

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO



RENAN RIBEIRO SILVEIRA

IMPLEMENTAÇÃO DE UMA REDE ZIGBEE COM
TELECOMUNICAÇÃO VIA PLC PARA
MONITORAMENTO DO CONSUMO DE ENERGIA

VITÓRIA – ES
AGOSTO/2017

RENAN RIBEIRO SILVEIRA

**IMPLEMENTAÇÃO DE UMA REDE ZIGBEE COM TELECOMUNICAÇÃO VIA
PLC PARA MONITORAMENTO DO CONSUMO DE ENERGIA**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Renan Ribeiro Silveira**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de engenheiro eletricista.

Orientador: **Prof. Dr. Jair Adriano Lima Silva**

VITÓRIA – ES
Agosto/2017

RENAN RIBEIRO SILVEIRA

**IMPLEMENTAÇÃO DE UMA REDE ZIGBEE COM TELECOMUNICAÇÃO VIA
PLC PARA MONITORAMENTO DO CONSUMO DE ENERGIA**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Renan Ribeiro Silveira**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de engenheiro eletricista.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Jair Adriano Lima Silva
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Helder Roberto de Oliveira
Rocha

Eng. Eletricista William Garcia Viegas dos
Santos

VITÓRIA – ES

Agosto/2017

RESUMO

Baseado no conceito de redes inteligentes, este projeto de graduação consiste na implementação de uma rede com tecnologia ZigBee para monitoramento do consumo de energia elétrica em residências. Além disso será implementada uma rede de comunicação via rede elétrica para telecomunicação dos dados medidos. As redes inteligentes vêm ganhando destaque no Brasil pelas vantagens que oferece tanto ao cliente quanto à concessionária. Entretanto este novo conceito de distribuição de energia ainda sofre com a falta de padronização. Dentro deste contexto, este projeto busca uma solução de baixo custo e robusta que funcione bem em qualquer situação para monitoramento e automação da rede.

Palavras-chave: ZigBee, PLC, Smart-grid, Medidores inteligentes

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Redes inteligentes.....	9
Figura 2 - Comparação entre redes sem fio	11
Figura 3 – Transferência de dados: a) modo Beacon, b) modo não-Beacon	14
Figura 4 – Topologia estrela.....	18
Figura 5 – Topologia Arvore	18
Figura 6 – Topologia Malha.....	19
Figura 7- Banda de frequência da tecnologia PLC.....	19
Figura 8 - Topologia usada em redes BPL	21
Figura 9 – Diagrama do sistema.....	24
Figura 10 - Sensor SCT013.....	25
Figura 11 - Sensor ligado a caixa de distribuição	27
Figura 12 - Módulo XBee.....	28
Figura 13 - Shield XBee	29
Figura 14 - Programa XCTU.....	30
Figura 15 - Arduino ligado ao modem CPL	31
Figura 16 - Rede elétrica da sala do NIDA	32
Figura 17 - Verificação do sensor de corrente.....	33
Figura 18 - RSSI para dispositivos afastados por 10m.....	36
Figura 19 - RSSI para dispositivos afastados em mais de 15m	37
Figura 20 - Dispositivos ZigBee utilizados.....	37
Figura 21 - Sinal no domínio do tempo.....	38
Figura 22 - Sinal com espaçamento entre SOT e PDU	39
Figura 23 - Sinal no domínio do tempo com SOT e PDU	39
Figura 24 - Espectro do sinal OFDM	40
Figura 25 - Amostras de SNR medido durante 25min	41
Figura 26 - SNR médio.....	41
Figura 27 - Software SG Netman, informando a taxa de transmissão dos modems	42
Figura 28 - Smart Grid aplicada à iluminação pública	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo das diferenças para cada região	11
Tabela 2 – Estrutura do pacote da camada física	13
Tabela 3 – Tipo de dispositivos	17

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Potencia dissipada durante 2 horas.....	34
Gráfico 2 – Consumo de energia durante 2 horas.....	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IEEE – Institute of electrical and electronic engineers

LABTEL – Laboratorio de telecomunicações

PAN – Personal area network

PLC – Power line communication

UFES – Universidade federal do Espírito Santo

MAC – Medium Access control

ED – Energy detection

LQI – Link quality indication

SHR – Synchronization header

PHR – Phy header

DSSS – Direct sequence spread spectrum

GTS – Guaranteed time slot

CSMA-CA – Carrier sense multiple access with collision avoidance

FFD – Full Function Device

RFD – Reduced Function Device

BPL – Broadband power line

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
1.1 Motivação.....	7
1.2 Objetivos	7
1.2.1 Objetivo geral	7
1.2.2 Objetivos específicos.....	8
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	9
2.1 Redes inteligentes.....	9
2.2 A Tecnologia ZigBee	10
2.2.1 Padrão IEEE 802.15.4	11
2.2.2 Camada Física.....	12
2.2.3 Camada MAC	13
2.2.3.1 Modo Beacon e não-Beacon	13
2.2.3.2 CSMA-CA.....	14
2.2.4 Camada de Rede.....	15
2.2.5 Camada de aplicação	16
2.2.6 Estrutura da rede	16
2.2.7 Topologia da rede.....	17
2.3 Transmissão de dados via rede elétrica.....	19
2.4 Cálculo do consumo de energia elétrica	21
2.4.1 Potência em circuitos de corrente alternada.....	22
3 METODOLOGIA	24
3.1 Implementação do medidor de consumo de energia elétrica.....	24
3.1.1 Sensor de corrente SCT013.....	25
3.2 Rede ZigBee	27
3.2.1 Rádio XBee	28

3.2.2 Configurações do XBee.....	29
3.3 Rede PLC	31
4 RESULTADOS OBTIDOS.....	32
4.1 Análise do medidor de consumo	32
4.2 Análise da rede ZigBee	35
4.3 Análise da comunicação PLC	38
5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	43
REFERÊNCIAS	45
APENDICE A – CÓDIGO DO DISPOSITIVO SENSOR DE CORRENTE	48
APENDICE B – CÓDIGO DOS DISPOSITIVO COORDENADOR	50

1 INTRODUÇÃO

Para atender aos consumidores de forma eficiente e com qualidade, o setor de energia elétrica brasileiro precisa passar por uma modernização em sua atual infraestrutura de distribuição, isto vem ocorrendo com a implantação das redes inteligentes (*Smart Grids*) [4]. Basicamente a rede inteligente é um sistema de fornecimento de energia elétrica que utiliza sensores aliados a modernos sistemas de telecomunicação para conectar casas, escritórios e indústrias a centrais, permitindo a automação do sistema de distribuição e o monitoramento remoto do consumo de energia elétrica e de possíveis anomalias presentes na rede [1].

Podemos afirmar que um dos componentes mais importantes deste novo sistema é o medidor inteligente de energia, que progressivamente irá substituir os tradicionais medidores [5]. Estes novos medidores são dispositivos digitais capazes de coletar os dados de consumo e enviar automaticamente para o próprio consumidor e também para centrais garantindo monitoramento em tempo real, além de melhora no desempenho da rede.

Para a conexão com os medidores de cada residência é necessária uma rede com baixo consumo de energia, baixo custo e capacidade de suportar elevados números de dispositivos conectados. Dentro deste contexto se destaca o padrão ZigBee, desenvolvido pela ZigBee Alliance e definido sobre o padrão IEEE 802.15.4 para redes sem fio de curtas distâncias (PAN) [6]. O ZigBee é um padrão voltado para aplicações que necessitam de baixa taxa de dados, ou seja, aplicações de monitoramento e controle, por este motivo, pela sua simplicidade e baixo custo, esta tecnologia vem se mostrando a mais promissora para esta área.

Como a rede ZigBee se destina a aplicações em curtas distâncias, deve-se definir também um meio de comunicação para transporte dos dados até uma central que possa estar distante da rede que está sendo monitorada. Uma alternativa é o uso da tecnologia PLC (*Power Line Communication*), ou seja, comunicação pela própria rede elétrica de distribuição. A vantagem desta opção é utilizar a infraestrutura já existente, evitando assim novos gastos para implantação do sistema.

Baseado nestas informações, este projeto visa a implementação de uma rede sem fio, incluindo um medidor inteligente que permita a transmissão dos dados de consumo via rede elétrica para monitoramento em uma central distante.

1.1 Motivação

A implantação das redes inteligentes gera a necessidade do desenvolvimento de novos sistemas para medição e automação inteligente, que funcione de forma eficiente tanto para a distribuidora quanto para o cliente.

Por se tratar de uma ideia relativamente nova, as redes inteligentes ainda sofrem com uma falta de padronização nas soluções utilizadas pelas distribuidoras de energia elétrica, o que dificulta a interoperabilidade e a intercambialidade entre sistemas de diferentes fabricantes, ou seja, isso dificulta que equipamentos de diferentes fabricantes operem na mesma rede e além disso dificulta a possibilidade da troca dos equipamentos em uso por equipamentos equivalentes de outros fabricantes sem que haja perda de funcionalidade da rede.

Portanto, para evitar estes problemas, deve ser adotado pelas distribuidoras um padrão que seja eficiente e que atenda da melhor forma as diferentes características de cada unidade consumidora. Baseado nisso o ZigBee com baixo custo, aliado a vantagem do PLC de utilizar a infraestrutura existente para comunicações a longas distâncias surge como uma alternativa de padronização para a implantação dos sistemas de medição inteligente.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Implementar uma rede de sensores básicos para comunicação via tecnologia ZigBee com uma placa concentradora Arduino. Além disso, para a telecomunicação dos dados medidos, pretende-se utilizar a tecnologia de comunicação de dados via rede elétrica de baixa tensão.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do presente projeto são:

- Implementar uma rede de sensores básicos e posterior comunicação via tecnologia ZigBee até a plataforma de hardware livre Arduino;
- Realizar a transmissão e recepção via rede elétrica dos dados de consumo coletados utilizando um modem PLC.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

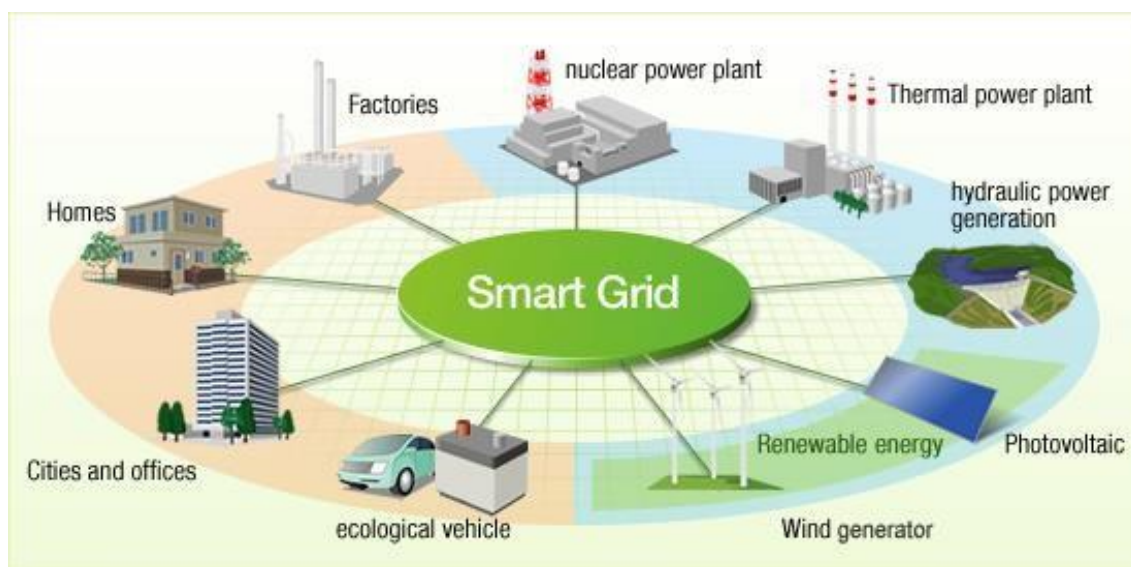
Este capítulo apresenta o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento deste trabalho, aprofundando os conhecimentos no conceito de redes inteligentes e nas tecnologias ZigBee e PLC

2.1 Redes inteligentes

As *Smart Grids* ou Redes inteligentes formam um novo conceito na distribuição de energia elétrica, fornecendo ao consumidor diversos benefícios que antes não eram possíveis no tradicional sistema de distribuição.

Neste novo padrão os fluxos de energia e de informações são bidirecionais (Figura 1), ou seja, o cliente deixa de ser apenas um consumidor como no sistema tradicional, podendo agora também gerar e fornecer energia à rede. Além disso, informações de consumo e qualidade de energia são enviadas em tempo real para uma central de monitoramento [2].

