



CENTRO UNIVERSITÁRIO DE BRASÍLIA - UniCEUB
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Fernando Ribeiro da Silva

*Medição wireless com vistas à eficiência
energética em data centers*

Brasília

4 de julho de 2012

Fernando Ribeiro da Silva

Medição wireless com vistas à eficiência energética em data centers

Trabalho apresentado ao Centro Universitário de Brasília (UniCEUB) como pré-requisito para a obtenção de Certificado de Conclusão de Curso de Engenharia de Computação.

Orientador:

Prof. Msc. Maria Marony Sousa Farias

Co-orientador:

Prof. Msc. José Julimá Bezerra Júnior

Brasília

4 de julho de 2012

Fernando Ribeiro da Silva

*Medição wireless com vistas à eficiência
energética em data centers*

Trabalho apresentado ao Centro Universitário de Brasília (UniCEUB) como pré-requisito para a obtenção de Certificado de Conclusão de Curso de Engenharia de Computação.

Este Trabalho foi julgado adequado para a obtenção do Título de Engenheiro de Computação, e aprovado em sua forma final pela Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas - FATECS.

Aprovado em: 02 de Julho de 2012.

Prof. Msc. Abiezer Amarilia Fernandez
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Msc. Maria Marony Sousa Farias
Orientador

Luciano Henrique Duque
Prof. Msc. Engenharia Elétrica

Marco Antônio Araújo
Prof. Msc. Ciência da Computação

José Julimá Bezerra Júnior
Prof. Msc. Engenharia Elétrica

Dedicatória

A Deus por me permitir realizar este trabalho. Sem ele nada seria possível.

A minha esposa, companheira e amada Geísa que me incentiva e me faz feliz a cada dia.

A minha filha e princesa Maria Fernanda, por me fazer esquecer de tudo e sorrir como criança.

Aos meus pais, por acreditarem em mim e me apoiarem em tudo que foi possível.

Agradecimentos

Ao grande amigo Deivid Darwin (OLIVEIRA, 2010), por ter me cedido a ideia principal do projeto. Mesmo eu tendo mudado bastante o projeto original.

À Prof. Msc. Marony, por me tolerar durante este projeto. Um muito obrigado pela dedicação e ajuda.

Ao amigo e Prof. Msc. Julimá, pela dedicação e pelo aprendizado por esses meses que trabalhamos juntos.

Ao amigo e Prof. Msc. Luís Cláudio, o cavaleiro de ouro, por me ensinar a resolver os cálculos mais sinistros.

Um muito obrigado e sucesso aos companheiros de aula que se distribuirão pelo mundo com todo o conhecimento adquirido juntos.

Aos colegas de trabalho, por me aturarem nos momentos estressantes.

Resumo

Nos últimos anos, diversas empresas estão buscando a sustentabilidade. Porém, muitas empresas são deficientes na adequação da eficiência energética. Essa deficiência muitas vezes se dá por falta de informação ou por falta de uma métrica bem difundida no mercado. Elas primariamente buscam formas de aumentar a eficiência somente na parte de refrigeração, deixando de lado a busca da eficiência na própria TI, buscando alternativas como a virtualização. Para que uma empresa consiga alcançar o equilíbrio energético e conseqüentemente se tornar uma empresa *verde*, ambas abordagens devem ser traçadas e alcançadas.

Abstract

In recent years, many companies are seeking sustainable energy. However, many companies are deficient in the adequacy of energy efficiency. This deficiency is by many as lack of information or lack of a metric widespread in the market. They primarily seek ways to increase efficiency in the cooling only, leaving aside the pursuit of efficiency in IT itself, seeking alternatives such as virtualization. For a company to can achieve energy balance and thus become a *green* company, both approaches should be set and met.

Keywords. energy efficiency, current transformer, zigbee

Lista de Figuras

2.1	Visão de um Data Center	15
3.1	Direção campo magnético	20
3.2	Campo magnético induzido por uma corrente estacionária z	20
3.3	Bobina simples	22
3.4	Fluxo das linhas da corrente	22
3.5	Regra da mão esquerda	23
3.6	Transformador ideal	24
3.7	Erro de fase	26
3.8	Amplificador operacional básico	27
3.9	Amplificador Operacional Conversor Corrente Tensão	29
3.10	Ilustração de Xbee que implementa a especificação ZigBee	29
3.11	Tipos de topologias utilizadas pelo ZigBee	31
3.12	Interface USB de comunicação e configuração do XBee	32
4.1	Circuito proposto para implementação	33
4.2	Regulador de tensão LM7805	34
4.3	Regulador de tensão LM7833	35
4.4	Esquema de aplicação típica do regulador de tensão LM78XX obtido do <i>datasheet</i> do fabricante.	35
4.5	Amplificador Operacional TL084CN	35
4.6	Esquema do amplificador operacional TL084 utilizado	36
4.7	Transformador de corrente Leviton CDE01-R11 com relação de 100A:0.1A	36
4.8	Tela de informações do software X-CTU	38
4.9	Configuração porta Serial no X-CTU	39
4.10	Configuração do XBee-Pro base	39
5.1	Exemplo de arquitetura de implementação do instrumento de medição sem fio	41
5.2	Circuito do protótipo montado	42
5.3	Soldagem do circuito do protótipo	42
6.1	Resultado obtido utilizando um notebook Lenovo como carga	45

Lista de Tabelas

3.1	Exemplo de endereços do XBee.	32
4.1	Pinagem do XBee-PRO	37
4.2	Configurações necessárias do XBee-Pro Remoto e Base	38

Lista de Siglas

TI	Tecnologia da Informação	13
DCiE	Data Center infrastructure Efficiency	17
PUE	Power Usage Efficiency	17
WPAN	Wireless Personal Area Network	29
WLAN	Wireless Local Area Network	29
FFD	Full-Function Device	30
RFD	Reduced-Function Device	30
ZC	ZigBee Coordinator	30
ZR	ZigBee Router	30
ZED	ZigBee End Device	30
TC	Transformador de Corrente	25
RTC	Relação de Transformação da Corrente	25
FCR	Fator de Correção da Relação	26
DL	Destination Address Low	37
IR	Sample Rate	37
IT	Sample Rate TX	37
API	Application Programming Interface	38

Sumário

1	Introdução	13
1.1	Motivação	13
1.2	Objetivos Gerais	13
1.3	Objetivos Específicos	14
1.4	Estrutura do Trabalho	14
2	Apresentação do Problema	15
2.1	Visão geral de um data center	15
2.2	Eficiência Energética	16
2.2.1	Eficiência Energética em Data Centers	17
3	Referencial Teórico	19
3.1	Eletricidade	19
3.1.1	Campo magnético	19
3.1.2	Fluxo de elétrons	21
3.1.3	Bobinas	21
3.1.4	Fluxo de corrente	21
3.1.5	Polaridade	23
3.2	Transformadores	23
3.2.1	Transformadores para Instrumentos	24
3.2.2	Transformadores de Corrente	25
3.2.3	Erros de exatidão	26

3.3	Amplificador Operacional	27
3.3.1	Amplificador Operacional Ideal	27
3.3.2	Conversor Corrente Tensão	28
3.4	Transferência dos dados	29
3.4.1	ZigBee	29
3.4.2	Topologia	30
3.4.3	Endereços	31
3.4.4	Obtenção dos dados	32
4	Descrição do Hardware e Software	33
4.1	Regulador de tensão	34
4.1.1	LM7805 e LM7833	34
4.2	Amplificador Operacional	35
4.2.1	TL084	35
4.3	Transformador de Corrente	36
4.3.1	Leviton CDE01-R11	36
4.4	Transferência dos dados	37
4.4.1	Configuração do XBee-Pro	37
4.5	Envio e Recebimento dos Dados	40
5	Implementação	41
5.1	Localização da instalação	41
5.2	Montagem do circuito	41
5.3	Elaboração do código fonte para obtenção dos dados	42
5.3.1	Cálculo de saída	43
6	Resultados Obtidos	45
6.1	Problemas Encontrados	46

7	Considerações Finais	48
7.1	Conclusões	48
7.2	Proposta de Trabalhos Futuros	49
	Apêndice A – Código fonte do leitor XBee-Pro Base	50
	Referências	52

1 *Introdução*

1.1 Motivação

A motivação surgiu de um estudo de um caso real, no qual uma grande empresa de Tecnologia da Informação (TI) da América Latina enfrenta problemas de consumo de energia, pois está alcançando o limite de sua capacidade energética em seu Data Center. Atualmente, nessa empresa, as medições são realizadas em períodos específicos, onde é feita uma medição instantânea, e conseqüentemente, não constante, da carga em produção.

No ambiente computacional, o consumo de energia varia ao longo do tempo, pois a carga de TI também varia. Com isto, qualquer medição ocasional será imprecisa devido a essa variação. Um exemplo claro dessa variação é a grande carga necessária para executar procedimentos em lote em computadores de grande porte fora do horário comercial. Geralmente, as medições são realizadas durante o horário comercial, não obtendo assim a real situação do ambiente, visto que existe uma grande carga consumida durante o horário noturno.

1.2 Objetivos Gerais

O objetivo geral é desenvolver um *software* e *hardware* que possa obter informação em tempo real da carga de um *rack* em um data center a fim de agregar valor à área de gerenciamento de energia elétrica em data centers de Tecnologia da Informação - TI, visando gerenciar a alocação de novos recursos energéticos de forma sistêmica e precisa (ALGER, 2010). Possibilitando alavancar o Brasil nas estatísticas em produção de Data Center com máxima eficiência energética. Para buscar esta eficiência energética é necessário o desenvolvimento de um instrumento de medição que possa:

- Medir a carga
- Enviar e receber os dados

- Ler os dados
- Tratar dos dados

1.3 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste projeto são:

- Obter corrente utilizando um transformador de corrente 100 : 0.1;
- Converter para tensão e reduzir para um valor menor que 5V;
- Utilizar um conversor A/D para converter a corrente analógica para um valor digital;
- Enviar os dados através de radiofrequência para um gerenciador que será responsável por tratar os dados;
- Gerar relatórios, no gerenciador, dos dados obtidos em ferramenta específica.

1.4 Estrutura do Trabalho

No capítulo 2, é apresentado o problema alvo do projeto, definindo a eficiência energética e principalmente a eficiência energética em data centers, objetivo do produto que será construído no projeto.

