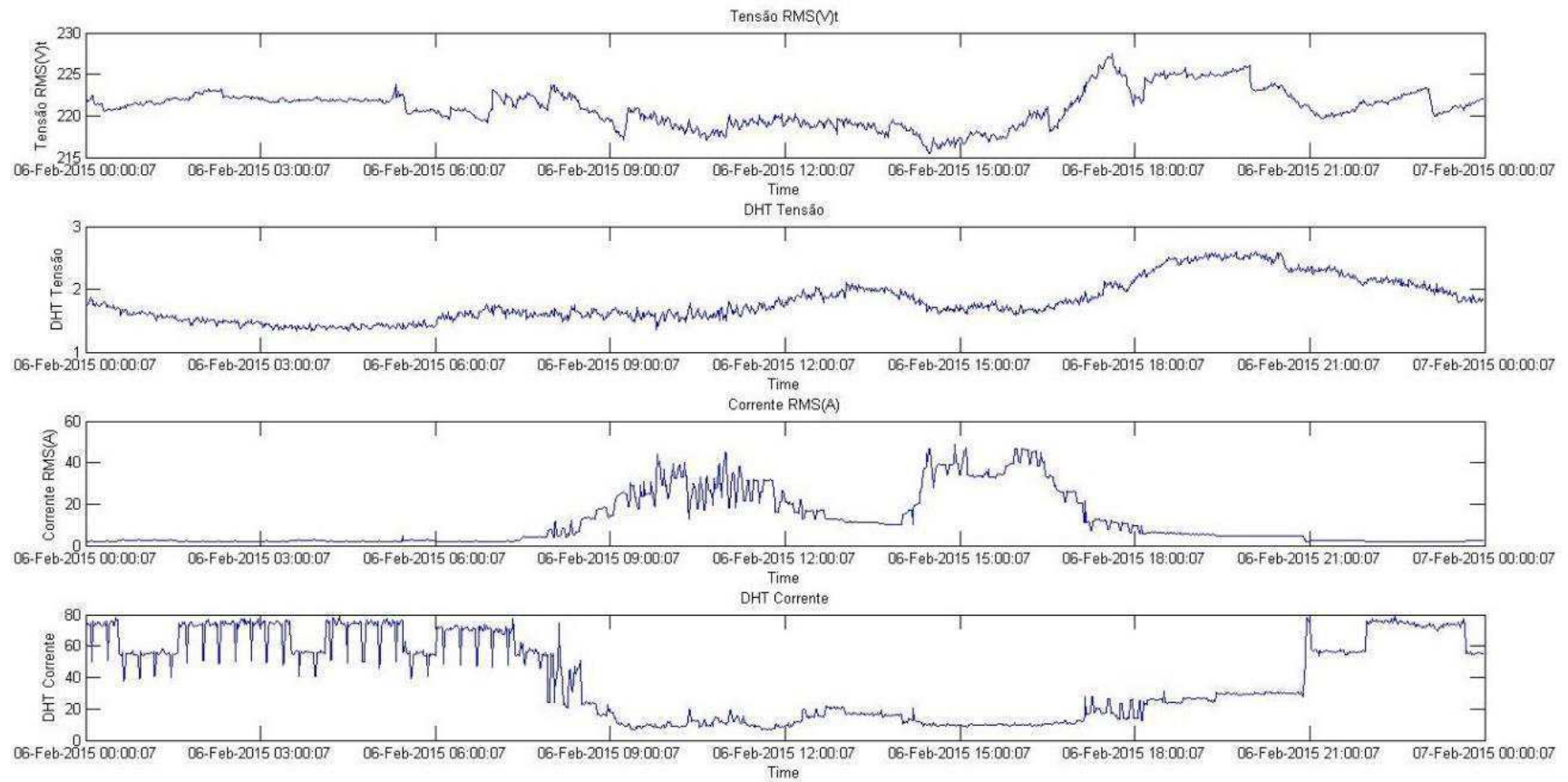


Figura 54. Registro da tensão e corrente RMS e DHT na fase B no dia 06/02/2015. Fonte: Próprio autor.

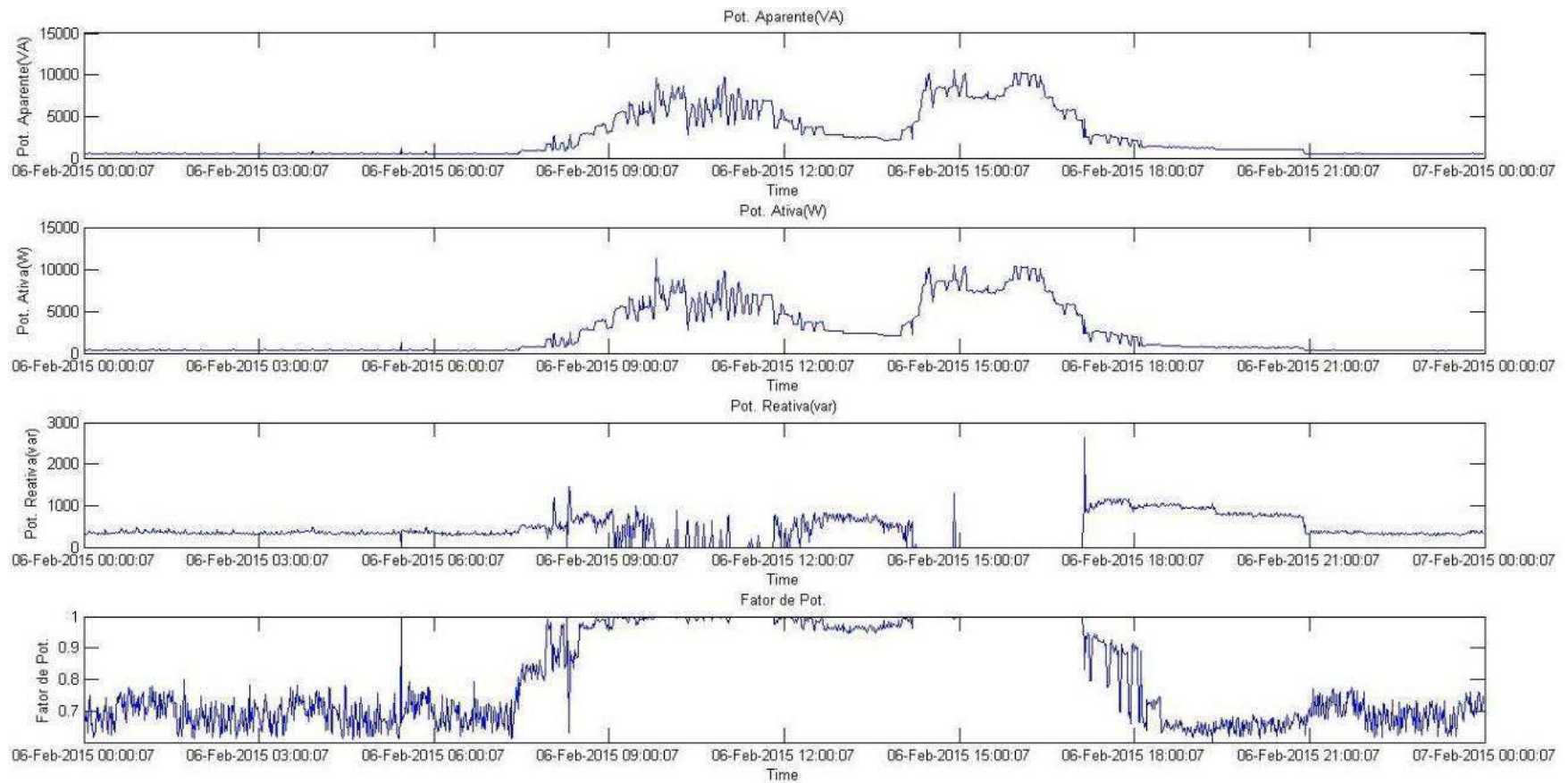


Figura 55. Registro das potências aparente, ativa, reativa e fator de potência na fase B no dia 06/02/2015. Fonte: Próprio autor.

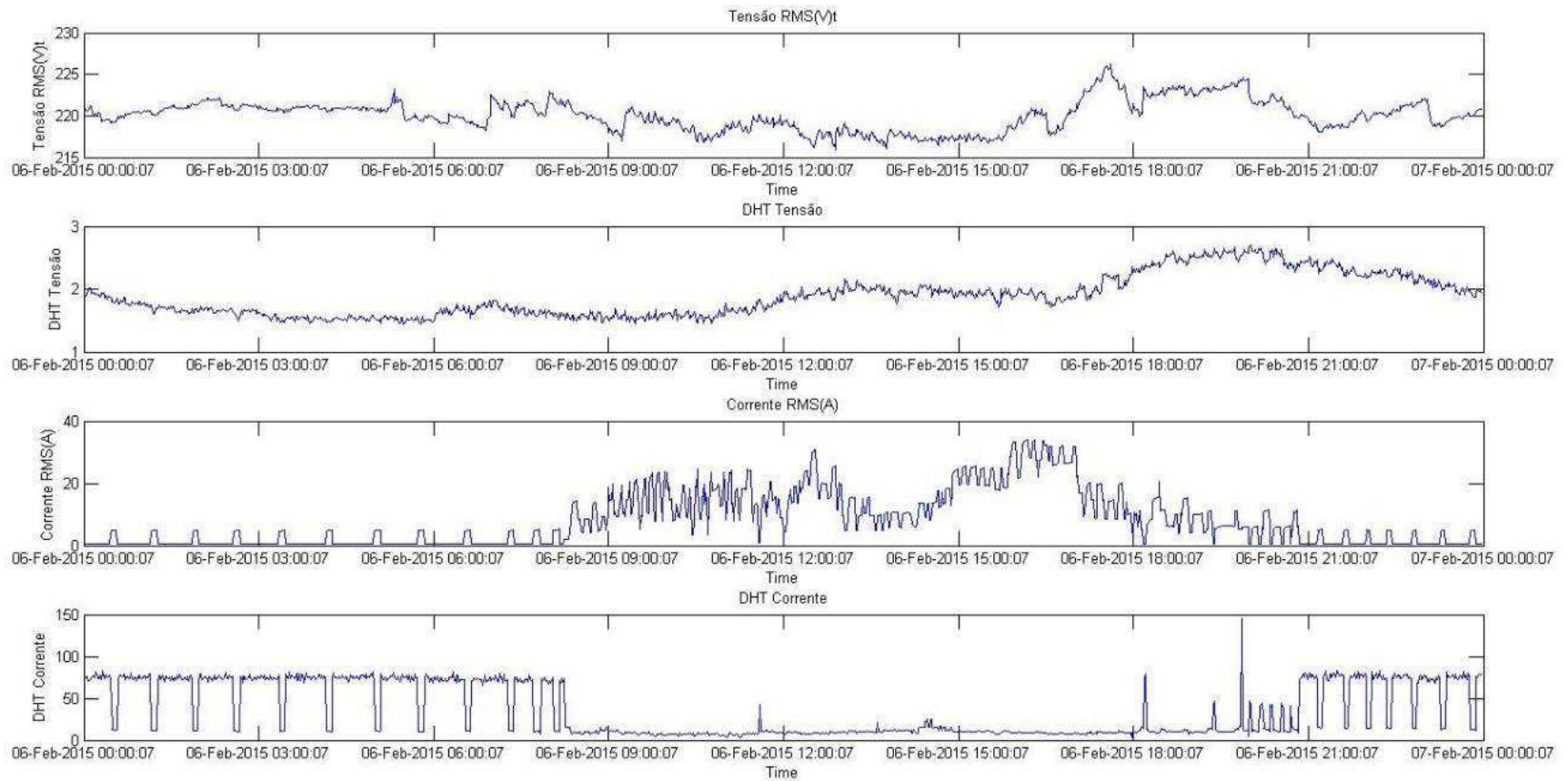


Figura 56. Registro da tensão e corrente RMS e DHT na fase C no dia 06/02/2015. Fonte: Próprio autor.

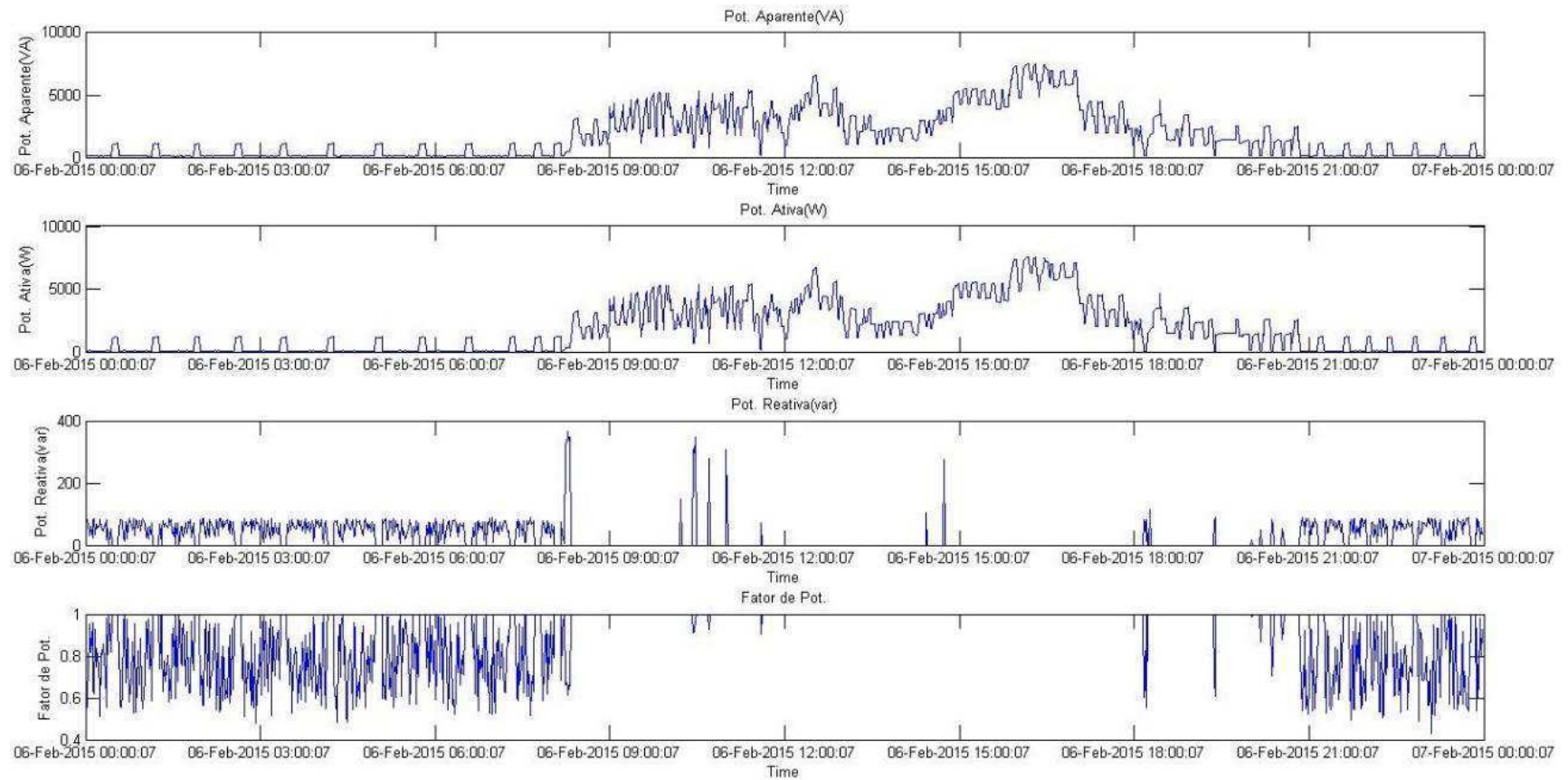


Figura 57. Registro das potências aparente, ativa, reativa e fator de potência na fase C no dia 06/02/2015. Fonte: Próprio autor.

