

Euzébio das Dores de Souza

**ESTUDO DAS TECNOLOGIAS DE
MONITORAMENTO DE PAINÉIS EM USINAS
FOTOVOLTAICAS ATRAVÉS DE REDES DE
SENSORES SEM FIO**

Belo Horizonte 2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ESTUDO DAS TECNOLOGIAS DE
MONITORAMENTO DE PAINÉIS EM USINAS
FOTOVOLTAICAS ATRAVÉS DE REDES DE
SENSORES SEM FIO**

Dissertação submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

Orientador: Sidelmo Magalhães Silva Dr.

Euzébio das Dores de Souza

Belo Horizonte - Minas Gerais.
Universidade Federal de Minas Gerais
Março de 2013

AGRADECIMENTOS

Ao Deus altíssimo que tudo criou.

A minha esposa e filhos por me impulsionarem e apoiarem.

Ao meu orientador Professor Dr. Sidelmo Magalhães Silva por seu apoio e orientação.

Muito Obrigado!

SUMÁRIO

1- Introdução	10
1.1-Motivação	10
1.2-1. Objetivo geral	10
1.2.1-Objetivos específicos	11
1.3-Contextualização	11
1.3.1- Sistemas de Geração Distribuída	11
1.3.2- Topologias das redes de sensores sem fio	17
1.4- Metodologia	19
1.5- Organização do texto	20
1.6 - Conclusões	21
2- Geração fotovoltaica	22
2.1- Sistemas de geração fotovoltaica	22
2.2- Componentes básicos de um sistema de geração fotovoltaica	24
2.3- Características elétricas de um sistema de geração fotovoltaica	28
2.4- Interligação com a rede	32
2.5- Proteção de sistemas fotovoltaicos	36
2.6- Aterramento de sistemas fotovoltaicos	39
2.7 - Conclusões	40
3- Tecnologias <i>wireless</i>	41
3.1- Redes de sensores sem fio	41
3.2- Comparativo das tecnologias <i>wireless</i>	43
3.3- Arquitetura de tecnologia Bluetooth	47
3.2.2- Arquitetura de tecnologia Wi-Fi	49
3.2.3- Arquitetura da tecnologia ZigBee	46
3.3 - Conclusões	56
4- Monitoramento de plantas fotovoltaicas	57
4.1- Redes ZigBee para o monitoramento de plantas solares	57
4.2- Técnicas de roteamento	60
4.3- Topologias de Redes ZigBee para o monitoramento	

de plantas solares	64
4.4- Dimensionamento de uma rede de sensores sem fio	68
4.5 - Conclusões	74
5- Resultados	75
5.1- Experimento	75
5.1- Análise de cenários	77
5.3 - Latência da rede e consumo de corrente	78
5.4 - Conclusões	86
6- Conclusões e propostas de continuidade	87
6.1- Conclusões	87
6.2- Continuidade dos trabalhos	88
Referências Bibliográficas	89

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1.1 – Modelo tradicional de produção de eletricidade baseado em grandes usinas distantes dos locais de consumo.	12
Figura 1.2 – Sistemas para a instalação em grandes centros urbanos adaptando-se a arquitetura dos prédios e das residências .	12
Figura 1.3 – Diagrama esquemático de um sistema fotovoltaico residencial conectado a rede elétrica.	13
Figura 1.4 – Diagrama em blocos de um gerador fotovoltaico ligado a rede.	13
Figura 1.5 – Curva $I \times V$ de um painel solar genérico	14
Figura 1.6 – Curva $P \times V$ de um painel solar genérico.	15
Figura 1.7 – Diagrama esquemático de sistema fotovoltaico conectado à rede com um estágio.	15
Figura 1.8 – Sistema fotovoltaico conectado a rede com dois estágios.	16
Figura 1.9 – Sistema fotovoltaico com dois <i>strings</i> .	16
Figura 1.10 – Topologia em anel.	17
Figura 1.11 – Topologia em estrela .	18
Figura 1.12 – Topologia em árvore.	18
Figura 1.13 – Topologia em <i>mesh</i> .	19
Figura 2.1 – Sistema fotovoltaico isolado com armazenamento.	23
Figura 2.2 – Sistema fotovoltaico conectado à rede com medição única	23
Figura 2.3 – Sistema fotovoltaico conectado à rede com medição dupla	24
Figura 2.4 – Sistema fotovoltaico de geração conectado à rede	24
Figura 2.5 – Célula fotovoltaica de silício monocristalino	25
Figura 2.6 – Princípio de operação de uma célula fotovoltaica	26
Figura 2.7 – Agrupamento de células para formação de painel fotovoltaico .	26
Figura 2.8 – Constituição do Módulo Fotovoltaico	27
Figura 2.9 – Modelo elétrico de um módulo fotovoltaico	27
Figura 2.10 – Curva $I \times V$ de um módulo fotovoltaico	29
Figura 2.11 – Curva $I \times V$ de um módulo fotovoltaico considerando o fator de forma	30
Figura 2.12 – Curva $I \times V$ e FF e ponto de máxima potência.	31

Figura 2.13 – Curva $I \times V$ e FF ideais e ponto de máxima potência	32
Figura 2.14 – Diagrama em blocos de um gerador fotovoltaico	33
Figura 2.15 – Gerador fotovoltaico com dois estágios de conversão	33
Figura 2.16 – Gerador fotovoltaico <i>mult-string</i>	34
Figura 2.17 – Algoritmo da condutância incremental	36
Figura 2.18 – Arranjo fotovoltaico com fusíveis, diodos de passo e chave de desconexão	37
Figura 2.19 – Proteções do circuito de corrente alternada do gerador Fotovoltaico	38
Figura 2.20 – Gerador Fotovoltaico com dispositivos de proteção contra surto e equipotencialização.	40
Figura 3.1 – Diagrama em blocos de um nó de rede de sensores sem fio	42
Figura 3.2– Rede <i>Bluetooth</i> com dispositivos Escravos (E) e um dispositivo Mestre (M)	45
Figura 3.3– Rede WLAN sem ponto de acesso	47
Figura 3.4 – Rede WLAN com ponto de acesso	48
Figura 3.5– Arquitetura básica ZigBee	49
Figura 3.6 – Dispositivo sensor ZigBee para monitoramento de um módulo fotovoltaico	50
Figura 3.7 – Dispositivo sensor ZigBee para um módulo fotovoltaico com compensação do erro	51
Figura 3.8 – Camadas do Protocolo IEEE 802.15.4	52
Figura 3.9 – Camadas do protocolo ZigBee	54
Figura 3.10 – Capacidade de controle de dispositivos de uma rede ZigBee	55
Figura 4.1 – Rede ZigBee transmitindo dados com a técnica <i>Broadcast</i>	58
Figura 4.2 – Rede ZigBee transmitindo dados com a técnica <i>Unicast</i>	59
Figura 4.3 –Roteamento <i>Many-to-one</i>	61
Figura 4.4 – Rede ZigBee empregando roteamento <i>Many-to-one</i> .	62
Figura 4.5 – Rede ZigBee empregando roteamento <i>Source</i>	63
Figura 4.6 – Rede ZigBee empregando roteamento <i>Source</i> com solicitação de gravação da rota	64
Figura 4.7– Rede Estrela ZigBee	65
Figura 4.8– Rede <i>Mesh</i> ZigBee	66

Figura 4.9– Rede Árvore ZigBee	67
Figura 4.10 – Cenário básico Coordenador - Roteadores	72
Figura 4.11 – Cenário básico Roteadores - Dispositivos finais	73
Figura 4.12– Planta Fotovoltaica 3MW - Sete lagoas	73
Figura 5.1– Módulo Xbee – rádio modem	75
Figura 5.2 – Adaptadores COMBEE e PROTOBEE com interface RS232.	76
Figura 5.3– Range test	76
Figura 5.4– Relação RSSI e a quantidade de pacotes enviados	77
Figura 5.5 – Interface do Programa de Cálculo da Latência	79
Figura 5.6 – Arranjo físico para a planta de Sete Lagoas	81
Figura 5.7 – Latência para um agrupamento de sensores e roteadores na planta de Sete Lagoas	81
Figura 5.8 – Distribuição de roteadores a planta de Sete Lagoas	82
Figura 5.9 – Dispositivos por rota para a planta de Sete Lagoas	83
Figura 5.10 – Roteamento de dispositivos para a planta de Sete Lagoas	83
Figura 5.11 – Consumo de corrente para a leitura de um sensor distante considerando as técnicas de roteamento <i>Many to One</i> e <i>Source</i> .	84
Figura 5.12 – Consumo de corrente para rotas contendo 100 dispositivos	85
Figura 5.13 – Consumo de corrente rotas contendo 250 dispositivos.	85
Figura 5.14 – Roteamento de dispositivos para o menor consumo de corrente	

RESUMO

Este trabalho busca fazer um estudo sobre as tecnologias empregadas em redes de sensores sem fio com foco no monitoramento de plantas de geração fotovoltaica. Este esforço se deve à crescente demanda por novas fontes de energia limpas e renováveis, com destaque para as plantas fotovoltaicas, sendo esta tecnologia alvo de estudo em todo o mundo. As plantas fotovoltaicas podem ter sua capacidade de geração afetada por fatores como contaminação dos painéis por poeira ou desgaste natural. Logo o número de painéis, em condições operacionais e a energia entregue por estes impacta diretamente a capacidade de geração da planta. O entendimento das topologias de redes de sensores sem fio aplicáveis ao monitoramento de plantas de geração fotovoltaica tem como objetivo principal obter informação sobre do estado dos painéis, garantindo assim a maximização da energia gerada, atingindo a melhor relação entre geração e captação.

Palavras Chaves — Geração Fotovoltaica, Redes de Sensores Sem Fio, Protocolo Zigbee.

1 - ***Introdução***

1.1.Motivação

A inserção de sistemas fotovoltaicos na rede de energia elétrica tem sido apontada como uma opção viável, que atenua não somente os aspectos relativos a impactos ambientais, mas melhora o desempenho da rede de distribuição de energia como um todo [1].

A necessidade de diversificação da matriz energética demanda estudos e desenvolvimento de tecnologia que permita o controle não apenas do desempenho dos painéis fotovoltaicos, mas como evitar que a degradação destes, seja por vida útil ou ação de fatores ambientais, comprometa a eficiência do sistema.

A vida útil do módulo fotovoltaico pode ser entendida como o tempo operacional, ao final do qual a capacidade de geração do módulo é interrompida. No que se refere aos fatores ambientais, um conjunto de painéis contaminados por detritos ou poeira pode levar ao comprometimento de todo *string*, além disto efeitos como sombreamento podem produzir flutuações na energia gerada. Diante disto, o sistema de monitoramento e diagnóstico deverá estabelecer as correções para evitar a interrupção da geração.

1.2.Objetivo Geral

Este trabalho visa o estudo de tecnologias e topologias de redes de sensores sem fio para acompanhamento da operação e estudo dos painéis em usinas fotovoltaicas conectadas à rede de energia. O monitoramento das características de tensão e corrente dos painéis fotovoltaicos em usinas conectadas à rede de energia, por meio de redes de sensores sem fio, busca garantir o acompanhamento do desempenho do conjunto de painéis, sob as mais

diversas condições de insolação, visando a inserção mais eficiente da planta solar fotovoltaica na rede.

1.2.1. Objetivos Específicos

Entre os objetivos específicos deste trabalho, destacam-se:

- Identificar as tecnologias aplicáveis ao desenvolvimento de redes de sensores sem fio para aplicação em sistemas de geração fotovoltaicas;
- Identificar a tecnologia que permita o monitoramento das características operacionais individuais dos painéis fotovoltaicos;
- Identificar topologias de redes aplicáveis aos sistemas de geração solar fotovoltaica;

1.3. Contextualização

1.3.1. Sistemas de Geração Solar Distribuída

A inclusão de fontes renováveis de energia no sistema elétrico de potência cria um novo paradigma, que se destaca do modelo tradicional de geração denominado geração distribuída. Nos sistemas de geração distribuída os geradores são instalados próximos aos locais de consumo [2], enquanto que nos modelos tradicionais a produção de eletricidade as unidades de geração se encontram afastadas dos pontos de consumo. A figura 1.1 apresenta os dois modelos, onde se pode ver o tradicional representado por barragens, linhas de transmissão e linhas em baixa tensão que interligam o sistema de geração distribuída a rede de distribuição. Os sistemas de geração distribuída tem ganhado espaço na matriz energética dos países, devido a diversos fatores como redução das reservas globais de combustíveis fósseis, redução do número de rios com potencial hídrico para geração de energia e aos riscos associados a energia nuclear.

Os sistemas de geração distribuída baseado em sistemas fotovoltaicos constituem uma opção de complementação da matriz energética, pois devido às suas características podem apresentar uma ampla gama de formas de instalações [3], adequando-se a espaços livres, fachadas ou telhados de edifícios. A figura 1.2 ilustra exemplos de sistemas de geração

distribuída integrados a arquitetura dos prédios e residências, seja em telhados ou fachadas laterais.



Figura 1.1 – Modelo tradicional de produção de eletricidade baseado em grandes usinas distantes dos locais de consumo [2].