O referencial teórico necessário para o desenvolvimento do projeto é descrito no capítulo 3. Os principais conceitos de eletricidade, de transformadores, de amplificadores operacionais e sobre a transferência dos dados entre os dispositivos são definidos em detalhes.

Com uma abordagem mais voltada às especificações do hardware utilizado no projeto, o capítulo 4 descreve os componentes utilizados, com suas respectivas configurações e detalhes.

O capítulo 5 aborda o detalhamento da implementação do projeto, ilustrando o circuito montado e os cálculos necessários para obter a potência do dispositivo conectado ao projeto. Conseqüentemente, no capítulo 6 temos os resultados obtidos do teste realizado, e no capítulo 7 são exibidas as considerações finais sobre o projeto, demonstrando os objetivos alcançados e as propostas de trabalhos futuros.

2 *Apresentação do Problema*

Este capítulo apresenta brevemente a definição de um Data Center, justificando sua criação e aprimoramento. Principalmente no que tange a eficiência energética para redução de consumo, custos e padronização mundial.



Figura 2.1: Visão de um Data Center

Fonte: Site keliweb.it

2.1 **Visão geral de um data center**

De acordo com (VERAS, 2011) a definição de Data Center, ilustrado na figura 2.1, é “*um conjunto integrado de componentes de alta tecnologia que permitem fornecer serviços de infraestrutura de TI de valor agregado, tipicamente processamento e armazenamento de dados, em larga escala, para qualquer tipo de organização*”. Além desta definição, é possível complementar que esses componentes são dispositivos de telecomunicações, de segurança de acesso, unidades de fornecimento de energia e resfriamento. Todos estes acomodados em um ambiente controlado, visando ter uma estabilidade de operações, sem interrupções.

Nesses ambientes controlados, diversos serviços são comercializados entre grandes cor-

porações, principalmente financeiras, governamentais, operadoras de telecomunicações e outras empresas que necessitam de alto poder de desempenho e alta confiabilidade nos serviços, visto que uma parada em algum destes serviços pode produzir um prejuízo exponencialmente elevado.

Para garantir tal disponibilidade, é necessário ter instalado diversos equipamentos em um data center, sendo os principais, um sistema de resfriamento, visto que os equipamentos produzem energia térmica elevada, que se não for retirada, ou reduzida, gerará problemas de hardware. Outro sistema importante é a disponibilidade energética, que é garantida com a utilização de *no-breaks* e geradores para eventuais falhas da prestadora. Além da disponibilidade, é necessário o monitoramento dos *racks*, visto que um adequado monitoramento pode e deve garantir que o sistema esteja funcionando o mais próximo do ideal. Neste trabalho somente será abordado o sistema energético, sua mensuração e gerenciamento. Não é foco o tratamento de questões referente à equipamentos de resfriamento.

2.2 Eficiência Energética

A forma mais fácil de definir eficiência energética é realizando uma analogia com o combustível utilizado em um automóvel. A eficiência neste caso é a quantidade de energia mecânica gerada pela queima do combustível, ou seja, pela energia química. Quando existe a queima do combustível, ela é convertida em energia mecânica, gerando assim uma força mecânica que realiza o movimento do carro, porém, parte desta transformação de energia é perdida na geração de energia térmica. Esta perda é que define a eficiência energética. Quanto menor a perda, maior a eficiência energética.

Em um data center, a eficiência é dividida em dois grandes grupos. O primeiro é a energia elétrica que alimenta os dispositivos de TI, como servidores, *storages*, roteadores, ou seja, os equipamentos que realizam o trabalho da TI. O segundo é o grupo de apoio, onde este altera o ambiente para que os recursos do primeiro grupo operem próximos ao seu estado ideal, ou seja, em temperatura baixa e constante, com umidade constante, com energia estabilizada e ininterrupta. Estes equipamentos são os condicionadores de ar, os *no-breaks*, geradores e outros. Analogamente ao exemplo do automóvel, a energia mecânica seria a energia dos equipamentos de TI e a energia térmica, “perdida”, seria a energia elétrica dos equipamentos de apoio à TI.

Além do exposto, existe também a baixa eficiência energética no mal aproveitamento

dos recursos de TI, visto que a maioria dos servidores instalados em um Data Center não são completamente utilizados, por exemplo, dois servidores, onde cada um utiliza somente 20% de sua capacidade total. Nessa situação é melhor implementar um sistema com maior aproveitamento de recursos, uma vez que os servidores estão subutilizados. Uma boa estratégia seria a utilização de virtualização, reduzindo assim a quantidade de servidores, e conseqüentemente a quantidade de energia elétrica consumida.

2.2.1 Eficiência Energética em Data Centers

Data centers são uns dos maiores consumidores energéticos atualmente, de acordo com o *Report to Congress on Server and Data Center Energy Efficiency* (ENERGY, 2007), onde somente os Data Centers localizados dos Estados Unidos são responsáveis por 1.5% do total energético daquele país. Neste mesmo relatório foi apontado que somente 30% do custo energético de um data center é utilizado de forma eficiente e os 70% restantes são utilizados em sistemas de apoio. Este projeto visa monitorar e gerenciar o consumo dos *racks* do datacenter, para que seja possível visualizar a abordagem mais adequada para ser aplicada a fim de alcançar a eficiência energética.

Para mensurar a eficiência energética em data centers, um consórcio de mais de 100 empresas de produtos e tecnologias voltada para data centers, o The Green Grid (<http://www.thegreengrid.org>), desenvolveu um padrão de medição de eficiência em data centers para serem utilizadas por indústrias. Duas de suas medições, o Power Usage Efficiency (PUE) ou eficiência de utilização de energia elétrica e o Data Center infrastructure Efficiency (DCiE) ou simplesmente eficiência da infraestrutura do data center tem recebido aceitação mundial por permitir a utilização com diversos fabricantes e distribuidores, podendo assim garantir uma melhor adequação em um data center.

O conceito por trás do PUE e DCiE é simples, eles geram uma métrica capaz de avaliar a eficiência energética do data center.

PUE é definido como:

$$PUE = \frac{D}{T} \quad (2.1)$$

Onde D é o total de energia elétrica para o Data Center e T é a energia elétrica da carga de TI.

Quanto maior o valor resultante da equação 2.1, ou seja, o PUE, menor será a eficiência

energética. A eficiência energética ideal é quando temos $PUE = 1$.

Outra medida é o DCiE, e é definida como:

$$\frac{1}{PUE} = \frac{T}{D} \times 100 \quad (2.2)$$

O resultado da equação 2.2 é o valor em porcentagem da eficiência energética. Quando o DCiE resultante é 100%, então a eficiência energética máxima foi atingida.

Neste contexto, é levada em consideração duas *energias* em um data center. A primeira é a energia atribuída ao DCiE, ou seja, somente a energia que realmente chega aos equipamentos de TI. A outra é a energia utilizada em equipamento de resfriamento, em no-breaks, ou seja, equipamentos que dão suporte aos equipamentos de TI. Com isso, muitas literaturas como em (RASMUSSEN, 2006) tentam incrementar a eficiência energética atacando somente as energias gastas com os equipamentos que dão suporte à infraestrutura de TI, porém, e não menos importante, é como aumentar a eficiência energética dos próprios equipamentos de TI. Para isso, é necessário que seja realizada uma medição constante dos equipamento a fim de verificar a sua real utilização, e se possível propor melhorias, principalmente na área de virtualização de servidores, reduzindo assim o DCiE em questão.

3 Referencial Teórico

3.1 Eletricidade

3.1.1 Campo magnético

Aproximadamente há 2800 anos, os gregos descobriram um tipo de pedra que atraia pedaços de ferro. Essas pedras são conhecidas como *magnetita* (Fe_3O_4) e este fenômeno é chamado de *magnetismo*.

Após alguns anos, cientistas franceses descobriram que os ímãs possuem pólos e os denominaram de pólo norte e pólo sul.

Além dos pólos, foi constatado que os pólos idênticos de ímãs diferentes se repelem e pólos diferentes de ímãs diferentes se atraem.

As linhas mostradas na figura 3.1 são denominadas *linhas de campo magnético* e representam a existência de um campo magnético denominado *densidade de fluxo magnético* (B).

Esse tipo de campo magnético é um campo magnético natural. Existe a possibilidade de se criar um campo magnético a partir de uma corrente elétrica. Essa descoberta foi feita pelo cientista dinamarquês Hans Oersted (1777-1851) (ULABY, 2007).

Após a descoberta de Hans Oersted, os cientistas franceses Jean Baptiste Biot e Felix Savart desenvolveram uma expressão da relação entre a densidade do fluxo magnético (B) com a corrente no condutor. A aplicação da fórmula elaborada por eles é denominada *lei de Biot-Savart* para a figura 3.2.

$$B = \phi \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (\text{T}) \quad (3.1)$$

A equação 3.1 conduz ao valor da densidade de fluxo magnético B induzido por uma corrente na direção z , conforme figura 3.2. Onde r é a distância radial a partir da corrente