Figura 1 - Redes inteligentes



Fonte: [3]

Para que seja possível a troca de informações entre a concessionária e o consumidor, é preciso que os antigos medidores de energia sejam substituídos por modernos medidores, também conhecidos como medidores inteligentes [5]. Com estes novos equipamentos, usuários poderão acompanhar seu consumo em tempo real pela internet, o que pode resultar em um consumo de energia mais consciente e maior economia na fatura. As concessionárias poderão também otimizar o atendimento aos clientes, pois a tecnologia permite que a identificação de possíveis problemas seja mais rápida, além de poder fazer e desfazer ligações remotamente.

2.2 A Tecnologia ZigBee

O ZigBee foi desenvolvido pelo ZigBee Alliance, da qual fazem parte centenas de empresas da área de semicondutores e software. Formada em 2002, a ZigBee Alliance é uma organização sem fins lucrativos, cuja a meta é construir uma norma aberta com aplicações que permitam interoperabilidade entre diversos fabricantes e promover a tecnologia de produtos compatíveis com ZigBee [6].

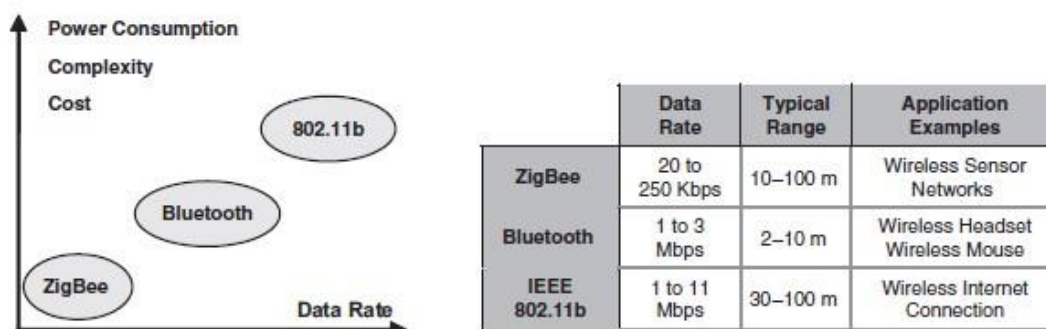
O Padrão ZigBee é uma tecnologia de comunicação para aplicações em pequenas distâncias e com baixas taxas de dados. Os dispositivos baseados nesse padrão operam com taxa de dados de 20Kb/s a 250Kb/s na banda ISM, utilizando basicamente três faixas de frequência: 868MHz, 915MHz e 2,4GHz [7].

Uma das principais características deste padrão de redes de comunicação é o fato dos dispositivos permanecerem ativos, transmitindo ou recebendo dados por um curto período de tempo. Na maior parte do tempo, os dispositivos permanecem em um modo de economia de energia, conhecido como *Sleep mode*. Como resultado os dispositivos em uma rede ZigBee podem funcionar anos sem que haja necessidade de troca da bateria.

O protocolo ZigBee é destinado a aplicações industriais, onde se deseja utilizar a tecnologia para monitoramento e controle. Devido a isto, os dispositivos são projetados para operarem em curtas distâncias e baixa taxa de dados. Como consequência destas características, o projeto resulta em um dispositivo simples e de

baixo custo quando comparado a outros padrões de redes de comunicação, como por exemplo o Bluetooth e o WiFi (802.11b). Uma comparação destas tecnologias é mostrada na Figura 2.

Figura 2 - Comparação entre redes sem fio



Fonte: [6]

2.2.1 Padrão IEEE 802.15.4

O padrão IEEE 802.15.4 foi criado pelo Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) [11] como padrão para redes de baixa velocidade e baixo consumo de energia. As redes IEEE 802.15.4 operam em 3 faixas de frequências diferentes, para atenderem as regulamentações da Europa, Japão, Canadá e EUA, além de trabalhar com dois tipos de modulação e diferentes taxas de transmissão. Na tabela 1 podemos ver um resumo das diferenças para cada região [7].

Tabela 1 – Resumo das diferenças para cada região

PHY (MHz)	Banda de frequência (MHz)	Parâmetros de espalhamento		Parâmetros dos dados		
		Taxa de espalhamento (kchip/s)	Modulação	Taxa de bit (kb/s)	Taxa de símbolo	Símbolos
868/915	868-868.6	300	BPSK	20	20	Binário
	902-928	600	BPSK	40	40	Binário
2450	2400-2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16 símbolos

Fonte: [13]

O protocolo IEEE 802.15.4 é responsável por implementar as camadas física e Medium Access Control (MAC), sendo neste caso as camadas superiores definidas pelo padrão ZigBee.

2.2.2 Camada Física

A camada PHY (IEEE 802.15.4) é o nível de camada mais baixo, nela são implementadas as funções que controlam a ativação e desativação do transceptor do rádio, a transmissão e a recepção dos dados através de um meio físico, fornecendo uma interface entre a camada MAC e o meio físico. Dentre suas funções estão ainda a seleção do canal, a detecção de energia (ED) e o LQI (Link Quality Indication). [12].

O LQI caracteriza a qualidade do sinal recebido. Esta qualidade pode ser baseada na potência do sinal recebido, na relação sinal-ruído (SNR), ou a combinação dos dois. O LQI é passado para a camada MAC e após é disponibilizado para as camadas superiores da rede.

A camada física utiliza a modulação DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) que incorpora em cada bit de dado um padrão de redundância e os espalha pela largura de banda utilizada (veja Tabela 1). Essa redundância permite não só que o dado seja identificado como pertencente a um determinado nó, como também, facilita a detecção de erros. Ao espalhar os dados em todas as frequências da banda, o sinal resultante se assemelha cada vez mais a um ruído, tornando-se mais robusto às interferências. Após ser feito a DSSS, o sinal é modulado em uma portadora para transmissão. [13]

Toda informação que é transmitida pelos dispositivos, está no formato de pacotes. O pacote da camada física consiste basicamente em três componentes: um sinal de sincronismo (SHR - Synchronization header), um sinal de informação, contendo o tamanho do quadro (PHR - PHY header) e o Payload, que carrega os dados das camadas superiores [13]. Podemos ver a estrutura geral do pacote na tabela 2.

Tabela 2 – Estrutura do pacote da camada física

Bytes	4	1	1	n
Camada Física	Sequência de Preâmbulo	Delimitador de início de quadro	Comprimento do quadro	MAC PDU
	SHR		PHR	
	6+n			
	PHY PDU			

Fonte: [13]

2.2.3 Camada MAC

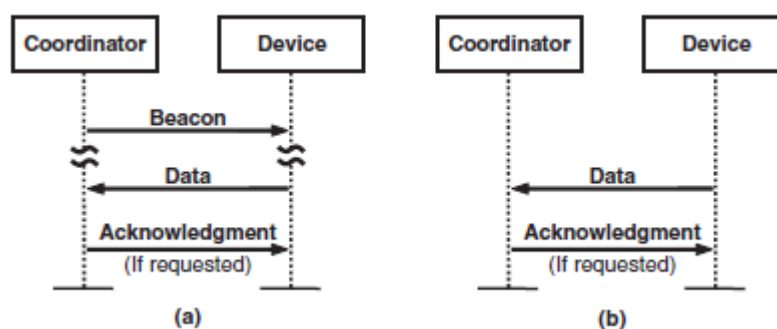
A principal função da camada MAC padronizada pelo IEEE 802.15.4 é estabelecer uma comunicação com a camada inferior e controlar o acesso aos canais RF [6]. Ela gera e reconhece os endereços, e verifica a sequência das estruturas de controle. A camada MAC também atua definindo o tipo dos dispositivos permitidos na rede, além de fazer o controle da sincronização e transmissão de Beacons [13]. Adicionalmente a estas funções, a camada MAC fornece ainda uma base para implementar mecanismos de segurança apropriados às aplicações.

2.2.3.1 Modo Beacon e não-Beacon

No modo de operação Beacon o coordenador transmite sinais, conhecidos como Beacon frames que são usados para sincronizar os clocks dos dispositivos na rede, de modo que cada dispositivo tenha um tempo específico garantido para transmitir, este período é chamado de GTS (Guaranteed Time Slot) [6]. Veja a figura 3.

Neste modo de funcionamento os nós da rede permanecem inativos entre os Beacon frames, ou seja, os dispositivos são ativados apenas para a sincronização e não realizam nenhuma outra tarefa, após o sincronismo, os dispositivos voltam para o estado inativo.

Figura 3 – Transferência de dados: a) modo Beacon, b) modo não-Beacon



Fonte: [6]

Uma rede cujo o coordenador não transmite um sinal Beacon é conhecida como uma rede não-Beacon. Uma rede não-Beacon não possui GTS e por isso não há também um período específico para se transmitir. Qualquer dispositivo poderá transmitir a todo momento, bastando que o canal esteja livre. O consumo de energia de uma rede não-Beacon, pode ser melhor do que em uma rede Beacon, visto que em uma rede não-Beacon, o dispositivo fica ativo menos vezes.

2.2.3.2 CSMA-CA

Para que a rede ZigBee funcione corretamente é necessário que haja um mecanismo que permita os dispositivos transmitirem dados a qualquer momento compartilhando o mesmo canal. No padrão IEEE 802.15.4 esse problema é resolvido através de um mecanismo chamado de CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance ou Acesso múltiplo com verificação de portadora com prevenção de colisão). Este mecanismo permite que o dispositivo verifique se o canal está livre antes de realizar uma transmissão. A verificação é feita através da análise da energia do canal selecionado [6].

Antes de transmitir qualquer tipo de dados o dispositivo ZigBee entra em modo de recepção e obtém o sinal com nível de energia em determinado canal, esta ferramenta é conhecida como detecção de energia (ED) [13]. O dispositivo não decodifica o sinal

recebido, ou seja, essa etapa apenas identifica se o canal está livre, mas não identifica se é um sinal do ZigBee ou um ruído nesta faixa de frequência determinada.

Caso o canal esteja ocupado, o dispositivo aguarda por um período de tempo e analisa novamente a energia do canal. Este procedimento é repetido diversas vezes, por uma quantidade máxima definida pelo usuário, até que o canal esteja livre para realizar a transmissão.

Ambos os modos, Beacon e não-Beacon utilizam o método CSMA-CA para verificar se o canal está livre. Porém cada modo utiliza algoritmos CSMA diferentes: slotted e unslotted [14].

- Slotted CSMA-CA: Algoritmo utilizado por dispositivos tentando acessar o canal no período CAP do sinal Beacon, quando há disputa pelo acesso ao canal.
- Unslotted CSMA-CA: usado para acessar o canal em modo não-Beacon, onde não há sinais Beacon enviados pelo coordenador. Os dispositivos poderão tentar ocupar o canal de comunicação a qualquer momento, utilizando o algoritmo Unslotted CSMA-CA.

2.2.4 Camada de Rede

A camada de rede (NWK), implementada pelo padrão ZigBee, está entre a camada de aplicação e a camada MAC e tem como objetivo principal cuidar do nível de rede relativo a comunicação. As principais funções desta camada são: começar uma nova rede, configurar uma rede, juntar-se ou sair de uma rede, endereçamento e roteamento [15]. A camada de rede deve manter todas as informações sobre os nós contidos na rede, para que a rede se mantenha dinâmica. Além disso uma importante função desta camada está relacionada à segurança dos dados transmitidos, pois nesta camada é adicionada segurança ao Payload, encriptando a mensagem.

2.2.5 Camada de aplicação

A camada de aplicação (APL), assegura uma correta gestão e suporte para as diversas aplicações. Cada aplicação possui um código que é escrito dentro do objeto do dispositivo ZigBee (ZDO) [15]. Nesta camada são definidas as propriedades e os parâmetros da rede, incluindo a especificação do tipo dos dispositivos, as funções de segurança da rede e o comportamento da rede para cada evento do sistema.

Esta camada conta ainda com a subcamada de suporte à aplicação (APS), que forma o nível baixo da camada de aplicação. A descoberta da vizinhança dos dispositivos e as ligações são feitas nesta camada APS. Além disso é responsável também por habilitar a funcionalidade de modificar a rede para o tipo malha e encaminhar as mensagens através dos dispositivos que não estão habilitados para se comunicarem diretamente [14].

2.2.6 Estrutura da rede

A camada de aplicação define dois tipos de dispositivos físicos: o Full Function Device (FFD), que é responsável pelo roteamento na rede, sendo que um nó FFD é utilizado como coordenador da rede, controlando a topologia e endereçamento dos nós e também como roteador, fazendo o encaminhamento de mensagens; e o Reduced Function Device (RFD), que é um dispositivo de baixo custo, não faz roteamento e só pode se conectar a um nó FFD de cada vez [14].