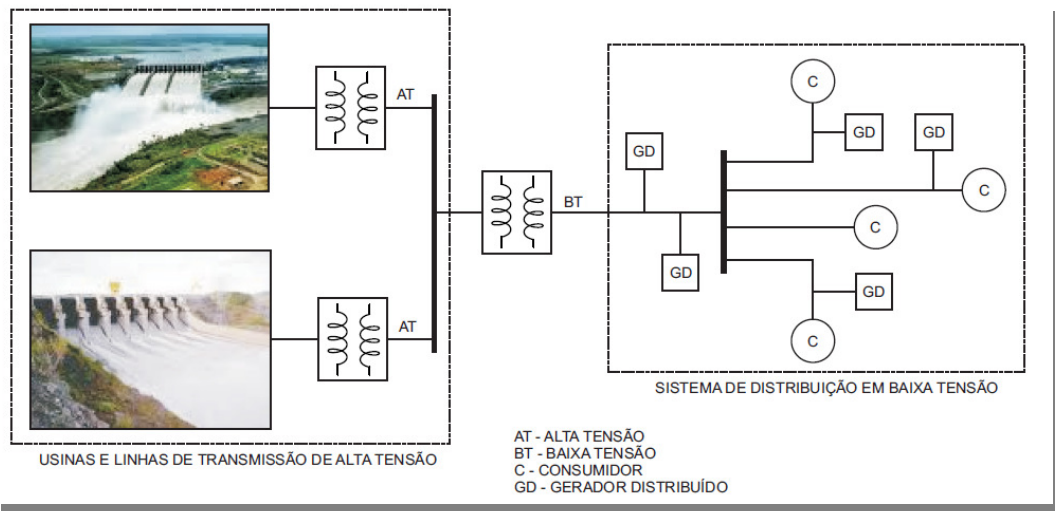


Figura 1.2 – Sistemas para a instalação em grandes centros urbanos adaptando-se a arquitetura dos prédios e das residências [3].

A instalação de uma unidade geradora em um edifício abre um universo de opções, permitindo que grandes condomínios se transformem em unidades de geração.

As residências por sua vez podem se tornar micro-unidades de geração, conforme o diagrama esquemático apresentado na figura 1.3, composto por medidores inteligentes e conversores que fazem a interligação com a rede.

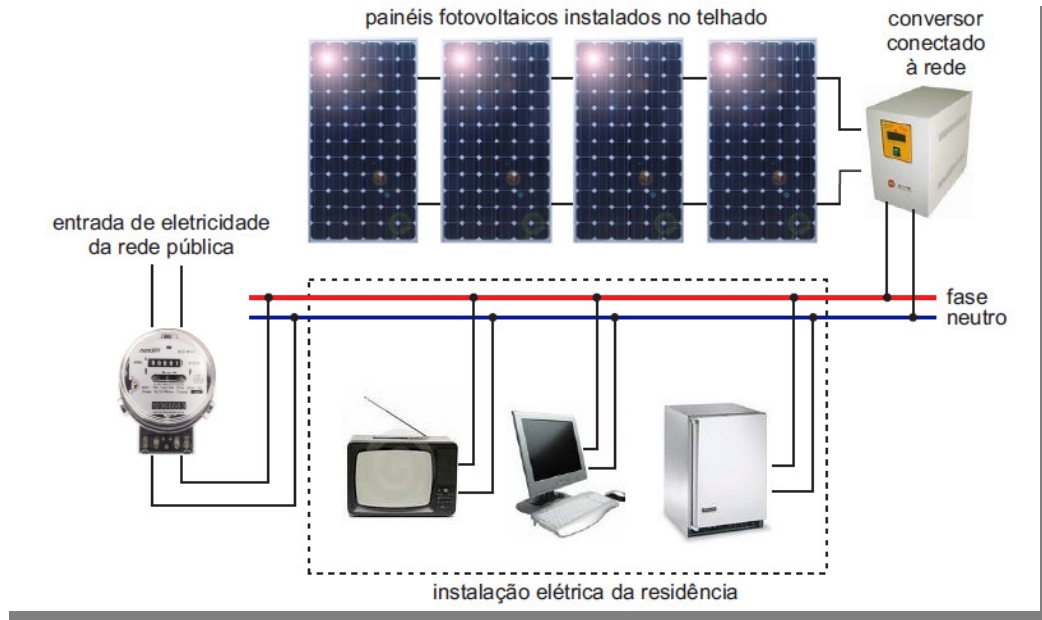


Figura 13 – Diagrama esquemático de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede elétrica [3].

O sistema de geração solar distribuída compreende um conjunto de painéis fotovoltaicos, um sistema seguidor de ponto de máxima potência (MPPT) associados a um inversor c.c.-c.a. e conforme o diagrama é representado na figura 1.4.

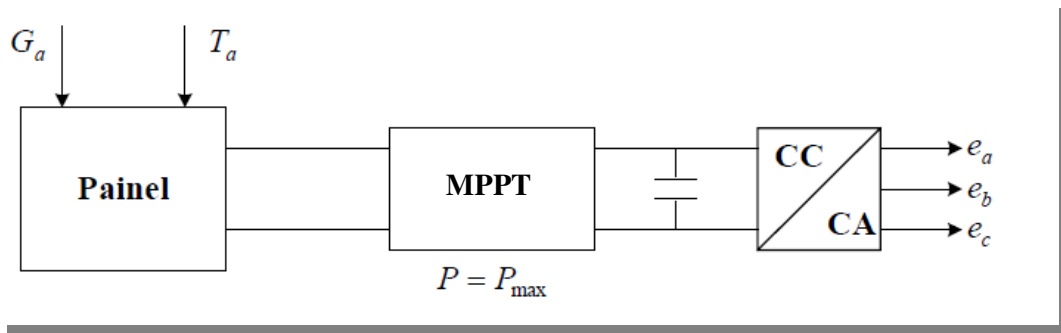


Figura 1.4 – Diagrama em blocos de um gerador fotovoltaico ligado a rede [3].

O painel solar converte a radiação solar em energia elétrica c.c., sendo esta representada por uma curva IxV do conjunto de painéis. O bloco denominado MPPT (Sistema de Rastreamento de Posicionamento para Máxima Potência) tem como função extrair o máximo de potência, considerando as flutuações de tensão e corrente devido a variações de radiação solar (G_a) e temperatura do painel (T_a) [3]. A figura 1.5 apresenta a curva IxV de um painel solar típico, onde se pode ver as influências da insolação e temperatura no desempenho do painel solar.

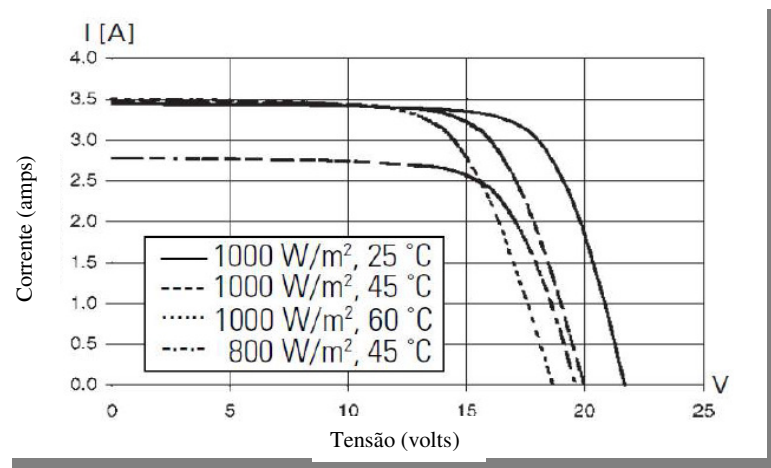


Figura 1.5 – Curva IxV de um painel solar genérico [4]

O ponto de máxima potência corresponde ao declive igual a zero, conforme se pode ver na figura 1.6, este ponto pode ser detectado a partir do método da variação de condutância que consiste em identificar o declive da curva de potência em função da tensão.

A potência produzida na unidade geradora ou na micro-geração é convertida em tensão alternada com frequência e amplitudes compatíveis com a rede de distribuição de energia.

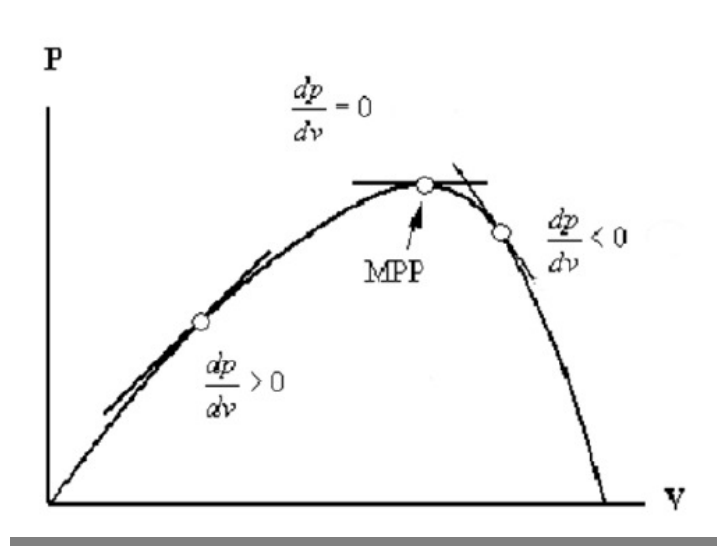


Figura 1.6 – Curva PxV de um painel solar genérico [4].

O sistema apresentado até este momento é constituído por um estágio, onde os painéis fotovoltaicos possuem potência e tensão suficientes para a alimentação do conversor c.c.-c.a, normalmente denominados de sistemas com conversor de um estágio [4] conforme se pode ver na figura 1.7.

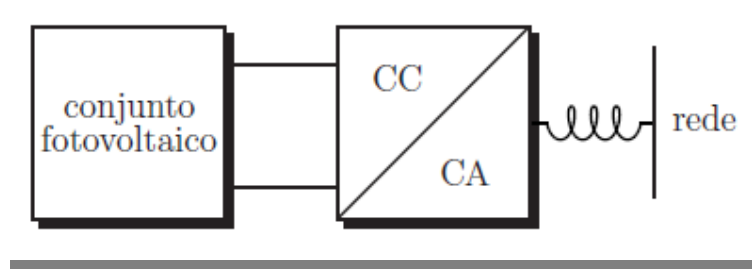


Figura 1.7 – Diagrama esquemático de sistema fotovoltaico conectado a rede com um estágio [4].

Estes sistemas têm como vantagem a simplicidade porém, a interligação à rede pode apresentar problemas devido a ausência de um trafo de isolamento. Outra opção seria o uso de conversores de dois estágios [4], conforme se pode ver na figura 1.8, sendo que este sistema apresenta a melhor adequação do ponto de máxima potência. O primeiro estágio tem como função alimentar o barramento de tensão contínua, enquanto que o segundo estágio realiza a interface com a rede [4].

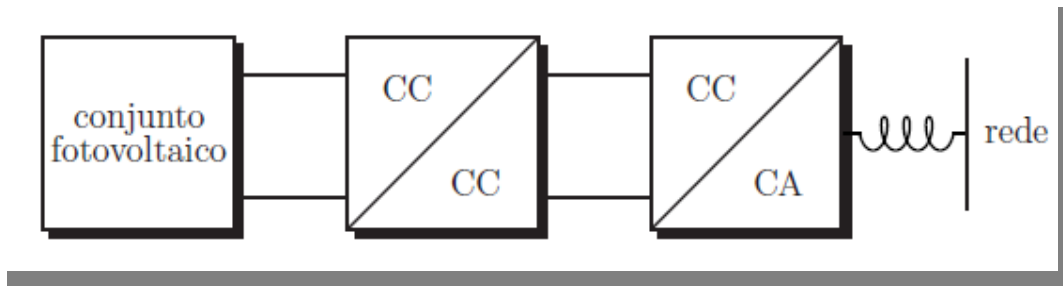


Figura 1.8 – Sistema fotovoltaico conectado a rede com dois estágios [4].

A interface com a rede deve obedecer a critérios relativos, não somente à amplitude e frequência, mas também aterramento e corrente residual, injeção de corrente, distorção harmônica e fator de potência.

Uma planta solar pode ser caracterizada por um conjunto de *strings* em paralelo, ou geradores fotovoltaicos, onde cada *string* consiste em um subconjunto de painéis, conforme se pode ver na figura 1.9.

As plantas solares podem ter seu desempenho prejudicado por diversos fatores como, sombreamento, poluição, perdas nos inversores e no cabeamento, defeitos de fabricação associado aos painéis [5]. O monitoramento das condições operacionais dos *strings* permite não apenas identificar as condições de operação, mas detectar falhas de painéis ou condições de subtensão que poderiam levar ao desligamento dos inversores [6] conforme se pode ver na figura 1.9.