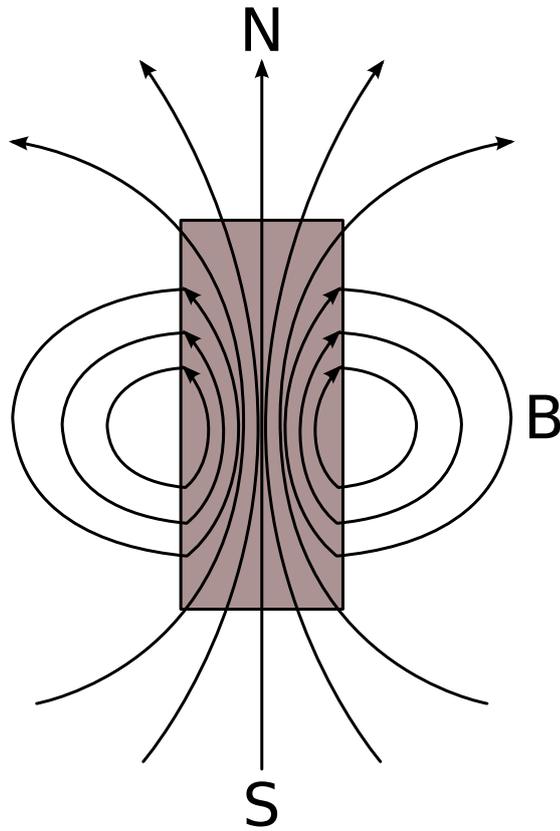


Figura 3.1: Direção campo magnético

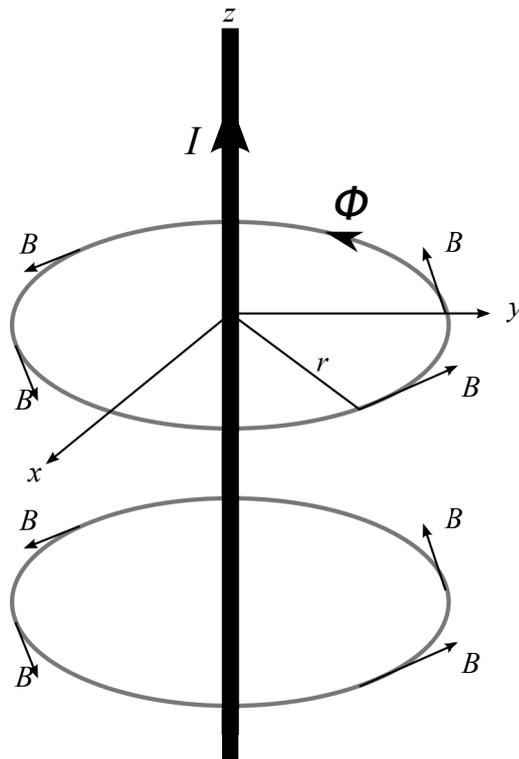


Figura 3.2: Campo magnético induzido por uma corrente estacionária z

e ϕ é um valor unitário azimutal (plano tangente a um ponto) indicando o fato de que a direção do campo magnético é tangencial ao círculo em torno da corrente. μ_0 é a permeabilidade magnética do espaço livre, que possui valor de $4\pi \times 10^{-7}$ henrys por metro (H/m). Além da densidade do fluxo magnético B , existe a intensidade do campo magnético H , que é inter-relacionada com B conforme a equação 3.2.

$$B = \mu H \quad (3.2)$$

3.1.2 Fluxo de elétrons

De acordo com (HELD, 2011), eletricidade *representa a forma de energia que ocorre dado um fluxo de elétrons. Cada átomo, que representa uma estrutura microscópica encontrada em toda matéria contém um ou mais elétrons que possuem uma carga negativa.*

Alguns materiais, como a borracha e o plástico, possuem os elétrons fortemente acoplados, dificultando sua movimentação, tornando assim esses materiais isolantes, pois os elétrons não se movimentam pelo material. Por outro lado, materiais como o ferro, o alumínio e o cobre possuem elétrons que são facilmente desacopláveis, possibilitando assim o fluxo de elétrons pelo material. Com isto, estes materiais são considerados materiais condutores, pois eles conduzem eletricidade.

3.1.3 Bobinas

Uma bobina pode ser enrolada em qualquer tipo de material. Este material pode ser um material isolante, como a borracha ou o plástico, ou pode ser um material condutor, como o ferro, ouro, cobre e outros. Dependendo do material utilizado, se ele for condutor, vai ser gerado um campo magnético 50 vezes maior que um material não condutor. Este é o nome dado à permeabilidade magnética, ou seja, **permeabilidade magnética** (μ) é a medida da capacidade de um material de conduzir eletricidade. Outra medida magnética comum é a **relutância**, ou seja, é a resistência ao magnetismo. Metais leves possuem uma alta permeabilidade e uma baixa relutância, visto que é elemento de alta condutividade.

3.1.4 Fluxo de corrente

O fluxo da corrente é o caminho que será percorrido pelo campo eletromagnético gerado pela bobina, ou seja, é o caminho que os elétrons se movimentam dada pela

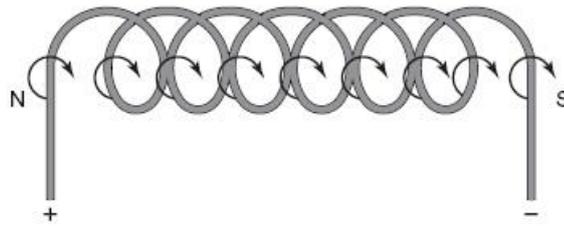


Figura 3.3: Bobina simples

Fonte: (HERMAN, 2011)

construção (quantidade de voltas) e as propriedades físicas do material.

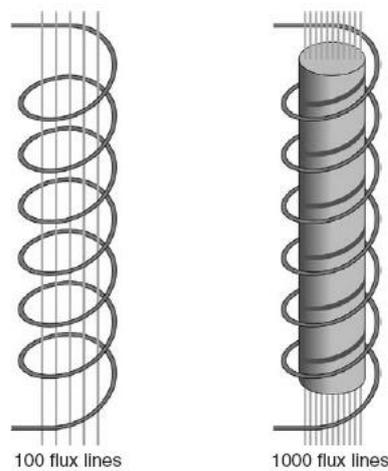


Figura 3.4: Fluxo das linhas da corrente

Fonte: (HERMAN, 2011)

De acordo com a figura 3.4, a quantidade de fluxos é diretamente proporcional ao tipo de condutor utilizado, e também da quantidade de voltas da bobina. Se o fluxo de corrente em um campo eletromagnético é continuamente incrementado, eventualmente alcançará um ponto de saturação, ou seja, a **saturação** ocorre quando todos os elétrons do material estão alinhados, em equilíbrio.

Após o material ser submetido a uma grande quantidade de eletricidade, e após a eliminação da fonte desta eletricidade, o campo magnético é reduzido a quase zero. Esse campo elétrico resultante varia de um material para outro e é chamado de magnetismo residual, ou seja, é o campo magnético residual após a eliminação da fonte. Com isso temos a medida da capacidade do material de reter magnetismo, chamado de **força coercitiva**.

3.1.5 Polaridade

A polaridade pode ser obtida através da regra da mão esquerda. Quando os dedos são colocados ao redor do enrolamento em direção do fluxo da corrente, o polegar estará direcionado ao norte do pólo magnético, conforme mostrado na figura 3.5.

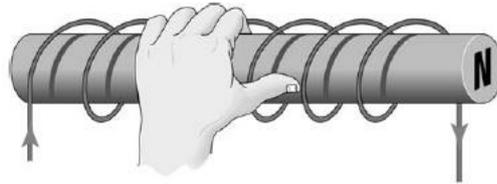


Figura 3.5: Regra da mão esquerda

Fonte: (HERMAN, 2011)

3.2 Transformadores

(KULKARNI; KULKARNI; KHAPARDE, 2004) define transformadores como “*um dispositivo estático que transfere energia elétrica de um circuito para outro utilizando indução eletromagnética sem alteração na frequência*”. Complementarmente ao definido, podemos dizer que um transformador pega a energia elétrica recebida pelo enrolamento primário e o transforma em energia magnética que é convertida, pelo enrolamento secundário, novamente em energia elétrica. É possível afirmar assim que os enrolamentos primário e secundário não estão eletricamente conectados, mas sim acoplados magneticamente.

Os transformadores podem ser classificados em *step-up* ou *step-down*, dependendo se a carga do enrolamento secundário é maior ou menor que a do primário respectivamente.

De acordo com (ULABY, 2007), um transformador consiste de duas bobinas enroladas em torno de um núcleo magnético comum, conforme ilustrado na figura 3.6. A bobina primária possui N_1 espiras, e a bobina secundária possui N_2 espiras. A bobina primária está conectada a uma fonte de tensão $V_1(t)$ e a do secundário ligada a um resistor R_L . No transformador ideal é estabelecido que a permeabilidade magnética é infinita ($\mu = \infty$).

No lado primário do transformador, a fonte de tensão V_1 produz uma corrente I_1 na bobina do primário, estabelecendo assim um fluxo ϕ no núcleo magnético.

A tensão do primário é definida pela lei de Faraday, como mostra a equação 3.3.

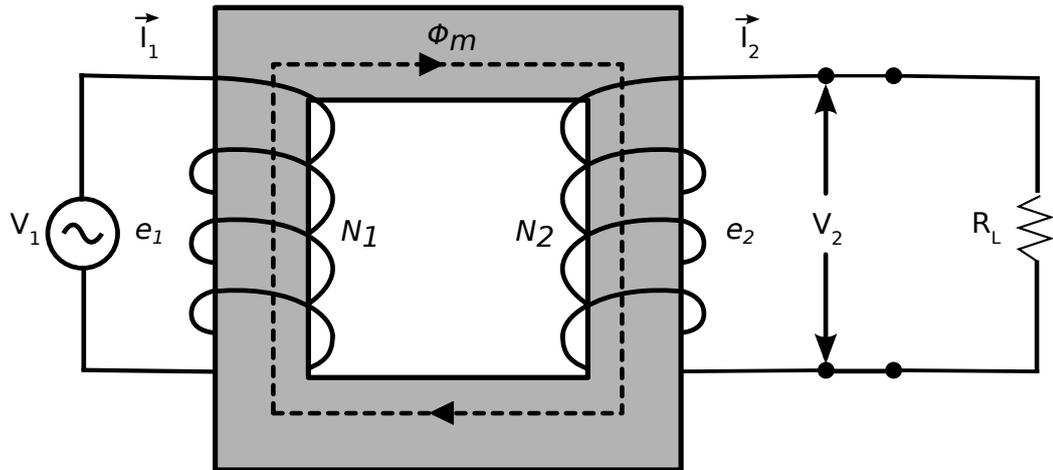


Figura 3.6: Transformador ideal

$$V_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (3.3)$$

e de forma similar temos a tensão do secundário na equação 3.4.

$$V_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (3.4)$$

Assim, associando as equações 3.3 e 3.4 temos:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3.5)$$

Na caso do transformador ideal temos que $P_1 = P_2$ e como $P_1 = I_1 V_1$ e $P_2 = I_2 V_2$ temos:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3.6)$$

Assim, a tensão é proporcional à razão de espiras. Enquanto que a corrente é igual ao inverso da razão de espiras. Ex: $\frac{N_1}{N_2} = 0,1$ no secundário seria 10 vezes V_1 do circuito primário, enquanto I_2 seria $\frac{I_1}{10}$.

3.2.1 Transformadores para Instrumentos

Os transformadores para instrumentos são equipamentos elétricos projetados e construídos especificamente para alimentar instrumentos elétricos de medição, controle ou projeção. O modelo de grandeza a ser medido deve ser traduzido para uma relação deter-

minada para um valor secundário adequado ao uso em outros equipamentos de medição. Simplificadamente, o transformador de instrumento é considerado um redutor de tensão (Transformador de Potencial) ou um redutor de corrente (Transformador de Corrente), onde $V_2 < V_1$ e $I_2 < I_1$ respectivamente.