Outro fator importante monitorado foi a temperatura na carcaça do transformador. A temperatura no transformador é um dos principais fatores que causam a redução de sua vida útil. A maior causa de falhas em transformadores é o comprometimento de algum ponto do sistema de isolamento elétrica, que é degradado principalmente por fatores como sobrecarga, umidade inadequada e temperaturas elevadas de operação que afetam as propriedades do isolante. O histórico de temperatura obtido durante o período de observação é ilustrado pelo gráfico da Figura 58.

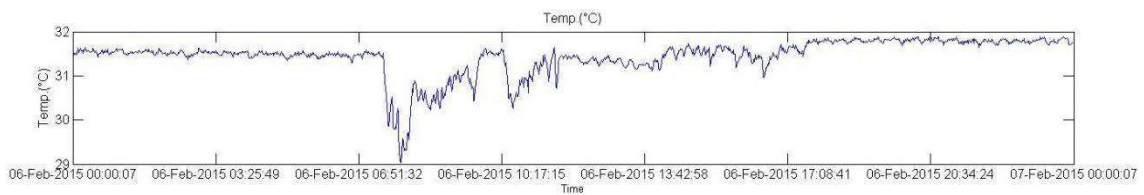


Figura 58. Registro da temperatura na carcaça do transformador. Fonte: Próprio autor.

Analisando gráfico da Figura 58, é possível inferir que o transformador não apresenta súbitas elevações de tensão, ou seja, julgando do ponto de vista térmico, não há irregulares em sua característica de operação.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de monitoramento de transformadores de distribuição. O sistema tem a capacidade de adquirir dados de variáveis elétricas, incluindo formas de onda de corrente e tensão nas três fases, valores RMS e de pico, monitorar harmônicas e distorções harmônicas totais e proporcionar uma interface para que o usuário, à distância, possa monitorar e avaliar os dados.

A unidade de monitoramento desenvolvida, obedeceu as fases de projeto, especificação, implementação e testes. Foram projetados circuitos de condicionamento e processamento para os sinais de tensão e corrente. Após condicionados, os sinais foram processados pelo circuito integrado ADE7880, que é um processador dedicado ao cálculo de grandezas relacionadas à medição de energia. Além disso, foram projetados e implementados circuitos de regulação de tensão para fornecer alimentação à todos os circuitos necessários para a composição do sistema.

Foram desenvolvidas rotinas computacionais para realizar a comunicação de todos os dispositivos do utilizados no trabalho. Dessa forma, todas as grandezas medidas pelo ADE7880, foram processadas pelas rotinas computacionais implementadas pelo microcontrolador e enviadas, via rede sem fio baseada em protocolo ZigBee, para um computador.

Foi desenvolvida uma interface gráfica, em linguagem C#, para concentrar todas as grandezas medidas e enviadas pela unidade de monitoramento. Estes dados foram organizados e expostos em forma de gráficos, quadros e relatórios. O *software* desenvolvido também implementa a função de gravação de dados, onde é alocada uma base de dados das variáveis medidas para que possam ser utilizadas para posterior análise.

Os testes de validação do sistema foram realizados em laboratório, utilizando cargas lineares e não lineares de modo a avaliar as inexatidões de medição do sistema desenvolvido. Também foi realizado o teste de monitoramento de longa duração, no qual uma base de dados foi gerada com as variáveis medidas pelo sistema em diferentes dias. Os dados armazenados foram exportados para uma rotina computacional implementada no *software* Matlab®, onde gráficos foram gerados para visualização e análise.

A partir dos resultados obtidos, observa-se que o sistema opera com exatidões satisfatórias nas aquisições das formas de onda e medições de tensões e correntes *RMS*. As medições de potência ativa, aparente e fator de potência, também apresentaram valores satisfatórios, quando comparados com os obtidos pelo AQEE. A maior deficiência do circuito

reside no elevada incerteza na medição da potência reativa em cargas com fator de potência próximo ao valor unitário.

A partir do sistema desenvolvido, estudos futuros podem ser realizados tanto na melhoria da confiabilidade das medições, quando na aplicação do sistema em trabalhos que requeiram o monitoramento de transformadores de distribuição ou de outros dispositivos, além de outras aplicações que necessitem de sistemas de aquisição e processamento dos dados que foram implementados.

Para a continuação deste trabalho, propõe-se:

- Avaliar o consumo de energia elétrica, bem como fontes alternativas de energia, de forma a permitir que o sistema opere mesmo em caso de interrupção de energia elétrica da linha de transmissão;
- Avaliar a aplicabilidade de um sistema de interação via internet que possa integrar o sistema em tempo real com um servidor on-line de dados;
- Desenvolver melhorias no sistema de condicionamento do sinal, de forma a eliminar o erro da medição de potência reativa;
- Desenvolver uma função adicional de medição de consumo de energia, de forma que seja possível a distribuidora de energia elétrica possa consultar o sistema e conferir a demanda de energia mensal do transformador de distribuição. Esta função poderia fornecer subsídios para a detecção de roubo de energia;
- Integrar ao sistema sensores de temperatura diretamente no óleo isolante do transformador e sensores de vibração de forma a fornecer subsídios adicionais para a caracterização da saúde do equipamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. A. C., J. T. Burnham R. S. Gorur, *Outdoor Insulators*. Phoenix, Ariz: Ravi S Gorur Inc, 1999.
- [2] Fernandes JR, F. F., “Modelo de Transformadores de Potencial Capacitivos para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos,” Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, 2003.
- [3] E. S. Jin, L. L. Liu, Z. Q. Bo, and A. Klimek, “Parameter identification of the transformer winding based on least-squares method,” in *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008, pp. 1–6.
- [4] W. Roshen, “Ferrite core loss for power magnetic components design,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 27, no. 6, pp. 4407–4415, Nov. 1991.
- [5] Araújo, J. F., “Modelagem Matemática de Transformadores Monofásicos de Baixa Potência Baseada na Resposta em Frequência da Corrente de Excitação,” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, 2003.
- [6] A. E. B. Abu-Elanien and M. M. A. Salama, “Survey on the Transformer Condition Monitoring,” in *2007 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering*, 2007, pp. 187–191.
- [7] Souza, Denise Cascão Poli, “Falhas e defeitos ocorridos em transformadores de potência do sistema elétrico da Celg, nos últimos 28 anos: um estudo de caso,” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Goiania, 2008.
- [8] Falcão, D. M., “Integração de Tecnologias para Viabilização da Smart Grid,” presented at the Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2010.
- [9] Cronje Madhoo, H., “Power grid intelligence utility challenges on advanced metering infrastructure deployment and the use of meters as smart grid sensors,” presented at the International Symposium on High Voltage Engineering, Seoul - South Korea, 2013.
- [10] M. Hashmi, S. Hanninen, and K. Maki, “Survey of smart grid concepts, architectures, and technological demonstrations worldwide,” in *2011 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America)*, 2011, pp. 1–7.
- [11] F. Tao, D. Zhang, and Z. Liao, “The design of Zigbee-based transformer insulation on-line monitoring system,” in *2012 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, 2012, pp. 1–4.
- [12] Thiyagarajan, V, “International Journal of Research and Reviews in Applied,” *An Efficient Monitoring Substations Using Microcontroller Based Monitoring System*, Jun-2010.
- [13] Y.-F. Su, C.-X. Zhao, L. Xu, H.-P. Ye, and H. Xu, “Research and Application of WSN Technology in the Contact Points of Distribution Transformer,” *J. Clean Energy Technol.*, pp. 65–68, 2014.
- [14] R. Wood, R. Shoureshi, M. G. Simoes, and X. Wang, “Optical sensor for transformer monitoring,” 2003, pp. 142–145.
- [15] M. Givelberg, S. Gurevich, N. Lazar, and R. Zelichonok, “An algorithm and software for distribution transformer operating age monitoring,” in *Nineteenth Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, 1996*, 1996, pp. 299–302.
- [16] Texas Instruments, “Principles of Data Acquisition and Conversion.” 2000.
- [17] FONSECA, I. M., “Sensores, transdutores e detectores,” Material Didático, Universidade de São Judas, 2014.
- [18] Instrumatic, “Condicionamento de sinais analógicos & sensores.” 2010.
- [19] Universidade Federal do Rio de Janeiro, “Conversores AD e DA,” Notas de aula, UFRJ, 2012.

- [20] Macedo, E. C. T., “Sistema de Avaliação do Nível de Degradação de Para-Raios de Óxido de Zinco,” Universidade Federal de Campina Grande, 2010.
- [21] B. L. R. P. Vasques, I. B. de A. Coutinho, M. F. de Lima, and V. P. de O. Carneval, “ZigBee,” Site, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.
- [22] S. M. Deckmann and J. A. Pomilio, “Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica.” Jun-2010.
- [23] Paulilo, G., “O Setor Elétrico,” *Conceitos gerais sobre qualidade da energia*, vol. 34, pp. 28–35, 2008.
- [24] R. C. Dugan, *Electrical power systems quality*, Third edition. New York: McGraw Hill, 2012.
- [25] Franco, E., “Qualidade de Energia - Causas, Efeitos e Soluções.” 19-Apr-2013.
- [26] C. Masetti, “Revision of European Standard EN 50160 on power quality: Reasons and solutions,” 2010, pp. 1–7.
- [27] ANEEL, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST.” 2014.
- [28] ANEEL, “Revisão da Regulamentação sobre a Qualidade do Produto no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica,” Jun. 2011.
- [29] Maia, R. M., “Caracterização das Variações de Tensão de Curta Duração e seus Impactos em uma Planta da Indústria Alimentícia,” Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2011.
- [30] Martinho, E., *Distúrbios da Energia Elétrica*, 1st ed. Erica, 2009.
- [31] T., M. D. Paulilo, G., “Variações de tensão de longa duração,” no. 87, Apr-2013.
- [32] Departamento de Eletroeletrônica -COTUCA, “Material Didático - Circuitos Elétricos.”
- [33] B. Hanzelka, Z. A., *Guia de Aplicação de Qualidade de Energia*. 2006.
- [34] G. T. Bellarmine, A. B. Asgill, and M. V. Lee, “Noise induced from power lines in voice-frequency communications,” in *Proceedings of the IEEE Southeastcon 2000*, 2000, pp. 9–12.
- [35] E. W. Gunther, “Interharmonics-recommended updates to IEEE 519,” in *2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 2002, vol. 2, pp. 950–954 vol.2.
- [36] A. Heniche, H. Bourles, and M. P. Houry, “A desensitized controller for voltage regulation of power systems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 3, pp. 1461–1466, Aug. 1995.
- [37] MathWorks, *MATLAB*. 2014.
- [38] Analog Devices, “Datasheet - ADE7880 - Polyphase Multifunction Energy Metering IC with Harmonic Monitoring.” 2011.
- [39] Microchip, “Datasheet - PIC18F2420/2520/4420/4520.” 2014.
- [40] Digi, “Datasheet - XBee™ ZNet 2.5/XBee-PRO™ ZNet 2.5 OEM RF Modules.” 2008.
- [41] Texas Instruments, “Datasheet - LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors.” 2013.
- [42] D. Tien and M. Kavakli, *Development of Low-cost Sensor Interface for Wireless Sensor Network Monitoring Application*. Bathurst, N.S.W.: Macquarie Scientific Publishing, 2008.
- [43] Analog Devices, “A Power Meter Reference Design Based on the ADE7756.” 2011.
- [44] STMicroelectronics, “Datasheet - TL084 - General Purpose JFET Quad Operational Amplifiers.” Mar-2011.
- [45] Allegro, “Datasheet - ACS712, Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor.” 2013.

- [46] A. H. Chowdhury, W. M. Grady, and E. F. Fuchs, "An investigation of the harmonic characteristics of transformer excitation current under nonsinusoidal supply voltage," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 14, no. 2, pp. 450–458, Apr. 1999.