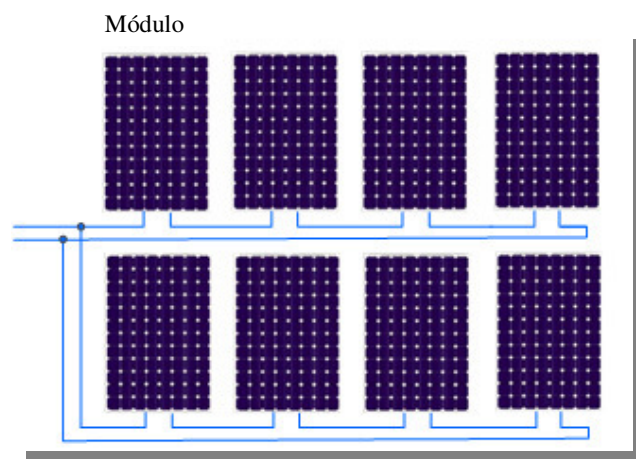


Figura 1.9 – Sistema fotovoltaico com dois *strings* [6].

1.3.2. Topologias das Redes de Sensores sem Fio

A detecção de falhas nos módulos permite a tomada de ações como desconexão dos *strings* que poderiam comprometer a operação da planta, algo que é possível com a adoção de monitoramento individual dos painéis por meio de redes de sensores sem fio [6].

O monitoramento dos painéis e, conseqüentemente dos *strings*, traz consigo duas vantagens, sendo estas a rápida localização do painel defeituoso por meio da sua identificação digital [6] e caracterização da falha do painel ou *string*[7].

A topologia da rede é uma característica da rede de sensores sem fio, que deve ser considerada, pois é determinante no número de dispositivos monitorados. As topologias mais comuns são o tipo anel, estrela, árvore e *mesh*, sendo algumas de suas características listadas a seguir. Na topologia em anel ilustrada na figura 1.10, cada estação é conectada, sendo os pacotes de dados trocados entre as estações [7].

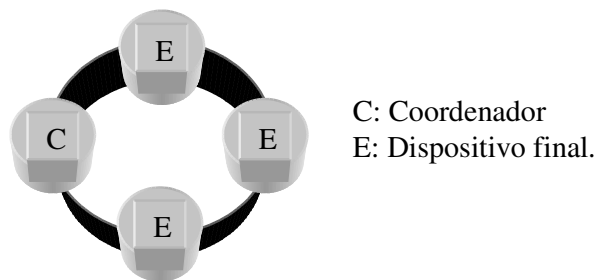
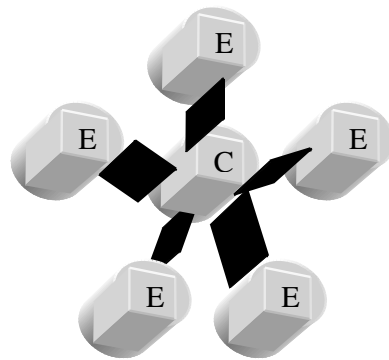


Figura 1.10 – Topologia em anel [7].

Na figura 1.11 pode se ver a topologia em estrela, sendo o coordenador o elemento central que atribui o endereço a rede e controla quem entra ou sai da rede, enquanto que os elementos externos são os dispositivos finais ou roteadores [8]. O roteador é o dispositivo responsável por agregar novos dispositivos finais, ou seja, estabelece rotas com qualidade de comunicação entre dispositivos.

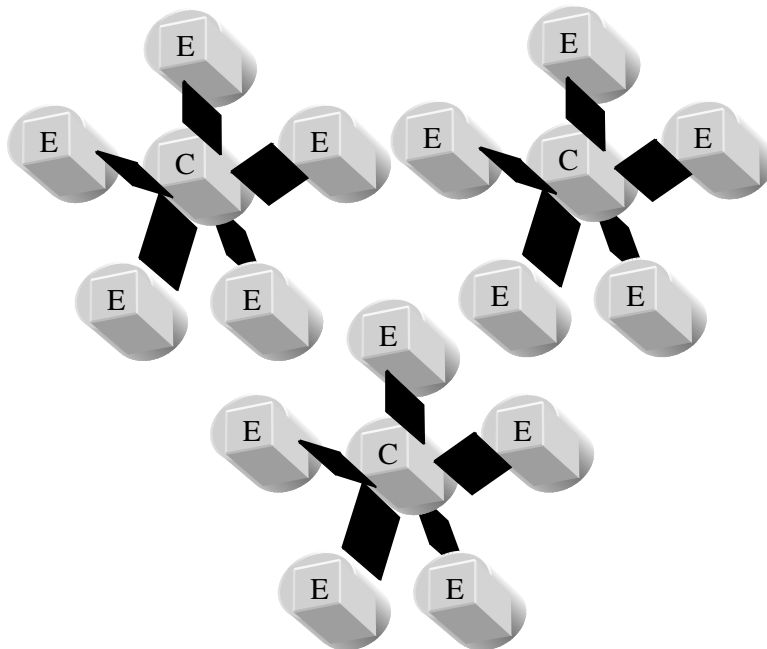
Os dispositivos finais são os elementos sensores, sendo estes responsáveis diretamente por cada medição. Uma das vantagens desta topologia é a rápida expansão, característica esta que viabilizou seu emprego em outras redes.



C: Coordenador
E: Dispositivo final.

Figura 1.11 – Topologia em estrela [8].

A topologia em árvore é vista na figura 1.12 onde se pode ver que a interconexão com outros elementos da rede, ocorre por meio de uma rede *wireless*, de forma semelhante a um barramento. Além disto esta topologia permite a expansão rápida sem comprometer as relações hierárquicas da rede [8].



C: Coordenador
E: Dispositivo final.

Figura 1.12 – Topologia em árvore [8].

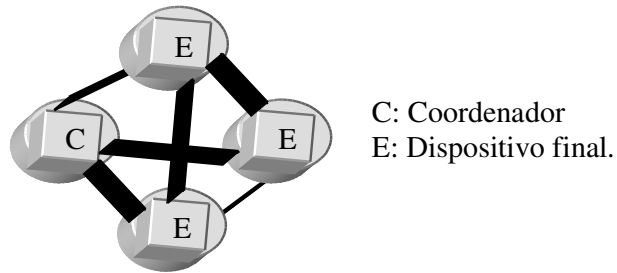


Figura 1.13 – Topologia em *mesh* [8].

A figura 1.13 apresenta a topologia *Mesh* onde as rotas são modificadas em função das necessidades do ambiente, ou seja, qualquer par coordenador dispositivo final pode ser acessado por rotas criadas por demanda. Esta característica confere à rede a capacidade de se auto-organizar, ou seja, quando uma rota deixa de ser eficiente o coordenador pode buscar uma alternativa [8]

1.4. Metodologia

O desenvolvimento deste trabalho efetuado a partir de uma revisão bibliográfica, com a identificação das tecnologias de redes de sensores sem fio. A tecnologia selecionada foi estudada do ponto de vista do *hardware* e do protocolo, com destaque para o controle e acesso aos parâmetros da rede. A qualidade da conexão foi avaliada por meio do software X-ctu, através do *Range teste* da medição da força do sinal ou RSSI . Sendo estudados parâmetros como tempo de envio de dados, bem como a latência entre coordenador e roteador ou dispositivo final. O estudo do tempo de envio e da latência da rede será efetuado por meio de simulações, a serem realizadas com uma aplicação desenvolvida através do software Matlab. As simulações foram efetuadas considerando uma planta fotovoltaica real a ser instalada na cidade de Sete Lagoas. Sendo alvo destas simulações, determinar arranjos de dispositivos da rede que tenham influência sobre o consumo de potência, número de dispositivos necessários e tempo de envio de dados.

Desta forma os elementos que compõem uma rede de sensores sem fio são entendidos, permitindo assim o desenvolvimento de soluções para o monitoramento de plantas solares.

1.5. Organização do Texto

No primeiro capítulo deste trabalho foi apresentada uma visão geral dos sistemas fotovoltaicos. As topologias básicas foram apresentadas considerando algumas de suas características mais importantes.

O segundo capítulo aborda com mais detalhes os sistemas de geração fotovoltaicos, considerando seus componentes e a interligação com a rede de distribuição de energia. Neste capítulo foram ainda abordados os sistemas de proteção, como proteções contra sobrecarga e curto-circuito e a proteção do operador por meio do aterramento conforme preconiza a NR10.

O terceiro capítulo abordou tecnologia *wireless*, considerando o *hardware* dos nós de uma rede de sensores sem fio, bem como as tecnologias direcionadas a redes de sensores sem fio. As diversas tecnologias foram comparadas e suas características mais importantes assinaladas, sendo o foco a possibilidade de aplicação no monitoramento de plantas solares.

O quarto capítulo aborda o monitoramento de plantas solares fotovoltaicas, tendo sido enfatizado o emprego da tecnologia Zigbee. As técnicas de roteamento foram apresentadas como elemento determinante para o monitoramento de uma planta fotovoltaica.

Onde as técnicas *Many-to-one* e *Source* foram consideradas ideais para a estruturação de uma rede de sensores sem fio destinadas ao monitoramento de plantas solares fotovoltaicas.

O quinto capítulo tratou do experimento e da apresentação dos resultados, onde se empregou para a análise da qualidade da comunicação a medição da taxa de erro de bits e de blocos. A determinação da quantidade de dispositivos é dependente das dimensões da planta, tendo sido avaliado o nível de sinal recebido para identificar o raio de cobertura. O raio de cobertura máximo com qualidade de conexão por sua vez permite a quantificação do número de dispositivos necessários ao monitoramento de uma planta fotovoltaica.

O sexto capítulo abordou as conclusões e as propostas de continuidade, onde se busca a redução de custos e o desenvolvimento de um perfil de aplicação específico ao monitoramento de plantas solares fotovoltaicas.

1.6. Conclusões

Os sistemas de geração solar são uma tecnologia confiável e adequada às necessidades modernas, no que se refere a complementação da matriz energética. A identificação das topologias que permitam a implantação, redes de grandes dimensões, contribuirá para a inserção das usinas fotovoltaicas na rede de distribuição de energia. Nos capítulos seguintes são abordados os elementos que compõem uma unidade de geração solar, bem como algumas de suas características e as topologias de redes de sensores sem fio mais comuns.

2 - *Geração Fotovoltaica*

2.1. Sistemas de Geração Fotovoltaica

Os sistemas fotovoltaicos, assim como outras tecnologias que permitem a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, têm ganhado espaço, devido à necessidade crescente de diversificação da matriz energética dos países [9].

Dentro deste foco, este capítulo busca delinear os elementos que compõem um sistema fotovoltaico de geração de energia elétrica, bem como trazer uma visão geral dos sistemas e da tecnologia.

Os sistemas de geração fotovoltaicos podem então ser classificados em duas categorias, conforme sua interligação com a rede de distribuição de energia, sendo estas categorias divididas em sistema isolado ou conectado à rede [10]. Os sistemas isolados podem ser entendidos como aqueles destinados à alimentação de sistemas sem conexão elétrica com a rede de energia.

Sistemas isolados, cujo diagrama em blocos pode ser visto na figura 2.1, são sistemas onde o controle da demanda de energia relativa aos módulos fotovoltaicos, bem como a carga ou descarga das baterias é centralizado em um circuito controlador de carga. Estes sistemas são destinados à geração para alimentação de cargas que devem operar de forma independente da rede de distribuição, possuindo normalmente sistemas de armazenagem de energia como baterias [11].

Os sistemas isolados podem ser denominados autônomos, devido à sua independência com relação a rede de energia. Os sistemas autônomos com baterias para armazenamento podem empregar a energia acumulada durante períodos de insolação favoráveis para posteriormente entregá-la à rede de energia elétrica.

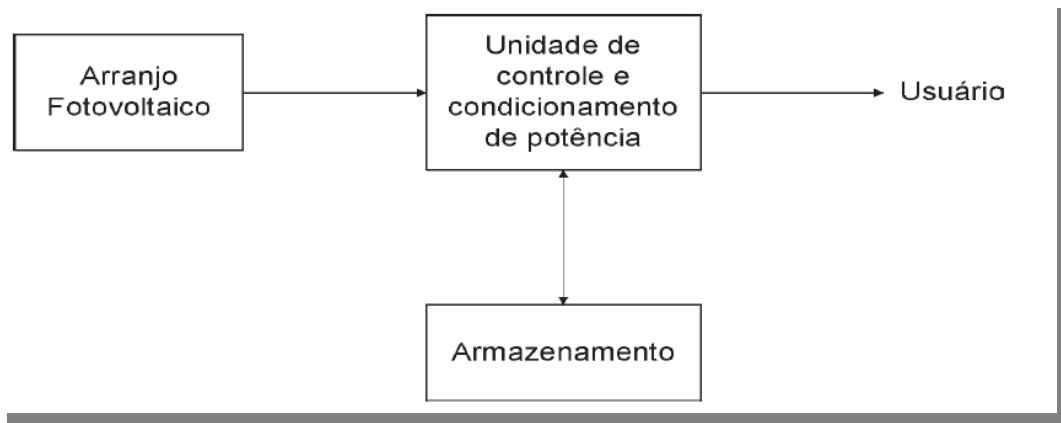


Figura 2.1 – Sistema fotovoltaico isolado com armazenamento [11].

