

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS – UNIS
ENGENHARIA ELÉTRICA
RENATO MARTINS LEMOS

REDE DE CONTROLE E MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DA
QUALIDADE DE ENERGIA EM UM AMBIENTE INDUSTRIAL - RADIUIND

Varginha
2016

RENATO MARTINS LEMOS

**REDE DE CONTROLE E MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DA
QUALIDADE DE ENERGIA EM UM AMBIENTE INDUSTRIAL - RADIUIND**

Trabalho de Conclusão do Curso apresentada ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS-MG como pré-requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica sob orientação do Prof. Me. Eduardo Henrique Ferroni.

**Varginha
2016**

RENATO MARTINS LEMOS

**REDE DE CONTROLE E MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DA
QUALIDADE DE ENERGIA EM UM AMBIENTE INDUSTRIAL - RADIUIND**

Trabalho de Conclusão do Curso apresentada ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS-MG como pré-requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica pela banca examinadora composta pelos membros:

Aprovado em: ___ / ___ / ___

Prof. Me Eduardo Henrique Ferroni

Prof.

Prof.

OBS.:

RESUMO

Este trabalho traz todo estudo e resultados obtidos com a elaboração e confecção de uma rede de monitoramento e controle da qualidade de energia em um ambiente industrial (RadiuInd), tendo por objetivo a criação de uma ferramenta baseada em *software* e *hardware* aberto que auxilie nas tomadas de controle sobre a qualidade da energia elétrica do ambiente instalado. O estudo objetiva também a utilização de métodos de controle variados para atuar no sistema e garantir que os parâmetros de qualidade de energia sejam alcançados. Seguindo a documentação atual sobre o assunto de qualidade de energia e englobando um estudo sobre o conceito de redes inteligentes (*smart-grid*) o trabalho traz explicações básicas dos padrões de recebimento de energia do consumidor final elaboradas pela legislação vigente, análises da estrutura do local da implantação e a esquematização da criação dos sensores de leitura que utilizam da plataforma Rádiumino e outros *softwares* para montagem do sistema. Visando a criação de uma ferramenta confiável e versátil para o monitoramento da qualidade de energia, o projeto executado apresentou um desempenho satisfatório, tendo todas as medidas validadas com ferramentas de instrumentação solidificadas no mercado e possibilitando o acesso dos dados coletados de forma local e remota, garantindo a atuação rápida e automática no sistema de distribuição interna.

Palavras-chave: Qualidade de energia elétrica. Sistema de monitoramento. Rádio frequência.

ABSTRACT

This work brings all study and results obtained with the design and construction of a network monitoring and control of power quality in an industrial environment (Radium), aiming to create a software-based tool and open hardware to assist in decision control on the power quality of the installed environment. The study aims also the use of different control methods to work the system and ensure that the power quality parameters are achieved. Following the current literature on the subject of power quality and encompassing a study on the concept of intelligent networks (smart-grid) work provides basic explanations of final consumer energy receiving standards developed by the current legislation and analysis of the local structure the implementation and the layout of the creation of reading sensors using the Radium and other software for system mounting platform. In order to create a reliable and versatile tool for monitoring power quality, the project runs showed a satisfactory performance, with all the measures validated instrumentation tools solidified the market and enabling access of data collected locally and remotely, ensuring rapid and automatic operation in the internal distribution system.

Keywords: *Power quality. Monitoring system. Radio frequency.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Diagrama de blocos do <i>hardware</i> desenvolvido para o RadiuInd.....	12
Figura 02 – Arquitetura de uma rede sem fio.....	12
Figura 03 – Diagrama de blocos da lógica de funcionamento do sistema RadiuInd.....	15
Figura 04 – Módulo de RF do Arduino (Radiuino)	15
Figura 05 – Protocolo TCP/IP adaptado para o Radiuino	16
Figura 06 – Diagrama de blocos da estrutura elétrica da planta industrial.....	17
Figura 07 – Esquema elétrico do detector de tensão desenvolvido.....	18
Figura 08 – Esquema elétrico do detector de corrente desenvolvido.....	19
Figura 09 – TC de 100A : 50mA adotado para testes	19
Figura 10 – <i>Layout</i> da PCI RU-3 Radiuind	20
Figura 11 – RU-3 mostrado em <i>software</i> de modelagem 3D.....	21
Figura 12 – Detalhe dos pontos de fixação DIN-35	21
Figura 13 – Diagrama da parte física da comunicação SPI.....	22
Figura 14 – Diagrama de bloco do <i>firmware</i> instalado na plataforma Radiuino	22
Figura 15 – Diagrama de bloco do <i>firmware</i> instalado no microcontrolador PIC-18F.....	23
Figura 16 – Triângulo de potências	26
Figura 17 – Software Radiunis com a incorporação do módulo de saídas.....	27
Figura 18 – Teste de validação feito em um sistema trifásico.....	28
Figura 19 – Aproximação da Figura 17 para melhor visualização.....	29
Figura 20 – Software RadiuInd com os valores recebidos via RF no teste de validação....	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas gerais
UNIS-MG – Centro Universitário do Sul de Minas
PID – Proporcional integral derivativo
ND – Norma de Distribuição
PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico
QEE – Qualidade de energia elétrica
REI – Redes Elétricas Inteligentes –*Smart-grid*
SQL – *Structured Query Language*
TCP – *Transmission Control Protocol*
IP – *Internet Protocol*
ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações
GPS – *Global positioning system*
RF – Rádio frequência
AD – Analógico Digital
SPI – *Serial Peripheral Interface bus*
RMS – *Root Mean Square*
PCI – Placa de Circuito Impresso
TC – Transformador de corrente
THD – *Total harmonic distortion*
FFT – *fast Fourier transform*
RU-3 – Radiunis trifásico
DIN – *Deutsches Institut für Normung*
PHP – *Personal Home Page*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	08
2 QEE (Qualidade da Energia Elétrica).....	09
2.1 Parâmetros exigidos pela ANEEL.....	10
2.2 Exigências para o <i>hardware</i> de medição	11
3 REDES DE SENSORES	12
3.1 Redes Inteligentes	13
3.2 Rede de sensores sem fio e Plataforma RADIUINO	14
3.3 Estrutura elétrica da planta industrial.....	16
4 METODOLOGIA.....	18
4.1 Desenvolvimento dos <i>Hardwares</i>	18
4.2 Desenvolvimento dos <i>Firmwares</i>	21
4.2.1 Método para obtenção da tensão e corrente elétrica.....	23
4.2.2 Método para obtenção da frequência.....	24
4.2.3 Método para obtenção do fator de potência.....	24
4.2.4 Método para obtenção das potências	25
4.2.5 Método para obtenção da distorção harmônica	26
4.3 Desenvolvimento do <i>Software</i>	27
4.4 Testes e validação	28
5 RESULTADOS	31
5.1 O Lote protótipo	31
5.2 Precisão do sistema.....	32
5.3 Visualização dos dados.....	33
5.4 Custos envolvidos.....	34
6 CONCLUSÃO.....	35
REFERÊNCIAS	37
APÊNDICE A – Esquema elétrico	40
APÊNDICE B – Desenho técnico	43
APÊNDICE C – Trechos do algoritmo.....	44

1 INTRODUÇÃO

Em meio às vigências da Agência nacional de energia elétrica (ANEEL), que exige a entrega de energia de qualidade para seu consumidor final, faz-se importante a verificação da qualidade da energia consumida. A proposta deste projeto consiste em um estudo e confecção de sensores de leitura da rede elétrica e dispositivos de controle, instalados em pontos estratégicos de uma planta industrial, com monitoramento dos dados lançados via plataforma RADIUNO e com acesso via *website*, com a finalidade de conferência da qualidade da energia em tempo real, ações de controle no sistema de distribuição e também para a coleta de dados estatísticos. Um estudo utilizando esta sistemática foi realizado por Lemos e colaboradores (2015) na presente universidade deste trabalho, o qual foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) gerando como legado a tecnologia empregada nos *hardwares* e *firmwares* deste projeto. A referência adotada para o estudo de Lemos e colaboradores (2015) foi o Centro Universitário do Sul de Minas (UNIS-MG).

A possibilidade de implementação de técnicas de controle como PID, Lógica *Fuzzy* são aspectos que serão implementados na plataforma RADIUNIS (LEMOS et al, 2015), sendo agora voltado o foco para ambiente industriais, RADIUNID. Sendo assim, para questões de desambiguação, este trabalho se trata de uma adequação e evolução da plataforma RADIUNIS que foi desenvolvida por Lemos (2015) que é também o autor do presente projeto.

A inspeção da qualidade da energia é algo de extrema importância, principalmente devido ao grande uso de cargas não lineares, tais como computadores, motores e demais componentes industriais, que podem causar diversos distúrbios que afetam diretamente a qualidade da energia.

Para este projeto, deve-se ressaltar que a Norma de Distribuição ND-5.3 da Companhia de Energia de Minas Gerais (CEMIG), responsável pelos atendimentos a clientes de média tensão, estabelece que a energia a partir do ponto de entrega (que varia de acordo com o atendimento) passa a ser de responsabilidade do próprio consumidor, e não da concessionária fornecedora de energia.

2 QEE (Qualidade da Energia Elétrica)

O setor elétrico brasileiro tem suas diretrizes básicas definidas no documento “Proposta do Modelo Institucional do Setor Elétrico” (CNPE, 2003), o qual estabelece os modelos tarifários, restauração e planejamento de expansão do sistema, a universalização do acesso à energia elétrica dentre outras relações com o sistema de energia elétrica brasileira. A base operacional para que esta resolução normativa seja seguida está descrita pela ANEEL através do módulo 8 do documento Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) (ANEEL, 2015), que são parâmetros que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica brasileiro. Este documento é parte principal no embasamento do presente projeto, pois o mesmo trata de modo aprofundado sobre a qualidade da energia elétrica (QEE) dentro dos padrões exigidos, sendo considerados os parâmetros: tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variações de tensão de curta duração e variação de frequência (ANEEL, 2015).

Segundo Belisário, Bahiense e Oliveira (2003) a qualidade do serviço prestado pelas concessionárias elétricas pode ser avaliada nos seguintes aspectos: a continuidade do fornecimento, a qualidade do atendimento ao consumidor e a qualidade do produto energia elétrica. Seguindo esta linha, Paniago (2006), afirma que cada um dos três aspectos resulta assim na continuidade do fornecimento, que corresponde à disponibilidade da energia elétrica ao consumidor final.

De acordo com Dias (2002) uma boa energia recebida é a disponibilidade de energia elétrica na forma de onda senoidal pura, sem alterações na amplitude e interrupções, emanando de uma fonte de potência infinita. Qualquer desvio nas características destes parâmetros é considerado um problema envolvendo qualidade da energia, por isso hoje temos em discussão a PRODIST (ANEEL, 2015).

Em um estudo deste cunho, Ferroni (2013) fala sobre o impacto econômico da qualidade de energia, sendo que em alguns ramos de atividade, como as indústrias têxtil, siderúrgica e petroquímica, uma interrupção elétrica de até 1 minuto pode ocasionar prejuízos de até US\$ 500 mil, o que deixa mais evidente a importância de termos uma ferramenta versátil e confiável para controle da qualidade de energia em uma indústria.

Existem várias ferramentas que auxiliam na coleta de dados das grandezas elétricas envolvidas na qualidade de energia, porém não possuem a mesma versatilidade que a proposta

neste trabalho. Ter uma ferramenta que permita a coleta de informações, possua técnicas computacionais capazes de dar suporte à tomada de decisão e sistemas que proporcionem o acesso a informação de forma rápida e remota, implica em uma indústria eficiente energeticamente e por consequência um nível de qualidade de energia melhor (FERRONI, 2013).

Todos os aspectos que são considerados para determinar a qualidade da energia estão condensados em arquivos técnicos governamentais os quais embasam este projeto.

2.1 Parâmetros exigidos pela ANEEL

Os aspectos considerados da qualidade do produto em regime permanente ou transitório, segundo a PRODIST (ANEEL, 2015) são:

- a) Tensão em regime permanente: são os limites adequados para os níveis de tensão em regime permanente. Esses valores são medidos e comparados com os níveis que são estipulados e considerados adequados, de acordo com o tipo de atendimento da unidade consumidora.
- b) Fator de potência: o fator de potência é calculado através da razão da potência ativa com a potência aparente. O resultado dessa divisão irá indicar a eficiência energética, ou seja, um alto fator de potência caracteriza uma alta eficiência energética e um baixo fator de potência indica uma baixa eficiência energética. Em Sadiku (2013), temos que o valor de fator de potência varia entre zero e a unidade. Para uma carga puramente resistiva, a tensão e a corrente estão em fase, de modo que o fator de potência seja unitário. Isso faz com que a potência aparente seja igual à potência média. Para uma carga puramente reativa, o fator de potência equivale a zero, o que faz com que a potência média seja nula.
- c) Harmônicos: são sinais de frequência diferentes da fundamental adicionados à rede elétrica, ou seja, ruídos de alta frequência que conflitam com o padrão de 60Hz estabelecido para nossa região. Temos em Schneider (2003) que as harmônicas têm um impacto econômico considerável nas instalações, como o aumento das despesas com energia e perdas de produtividade.
- d) Desequilíbrio de tensão: ocorre quando há desbalanceamento de tensão nominal entre fases em um circuito trifásico.
- e) Flutuação de tensão: é a modificação do valor eficaz da tensão, podendo ocorrer aleatoriamente, esporadicamente ou repetitivamente.

