



**Universidade Federal de Campina Grande**

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

NEWTON SÁVIO SOUZA MARQUES DA FONSÊCA

**REDE DE SENSORES SEM FIO APLICADA AO  
MONITORAMENTO DE TRANSFORMADORES**

Campina Grande, Paraíba  
Fevereiro de 2014

NEWTON SÁVIO SOUZA MARQUES DA FONSÊCA

REDE DE SENSORES SEM FIO APLICADA AO  
MONITORAMENTO DE TRANSFORMADORES

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Professor Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba  
Fevereiro de 2014

NEWTON SÁVIO SOUZA MARQUES DA FONSÊCA

# REDE DE SENSORES SEM FIO APLICADA AO MONITORAMENTO DE TRANSFORMADORES

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade  
Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal de Campina Grande como parte dos requisitos  
necessários para a obtenção do grau de Bacharel em  
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em        /        /

**Professor Avaliador**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Professor Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais, minha irmã e minha namorada, por toda paciência, compreensão e a credibilidade sempre atribuídas a mim.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dar forças e luz para sempre aceitar os desafios e superar os obstáculos que me foram oferecidos durante toda minha trajetória, sem sua benção nada eu seria.

Agradeço aos meus pais e minha irmã, que sempre depositaram confiança em meu potencial, me apoiando da melhor maneira que puderam. Tenho certeza que a força que tive durante muitas noites de estudos tinham o objetivo de corresponder todo esse afeto e dedicação que me foi fornecido. Agradeço ainda à minha namorada, por todo apoio e compreensão nos momentos difíceis que enfrentei.

Agradeço a todos os meus amigos que me acompanharam na trajetória do curso, em especial à Igor Pinheiro, Bruno Winkeler e Daniel Pereira. Agradeço ao colega e amigo Jalberth Araújo, pela força e orientação no projeto e nos testes realizados deste trabalho.

Agradeço ao Professor Tarso Vilela Ferreira, pela confiança, orientação e paciência nesta etapa tão importante.

Agradeço aos meus mestres, pela formação que me foi proporcionada, em especial ao Prof. Raimundo Freire, por todo apoio e orientação durante a graduação.

*“O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.”*

Albert Einstein.

## RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema capaz de monitorar remotamente alguns parâmetros que dizem respeito à qualidade de energia em transformadores de distribuição. Foi desenvolvido um dispositivo com o objetivo de medir os sinais de tensão, corrente e temperatura de um transformador e enviá-los para um computador pessoal por meio de uma rede de dados sem fio baseada em protocolo ZigBee. Ainda foi desenvolvido um *software* escrito em C#, no qual o usuário, utilizando um computador pessoal é capaz de visualizar as formas de onda de corrente e tensão. São apresentados também valores de pico e RMS de tensão e corrente, fator de potência (defasagem entre tensão e corrente) e temperatura. Por fim, estes dados são armazenados em um registro para uma posterior análise.

**Palavras-chave:** Transformadores de Distribuição, Qualidade de Energia, Sistemas de Sensoriamento Remoto, Metrologia Elétrica.

## ABSTRACT

This work describes the development of a system capable of remotely monitor some parameters related to energy quality in distribution transformers. A device intended to measure signals of voltage, current and temperature, sending these data to a personal computer via a ZigBee wireless based protocol was developed. In addition, a C# based program developed was developed, in which the user, using a personal computer, is able to visualize the voltage and current waveforms. The RMS voltage and current, power, power factor and temperature values are also available for visualization. Finally, these values were logged for later analysis.

**Keywords:** Distribution Transformers, Power Quality, Remote Sensing Systems, Electrical Metrology.



# SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	Objetivos.....	2
1.1.1	Objetivo Primário.....	2
1.1.2	Objetivos Secundários.....	2
2	Metodologia.....	4
2.1	Microcontrolador PIC.....	4
2.2	Módulo Xbee-Pro Series 2.....	6
2.3	Sensor de Temperatura LM35.....	7
2.4	Sensor de Corrente ACS712.....	8
2.5	Condicionamento E Aquisição dos Sinais.....	9
2.5.1	Placa de Condicionamento da Tensão.....	9
2.5.2	Placa de Condicionamento da Corrente.....	11
2.5.3	Placa de Aquisição de Dados.....	11
2.5.4	Software de Aquisição de Dados.....	12
2.6	Método de Cálculo das Grandezas.....	14
3	Testes e Resultados.....	16
3.1	Validação do Sistema.....	16
3.2	Monitoramento do Quadro de Distribuição do LAT.....	18
4	Conclusões.....	23
	Bibliografia.....	25
	Anexo A – Registro das Grandezas Elétricas Monitoradas.....	27

# 1 INTRODUÇÃO

Transformadores são equipamentos essenciais em qualquer sistema elétrico. Falhas em transformadores podem acarretar indisponibilidade de fornecimento, isto é, perda no faturamento, multas pelo aumento dos índices Duração Equivalente de Continuidade (DEC), Frequência Equivalente de Continuidade (FEC), Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (DIC), Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (FIC) e Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora (DMIC). Além disso, interrupções de fornecimento também trazem danos intangíveis para a distribuidora. Desta forma, percebe-se a importância do monitoramento dos transformadores a fim de se garantir a manutenção preditiva, de modo que os desligamentos não programados sejam evitados.

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 e não garantem a prevenção contra falhas. 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 a grandezas que podem fornecer informações a respeito do estado atual, futuro e tempo de vida útil.

Assim, 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.

Neste trabalho apresenta-se o desenvolvimento de um protótipo de um sistema de monitoramento de grandezas elétricas em transformadores. O sistema é fundamentado na utilização de um microcontrolador de baixo custo (PIC18F4520), com ambiente gráfico de visualização que foi desenvolvido na linguagem C#. A utilização do PIC associado a um módulo Xbee permitiu o sensoriamento, aquisição e transmissão dos dados relativos às grandezas elétricas e temperatura do transformador de distribuição via rede sem fio. Esses dados foram concentrados, em tempo real, em um computador pessoal com o ambiente do *software* desenvolvido, o qual possibilitou a visualização das grandezas elétricas e também o registro desses dados para seu posterior tratamento e processamento.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 OBJETIVO PRIMÁRIO

Realizar a aplicação do microcontrolador PIC, associado a um *software* com ambiente gráfico desenvolvido em C#, a fim de desenvolver um sistema de monitoramento que permita o sensoriamento, aquisição, e transmissão de dados relativos a grandezas elétricas de um transformador via rede sem fio.

### 1.1.2 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

- i. Projetar e desenvolver circuitos condicionadores de sinais capazes de adequar as formas de onda de tensão e corrente da rede para que sejam medidas pelo microcontrolador PIC;
- ii. Especificar e utilizar um dispositivo capaz de medir temperatura que seja aplicável no sistema proposto;
- iii. Estudar as características do módulo *Xbee*, para transmissão e recepção de dados sem fio, a fim de utilizá-lo em conjunto com o microcontrolador especificado;

- iv. Fabricar um protótipo do sistema com base no microcontrolador PIC, que seja capaz de medir, registrar e enviar, por meio de uma rede sem fio ZigBee, informações relativas às grandezas elétricas para um computador pessoal;
- v. Desenvolver e testar um *software* com interface gráfica capaz de apresentar de forma organizada e intuitiva as grandezas elétricas medidas pelo protótipo desenvolvido;
- vi. Testar o sistema completo por um período de tempo e extrair os dados adquiridos para uma posterior análise no Matlab®;
- vii. Construir uma base de dados referente às grandezas medidas e registradas com o sistema desenvolvido, para uso futuro em aplicações de coleta de dados ou inteligência artificial.

## 2 METODOLOGIA

Nesta seção são apresentados o material e os métodos utilizados para desenvolver o trabalho, descrevendo-se informações sobre os componentes e os circuitos utilizados, além da plataforma de desenvolvimento empregada na construção do *software*.

### 2.1 MICROCONTROLADOR PIC

Para a realização deste projeto, foi escolhido como unidade de processamento o microcontrolador PIC18F4520 [1], devido às qualidades e 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 PIC18F4520 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. Estas características são especificadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características do PIC184520 [1]

<b>Característica</b>	<b>Parâmetro</b>
Frequência de operação	Até 40 MHz (10 MIPS)
Memória de programa	32 KB
Memória de dados EEPROM	256 bytes
Fontes de interrupção	18
Portas I/O	5
<i>Timers</i>	4
Módulos PWM	2
Comunicação serial	MSSP, USART
Comunicação paralela	1 PSP
Módulo ADC	1 módulo, 8 canais, 10 bits
Set de instruções	75 instruções
Pinos	40

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  $\mu$ A típico com uso à 3V, 32 kHz;
- < 0,2  $\mu$ A típico no modo *stand-by*.