Os sistemas conectados à rede, ilustrados esquematicamente na figura 2.2, têm como característica determinante a entrega da energia gerada à rede de distribuição de energia elétrica, empregando conversores c.c-c.a.[12].

Os sistemas conectados à rede de distribuição de energia podem ser classificados em microgeração, pequeno, médio e de grande porte [13], sendo que os sistemas de microgeração ou de pequeno porte podem ser divididos, conforme a medição, em sistemas de medição única, dupla e simultânea [13]. Os sistemas de medição única ou de balanço de energia representados na figura 2.2, possuem um único medidor para registro de energia gerada e entregue à concessionária, sendo possível o registro do consumo exclusivamente a partir de rede de distribuição de energia da concessionária local.

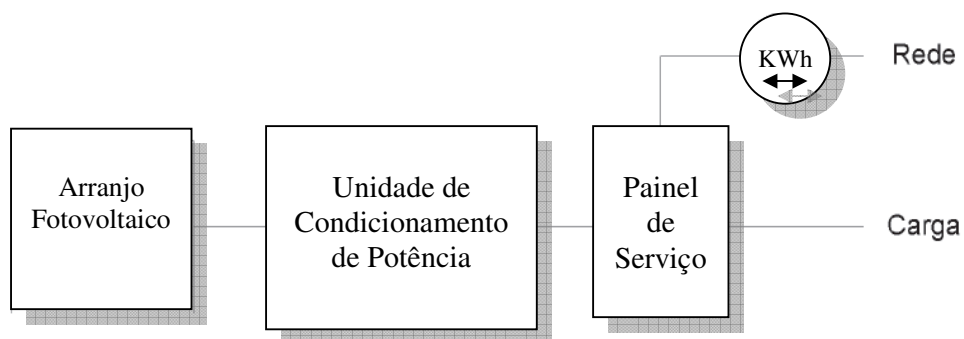


Figura 2.2 – Sistema fotovoltaico conectado à rede com medição única [13].

Os sistemas de medição dupla como ilustrado esquematicamente na figura 2.3 são aqueles que como o próprio nome indica, possuem recursos de medição que permitem a tarifação tanto do ponto de vista da energia gerada no sistema fotovoltaico, quanto da utilizada pelo consumidor a partir da rede de distribuição da concessionária local.

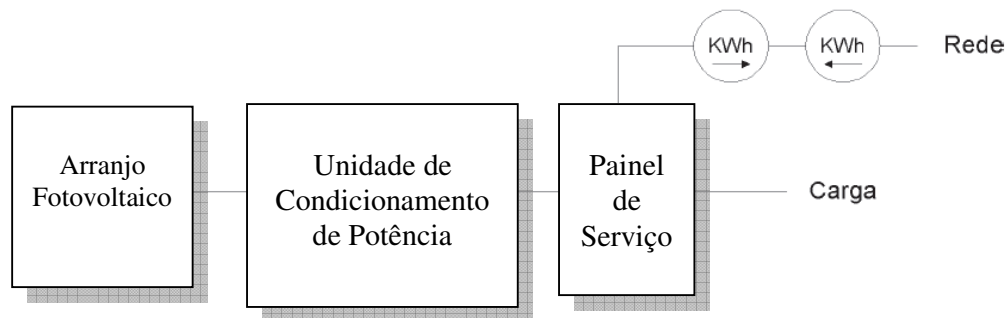


Figura 2.3 – Sistema fotovoltaico conectado à rede com medição dupla [13].

Os sistemas de grande porte são empregados por concessionárias que detêm a geração, distribuição e transmissão de energia elétrica, sendo os sistemas fotovoltaicos interligados à rede de distribuição em tensão secundária. Os sistemas de grande porte [14] ou de geração são caracterizados por necessitarem de circuito de elevação de tensão e conversão c.c-c.a. como se pode ver na figura 2.4.

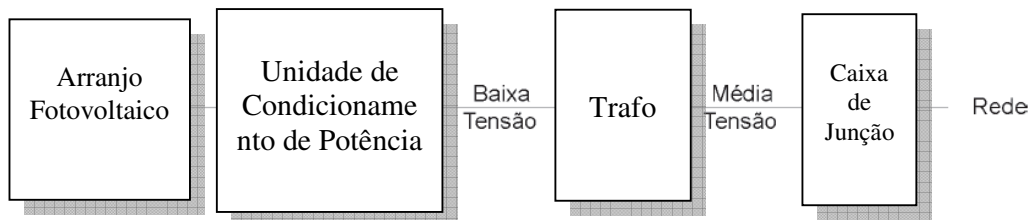


Figura 2.4 – Sistema fotovoltaico de geração conectado à rede [14].

2.2. Componentes Básicos de um Sistema de Geração Fotovoltaica

O elemento básico de qualquer planta de geração fotovoltaica é o módulo solar, sendo este constituído por células fotovoltaicas, cuja função é converter a energia irradiada do sol em energia elétrica. Uma célula fotovoltaica pode ser vista na figura 2.5, sendo esta atualmente construída principalmente de silício monocristalino ou, em alguns casos de menor custo de silício amorfo [15]. O silício policristalino tem seu custo elevado devido as técnicas de produção empregadas, pois se torna necessário o uso de silício com grau de pureza muito elevado. As células fotovoltaicas de silício amorfo por outro lado apresentam grau de pureza menor e devido às técnicas simples de fabricação possuem um custo final menor. As células fotovoltaicas de silício amorfo possuem rendimento menor, quando comparadas com as de silício monocristalino, algo que torna necessária a seleção criteriosa desta tecnologia [15].



Figura 2.5 – Célula fotovoltaica de silício monocristalino
fonte www.engenhariaquimicasantosp.blogspot.com.

As células fotovoltaicas são elementos compostos por junções semicondutoras, conforme ilustra a figura 2.6, quando expostas a energia luminosa liberam elétrons [16]. Os elétrons liberados devido à energia luminosa são coletados por eletrodos com desenho na forma de uma malha.

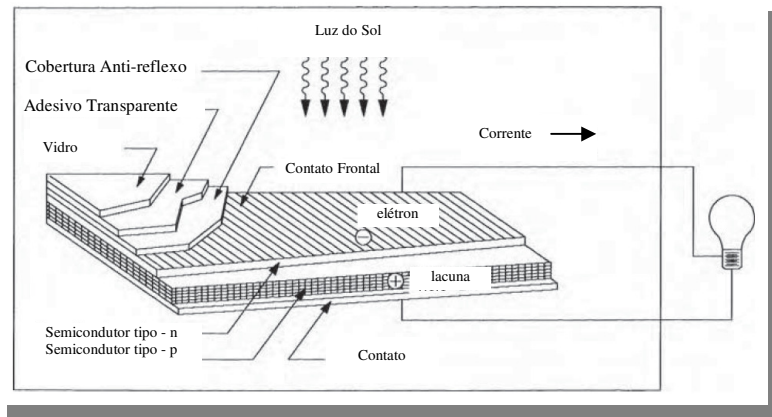


Figura 2.6 – Princípio de operação de uma célula fotovoltaica [16].

De modo a maximizar a absorção de luz solar é aplicada sobre a célula fotovoltaica uma camada de material anti-reflexivo. Além disto, de modo a conferir à célula solar resistência às intempéries esta é recoberta com vidro fixado por meio de um adesivo transparente.

Os módulos fotovoltaicos por sua vez são agrupamentos de células fotovoltaicas normalmente em série de modo alcançar tensões mais elevadas, sob máxima insolação como pode se ver na figura 2.7 [17].

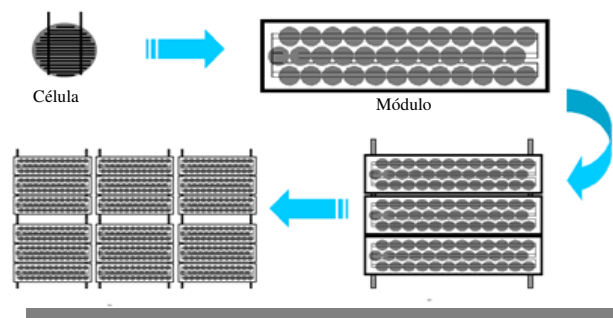


Figura 2.7 – Agrupamento de células para formação de painel fotovoltaico [17].

Os elementos construtivos dos módulos fotovoltaicos são apresentados na figura 2.8, onde pode-se ver o quadro que garante a resistência mecânica do conjunto, sem o qual não seria possível a montagem do módulo. Na mesma figura é possível ver o barramento elétrico, a caixa de terminais a prova de água, o painel fotovoltaico dentre outros elementos que buscam garantir melhor desempenho e durabilidade aos módulos fotovoltaicos.

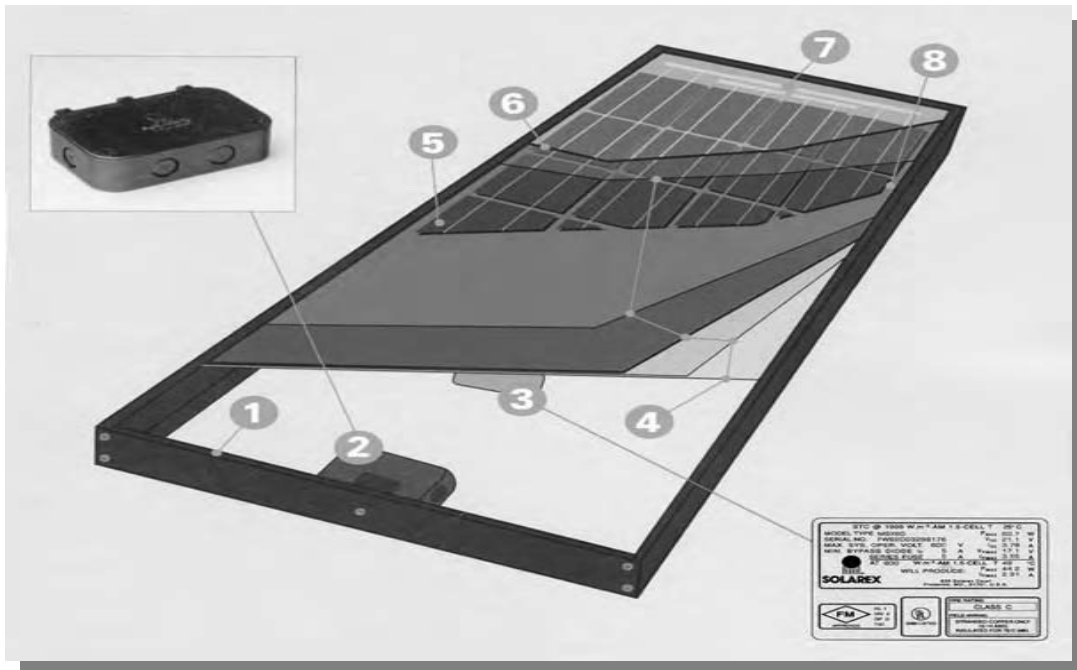


Figura 2.8 – Constituição do Módulo Fotovoltaico: (1) quadro, (2) caixa de terminais a prova de água, (3) placa de certificação, (4) proteção contra ação do tempo, (5) painel fotovoltaico, (6) cobertura de vidro temperado, (7) barramento elétrico e (8) abertura do quadro fonte <http://www.bp.com/>.

Os módulos fotovoltaicos empregam algumas técnicas construtivas cujo papel é garantir o desempenho e a confiabilidade do módulo, entre estas está o emprego de um diodo de bloqueio ou *bypass* [18]. O diodo de *bypass* tem como função eliminar células defeituosas como se pode ver na figura 2.9, sem que isto comprometa a operação do painel. Diante disto mesmo com perda parcial de sua capacidade, o painel é mantido em operação.

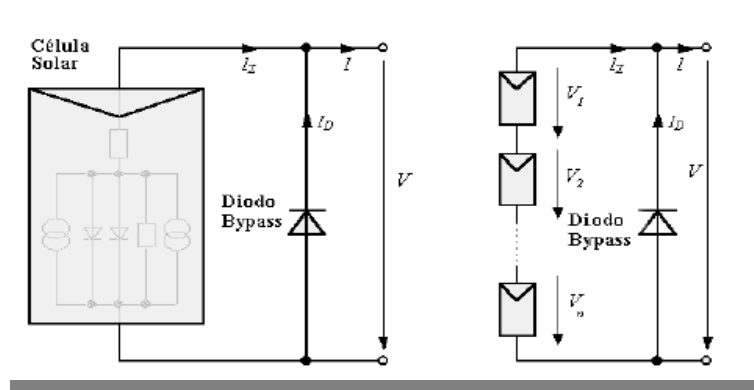


Figura 2.9 –Modelo elétrico de um módulo fotovoltaico [18].

O diodo de bloqueio atua também quando, devido a baixas condições de insolação, surge uma subtensão no módulo, de modo que a tensão do acumulador se torna maior que aquela gerada nos módulo. Além disto, ele atua também no caso de sistemas interligados à rede em caso de falha do conversor, algo que pode levar a circulação de corrente pelo módulo, comprometendo a operação do mesmo.