3.2.2 Transformadores de Corrente

O enrolamento primário do Transformador de Corrente (TC) é constituído de poucas espiras sendo o secundário dimensionado para uma corrente nominal padronizada. A corrente nominal do secundário é definida como Relação de Transformação da Corrente (RTC), que nada mais é que o quociente entre a corrente primária nominal I_p^n e a corrente secundária nominal I_s^n , onde n informa que se trata de uma corrente nominal, e s e p informa respectivamente secundário e primário, conforme a equação 3.7.

$$RTC = \frac{I_p^n}{I_s^n} \quad (3.7)$$

Desta forma, quando o valor de I_p^n chegar ao seu limite, por exemplo, se a razão for de 100 : 0.1, então a corrente primária nominal será de 100A, e a corrente secundária nominal será de 0.1A. Essa proporção é mantida para correntes menores que o máximo estabelecido no primário, assim a corrente no secundário mantém a mesma proporção, por exemplo, se no primário possuir 50A, no secundário retornará 0.05A.

Nos transformadores de corrente, o fasor da corrente primária depende fundamentalmente do circuito primário, visto que os equipamentos ligados ao secundário são sensores de corrente. Assim, o fasor corrente do secundário será dado por:

$$\bar{I}_s = \frac{\bar{I}_p^n}{RTC} \quad (3.8)$$

Consequentemente o fasor tensão do secundário \bar{U}_s dependerá da impedância conectada ao secundário \bar{Z}_s .

$$\bar{U}_s = \bar{I}_s \cdot \bar{Z}_s = \frac{\bar{I}_p^n}{RTC} \bar{Z}_s \quad (3.9)$$

Existem dois casos particulares para Z_s .

Quando $\bar{Z}_s \rightarrow 0$ (curto-circuito), a tensão do secundário será nula ($\bar{U}_s \rightarrow 0$). E quando for um circuito aberto ($\bar{Z}_s \rightarrow \infty$) a impedância do secundário seria refletida no primário,

fazendo com que a tensão primária se aproximasse da tensão do sistema ($\bar{U}_p \rightarrow \bar{U}_{sist.}$).

3.2.3 Erros de exatidão

Erro de Relação

O erro de relação é o erro proveniente da relação de transformação real para a transformação nominal. É denominada como Fator de Correção da Relação (FCR) e dado de acordo com a equação 3.10.

$$FCR = \frac{K_r}{RTC} \quad (3.10)$$

Onde RTC é dado na equação 3.7 e a relação de transformação real é dada por:

$$K_r = \frac{I_p}{I_s} \quad (3.11)$$

onde I_p é a corrente no primário e I_s é a corrente no secundário.

Erro de fase

Erro de fase é o ângulo de fase entre os fasores primário e o secundário, definidos pela 3.12.

$$\beta = \angle \bar{I}_p - \angle \bar{I}_s \quad (3.12)$$

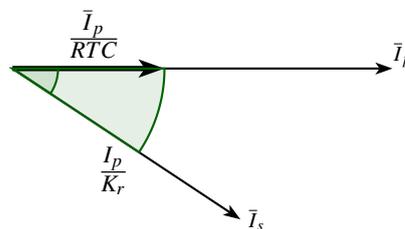


Figura 3.7: Erro de fase

3.3 Amplificador Operacional

De acordo com (SEABRA, 1996) um amplificador operacional é “*um circuito eletrônico integrado composto de resistores, transistores e capacitores*”. Este circuito foi largamente utilizado para realizar operações matemáticas como a soma e integrações, e por isso recebeu o nome de amplificador **operacional**. Por se aproximar muito de suas características ideais de operação e sua versatilidade, ele constitui diversos circuitos e por estes motivos é considerado atualmente como um componente.

De acordo com (NASHELSKY; BOYLESTAD, 2005), “*um amplificador operacional é um amplificador diferencial de ganho muito alto com impedância de entrada muito alta e impedância de saída muito baixa*”.

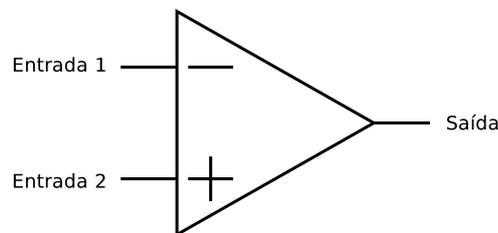


Figura 3.8: Amplificador operacional básico

A figura 3.8 ilustra um amplificador operacional básico, que possui uma entrada inversora (Entrada 1) e outra não-inversora (Entrada 2).

A saída do amplificador operacional é dada pela equação 3.13. Onde A é a representação do amplificador operacional. A função que ele executa é apresentar na saída, aqui chamada v_0 , um múltiplo da diferença entre as duas entradas, neste caso v_+ (entrada não-inversora) e v_- (entrada inversora).

$$v_0 = A(v_+ - v_-) \quad (3.13)$$

A função A apresenta na equação 3.13 é conhecida como **ganho de tensão do amplificador operacional**.

3.3.1 Amplificador Operacional Ideal

Para classificar um amplificador operacional como ideal, ele deve satisfazer cinco requisitos, sendo eles:

- O amplificador operacional deve amplificar somente a **diferença** dos sinais de en-

trada, nunca amplifica o sinal comum às duas entradas. E de acordo com a equação 3.13, v_0 é uma função linear, e decorre com isso que o amplificador operacional ideal **nunca satura**;

- As entradas (inversora e não-inversora) não consomem nem fornecem corrente ($i_+ = 0$ e $i_- = 0$). Isto acontece porque o amplificador operacional utiliza as entradas para observar o sinal, assim as correntes não devem interferir nos sinais. Com isto, podemos concluir que a impedância das entradas é infinita $R_o = \infty$;
- A tensão de saída deve ser ideal, pois a impedância de saída é nula ($R_o = 0$), pois sempre fornece o proposto na equação 3.13, independentemente da corrente;
- O amplificador operacional ideal possui ganho A constante, além disso, ele não introduz nenhuma defasagem, ou seja não introduz atrasos ao circuito. Concluindo assim que A é um número real e positivo;
- O amplificador operacional deve ter ganho $A = \infty$.

3.3.2 Conversor Corrente Tensão

Também conhecido como *amplificador transresistência*, esta aplicação do amplificador operacional, fornece na saída uma tensão proporcional à corrente de entrada.

De acordo com a figura 3.9 e tendo como base um amplificador operacional ideal, podemos aplicar a lei de Ohm à R obtendo:

$$I_e = \frac{V_- - V_s}{R} \quad (3.14)$$

Onde V_- é a tensão na entrada inversora e V_s é a tensão na saída do amplificador.

O curto-circuito virtual de entrada nos garante que $V_- = V_+$, assim temos:

$$V_s = -R \cdot I_e \quad (3.15)$$

A figura 3.9 ilustra o amplificador operacional conectado para oferecer a operação de conversor corrente tensão.

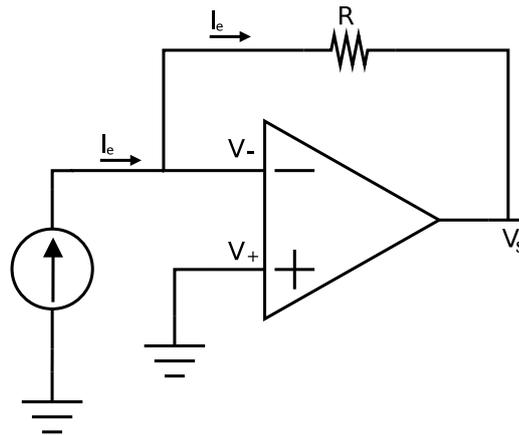


Figura 3.9: Amplificador Operacional Conversor Corrente Tensão

3.4 Transferência dos dados

3.4.1 ZigBee

ZigBee é um protocolo de comunicação que cria uma rede Wireless Personal Area Network (WPAN). A principal diferença entre uma rede WPAN e uma rede Wireless Local Area Network (WLAN) é que aquela não necessita de infraestrutura para funcionar. Com isso, essa solução pode ser implementada para uma grande quantidade de dispositivos, consumindo pouco energia.



Figura 3.10: Ilustração de Xbee que implementa a especificação ZigBee

Fonte: Site Digi International

Por sua vez, o Xbee é um dispositivo que implementa uma variedade de protocolos de comunicação, entre eles o ZigBee, 802.15.4w, e outros.

As redes ZigBee operam em frequências abertas entre $868 - 868.6\text{MHz}$, $902 - 928\text{MHz}$, e $2400 - 2483.5\text{MHz}$, não sendo necessário então qualquer tipo de permissão ou autorização para sua utilização. O alcance deste rádio é de até 1km em área aberta, e como essas frequências não precisam de regularização para sua utilização, é possível que o es-

pectro possa estar sendo utilizado por outras redes, possivelmente causando algum tipo de interferência no canal.

A camada de rede por trás do ZigBee que suporta suas funcionalidades é conhecida como IEEE 802.15.4. Este é um conjunto de padrões que definem o gerenciamento de energia, endereçamento, correções de erros, formato de mensagem e outros pontos específicos necessários para o estabelecimento de comunicação entre um rádio e outro.

Em uma rede ZigBee, dois tipos de dispositivos podem operar, o Full-Function Device (FFD) e o Reduced-Function Device (RFD). Os dispositivos FFD utilizam uma maior quantidade de recursos, porém possuem mais funcionalidades que o RFD. O RFD por sua vez é mais simples e não utiliza muitos recursos, sendo bastante utilizado em sistemas simples, como um interruptor ou um sensor infravermelho.

Além dos tipos de dispositivos, existem três classes onde eles podem ser adequados, sendo elas:

ZigBee Coordinator (ZC) Este dispositivo é responsável pela formação da rede, distribuição de endereços, implementação de segurança e manutenção da rede. Só pode ser implementado utilizando dispositivos FFD. Em uma rede ZigBee só pode existir um e somente um dispositivo coordenador.

ZigBee Router (ZR) - Um ZigBee roteador é responsável pela comunicação dos dispositivos que estão a longas distâncias do coordenador, trabalhando como um roteador, uma ponte, entre o dispositivo final e o coordenador, possibilitando assim estender a rede a distâncias maiores. Este dispositivo geralmente é ligado diretamente na energia elétrica, visto que sua indisponibilidade gerará também uma indisponibilidade dos dispositivos finais abaixo dele. Este também só pode ser implementado utilizando um dispositivo FFD.