- f) Variação de tensão de curta duração: são alterações de curto período de tempo no valor eficaz da tensão. Segundo ITI (2000) existe uma grande vulnerabilidade dos equipamentos eletrônicos a estas variações, com isso foi criada a Curva ITIC (IEEE466, 1995) que passou a ser uma referência para verificação do nível de vulnerabilidade de equipamentos comparando-se a curva de sensibilidade dos equipamentos eletrônicos.
- g) Variação de frequência: são alterações nas frequências das ondas senoidais no sistema elétrico de distribuição, não podendo essas alterações ser inferiores a 50,9Hz ou ultrapassar 60,1Hz, lembrando que no Brasil a frequência adotada é de 60Hz.

2.2 Exigências para o *hardware* de medição

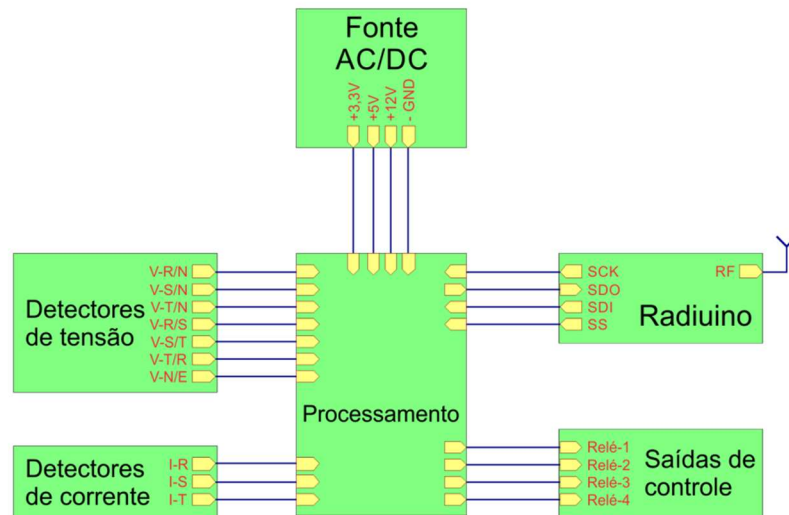
Quanto aos medidores das grandezas elétricas, a ANEEL (2016) estabelece os requisitos mínimos para medição das grandezas elétricas do sistema de distribuição aplicáveis ao faturamento, à qualidade da energia elétrica, ao planejamento da expansão e à operação do sistema de distribuição. Assim sendo a tecnologia utilizada deve atender a estes parâmetros para serem de fato utilizados em uma rede de monitoramento Inteligente de Energia.

Os medidores eletrônicos destinados não somente a fatura, mas também a QEE, devem respeitar os parâmetros descritos no Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica (ANEEL, 2015).

Outro ponto importante já citado são os dados gerados pelos medidores da rede inteligente de energia, segundo ANEEL (2016), os medidores eletrônicos deverão disponibilizar, quando existentes, através de protocolo de comunicação aberto, os valores de QEE solicitados.

A eletrônica responsável por coletar estas informações mediante as exigências da ANEEL esta composta, neste proposto, por 5 blocos funcionais bem definidos os quais seguem a tecnologia de Lemos e colaboradores (2015) e são aprimoradas para uso com técnicas de controle. A Figura 1 mostra um diagrama de bloco do hardware criado para tal feito, lembrando que toda tecnologia desenvolvida é de propriedade intelectual deste projeto e uma descrição mais aprofundada dos circuitos elétricos contidos nos blocos funcionais são encontradas nas Figuras 7 e 8.

Figura 1 - Diagrama de blocos do hardware desenvolvido para o RadiuInd

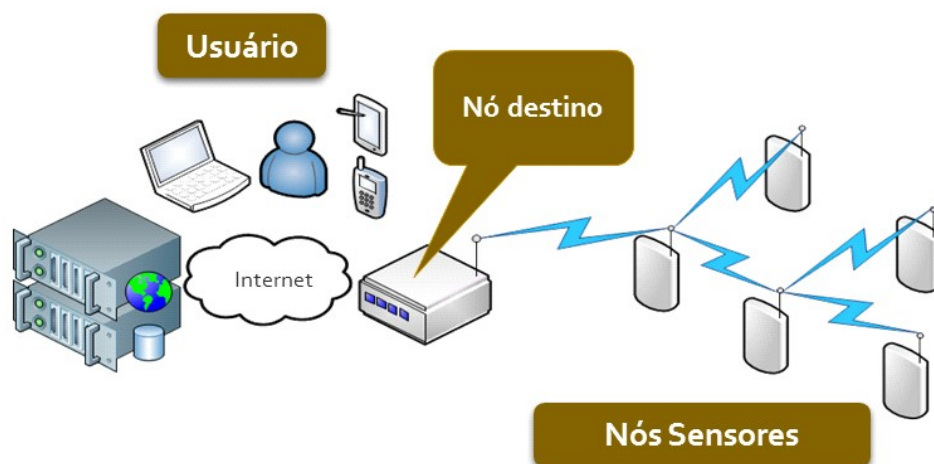


Fonte: O autor.

3 REDES DE SENSORES

As redes de sensores podem ser comparadas as redes de computadores que são caracterizadas em tipos de redes, topologias, arquiteturas e protocolos. Sendo que cada Nó sensor é composto de todos estes parâmetros possibilitando assim sua identificação e comunicação na rede (KUROSE e ROSS, 2002). Dentre as classificações dadas por Dantas (2002) sobre rede de computadores, o presente trabalho utilizará a rede sem fio como meio de comunicação dos sensores de coleta de dados da qualidade de energia, Figura 2.

Figura 2 – Arquitetura de uma rede sem fio



Fonte: BRANQUINHO, 2016.

3.1 Redes Inteligentes

Segundo CGEE (2013) o conceito *Smart Grid* ou Redes Elétricas Inteligentes (REI) pode ser compreendido como uma rede elétrica que utiliza tecnologia eletrônica e digital avançada para monitorar, gerenciar e controlar o transporte de eletricidade em tempo real com fluxo de energia e de informações bidirecionais entre o sistema de fornecimento de energia e o cliente final.

O Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2011) destaca que o impacto nos níveis mais altos do sistema elétrico ocorre de forma indireta, por meio do aplainamento da curva de carga e das consequências do surgimento de uma quantidade significativa de geração distribuída, e com os sistemas de medidores interligados consegue-se um controle maior do sistema e redução deste impacto.

Para obter a rede elétrica inteligente, segundo Xinghuo e colaboradores (2011) os subsistemas relacionados com a interligação de micro redes, infraestrutura de comunicação, infraestrutura de medição, abastecimento de veículos elétricos e com o armazenamento de energia devem estar todos com seus parâmetros digitalizados.

Para fechar o foco mais na distribuição de energia, que é o objeto de estudo do presente projeto, baseamos em CGEE (2013), que diz que o segmento da distribuição de energia elétrica será muito beneficiado pelas tecnologias de Redes Elétricas Inteligentes, principalmente pela aplicação de medidores inteligentes e automação de equipamentos que permitirão controlar em tempo real o estado de toda a rede, balancear as cargas, prever a interrupção do fornecimento de energia detectando e isolando automaticamente as faltas, reconfigurando e restaurando o fornecimento do serviço.

Ponto de atenção são os *softwares* do sistema de medição e gerenciamento, que em geral são proprietários, disponibilizados pelo fabricante dos medidores. Segundo CGEE (2013) como os *softwares* são proprietários, a disponibilização dos dados é falha, pois implica que os usuários somente poderão acessá-los utilizando ferramentas de gerenciamento do fornecedor dos equipamentos, o que não é o ideal, pois a própria ANEEL (2016) diz respeito à disponibilização dos dados em meios difundidos da informação. Por isso a importância que os dados de medição sejam abertos e que o fornecedor de equipamentos disponibilize-os em sua fonte original e fornecendo conversores de protocolos e conectores para diversos padrões de banco de dados em linguagem tais como *Structured Query Language* (SQL) ou em formato de conversão desejado pelo usuário.

O serviço de comunicação tradicional está evoluindo gradualmente em direção à internet de banda larga. Segundo Gellings (2009), o primeiro passo que se dará no uso das telecomunicações dentro do próprio setor elétrico será naquelas aplicações esperadas como telemetria, cortes e religações remotas, monitoramento da rede e gestão eficiente do consumo. Esta comunicação está baseada em redes RF *Mesh* em espectros licenciados, que compreende a faixa de 700 – 960 MHz, e em não licenciados, que compreende as faixas de 900 MHz ISM, 902-928 MHz e 2,4–5GHz. A maioria dos fabricantes de soluções para REIs utilizam radiotransmissores dentro da faixa de 900 MHz, com restrições de potência máxima de transmissão para dispositivos não licenciados e o uso de tecnologias de espectro disseminado (SILVER SPRING NETWORKS 2011).

3.2 Rede de sensores sem fio e Plataforma Rádiumo

O uso da radiofrequência no Brasil é regulamentado pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) e seu uso gera custos altos de homologação, por isso faz-se necessária a busca de alternativas viáveis para a implementação do projeto. A alternativa encontrada é a plataforma Arduino associada à radiofrequência, que já possui homologação da ANATEL.

O Arduino é um *hardware* com *software* livre, ou seja, não há necessidade de arcar com despesas de *royalties* para a empresa dona da plataforma, nem a necessidade de aquisição de *softwares* específicos para realizar a programação, pois a plataforma Arduino possui uma IDE (*Integrated Development Environment*) grátis para que o usuário possa desenvolver o *firmware* do seu projeto, o que faz com que os custos sejam reduzidos.

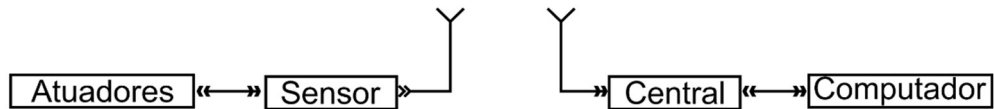
A plataforma Arduino consiste em um sistema que permite a um usuário com conhecimentos técnicos interagir com o ambiente através de dispositivos e equipamentos. Segundo Rodrigues (2012), o Arduino foi criado pelo professor Massimo Banzi na Itália, o qual queria ensinar programação de computadores de forma que este conhecimento pudesse ser aplicado a projetos de arte, automação e robótica.

O Arduino também pode ter suas aplicações estendidas utilizando placas que contêm outros dispositivos, as quais são facilmente conectadas a ele. Estas placas são chamadas de módulos e podem funcionar como receptores GPS (*Global position system*), módulos de rede *ethernet* ou *wireless*, dentre outros (MICROBERTS, 2010).

Com toda esta versatilidade temos o ambiente ideal para realizar o presente projeto, pode-se associar o Arduino com outros dispositivos, segundo Ferroni (2015) embora a

plataforma Arduino possua um número extremamente amplo de aplicações, para fins de facilitar ainda mais este processo, o Arduino conta com a possibilidade de se integrar a outras placas cuja programação é feita em microcontrolador independente daquele localizado na placa do Arduino. A Figura 3 nos mostra a lógica do RadiuInd quanto a comunicação RF.

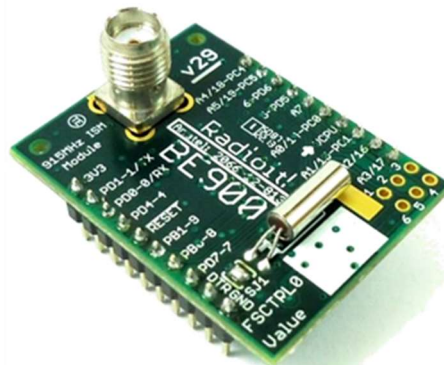
Figura 3 - Diagrama de blocos da lógica de funcionamento do sistema RadiuInd via RF



Fonte: adaptado de FERRONI, 2013.