2.3. Características Elétricas de um Sistema de Geração Fotovoltaica

As características elétricas dos módulos fotovoltaicos são dependentes das células que o compõe, logo estas são abordadas nas páginas seguintes. O primeiro parâmetro a ser entendido é o W_p ou *watt-pico* [19], que pode ser entendido como a potência entregue nos terminais de saída da célula, quando a insolação se situar em torno de 1kw/m^2 a uma temperatura de $25\text{ }^\circ\text{C}$.

A tensão de circuito aberto ou ***Voc*** e a corrente de curto circuito ***Isc*** são parâmetros, onde a tensão de circuito aberto, como o próprio nome indica é a tensão medida nos terminais de saída da célula sem a conexão de qualquer carga.

A corrente de curto-circuito semelhantemente é a corrente medida diretamente nos terminais da célula fotovoltaica, por meio da inserção de um amperímetro, sendo tanto a tensão de circuito aberto quanto a corrente de curto circuito medidas estando a célula iluminada pelo sol.

É evidente que apenas as medições da tensão de circuito aberto aliada à corrente de curto circuito não são suficientes para a caracterização do comportamento de uma célula fotovoltaica [19]. Logo, faz-se necessário o emprego de elementos traçadores de curvas características.

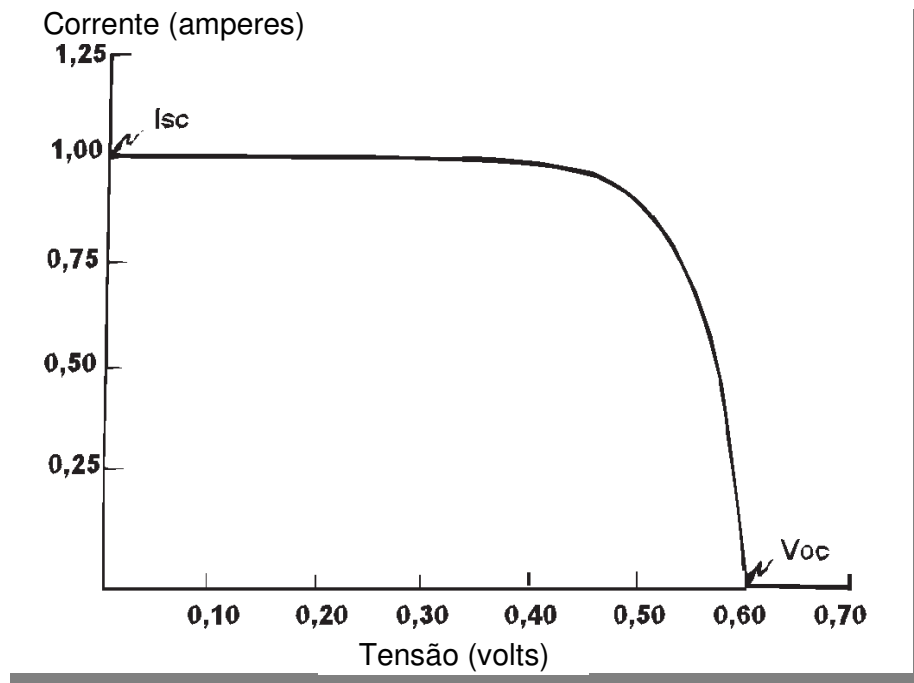


Figura 2.10 – Curva $I \times V$ de uma célula fotovoltaica [19].

A curva $I \times V$ vista na figura 2.10 representa todos os pontos de potência possíveis de serem obtidos com uma célula fotovoltaica [20]. Os elementos desta curva podem caracterizar não apenas o comportamento da célula, mas a potência passível de ser obtida de um módulo. Estes elementos são a tensão de máxima potência (V_{mp}), a corrente de máxima potência (I_{mp}) e a máxima potência (P_m).

Os pontos correspondentes a tensão V_{mp} e a corrente I_{mp} definem o ponto de máximo rendimento da célula conforme se pode ver na figura 2.11.

O fator de forma é um indicador da qualidade das células fotovoltaicas empregadas na construção do módulo [20], sendo considerado um fator de forma ou FF satisfatório, aquele que mais se aproximar da forma retangular sendo este visto na figura 2.11.

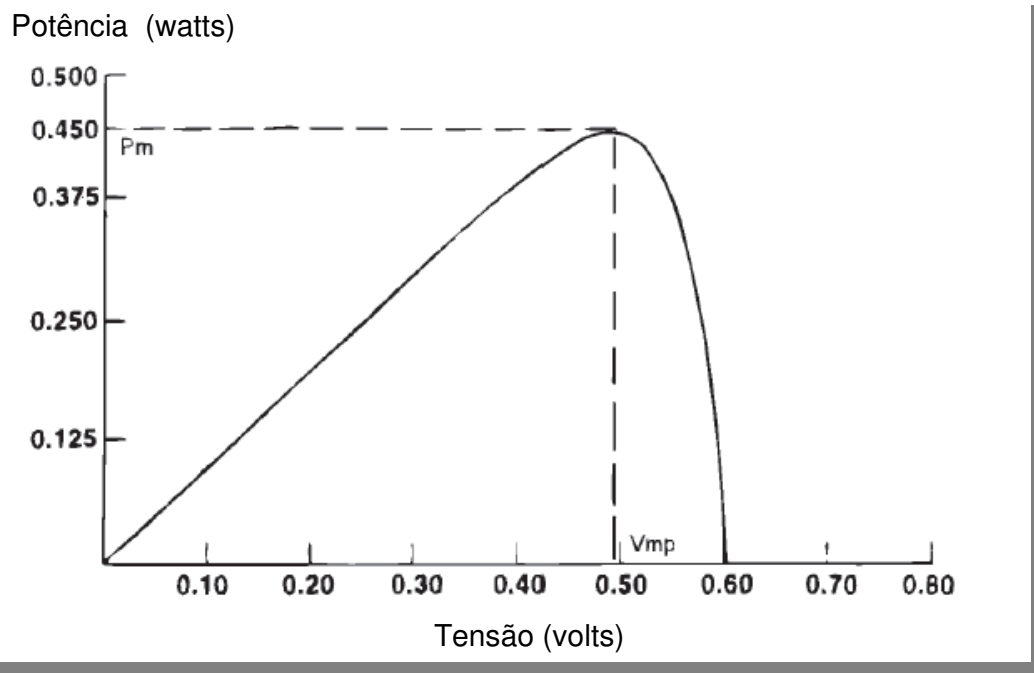


Figura 2.11 – Curva $I \times V$ de uma célula fotovoltaica considerando o fator de forma [20].

O fator de forma busca estabelecer uma aproximação entre a forma retangular e a curva $I \times V$ que indica o comportamento da célula quanto as melhores condições de geração, onde uma forma retangular denota uniformidade de potência para diversas condições de insolação.

Mediante a comparação ou sobreposição da curva $I \times V$ com a curva do fator de forma como se pode ver na figura 2.12 é possível determinar graficamente o ponto de máxima potência entregue por uma célula fotovoltaica [20], lembrando que as curvas citadas devem estar atreladas as condições de insolação e temperatura nas quais foram traçadas.

A obtenção das curvas $I \times V$ e do fator de forma são elementos úteis na análise e seleção das células que irão compor um módulo fotovoltaico. Estes dados extraídos a partir das curvas de cada célula permitem a obtenção de valores pontuais. Estes dados pontuais permitem o levantamento das curvas [20] reais de módulos fotovoltaicos, desta forma, se torna possível a caracterização do desempenho dos módulos fotovoltaicos.

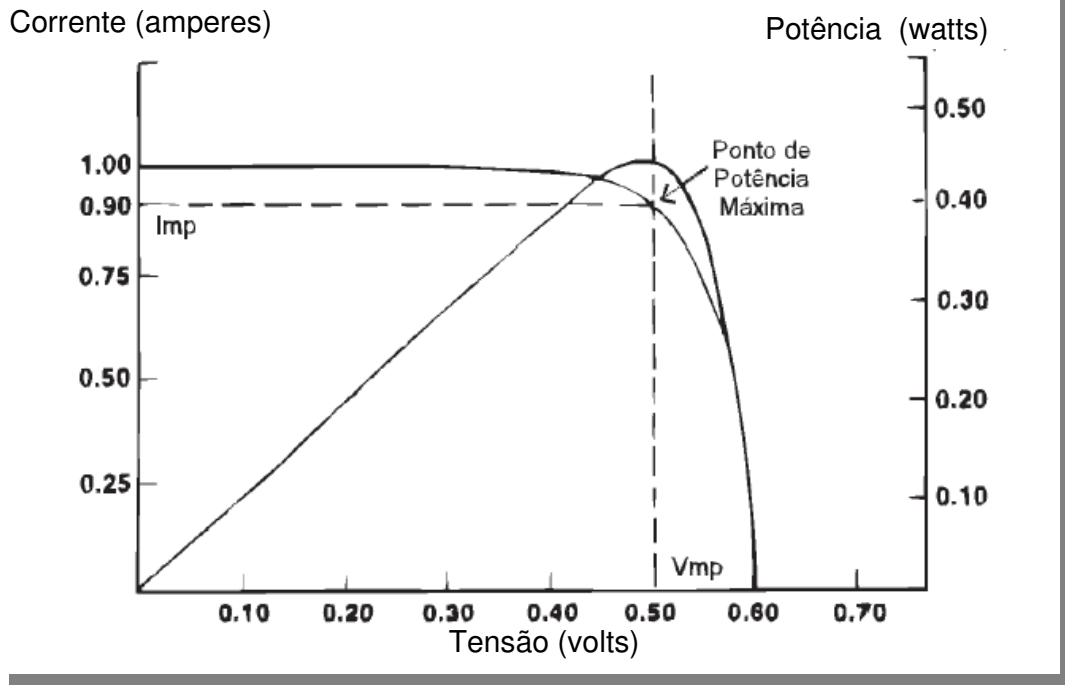


Figura 2.12 – Curva $I \times V$ e FF e ponto de máxima potência [20].

As equações para cálculo de valores pontuais relativos à potência, eficiência e o fator de forma são dados a seguir:

$$P_m = I_{mp} * V_{mp} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{I_{mp} * V_{mp}}{A * I_c} \quad (2)$$

$$FF = \frac{I_{mp} * V_{mp}}{I_{sc} * V_{oc}} \quad (3)$$

Onde:

I_c : É a potência incidente em W/m^2

A : É a área útil do módulo em m^2

Tomando como base a equação (3) pode-se representar o fator de forma ideal que pode ser vista na figura 2.13, onde é possível visualizar com precisão a intercessão entre a curva $I \times V$ e a curva que representa o fator de forma ideal.

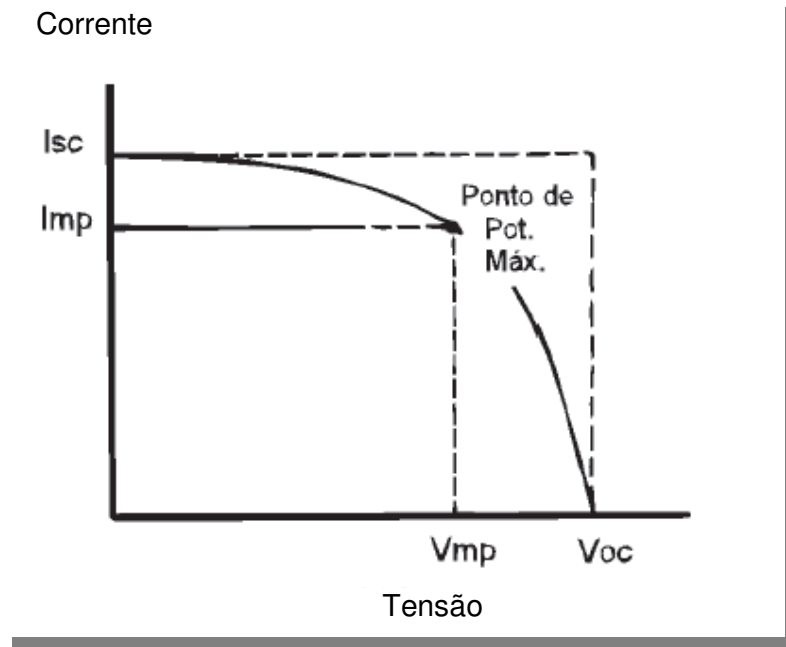


Figura 2.13 – Curva $I \times V$ e FF ideais e ponto de máxima potência [20].

2.4. Interligação com a Rede

Os inversores para a interconexão de geradores fotovoltaicos a rede possuem detectores do ponto de máxima potência, bem como dispositivos de proteção para o gerador fotovoltaico. A detecção do ponto de máxima potência é efetuada por meio de algoritmos implementados em processadores digitais de sinais, sendo que a eficiência deste depende da velocidade do processador para atualizar sua saída, mediante as variações do ponto de operação do gerador fotovoltaico entre outros.

O ponto de máxima potência em um gerador fotovoltaico é influenciado pelas condições ambientais, onde insolação e temperatura impactam a energia gerada. A irradiação e a temperatura são concorrentes na geração fotovoltaica, onde quanto maior a irradiação solar

ou insolação sobre os módulos fotovoltaicos, maior a potência instantânea do gerador e quanto maior a temperatura dos módulos, menor a potência instantânea obtida.