O roteamento permite que um nó encaminhe uma mensagem de um nó RFD ou FFD para outros nós FFD até o nó coordenador e normalmente tanto os nós FFD para roteamento quanto os nós FFD coordenadores necessitam de uma fonte de energia constante, pois necessitam estar ativos a todo o momento para a transmissão de mensagens, diferente dos nós RFD que normalmente são alimentados por baterias e necessitam economizar o máximo de energia possível.

A rede ZigBee, diferencia os dispositivos em três modos, com relação a função que desempenha na rede de comunicação: Coordenador, Roteador e End-device. As características de cada um destes modos são descritos na tabela [15]:

Tabela 3 – Tipo de dispositivos

DISPOSITIVO	TIPO DE DISPOSITIVO FÍSICO ASSOCIADO	FUNÇÃO
Coordenador	FFD	Inicia a rede, retransmite mensagens, permite que outros nós se juntem a rede, estabelece o período permitido para transmissão.
Roteador	FFD	Retransmite mensagens, junta-se a uma rede existente, permite que outros nós se juntem a rede, pode funcionar como End-Device.
End-Device	RFD	Junta-se a uma rede existente, normalmente é operado à bateria, normalmente entra em modo de suspensão, tem capacidade de processamento limitada.

Fonte: Produção do próprio autor.

2.2.7 Topologia da rede

A rede ZigBee permite três tipos diferentes de topologias de rede: estrela, árvore e malha. A topologia está relacionada à forma como os dispositivos se agrupam em uma rede para se comunicarem [6].

- Estrela: Nesta topologia, o Coordenador assume o papel central de comunicação direta com todos os dispositivos End-devices, sendo, portanto, o Coordenador que inicia e mantém os dispositivos na rede. Toda a informação em circulação na rede passa pelo nó Coordenador. Veja a figura 4.

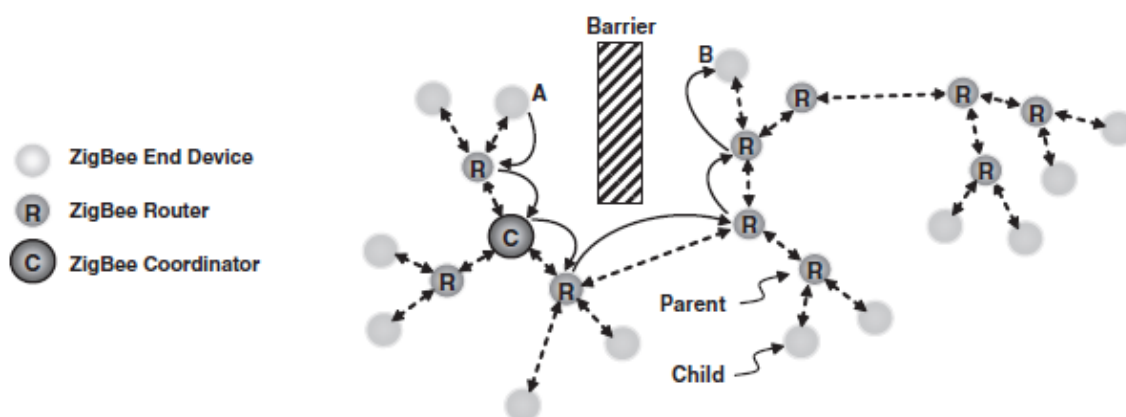
Figura 4 – Topologia estrela



Fonte: [6]

- **Árvore:** Nesta topologia o dispositivo Coordenador é conectado a dispositivos roteadores, que por sua vez são conectados a outros dispositivos roteadores ou End-Devices. A distribuição de dados e mensagens de controle ocorrem numa estrutura hierárquica, onde o Coordenador assume o papel de nó central da rede. Veja a figura 5.

Figura 5 – Topologia Arvore

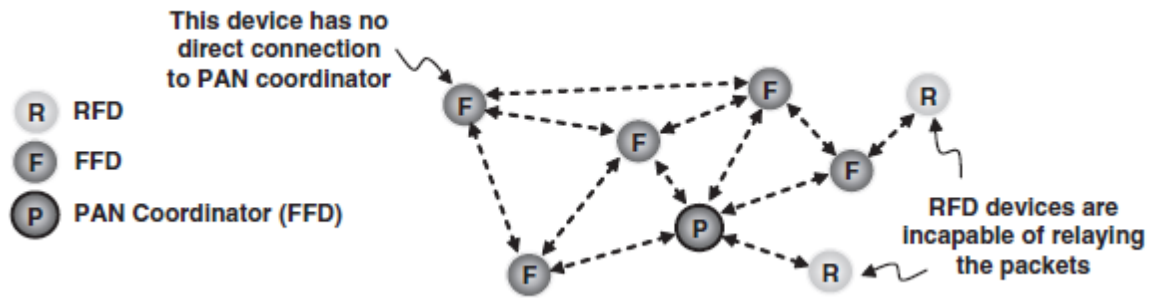


Fonte: [6]

- **Malha:** A topologia em malha é semelhante a topologia em árvores, entretanto os dispositivos do tipo FFD (Coordenadores/Roteadores) são livres para se comunicar com outro dispositivo FFD. Isto permite, quando necessária, a expansão

física da rede (maior alcance). O Coordenador regista toda a entrada e saída de dispositivos, mas não assume um papel tão preponderante em termos de fluxo de informação como nas configurações anteriores. Veja a figura 6.

Figura 6 – Topologia Malha

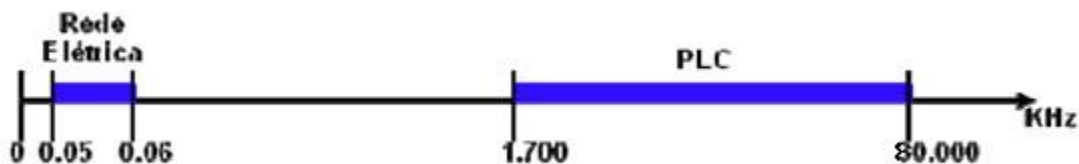


Fonte: [6]

2.3 Transmissão de dados via rede elétrica

O PLC (*Power Line Communication*) é uma tecnologia de telecomunicação baseado no transporte de dados através da rede elétrica [10]. A comunicação por este meio é possível, pois enquanto a rede elétrica opera na faixa de frequência de 50Hz ou 60Hz, a transferência de dados ocorre na faixa de 1,7MHz a 80 MHz (Figura 7), sendo assim há pouca interferência da energia elétrica sobre a transmissão de dados.

Figura 7- Banda de frequência da tecnologia PLC



Fonte: [8]

A principal vantagem da rede PLC é o fato de utilizar a infraestrutura física existente. Fazer uso da própria rede de transmissão de energia elétrica para transmitir dados de monitoração de consumo, pode representar uma grande economia, pois não é necessário um cabeamento adicional [9].

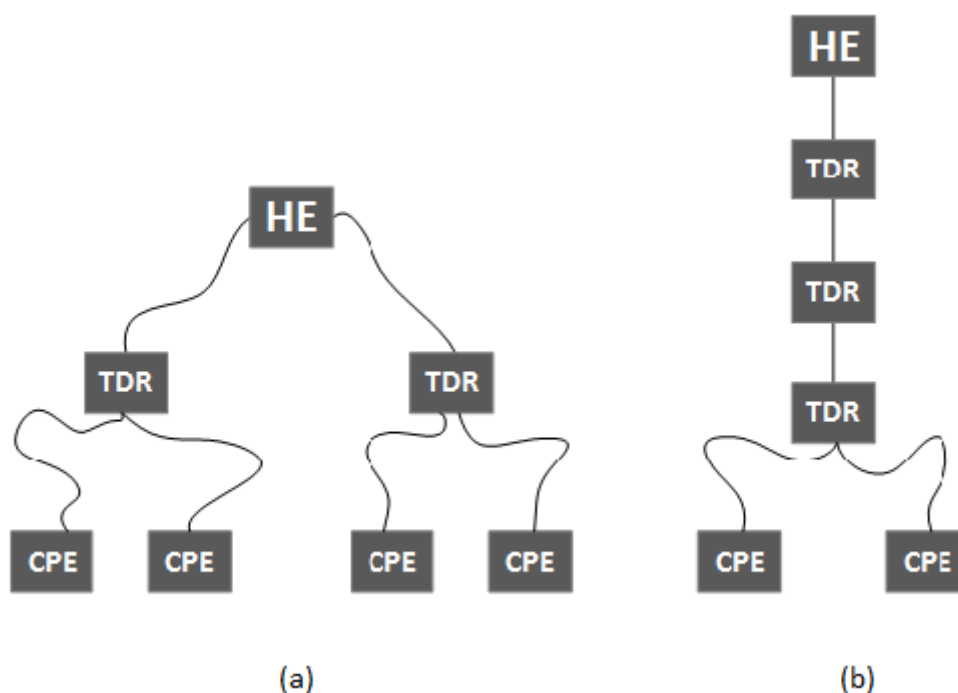
Entretanto, transmitir dados através da rede elétrica pode trazer algumas desvantagens devido às características do meio de transmissão. Entre elas, temos atenuação de acordo com a frequência, atraso, ruído e falta de segurança [17].

A tecnologia PLC também permite a transmissão de dados em banda larga via rede elétrica. Esta tecnologia é conhecida como BPL (Broadband Power Line) e fornece maiores taxas de transmissão (acima dos 2 Mbps) do que a tecnologia destinada para banda estreita [17]. Esta tecnologia poderia ser usada para através do meio físico já existente, fornecer mais serviços ao usuário, como por exemplo internet banda larga. Entretanto a transmissão pode ser seriamente afetada devido ao meio utilizado não ser preparado para transmissão de dados, como é o caso do sistema de distribuição brasileiro.

Para se adaptar melhor ao meio de transmissão, os novos equipamentos PLC estão utilizando a tecnologia OFDM, pois reduz os efeitos de multipercurso e também a interferência em ondas de rádio graças à diminuição da densidade espectral da potência transmitida. A modulação OFDM espalha o sinal em uma largura de banda grande, reduzindo a quantidade de potência injetada sobre uma única frequência [17].

A rede PLC de banda larga (BPL), pode ser implementada utilizando a topologia do tipo árvore. Nesta topologia há três tipos de dispositivos: o HE (Head End), que concentra e comanda todos os fluxos de dados; o TDR (Time Division Repeater), utilizado para reforçar o sinal; e o CPE (Customer Premise Equipment), que são os terminais dos usuários. O HE é responsável por todos os recursos da rede para atender todas as células BPL, sendo este terminal central o mestre para qualquer outro terminal que se conecte a rede [17]. A figura 8 mostra uma representação desta topologia.

Figura 8 - Topologia usada em redes BPL



Fonte: [17]

2.4 Cálculo do consumo de energia elétrica

Conhecer o consumo energético de um equipamento é fundamental tanto para um engenheiro que deseja projetar ou analisar algo, como também para pessoas que não sejam desta área, pois conhecendo o consumo de energia de seus eletrodomésticos é possível fazer um melhor controle de gasto com a conta de energia.

De forma simples podemos definir energia como a capacidade de produzir trabalho. Quando se fala em energia elétrica, dizemos que praticamente toda ela é fornecida na forma de tensões e correntes senoidais que chegam às nossas residências através dos sistemas de distribuição. Por isso é importante entender como é realizado em correntes senoidais o cálculo de potência (W), que nada mais é que a variação da energia (J) liberada ou absorvida em função da variação do tempo (s).

Sendo assim a Energia consumida ou fornecida será definida como:

$$E = \text{potencia} \times \text{tempo}$$

2.4.1 Potência em circuitos de corrente alternada

Podemos definir a potência instantânea como:

$$p(t) = v(t) \times i(t) \quad (1)$$

Sendo que,

$$v(t) = V \sin(\omega t) \quad (2)$$

$$i(t) = I \cos(\omega t - \theta) \quad (3)$$

Onde $v(t)$ e $i(t)$ representam respectivamente a tensão instantânea e a corrente instantânea, V e I a tensão e a corrente de pico, ω a frequência angular e θ a diferença de fase entre $v(t)$ e $i(t)$.