O encapsulamento utilizado foi o DIP (*dual in-line*), devido à disponibilidade no laboratório de pesquisa. O diagrama de pinos do microcontrolador utilizado é exposto na Figura 1, assim como a foto do componente real é exibido na Figura 2.

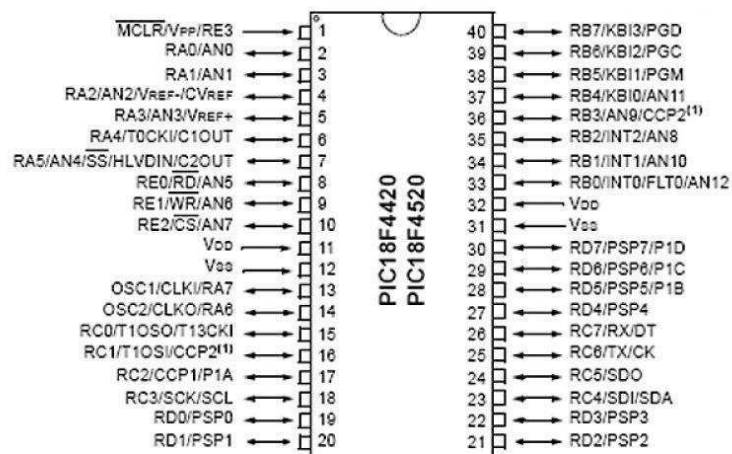


Figura 1. Diagrama de pinos do PIC184520 [1]

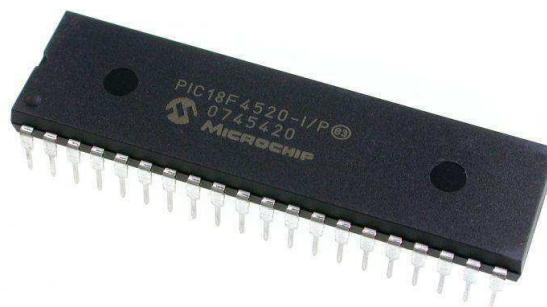


Figura 2. Microcontrolador PIC18f4520 [1]

Diante estas características, o PIC18F452 demonstra ser uma escolha viável para o projeto, pois supre as necessidades de comunicação serial, para interagir com o ZigBee,

além de possuir um conversor analógico-digital capaz de amostrar os sinais de tensão e corrente a uma taxa que satisfaz as normas vigentes.

## 2.2 MÓDULO XBEE-PRO SERIES 2

Os módulos Xbee-Pro *Series 2* [2], 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. Três versões deste dispositivo são ilustrados na Figura 3.



Figura 3. Módulos Xbee-Pro *Series 2* [2]

Os modelos ilustrados pela Figura 3 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.

A Tabela 2, apresenta as características deste módulo transceptor.

Tabela 2. Características do Xbee-Pro *Series 2* [2]

Característica	Parâmetro
Potência de transmissão	50mW
Sensibilidade de recepção	102dBm
Alcance em ambientes internos	120m
Alcance máximo em ambientes externos	1,6 Km
Tensão de alimentação	3,0-3,6V
Corrente máxima de consumo	295 mA
Corrente em modo <i>sleep</i>	<10 $\mu$ A
Conversor A/D	4 canais multiplexados (10 bits)

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. Visto isso, foram utilizados módulos Xbee Pro Series 2 como transceptores de dados sem fio, todos configurados no modo API.

## 2.3 SENSOR DE TEMPERATURA LM35

O circuito integrado LM35 [3] é um sensor de precisão, fabricado pela National Semiconductor, que apresenta uma saída de tensão linear proporcional à temperatura a que se encontra. 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. 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;

Uma representação gráfica do sensor de temperatura LM35 é apresentada na Figura 4.





Tabela 3. Características do sensor de corrente ACS712 [4]

<b>Característica</b>	<b>Parâmetro</b>
Tempo de resposta	5 $\mu$ s
Largura de banda	80 kHz
Margem de erro	1,5 % a 25 °C
Resistência interna	1,2 m $\Omega$
Tensão de isolamento	2,1 kV RMS
Tensão de alimentação	5 V
Leitura	Corrente contínua e alternada
Razão de saída	66 até 185 mV/A

## 2.5 CONDICIONAMENTO E AQUISIÇÃO DOS SINAIS

### 2.5.1 PLACA DE CONDICIONAMENTO DA TENSÃO

Para que o sinal da tensão da rede elétrica seja adequado às necessidades do conversor A/D do microcontrolador, é preciso condicioná-lo. Para isto, a primeira etapa do condicionamento do sinal foi realizar uma atenuação por meio de um divisor resistivo. Tal técnica consiste em resistências conhecidas associadas em série, das quais a saída servirá de ponto de medição para que o microcontrolador possa adquirir o sinal.

Mesmo atenuado, o sinal ainda apresenta tensões negativas, pois ainda é um sinal alternado, logo, foi utilizado um retificador de precisão, um circuito que muitas vezes na literatura é chamado de “circuito de valor absoluto” [5], pois não apresenta queda de tensão devido aos diodos, como nos retificadores comuns. Feito isso, o sinal está pronto para ser medido pelo microcontrolador.

A retificação da tensão, contudo, insere um novo problema na aquisição da informação, dado que o sinal passa a ser uma sequência de semiciclos positivos, e o microcontrolador não tem como identificar a polaridade original da tensão em cada um deles. Para sanar esta questão, foi construído um circuito comparador com zero que apresenta um sinal de sinalização de ciclo para que o microcontrolador pudesse reconstruir o sinal digitalmente, no que diz respeito à polaridade. Este circuito apresenta um sinal nível baixo durante o ciclo negativo da tensão da rede, e nível alto durante o ciclo positivo da tensão da rede.

Após o projeto e teste do circuito, foi desenvolvido o esquemático, o *layout*, e posteriormente a placa de circuito impresso do circuito de condicionamento da tensão,

utilizando o *software* Cadence Orcad® [6]. O esquema elétrico do circuito condicionador da tensão é apresentado na Figura 6.

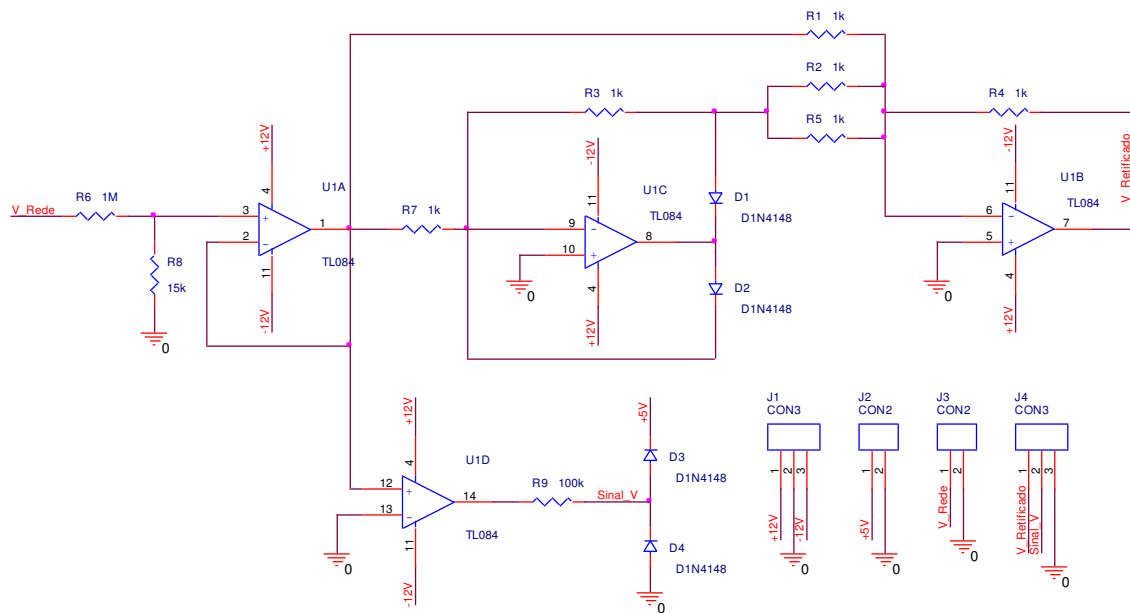


Figura 6. Circuito do condicionador da tensão.

A placa de circuito impresso do condicionador da tensão é ilustrada na Figura 7.