APÊNDICE A – HISTÓRICO DE DADOS
MONITORADOS NO DIA 28/01/2015 (QUARTA-
FEIRA)

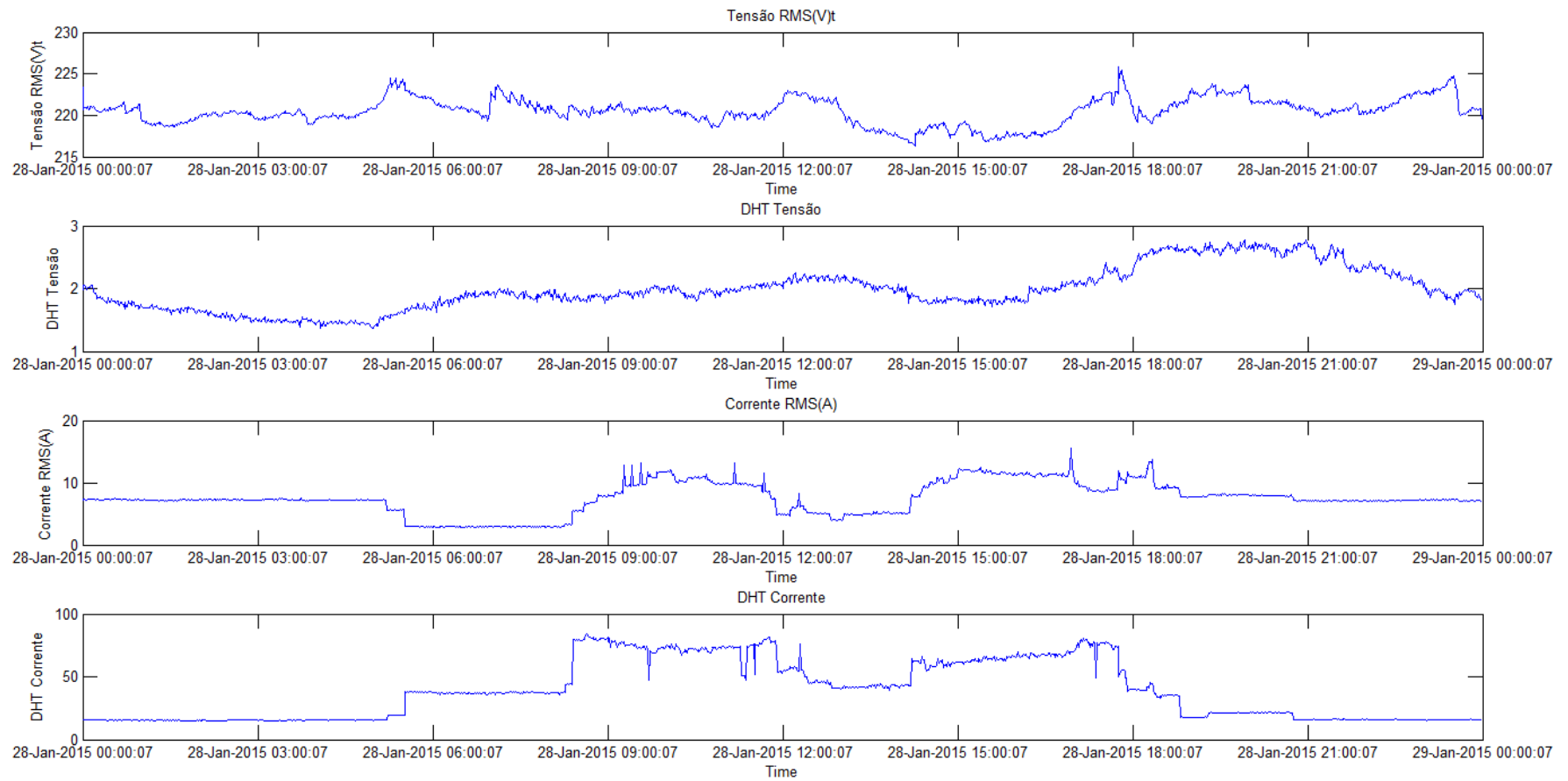


Figura 59. Tensão RMS, Corrente RMS e DHT das tensões e correntes na fase A no dia 28/01/2015. Fonte: Próprio autor.

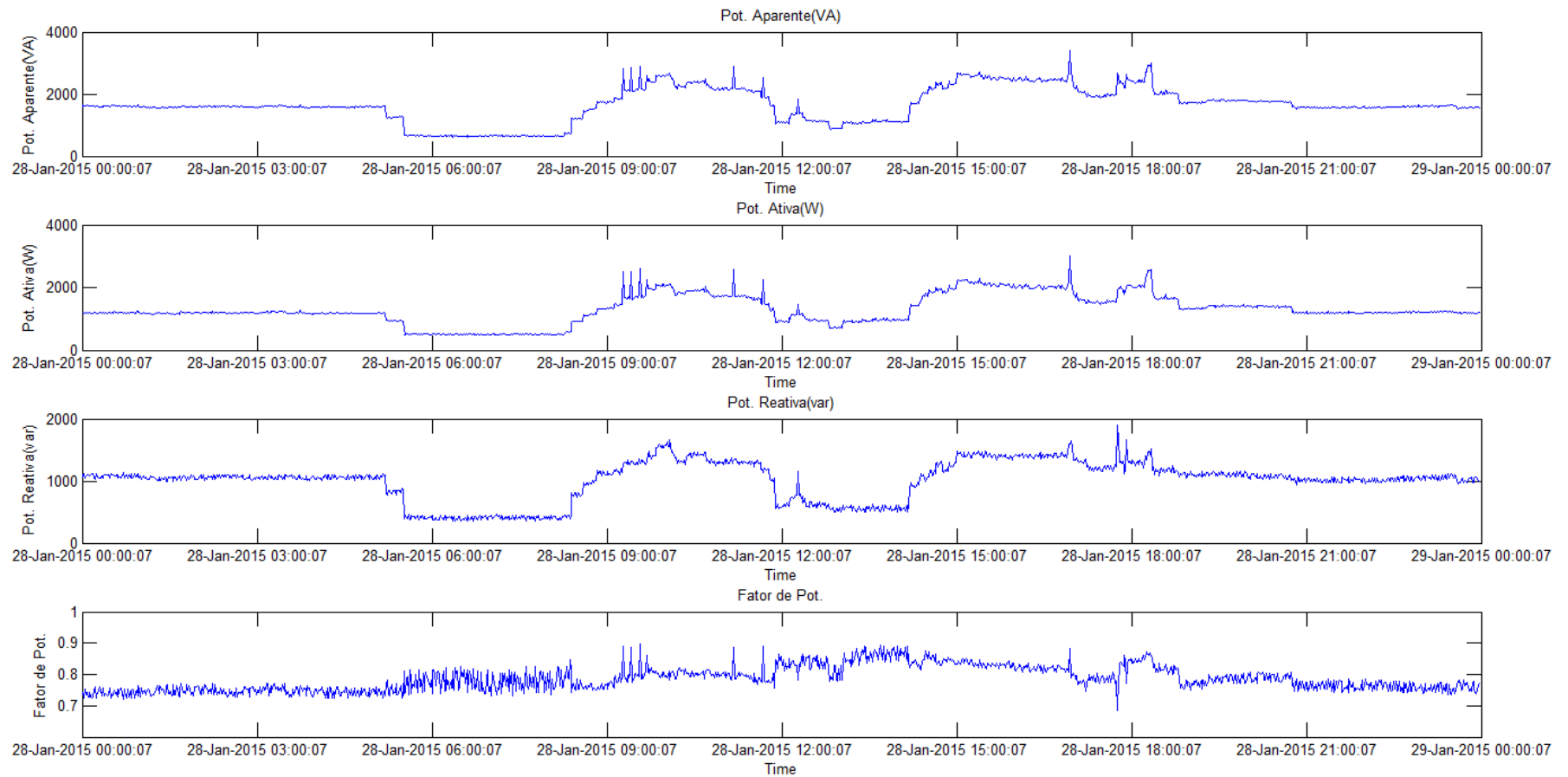


Figura 60. Potências Aparente, ativa, reativa e fator de potência na fase A no dia 28/01/2015. Fonte: Próprio autor.

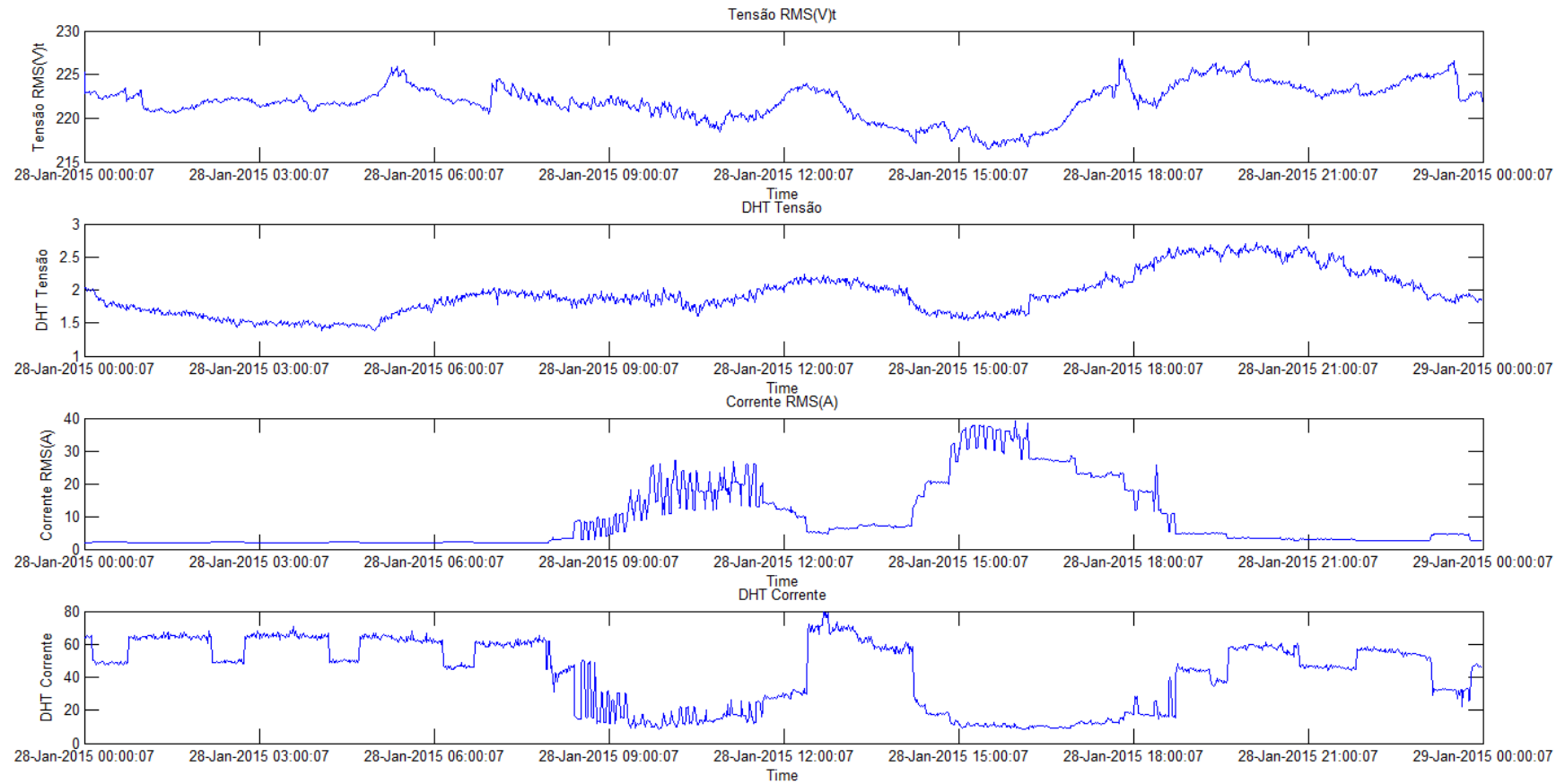


Figura 61. Tensão RMS, Corrente RMS e DHT das tensões e correntes na fase B no dia 28/01/2015. Fonte: Próprio autor.

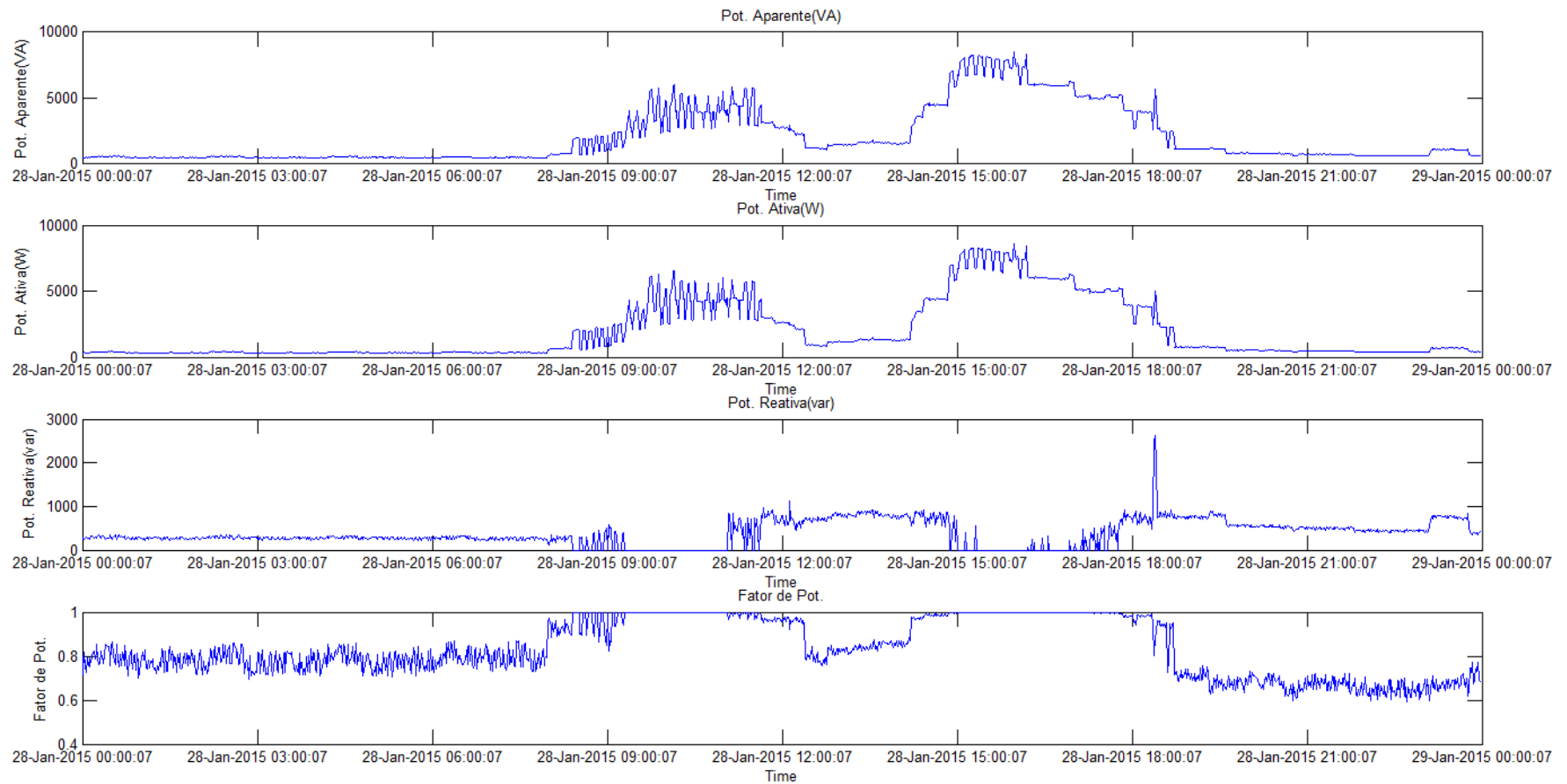


Figura 62. Potencias Aparente, ativa, reativa e fator de potência na fase B no dia 28/01/2015. Fonte: Próprio autor.