Substituindo as equações 2 e 3 na equação 1, temos:

$$p(t) = v(t) \times i(t) = V \sin(\omega t) \times I \cos(\omega t - \theta) \quad (4)$$

Simplificando a equação 4, obtém-se:

$$p(t) = \frac{VI}{2} (\cos(\theta) - \cos(2\omega t - \theta)) \quad (5)$$

Entretanto este valor muda a todo o instante, sendo mais conveniente adotar um valor médio:

$$P_{media} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} p(t) dt \quad (6)$$

Aplicando o critério do valor eficaz ou Root Mean Square, obtém-se:

$$P_{media} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} p(t) dt = V_{RMS} \times I_{RMS} \times \cos(\theta) \quad (7)$$

A utilização do valor eficaz de tensões e correntes senoidais em cálculo de potência é tão ampla que os valores nominais de tensões e correntes de circuitos e equipamentos elétricos, são dados em termos de valores eficazes. Por exemplo os

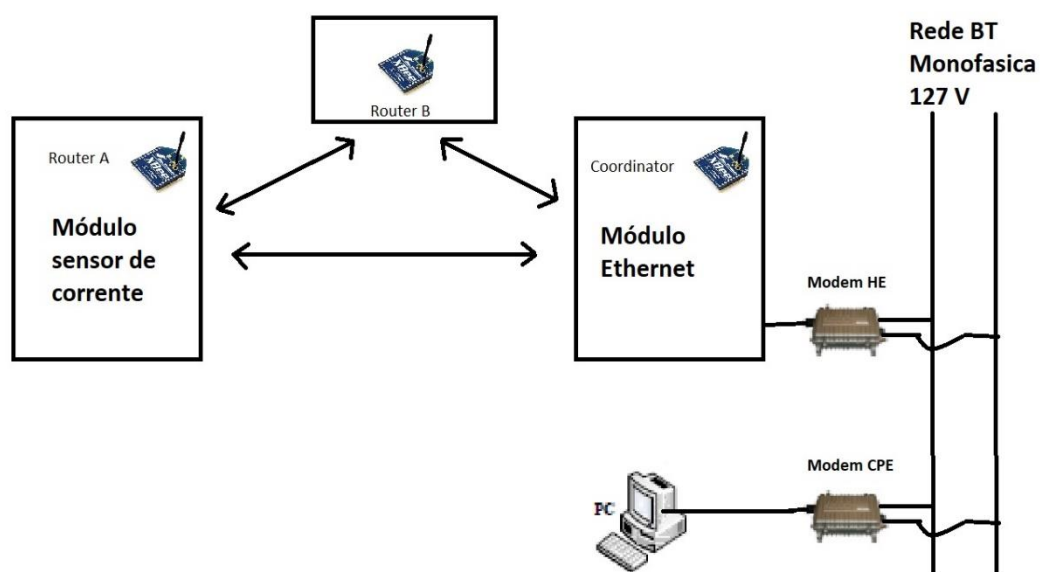
valores de tensão que são utilizados nas residências, 127 V ou 220 V, são os valores eficazes das tensões senoidais fornecida pela concessionária.

A energia consumida pelos eletrodomésticos é tarifada pela concessionária de energia elétrica e é especificada em termos da potência média, dada em quilowatts-horas (kWh).

3 METODOLOGIA

O sistema de medição proposto é representado na figura 9. O modelo funciona da seguinte forma: o sensor preso ao fio coleta os valores da corrente, que são processados pelo Arduino e então transmitidos através da rede ZigBee. Estes dados são recebidos por outro Arduino com um dispositivo pertencente a rede, que direciona toda informação para um modem PLC, através de uma porta Ethernet. Os dados então são recebidos por um computador ligado a outro modem PLC, sendo a informação de consumo exibida na tela do computador.

Figura 9 – Diagrama do sistema



Fonte: Produção do próprio autor.

3.1 Implementação do medidor de consumo de energia elétrica

O sistema responsável pela medição do consumo de energia em uma residência é basicamente composto pelo sensor de corrente não invasivo, SCT-013, pelo circuito de condicionamento de sinal e pelo Arduino, que fará o processamento dos dados.

Este sistema mede simplesmente a corrente, pois visando diminuir o custo do projeto, utiliza-se um valor fixo para tensão de 127V, e calcula-se a potência aparente. Apesar de não ser tão preciso quanto um medidor que também mede a tensão, assim como a corrente, é um método que fornece um valor bem próximo ao real, visto que o valor da tensão varia pouco.

3.1.1 Sensor de corrente SCT013

Para o monitoramento foi utilizado o sensor de Corrente SCT013 da YHDC, desenvolvido para aplicação em diversos circuitos elétricos. Este Sensor trabalha com correntes de até 100A e sua aplicação é feita de forma não invasiva, ou seja, o sensor envolve o condutor, não sendo necessário ligá-lo em série com o circuito a ser medido.

Este sensor, compatível com Arduino, possui dois fios que estão ligados diretamente à um plug P2, entretanto estes fios podem ser facilmente retirados e utilizados de forma direta no projeto.

Figura 10 - Sensor SCT013



Fonte: YHDC, 2015

A medição feita através deste componente gera na saída um sinal de corrente. Portanto é necessário um circuito de condicionamento de sinal, contendo um “Burden resistor” (resistor de carga) que gera a variação de tensão necessária para a leitura do Arduino. O resistor de carga pode ser dimensionado a partir da seguinte equação:

$$R_c = \frac{V_{ref} \times N}{2\sqrt{2} I_{max}} \quad (8)$$

Onde,

V_{ref} - Tensão de referência do Arduino (5V)

N - Número de voltas do CT (2000)

I_{max} - Corrente máxima no primário (100 A)

Substituindo estes dados na fórmula encontramos um valor de $R_c = 35,4\Omega$, entretanto, foi utilizado um resistor de 33Ω , por ser o valor comercial de resistor mais próximo.

Para que o sensor seja utilizado corretamente é necessário que se faça a calibração do componente. Esta calibração visa corrigir erros na leitura da corrente causada por alguns fatores físicos. Dentre eles, podemos destacar: a razão de transferência de um transformador de corrente, a resistência de carga e a precisão que a tensão de carga é medida.

A calibração pode ser feita alterando-se uma constante que é inserida no código de programação. O programa é baseado na biblioteca EmonLib, criada pelo Open Energy Monitor, que disponibiliza diversas funções utilizadas para o cálculo de consumo de energia.

Esta constante de calibração está relacionada à: resolução da amostragem, corrente máxima do primário (100 A), relação de transformação do transformador de corrente e valor do resistor de carga. A equação que define essa constante é dada por:

$$K = \frac{\frac{I_{max}}{a}}{R_c} \quad (9)$$

Onde,

K - Constante de calibração a ser inserida no código fonte;

I_{max} - Corrente máxima no primário; (100 A)

a - Relação de transformação do sensor; (0,05)

R_c - Resistor de carga da placa de condicionamento do sinal. (33Ω)

Considerando o valor do resistor de carga 33Ω como já foi calculado e substituindo os demais valores na equação, encontramos uma constante de calibração de 60,6. Entretanto, foi feito um ajuste fino com o auxílio de um amperímetro, ajustando a constante até que o valor mostrado pelo sensor ficasse o mais próximo possível do valor mostrado pelo amperímetro. Após o ajuste fixou-se a constante de calibração com o valor de 55.

3.2 Rede ZigBee

A rede ZigBee proposta neste trabalho, funciona com 2 ou 3 dispositivos, em topologia malha: um dispositivo com o sensor de corrente na função roteador, um dispositivo sem sensor, como roteador e outro funcionando como dispositivo coordenador, sendo este último responsável por enviar as informações através do modem PLC.

Os testes na rede ZigBee foram realizados em ambiente residencial, posicionando os dispositivos em diversos cômodos da casa, medindo o consumo de equipamentos eletrodomésticos, eletrônicos e também o consumo do padrão entrada da residência, com rede monofásica. Veja a figura 11.

Figura 11 - Sensor ligado a caixa de distribuição



Fonte: Produção do próprio autor.

Além dos testes em ambiente interno, também foram realizados testes em ambientes externos, simulando um sistema de medição de consumo em uma Smart Grid, onde poderiam ser medidos os consumos das residências do local. Todos os testes em ambientes residenciais e externos foram feitos sem a inclusão da rede PLC. Os testes integrando a rede ZigBee com os modems PLC foram realizados nos laboratórios do CTII na UFES.

3.2.1 Rádio XBee

O rádio XBee, foi o dispositivo de comunicação ZigBee utilizado na rede de sensores deste trabalho. Os módulos XBee foram escolhidos pois são compatíveis com a plataforma Arduino e são facilmente encontrados no mercado.

Figura 12 - Módulo XBee



Fonte: [18]

Os módulos de comunicação XBee são fabricados pela Digi International, que disponibiliza alguns modelos de rádio XBee. Entretanto o modelo utilizado neste trabalho é o Series 2, que implementa o padrão ZigBee, e permite a utilização de redes do tipo Mesh, ao contrário do modelo anterior, o Series 1 [18].

Para que haja um funcionamento adequado, além do módulo XBee, é necessária uma placa denominada XBee Shield, que permite a interligação do Arduino ao rádio XBee. Esta placa é sobreposta à placa principal, fornecendo o encaixe para uso do módulo,

mas mantendo todas as configurações de entrada e saída do Arduino. A placa também possui um regulador de tensão, para manter os 3,3 V necessários para o funcionamento do rádio XBee, além de um LED indicador do estado da conexão da rede, conectado ao pino 15 do módulo.

Figura 13 - Shield XBee

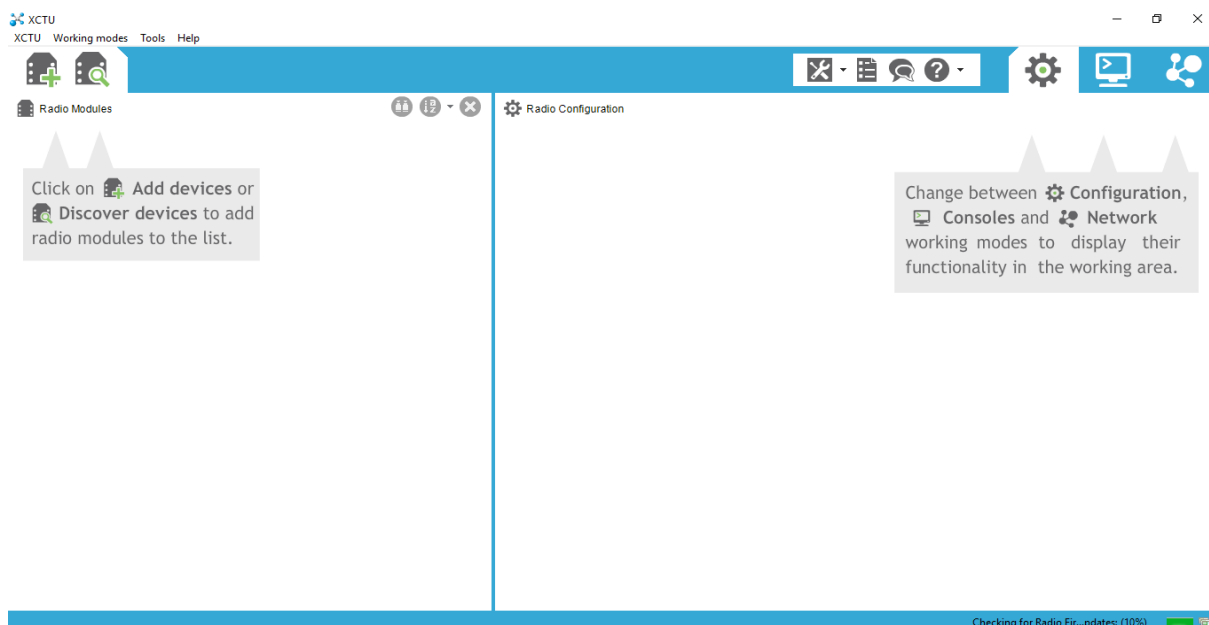


Fonte: [18]

3.2.2 Configurações do XBee

O módulo XBee é configurado através do programa X-CTU [18], desenvolvido pelo fabricante do rádio XBee. Os parâmetros de configuração são divididos em grupos, como endereçamento, rede, segurança, interface de RF, interface serial, comandos de E/S, diagnóstico, comandos de dormiência e comandos de execução, e podem ser configurados tanto pelo modo API quanto pelo modo AT.

Figura 14 - Programa XCTU



Fonte: Produção do próprio autor.

Os modos Transparent Operation (AT) e Application Programming Interface (API), são os dois modos de operação de transmissão e recepção de dados nos rádios XBee. No modo AT, os dados são enviados e recebidos diretamente pela porta serial, tendo uma interface simples e sendo mais fácil o desenvolvimento de aplicações, bastando a aplicação se conectar à porta serial do módulo e enviar os dados utilizando comandos AT. Este modo, apesar de simples, não é escalável para enviar dados para múltiplos destinatários e também não permite o envio de configurações remotas de módulos.

Neste trabalho, é utilizada a segunda opção, o modo API, baseado no envio e recepção de quadro de dados, especificando como comandos, respostas de comandos e mensagens sobre o estado de funcionamento do módulo são enviados e recebidos, permitindo um aumento na escalabilidade da rede. Comandos AT também podem ser enviados e recebidos através do modo API, permitindo a coexistência dos dois modos em uma rede.