No presente trabalho, a plataforma será utilizada com o módulo de RF (rádio frequência), para transferir os dados coletados por uma placa com microcontrolador independente. Foi escolhido o PIC-18F da empresa Microchip para realizar o tratamento dos dados coletados, este microcontrolador irá trabalhar juntamente com o módulo de RF. A partir deste ponto utilizaremos o nome de Radiuino para referenciar a plataforma, que é justamente o Arduino destinado a RF, Figura 4.

Figura 4 - Módulo de RF do Arduino (Radiuino)

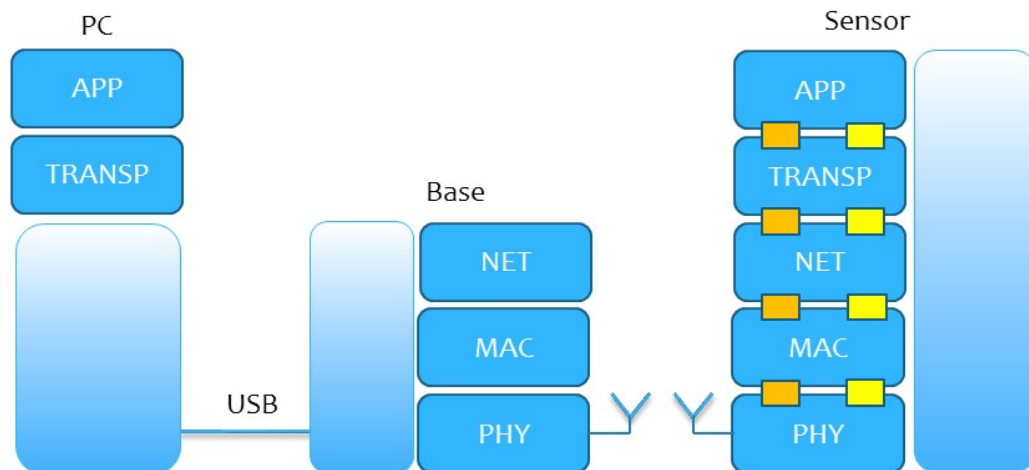


Fonte: BRANQUINHO, 2015.

O Radiuino é uma plataforma desenvolvida no Brasil na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Se trata de um módulo de RF associado ao Arduino, o que o torna uma ferramenta poderosa e versátil para transmissão de dados. A comunicação é feita via protocolo TCP/IP, usado na concomitante com antenas adequadas para vencer as distâncias elevadas da planta industrial (BRANQUINHO, 2015).

O desenvolvimento do firmware do Radiuino teve como base a pilha TCP/IP com cinco camadas e para desenvolvimento das aplicações deve-se respeitar esta arquitetura de pilha de protocolos vista na Figura 5.

Figura 5 – Protocolo TCP/IP adaptado para o Radiuino



Fonte: BRANQUINHO, 2015.

3.3 Estrutura elétrica da planta industrial

A seguir será estudada a estrutura elétrica de uma planta industrial modelo a fim de verificar os melhores pontos para a instalação dos sensores.

A empresa idealizada para o estudo é atendida em média tensão, ou seja, a concessionária CEMIG entrega a energia em 13,8kV, sendo o consumidor o responsável pela transformação para baixa tensão, faixa para atendimento do sistema de iluminação e aparelhos comumente utilizados na unidade consumidora. Isso ocorre da seguinte maneira:

O ponto de entrega de energia da concessionária ao consumidor encontra-se na chave de proteção localizada no poste da CEMIG onde ocorre a derivação para atendimento ao cliente, sendo este através de uma rede subterrânea.

“O consumidor pode optar por ramal de entrada subterrâneo quando a subestação de entrada de energia elétrica estiver localizada do mesmo lado da rede aérea da Cemig. Neste caso o Ponto de Entrega será na derivação da rede da Cemig” (CEMIG, 2013a).

A responsabilidade da energia não é mais da concessionária, e sim do consumidor a partir do ponto de entrega que é o ponto até onde a Cemig se responsabiliza pela QEE.

“É o ponto até o qual a Cemig se obriga a fornecer energia elétrica, com participação nos investimentos necessários, bem como, responsabilizando-se pela execução dos serviços de operação e de manutenção do sistema” (CEMIG, 2013b).

Os cabos saem da rede CEMIG e entram na subestação do consumidor, que é responsável pela medição de energia, proteção contra curtos-circuitos, alimentação reversa dos geradores e consumo além da demanda contratada, executada conforme a norma de distribuição ND-5.3 da concessionária. A partir da subestação segue a alimentação via rede subterrânea, ainda em média tensão (13,8kV), até uma chave seccionadora e proteção com fusível. Após a chave há uma conexão entre o cabo e o barramento principal, onde ocorre a derivação para os cabos que alimentam os transformadores.

Os transformadores estão em cabines seladas, construídas conforme a ABNT NBR-14039 (2005), que rege o atendimento em média tensão ao cliente após a subestação de medição e proteção.

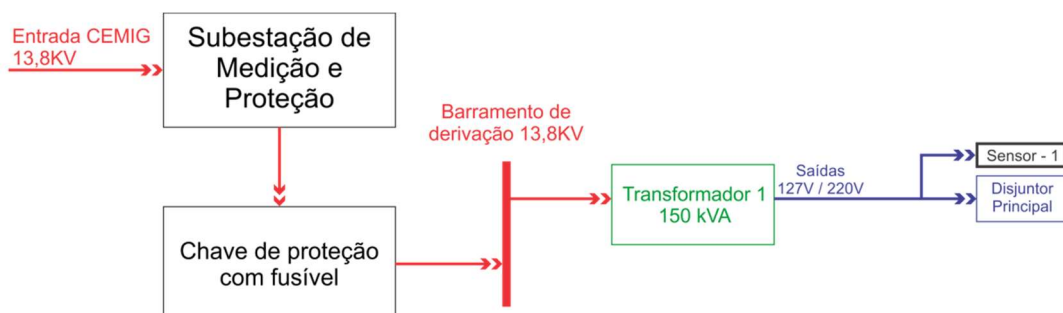
A empresa idealizada possui um transformador que é responsável pela energia de toda planta, sendo um transformador de 150 kVA.

O atendimento final em baixa tensão ocorre a partir da conexão dos cabos que saem do secundário dos transformadores ou geradores aos quadros de distribuição, como mostra a Figura 6.

Os sensores de medição da qualidade de energia ficam instalados então o mais próximo da entrada dos disjuntores principais de cada painel de distribuição, de forma que toda a baixa tensão de cada transformador seja inspecionada, como visto na Figura 6. Como em um ambiente industrial há uma distância considerável entre os pontos de instalação e a central do sistema de monitoramento, foi implantada a comunicação em radiofrequência para a coleta dos dados, utilizando da plataforma Rádiuino citada no subitem 3.2 deste trabalho.

Para uma utilização ótima da rede de sensores aplicada na planta industrial, é necessário a análise das distâncias dos sensores para que as antenas dos mesmos sejam calculadas para um uso ótimo da transferência de dados. Por se tratar de um estudo caso a caso, para validação dos dados deste trabalho foi utilizado antenas monopólos de 5dbi.

Figura 6 - Diagrama de blocos da estrutura elétrica da planta industrial



Fonte: O autor.

4 METODOLOGIA

O método proposto para o desenvolvimento e implementação do projeto foi dividido em quatro etapas a fim de organizar e otimizar os recursos e tempo gasto.

4.1 Desenvolvimento dos *Hardwares*

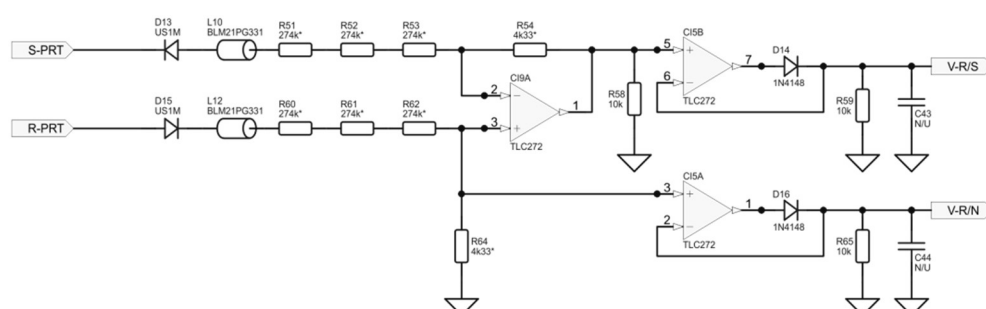
O primeiro passo foi o desenvolvimento dos sensores propriamente dito, que foram construídos levando-se em consideração os parâmetros de qualidade estabelecidos pela ANEEL para as redes de distribuição da concessionária, que são os mesmos adotados para a medição da qualidade da energia interna da indústria adotada.

Para a fabricação dos sensores foram utilizados componentes de eletrônica analógica básica, como amplificadores operacionais, resistores, capacitores e eletrônica digital com microcontroladores com conversores Analógicos Digitais (AD), foi utilizado o PIC-18F para esta tarefa, também foi utilizado *software* de desenvolvimento dos circuitos elétricos e *layout* de Placas de Circuitos Impressos (PCI), onde são inseridos os componentes eletrônicos e os módulos Rádiumino.

Foram criados dois tipos de sensores, o sensor de tensão elétrica, que recolhe os pontos da forma de onda da tensão e o sensor de corrente que recolhe os valores da forma de onda da corrente. Com estas duas medidas e vários cálculos de aproximação matemática obtém-se todos os outros valores necessários para análise da qualidade de energia, sendo eles a frequência, fator e potência, potências ativa, aparente e reativa. Os métodos de cálculo são referenciados nos subitens 4.2 e 4.3 deste trabalho.

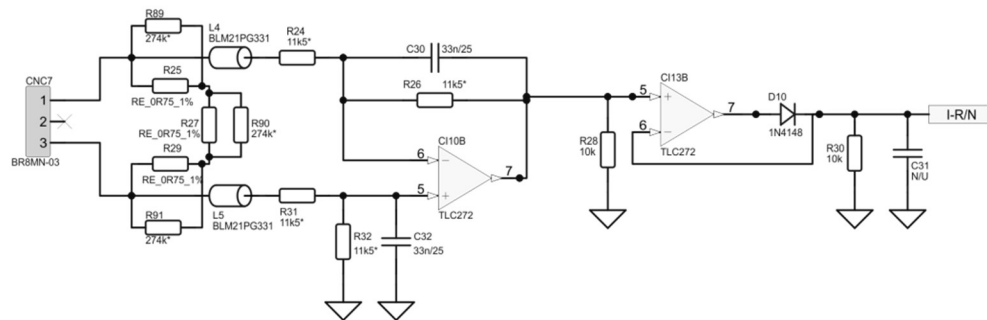
Os principais circuitos do trabalho estão evidenciados na Figura 1 onde lê-se “Detectores de tensão” e “Detectores de corrente”, as Figuras 7 e 8 mostram os detalhes da eletrônica empregada.

Figura 7 – Esquema elétrico do detector de tensão



Fonte: O autor.

Figura 8 – Esquema elétrico do detector de corrente



Fonte: O autor.

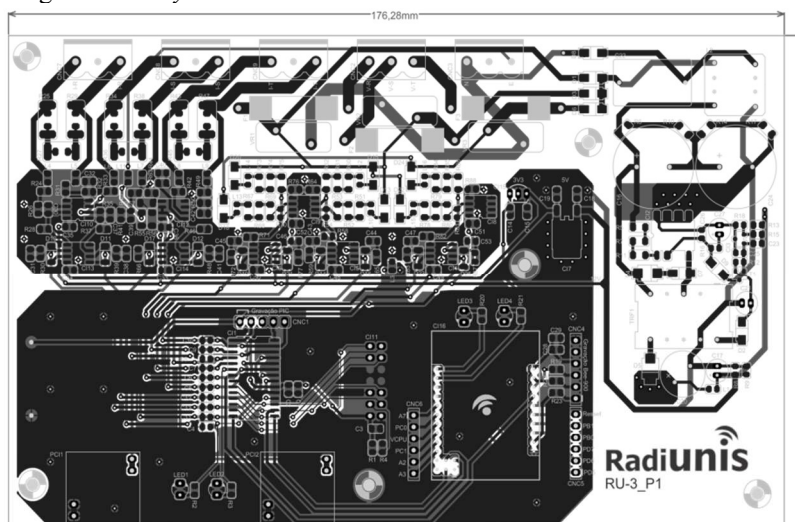
O detector de tensão é autônomo, bastando apenas a conexão das fases em seu borne de entrada para que ele comece a ler os valores da rede elétrica, porém o detector de corrente depende de um dispositivo a parte para realizar suas leituras, são os Transformador de corrente (TC). A eletrônica é compatível com vários TCs que possuem relações de transformações diferentes, a determinação da carga a ser lida remete diretamente no modelo a ser escolhido, para fim de simulação adotou-se um TC com relação de 100A:50mA, visto na Figura 9.