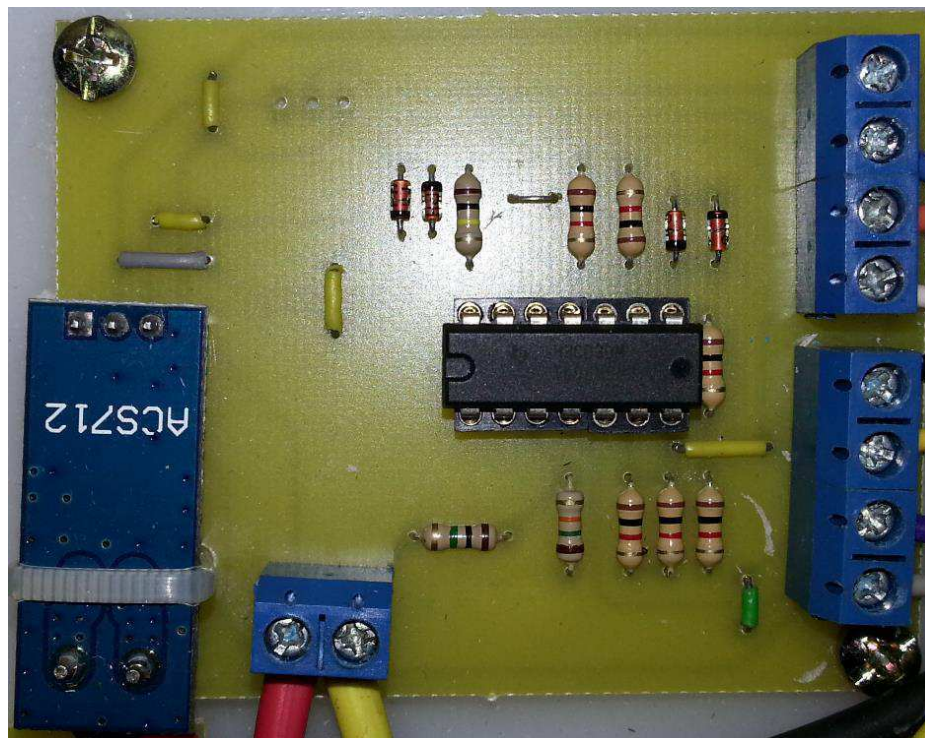


Figura 7. Placa do circuito condicionador de tensão

### 2.5.2 PLACA DE CONDICIONAMENTO DA CORRENTE

Para o condicionamento da corrente foi utilizada uma placa comercial na qual o circuito da Figura 5 já é implementado. A placa apresenta dois bornes para injeção da corrente a ser medida e três pinos de saída: alimentação, terra e saída de sinal. A placa do circuito ACS712 é ilustrada pela Figura 8.



Figura 8. Placa do circuito do sensor de corrente ACS712 [4]

### 2.5.3 PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Para a aquisição dos dados, foi desenvolvida uma placa composta pelo microcontrolador PIC18F4520, devidamente conectado ao módulo XBee. Foram dispostos bornes de conexão para que os sinais de tensão, corrente e temperatura pudessem ser conectados na mesma. O esquema elétrico da placa de aquisição de dados é mostrado na Figura 9.

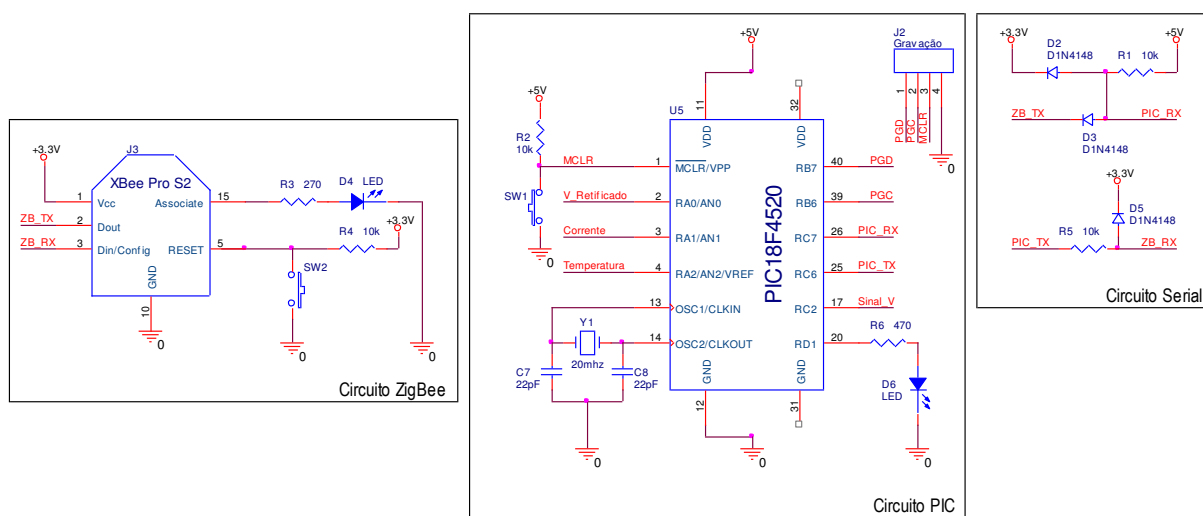


Figura 9. Esquema elétrico da placa de aquisição de dados.

Devido à tensão de alimentação do microcontrolador PIC ser 5 V e do módulo XBee ser 3,3 V, foi necessário utilizar um conversor dos sinais para a porta serial, de modo que não houvesse danos nem problemas na comunicação entre os dispositivos. A placa de circuito impressa desenvolvida é ilustrada pela Figura 10.

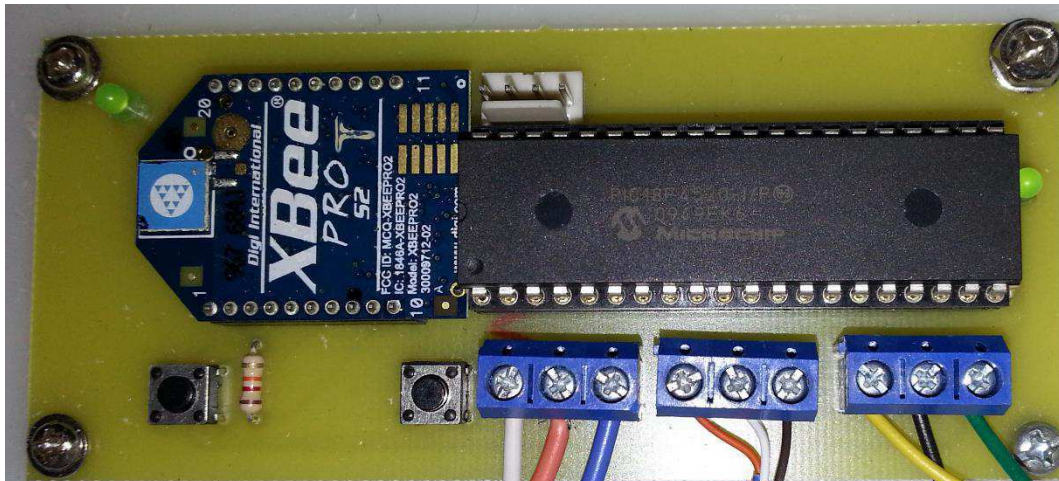


Figura 10. Placa do circuito de aquisição de dados.

#### 2.5.4 SOFTWARE DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Para monitorar o sistema desenvolvido foi desenvolvido um *software* com interface gráfica em linguagem C#. O objetivo foi permitir ao usuário do sistema “conectar-se” ao transformador de interesse e observar em tempo real suas grandezas elétricas, como tensão, corrente e parâmetros relativos à potência, e temperatura no qual o mesmo operava.

Visto isso, o *software* desenvolvido recebe dados continuamente do sistema de medição via rede sem fio ZigBee, e os apresenta de forma intuitiva para o usuário. Os dados apresentados são:

- Formas de onda de corrente, tensão e corrente e tensão (em p.u.);
- Valores de tensão e corrente (Pico e RMS);
- Potência Aparente (VA), Ativa (W), e Reativa (Var);
- Fator de potência (defasagem entre tensão e corrente);
- Temperatura.

O sistema ainda gera registros de dados de todas as grandezas já citadas para uma posterior análise.

A interface do programa é apresentada nas Figura 11, 12 e 13, as quais ilustram a forma de onda da tensão, forma de onda da corrente e forma de onda da tensão e corrente em p.u., respectivamente.