Além das opções de configuração o programa X-CTU inclui ferramentas como o Range Test, para testar a conexão entre módulos, o Terminal, utilizado para verificar

a recepção de dados da porta serial e interagir com o módulo no modo AT e também o Modem Configuration, onde são realizadas as configurações dos parâmetros do modem, atualização e escolha do firmware, do conjunto de funções do módulo (coordenador, roteador ou nó sensor) e salvar e recuperar esses parâmetros em arquivo.

3.3 Rede PLC

Os testes utilizando a tecnologia PLC em baixa tensão foram realizados nos laboratórios do CT II, na UFES, utilizando os modems PLC pertencentes ao LABTEL. A rede foi formada com comunicação ponto a ponto, onde o Módulo Arduino com o dispositivo coordenador foi conectado ao modem HE (veja a figura 15) e o computador que exibe as informações de consumo foi ligado ao modem CPE. Para os testes, o módulo com sensor de corrente foi utilizado para medir o consumo de um ar-condicionado da sala. Para a coleta dos dados, o osciloscópio foi ligado na tomada de entrada do modem CPE, onde foi possível coletar o sinal no domínio do Tempo e a banda de frequência utilizada.

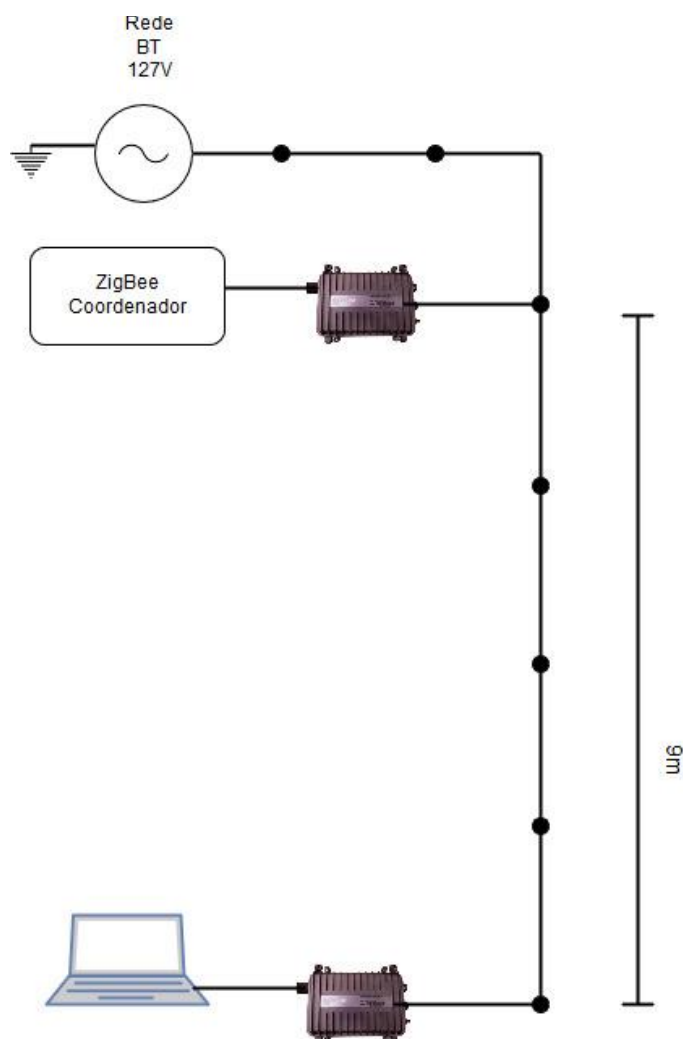
Os experimentos foram feitos na sala do NIDA (Núcleo de Inovação Desenvolvimento e Pesquisa Pró África), o diagrama representando a rede elétrica da sala é mostrada na figura 16.

Figura 15 - Arduino ligado ao modem CPL



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 16 - Rede elétrica da sala do NIDA



Fonte: Produção do próprio autor.

4 RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Análise do medidor de consumo

Para verificar o funcionamento do sensor foi utilizando um ventilador de 30w de potência, e medido sua corrente para cálculo de potência e consumo. Foi utilizado um amperímetro alicate para verificar se o sensor era capaz de mostrar valores próximos ao real. Em testes realizados (veja a imagem 17) foi possível observar que o sensor funcionava mostrando o mesmo valor que o amperímetro quase todo o tempo, visto que as vezes ocorriam pequenas variações de aproximadamente 0,02 A, o que neste

caso, em que a corrente medida estava na faixa de 0,3 A poderia representar um erro de aproximadamente 6%.

Figura 17 - Verificação do sensor de corrente



Fonte: Produção do próprio autor.

Realizou-se também, o experimento de monitorar o consumo de uma residência. Para este teste o medidor funcionou por um período de 2h, das 19:00h até as 21:00h, coletando os valores de corrente e calculando o consumo neste período. Os gráficos representando a variação de consumo e potência são mostrados nas figuras.

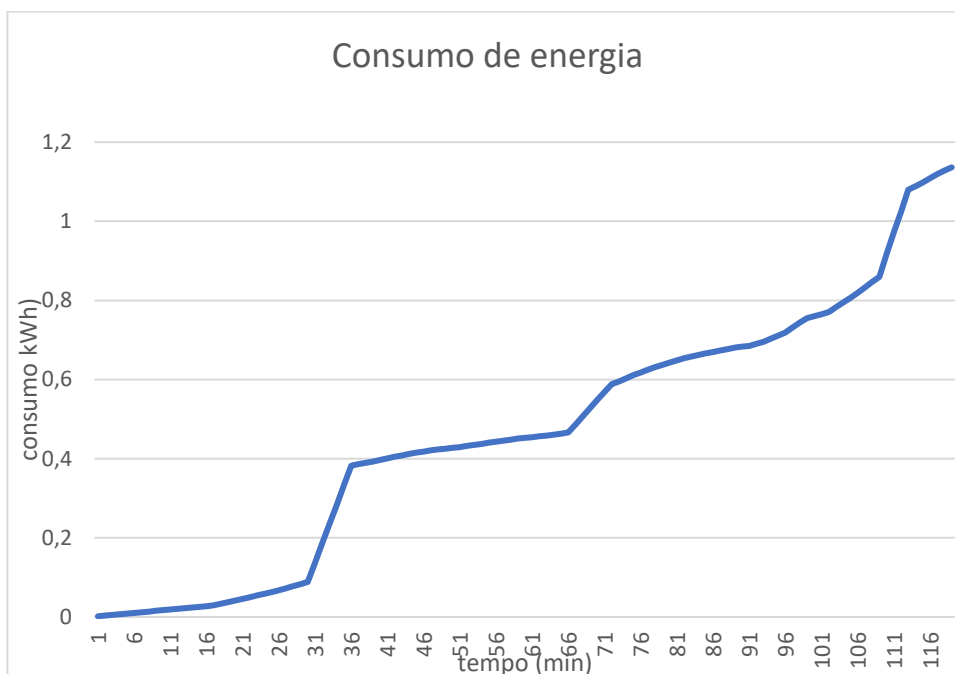
Gráfico 1 – Potência dissipada durante 2 horas



Fonte: Produção do próprio autor.

Analisando o gráfico nota-se que em dois momentos há picos na potência dissipada, por volta de 30 min e 110 min. Estes momentos correspondem aos horários em que foi utilizado o chuveiro elétrico na residência. O chuveiro de 4,6 kW foi utilizado na potência média, o que corresponde a aproximadamente 2,3 kW. No gráfico percebe-se justamente um aumento de cerca de 2,3 kW na potência. Podemos afirmar que o sensor se comportou de maneira esperada, até mesmo para medições envolvendo valores maiores de corrente. Além disso percebe-se que o gráfico de consumo (veja Gráfico 2) sobe de maneira mais acentuada nestes dois pontos, o que já era esperado, visto que houve um acréscimo considerável na potência nestes instantes.

Gráfico 2 – Consumo de energia medido durante 2 horas



Fonte: Produção do próprio autor.

4.2 Análise da rede ZigBee

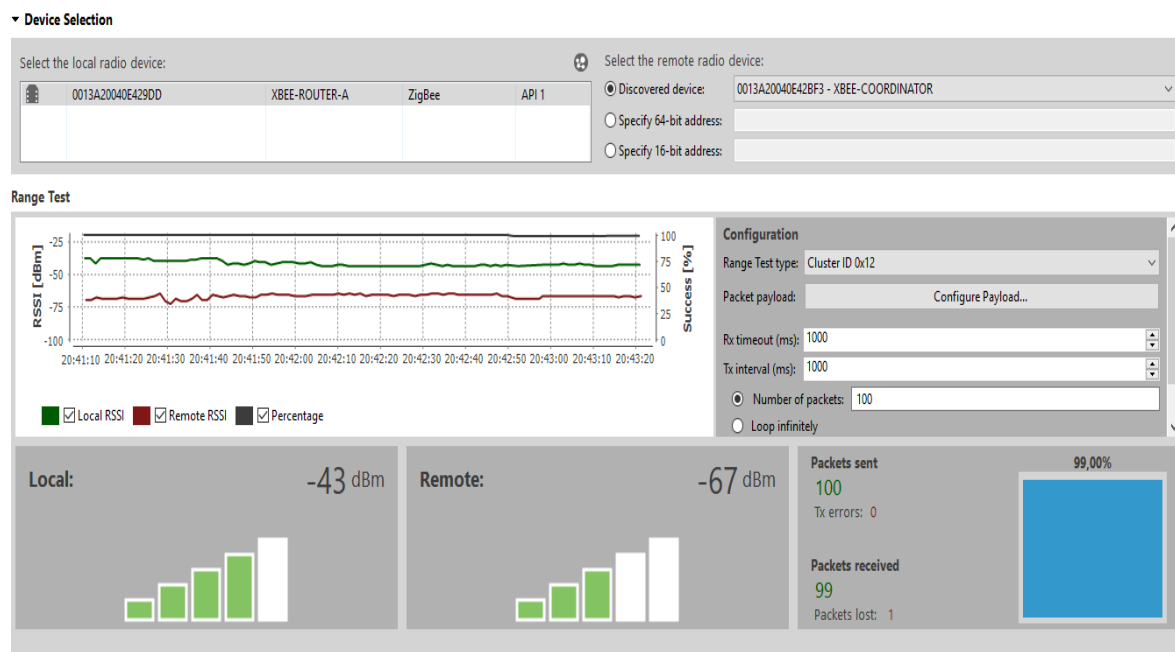
Para os testes com a rede ZigBee, inicialmente foi testado uma rede ponto a ponto entre um nó roteador e um nó coordenador. Parte dos testes foram realizados em ambientes internos, com paredes, dentro de uma residência e dentro do CT II na UFES. A outra parte dos experimentos foi realizada na rua, a fim de se verificar se era possível manter a comunicação em distâncias maiores.

Com os testes realizados em ambiente interno foi possível verificar, que para distâncias com raio de até 15m o sistema funcionava corretamente, atualizando os dados de consumo de maneira correta. Para distâncias acima de 15m, começam a ocorrer falhas no sistema, fazendo com que a atualização nos valores de consumo não ocorra de maneira correta.

O software X-CTU, disponibiliza uma ferramenta capaz de verificar a intensidade do sinal, verificando também a quantidade de pacotes que se perde na comunicação. A

figura 18 mostra a intensidade do sinal entre dois nós em uma distância de aproximadamente 10m. Nota-se que dos 100 pacotes de teste enviados apenas um foi perdido, tornando assim a comunicação nesta distancia viável.

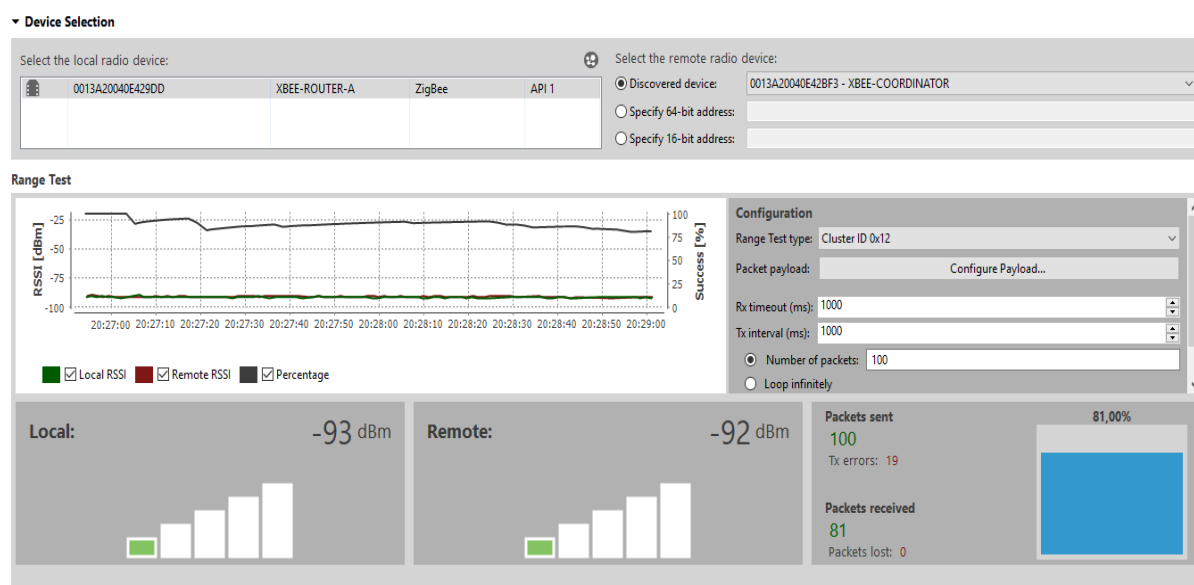
Figura 18 - RSSI para dispositivos afastados por 10m



Fonte: Produção do próprio autor.