ZigBee End Device (ZED) - São os dispositivos finais da rede. Podem ser implementados utilizando tanto um dispositivo FFD quanto um RFD, porém, por necessitarem de poucos recursos é recomendável a utilização de um dispositivo RFD. É neste que os sensores, atuadores, são implementados.

3.4.2 Topologia

Uma rede ZigBee pode utilizar primariamente quatro topologias, sendo elas:

Pares - É a topologia mais simples, onde dois e somente dois dispositivos, um coordenador e um roteador, se comunicam.

Estrela - É outra topologia bastante simples, onde um coordenador recebe todas as informações de um ou vários dispositivos finais. Os dispositivos finais estão diretamente conectados ao coordenador, sem a utilização de um roteador, conforme mostrado na figura 3.11.

Malha - Esta rede utiliza roteadores juntamente com um coordenador. Estes roteadores enviam as mensagens recebidas dos dispositivos finais para o coordenador. Os dispositivos finais não se comunicam diretamente, somente através de um coordenador ou roteador.

Árvore - Não é uma topologia muito diferente da topologia em malha. A única diferença é que os roteadores não se comunicam entre si, somente se reportam ao coordenador.

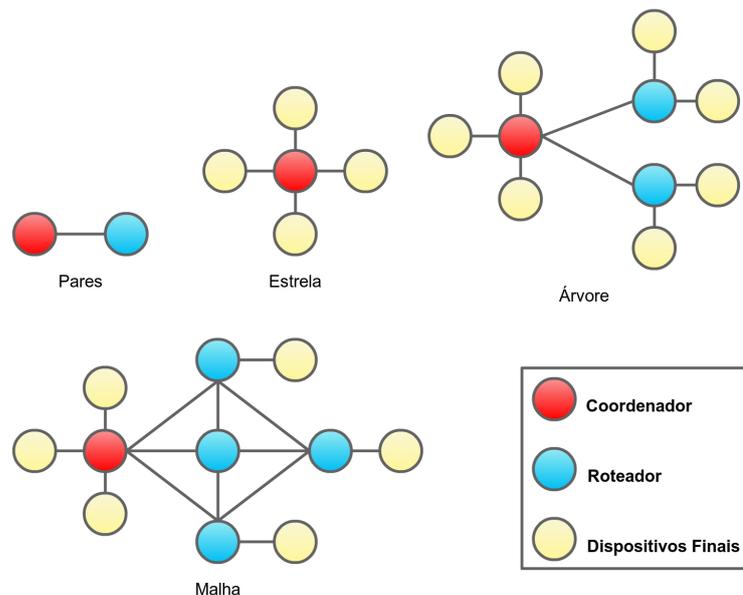


Figura 3.11: Tipos de topologias utilizadas pelo ZigBee

3.4.3 Endereços

Para que a comunicação ocorra, é necessário que os dispositivos saibam o endereço de destino de cada mensagem. Partindo deste pressuposto, é evidente que um endereço único deve ser atribuído para cada dispositivo. Em cada dispositivo ZigBee existe um endereço de 64 bits único e permanente. Nenhum outro dispositivo deve possuir um endereço idêntico.

Existe um endereço de 16 bits que é atribuído dinamicamente para cada dispositivo pelo coordenador, durante o processo de inicialização da rede. Este endereço é único somente na rede em que ele se encontra. Um exemplo de endereçamento pode ser visto na Tabela 3.1.

E por fim, cada dispositivo possui um identificador, que nada mais é que um texto que pode ser atribuído para identificar o dispositivo. Não existe garantia que esse identificador seja único, ficando a cargo do responsável pela rede defini-lo.

Tabela 3.1: Exemplo de endereços do XBee.

TIPO	ENDEREÇO	ÚNICO
64bits	0013A200403E0750	Sim. Permanentemente.
16bits	23F7	Sim. Em cada rede.
Identificador do Dispositivo	Identificador	Não

Fonte: (FALUDI, 2010)

3.4.4 Obtenção dos dados

Uma vez estabelecida a conectividade entre os dispositivos de radiofrequência, os dados serão transferidos do dispositivo final para o coordenador. A partir deste momento, os dados devem ser obtidos do coordenador através de um dispositivo específico, chamado CON-USBBEE, ilustrado na figura 3.12.

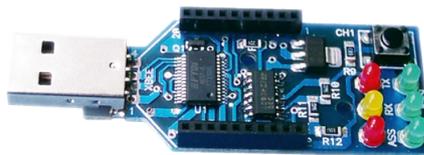


Figura 3.12: Interface USB de comunicação e configuração do XBee

Fonte: Site Rogercon

O módulo XBee coordenador é acoplado ao CON-USBBEE, e este é ligado em uma porta Universal Serial Bus (USB) do computador que receberá e tratará todos os dados recebidos. Para que este dispositivo funcione adequadamente, é necessário instalar o *driver* que é disponibilizado pelo fabricante. Uma vez instalado o driver e o dispositivo, é criada uma porta de comunicação COM, onde os dados serão enviados para essa porta pelo CON-USBBEE.

4 *Descrição do Hardware e Software*

Para a obtenção em tempo real da carga utilizada pelos racks de data centers, foi elaborado o circuito ilustrado na figura 4.1, onde foram utilizados dois reguladores de tensão, sendo eles o LM7805 e o LM7833, pois o amplificador operacional utilizado, TL084, necessita de tensão de 5V, e o XBee-Pro, de uma tensão de 3.3V. O conversor A/D do XBee-Pro possui uma resolução de 10 bits, ou seja, 1024.

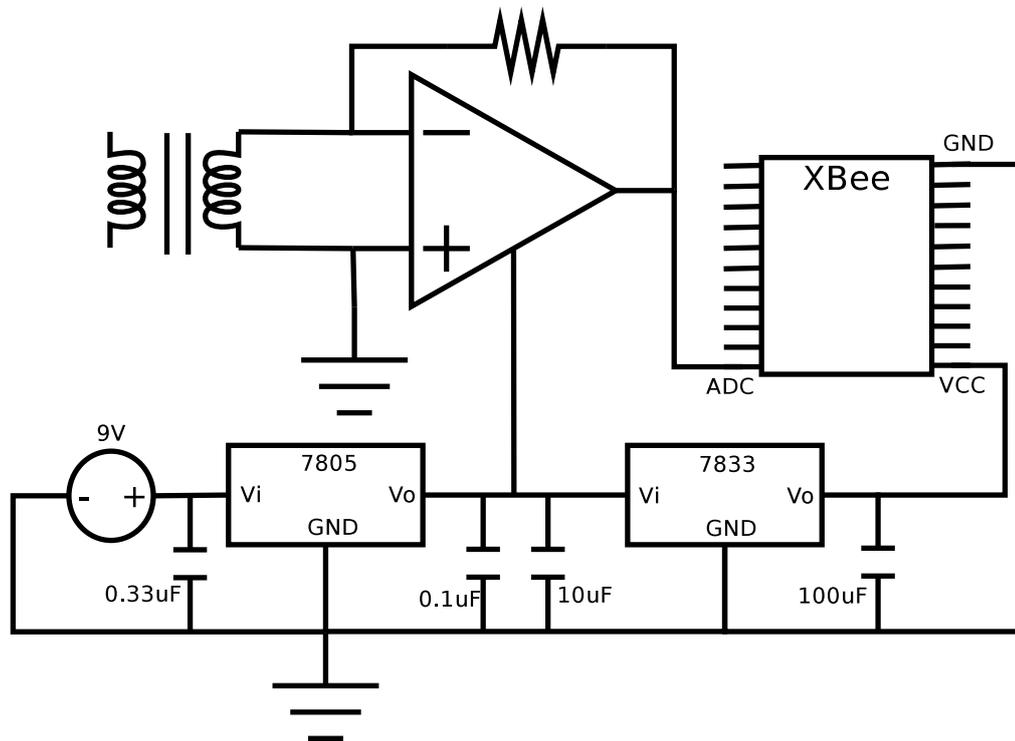


Figura 4.1: Circuito proposto para implementação

Na figura 4.1 foi ilustrado o transformador de corrente, onde a saída do secundário é conectado ao amplificador operacional e ao terra. Uma fonte de tensão de 9V é ligada a um regulador de tensão LM7805, o qual necessita de um capacitor de $0.33\mu F$ na entrada e outro capacitor de $0.1\mu F$ de acordo com o *datasheet* do fabricante. Desta forma, o

regulador de tensão LM7805 tem a saída regulada de $5V$ necessário para a alimentação do amplificador operacional TL084. Esse amplificador está sendo aplicado para realizar uma conversão corrente-tensão, ou seja, a tensão de saída desse amplificador operacional é relacionado com a corrente de entrada e com o resistor ligado ao operacional. Nota-se a utilização de um resistor de 150Ω para realizar a conversão no amplificador. A saída do regulador de tensão LM 7805 é a entrada de outro regulador de tensão, o LM7833, que regula a saída para $3.3V$, para isto, são utilizados dois capacitores, um de $10\mu F$ e outro de $100\mu F$, na entrada e saída respectivamente. Este regulador é necessário para alimentar o XBee-Pro. A saída do amplificador operacional é ligado ao conversor A/D do componente XBee-Pro para ser transmitido para o roteador.

4.1 Regulador de tensão

4.1.1 LM7805 e LM7833



Figura 4.2: Regulador de tensão LM7805

Fonte: Site futurehouse.gr

A figura 4.2 ilustra o regulador de tensão LM7805 utilizado no projeto. Este componente regula a tensão de entrada de $9V$ para uma tensão de saída de $5V$, necessária para a alimentação do amplificador operacional.

O outro regulador de tensão utilizado é o LM7833, da mesma família do LM7805, ou seja, da família LM78XX, onde XX é o modelo definido. No LM7833, é necessária uma tensão de saída de $3.3V$. A figura 4.3 ilustra este regulador.

O *datasheet* do fabricante recomenda o esquema de aplicação ilustrado na figura 4.4. Onde são utilizados dois capacitores, um de $0.33\mu F$ na entrada e outro de $0.1\mu F$ na saída.