Figura 9 – TC de 100A : 50mA adotado para testes



Fonte: YHDC, 2011.

A Figura 10 mostra o *layout* da PCI que contempla toda a eletrônica integrante do projeto, a mesma carrega o nome do produto idealizado RU-3 (Radiunis trifásico), o esquema elétrico completo pode ser visto no Apêndice A. Os arquivos *gerbers*, arquivos enviados para confecção de uma PCI, foram criados e devidamente utilizados para confecção do lote protótipo do produto RU-3. Na Figura 10 estão contemplados tanto os sensores de corrente e tensão descritos como também o suporte para colocação do Radiuino, que faz a transmissão dos dados sem fio via RF.

Figura 10 – *Layout* da PCI RU-3 Radiuind/Radiunis

Fonte: O autor.

Ainda sobre o hardware, a construção da mecânica foi pensada em padrões de fixação para facilidade de aplicação em modelo de norma DIN (*Deutsches Institut für Normung*), comumente utilizado em quadros de distribuição como visto na Figura 12. O chassi é feito em aço inox todo lacrado por rebites e que possui uma isolamento eletromagnética boa, o que reduz as interferências nocivas ao sistema de RF no interior do produto. Foi utilizado *softwares* de modelagem 3D para auxílio dos desenhos do chassi, pode-se ver o resultado da integração mecânica e eletrônica na Figura 11.

Outro aspecto importante da mecânica aplicada é a possibilidade de acondicionar *silk screen* eletroquímico para marcações importantes no chassi como visto na Figura 11, lembrando que por se tratar de um produto elétrico que é aplicado em cabines com possível acesso de pessoas, deve-se assinalar todos as instruções rápidas de uso do produto bem como avisos importantes sobre segurança na utilização do mesmo.

No Apêndice B encontra-se todas as dimensões e especificações detalhadas do chassi do produto RU-3, inclusive a arte criada que integra o *silk screen*.

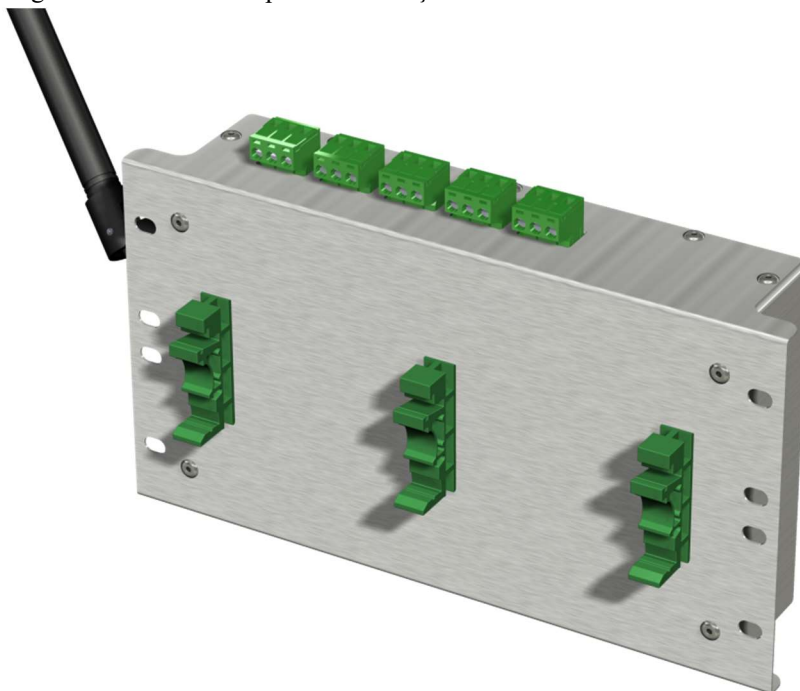
A Figura 9 nos mostra dois aspectos importantes das conexões utilizadas, nota-se que o suporte para a conexão da antena já está integrado no RU-3, a seleção da antena ideal depende diretamente do local onde os sensores serão instalados o que já foi abordado no subitem 3.1 do presente trabalho. Também observa-se a conexão de entrada das fases e dos TCs, foi utilizado bornes elétricos tipo bloco com 3 vias, capacidade de 15A e isolamento de 300V (METALTEX, 2016).

Figura 11 – RU-3 mostrado em *software* de modelagem 3D, integrando mecânica e eletrônica



Fonte: O autor.

Figura 12 – Detalhe dos pontos de fixação DIN-35



Fonte: O autor.

4.2 Desenvolvimento dos *Firmwares*

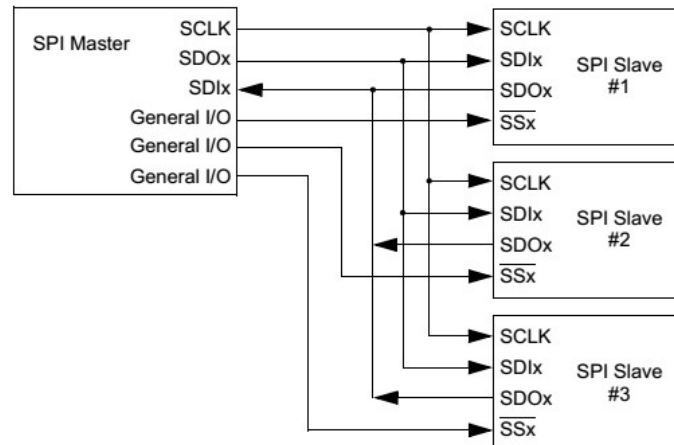
O projeto é composto por dois *softwares* distintos escritos pelo autor, que após serem gravados nos microcontroladores passam a ser chamados de *firmwares*. Os *firmwares* desenvolvidos são instalados um no Radiuino e o outro no microcontrolador PIC-18F que é parte integrante do processamento do produto RU-3, uma síntese das principais funções pode ser encontrada no Apêndice C deste trabalho.

Para comunicação do microcontrolador PIC-18F com o Rádiumo é utilizado Interface SPI (*Serial Peripheral Interface bus*). A interface SPI é um barramento síncrono utilizado na transferência de dados entre circuitos integrados diversos. Os pinos DO (*Serial Data Out*), DI (*Serial Data In*), CS (*Chip Select*) e SCK (*Serial Clock*) são utilizados na execução do barramento.

Um desafio encontrado foi utilizar este modo de comunicação pois o Rádiumo já trabalha com este barramento de comunicação para fazer a transferência dos dados via RF, por isso, neste trabalho, o PIC-18F é configurado como dispositivo escravo (*slave*) e o Rádiumo é configurado como dispositivo mestre (*master*). A entrada CS inicia e termina a transferência de dados. O sinal SCK, gerado pelo Rádiumo, sincroniza os sinais a leitura e escrita de dados. DO e DI são, respectivamente, a saída e entrada de dados entre os dois *chips*.

A Figura 13 mostra como são interligados os processadores para a comunicação, sendo que neste trabalho o SPI *Master* é o Rádiumo e o SPI *Slave* é o PIC-18F

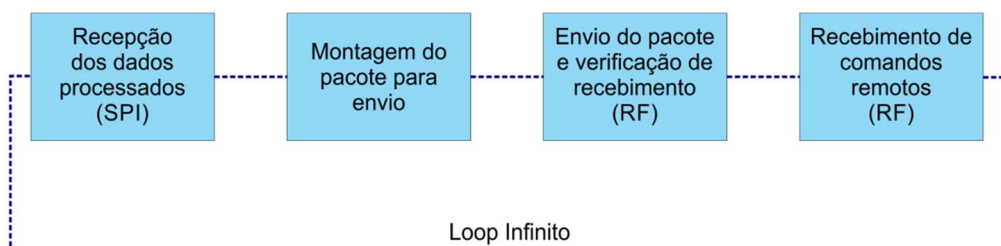
Figura 13 – Diagrama da parte física da comunicação SPI



Fonte: MICROCHIP, 2012.

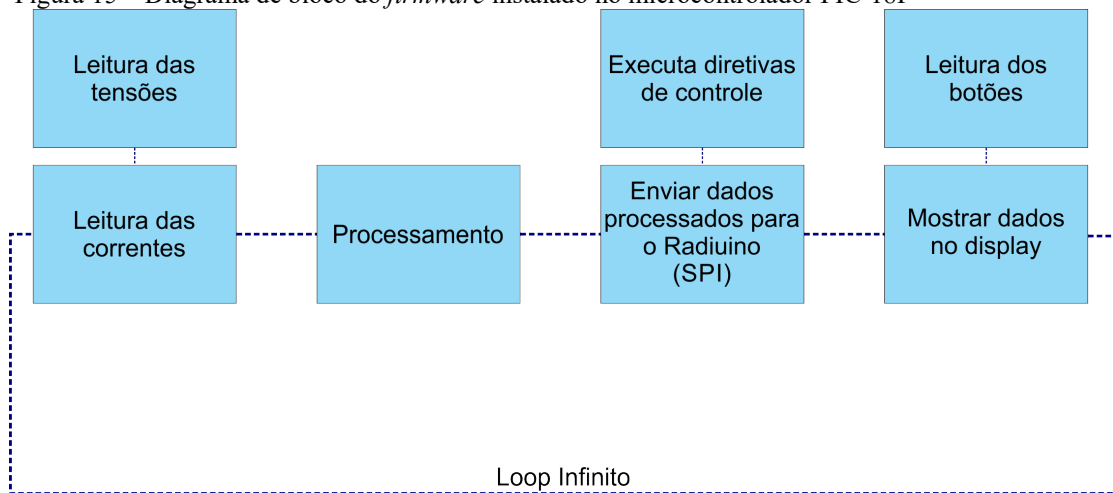
As Figura 14 e 15 mostram um diagrama de blocos com a sequência lógica do algoritmo escrito.

Figura 14 – Diagrama de bloco do *firmware* instalado na plataforma Rádiumo



Fonte: O autor.

Figura 15 – Diagrama de bloco do *firmware* instalado no microcontrolador PIC-18F



Fonte: O autor.

Os diagramas acima mostram de forma sintética como o firmware é executado dentro dos microcontroladores, a seguir veremos mais detalhado o bloco “processamento” que possui as lógicas para tratamento dos dados coletados e transcreve-los em dados utilizáveis.

4.2.1 Método para obtenção da tensão e corrente elétrica.

É feito uma amostragem do sinal da tensão e da corrente de 24 ciclos da rede elétrica sendo 2048 amostras em um período de 200 μ s o que resulta em uma frequência de amostragem de 5kHz.

Após recolhidas as médias de valores dos detectores da tensão e corrente, precisamos converter os dados digitais em valores quadráticos médios RMS (*Root Mean Square*) de tensão e corrente. O tratamento utilizado é o método da constante de conversão, onde convertemos um valor digital nos valores equivalente da grandeza medida através da multiplicação por um valor constante. Para obtermos o valor RMS precisamos fazer a soma quadrada dos valores, por isso já é feito a este cálculo com os valores da amostra, respeitando a Equação 1 que temos a definição do valor RMS de uma grandeza.

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} [x(t)]^2 dt} \quad (1)$$

Onde $x(t)$ representa o valor instantâneo da grandeza (tensão ou corrente) e T o período do sinal. Porém em um microcontrolador deve-se simplificar ao máximo os cálculos

matemáticos para otimizar sua performance, por isso é utilizado a Equação 2 no algoritmo que retorna o valor de corrente e tensão RMS.

$$X_{RMS} = Ctn * \sqrt{AQ_{2048}} \quad (2)$$

Onde AQ_{2048} representa a média da soma quadrática das amostras, X_{RMS} é a resultante de corrente ou tensão e Ctn é a constante de conversão adotada que para tensão vale 1,0761 e para corrente vale 0,1795, estes valores foram encontrados levando em consideração o circuito de detecção de corrente e tensão.

4.2.2 Método para obtenção da frequência

Para o cálculo da frequência foi utilizado o *zero crossing* do sinal de corrente coletado. O *zero crossing* representa o valor 0 de um sinal senoidal, sendo assim, basta detectarmos este ponto do sinal e contarmos o tempo até o próximo *zero crossing* obtendo assim o período do sinal e conseqüentemente achando a frequência da rede elétrica. Para tal o algoritmo está representado na Equação 3.

$$F = T_{Amostragem} * P_{z-z} \quad (3)$$

Onde $T_{Amostragem}$ representa o tempo de amostragem do sinal que é de 200 μ s como já foi dito e P_{z-z} é a contagem de ciclos de 200 μ s de um *zero crossing* ao outro.