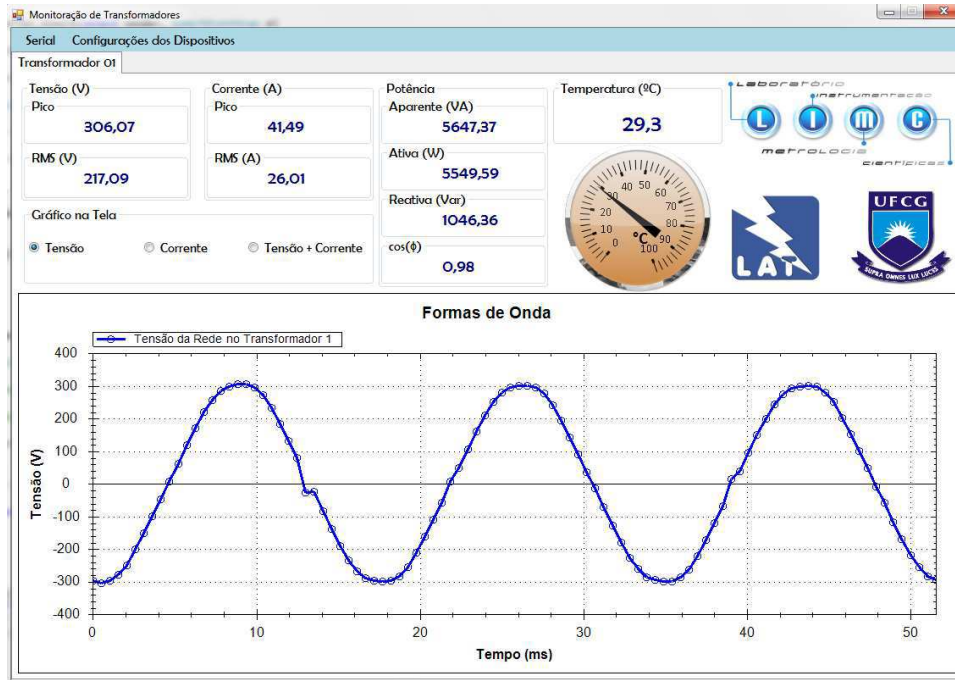


Figura 11. Forma de onda da tensão.



Figura 12. Forma de onda da corrente.

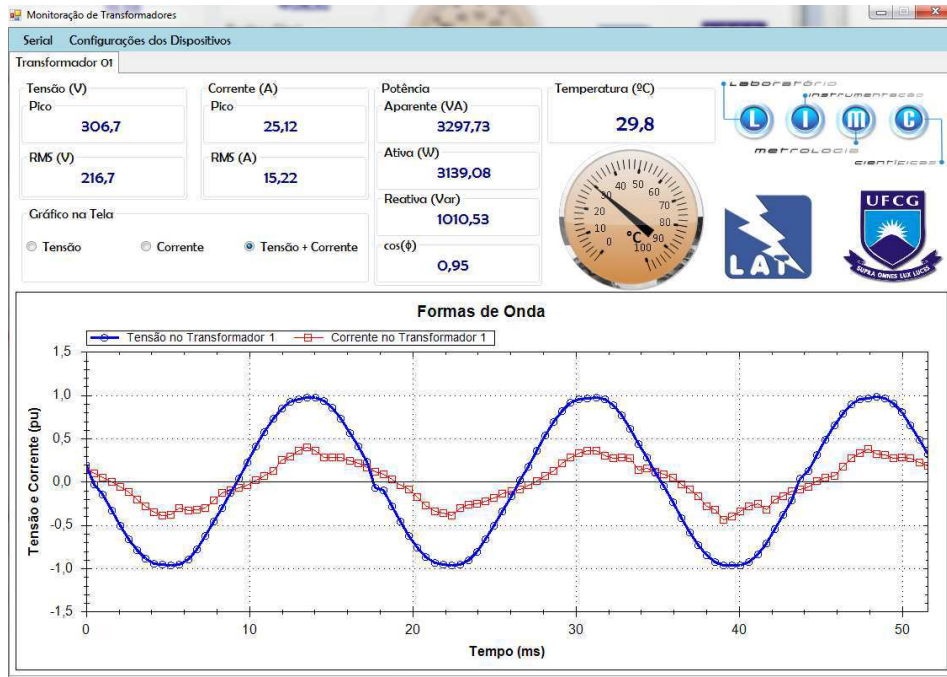


Figura 13. Formas de onda da tensão e corrente em p.u.

## 2.6 MÉTODO DE CÁLCULO DAS GRANDEZAS

O cálculo das grandezas foi realizado utilizando os dados de tensão e corrente, relativos à medição utilizando o sistema desenvolvido (50 amostras/ciclo industrial). Com o intuito de realizar uma validação dos valores obtidos com o uso do sistema, realizou-se também aquisições diretamente de um osciloscópio Tektronix TDS 2012 (2500 amostras) e pontas de prova específicas para a medição de corrente e tensão na faixa específica do secundário do transformador.

Desta forma, os valores RMS das grandezas foram determinados utilizando a expressão (1) (BATISTA *et al.*, 2010).

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n]x[n]} \quad (1)$$

em que  $X_{RMS}$  é o valor RMS da grandeza elétrica considerada,  $N$  é o número de amostras registradas e  $x$  é o valor da amostra no instante  $n$ .

Como o cálculo dos valores RMS das grandezas, a potência aparente pode ser calculada utilizando a expressão (2).

$$S = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \quad (2)$$

em que  $S$  é a potência aparente,  $V_{RMS}$  e  $I_{RMS}$  são os valores RMS da tensão e corrente, respectivamente.

Além dos valores RMS e da potência aparente, pode, também, ser calculada a potência ativa de acordo com a expressão (3).

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v[n]i[n] \quad (3)$$

Na expressão (3),  $P$  é a potência ativa,  $v$  e  $i$  representam os valores das amostras de tensão e corrente nos instantes  $n$ , respectivamente.

Com os valores de  $S$  e  $P$ , o fator de potência (FP; defasagem entre tensão e corrente) pode ser calculado utilizando a expressão (4).

$$\cos(\Phi) = \frac{P}{S} \quad (4)$$

em que  $\cos(\Phi)$  é o representativo de FP. Além disso, o modelo pelo qual FP foi definido é idêntico ao utilizado nos sistemas senoidais, diferenciando-se apenas no significado do ângulo  $\Phi$ . Para sistemas senoidais, esse ângulo está relacionado à defasagem angular (temporal) entre os sinais de tensão e corrente (BATISTA *et al.*, 2010).



### 3 TESTES E RESULTADOS

Nesta seção serão descritos os métodos utilizados para a validação e teste do sistema desenvolvido. Inicialmente, foram feitos testes com equipamentos de medição de referência para validar o sistema desenvolvido, determinando assim os erros de medição do protótipo. Por fim, como maneira de teste do sistema, o mesmo foi instalado em um transformador regulador de tensão do Laboratório de Alta Tensão (LAT) da UFCG. Foram monitoradas as grandezas elétricas de tensão, corrente, potência (aparente, ativa e reativa), FP e temperatura no regulador de tensão durante quatro dias. Estes dados foram coletados, armazenados e posteriormente analisados.

#### 3.1 VALIDAÇÃO DO SISTEMA

Para a determinação dos erros de medição do sistema, foram comparadas as medições de tensão RMS, corrente RMS e as formas de onda de tensão e corrente, obtidas no osciloscópio para um circuito de carga resistiva, composto por quatro lâmpadas incandescentes em paralelo. O arranjo experimental foi montado no Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas (LIMC) na UFCG, assim como é mostrado na Figura 14.

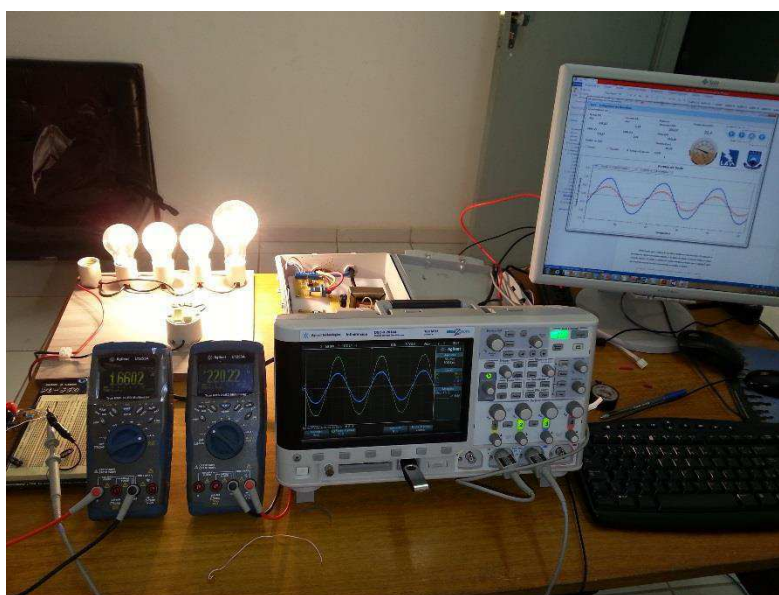


Figura 14. Arranjo experimental para validação do sistema desenvolvido.

Foram utilizados multímetros *true RMS* modelo Agilent U1253A como voltímetro e amperímetro para realizar as medições dos valores RMS da tensão e corrente de modo a se ter valores de referência a serem comparados com a saída do sistema de condicionamento.

Desta forma, após a aquisição dos dados mediante o osciloscópio, foi utilizado o protótipo do sistema de monitoramento, e os dados de tensão e corrente foram enviados via rede sem fio. Os dados recebidos do sistema foram exportados para o Matlab®, onde as formas de onda de tensão do protótipo e do osciloscópio são apresentadas na Figura 15. Analogamente, as formas de onda da corrente obtidas com o osciloscópio e com o protótipo foram exportadas para o Matlab®, conforme a Figura 16.