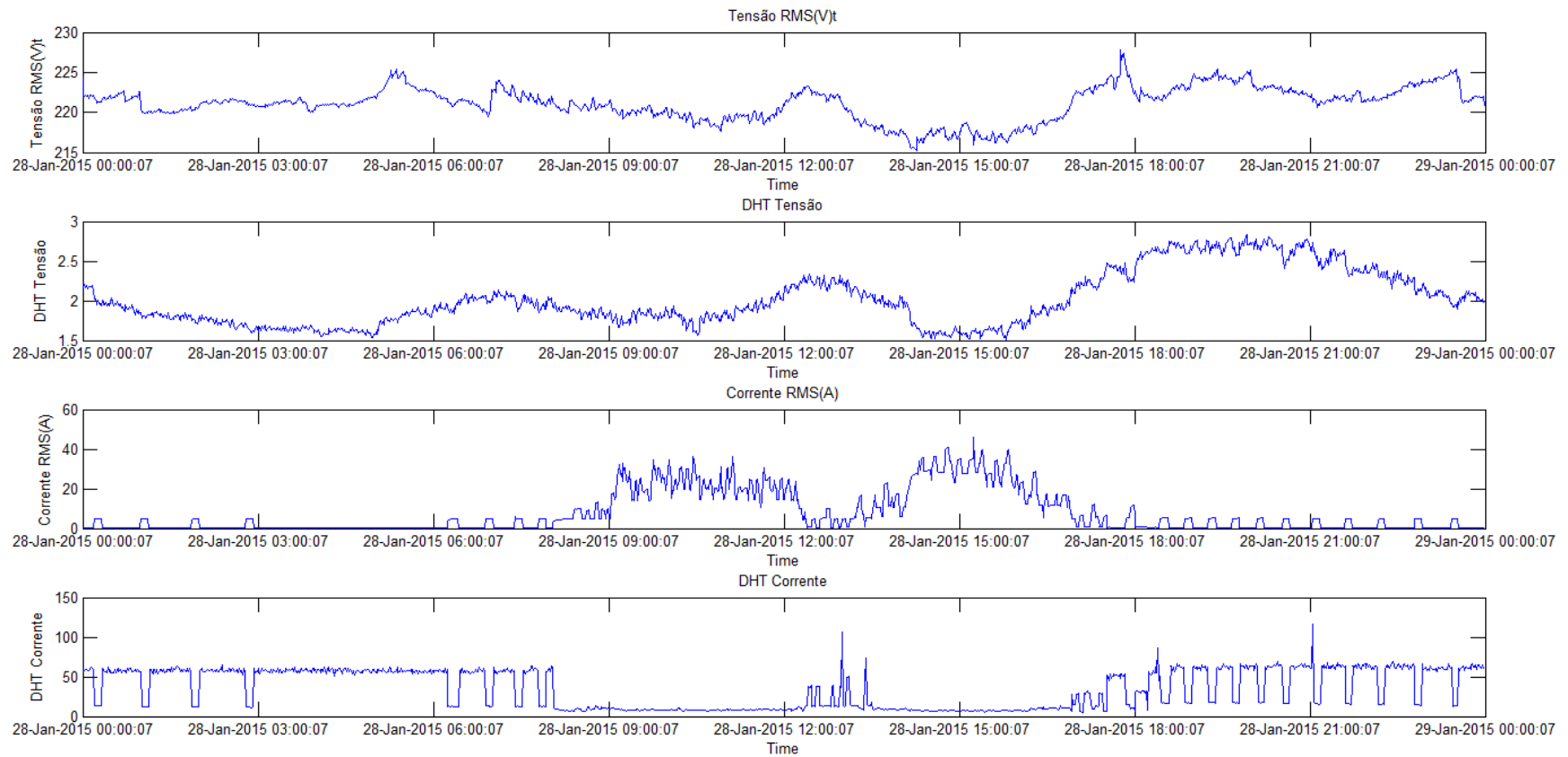


Figura 63. Tensão RMS, Corrente RMS e DHT das tensões e correntes na fase C no dia 28/01/2015. Fonte: Próprio autor.

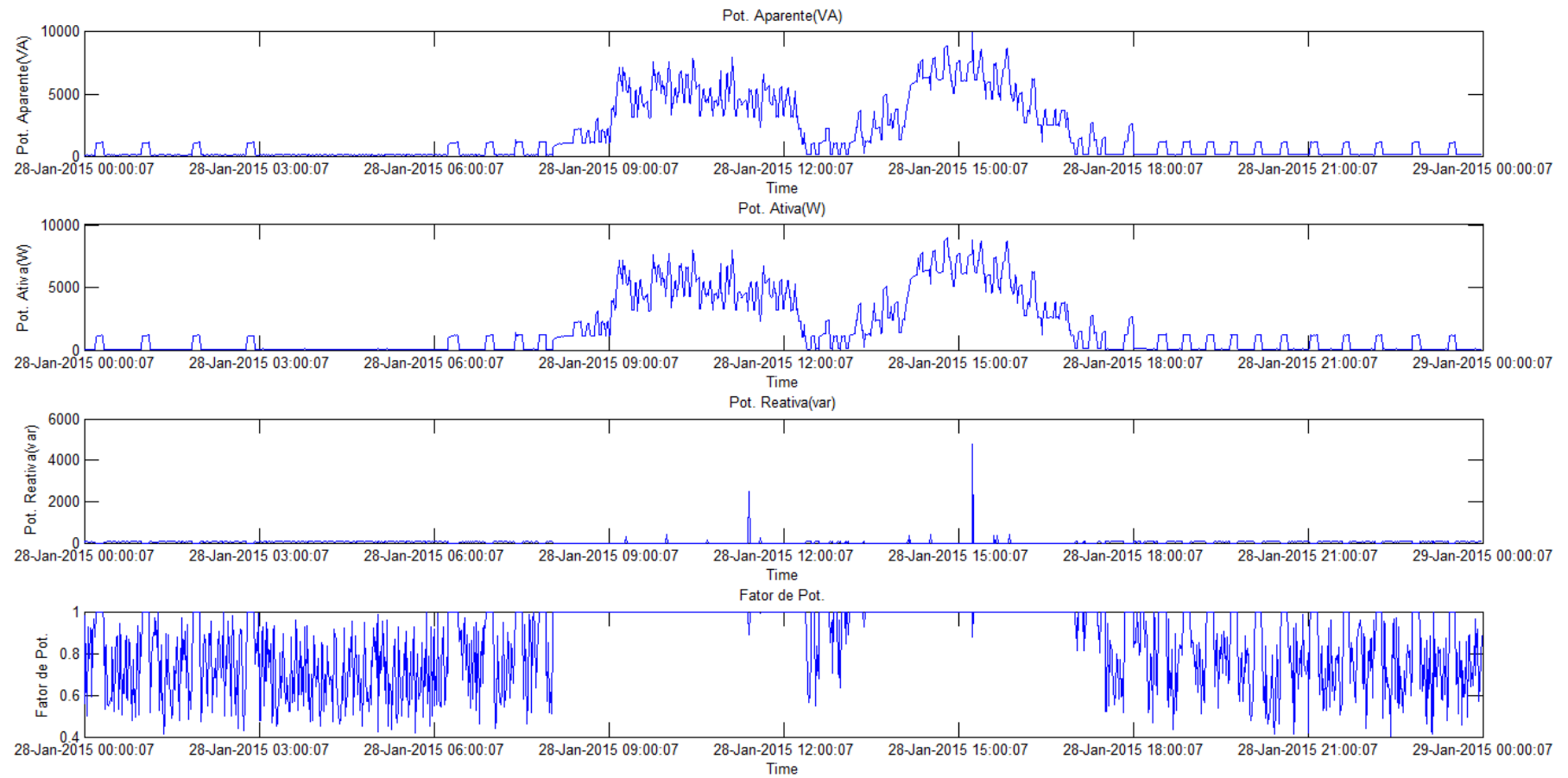


Figura 64. Potências Aparente, ativa, reativa e fator de potência na fase C no dia 28/01/2015. Fonte: Próprio autor.

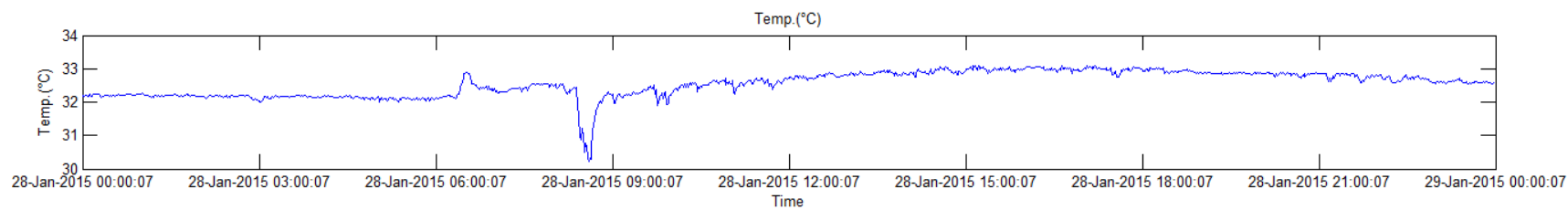


Figura 65. Temperatura na carcaça do transformador no dia 28/01/2015. Fonte: Próprio autor.

APÊNDICE B – HISTÓRICO DE DADOS
MONITORADOS NO DIA 07/02/2015 (SÁBADO)

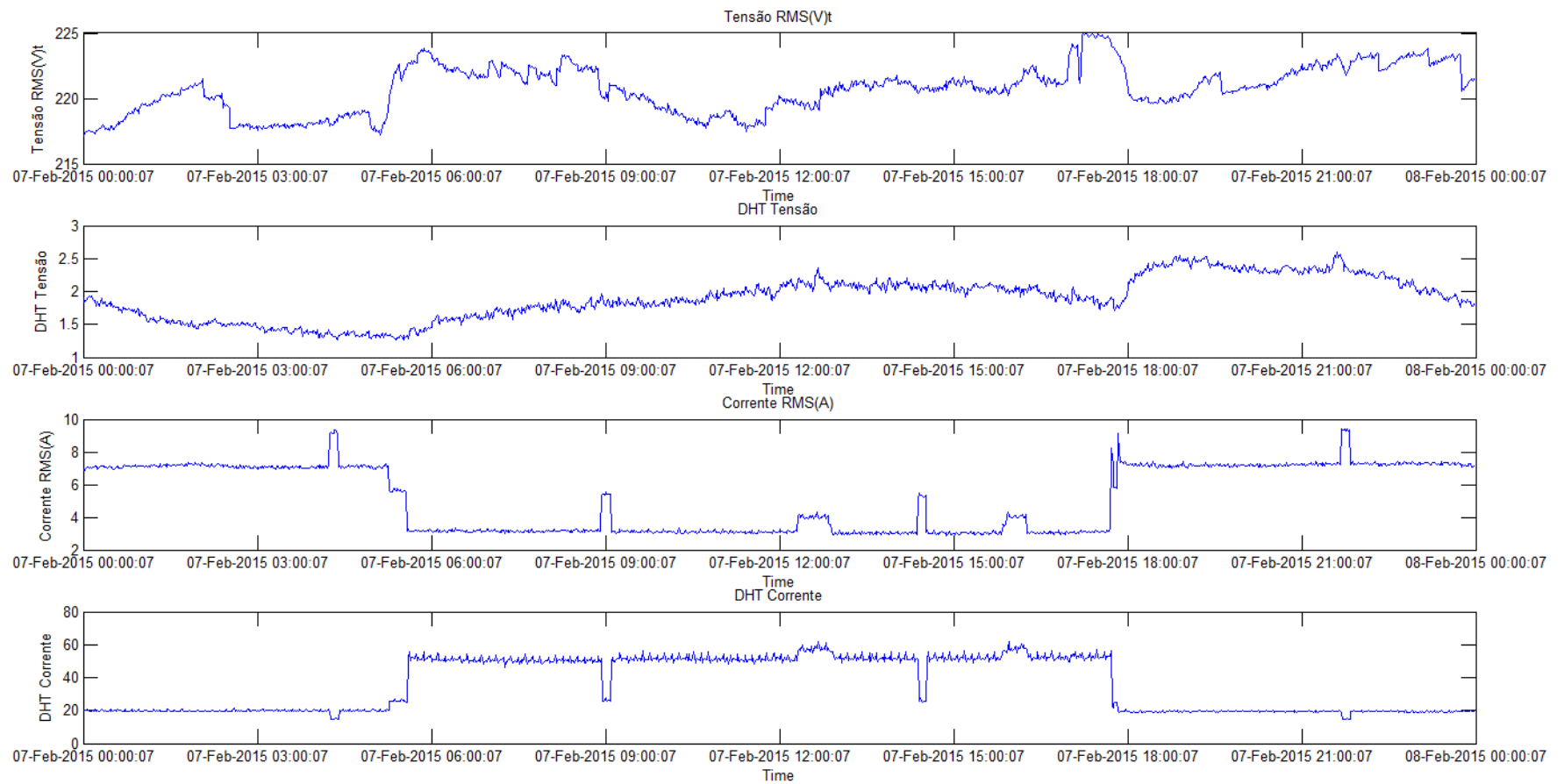


Figura 66. Tensão RMS, Corrente RMS e DHT das tensões e correntes na fase A no dia 07/02/2015. Fonte: Próprio autor.