4.2.1 Método para obtenção do fator de potência

O fator de potência é obtido pelo atraso ou adianto do sinal de corrente em relação ao sinal de tensão, para tal utilizamos novamente o *zero crossing* para esta tarefa, fazendo a contagem de tempo do *zero crossing* da tensão em relação a corrente. Este método se mostrou eficaz para obtenção da grandeza tendo seus resultados mostrados no subitem 4.2 das validações do sistema. Temos então a Equação 4.

$$T_{ms} = T_{Amostragem} * P_{zV-zI} \quad (4)$$

Onde $T_{Amostragem}$ representa o tempo de amostragem do sinal que é de $200\mu s$ e P_{zV-zI} é a contagem de ciclos de $200\mu s$ do *zero crossing* da tensão em relação ao *zero crossing* da Corrente. Porém este valor nos mostra em milissegundos o atraso ou adianto dos sinais, mas para obtermos realmente o fator de potência precisamos retirar o cosseno do ângulo que este tempo representa, sendo assim o algoritmo necessita também da Equação 5.

$$FP = \cos \frac{T_{ms} * 360}{\frac{1}{F}} \quad (5)$$

Onde T_{ms} representa o tempo em milissegundos obtido na Equação 4 e F a frequência obtida na Equação 3.

4.2.3 Método para obtenção das potências

Com os dados obtidos de corrente RMS, tensão RMS e fator de potência, podemos calcular as potências. Estas grandezas são apenas cálculos feitos no microcontrolador, não sendo detectadas diretamente pelo sistema, mas sim indiretamente, sendo a potência aparente, ativa e reativa seguindo as Equações 6, 7 e 8 respectivamente.

$$S = V_{RMS} * I_{RMS} \quad (6)$$

Onde V_{RMS} e I_{RMS} são os valores eficazes de tensão e corrente.

$$P = S * FP \quad (7)$$

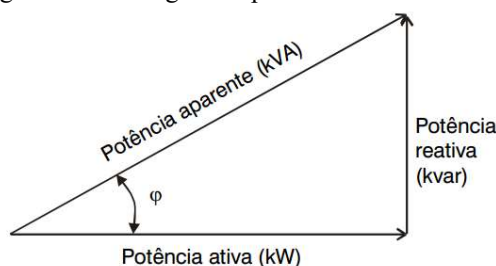
Onde S é a potência aparente obtida na Equação 6 e FP é o fator de potência obtido na Equação 5.

$$Q = S * \sen \frac{T_{ms} * 360}{\frac{1}{F}} \quad (8)$$

Onde S é a potência aparente obtida na Equação 6 e T_{ms} representa o tempo em milissegundos obtido na Equação 4 e F a frequência obtida na equação 3.

A relação entre as potências descritas pode ser representada pelo triângulo de potências descrito na Figura 16.

Figura 16 – Triângulo de potências



Fonte: GONÇALVES, 2013.

4.2.4 Método para obtenção da distorção harmônica

O sistema foi projetado para medir a distorção harmônica total (THD) a qual é obtida pela Transformada rápida de Fourier (FFT). Segundo Fourier qualquer função periódica pode ser representada como a soma de várias funções seno cosseno e um sinal T pode ser representado por uma componente senoidal fundamental e uma série de componentes senoidais de ordem superior no qual são chamados de harmônicos (DUGAN, 2002).

Outro fator a definir para obter a medida é o número de amostras que o sistema coleta em um determinado período, o calculado é feito através da Teoria da Amostragem (Teorema de Nyquist). A teoria afirma, que para ser realizada uma discretização do sinal é preciso ter pelo menos uma frequência de amostragem duas vezes maior que a frequência do sinal a ser medido. (NYQUIST, 1928). A partir desta base temos que para medir até a 25ª harmônica, que é a ordem exigida pela ANEEL, temos que ter uma frequência de amostragem de no mínimo $2 \times (25 \times 60\text{Hz}) = 3\text{kHz}$, o sistema opera como já mencionado, com frequência de amostragem de 5kHz, mais que o suficiente para coletarmos dados até a 25ª harmônica.

Na Equação 9 temos a forma simplificada da FFT utilizada para medir a THD, foram feitas modificações para otimizar o código para um microcontrolador.

$$V_{Fdm} = \sqrt{CA_{2048}^2 + SA_{2048}^2} \quad (9)$$

Onde CA_{2048} e SA_{2048} representa a média da soma do produto das amostras com o cosseno e seno da frequência fundamental vezes a ordem harmônica e V_{Fdm} é a tensão da frequência fundamental

Após obtidos estes valores podemos dar sequência e realmente encontrar a THD através da Equação 10 simplificada para o algoritmo.

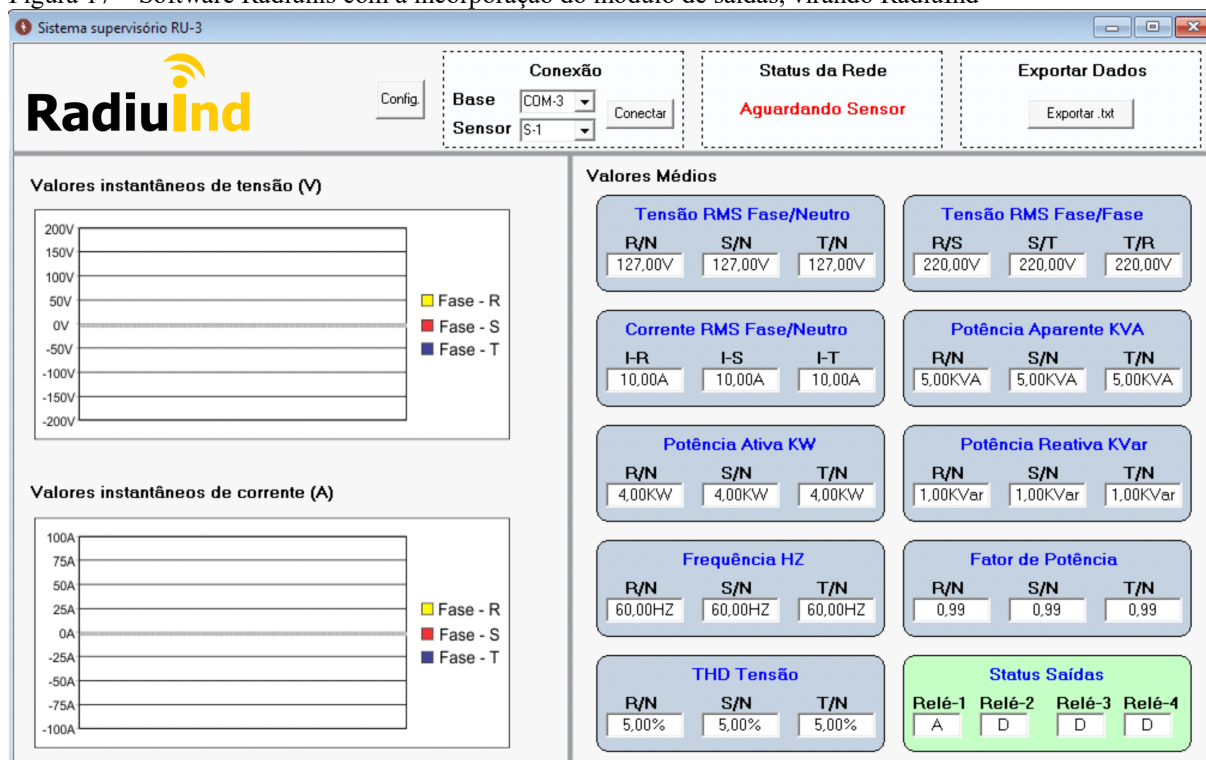
$$THD_{\%} = 100 * \sqrt{\left(\frac{V_{RMS}}{V_{Fdm}}\right)^2 - 1} \quad (10)$$

4.3 Desenvolvimento do *Software*

A plataforma utilizada por Lemos (2015) foi adaptada e incorporado a opção de atuar em 4 saídas que podem ser controladas a distância e serem definidas para seguir algum método de controle levando como fator de decisão todos os dados coletados. Foi desenvolvido então um *software* na plataforma *Visual basic* para a compilação de toda a leitura dos sensores espalhados pela rede elétrica, mostrando os dados de uma forma fácil e o qual é utilizado para parametrização das lógicas de controle. A Figura 16 mostra o *layout* básico do *software*, lembrando que os valores exibidos nela são apenas para demonstração.

As diretivas de controle são configuradas em outra janela, onde o usuário define suas entradas de dados e associa a alguma das 4 saídas.

Figura 17 – Software Radiunis com a incorporação do módulo de saídas, virando RadiuInd



Fonte: O autor.

A exibição final dos dados de todo o sistema é feita pelo sistema supervisor do RU-3 que também contempla a visualização através de gráficos que realizam comparações com os valores medidos a semanas, meses e até anos. Estes gráficos trazem a situação da rede atual e também valores absolutos parametrizados no presente artigo.

4.4 Testes e validação

Após a criação dos sistemas, foi feita a verificação se os *softwares* funcionaram corretamente, através de análises, teste e cálculos de validação dos *hardwares* e *firmwares* desenvolvidos. Após comprovada a veracidade dos dados compilados, foi feita a instalação de um sensor em um sistema trifásico e aplicou-se novos testes e aferições dos dados coletados para enfim serem compilados no *software* de base e no de visualização dos dados analisados.

A base adotada para validação dos dados gerados foi o produto *Fluke-435 power quality analyzer*. Se trata de um analisador de rede com vários parâmetros analisados que é comumente utilizado para análise da qualidade de energia elétrica gerando relatórios precisos que são utilizados pelo requerente da análise para melhorias no sistema elétrico da planta industrial.

A comparação dos dados coletados pelo RU-3 com os dados coletados pelo *Fluke-435* mostrou que o RU-3 foi preciso em suas medidas confirmando assim o funcionamento e precisão do produto objeto deste projeto. A seguir temos uma Figura17 do teste de campo feito, o produto RU-3 ainda estava fora de seu chassi metálico.

Figura 18 – Teste de validação feito em um sistema trifásico



Fonte: O autor.

Figura 19 – Aproximação da Figura 17 para melhor visualização



Fonte: O autor.

Para melhor análise dos dados da validação, foram tabelados todos os valores obtidos com o *Fluke-435* com o RU-3, estes dados estão contemplados nas Tabelas de 1 a 9. Vale ressaltar que os valores exibidos no display do RU-3 têm por objetivo uma rápida consulta local, para isso são truncados para serem mostrados melhor, porém os dados que são enviados via RF para o sistema supervisor são completos com todas as casas decimais que o sistema consegue ler.

Tabela 1 – Tensões Fase/Neutro

Tensão Fase R/N (V)		Tensão Fase S/N (V)		Tensão Fase T/N (V)	
RU-3	FLUKE-435	RU-3	FLUKE-435	RU-3	FLUKE-435
125,90	126,45	126,20	126,74	125,40	125,20

Fonte: o autor.

Tabela 2 – Tensões Fase/Fase

Tensão Fase R/S (V)		Tensão Fase S/T (V)		Tensão Fase T/R (V)	
RU-3	FLUKE-435	RU-3	FLUKE-435	RU-3	FLUKE-435
217,90	218,72	219,40	219,70	218,90	217,94

Fonte: o autor.

Tabela 3 – Corrente Fase/Neutro

Corrente Fase R/N (A)		Corrente Fase S/N (A)		Corrente Fase T/N (A)	
RU-3	FLUKE-435	RU-3	FLUKE-435	RU-3	FLUKE-435
23,20	23,00	21,90	22,00	42,20	43,00

Fonte: o autor.

Tabela 4 – Fator de Potência

FP R		FP S		FP T	
RU-3	FLUKE-435	RU-3	FLUKE-435	RU-3	FLUKE-435
1,00	-0,99	0,95	0,91	1,00	1,00

Fonte: o autor.

Tabela 5 – Potência Aparente de Fase

Potência R (kVA)		Potência S (kVA)		Potência T (kVA)	
RU-3	FLUKE-435	RU-3	FLUKE-435	RU-3	FLUKE-435
2,80	2,91	2,70	2,78	5,10	5,38

Fonte: o autor.

Tabela 6 – Potência Ativa de Fase

Potência R (kW)		Potência S (kW)		Potência T (kW)	
RU-3	FLUKE-435	RU-3	FLUKE-435	RU-3	FLUKE-435
2,80	2,88	2,56	2,52	5,10	5,38

Fonte: o autor.

Tabela 7 – Potência Reativa de Fase

Potência R (kVAr)		Potência S (kVAr)		Potência T (kVAr)	
RU-3	FLUKE-435	RU-3	FLUKE-435	RU-3	FLUKE-435
0,00	0,20	0,60	0,50	0,00	0,20

Fonte: o autor.

Tabela 8 – Frequência

Frequência R (Hz)		Frequência S (Hz)		Frequência T (Hz)	
RU-3	FLUKE-435	RU-3	FLUKE-435	RU-3	FLUKE-435
60,00	60,02	60,05	60,02	59,95	60,02

Fonte: o autor.