Os inversores podem ser classificados quanto ao modo de comutação com a rede, número de estágios e emprego de transformadores. Os inversores autocomutados podem operar como fontes de corrente ou tensão, sendo capazes de se sincronizarem com a rede elétrica [15]. Os comutados são capazes de operar apenas como fonte de corrente, sendo seu emprego destinado exclusivamente a sistemas conectados a rede de energia elétrica. Os inversores podem ser classificados ainda com base no número de estágios, como exemplifica a figura 2.14.

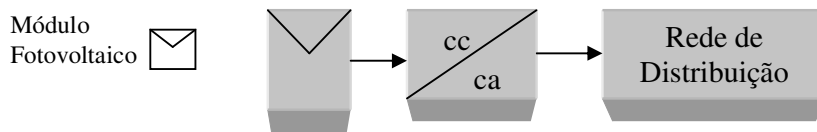


Figura 2.14 – Diagrama em blocos de um gerador fotovoltaico [15].

Na figura 2.14 tem-se o diagrama esquemático de um gerador fotovoltaico cujo inversor tem como funções não somente fazer a conversão c.c.-c.c., mas também determinar o ponto de máxima potência.

A figura 2.15 mostra um diagrama em blocos de um gerador fotovoltaico com um conversor c.c.-c.a. que tem como objetivo a detecção do ponto de máxima potência, enquanto que a conversão da tensão gerada em alternada cabe ao inversor c.c.-c.a. Nesta topologia, o inversor c.c.-c.a. tem como objetivo não apenas a interligação do gerador fotovoltaico à rede de distribuição, mas também garante a proteção do gerador fotovoltaico.

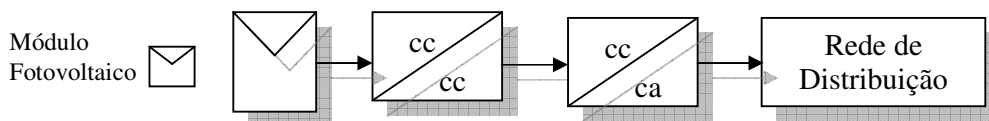


Figura 2.15 – Gerador fotovoltaico com dois estágios de conversão [15].

A terceira configuração quanto ao número de estágios de conversão é apresentada na figura 2.16 sendo denominada *mult-string*[15]. A primordial vantagem desta topologia é o melhor controle do ponto de máxima potência, associada a possibilidade de desconexão parcial de arranjos de módulos fotovoltaicos e seus inversores em situações de falha ou manutenção.

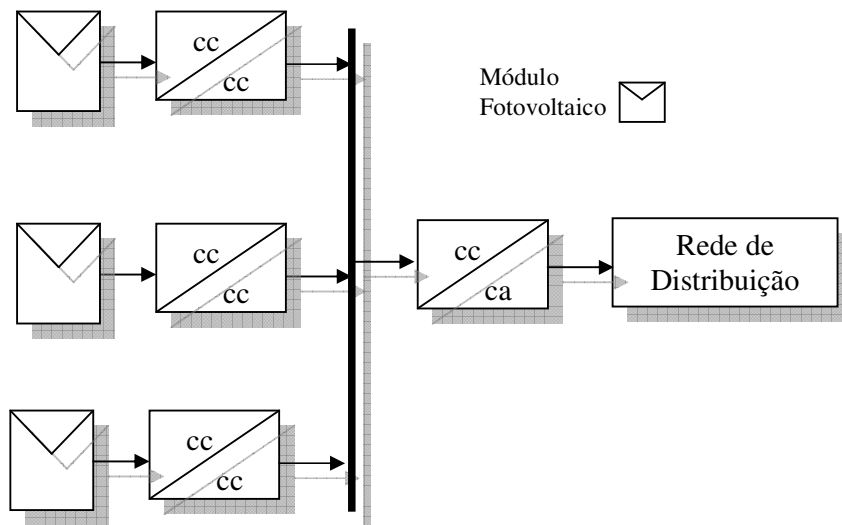


Figura 2.16 – Gerador fotovoltaico *mult-string* [15].

Como visto anteriormente os inversores empregam algoritmos que são executados por processadores digitais de sinais, sendo os mais comuns apresentados a seguir. Os algoritmos de detecção do ponto de operação em emprego atualmente são o de tensão e o algoritmo "perturbar e observar".

O algoritmo de tensão tem como característica a determinação de uma relação entre a tensão de máximo e a tensão circuito aberta, sendo o valor médio para esta relação de 0.8 [16]. O algoritmo de tensão efetua atualizações periódicas da tensão de circuito aberto, por meio da desconexão do gerador, o algoritmo obtém dados sobre a influência da temperatura e insolação sobre os painéis.

O algoritmo "perturbar e observar" tem como estratégia de controle manter a operação do gerador fotovoltaico próximo ao ponto de máxima potência, onde por meio de pequenas variações que o inversor insere no sistema se monitora o tempo de recuperação do mesmo.

Este algoritmo tem como desvantagem a resposta oscilante a perturbações rápidas, características de dias nublados.

O algoritmo de condutância incremental [17] ilustrado na figura 2.17 se vale do fato da derivada da função de potência ser nula no ponto de máximo.

$$\frac{Dp}{Dv} = I + V \frac{Di}{Dv} = 0 \quad (4)$$

A equação 4 permite a derivação de relações tomando como base a derivada da potência em função da tensão, sendo que se esta for menor ou maior que zero, fornecem ao algoritmo os elementos para a ação de controle que levará o gerador fotovoltaico ao seu ponto de máxima potência.

O ponto de máxima potência é obtido mediante a comparação do valor da condutância, sendo que quando esta é igual ao valor esperado (I/V) não há modificação do ciclo de trabalho, logo não há ajuste do MPPT. Um valor de maior que o valor nominal da condutância implica na necessidade de elevar a tensão que por sua vez indica a necessidade da carga de maior corrente.

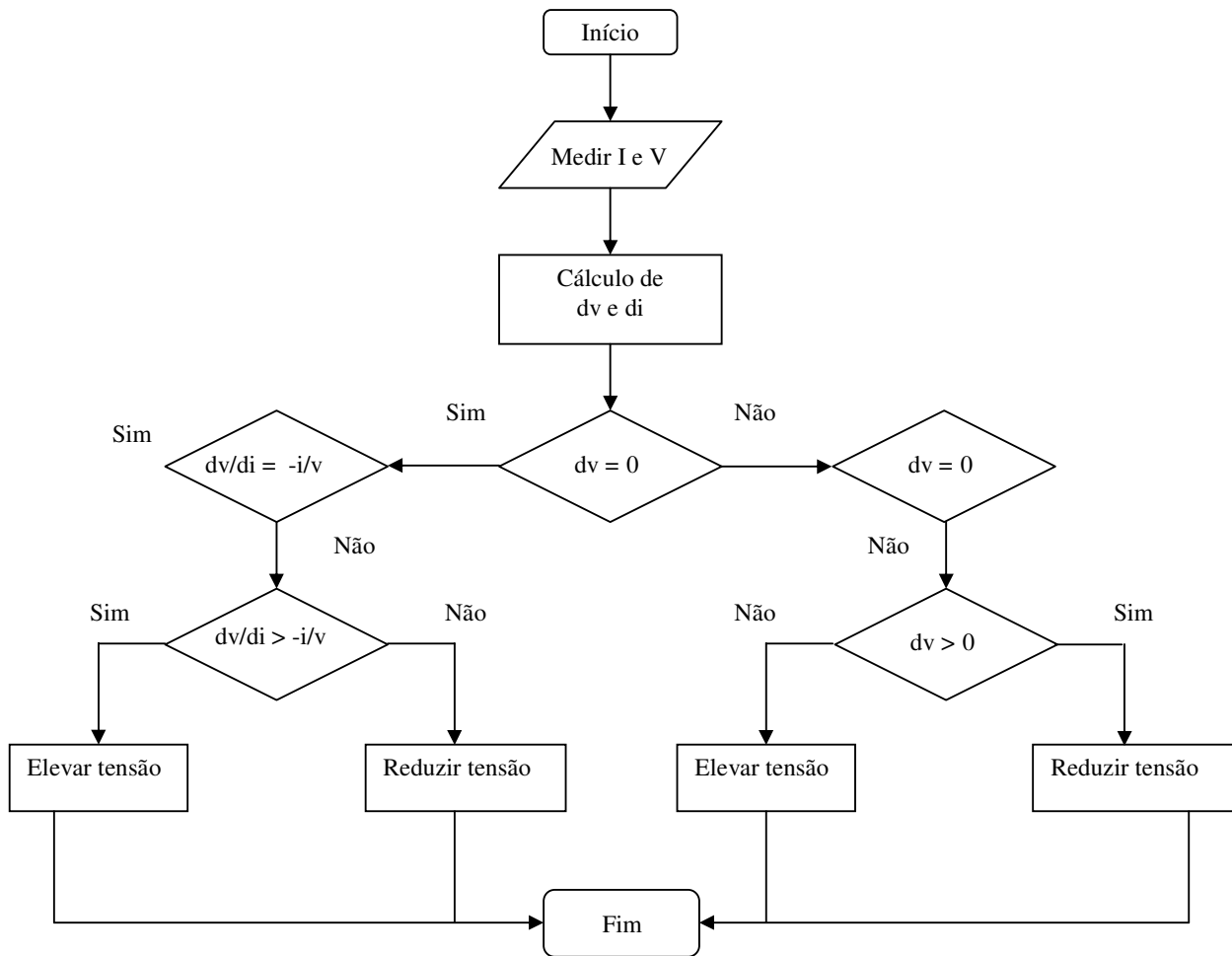


Figura 2.17 – Algoritmo da condutância incremental [17].

2.5. Proteção de Sistemas Fotovoltaicos

Os dispositivos de proteção são elementos importantes da instalação que compõem um gerador fotovoltaico [18], sendo entendidos como dispositivos de proteção os elementos necessários à operação segura tanto do circuito c.c. quanto do circuito c.a. Os dispositivos de proteção para sistemas de geração fotovoltaicos podem ser divididos nas seguintes categorias:

- Proteção dos módulos;
- Proteção do usuário;
- Proteção dos equipamentos ligados à rede de distribuição de energia.

A proteção dos módulos é representada por diodos de *bypass*, cuja função é impedir a circulação de correntes reversas indesejáveis entre arranjos de módulos, que podem danificar os mesmos.

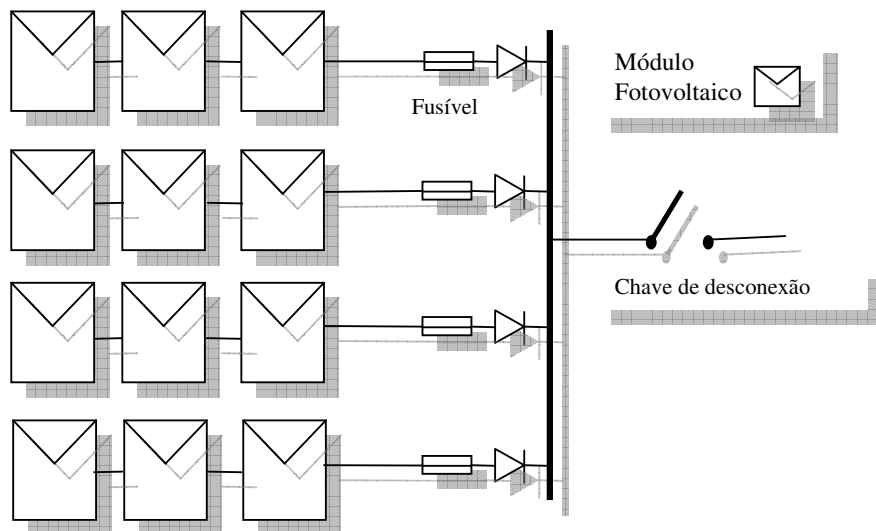


Figura 2.18 – Arranjo fotovoltaico com fusíveis, diodos de bypass e chave de desconexão [18]

Na figura 2.18 podem-se ver os elementos necessários à proteção e operação do circuito c.c. do gerador fotovoltaico, onde os fusíveis garantem proteção contra curto circuito e a chave seccionadora permite a separação do arranjo do gerador fotovoltaico, seja para manutenção ou devido à baixa insolação sobre o conjunto.

A proteção dos circuitos ligados à rede de distribuição de energia elétrica em corrente alternada é outra das necessidades de um gerador fotovoltaico, sendo esta assumida por disjuntores termomagnéticos, conforme se pode ver no diagrama na figura 2.19. Os disjuntores termomagnéticos garantem não apenas proteção contra curto circuito, mas também contra sobrecargas.

Os elementos de proteção do circuito c.a. do gerador fotovoltaico são destinados à proteção contra sobrecarga e curto circuito após o transformador, bem como a desconexão do gerador fotovoltaico da rede de distribuição.