Figura 4.3: Regulador de tensão LM7833

Fonte: Site sparkfun.com

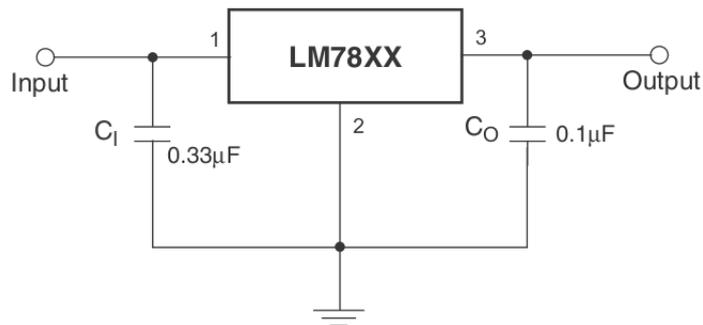


Figura 4.4: Esquema de aplicação típica do regulador de tensão LM78XX obtido do *datasheet* do fabricante.

Fonte: *Datasheet fabricante*

4.2 Amplificador Operacional

4.2.1 TL084

Conforme descrito na sessão 3.3, é necessário utilizar um amplificador operacional para converter a corrente de entrada para uma saída regulada de até 3.3V, visto que esta é a tensão máxima suportada pelo conversor *A/D* do XBee-Pro.



Figura 4.5: Amplificador Operacional TL084CN

Fonte: Site alibaba.com

A figura 4.5 ilustra o amplificador operacional utilizado. Este componente possui quatro amplificadores em um único circuito integrado. Para o projeto, será utilizado somente um amplificador, no caso, os pinos 1, 2, 3, 4 e 11, sendo respectivamente, saída, entrada inversora, entrada não inversora, VCC e terra, conforme ilustrado na figura 4.6.

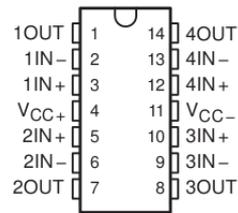


Figura 4.6: Esquema do amplificador operacional TL084 utilizado

Fonte: Datasheet fabricante

Juntamente com este amplificador operacional, será utilizado um resistor de 150Ω , visto que ele realizará a operação de conversão corrente-tensão para uma tensão de até $3.3V$.

4.3 Transformador de Corrente

4.3.1 Leviton CDE01-R11

Para o projeto, foi utilizado o transformador de corrente tipo janela fabricado pela Leviton, modelo CDE01-R11, ilustrado na figura 4.7. Este transformador possui uma relação de $100A : 0.1A$, ou seja, para cada $100A$ no primário, retornará $0.1A$ no secundário.



Figura 4.7: Transformador de corrente Leviton CDE01-R11 com relação de $100A:0.1A$

Fonte: Site da Leviton

Para que este transformador funcione, é necessário passar um e somente um fio por seu interior, ou seja, somente o fio de carga ou o neutro deverá passar por seu interior.

4.4 Transferência dos dados

Após ter obtido os dados pelo transformador de corrente e após ter “normalizado” os dados, é necessário transmiti-los do circuito onde é realizada a medição até a base. Será denominado base o XBee-Pro responsável por receber os dados, o qual está ligado ao gerenciador, e remoto o XBee-Pro que está conectado ao circuito medidor.

Ambos os dispositivos precisam ser conectados e configurados antes de entrarem em operação. A tabela 4.1 ilustra a pinagem do XBee-Pro, porém, nem todos serão utilizados neste projeto.

4.4.1 Configuração do XBee-Pro

A tabela 4.2 mostra as configurações necessárias dos XBee-Pro, tanto o remoto quanto o base. Na configuração remota, é configurado o Destination Address Low (DL) para o endereço de destino, tanto para a base quanto para o remoto. Também são habilitados o conversor ADC com a opção D0 setada para 2. O valor de Sample Rate (IR) é a taxa, em ms e hexadecimal, em que os dados serão transmitidos. Foi setado o valor `0x64` que corresponde a `100ms`. O valor de Sample Rate TX (IT) corresponde a quantidade de valores obtidos antes de serem enviados. Desta forma, o XBee-Pro remoto receberá os dados a cada segundo e enviará os dados a cada cinco segundos para a base.

Tabela 4.1: Pinagem do XBee-PRO

PINO	NOME	DIREÇÃO	DESCRIÇÃO
1	VCC	-	Power Supply
2	DOUT Output	UART	Data Out
3	DIN / CONFIG	Input	UART Data In
4	DO8*	Output	Digital Output 8
5	RESET	Input	Module Reset (reset pulse must be at least 200 ns)
6	PWM0 / RSSI	Output	PWM Output 0 / RX Signal Strength Indicator
7	PWM1	Output	PWM Output 1
8	[reserved]	-	Do not connect
9	DTR / SLEEP RQ / DI8	Input	Pin Sleep Control Line or Digital Input 8
10	GND	-	Ground
11	AD4 / DIO4	Either	Analog Input 4 or Digital I/O 4
12	CTS / DIO7	Either	Clear-to-Send Flow Control or Digital I/O 7
13	ON / SLEEP	Output	Module Status Indicator
14	VREF	Input	Voltage Reference for A/D Inputs
15	Associate / AD5 / DIO5	Either	Associated Indicator, Analog Input 5 or Digital I/O 5
16	RTS / AD6 / DIO6	Either	Request-to-Send Flow Control, Analog Input 6 or Digital I/O 6
17	AD3 / DIO3	Either	Analog Input 3 or Digital I/O 3
18	AD2 / DIO2	Either	Analog Input 2 or Digital I/O 2
19	AD1 / DIO1	Either	Analog Input 1 or Digital I/O 1
20	AD0 / DIO0	Either	Analog Input 0 or Digital I/O 0

Fonte: XBee datasheet

Para configurar o XBee-Pro, é necessário a utilização do software desenvolvido pela

Tabela 4.2: Configurações necessárias do XBee-Pro Remoto e Base

REMOTO	BASE
DL = 0x1234	DL = 0x5678
MY = 0x5678	MY = 0x1234
D0 = 2	P0 = 2
IR = 0x64	IA = 0xFFFF
IT = 10	–

Digi International ©. A figura 4.8 ilustra as informações sobre versão, compilação e *copyright* do software.



Figura 4.8: Tela de informações do software X-CTU

Antes de utilizarmos o X-CTU, é necessário acoplar o XBee-Pro na placa CON-USBEE para ser configurada. Após acoplar o XBee-Pro, é necessário instalar os *drivers* do dispositivo, que podem ser obtidos no site do fabricante. Com isto, o dispositivo USB pode ser plugado na estação para ser configurado.

Quando a placa USB com o XBee-Pro acoplado é conectada ao computador, o sistema operacional detecta este novo dispositivo e cria uma porta serial que será utilizada para comunicação com o dispositivo. Neste projeto, é criada a porta **COM10** de comunicação. A figura 4.9 ilustra a configuração da porta **COM10** no aplicativo.

No XBee-Pro base, algumas configurações devem ser realizadas, pois ele deve trabalhar em modo Application Programming Interface (API). Esta alteração deve ser realizada utilizando o X-CTU, na aba *Modem Configuration* conforme ilustrado na figura 4.10. Também devem ser configuradas as opções descritas na tabela 4.2.

Após realizar todas as alterações necessárias, grava-se essas informações no módulo XBee-Pro. E para isso, é necessário clicar no botão *Write* na aba *Modem Configuration* do X-CTU.

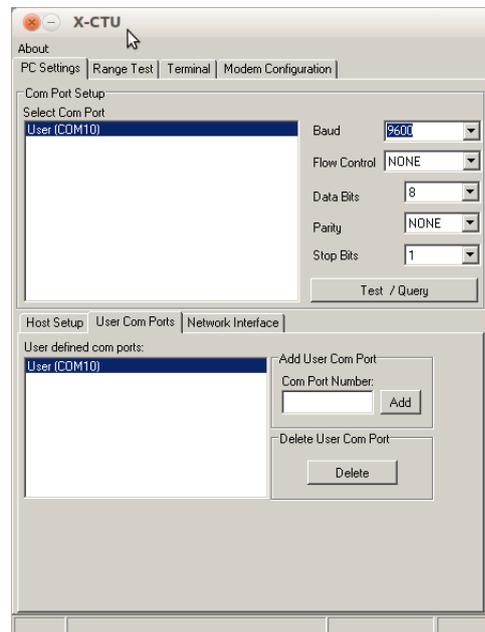


Figura 4.9: Configuração porta Serial no X-CTU

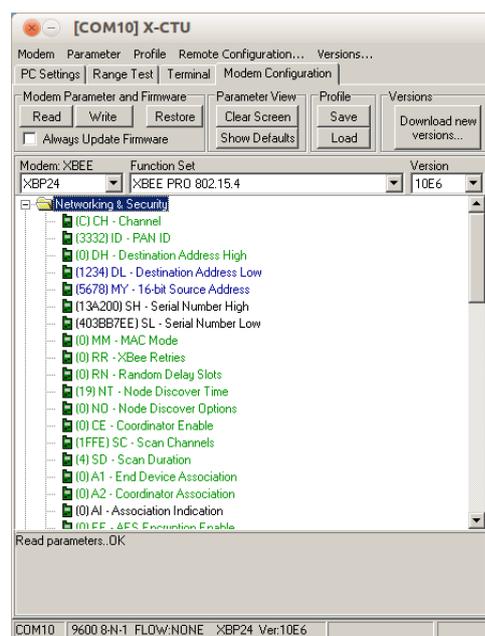


Figura 4.10: Configuração do XBee-Pro base

4.5 Envio e Recebimento dos Dados

Com as configurações da tabela 4.2 realizadas, o XBee-Pro remoto enviará ininterruptamente a cada 1s para o XBee-Pro base os dados da entrada do conversor A/D.

O XBee-Pro base buscará informações em sua entrada a cada 1s. Quando o dado é recebido, ele é enviado para o sistema de gerenciamento para atualização dos gráficos.

Essa transmissão dos dados é automatizada pelos dispositivos XBee-Pro, ficando transparente para o sistema a forma de envio e recebimento dos dados, sendo somente necessário a leitura dos dados e seu posterior tratamento.

5 Implementação

5.1 Localização da instalação

O local da implementação do circuito deste projeto é ilustrado na figura 5.1.