Tabela 8 – Distorção harmônica total THD

THD R (%)		THD S (%)		THD T (%)	
RU-3	FLUKE-435	RU-3	FLUKE-435	RU-3	FLUKE-435
1,70	1,60	1,20	1,65	1,00	1,02

Fonte: o autor.

Com estes valores tabelados foi feito uma análise final do sistema que é discutida no Capítulo 4.

5 RESULTADOS

5.1 O Lote protótipo

Este trabalho gerou o lote protótipo do produto RU-3 que é objeto para toda a fundamentação da rede de sensores de grandezas elétricas, vale lembrar que as funções da rede de sensores são: coleta em regime permanente de dados da energia elétrica da planta industrial, processamento dos dados coletados, atuação no sistema seguindo lógicas de controle e disponibilização dos dados on-line em tempo real.

Os produtos gerados pelo presente projeto estão alicerçados na plena aplicabilidade *in loco*, ou seja, todos os processos, métodos e tecnologia que embasam os produtos são aplicáveis em um ambiente industrial real, mesmo este contendo várias variáveis que afetam tanto a medição quanto a transmissão dos dados como ruídos diversos, distâncias longas e locais de difícil acesso.

Abaixo tem-se todos os parâmetros medidos pelo RU-3 que atendem as normas da PRODIST (ANEEL 2015):

- a) Tensões de Fase
- b) Tensões de Linha
- c) Correntes de Linha
- d) Frequências das Fases
- e) Fator de Potência
- f) Natureza do fator de potência (capacitivo/Indutivo)
- g) Potência Ativa
- h) Potência Aparente
- i) Potência reativa
- j) Distorção harmônica total

Todos os dados são transmitidos via plataforma Radium para a base que faz o tratamento dos dados para gerar os relatórios exigidos pelo cliente e também gerar respostas para o sistema de controle.

O lote protótipo engloba 2 x Sensores (nome de trabalho – RU-3) e 1 x Base (nome de trabalho – RU-B), os quais foram submetidos a testes em ambiente real para validação do *hardware* e *software* desenvolvidos, ressaltando que todo o sistema opera sem auxílio do presente desenvolvedor, ou seja, o sistema é autônomo na coleta e distribuição de dados, sendo necessárias apenas manutenções preventivas. Lembrando que os sensores são

dispositivos discretos que não interferem em nada na distribuição de energia da planta industrial.

5.2 Precisão do sistema

As seguir temos na Tabela 10 o comparativo dos valores coletados pelo RU-3 e pelo *Fluke-435* evidenciando os erros encontrados na rede de sensores, os valores absolutos estão presentes na etapa de validação no capítulo 4 deste trabalho. Foi feito uma média dos erros relativos de cada parâmetro, trazendo assim os dados de uma forma mais clara.

Tabela 10 – Relação de erro encontrado com *Fluke-435*

Parâmetro Medido	Erro de medição (%)
Tensão F/N	0,67
Tensão F/F	0,44
Corrente F	1,86
Fator de Potência F	4,39
Potência Ativa F	5,20
Potência Aparente F	5,20
Potência Reativa F	20,01
Frequência F	6,00
THD F	18,50

Fonte: o autor

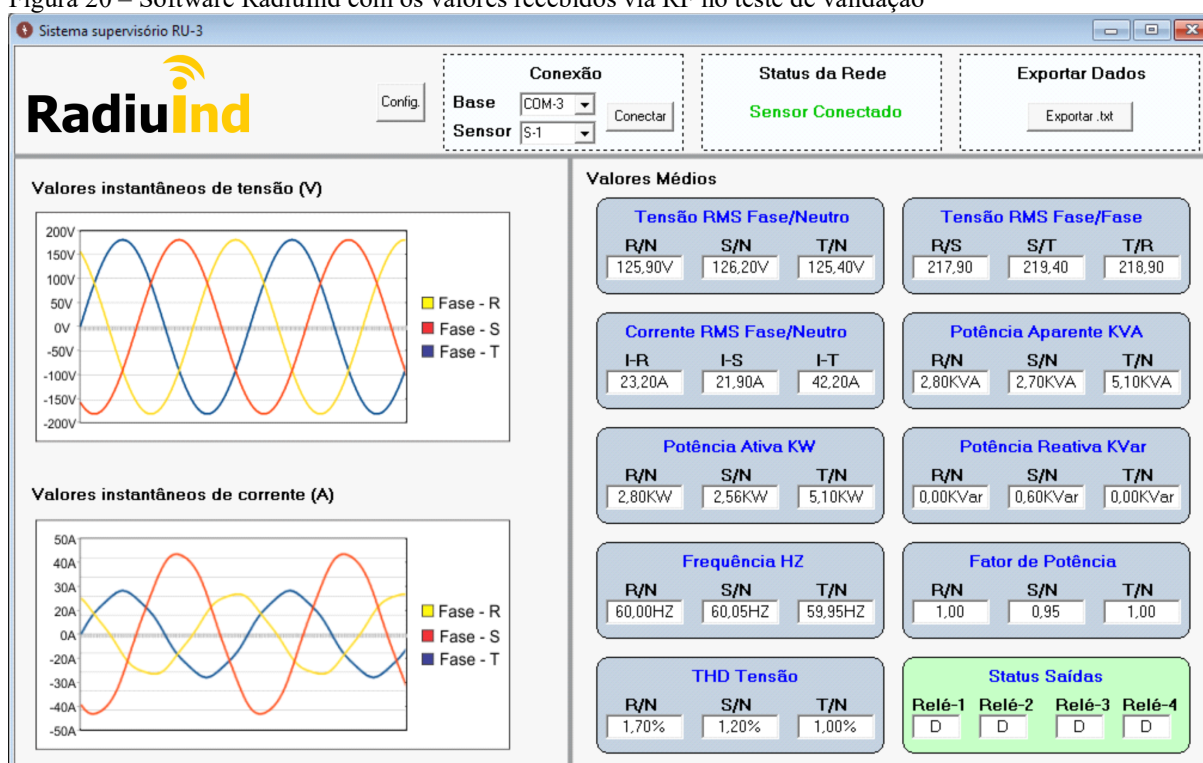
Podemos inferir sobre estes dados que os erros maiores estão relacionados mais diretamente com os valores que são obtidos indiretamente através de cálculos e que os erros menores estão nas grandezas que são realmente medidas, que são as tensões e correntes. Este fato está associado ao limite do *hardware* de processamento, pois o microcontrolador utilizado não possui as características de arquitetura necessária para realizar cálculos matemáticos com maior rapidez, contudo outro fator que influenciou nas medidas foram os baixos valores encontrados, isso acarreta em um erro relativo maior, como exemplo pegamos a potência reativa que estava muito baixa no momento das medições. De forma objetiva podemos constatar que os erro absolutos encontrados ficaram baixos e não tiram a confiabilidade do sistema, haja vista que para uma tomada de decisão sobre atuação no sistema os dados mais utilizados são corrente, tensão e fator de potência.

5.3 Visualização dos dados

Como descrito no decorrer do trabalho, os valores coletados são enviados via RF para o sistema supervisorio que por sua vez disponibiliza os dados em tempo real via internet para qualquer plataforma *web* via página PHP com servidor *Apache*. A seguir temos a tela do sistema supervisorio com os dados coletados no momento da medição, Figura 19, nota-se que agora a tela do software exibida anteriormente contém preenchido os Valores médios, dois gráficos com os valores instantâneos da corrente e tensão e a conexão com o sensor foi feita e relatada no campo Status da Rede.

Na Figura 19 podemos destacar também o quadro Status Saídas que mostra “D” para desativadas e “A” para ativadas, os nomes Relé-1, Relé-2, Relé-3 e Relé-4 podem ser mudados na janela de configuração do sistema onde o usuário poderia chamá-los de sua função, como exemplo “BC-1” (Banco de capacitor-1), “G-C1” (Grupo de cargas-1) ou qualquer outro nome que ele queira.

Figura 20 – Software RadiuInd com os valores recebidos via RF no teste de validação



Fonte: O autor.

A interface Web é exatamente um espelho desta janela, onde o usuário pode visualizar os valores remotamente de qualquer lugar que possua internet. Para tal foi utilizado o software *EasyPHP* para criar um servidor local e disponibilizar uma página da *web* contendo a tela da

Figura 20 via internet. Nesta mesma página da *web* é possível tanto aferir os valores medidos quanto interferir no sistema através das 4 saídas de controle.

5.4 Custos envolvidos

Para finalizarmos a análise, entraremos agora no quesito custos, onde está destacado na Tabela 11 os custos diretos envolvidos na fabricação do Lote protótipo:

Tabela 11 – Relação de custos envolvidos para 1 unidade de RU-3

Item	Custo (R\$)
Confecção PCI	80,00
Chassi em Aço inox	150,00
Componentes eletrônicos	102,00
Componentes de Fixação	10,00
Sistema RF Radiuino	112,50
Transformadores de Corrente	96,00
Antenas 5dbi	18,00
Total	568,50

Fonte: o autor

Com uma simples visualização dos custos podemos atestar que mesmo que se considerasse uma margem de lucro maior, o sistema RU-3 possui um custo muito menor que os outros sistemas existentes, os quais ficam com preço de compra na ordem de R\$ 5.000,00 a R\$ 10.000,00, como sistemas das marcas *Schneider*, *Fluke* e *Siemens*.

Vale ressaltar que os sistemas existentes não possuem toda a versatilidade de comunicação sem fio e visualização via *web*, ou quando possui, são módulos vendidos e cobrados a parte para implementação.

Outro fator importante são os custos de implementação, pois como o sistema funciona com comunicação sem fio, a instalação do mesmo é feita local e de forma mais “limpa” onde basta inseri-lo no painel onde deseja-se o monitoramento, o que difere dos sistemas existentes que necessitam de uma rede física de cabeamento, muitas vezes complexa, para garantir a comunicação.

6 CONCLUSÃO

A busca pela tecnologia de *software* aberto tem sido uma tendência devido ao baixo custo e à disseminação do conhecimento gerada em várias áreas, com isso têm-se a possibilidade de criação de sensores simples, o que viabiliza diversos projetos que necessitam dessa tecnologia sem que haja alto investimento financeiro, dando assim a chance do usuário criar sua rede de sensores sem fio de forma eficiente e confiável.

Do ponto de vista construtivo o sistema é composto por componentes básicos de eletrônica e elétrica, o que facilita a confecção dos sensores em módulos compactos. Isso torna o projeto factível e executável, podendo ser quase imperceptível ao *layout* do local onde é instalado.

Quanto aos valores obtidos o sistema criado se mostrou satisfatório trazendo erros relativos baixos quando comparados com um equipamento de instrumentação de referência como o *Fluke-435*. O RU-3 se mostrou melhor nas medidas coletadas que nas medidas calculadas indiretamente, o que levará a um estudo para a incorporação de um microcontrolador com arquitetura mais específica para cálculos matemáticos melhorando assim ainda mais sua precisão, contudo para o fim proposto os valores adquiridos estão dentro de um patamar aceitável, pois os valores com os menores erros são os que de fato são utilizados para as decisões de controle.

Associado a acurácia e precisão obtidas temos a versatilidade de visualização e controle remoto do sistema elétrico onde a rede for instalada, o que torna o RU-3 uma ferramenta poderosa no auxílio do controle da qualidade de energia de uma planta industrial.

Com as medidas feitas e todo o estudo realizado podemos inferir que o sistema é confiável, pois ele incorpora toda a parte construtiva, desde a captação dos dados até a visualização final, ou seja, possui-se o controle total do sistema. Com isso, toda a parte de calibração e validação dos dados ficam sob responsabilidade do desenvolvedor, que segue às normativas da ANEEL (2015). A energia deve ser tratada como um produto, o qual deve atender a normas e padrões específicos. Até o advento das cargas não lineares, em 1995, a não interrupção no fornecimento era uma, ou senão a única preocupação das concessionárias, porém hoje entregar um sinal livre de harmônicas, é um parâmetro importante e que está em discussão atualmente no Brasil.

Quanto aos custos envolvidos, tanto de confecção quanto implementação, o sistema RU-3 se destaca no cenário atual, onde existem sistemas parcialmente compatíveis com as funcionalidades, mas que possuem alto valor de aquisição e implementação. O que ajuda o

RU-3 a elencar-se neste quisto é a base toda feita com *hardwares* e *softwares* abertos, que simplificam muito processo de desenvolvimento e reduz diretamente os custos.