A figura 19 mostra a intensidade do sinal com os dispositivos afastados entre 15m e 20m. Pode se notar que há um decréscimo considerável na potência do sinal e além disso apenas 81% dos pacotes foram transmitidos corretamente. Sendo assim para ambientes internos a medição de consumo em distâncias acima de 15m podem não ser corretas, visto que há muitas perdas de pacotes. Uma solução para este problema foi adicionar um terceiro módulo ZigBee, funcionando como roteador, este módulo funcionou como um repetidor, fazendo com que os dados chegassem ao dispositivo coordenador.

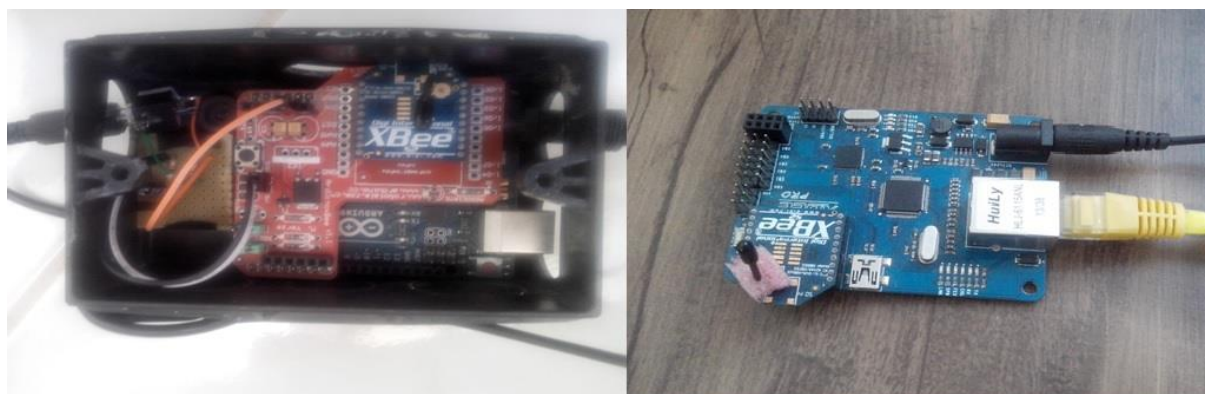
Figura 19 - RSSI para dispositivos afastados em mais de 15m



Fonte: Produção do próprio autor.

Sabendo que a rede funcionou de maneira esperada em ambiente interno, o próximo passo foi verificar o comportamento de rede em ambiente externo, com relação a distância entre os nós. Pode-se observar que em ambientes abertos, sem obstáculos, foi possível atingir distâncias superiores a 50m sem perdas de pacotes. Desta forma foi possível confirmar que o dispositivo funcionaria de maneira adequada caso fosse implantado em uma rede Smart Grid. Pois o dispositivo deve ser capaz de se comunicar com outros nós da rede mais distantes, que poderiam estar presentes em outras residências ou em postes da rua.

Figura 20 - Dispositivos ZigBee utilizados

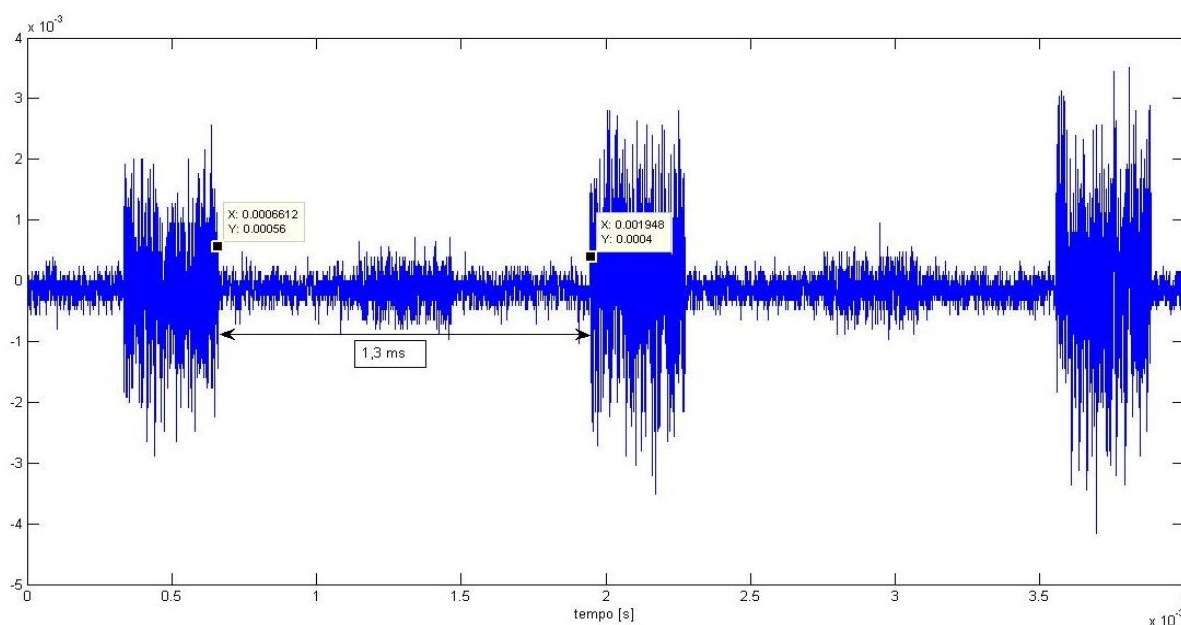


Fonte: Produção do próprio autor.

4.3 Análise da comunicação PLC

Com o sistema proposto em funcionamento, foram coletados na tomada de entrada do modem CPE os sinais no domínio da frequência e no domínio do tempo, correspondentes ao tráfego de dados desta rede. As figuras 21 e 22 mostram o sinal no domínio do tempo.

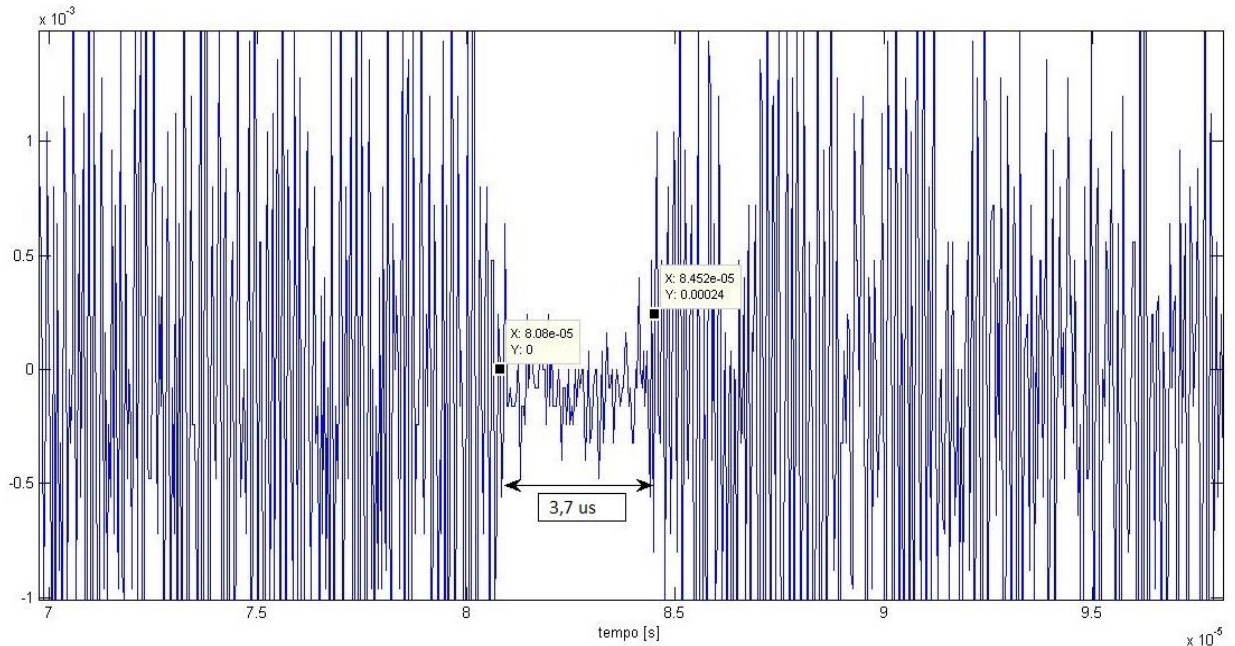
Figura 21 - Sinal no domínio do tempo



Fonte: Produção do próprio autor.

Pode-se perceber na figura 21 uma sequência contínua com diversos pacotes de dados sendo transmitidos. Estes pacotes estão espaçados no tempo por aproximadamente 1,3 ms. Aproximando o sinal com o zoom, percebe-se que o sinal contendo os dados é dividido em duas partes separadas em aproximadamente 3,7 μ s, conforme mostra a figura 22.

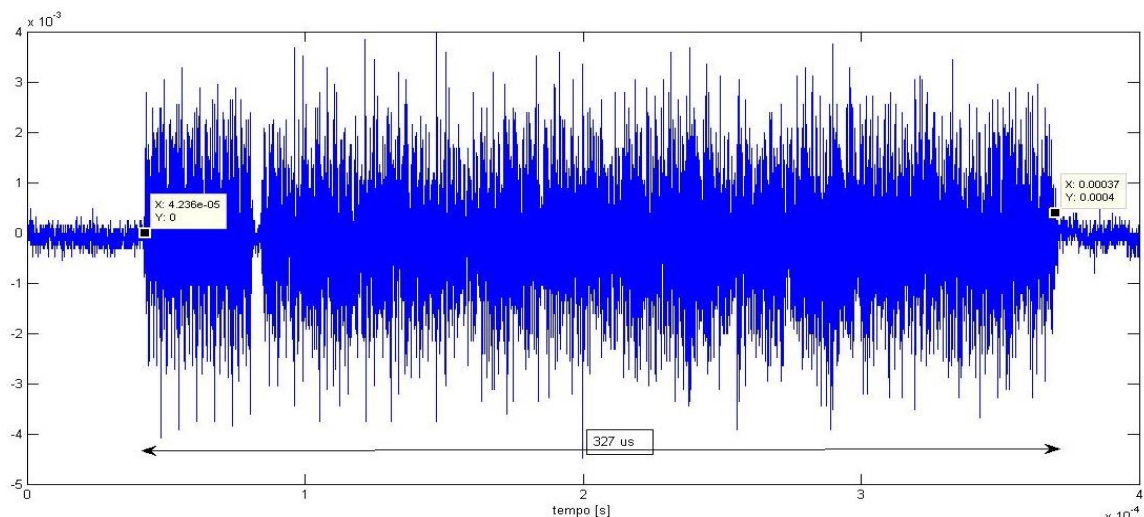
Figura 22 - Sinal com espaçamento entre SOT e PDU



Fonte: Produção do próprio autor.

Esta primeira parte do sinal corresponde a um Payload, contendo símbolos de sincronismo e de reconhecimento do canal. Com o sinal ampliado podemos perceber os pacotes conhecidos como SOT (Start of Communications) com duração aproximada de $38 \mu s$ e composta por 6 símbolos OFDM. Estes pacotes são transmitidos antes do símbolo de sincronismo e utilizados para o mecanismo de controle automático de ganho [17]. Nota-se ainda que a duração de um sinal composto por SOT+PDU é de aproximadamente $327 \mu s$ conforme a figura 23.