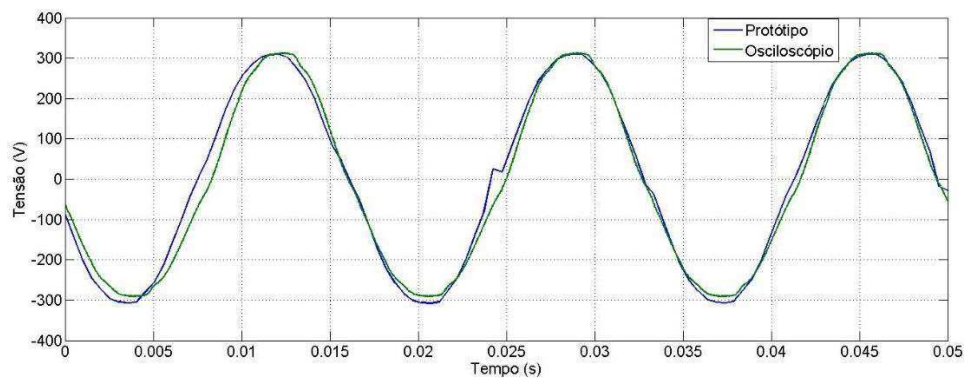


Figura 15. Formas de onda de tensão do osciloscópio e do protótipo.

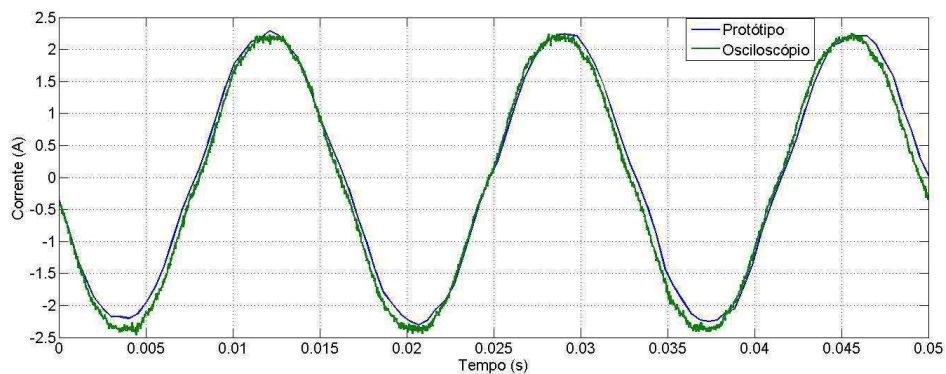


Figura 16. Formas de onda de corrente do osciloscópio e do protótipo.

Analisando a forma de onda da tensão aquisitada com o protótipo desenvolvido, é possível observar a formação de pequenas saliências durante o cruzamento do sinal com o zero. Isto ocorre porque durante a etapa de conversão analógico-digital, são feitas 10 aquisições do sinal, calculada a média e então enviado este valor para o *software*, tudo isso para minimizar ruídos provenientes do circuito de medição. Durante o cruzamento com o zero, este algoritmo pode falhar ao calcular esta média utilizando valores positivos

e negativos, deformando assim a forma de onda neste intervalo. Como o valor RMS é calculado durante todo o ciclo de amostragem, este é pouco afetado pela incerteza de apenas uma medição. No entanto, em futuras melhorias do protótipo, este problema deverá ser solucionado, escolhendo-se dispositivos que detenham conversores A/D mais rápidos, ou até o emprego de lógicas de programação mais adequadas.

De posse dos valores medidos pelo sistema desenvolvido e pelos equipamentos de referência, foram realizadas as comparações em relação ao erro obtido. Na Tabela 4, são apresentados os resultados comparativos.

Tabela 4. Comparação das formas de onda do osciloscópio e do protótipo desenvolvido.

<b>Grandeza</b>	<b>Sistema Desenvolvido</b>	<b>Osciloscópio</b>	<b>Erro (%)</b>
Máximo da tensão (V)	309,88	312,56	-0,85
Mínimo da tensão (V)	-307,65	-291,20	5,64
Máximo da corrente (A)	2,29	2,25	1,50
Mínimo da corrente (A)	-2,30	-2,45	-6,46

Também foram realizados os cálculos de tensão RMS. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Comparação dos valores eficazes de tensão e corrente entre o multímetro e o protótipo desenvolvido

<b>Grandeza</b>	<b>Sistema Desenvolvido</b>	<b>Multímetro</b>	<b>Erro (%)</b>
Tensão RMS (V)	220,61	220,22	0,18
Corrente RMS (A)	1,60	1,66	3,61

### 3.2 MONITORAMENTO DO QUADRO DE DISTRIBUIÇÃO DO LAT

Para o teste do sistema foi realizado o monitoramento de uma fase de um Transformador de Regulação (TR) do LAT/UFCG durante quatro dias (10/02/2014 a 13/02/2014). Para tanto, se fez uso das conexões acessíveis mais próximas aos terminais do TR, presentes no quadro de distribuição principal do LAT. A configuração experimental tinha por objetivo monitorar a tensão de uma das fases com relação ao neutro (solidamente aterrado) e a corrente na mesma fase.

Como a corrente na fase em questão excedia o valor máximo mensurável pelo ACS712, o mesmo foi conectado ao secundário do Transformador de Corrente (TC) presente no quadro, cujo fator de relação é 100/5. Todos os demais instrumentos conectados ao secundário do referido TC foram desconectados e seu atraso de fase foi

registrado para posterior consideração durante o processamento dos dados. A configuração experimental é apresentada na Figura 17.



Figura 17. Conexões no quadro de distribuição do LAT

O transformador regulador monitorado é apresentado na Figura 18(a) e seus dados de placa são apresentados na Figura 18(b).



Figura 18. Transformador de Regulação monitorado.

O protótipo desenvolvido, apresentado na Figura 19, foi acomodado em uma caixa hermética, próximo ao quadro de distribuição. O sensor de temperatura foi fixado na parte central do transformador regulador de tensão, de forma que foi possível obter um registro da temperatura do equipamento.

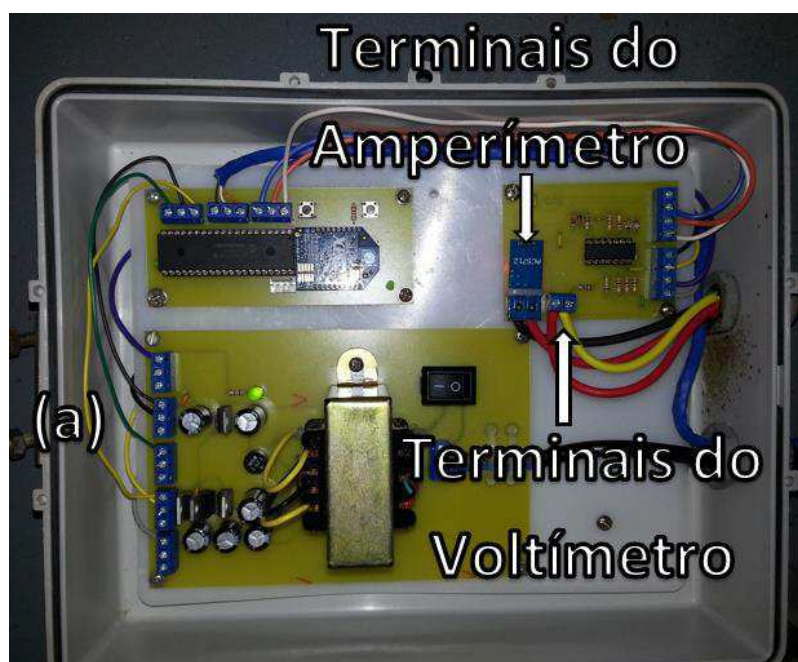


Figura 19. Protótipo de medição desenvolvido.

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

As análises dos registros foram feitas com base no histórico de dados obtidos durante os dias 11/02/2014 e 12/02/2014, pois foram os períodos de tempo nos quais foi possível obter dados durante um dia inteiro. O registro de todo o tempo de monitoração

(das 17:21:14 de 10/02/2014 até às 12:33:14 de 13/02/2014), é encontrado nos anexos desse trabalho.

Analisando o histórico de dados da tensão RMS nos dias 11/02/2014 e 12/02/2014, representados pelas Figuras 20 e 21 respectivamente, é possível observar que a tensão na fase analisada obteve um máximo de  $227,08 V RMS$  (1,03 pu) e um mínimo de  $209,66 V RMS$  (0,95 pu), valores estes que são considerados adequados pela resolução n°505 da ANEEL, a qual admite uma variação de 0,95-1,05 pu na tensão RMS da rede em relação ao valor nominal contratado. Estas variações são devidas às excursões de tensão oriundas do sistema de distribuição, nível de carregamento do sistema local, atuação do próprio TR e da incerteza inerente ao equipamento de medição.