Levando-se em consideração o baixo custo de implementação comparados aos sistemas existentes, a confiabilidade e a facilidade de confecção de todo o sistema, pode-se concluir então que esta rede de monitoramento agrega muito valor a planta industrial, pois além das vantagens apresentadas, deve-se ressaltar que existem diversos problemas que serão sanados com a implementação de um método de controle remoto de alta confiabilidade. A visualização on-line em tempo real é também interessante para dados estatísticos que acabam virando uma interessante ferramenta para controle de gasto e de qualidade de energia, dentre outros importantes assuntos na conjuntura atual.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14039**. Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **NBR 5410**. Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ANDRADE, R.T. **BPL (Broadband over Powerlines)**: características e aplicações. 2010. Disponível em: <<http://www.teleco.com.br>>. Acesso em: 20 ago. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 724/2016**. Procedimentos de Distribuição de Energia no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), Módulo 5 - Sistemas de Medição. Brasília: ANEEL, 2016.

_____. **Resolução Normativa nº 664/2015**. Procedimentos de Distribuição de Energia no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica. Brasília: ANEEL, 2015.

BELISÁRIO, C. D. A.; BAHIENSE, D. A.; OLIVEIRA, G. M. Continuidade nos serviços de distribuição de energia elétrica. **Conjuntura & Planejamento**, n. 105, p. 36-40, 2003.

BRANQUINHO, O.C. **Plataforma Rádiumo**. Campinas: UNICAMP 2015. Disponível em: <<http://www.radiumo.cc>> Acesso em: 10 maio. 2016.

_____. **A internet das coisas**. Campinas: UNICAMP 2016. Disponível em: <<http://www.radiumo.cc>> Acesso em: 20 ago. 2016.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia Brasil. Smart Grid. **Grupo de Trabalho de Redes Elétricas Inteligentes**, 2011.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. Fornecimento de Energia Elétrica em Média Tensão. Rede de distribuição aérea ou subterrânea. **Norma de Distribuição**. Belo Horizonte: CEMIG, 2013a.

_____. Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária. Rede de distribuição aérea – Edificações individuais. **Norma de Distribuição**. Belo Horizonte: CEMIG, 2013b.

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS. **Projeto Elétrico**: Unifilar Geral e Situação. Folha nº 15/22. 2012.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Redes Elétricas Inteligentes**: contexto nacional. Série Documentos Técnicos. Brasília: CGEE n. 16, 2012.

CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA ENERGÉTICA. Conselho Nacional De Política Energética. **Resolução nº 5 jul. 2003**. Brasília: CNPE, 2003.

DANTAS, C. A. B. **Probabilidade**: Um Curso Introdutório. 2. ed, São Paulo: Edusp, 2000.

DIAS, G. A. D. **Harmônicas em sistemas industriais**. 2 ed, Porto Alegre: Edipucrs, 2002.

DUGAN, R. E. **Electrical Power Systems Quality**. 3. ed, New York: McGraw-Hill, 2012.

FERRONI, E. H. et al. A plataforma Arduino e suas aplicações. **Revista UIIPS**, [S.l.], v. 3 n. 2, p. 133-148, 2015.

FERRONI, E. H. **Protótipo de um controle de demanda de energia baseado em sistemas supervisórios e rede de sensores sem fio**. 2013. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – universidade Federal de São João Del Rey, São João Del Rey, 2013.

GELLINGS, C. W. **The Smart Grid: enabling energy efficiency and demand response**. [S.l.]: CRC Press, 2009.

GONÇALVES, B. P. et al. Avaliação de impactos harmônicos na rede elétrica através dos indicadores THD e fator de potência utilizando lógica fuzzy. **Revista Brasileira de Energia**, v. 19, n. 1, p. 9-27, 2013.

IEEE Standard 446. **Recommended practice for emergency and standby power systems for industrial and commercial applications**. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1995.

ITI. **Curve Application Note**: Technical Committee 3 (TC3) of the Information Technology Industry Council. [S.l.]: 2000. Disponível em: <<http://www.itic.org>>. Acesso em: 30 jul.2016.

KUROSE, J.; ROSS, K. **Computer networks: A top down approach featuring the internet**. 2 ed. New Jersey: Addison Wesley, 2002.

LEMOS, R. M. et al. **Projeto de uma rede de monitoramento da qualidade de energia de um centro universitário RADIUNIS**. I Congresso Internacional: O mundo em suas mãos, UNIS-MG Centro Universitário do Sul de Minas, 2015.

LUQUETA, G. R.; BRANQUINHO, O. C; BIANCHINI, D. **Caracterização da propagação de redes de sensores sem fio em ambientes industriais utilizando a RSSI como parâmetro de avaliação**. Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica 10, João Pessoa, 2012

METALTEX. **Catálogo Datasheet BR8MN1-03**. 2016. Disponível em: <<http://www.metaltex.com.br/downloads/BR.pdf>> Acesso em: 03 ago. 2016.

MICROBERTS, M. **Beginning Arduino**. Nova Iorque: [s.n.], 2010.

MICROCHIP. **Catálogo do Data Sheet PIC18(L)F2X/4XK22**. 2012. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41412F.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2016.

NYQUIST, H. **Determinados tópicos na teoria da transmissão de telégrafo, transporte**. AIEE, vol. 47, p. 617-644, 1928.

PANIAGO, E. L. **Dispositivo para monitoramento, registro e análise dos indicadores de continuidade no fornecimento da energia elétrica**. Brasília: Universidade de Brasília, 2006.

SILVER SPRING NETWORKS. Porque o espectro não licenciado domina a rede elétrica inteligente. **Periodic informative online Silver Spring Networks**. [S.l.]: Silver Spring Networks, 2011. Disponível em: <<http://www.silverspringnet.com/pt/>>. Acesso em: 14 ago. 2016.

RODRIGUES, L. et al. **Introdução ao Arduino**. Fundação Universidade Federal do Mato Grosso do Sul - UFMS. Campo Grande, 2012.

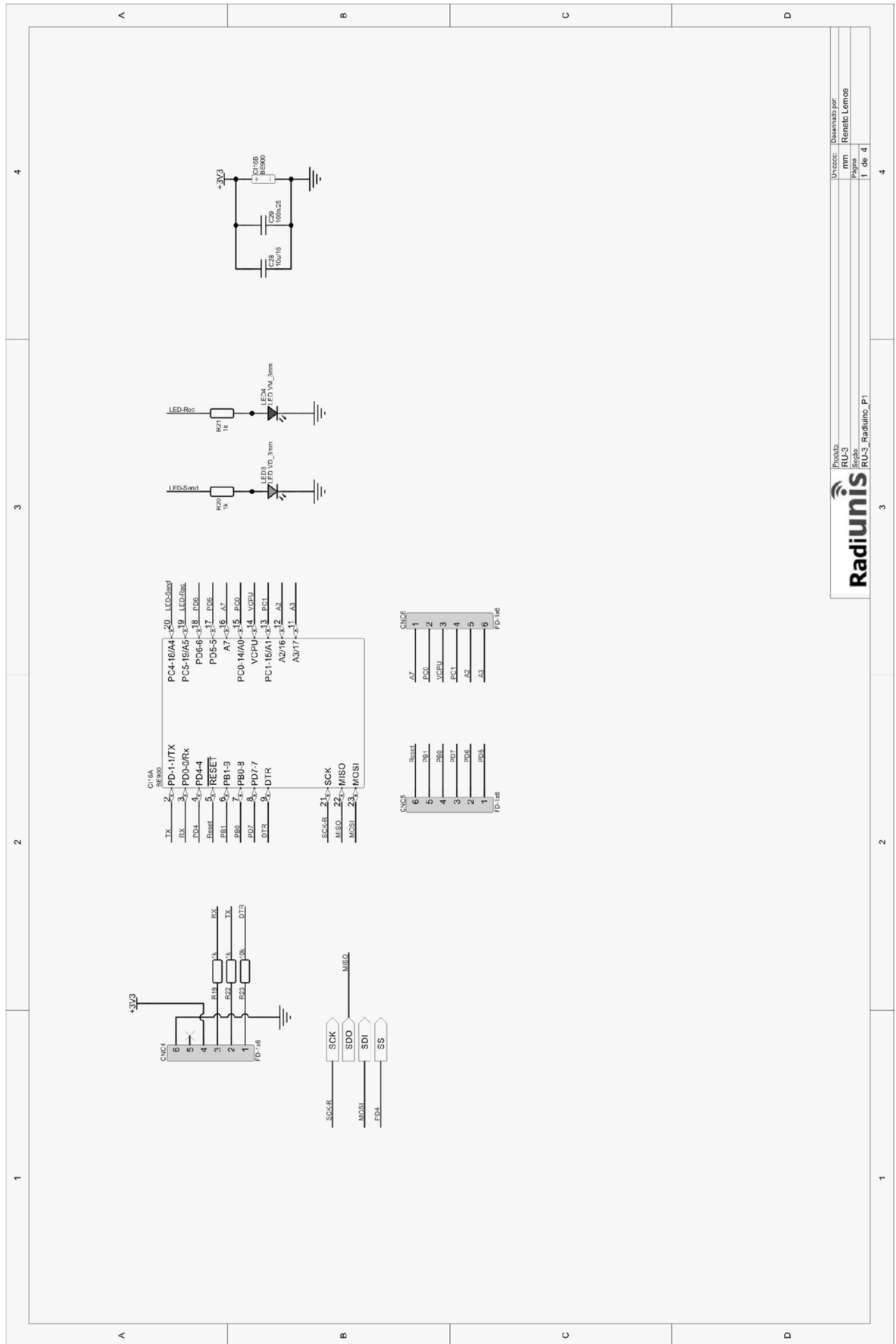
SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5 ed. São Paulo: Bookman, 2013.

SCHNEIDER ELETRIC. **Qualidade de Energia Harmônicas**. 2003. Disponível em: <<http://www.schneiderelectric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/harmon.pdf>>. Acesso em: 30 jun. 2016.

XINGHUO, Y. U. et al. The New frontier of smart grids. **Industrial Electronics Magazine**, [S.l.], v.5, n.3, p.49-63, 2011.

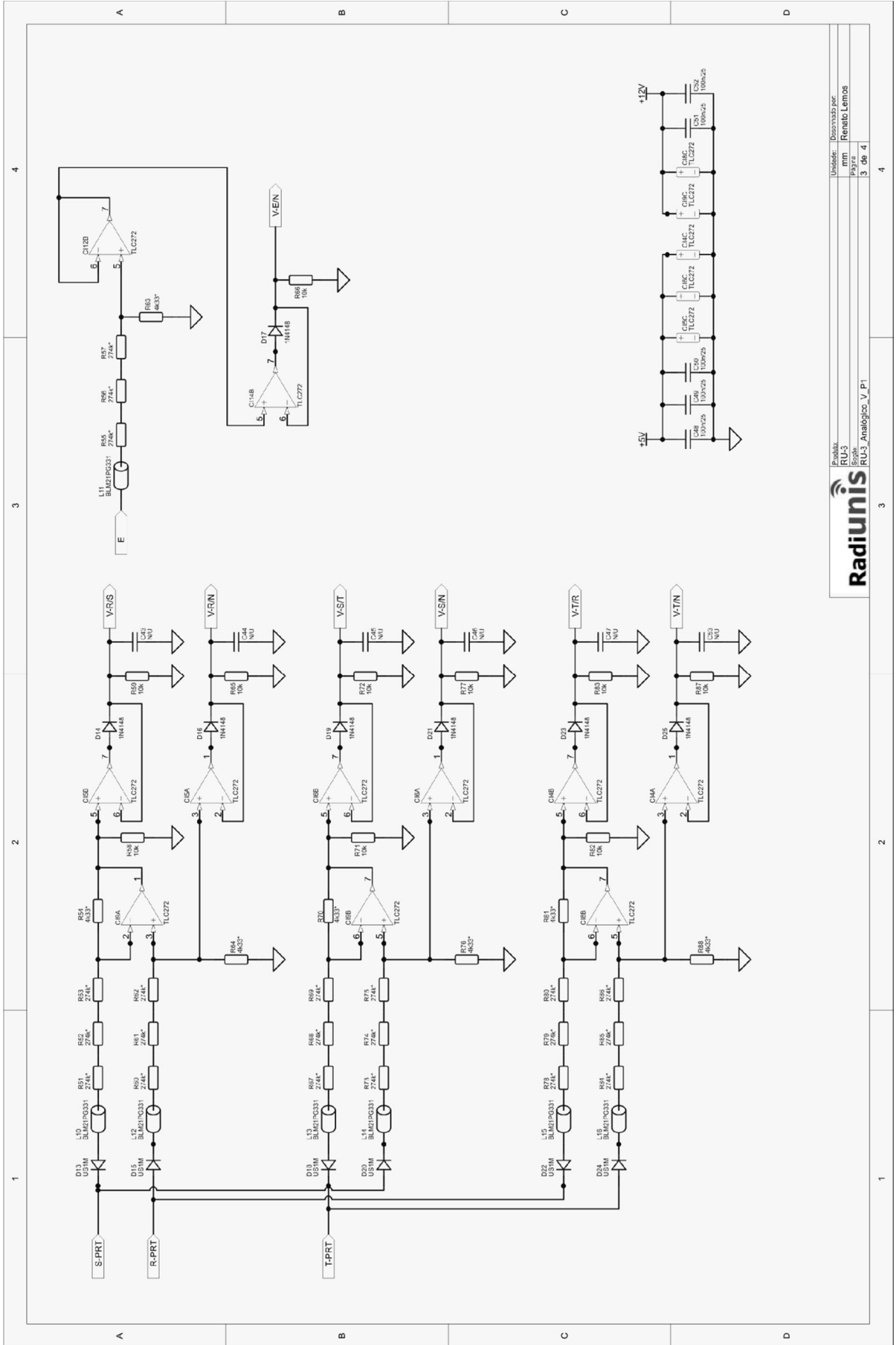
YHDC Eletronic. **Catálogo Datasheet SCT-013-000**. Beijing YaoHuadechang Electronic . Disponível em: <http://garden.seeedstudio.com/images/1/10/SCT013-000_datasheet.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2016.