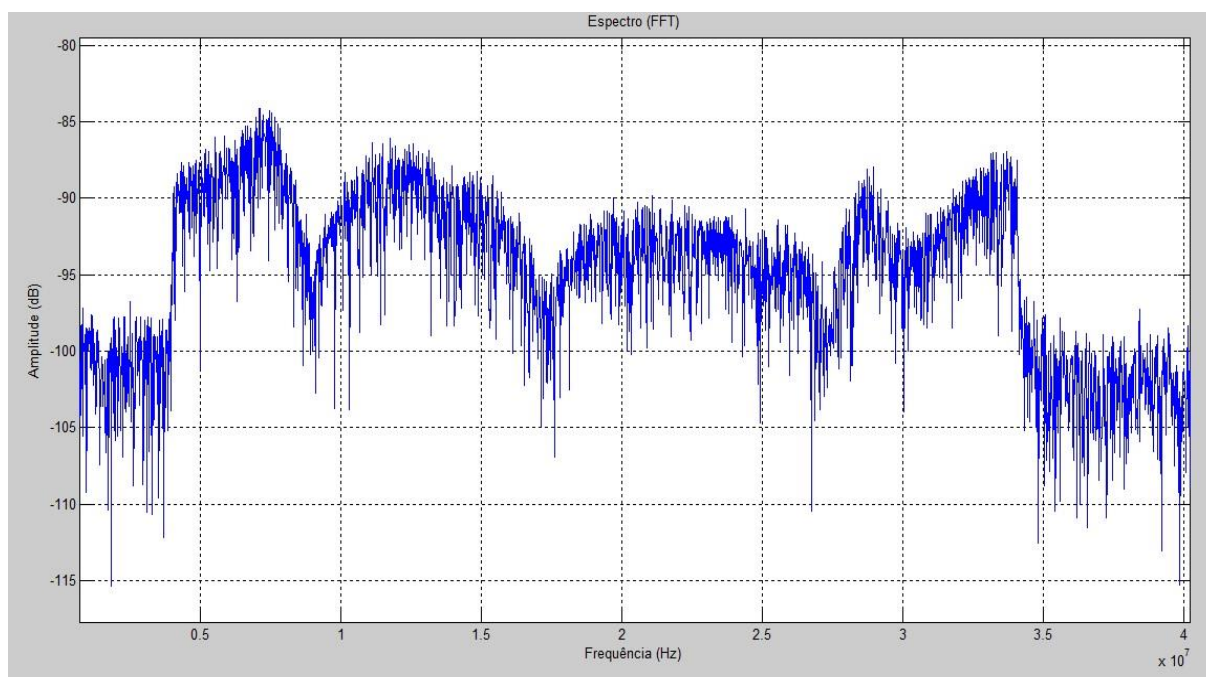
Figura 23 - Sinal no domínio do tempo com SOT e PDU



Fonte: Produção do próprio autor.

Na figura 24 vemos o espectro do sinal com largura de banda de 30 Mhz, obtido na entrada do modem CPE. O espectro ocupado pelo sinal que utiliza multiplexação OFDM, está na faixa de frequências compreendida entre 2 e 34 MHz, confirmando as especificações fornecidas pelo fabricante dos modems. Pode se notar uma seletividade de frequência no canal. Esta seletividade é devida ao efeito de multipercurso e também devido às interferências eletromagnéticas causada por diversos equipamentos elétricos ligados na rede como computadores, ar-condicionado, etc...

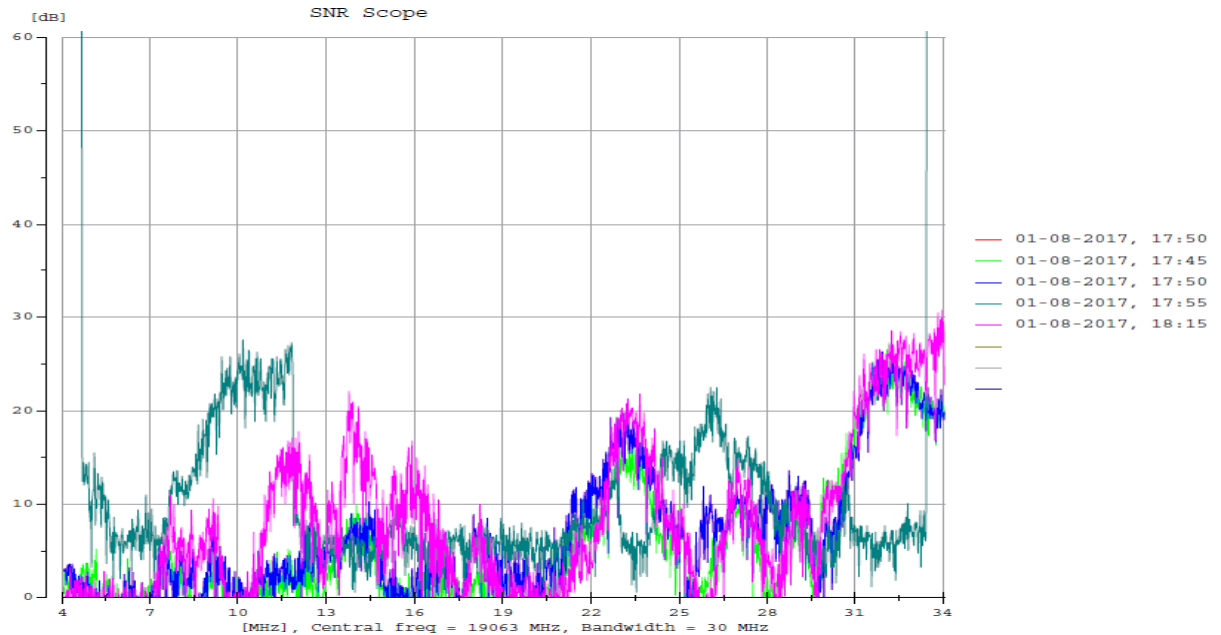
Figura 24 - Espectro do sinal OFDM



Fonte: Produção do próprio autor.

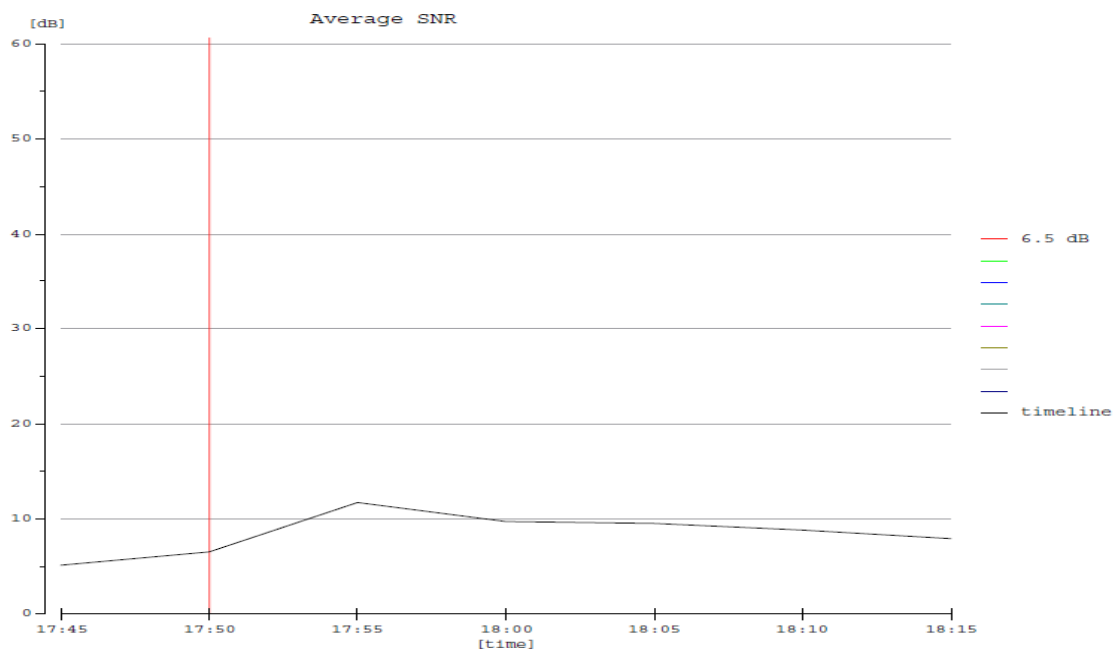
Analisando a figura 24 podemos notar a importância da modulação / multiplexação OFDM, pois apesar da seletividade em frequência causar uma redução da largura banda do canal, ainda assim é possível atingir altas taxas de transmissão com esta largura de banda.

Figura 25 - Amostras de SNR medido durante 25min



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 26 - SNR médio

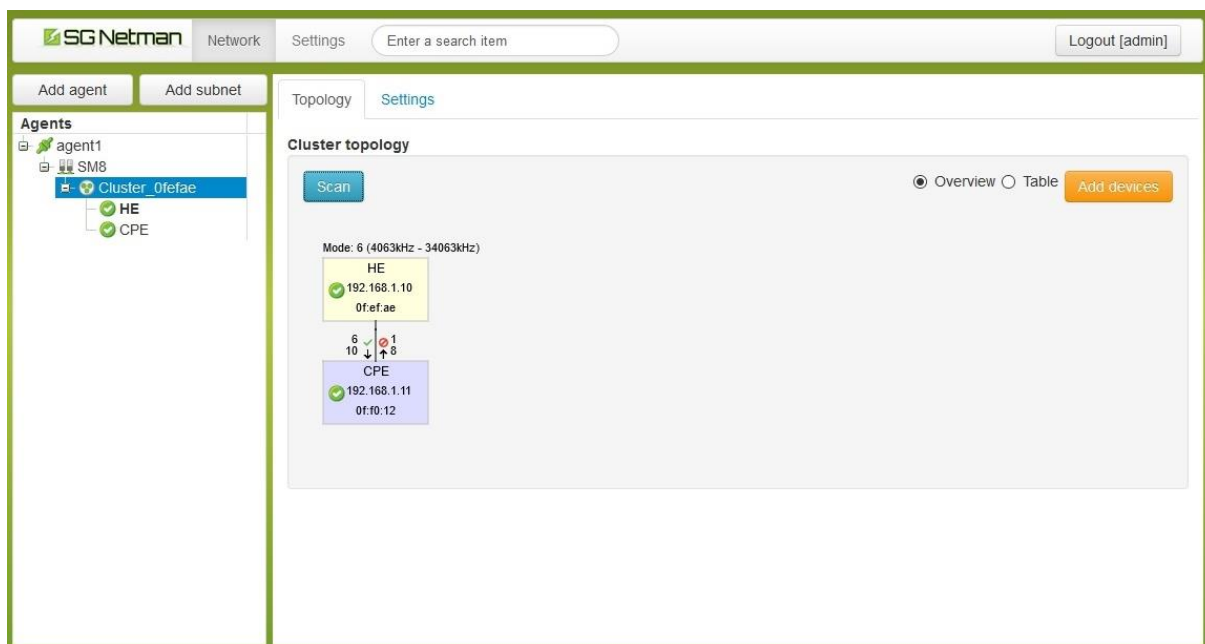


Fonte: Produção do próprio autor.

Foi analisado também o SNR da conexão durante 25 minutos, obtendo-se 5 amostras de SNR durante este tempo, conforme mostram as figuras 25 e 26. Percebeu-se que o SNR médio ficou abaixo do esperado, ficando abaixo dos 10 dB na maior parte do tempo, além disso a taxa de transmissão obtida também se mostrou abaixo do

esperado (veja a figura 27). Estes valores baixos, possivelmente são devidos a diversos equipamentos elétricos ligados à rede, como por exemplo filtros de linha que funcionam como filtros passa-baixa, o que pode atenuar o sinal transmitido.

Figura 27 - Software SG Netman, informando a taxa de transmissão dos modems



Fonte: Produção do próprio autor.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O projeto proposto teve o objetivo de mostrar o funcionamento de uma rede ZigBee integrada com a tecnologia PLC para utilização em Smart Grids. Foi possível concluir que essa integração é possível e viável, sendo uma alternativa às tecnologias utilizadas hoje.

O objetivo principal deste trabalho foi analisar a integração das tecnologias de telecomunicação ZigBee e PLC, para aplicação em Smart Grids. Portanto não foi dado uma ênfase maior à questão da implementação do medidor de energia.