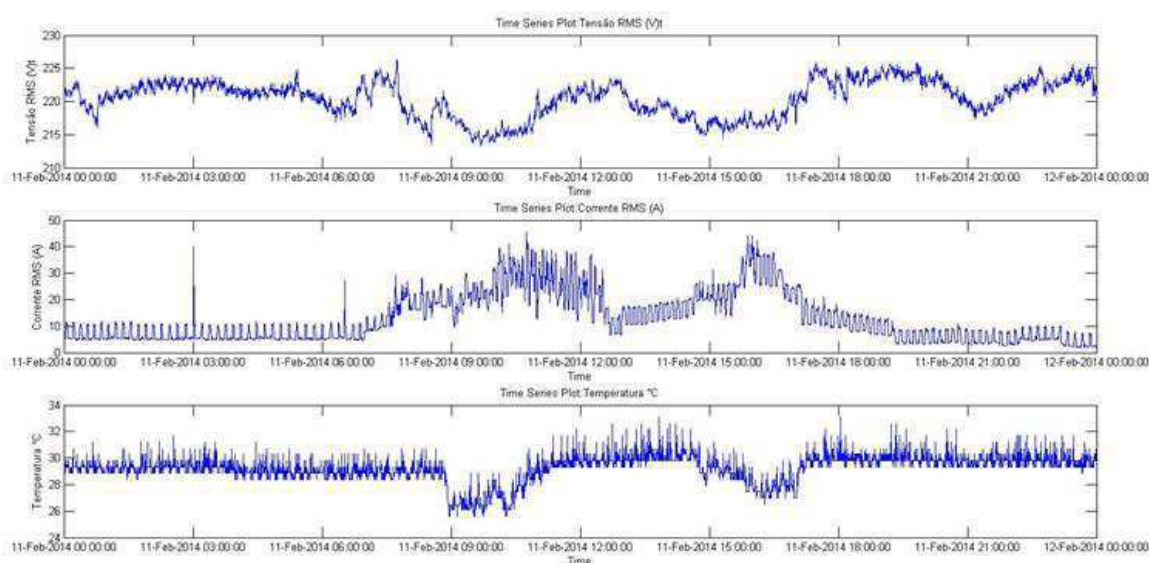


Figura 20. Registro da tensão e corrente RMS e temperatura durante o dia 11/02/2014.

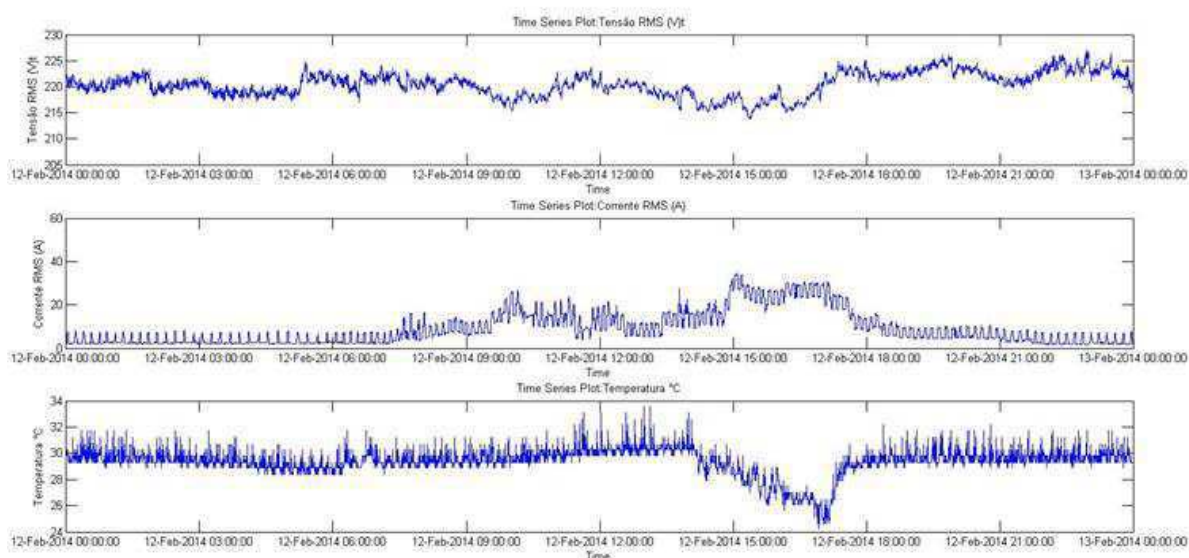


Figura 21. Registro da tensão e corrente RMS e temperatura durante o dia 12/02/2014.

A corrente RMS apresentou um comportamento esperado. Durante os horários de pico, manhã e tarde, houve um crescimento acentuado. Por outro lado, é possível observar o expressivo decaimento do consumo durante a noite e madrugada. Outro fator relacionado à corrente RMS são às variações periódicas apresentadas durante todo o tempo, possivelmente relativas às cargas que são ligadas e desligadas em um intervalo fixo de tempo, como ar condicionados por exemplo.

Os valores de temperatura apresentaram baixa variação, sugerindo que o equipamento opera com propriedades térmicas adequadas. Em relação às medições, apesar de soar contraditório, percebeu-se que nos horários de pico de consumo havia uma tendência de redução da temperatura. Uma teoria para a explicação deste fenômeno é a mudança de *tap* no próprio TR durante estes horários de pico de consumo. Uma vez que há uma tendência de afundamento de tensão com o aumento da carga atendida, o TR automaticamente muda de *tap* para incrementar a tensão e mantê-la dentro dos valores normatizados. Com isso, há a redução da corrente e posterior arrefecimento do tanque do TR.

Analisando o histórico de dados das potências aparente, ativa e reativa, durante os dias 11/02/2014 e 12/02/2014, representados pelas Figuras 22 e 23 respectivamente, é possível observar a predominância da potência ativa sobre a reativa durante os horários de pico. Como a potência reativa é praticamente constante durante todo o intervalo de tempo analisado, quando há uma queda no valor da potência ativa, o fator de potência é afetado drasticamente, isto acontece predominantemente durante a noite e madrugada.

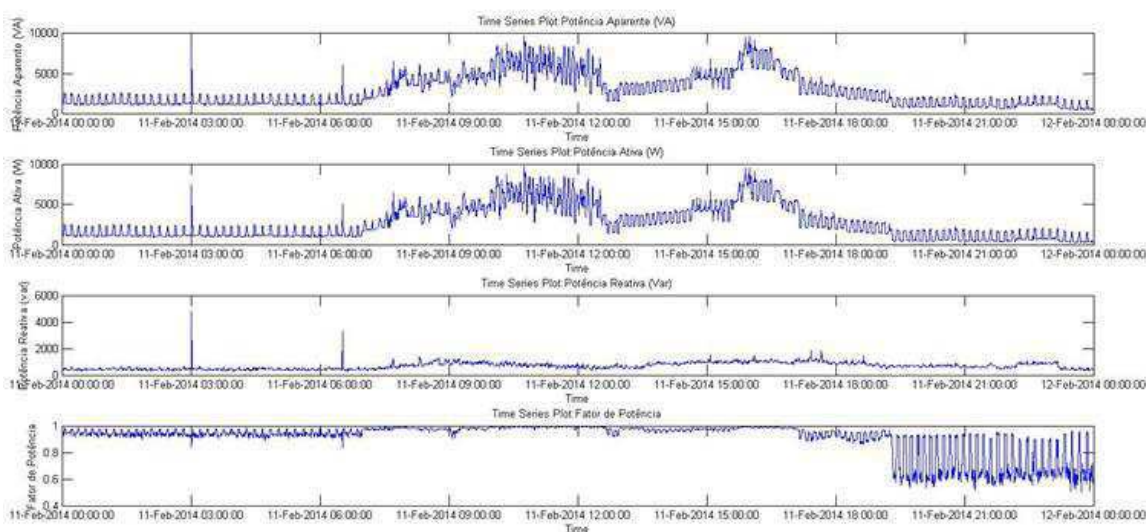


Figura 22. Registro das potências aparente, ativa e reativa e fator de potência durante o dia 11/02/2014.