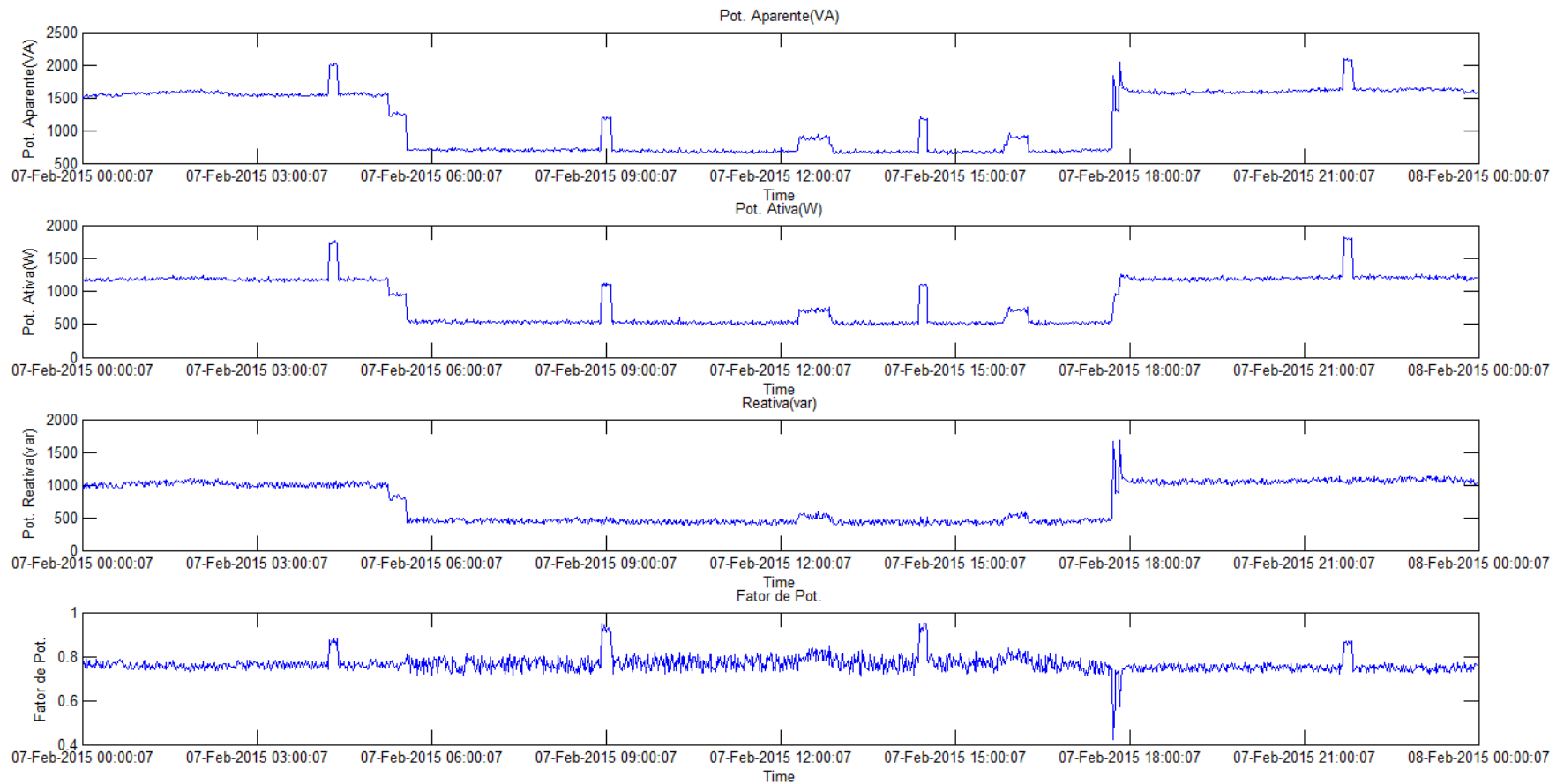


Figura 67. Potencias Aparente, ativa, reativa e fator de potência na fase A no dia 07/02/2015. Fonte: Próprio autor.

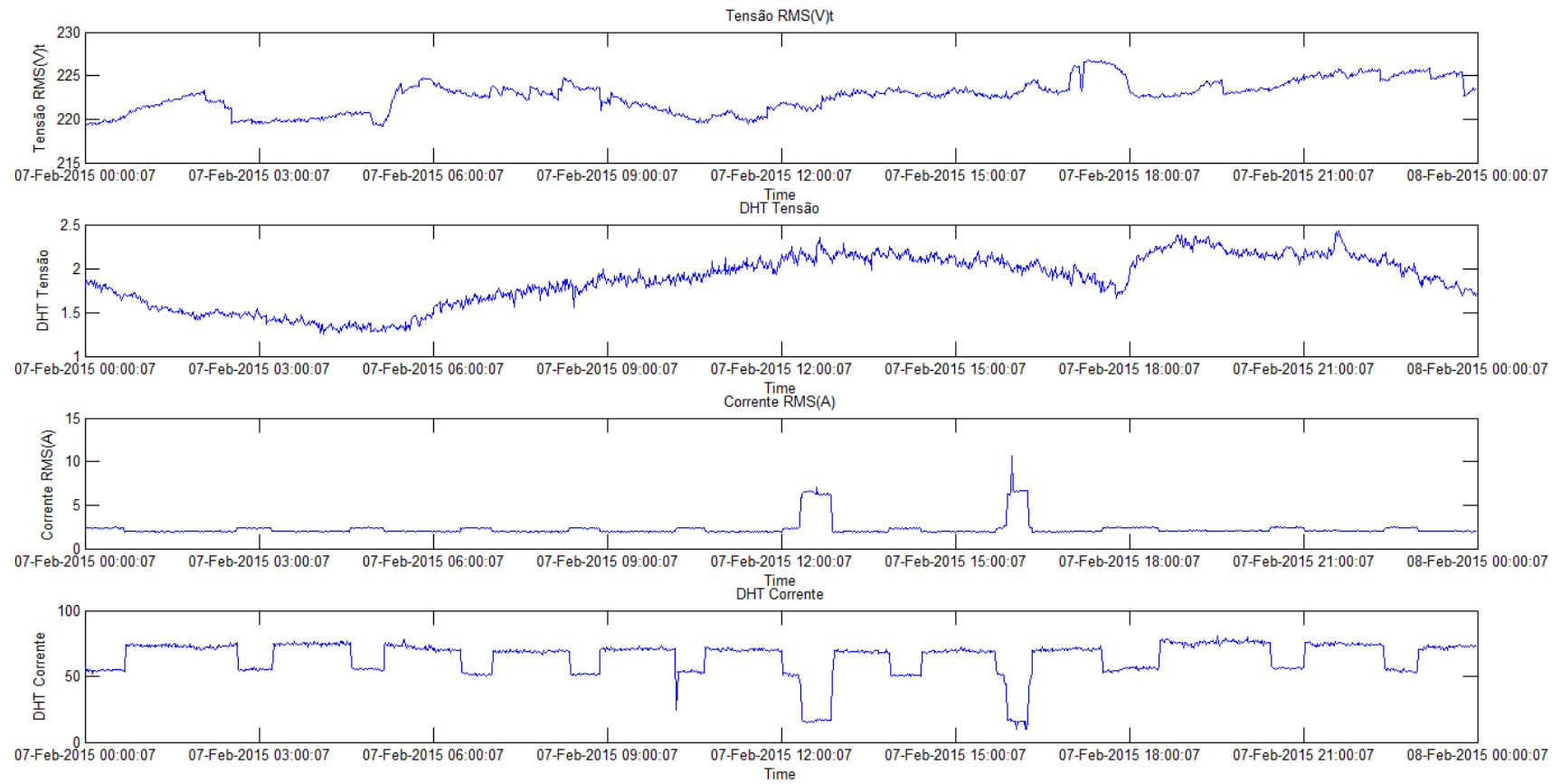


Figura 68. Tensão RMS, Corrente RMS e DHT das tensões e correntes na fase B no dia 07/02/2015. Fonte: Próprio autor.

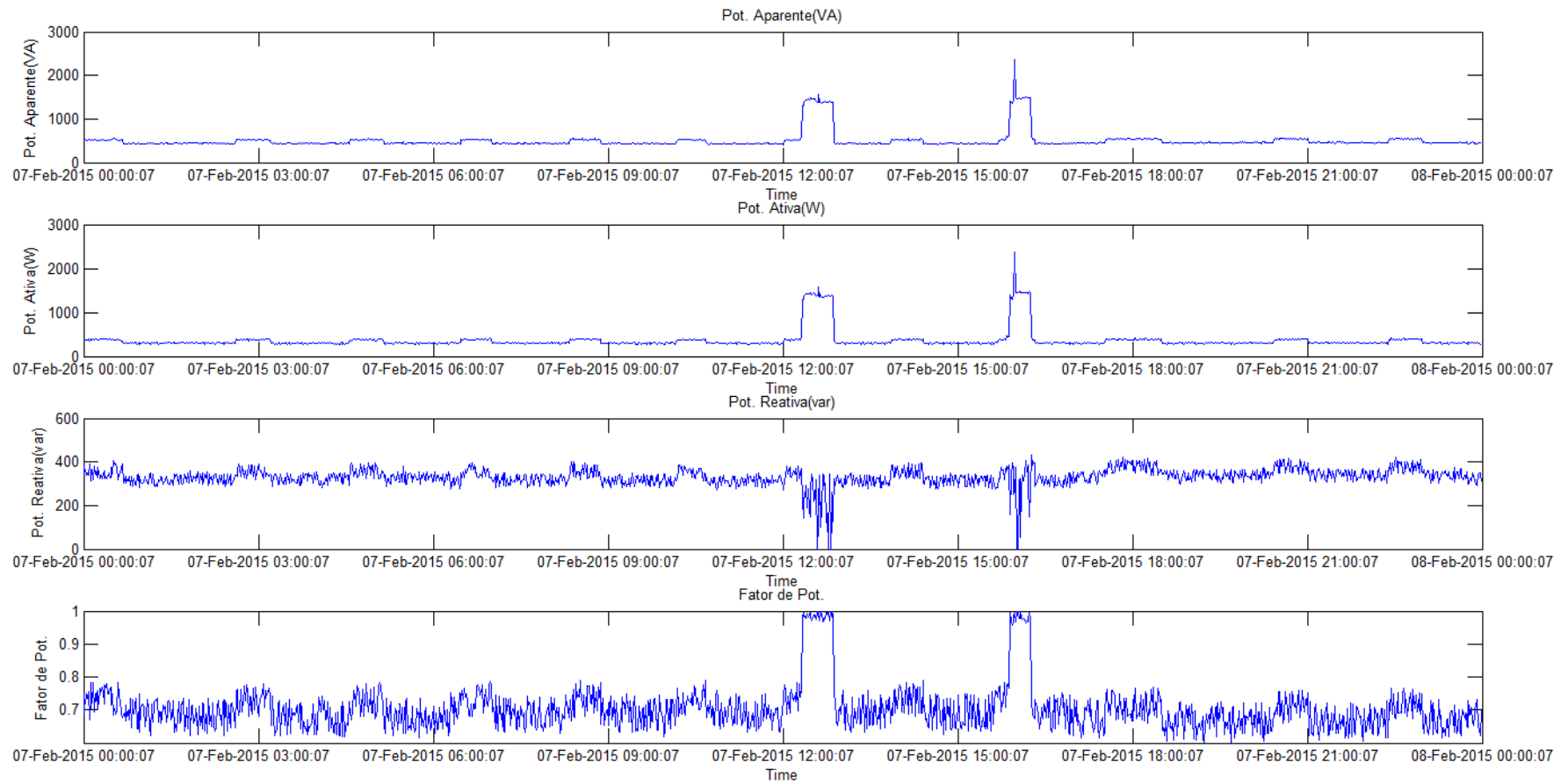


Figura 69. Potências Aparente, ativa, reativa e fator de potência na fase B no dia 07/02/2015. Fonte: Próprio autor.

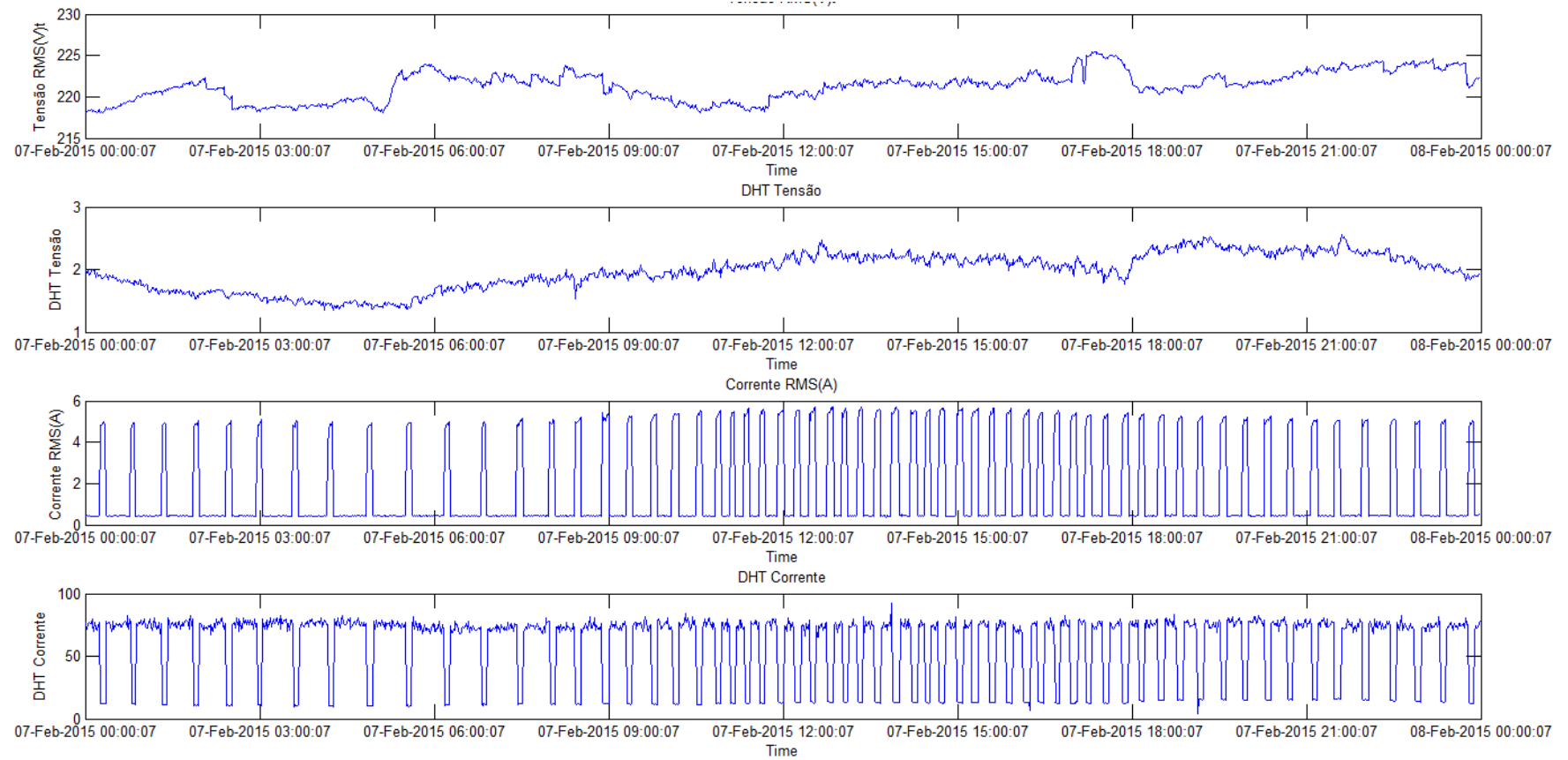


Figura 70. Tensão RMS, Corrente RMS e DHT das tensões e correntes na fase C no dia 07/02/2015. Fonte: Próprio autor.