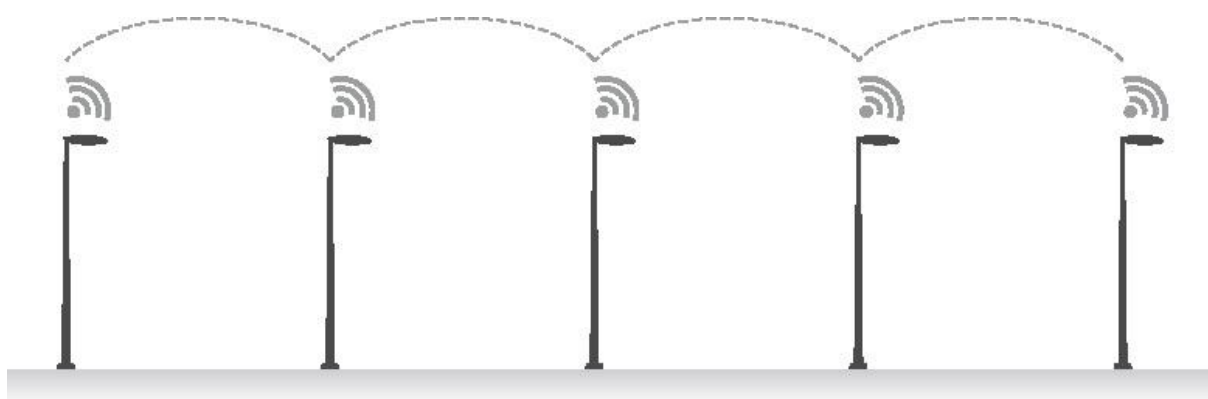
Os dados obtidos pelo medidor de corrente, mostraram-se confiáveis, sendo bem próximos do valor real. Entretanto deve-se levar em consideração, que para uma medida correta do consumo de energia é necessário medir também o valor da tensão e o fator de potência.

A rede ZigBee se mostrou segura e robusta, sendo capaz de trafegar dados de monitoração por distancia maiores de 50m. Além disso o custo de um módulo sensor, composto pelo Arduino, sensor de corrente e ZigBee ficou abaixo de R\$ 250,00, um valor acessível para as vantagens que apresenta. A fabricação de um hardware especializado para essa função em grande escala, poderia ainda reduzir o custo desta tecnologia.

A transmissão de dados pela rede PLC também foi realizada com sucesso. Mesmo com um meio físico não preparado para trafegar dados, a rede PLC se mostrou confiável para implantação em Smart Grids, pois com a técnica de modulação de subportadoras OFDM é possível alcançar uma transmissão de qualidade. Apesar de no dia dos testes para observar o SNR os modems terem apresentado uma baixa taxa de transmissão, não houve falhas na transmissão dos dados, visto que a rede ZigBee apresenta baixa taxa de transmissão.

Para trabalho futuros, uma proposta interessante seria aplicar esta rede para controle de iluminação pública (veja figura 28), verificando a viabilidade deste projeto em comparação a tecnologia que é utilizada hoje para este propósito: GSM.

Figura 28 - Smart Grid aplicada à iluminação pública



Fonte: [19].

REFERÊNCIAS

- [1] TOLEDO, Fabio. **Desvendando as redes elétricas inteligentes**: Smart Grid Handbook. 1ª ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2012.
- [2] CEMIG. **O que são as redes inteligentes de energia?** Disponível em:
<http://www.cemig.com.br/ptbr/A_Cemig_e_o_Futuro/sustentabilidade/nossos_programas/Redes_Inteligentes/Programas/as_redes_inteligentes.aspx>. Acesso em: 14 nov. 2014.
- [3] HITACHI. **Smart grid**. Disponível em:
<<http://www.hitachi.com/environment/showcase/solution/energy/smartgrid.html>>. Acesso em: 14 nov. 2014.
- [4] CENTRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM TELECOMUNICAÇÕES. **Smart Grid: Energia inteligente no Brasil**. Disponível em:
<<http://www.cpqd.com.br/mercado/smart-grid>>. Acesso em: 10 nov. 2014.
- [5] TERRA. **Medidores inteligentes de energia começam a sair do papel**. Disponível em: <<http://economia.terra.com.br/medidores-inteligentes-de-energiacomecam-a-sair-do-papel,f1586923c8f2d310VgnCLD200000bbcceb0aRCRD.html>>. Acesso em: 10 nov. 2014.
- [6] FARAHANI, Shahin. **ZigBee Wireless Networks and Transceivers**. 1 ed. Oxford: Elsevier, 2008.
- [7] ZigBee Alliance. **ZigBee Specification**. Disponível em: <<http://www.zigbee.org>>. Acesso em: 7 nov. 2014.

- [8] HRASNICA, H.; HAIDINE, A.; LEHNERT, R. **Broadband powerline communications networks**: network design. Londres: John Wiley & Sons, 2004.
- [9] UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA. **Transmissão de dados via rede elétrica é desenvolvida em parceria com a Cemig**. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/secom/2012/08/15/transmissao-de-dados-via-rede-eletrica-edesenvolvida-em-parceria-com-a-cemig/>>. Acesso em: 7 nov. 2014.
- [10] AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **PLC – Testes de Campo e Considerações da Anatel**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/7%20-%20ANATEL%20%20Maximiliano.pdf>>. Acesso em: 7 nov. 2014.
- [11] IEEE. 802.15.4 WPAN Task Group4. Disponível em: <<http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>>. Acesso em: 05 jul. 2015.
- [12] UNIVERSIDADE DO ALGARVE. **ZigBee, uma abordagem pratica**. Disponível em < https://lusorobotica.com/ficheiros/Introducao_ao_Zigbee_-_por_msaleiro.pdf > Acesso em: 15 fev. 2016.
- [13] UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO. **ZigBee**. Disponível em < https://www.gta.ufrj.br/grad/10_1/zigbee/ > Acesso em: 20 out. 2016
- [14] RIVIERO, I. A. S. Rede de Sensores sem Fio para Monitoramento de equipamentos eletrônicos. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais Minas, 2011.

[15] RANJAN, A. Wireless Communication using Zigbee

[16] CARCELLE, X. Power Line Communications in Practice. Boston, London: Artech House, 2006.

[17] CASTOR, L. R. M. A Rede de Média Tensão como Meio de Transporte de Dados em Redes Smart Grid. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo

[18] DIGI. **XBee / Xbee Pro ZB RF Modules**. Disponível em: <http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000976_G.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2017.

[19] SCHREDER. **Telegestão**. Disponível em: <<http://www.schreder.com/pt/aboutus/telegestao>> Acesso em: 06 agos. 2017.

APENDICE A – CÓDIGO DO DISPOSITIVO SENSOR DE CORRENTE

```
#include <SimpleZigBeeRadio.h>
#include "EmonLib.h"

// Create the XBee object ...
SimpleZigBeeRadio xbee = SimpleZigBeeRadio();
// Packet to send: In this example, we will update
// the contents of a packet before sending it.
SimpleZigBeePacket zbp = SimpleZigBeePacket();

// Value and payload to be sent
unsigned int val = 0;
// Variables to store time
unsigned long time = 0;
unsigned long last_sent = 0;

EnergyMonitor emon1;
//Pino do sensor SCT
//int pino_sct = A1;
//=====
//=====

void setup() {
    // Start the serial ports ...
    Serial.begin( 9600 );
    while( !Serial ){;}// Wait for serial port (for Leonardo only).
    //xbeeSerial.begin( 9600 );
    // ... and set the serial port for the XBee radio.
    xbee.setSerial( Serial );
    // Receive TX Status packets
    xbee.setAcknowledgement(true);
    // The frame data in a ZigBee packet refers to the data between
    // the length LSB and the checksum.
    uint8_t exFrame[] = {
        0x10,0x01,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0xff,0xfe,0x00,0x00,0xff,0xff
    };
    // Now store the example frame in the packet object.
    zbp.setFrameData(0, exFrame, sizeof(exFrame));

    emon1.current(A1, 55);
}
//=====
//=====

void loop() {
```

```

// While data is waiting in the XBee serial port ...
while( xbee.available() ){
    // ... read the data.
    xbee.read();
    // If a complete message is available and it
    // has not been read yet, read it.
    if( xbee.isComplete() ){
        delay(5);
    }
}
// The Arduino will send a packet to the XBee once every 5 seconds.
time = millis();
if( time > (last_sent+5000) ){
    last_sent = time; // Update the last_sent variable

    // Update the payload (in this case, the last 2 bytes of the frame)
    // The rest of the frame (address, etc) does not need to be changed.
    zbp.setFrameData( zbp.getFrameLength()-2, val >> 8 & 0xff );
    zbp.setFrameData( zbp.getFrameLength()-1, val & 0xff );

    // Send the packet. This example does not use the outgoing packet
    // object contained in the SimpleZigBeeRadio class.
    xbee.send( zbp );

    //Calcula a corrente
    double Irms = emon1.calcIrms(1480);
    Irms=Irms*100;
    val = (int) Irms;
}
delay(10); // Small delay for stability
// That's it! The router is ready to go.
}

```

APENDICE B – CÓDIGO DOS DISPOSITIVO COORDENADOR

```
#include <SimpleZigBeeRadio.h>

#include <SPI.h>

#include <Ethernet.h>

// Create the XBee object ...

SimpleZigBeeRadio xbee = SimpleZigBeeRadio();


//Definicoes de IP, mascara de rede e gateway

byte mac[] = {

    0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFE, 0xED };

IPAddress ip(192,168,1,15);      //Define o endereco IP

IPAddress gateway(192,168,1,10); //Define o gateway

IPAddress subnet(255, 255, 255, 0); //Define a máscara de rede


//Inicializa o servidor web na porta 80

EthernetServer server(80);


int val=0;

float corrente=0;

float consumo=0;

unsigned long tempo_anterior=0;

unsigned long intervalo=0;

float tempo_medicao=0;
```



```

//=====
=====

void setup() {

    // Start the serial ports ...

    Serial1.begin( 9600 );

    // ... and set the serial port for the XBee radio.

    xbee.setSerial( Serial1 );

    // Set a non-zero frame id to receive Status and Response packets.

    xbee.setAcknowledgement(true);

    //Inicializa a interface de rede

    Ethernet.begin(mac, ip, gateway, subnet);

    server.begin();

}

//=====
=====

void loop() {

    // If data is waiting in the XBee serial port ...

    if( xbee.available() ){

        // ... read the data.

        xbee.read();

```

```

// If a complete message is available, display the contents
if( xbee.isComplete() ){
    Serial.print("\nIncoming Message: ");
    printPacket( xbee.getIncomingPacketObject() );
}
}

delay(10); // Small delay for stability


//Aguarda conexao do browser
EthernetClient client = server.available();
if (client) {
    Serial.println("new client");

    // an http request ends with a blank line
    boolean currentLineIsBlank = true;
    while (client.connected()) {
        if (client.available()) {
            char c = client.read();
            Serial.write(c);

            // if you've gotten to the end of the line (received a newline
            // character) and the line is blank, the http request has ended,
            // so you can send a reply
            if (c == '\n' && currentLineIsBlank) {
                // send a standard http response header
                client.println("HTTP/1.1 200 OK");
            }
        }
    }
}

```

```
client.println("Content-Type: text/html");

client.println("Connection: close");

client.println("Refresh: 2"); //Recarrega a pagina a cada 2seg

client.println();

client.println("<!DOCTYPE HTML>");

client.println("<html>");

//Configura o texto e imprime o titulo no browser

client.print("<font color=#FF0000><b><u>");

client.print("Consumo de energia eletrica");

client.print("</u></b></font>");

client.println("<br />");

client.println("<br />");


//Mostra as informacoes lidas pelo sensor de corrente

client.print("Corrente : ");

client.print("<b>");

client.print(corrente,3);

client.print(" A");

client.print("<br />");

client.print("<br />");

client.print("Consumo : ");

client.print("<b>");

client.print(consumo,6);

client.print(" kWh");
```

```

    client.print("<br />");

    client.print("<br />");

    client.print("Tempo decorrido : ");

    client.print("<b>");

    client.print(tempo_medicao,3);

    client.print(" s");

    client.println("</b></html>");

    break;
}

if (c == 'n') {

    // you're starting a new line

    currentLineIsBlank = true;

}

else if (c != 'r') {

    // you've gotten a character on the current line

    currentLineIsBlank = false;

}

}

}

// give the web browser time to receive the data

delay(1);

// close the connection:

client.stop();

}

```

```

}

//=====
=====

//=====
=====

//=====
=====

void printPacket(SimpleZigBeePacket & p){
    unsigned long tempo_atual = millis(); //obtem tempo em ms

    intervalo= tempo_atual - tempo_anterior;

    intervalo=intervalo/1000; //transforma tempo em s

    tempo_anterior = tempo_atual;

    tempo_medicao = (float)tempo_anterior;

    tempo_medicao = tempo_medicao/1000;

    uint8_t checksum = 0;

    val=p.getFrameData(p.getFrameLength()-2) << 8;

    val|=p.getFrameData(p.getFrameLength()-1);

    corrente = (float)val;

    corrente = corrente/100;

    consumo = consumo + (intervalo*(corrente*127)/3600000); //consumo em kwh

    // Calculate checksum based on summation of frame bytes

    checksum = 0xff - checksum;

}

```