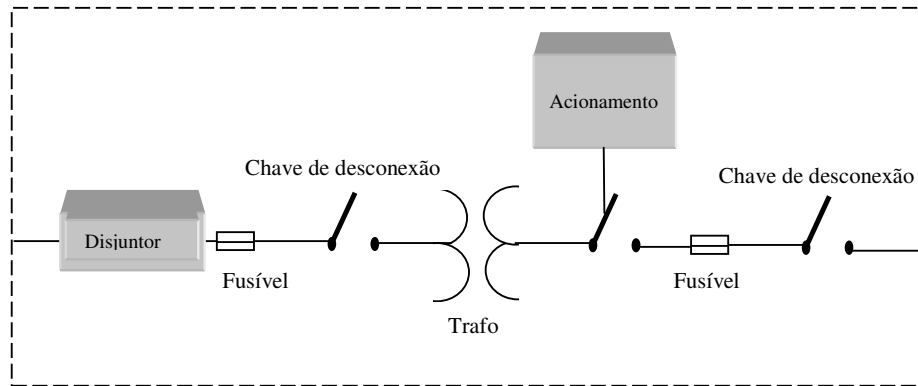


Figura 2.19 – Proteções do circuito de corrente alternada do gerador fotovoltaico.

Nesta etapa, o primário do transformador e o seu secundário devem ser protegidos por disjuntores termomagnéticos e ou chaves fusíveis, conforme a corrente elétrica entregue à rede por meio do gerador fotovoltaico. No que se refere ao secundário, devido às características de tensão da rede de distribuição de energia elétrica somente a proteção por meio de chave seccionadora com elementos fusível é necessária. Contudo, por questões ligadas à operação, uma chave de desconexão do gerador deve ser instalada após o transformador.

Os pontos de conexão das cargas, sejam estas localizadas nas proximidades do gerador, ou alocadas em uma rede de distribuição, não são abordados neste trabalho, sendo que a microgeração já possui legislação específica e equipamentos em desenvolvimento. A integração à rede de distribuição de energia elétrica em um sistema distribuído ou não possui os mesmo elementos básicos que caracterizam um gerador fotovoltaico. A distinção maior entre geradores fotovoltaicos ligados à rede de distribuição de energia ou a cargas locais reside nos sistemas de controle e supervisão, sendo para cargas locais empregados dispositivos controladores de carga.

2.6. Aterramento em Sistemas Fotovoltaicos

O aterramento da estrutura e conseqüentemente a equipotencialização é outro dos recursos de segurança encontrado em geradores fotovoltaicos, sendo sua obrigatoriedade determinada por norma técnica, no caso a NBR 5410. O aterramento da estrutura tem como objetivo a proteção do usuário contra choques elétricos, seja em corrente contínua ou alternada, bem como garantir a equipotencialização dos equipamentos e módulos em caso de descarga atmosférica. Devido às dimensões de uma planta de geração solar, durante tempestades podem surgir pontos da instalação expostos a densidades diferentes de cargas elétricas. O campo elétrico devido a esta diferença de carga pode induzir correntes nos elementos estruturais da planta, bem como nos condutores que interligam os diversos arranjos. A equipotencialização visa não apenas permitir o escoamento destas correntes indesejáveis, bem como por meio de dispositivos de proteção contra surtos, garantir a operação segura dos equipamentos que compõe o gerador fotovoltaico, sejam estes módulos ou inversores [17]. A figura 2.20 apresenta o diagrama em blocos de um gerador fotovoltaico com seu aterramento e dispositivos de equipotencialização.

A proteção contra descargas atmosféricas vindas da rede de distribuição de energia elétrica é assumida pelo aterramento e os dispositivos de proteção contra surto ou DPS. Contudo, pode se fazer necessária a inclusão de pára-raios na rede próxima ao transformador. A inclusão de dispositivo para raios junto ao transformador deve observar as normas de distribuição adotadas conforme a concessionária de distribuição de energia da localidade.

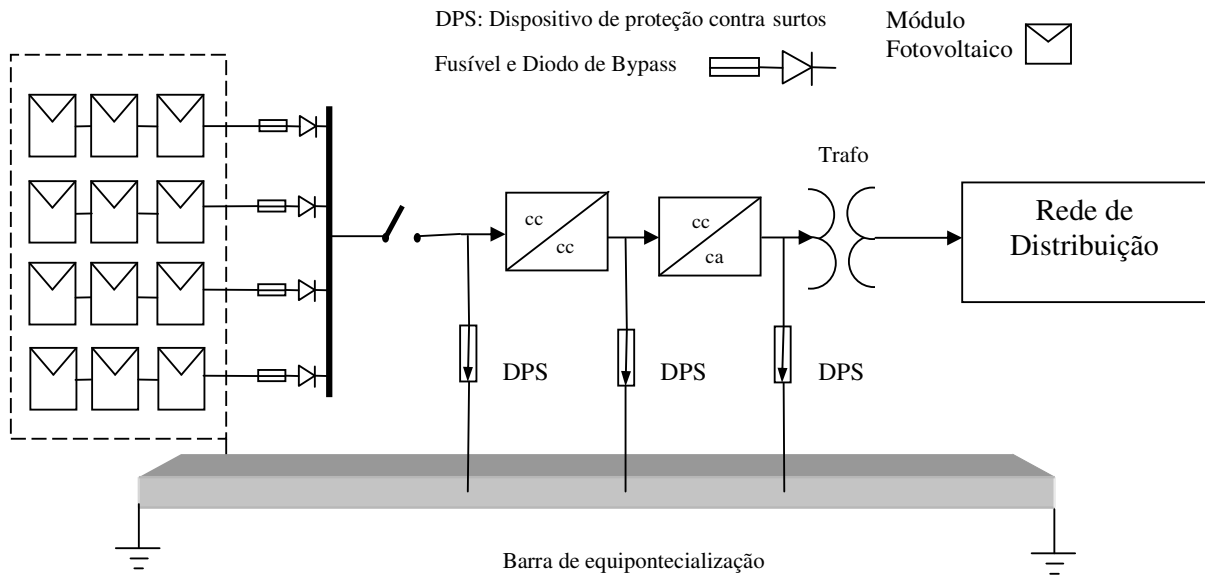


Figura 2.20 – Gerador Fotovoltaico com dispositivos de proteção contra surto e equipotencialização [18].

2.7. Conclusões

Neste capítulo foram abordados os sistemas de geração fotovoltaica conectados a rede, sendo tratadas suas características elétricas do ponto de vista da operação e proteção. A interligação dos sistemas fotovoltaicos a rede de energia, implica na necessidade da medição da energia fornecida. Diante disto o monitoramento eficiente da planta de geração ganha importância, conferindo maior confiabilidade a usina interligada a rede de energia.

3 - *Tecnologias Wireless*

3.1. Redes de Sensores sem Fio

As redes de sensores sem fio são uma tecnologia recente, que tem ganhado impulso em segmentos como automação residencial, automação de processos e medicina [21]. Atualmente é possível interligar todos os interruptores de uma residência por meio de módulos de controle sem fio, sendo possível o monitoramento de cada um a distâncias de 50 a mais de 100 metros [22]. Não apenas circuitos de luz podem ser comandados por aplicações sem fio, mas equipamentos de ar condicionado, câmeras de vídeo e sistemas de alarme. A comodidade associada a sistemas sem fio permite vantagens como rápida expansão, estrutura flexível e interação com sistemas cabeados. O custo associado a estas tecnologias tem caído na última década, devido a integração em larga escala associada ao desenvolvimento de protocolos que permitem a rápida implementação das mais variadas aplicações.

As redes de informática tradicionais, devido às características físicas dos ambientes onde estão estruturadas são dedicadas ao tráfego de volumes elevados de dados [23]. As redes de sensores sem fio privilegiam o número de equipamentos participantes, ou nós em detrimento da velocidade. Diante disto a primeira e mais marcante diferença entre as redes cabeadas e as redes de sensores sem fio é o tamanho, seguido da necessidade do tráfego de pequenos volumes de dados, algo que implica em taxas de transferência baixas. As baixas velocidades de transferência associadas às redes de sensores sem fio, pode parecer uma limitação. Contudo, devido a esta característica, o custo dos dispositivos é menor, permitindo a implementação de aplicações onde as demais tecnologias seriam inviáveis economicamente.

Tecnologias como a rede cabeada ou a *Wifi* não poderiam ser empregadas no monitoramento de módulos fotovoltaicos em usinas solares, pois o custo da rede de monitoramento seria proibitivo, algo que não acontece com as redes de sensores sem fio. Os componentes das redes sem fio devido ao seu protocolo, possuem características que permitem a sua configuração como elemento de interligação dos sensores, sejam estes de saída analógica ou digital [24]. Além disto, os dispositivos das redes de sensores sem fio podem ainda serem configurados para operar como dispositivos de gestão dos dados na rede ou como dispositivo que estrutura, organiza e endereça a rede. A mobilidade dos dispositivos de rede ou nós é outra característica que diferencia a rede de sensores sem fio das redes cabeadas, entretanto, esta mobilidade associada à necessidade de energia cria a obrigatoriedade do nó possuir um *hardware* simples e de baixo consumo [25]. A necessidade de um *hardware* simples e de baixo consumo, atualmente não constitui um limitador, pois existem diversas tecnologias para fabricação de circuitos integrados que possuem estas características.

O diagrama esquemático do *hardware* de um dispositivo para rede de sensores sem fio é apresentado na figura 3.1, onde se pode ver que o uso de microcontroladores garante a flexibilidade e simplicidade de *hardware* necessário [25]. Na atualidade já existem microcontroladores dedicados para a criação de aplicação destinadas a implementação de redes de sensores sem fio.

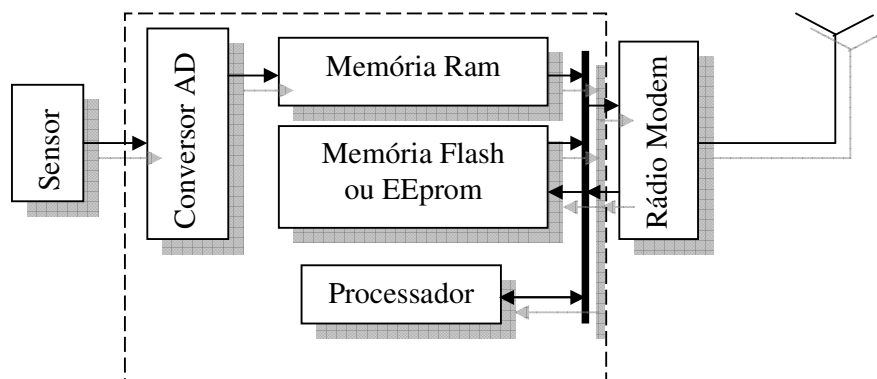


Figura 3.1 – Diagrama em blocos de um nó de rede de sensores sem fio [25].

O protocolo de comunicação é o elemento que responde por questões relativas ao controle do consumo de energia, organização da rede e tráfego de dados, sendo este que qualifica a

tecnologia empregada na organização das redes [26]. Diferentemente das tecnologias de controle remoto sem fio que não possuem endereçamento ou recursos de gestão, as tecnologias associadas a estruturação de redes *wireless* possuem camadas organizadas por meio dos protocolos. A organização da estrutura da rede *wireless* confere aos sistemas de redes de sensores sem fio todos os benefícios de uma rede cabeada, algo que não acontece com os sistemas tradicionais de controle remoto.

3.2. Comparativo das Tecnologias Wireless

As tecnologias *wireless* mais empregadas atualmente são apresentadas de forma sucinta na tabela 1, sendo que a tecnologia de comunicação difere em fatores como velocidade de tráfego, alcance e aplicações.

Tabela 1 – Comparativo das tecnologias *wireless*

<i>Padrão</i>	<i>Taxa de Transmissão</i>	<i>Consumo Transmissão</i>	<i>Consumo Standby</i>	<i>Capacidade da Pilha</i>
<i>BlueTooth</i>	<i>1Mbps</i>	<i>50 mA</i>	<i>0,2 mA</i>	<i>100 KBytes</i>
<i>Wi-Fi</i>	<i>54 Mbps</i>	<i>400 mA</i>	<i>20 mA</i>	<i>> 100 KBytes</i>
<i>Zigbee</i>	<i>250 Kbps</i>	<i>50 mA</i>	<i>50 μA</i>	<i>34KBytes</i>

As tecnologias listadas têm sua aplicação conforme suas características primordiais que são a taxa de transmissão e capacidade da pilha. Entretanto, no que se refere à implantação de redes de sensores sem fio, o consumo durante a transmissão bem como em modo *standby* devem ser considerados [27].