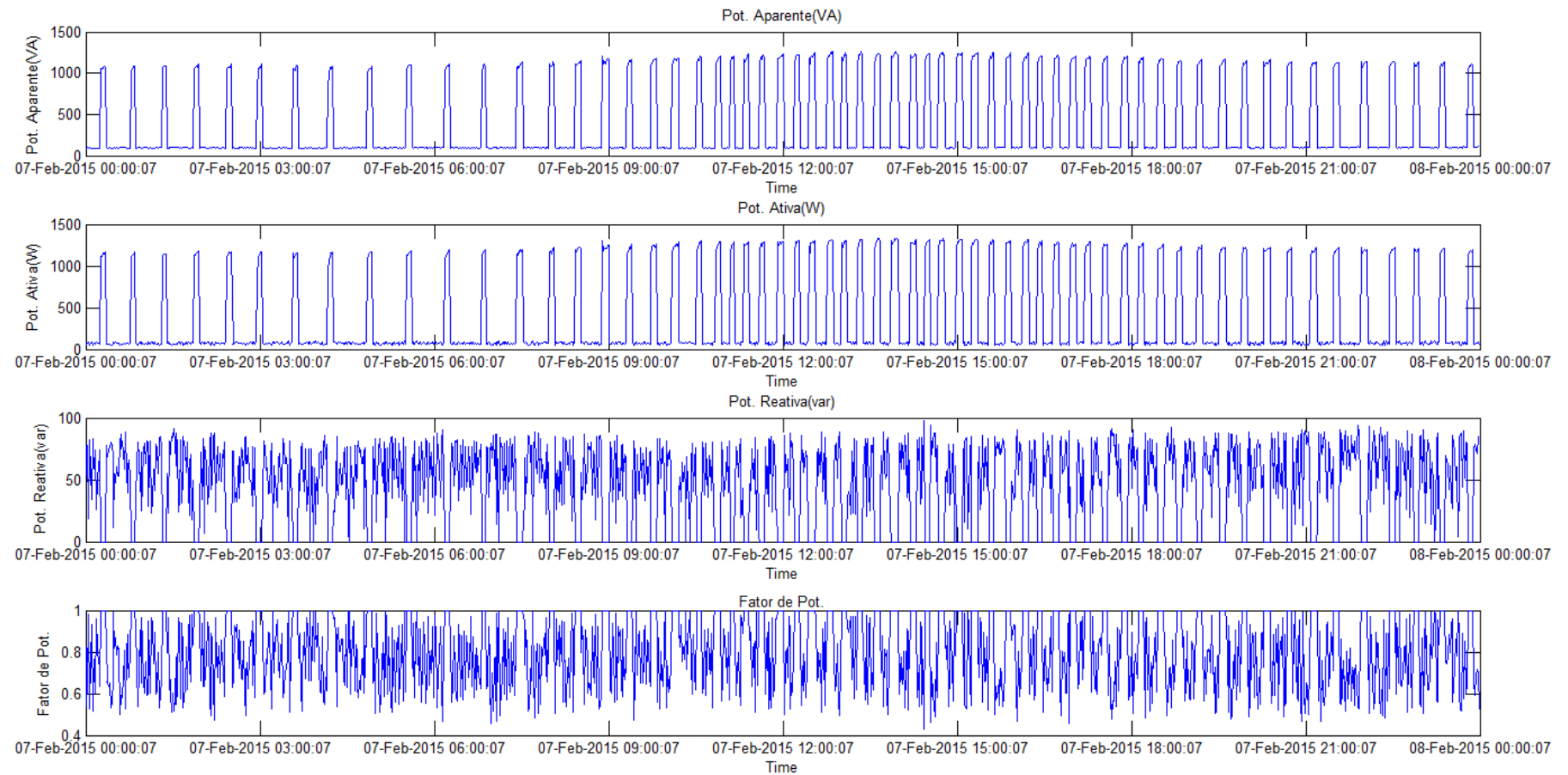


Figura 71. Potências Aparente, ativa, reativa e fator de potência na fase C no dia 07/02/2015. Fonte: Próprio autor.

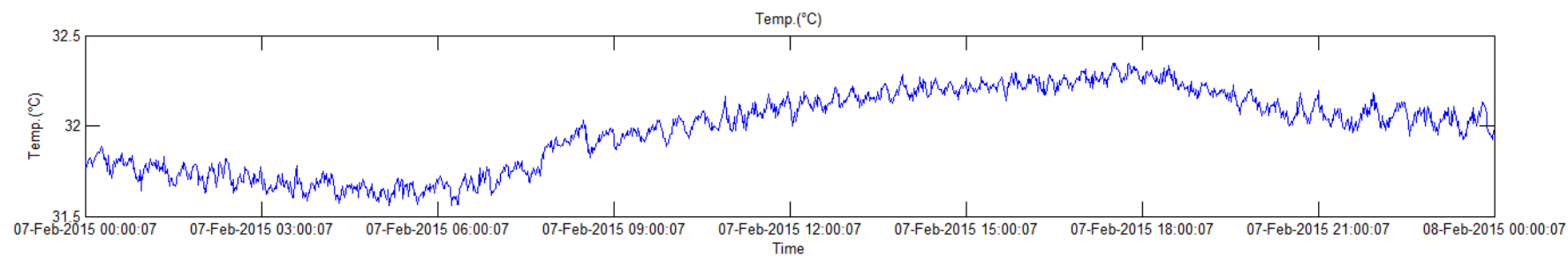


Figura 72. Temperatura na carcaça do transformador no dia 07/02/2015. Fonte: Próprio autor.

APÊNDICE C – HISTÓRICO DE DADOS

MONITORADOS NO DIA 08/02/2015 (DOMINGO)

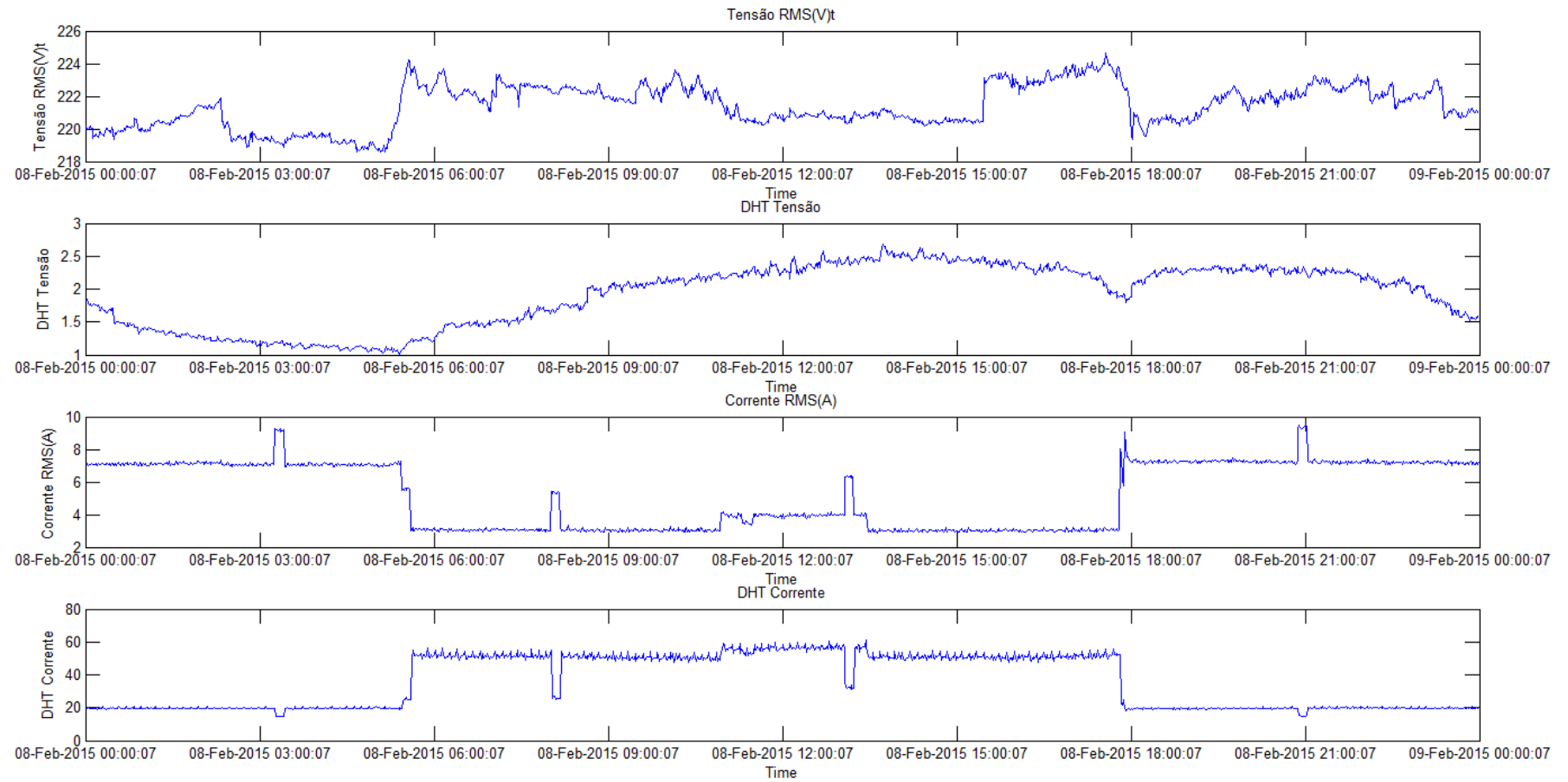


Figura 73. Tensão RMS, Corrente RMS e DHT das tensões e correntes na fase A no dia 08/02/2015. Fonte: Próprio autor.

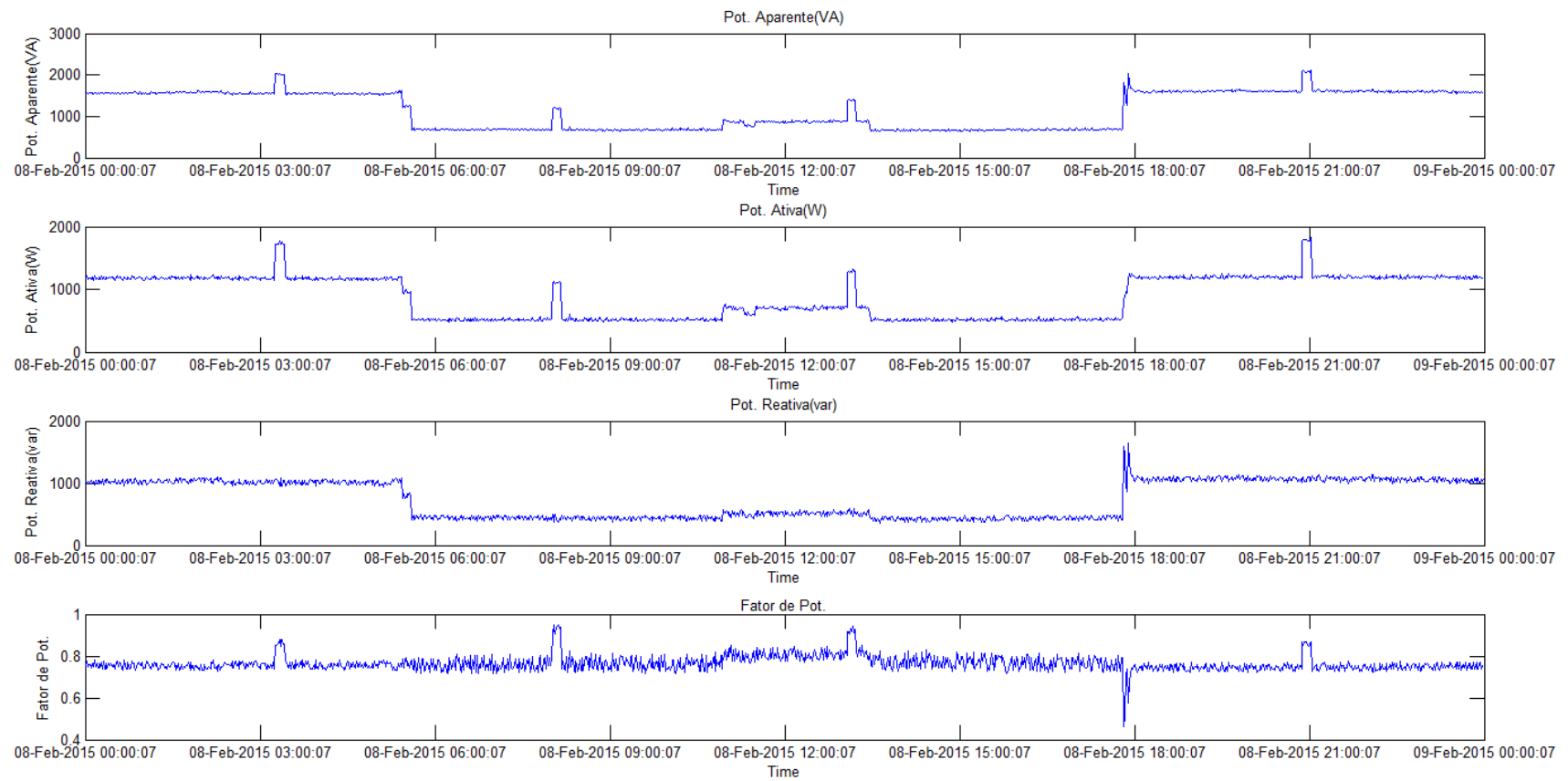


Figura 74. Potencias Aparente, ativa, reativa e fator de potência na fase A no dia 08/02/2015. Fonte: Próprio autor.