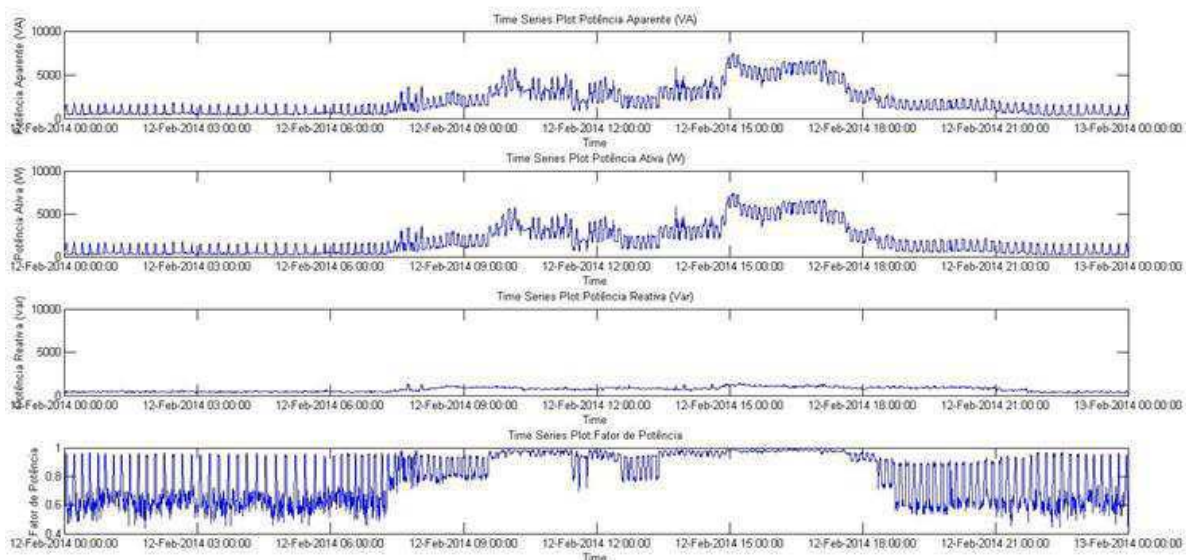


Figura 23. Registro das potências aparente, ativa e reativa e fator de potência durante o dia 12/02/2014.

## 4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um protótipo de um sistema de monitoramento para transformadores de distribuição utilizando um microcontrolador, módulos transceptores Xbee, um software para interface com o usuário, além o auxílio do Matlab para análise dos resultados.

Durante a etapa de projeto do sistema, foram consideradas as vantagens e desvantagens dos dispositivos utilizados, concluindo-se que era necessário visar o baixo custo e a praticidade de implementação. Desta forma, o microcontrolador PIC18F4520 apresentou resultados satisfatórios em relação à velocidade de processamento e a exatidão nas medições das tensões. Às medições da corrente, geraram incerteza devido à necessidade de calibração mais específica do ACS712, isto pode ser melhorado no futuro. O módulo Xbee não apresentou limitações de alcance nem perdas de dados nas condições em que foi utilizado.

O protótipo teve seu funcionamento validado para determinar os erros das medições inerentes ao sistema, permitindo assim verificar em que aspectos o equipamento pode ser melhorado. Para casos que exijam uma exatidão mais elevada em suas medições, será necessário despender um esforço maior na calibração das medições, ou até mesmo na escolha de outros dispositivos. Vale salientar que o sistema desenvolvido custa em



torno de R\$ 150,00, se forem considerados apenas os componentes eletrônicos, valor que em larga escala pode cair até 70%.

Visto isso, foi possível desenvolver um sistema de baixo custo capaz de realizar o monitoramento de um transformador de distribuição, armazenando para posterior análise dados de:

- Formas de onda de tensão e corrente;
- Valores de tensão e corrente RMS;
- Valores de potência aparente, ativa e reativa;
- Fator de potência;
- Temperatura.

Os objetivos primários e secundários do trabalho foram alcançados, uma vez que todas as grandezas de interesse foram medidas, dentro das limitações do sistema, com erros de exatidão conhecidos.

Apesar do erro máximo de 5,64% na medição do sinal da tensão, mais precisamente no valor de pico, o valor *RMS* apresentou um erro consideravelmente baixo, 0,18%, comprovando que a deformação de onda no cruzamento com o zero não afetou demasiadamente na exatidão da medição. Entretanto, este circuito ainda pode ser melhorado, com a utilização de amplificadores de instrumentação, visando assim reduzir o erro comum na medição do sinal, além da utilização de resistores com maior precisão, no divisor de tensão.

Em relação à medição da corrente, esta apresentou erros de medição que podem ser atribuídos tanto à inexatidão da medição pelo microcontrolador, quanto ao ruído presente na fonte de alimentação, pois em diversos testes, para valores pequenos de corrente, este sensor apresentou uma relação sinal/ruído elevada, comprometendo assim a exatidão da medição.

Portanto, pode-se destacar o potencial do trabalho em atividades futuras para o aprimoramento de sistemas de monitoramento de transformadores em geral, mais especificamente de distribuição, tomando como base o contexto de *smart grid*.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. **Manual do PIC18F4520/2520/4420/4520**. Disponível em: < <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39631e.pdf>>. Acesso em: 23 fev. 2014.
- [2] Digi International® INC. **MANUAL do Xbee PRO ZNet 2.5**. Disponível em: < <https://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-2.5-Manual.pdf>>. Acesso em: 23 fev. 2014.
- [3] Texas Instruments. **Manual do LM35**. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>>. Acesso em: 23 fev. 2014.
- [4] Allegro MicroSystems INC. **MANUAL do ACS712**. Disponível em <<http://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/ACS712-Datasheet.ashx>>. Acesso em: 23 fev. 2014.
- [5] COUGHLIN, Robert F.; DRISCOLL, Frederick F. **Amplificadores Operacionais y Circuitos Integrados Lineales**. 5. ed. Naucalpan de Juárez: Pearson Pentice Hall, 1999.
- [6] Cadence INC. **Manual do Orcad Capture**, Disponível em: <[http://www.seas.upenn.edu/~jan/spice/PSPICE\\_CaptureGuideOrCAD.pdf](http://www.seas.upenn.edu/~jan/spice/PSPICE_CaptureGuideOrCAD.pdf)>. Acesso em: 23 fev. 2014.
- [7] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução ANEEL 345/2009**. Qualidade de Energia – PRODIST. Disponível em: < [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2009/168/resultado/nota\\_tecnica\\_0395.pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2009/168/resultado/nota_tecnica_0395.pdf)>. Acesso em: 23 fev. 2010.
- [8] Mathworks INC. **Manual do MATLAB 2013b**, Disponível em: <[http://www.mathworks.com/help/pdf\\_doc/matlab/getstart.pdf](http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/getstart.pdf)>. Acesso em: 23 fev. 2014.
- [9] Cadence INC. **Manual do Orcad Capture**, Disponível em: <[http://www.seas.upenn.edu/~jan/spice/PSPICE\\_CaptureGuideOrCAD.pdf](http://www.seas.upenn.edu/~jan/spice/PSPICE_CaptureGuideOrCAD.pdf)>. Acesso em: 23 fev. 2014.
- [10] ABU-ELANIEN, A. E. B.; SALAMA, M. M. A. **Survey on the Transformer Condition Monitoring**. IEEE Power Engineering, p. 187-191, 2007.
- [11] ARAÚJO, J. F. **Modelagem Matemática de Transformadores Monofásicos de Baixa Potência Baseada na Resposta em Frequência da Corrente de Excitação**. Universidade Federal de Campina Grande (Dissertação de Mestrado). Campina Gande, 2013.
- [12] BATISTA, T. C.; LIRA, J. G. A.; FREIRE, R. C. S.; LUCIANO, B A.; **Sistema automático para ensaios de perdas em núcleos de transformadores monofásicos**. IEEE Industry Applications Conf., p. 1-4, 2010.
- [13] FALCÃO, D. M. **Integração de Tecnologias para Viabilização da Smart Grid**. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Belém, 2010.

- [14] FERNANDES JR, D. F. **Modelo de Transformadores de Potencial Capacitivos para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos**. Universidade Federal de Campina Grande (Tese de Doutorado). Campina Grande, 2003.
- [15] GORUR, R. S.; BURNHAM, J. T.; CHERNEY, E. A. **Outdoor Insulators**. 1ª Edição. ed. [S.l.]: Phoenix: Ravi S. Gorur Inc., 1999.
- [16] HASHMI, M.; HANNINEN, S.; MAKI, K. **Survey of smart grid concepts, architectures, and technological demonstrations worldwide**. IEEE Innovative Smart Grid Technologies, p. 1-7, 2011.
- [17] JIN, E. S. **Parameter Identification of the Transformer Winding Based on Least-Squares Method**. IEEE Power and Energy Society General Meeting, p. 1- 6 , 2008.  
KIOUMARS, A. H.; TANG, L. ATmega and XBee-based wireless sensing. **IEEE Automation, Robotics and Applications**, p. 351-356, 2011.
- [18] LIRA, J. G. A. **Sistema de Aquisição de Dados para Monitoramento e Diagnóstico Remoto das Condições de Para-Raios de Óxido de Zinco**. Universidade Federal de Campina Grande (Tese de doutorado). Campina Grande. 2007.
- [19] MACÊDO, E. C. T. **Sistema de Avaliação do Nível de Degradação de Para-Raios de Óxido de Zinco**. Universidade Federal de Campina Grande (Dissertação de Mestrado). Campina Grande. 2012.
- [20] MADHOO, H.; CRONJE,; SUBRAMONEY,. **Power Grid Intelligence: Utility Challenges on Advanced Metering Infrastructure Deployment and the Use of Meters as Smart Grid Sensors**. International Symposium on High Voltage Engineering, 2013.
- [21] NETO, J. M. **Remote Educational Experiment Applied To Electrical Engineering**. IEEE Remote Engineering and Virtual Instrumentation, p. 1 - 5, 2012.
- [22] ROSHEN, W. **Ferrite core loss for power magnetic components design**. IEEE Transactions on Magnetics, v. 27, p. 4407 - 4415, 1991.
- [23] SILVA, J. F. M. C. **Building a Node for Wireless Sensor Network Based on Open Source Platform Arduino**. IEEE Computing System Engineering, p. 224, 2012.