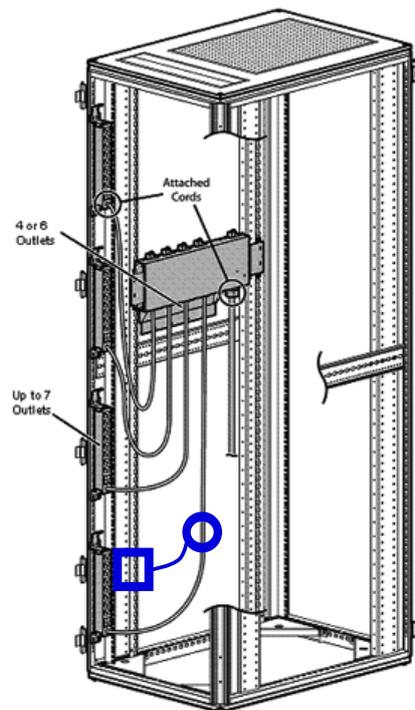


Figura 5.1: Exemplo de arquitetura de implementação do instrumento de medição sem fio

Fonte: Site HP internacional, com adaptações

5.2 Montagem do circuito

O circuito foi montado sobre uma placa de circuito com todos os componentes interconectados de acordo com a figura 4.1 do capítulo 4.

A figura 5.2 ilustra o circuito do protótipo, em que é possível visualizar o XBee-Pro



Figura 5.2: Circuito do protótipo montado

acoplado ao circuito, que será responsável por obter e enviar os dados, e o outro XBee-Pro acoplado à placa USB que será responsável pela recepção e tratamento dos dados.

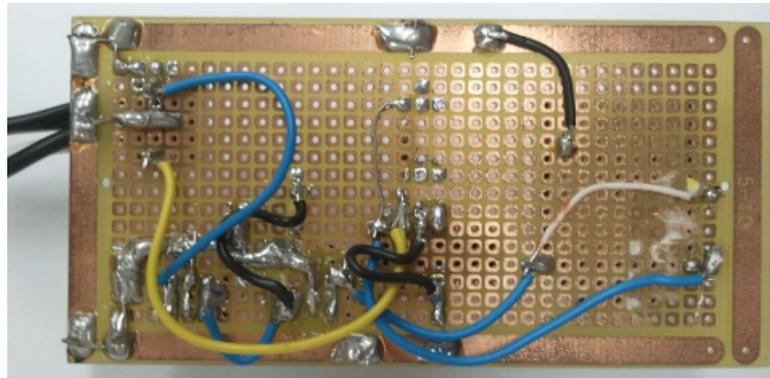


Figura 5.3: Soldagem do circuito do protótipo

A figura 5.3 ilustra a soldagem dos componentes ilustrados na figura 5.2.

5.3 Elaboração do código fonte para obtenção dos dados

Para obter os dados do XBee-Pro é necessário utilizar um software para ler os dados recebidos pela porta de comunicação *COMX*, onde *X* é o indicador da porta.

Para realizar esta leitura, foi desenvolvido um software na linguagem de programação Python, detalhado no apêndice 7.2.

Por se tratar de uma linguagem interpretada, não é necessário que o código seja compilado, basta executar o aplicativo com o comando:

```
python graph.py
```

Para que este comando seja executado sem problemas, é necessário que as bibliotecas

`python-matplotlib` e `pyserial` sejam instaladas antes da execução do comando acima, visto que são dependentes.

Após executar este comando, uma janela contendo um gráfico será exibida, mostrando os dados obtidos pelo XBee-Pro.

5.3.1 Cálculo de saída

Conforme informado na sessão 3.2.2, a corrente no secundário do transformador de corrente é da razão de $100A : 0.1A$, e um resistor de 150Ω foi utilizado por limitação de hardware do conversor A/D . O cálculo deste resistor é detalhado na equação 5.1.

$$\begin{aligned} V_s &= I_e \cdot R \\ 3.3V &= 20_{mA} \cdot R \\ R &= 165\Omega \end{aligned} \tag{5.1}$$

Onde V_s é a tensão de saída máxima, no caso $3.3V$, e a corrente máxima estipulada (I_e) neste projeto para o primário do transformador de corrente é de $20A$, ou seja, como a relação é de $100A : 0.1A$, a saída do secundário do transformador de corrente será de $20mA$, utilizado na equação. Resolvendo a equação 5.1 tem-se uma resistência máxima de 165Ω . Foi adotado o limite de 150Ω como margem de segurança.

Desta forma, para o cálculo da potência de saída foi considerado uma tensão constante de $220V$.

Como a corrente vai variar de $0A$ a $20A$, temos que a tensão na saída do operacional será dado pela equação 5.2.

$$V_s = I_e \cdot 150 \tag{5.2}$$

Onde V_s é a saída esperada entre $0V$ e $3.3V$ e I_e é a corrente no secundário do transformador de corrente.

Antes de realizar o cálculo da potência, é necessário converter o valor da tensão da saída do amplificador operacional novamente para corrente, e para isso, é necessário utilizar a equação 5.3.

$$I_e = \frac{V_s}{R} \quad (5.3)$$

Como $R = 150\Omega$ e a razão é de $100A : 01A$, então o resultado deverá ser multiplicado por 1000, para obter o valor da corrente no primário do transformador de corrente.

$$I_e = \left(\frac{V_s}{150} \right) \cdot 1000 \quad (5.4)$$

Para o cálculo da potência, algumas premissas foram definidas: uma delas é a tensão constante de $220V$ indicada acima; a outra é o ângulo de fase zero entre a tensão e a corrente, ou seja, o fator de potência igual a 1. Assim, pela equação 5.5, temos a equação padrão da potência ativa.

$$P = U_e \cdot I_e \cdot \cos(\phi) \quad (5.5)$$

Onde U_e é a tensão senoidal (Volts), I_e é a corrente (Ampères). Desta forma a potência P estará em watts. Como foi considerado $\phi = 0$, temos na equação 5.6 que a potência vai depender exclusivamente da corrente da equação 5.4.

$$P = 220_v \cdot I_e \quad (5.6)$$

6 *Resultados Obtidos*

Para realizar o teste de viabilidade, foi utilizado como carga um notebook da marca Lenovo. Para obter a corrente, foi passado internamente pelo transformador de corrente o fio da fase, não é obrigatório que seja a fase, poderia ter sido o neutro.

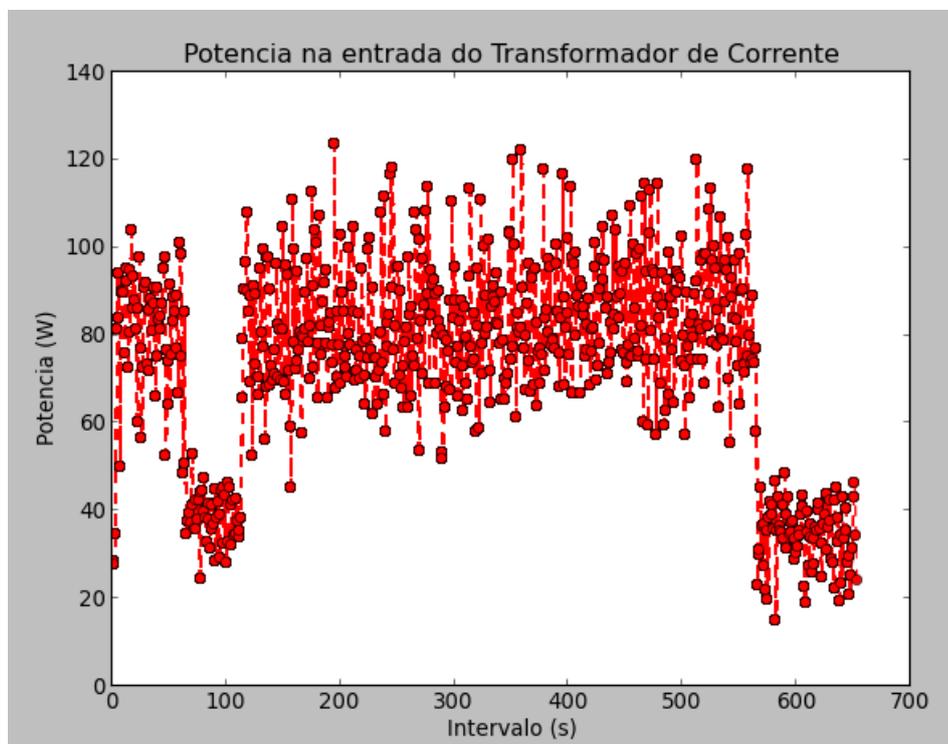


Figura 6.1: Resultado obtido utilizando um notebook Lenovo como carga

Como a carga de um notebook deste porte consome em média 95 Watts, variando esta carga de acordo com os processos que estão em execução e consumindo os recursos naquele momento. De certa forma, em uma escala reduzida, essa medição utilizando um notebook retrata a carga de um servidor em ambiente de produção, visto que o servidor em um data center também tem uma variação na carga de acordo com o consumo atual.

A figura 6.1 ilustra os dados obtidos em aproximadamente 650 intervalos. Para calcular a unidade destes intervalos as configurações do XBee-Pro descritas na tabela 4.2, tem-se que IR é o tempo em milisegundos em que um dado será obtido do conversor A/D .

O parâmetro IT é a quantidade de dados obtidos que serão agrupados para envio. Neste caso, e de acordo com as configurações, serão obtidos dados a cada $100ms$ e serão enviados 10 dados por vez. Sendo assim, a cada $1s$ serão enviados 10 medições para o XBee-Pro base.

Para ter uma melhor precisão, foi utilizada a média aritmética das 10 medições para ter um valor mais próximo da realidade, pois foi detectado um problema de oscilação dos valores obtidos e que será descrito posteriormente.

A figura 6.1 foi obtida inicialmente com o notebook ligado ao projeto, e assim é fácil identificar no gráfico a partir do intervalo 1 até aproximadamente o intervalo 80 que existiu uma carga média de 80 watts e entre o intervalo aproximadamente de 80 a 120 o notebook foi desligado do projeto, e os dados tiveram uma queda conforme esperado. Após este intervalo, o notebook foi novamente ligado ao projeto e o gráfico reporta isso automaticamente voltando à média de 80 watts como anteriormente. Nota-se claramente a variação da carga do notebook, pois a carga do mesmo está variando entre 50 watts a 122 watts.