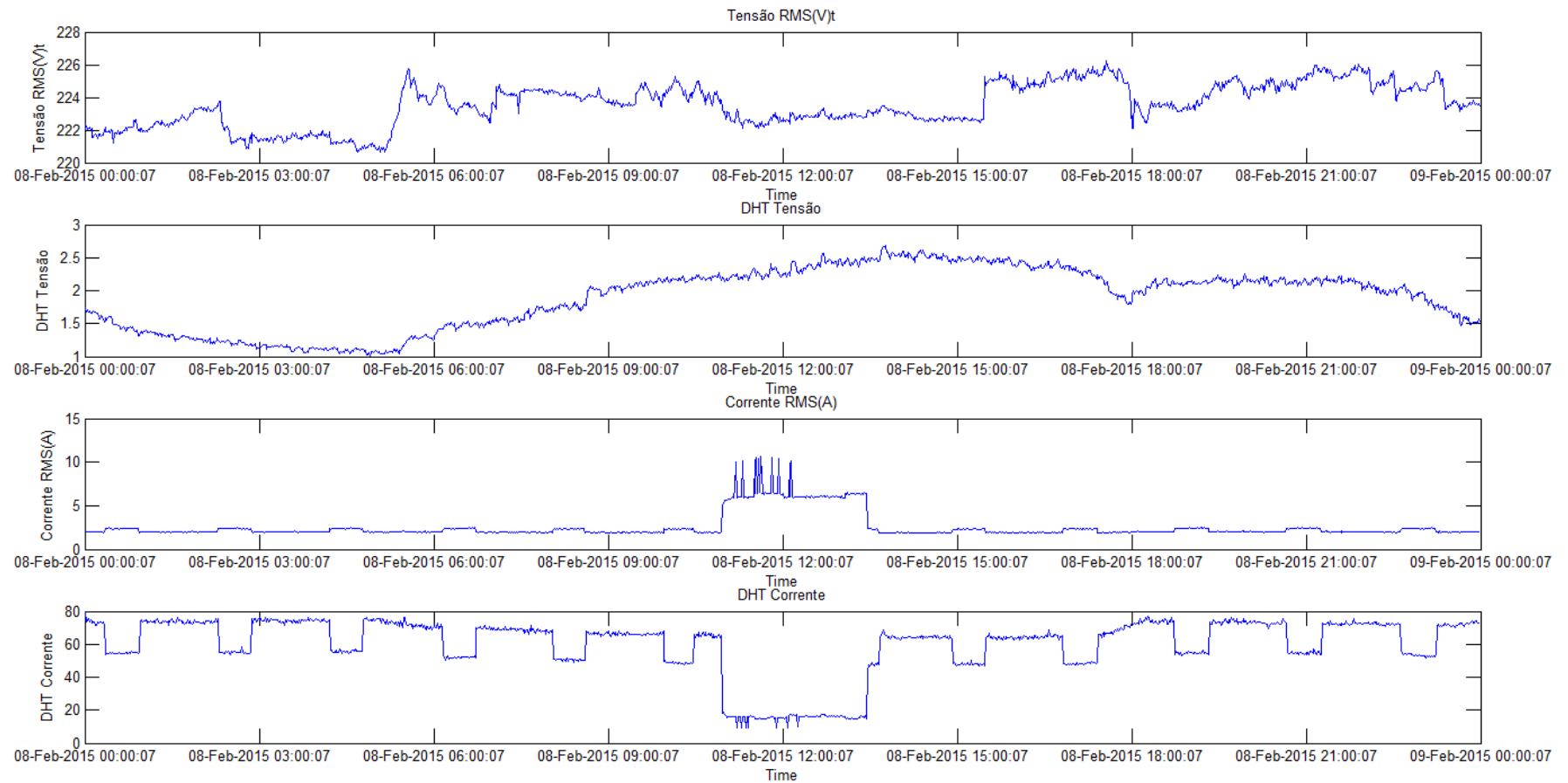


Figura 75. Tensão RMS, Corrente RMS e DHT das tensões e correntes na fase B no dia 08/02/2015. Fonte: Próprio autor.

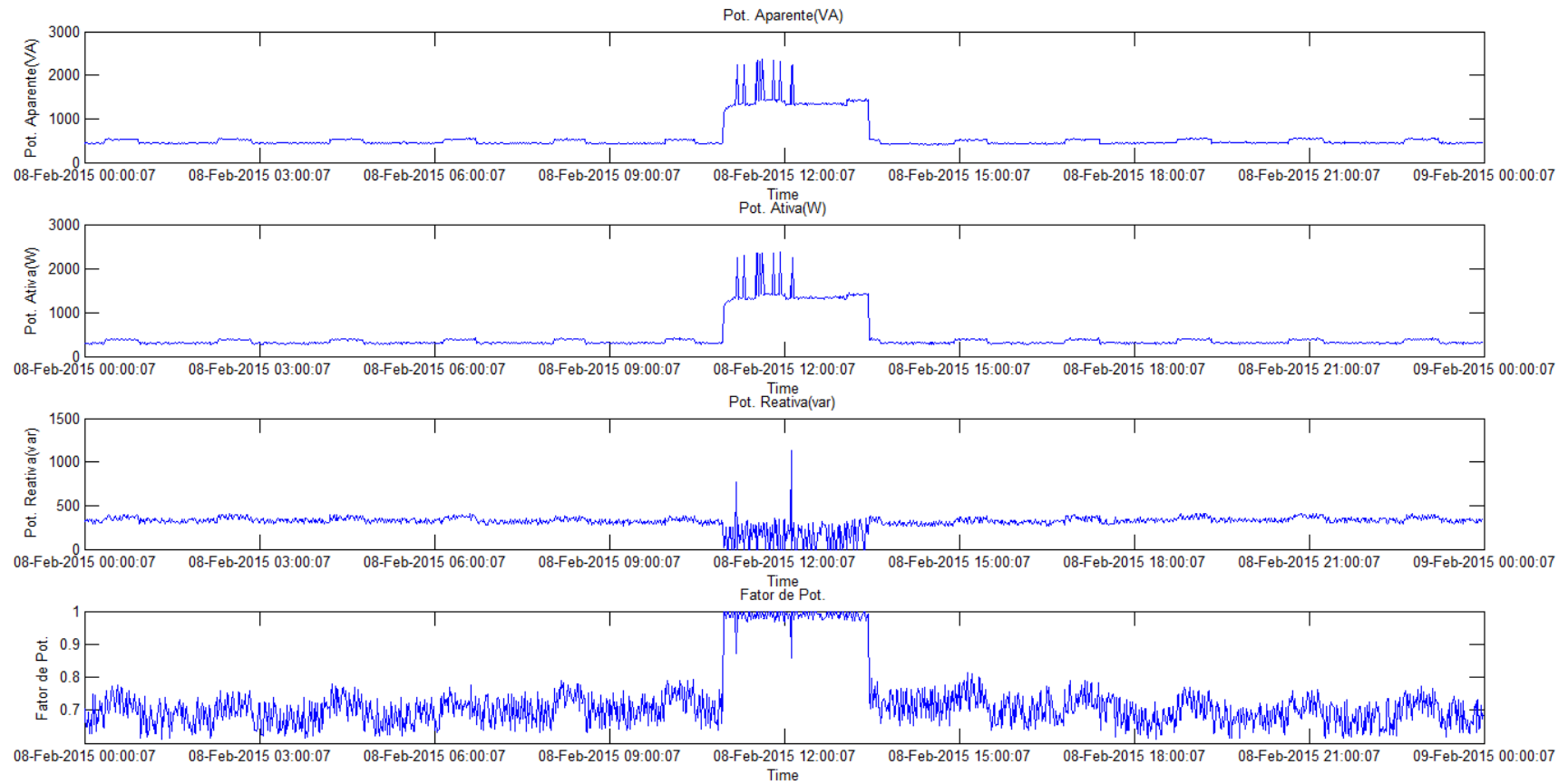


Figura 76. Potencias Aparente, ativa, reativa e fator de potência na fase B no dia 08/02/2015. Fonte: Próprio autor.

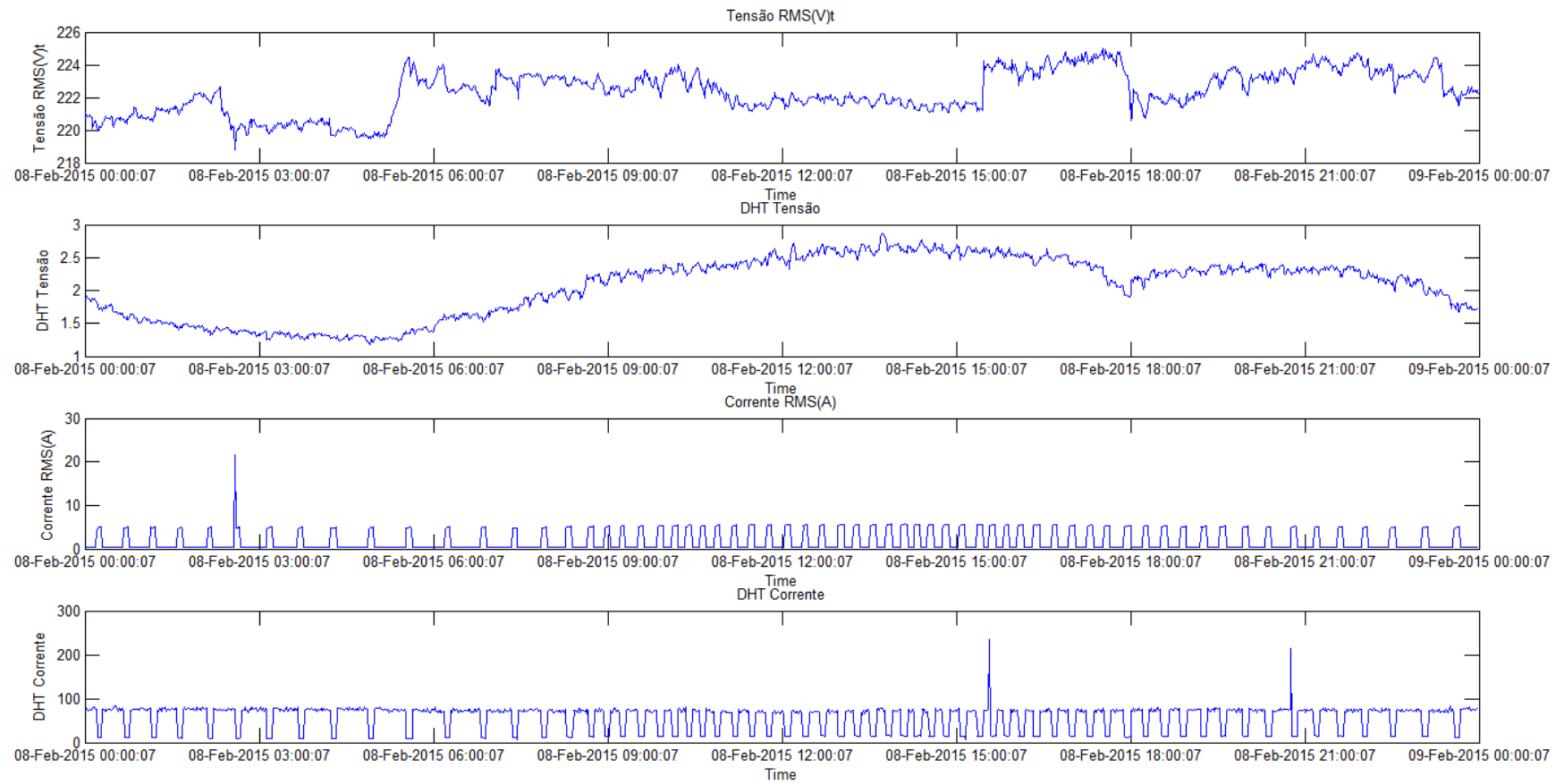


Figura 77. Tensão RMS, Corrente RMS e DHT das tensões e correntes na fase C no dia 08/02/2015. Fonte: Próprio autor.