## ANEXO A – REGISTRO DAS GRANDEZAS ELÉTRICAS MONITORADAS

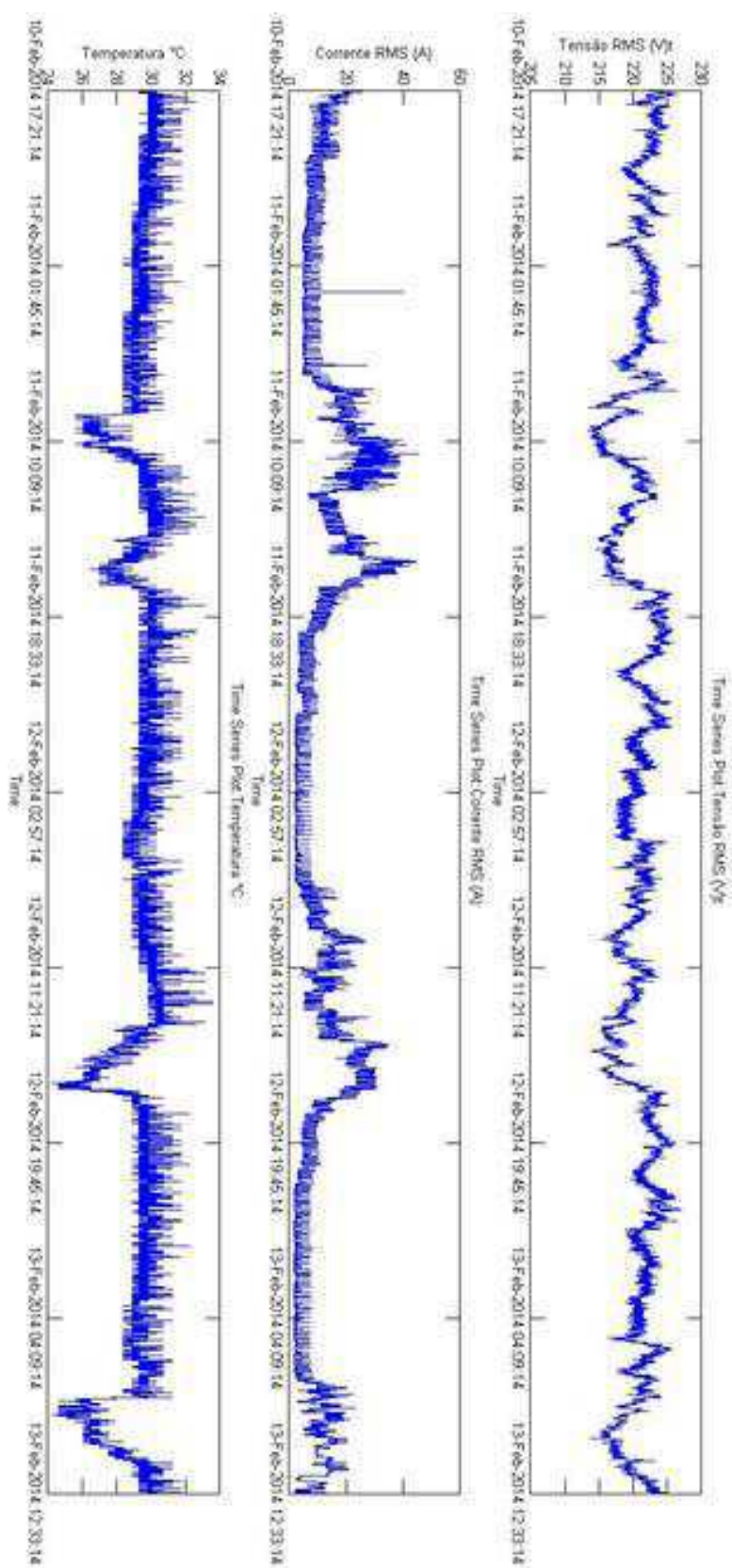


Figura 24. Registro da tensão e corrente RMS e temperatura durante todo o tempo observado.

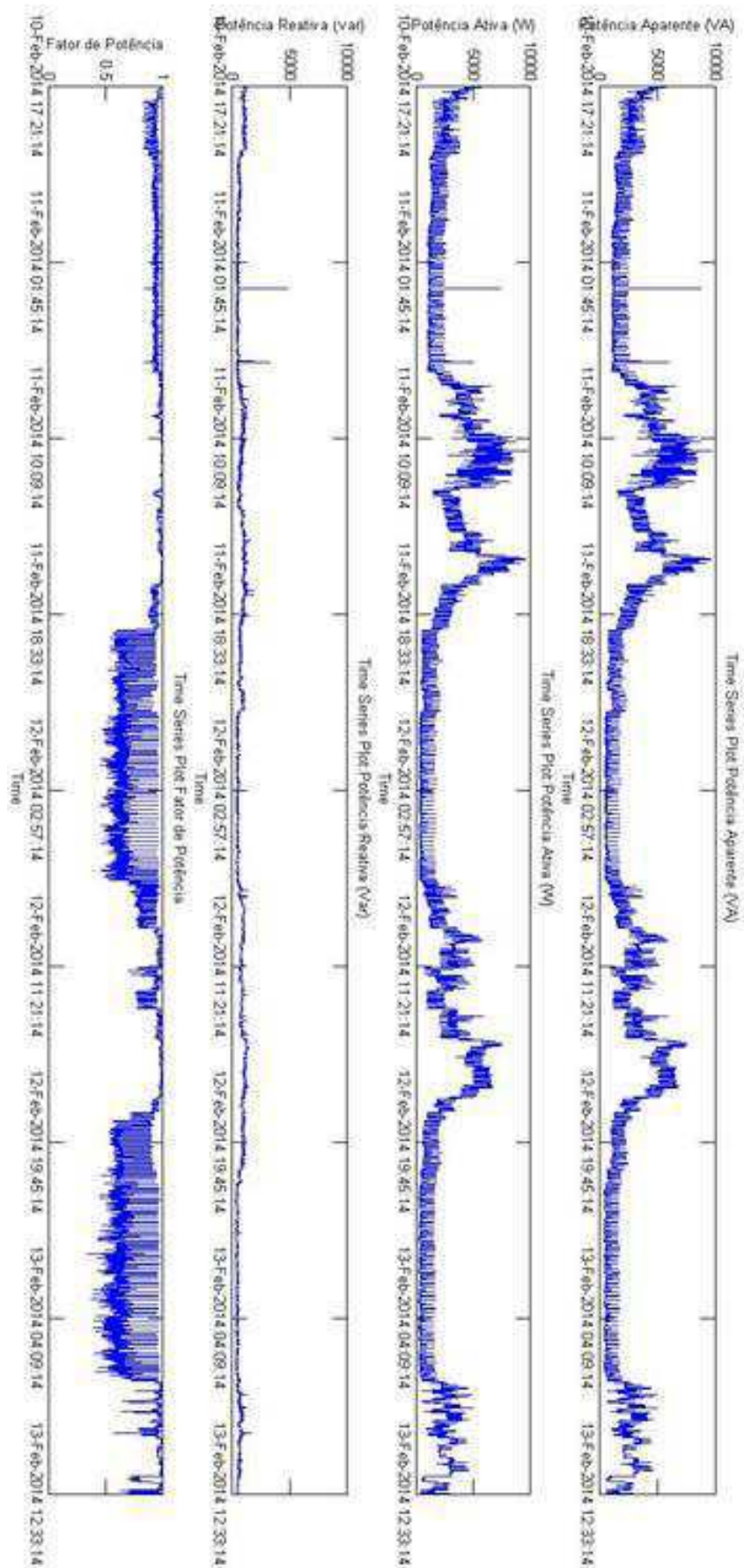


Figura 25. Registro das potências aparente, ativa e reativa e fator de potência durante todo o tempo observado.