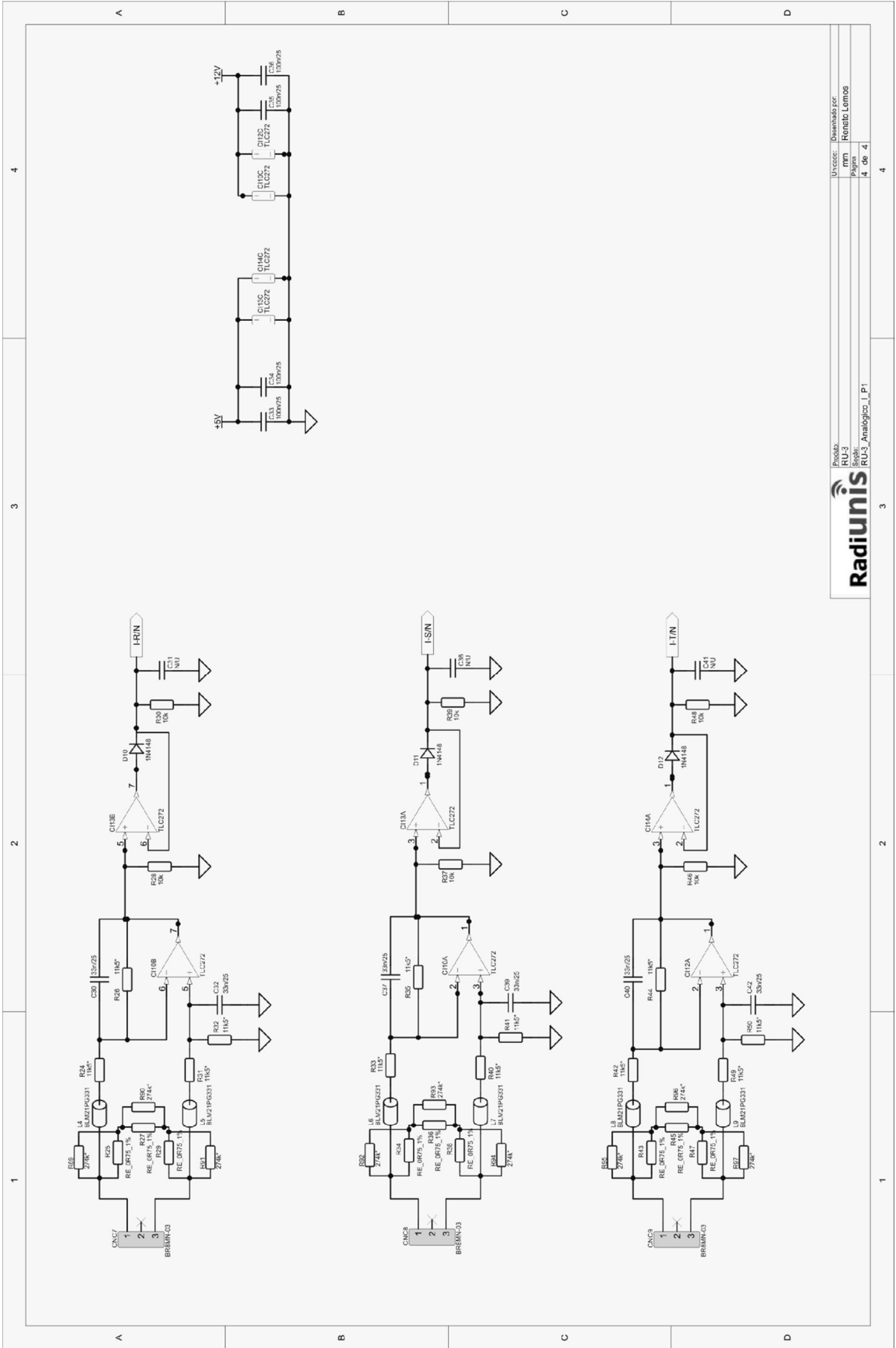
APÊNDICE A – Esquema elétrico



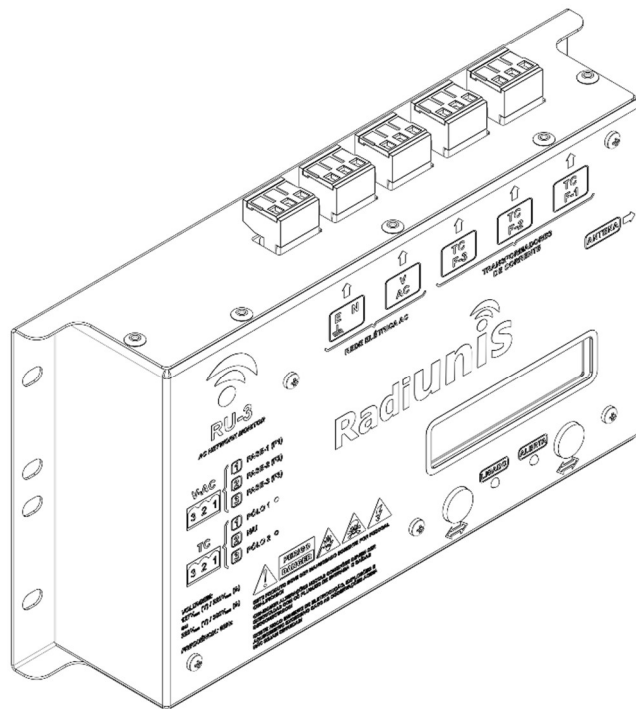
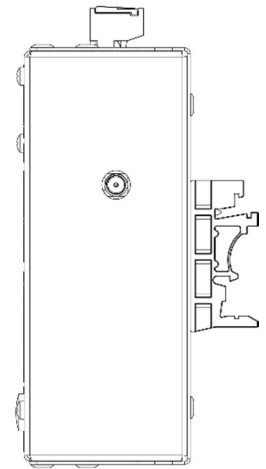
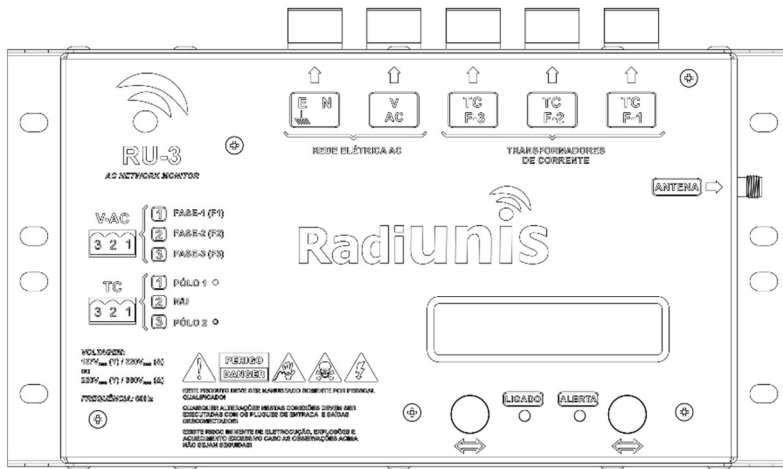
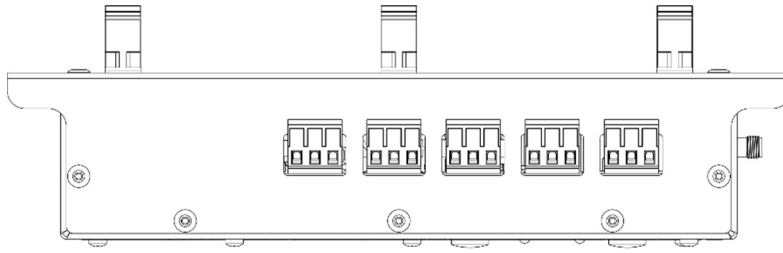
RADIUNIS
 Produto: RU-3
 Referência: RU-3_Radiunis_P1

Unidade:	Quantidade por:
mm	Remate Lemos
1 de 4	





APÊNDICE B – Desenho técnico



APÊNDICE C – Trechos do algoritmo

Trecho do código, do Firmware do PIC18F, responsável pela comunicação entre o Rdiuino e o processamento do RU-3

```

/* Arquivo: SPI.c
 *
 * Autor: Renato Martins Lemos
 */

//Bibliotecas
#include <P18F25k22.h>           // Biblioteca do Microcontrolador
#include <delays.h>             // Biblioteca de Delay
#include <math.h>

TRISA = 0xFF;
PORTA = 0x00;
PORTB = 0x00;
TRISCBits.TRISC3 = 1; //SCLK
TRISCBits.TRISC4 = 1; //MOSI

// configura SPI
OpenSPI(SLV_SSON, MODE_00,SMPMID);
DPOT_CS = 1;
OpenADC(ADC_FOSC_16 &
        ADC_RIGHT_JUST &
        ADC_12_TAD,
        ADC_CH0 &
        ADC_INT_ON&
        ADC_VREFPLUS_VDD &
        ADC_VREFMINUS_VSS, 0x0E);

for(;;){

    while (!DataRdySPI());
    PKT= SLAVE_LER_SPI();
    SSPBUF = 70;
    Transf(PKT);
}
}

```

Trecho do código, do Firmware do PIC18F, responsável pela coleta de dados para envio via RF do RU-3.

```

/* Arquivo: Medias.c
*
* Autor: Renato Martins Lemos
*/

//Bibliotecas
#include <P18F25k22.h>           // Biblioteca do Microcontrolador
#include <delays.h>             // Biblioteca de Delay
#include <math.h>
#include "LCD4.h"               // Funções de inicialização e escrita do Display
#include "v_media.h"           // Funções que realizão as médias das medidas coletadas.

extern unsigned char flag_Cal, flag_MT, flag_V0_R, flag_V0_S, flag_V0_T, Virgula;
extern unsigned int aux_Media;
extern rom const char Volts[], V0[];

//Coleta de dados da tensão
unsigned long V_Media(unsigned long V_MD_x, unsigned char V_x, signed char
DOP_RAM_x, unsigned int Media_x){
    unsigned long V_MD_xaux =0, V_Raiz, aux_Raiz;
    unsigned short long buffer_ADC=0;

    buffer_ADC=convert_ad(V_x);
    V_MD_xaux = V_MD_x + buffer_ADC*buffer_ADC;

    if(aux_Media == Media_x){
        V_MD_xaux = (V_MD_xaux/(Media_x+1));
        aux_Raiz = 1;
        V_Raiz=0;
        while(V_MD_xaux >=aux_Raiz){
            V_MD_xaux = V_MD_xaux - aux_Raiz;
            aux_Raiz = aux_Raiz + 2;
            V_Raiz = V_Raiz + 1;
        }
        V_MD_xaux = V_Raiz;
        V_MD_xaux = (Mult_T + DOP_RAM_x) * V_MD_xaux;
        V_MD_xaux = (V_MD_xaux >> Div_T)+1;
        flag_MT=1;
    }
    return V_MD_xaux;
}

```

Trecho do código, do Firmware do Radiuino, responsável pelo envio e recebimento do pacote de dados via RF

```
/* Arquivo: RU-3.ino
 *
 * Autor: Renato Martins Lemos
 */

void IntReceiveData()
{
  if (int_rx == 0)
  {
    int_rx = 1;
    return;
  }
  if ( digitalRead(GDO0) == HIGH )
  {
    Phy.receive(&g_pkt);
  }
  return;
}

void IntSendData()
{
  if (int_rx == 0)
  {
    int_rx = 1;
    return;
  }
  if ( digitalRead(GDO0) == HIGH ) {
    Phy.sendSerial(&g_pkt);
  }
  return;
}
```