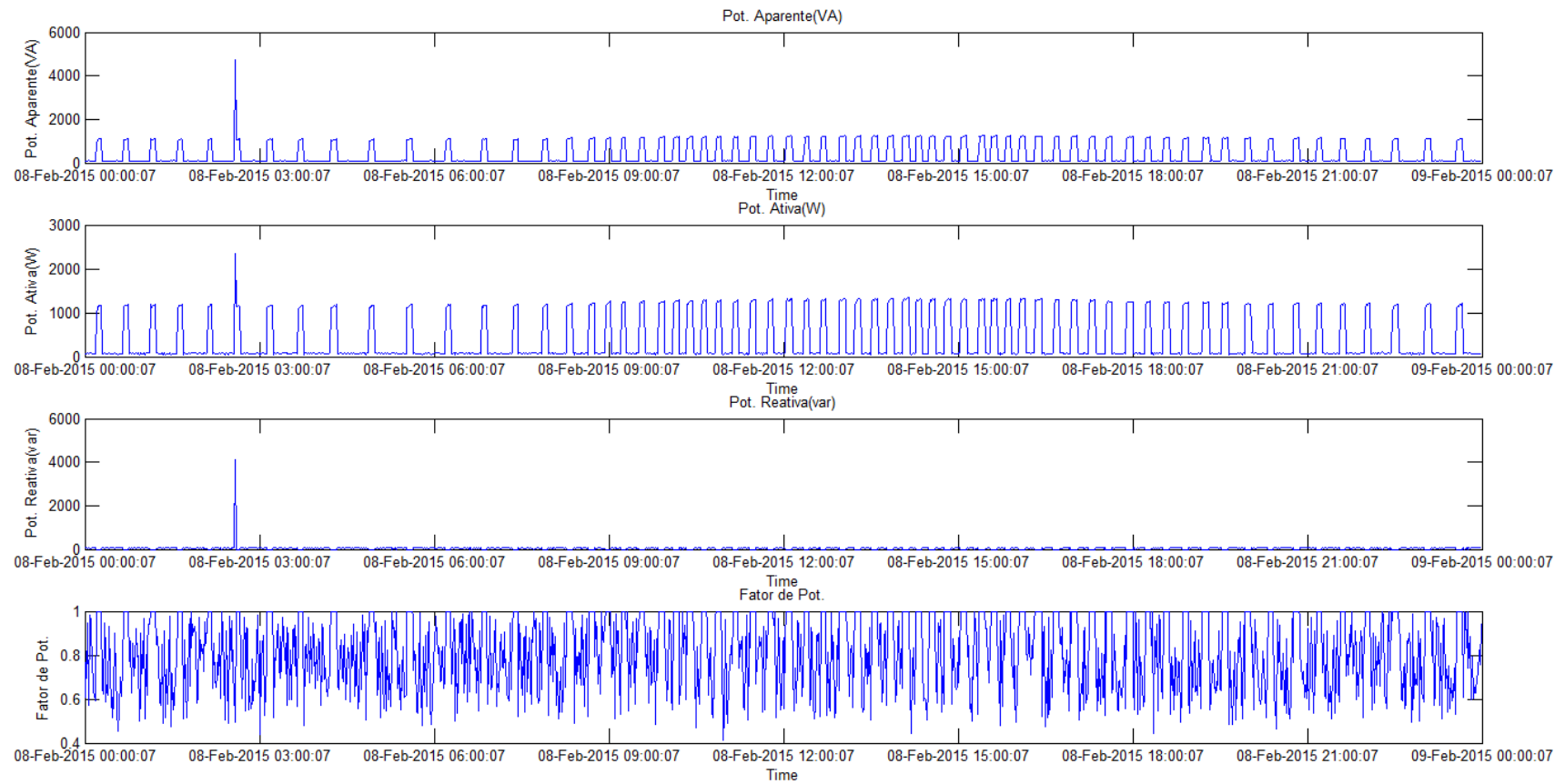


Figura 78. Potencias Aparente, ativa, reativa e fator de potência na fase C no dia 08/02/2015. Fonte: Próprio autor.

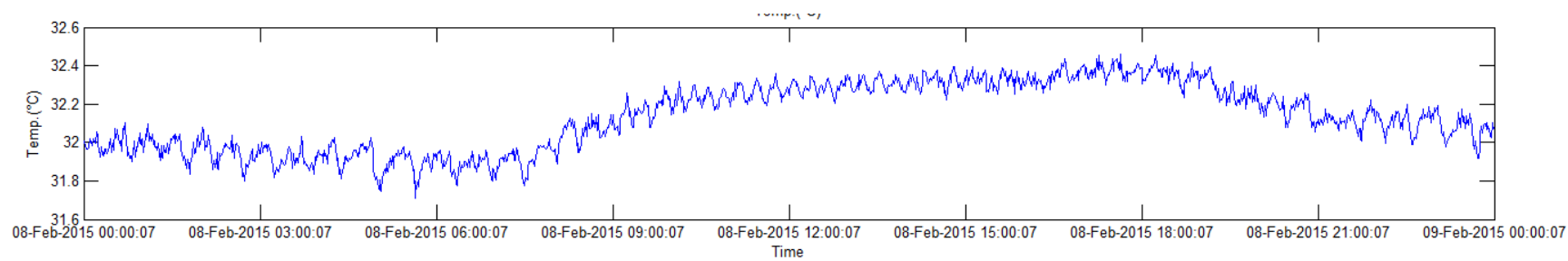


Figura 79. Temperatura na carcaça do transformador no dia 08/02/2015. Fonte: Próprio autor.

APÊNDICE D – ESQUEMA ELÉTRICO DA UASPTD

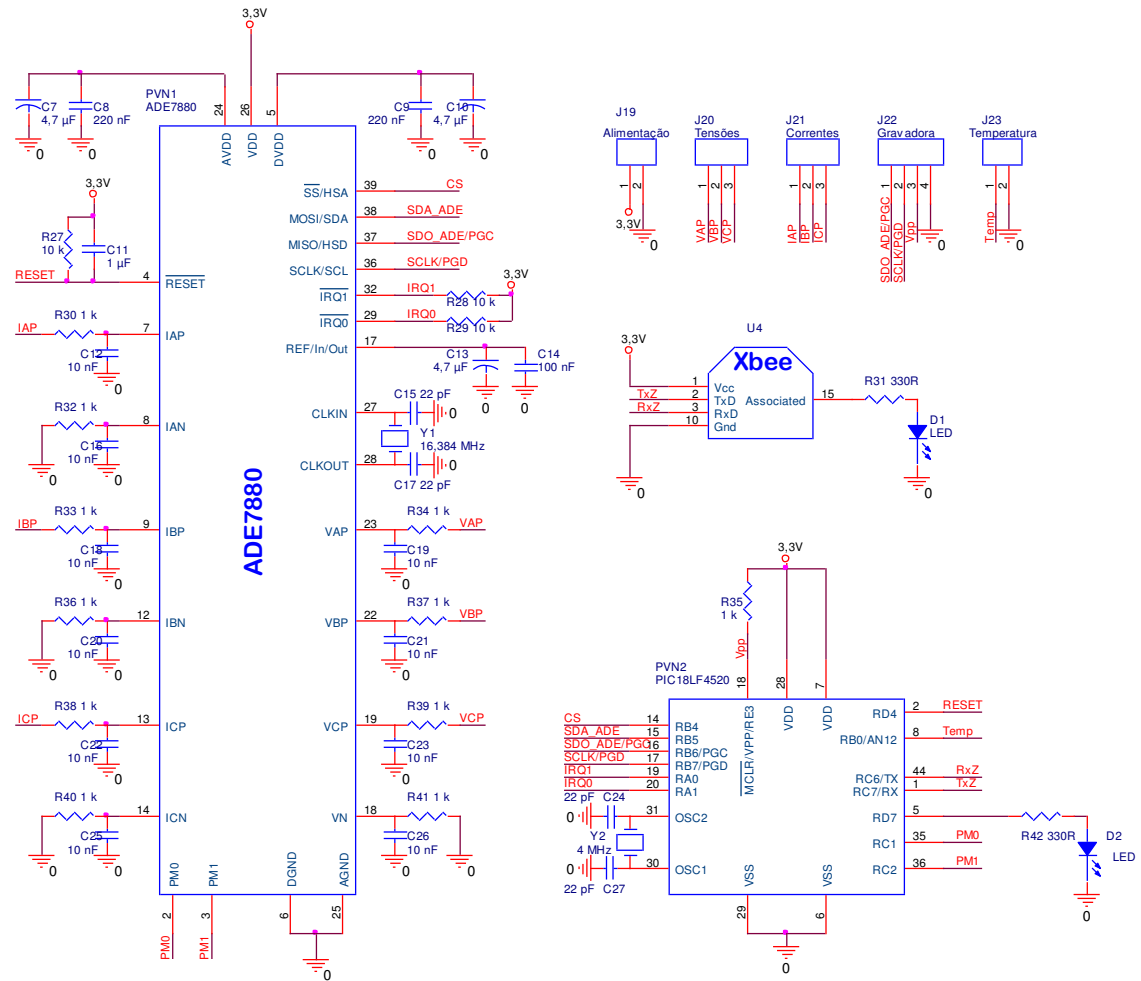


Figura 80. Esquema Elétrico da UASPTD

APÊNDICE E – ESQUEMA ELÉTRICO DA UCS

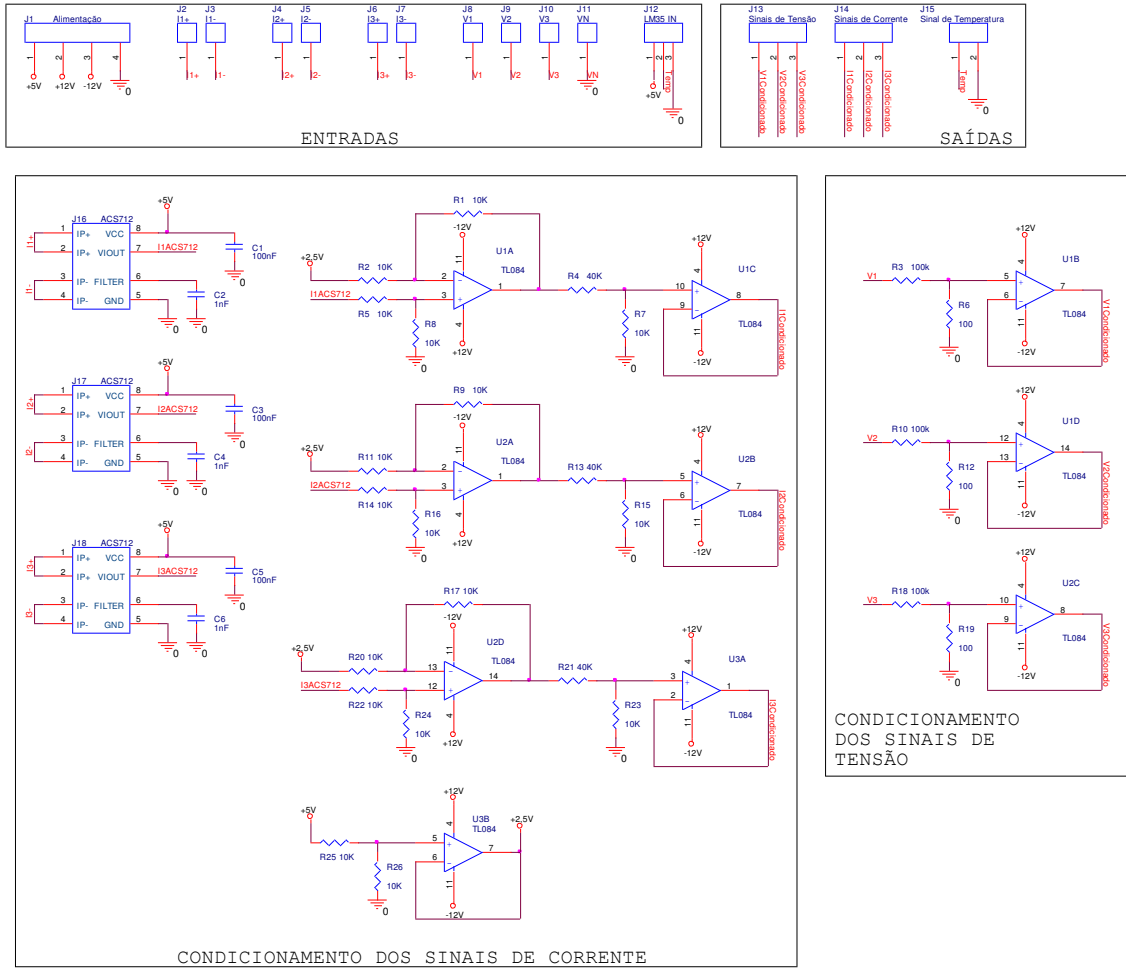


Figura 81. Esquema elétrico da UCS

APÊNDICE F – ESQUEMA ELÉTRICO DA UA

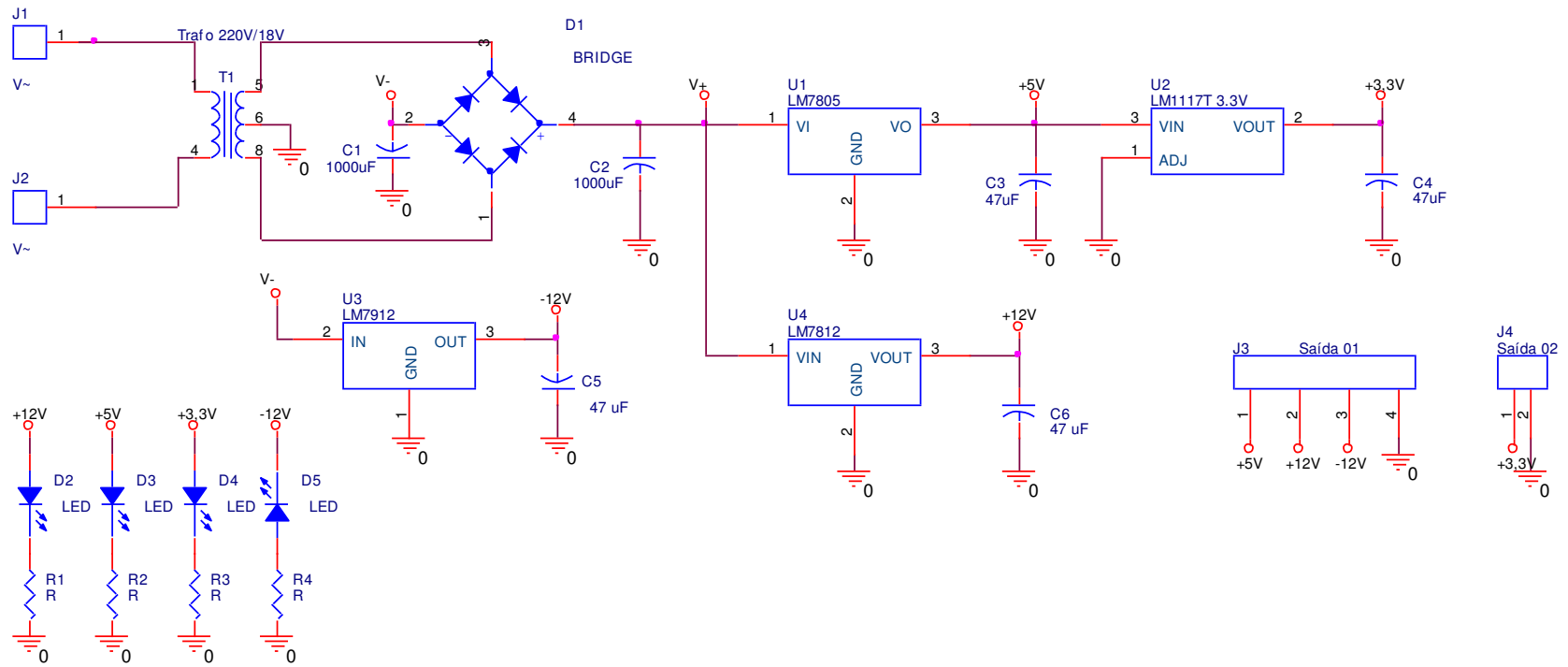


Figura 82. Esquema Elétrico da UA