6.1 Problemas Encontrados

Durante o desenvolvimento do projeto, vários problemas foram encontrados, entre eles:

Transformador de corrente - Para este projeto era necessário um transformador de corrente que trabalhasse com pequenas correntes, ou seja, em média de 5 a 12 ampères e com uma precisão inferior a $1A$ no secundário. No mercado local, e nacional, este tipo de transformador não é facilmente encontrado, visto que alguns fabricantes como a Siemens possuía um transformador com a configuração de $50 : 1A$, porém, em contato com o fabricante este transformador não é mais produzido. Para solucionar este problema, existiu a necessidade de adquirir um transformador de corrente no exterior, por sorte, existem diversos fabricantes no exterior, e o mais adequado para a utilização foi o desenvolvido pela empresa Leviton com uma relação de $100 : 0.1A$. Em levantamento realizado em um data center local, foi levantado que o potência em $220V$ em um rack em produção consome até $3KVA$.

Documentação do XBee-Pro - O XBee-Pro possui quatro conversores A/D embutidos. Porém, a sua documentação não é completa, não deixando claro alguns

informações importantes, como por exemplo, os dados obtidos pelo XBee-Pro base precisam ser tratados para que o valor da corrente seja convertido utilizando o conversor A/D no XBee-Pro tem de ser obtido através da equação 6.1.

$$\frac{V_{ref}}{1023} \cdot V_o \quad (6.1)$$

Onde V_{ref} é o valor do V_{ref} do XBee-Pro remoto, que no projeto é o mesmo que o VCC do XBee-Pro, ou seja, $3.3V$ e o V_o é o valor recebido pelo XBee-Pro base. Com isso, é possível obter o valor em Volts do que foi convertido no XBee-Pro remoto.

Componentes defeituoso - Após a montagem do circuito, e durante os testes, o amplificador operacional apresentou defeito, substituído por outro voltou a funcionar por um tempo determinado, apresentando novamente problemas, onde mesmo desligado o transformador de corrente, existia uma tensão de saída de $0.0017V$ na saída do amplificador operacional, e conseqüentemente, mesmo sem nenhuma carga, foram plotados dados que não deveriam existir, talvez pela existência de uma carga residual no transformador ou por algum ajuste na configuração. Esse efeito é claramente visualizado na figura 6.1, quando o notebook é desligado, o gráfico plota uma carga residual de até 50 watts, para um projeto comercial esse erro pode ser um impedimento para o projeto todo, visto que em grandes medições esse erro é um problema em potencial.

Oscilação XBee-Pro - Durante os testes, os dados convertidos pelo A/D do XBee-Pro apresentaram uma oscilação muito grande, mesmo em cargas mais estáticas. Em contato internacional com o suporte técnico do fabricante, nenhum erro de configuração foi detectado, as últimas sugestões do suporte foram de problema no módulo XBee-Pro ou no circuito. Como o circuito foi montado seguindo todas as indicações dos fabricantes, não houve como afirmar que o problema era do circuito, talvez algum outro componente não esteja com a precisão mais adequada, ou talvez esteja com defeito em algum limite de utilização que não foi detectado.

7 *Considerações Finais*

7.1 Conclusões

Todos os objetivos especificados do projeto, descritos na seção amplificador operacional 3.3, foram alcançados pelo projeto.

A aquisição da corrente utilizando um transformador de corrente foi realizado sem problemas, visto que é um produto fechado sem a necessidade de muito desenvolvimento durante sua implementação. A relação da corrente entre o primário e o secundário foi atendido conforme especificação do fabricante.

Para verificar se os dados obtidos estavam de acordo com o esperado, foi utilizado um multímetro ligado ao circuito para verificar o valor obtido com o valor transferido.s

A conversão da corrente foi realizada utilizando um amplificador operacional do tipo conversão corrente-tensão com um resistor de 150Ω , pois o conversor A/D trabalha até o limite de $5V$, tornando-se assim um limitador de corrente para $20A$. Isso não foi considerado um problema de projeto, uma vez que é possível realizar uma adequação para atender os requisitos dos $100A$.

O envio dos dados feito pelos XBee-Pro são feitos de forma transparente, tendo em vista que o produto é bem estável e confiável. O frame recebido pela base teve de ser tratado para extrair somente as informações necessárias para a elaboração dos gráficos como o proposto no último item dos objetivos. Estes gráficos podem ser utilizados para qualquer propósito, mas principalmente para o gerenciamento da eficiência energética de um data center, pois consegue visualizar em tempo real a carga de um ativo. Como é um dispositivo sem fio, e sem limitação de quantidade de ativos, pode ser amplamente utilizado, além de permitir um grande alcance em área aberta, viabiliza a sua implementação em larga escala, em grandes data centers e é independente de ambiente que está sendo instalado.

7.2 Proposta de Trabalhos Futuros

Algumas abordagens não foram tratadas neste projeto. Sendo os principais:

Amortização do sinal - Os dados enviados pelo conversor A/D apresentaram oscilações que podem ser reduzidos ou melhor recuperados na recepção utilizando alguns tipos de filtros.

Eliminação de limitações - Para a simplificação do hardware utilizado, algumas limitações foram impostas. Essas limitações podem ser modificadas a fim de permitir melhor aproveitamento do transformador de corrente, visto que este pode ser utilizado com até 100A no primário.

Miniaturização - O circuito pode ser miniaturizado para permitir sua instalação em locais com limitações de espaço, como por exemplo, em caixas para tomadas.

Ampliação de público alvo - Como a gama de aplicações deste projeto é muito grande, é interessante alcançar novos ramos como por exemplo o residencial, que pode ser aplicado no gerenciamento automatizado dos recursos gastos na residência, podendo visualizar os equipamentos que estão consumindo a maior carga a fim de aplicar alguma alternativa eficiente ou, se necessário, a substituição.

APÊNDICE A -- Código fonte do leitor XBee-Pro Base

```
1  #!/usr/bin/env python
   import time
3  import serial
   from xbee import XBee
5  import numpy as np
   import matplotlib
7  matplotlib.use('GTKAgg')
   from math import fsum
9
   import matplotlib.pyplot as plt
11
   plt.ion()
13
   tagnr=1
15  samplingRate=1
   graphbuf=50
17
   gdist= np.zeros(graphbuf)
19  ax1=plt.axes()

21  SERIALPORT = "/dev/ttyUSB0"
   BAUDRATE = 9600
23
   count = 0
25  total = 0

27  nsr=time.time()

29  def readSerial():
       try:
31     ser = serial.Serial(SERIALPORT, BAUDRATE)
           xbee = XBee(ser)
33     response = xbee.wait_read_frame()
           ser.close()
35     except KeyboardInterrupt:
           exit()
37
           sum = 0
39     sum = []
```

```

    if response.has_key('samples'):
41         for adc in response['samples']:
                for key, value in adc.items():
43                 sum.append(value)
        #print response
45         value = (fsum(sum))/len(response['samples'])
        value_normalized = (3.3/1023)*value
47         total = (value_normalized/150)*1000
        #print value, value_normalized, total*220, total*110
49         return total*220

51 y = []
    x = []
53 while True:
        count += 1
55         y.append(readSerial())
        x.append(count)
57         line, = plt.plot(x, y, marker='o', linestyle='—', color='r')
        line.set_ydata(y)
59         plt.title('Potencia na entrada do Transformador de Corrente')
        plt.xlabel('Intervalo (s)')
61         plt.ylabel('Potencia (W)')
        plt.draw()
63
        nsr=nsr+samplingRate
65         while time.time()<nsr:
                pass

```

Referências

- ALGER, D. *Grow a Greener Data Center*. [S.l.]: Cisco Press, 2010. ISBN 9781587058134.
- CARTER, B.; MANCINI, R. *Op Amps for Everyone*. [S.l.]: Newnes/Elsevier, 2009. (Electronics & Electrical). ISBN 9781856175050.
- CATHEY, J. *Dispositivos e Circuitos Eletrônicos*. [S.l.]: BOOKMAN COMPANHIA ED. ISBN 9788536302522.
- CHERNICOFF, D. *The Shortcut Guide to Data Center Energy Efficiency*. [S.l.]: Realtimedpublishers.com. ISBN 9781931491990.
- ENERGY, S. Report to congress on server and data center energy efficiency public law 109-431. *Public law*, v. 109, p. 431, 2007.
- FALUDI, R. *Building Wireless Sensor Networks: With ZigBee, XBee, Arduino, and Processing*. [S.l.]: O'Reilly Media, 2010. (O'Reilly Series). ISBN 9780596807733.
- HELD, G. *Making Your Data Center Energy Efficient*. [S.l.]: Auerbach Pub, 2011.
- HERMAN, S. *Electrical Transformers and Rotating Machines*. [S.l.]: Cengage Learning, 2011. ISBN 9781111039134.
- IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). *IEEE Std 802.15.4-2011 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2006)*, p. 1–314, 5 2011.
- JUNIOR, A. *Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos*. [S.l.]: TEKNE - ARTMED, 2012. ISBN 9788564519022.
- KANT, K. Data center evolution:: A tutorial on state of the art, issues, and challenges. *Computer Networks*, Elsevier, v. 53, n. 17, p. 2939–2965, 2009.
- KAPLAN, R.; NORTON, D. et al. The balanced scorecard—measures that drive performance. *Harvard business review*, Boston, v. 70, n. 1, p. 71–79, 1992.
- KULKARNI, S.; KULKARNI, S.; KHAPARDE, S. *Transformer Engineering: Design and Practice*. [S.l.]: Marcel Dekker, Incorporated, 2004. (Power Engineering). ISBN 9780824756536.
- NASHELSKY, L.; BOYLESTAD, R. *Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos*. [S.l.]: PRENTICE HALL BRASIL, 2005. ISBN 9788587918222.
- OLIVEIRA, D. *Sistema inteligente de gerenciamento de energia para racks de data center*. 83 f. Monografia (Graduação) — Instituto de Educação Superior de Brasília, Brasília, 2010.

PONIATOWSKI, M. *Foundation of Green IT: Consolidation, Virtualization, Efficiency, and ROI in the Data Center*. [S.l.]: Pearson Education, 2009. ISBN 9780137044191.

RASMUSSEN, N. *Electrical efficiency modeling of data centers*. [S.l.]: APC. White paper, 2006.

SEABRA, A. *Amplificadores operacionais: teoria e análise*. [S.l.]: Érica, 1996. (Coleção estude e use. Série eletrônica analógica). ISBN 9788571943162.

ULABY, F. *Eletromagnetismo Para Engenheiros*. [S.l.]: BOOKMAN COMPANHIA ED, 2007. ISBN 9788560031191.

VERAS, M. *Virtualização: Componente Central do Datacenter*. [S.l.]: BRASPORT, 2011. ISBN 9788574524672.