A tecnologia *Bluetooth* devido a sua taxa de transmissão tem ganhado espaço, na implementação de soluções *wireless* para dispositivos periféricos de computadores e sistemas de tecnologia de informação. A maior limitação da tecnologia *Bluetooth* é o número reduzido de dispositivos que podem ser agrupados, sendo este limitado a sete dispositivos. O alcance dos dispositivos que empregam esta tecnologia é de até 100 metros, contudo o número baixo de dispositivos que podem ser agrupados ou pareados inviabiliza o uso desta tecnologia para a estruturação de redes de sensores sem fio [28]. A tecnologia *Wifi* apresenta como vantagens boa imunidade a ruídos e grande capacidade de tráfego,

contudo seu consumo de energia é elevado. A tecnologia *Wifi* tem ganhado espaço nos últimos anos para a estruturação de redes sem fio em escritórios e pequenas e médias empresas. No que se refere a aplicação para construção de redes de sensores sem fio, a tecnologia *Wifi* não é uma opção, o que se deve ao seu elevado consumo de energia, fator este que é determinante para a viabilização de uma rede de sensores sem fio. O alcance dos dispositivos que utilizam a tecnologia sem fio se situa no limite de 30 metros, sendo este parâmetro fortemente impactado por obstruções como paredes, biombos e portas. O custo associado à tecnologia Bluetooth é baixo, enquanto que para os dispositivos *Wifi* o custo não permite o desenvolvimento de redes com número elevado de dispositivos.

3.2.1. Arquitetura da Tecnologia Bluetooth

Como citado anteriormente a tecnologia *Bluetooth* pode manter até sete dispositivos conectados, conforme ilustra a figura 3.2, sendo estes escravos ligados a um dispositivo mestre [23]. O dispositivo *Bluetooth* pode estar ligado à rede, sendo mantido por meio da ação do dispositivo mestre em um de quatro estados possíveis. Estados estes que são mestre, escravo ativo, escravo passivo e em espera.

O estado mestre pode ser definido como aquele no qual o dispositivo tem o controle sobre os nós que compõe a rede, sendo possível ao mestre modificar o estado de qualquer um dos dispositivos integrantes da rede a qualquer momento. O escravo ativo é representado por um dispositivo que se comunica na rede e ainda monitorando os estados dos demais dispositivos. O escravo passivo permanece ligado à rede, mas apenas monitora a rede aguardando receber uma solicitação do dispositivo mestre.

O dispositivo em espera diferentemente do escravo passivo não se mantém sincronizado, pois não efetua o monitoramento da rede, contudo pode ter seu estado modificado a qualquer momento por meio do dispositivo mestre.

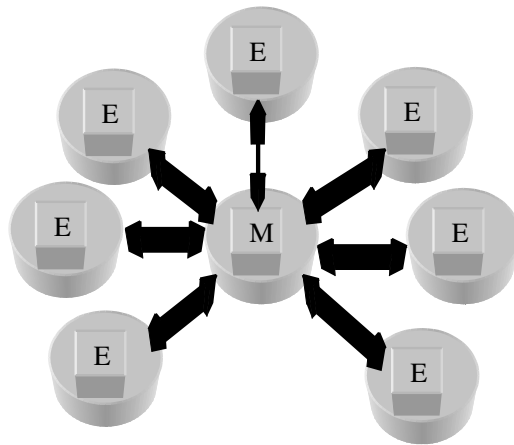


Figura 3.2– Rede *Bluetooth* com dispositivos Escravos (E) e um dispositivo Mestre (M) [23].

Um ponto forte desta arquitetura é o controle de consumo de energia, onde o dispositivo mestre controla o fluxo de informações, logo impacta atividade do circuito de rádio frequência. O circuito de rádio frequência é a maior fonte de consumo de energia. Dessa forma a redução do seu tempo de funcionamento, bem como a redução do número de dispositivos transmitindo permite a redução do consumo.

O protocolo *Bluetooth* é organizado em camadas sendo estas a camada de rádio, *baseband*, L2CAP (*Lógic Link Adaptation Protocol*) e a camada de *Middleware* [28]. A camada de rádio é o elemento responsável pelo envio de dados, operando com modulação FHSS ou (*Frequency Hooping Spread Spectrum*), na frequência de 2.4 GHz, com 79 canais de 1M e taxa de transferência máxima de 1Mbps. A camada *baseband* tem como papel primordial a criação dos pacotes de bits que serão enviados e a determinação dos intervalos de tempo de comunicação entre dispositivo mestre e escravos.

Uma característica atribuída a *baseband* é a organização do início das transmissões, onde o mestre inicia a comunicação nos intervalos de tempo pares, enquanto que os escravos nos intervalos ímpares.

A formação do *link* de comunicação entre mestre e escravo é outra função desta camada, sendo possível o *link* síncrono e o assíncrono. A transmissão por meio de um *link* assíncrono é empregada para a transmissão de dados irregulares e sem a necessidade de garantia de integridade, enquanto que a comunicação síncrona é empregada para pacotes que necessitam ser enviados em tempo real.

A camada L2CAP tem como função o gerenciamento de potência, bem como o estabelecimento dos canais lógicos de comunicação entre dispositivos. Esta camada ainda tem como incumbências a recepção de pacotes, sua divisão e organização até o tamanho máximo de 64 KB. A multiplexação e demultiplexação dos pacotes de origens distintas e a gestão da qualidade da comunicação são funções de responsabilidade desta camada.

A camada *Middleware* contém protocolos de padrões como WAP (*wireless Application protocol*), TCP (*Transmission Control Protocol*) e IP (*Internet Protocol*), além do protocolo de descoberta de serviço, permitindo que dispositivos obtenham informações sobre serviços disponibilizados nos dispositivos da rede [28].

Existe outra camada associada ao protocolo *Bluetooth*, sendo esta a de perfis que caracterizam operações específicas e de uso padronizado e que conferem funcionalidades ao dispositivo *Bluetooth*, sendo estes perfis listados na tabela 2.

Tabela 2– Perfis e funções do protocolo *Bluetooth*

<i>Perfil</i>	<i>Função</i>	<i>Perfil</i>	<i>Função</i>
<i>Acesso Genérico</i>	<i>Gestão do link</i>	<i>Telefone sem fio</i>	<i>Conecta o telefone a sua base fixa</i>
<i>Descoberta</i>	<i>Descoberta de serviços</i>	<i>Intercom</i>	<i>Walk talk</i>
<i>Porta serial</i>	<i>Comunicação serial</i>	<i>Headset</i>	<i>Comunicação hands-free</i>
<i>Troca de objetos</i>	<i>Relação Cliente servidor</i>	<i>Push de frames</i>	<i>Troca de objetos (fotos)</i>
<i>LAN</i>	<i>Comunicação móvel e LAN</i>	<i>Transferência de arquivos</i>	<i>Permitir a transferência de arquivos</i>
<i>Conexão discada</i>	<i>Telefone modem</i>	<i>Sincronização</i>	<i>Conexão de dispositivos a um computador</i>
<i>Fax</i>	<i>Comunicação telefone móvel e fax</i>		

3.2.2. Arquitetura da Tecnologia Wifi

A arquitetura da tecnologia *Wifi* permite a interligação via de rede de dispositivos com média à elevada taxa de transferência de dados [23], sendo que a faixa de rádio com frequências de 2,4GHz e modulação DSSS (*Direct-Sequence Spread Spectrum*). A WLAN (*wireless Local Area Network*) utiliza o protocolo 802.11 que permite a transmissão full duplex com taxas de transferência de 11Mbps na banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*). A tecnologia *Wifi* permite a implantação de redes simples, sem dispositivo de gerenciamento da rede como se pode ver na figura 3.3. Neste arranjo, os dispositivos estão conectados cada um com seu endereço, sendo a configuração da rede fixa, não sendo possível a troca do endereço.

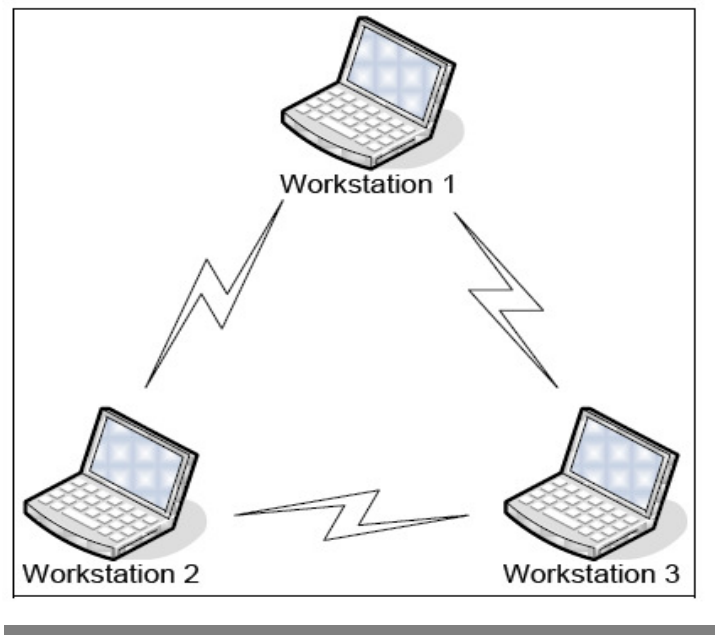


Figura 3.3– Rede WLAN sem ponto de acesso [23].

Este tipo de arquitetura é definido como independente, sendo de simples implantação. Contudo, a limitação de tráfego impede a comunicação entre mais de duas estações de trabalho ou *workstations*.

Na figura 3.4 tem-se uma arquitetura de rede *Wifi* onde são empregados pontos de acesso, tornando a rede mais complexa. Entretanto, nesta arquitetura, permite-se um aumento

significativo de tráfego bem como a inclusão dinâmica de equipamentos. A possibilidade de inserir uma *workstation* ou retirá-la rapidamente confere a esta arquitetura flexibilidade aliada à velocidade, algo que a rede cabeada não consegue atingir.

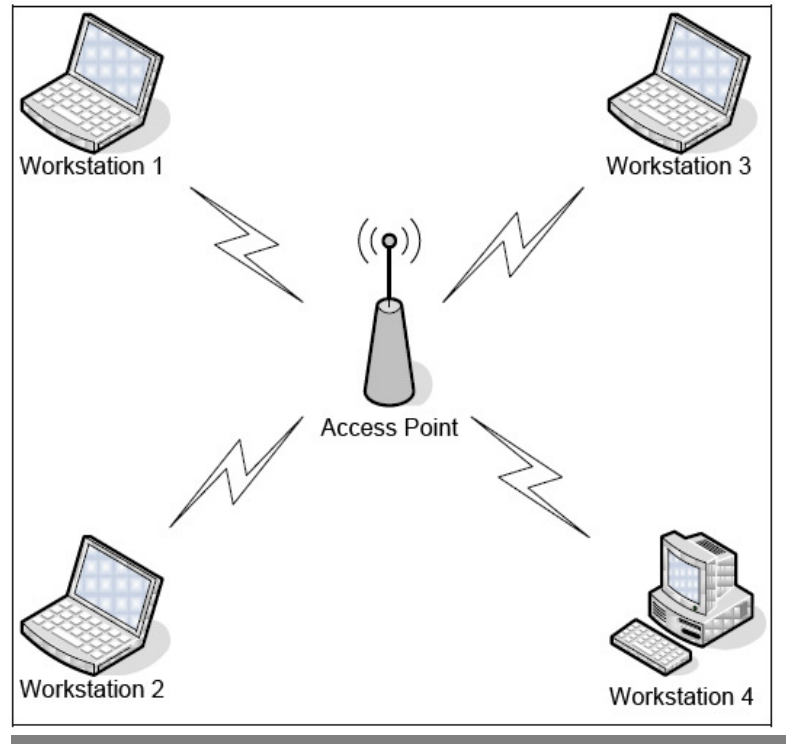


Figura 3.4 – Rede WLAN com ponto de acesso [23].

O protocolo 802.11 [23] se estrutura em células denominadas BSA (*Basic Service Area*), sendo que as dimensões da BSA dependem de fatores como a potência dos transmissores e receptores nas estações. O protocolo 802.11 ainda conta com as camadas BBS (*Basic Service Set*), AP (*Access Point*), DS (*Distribution System*), ESS (*Extended Service Set*).

A camada BBS é definida como um grupo de estações subordinadas a uma única coordenação que determina quando as estações podem transmitir ou receber dados. A camada AP é responsável por permitir a comunicação entre estações no BSS, enquanto que

DS permite a ligação de múltiplos BSS permitindo a cobertura de áreas multi-célula. O ESS é o conjunto formado por meio da ligação do DS interligando vários BSS.

3.2.3. Arquitetura da Tecnologia ZigBee

A tecnologia denominada ZigBee tem se destacado em muito nos últimos anos, sendo adotada em áreas como automação, segurança patrimonial e diversas redes de sensores sem fio. A aplicação desta tecnologia para a implementação de redes de sensores sem fio, destinadas ao monitoramento de plantas fotovoltaicas conta com diversas aplicações [21]. O maior diferencial da tecnologia ZigBee é a capacidade de alocação de dispositivos à rede, sendo esta situada em torno de 65000 dispositivos. O número de dispositivos que podem ser alocados a uma rede ZigBee, torna esta tecnologia muito atrativa para a implementação de redes de sensores sem fio destinada ao monitoramento das características de tensão, corrente e temperatura para plantas de geração fotovoltaica. A figura 3.5 apresenta a arquitetura básica de um dispositivo ZigBee, podendo este ser destinado a interfacear os demais dispositivos da rede, ou os diversos sensores ou transdutores necessários ao monitoramento dos módulos fotovoltaicos de uma planta solar [21].

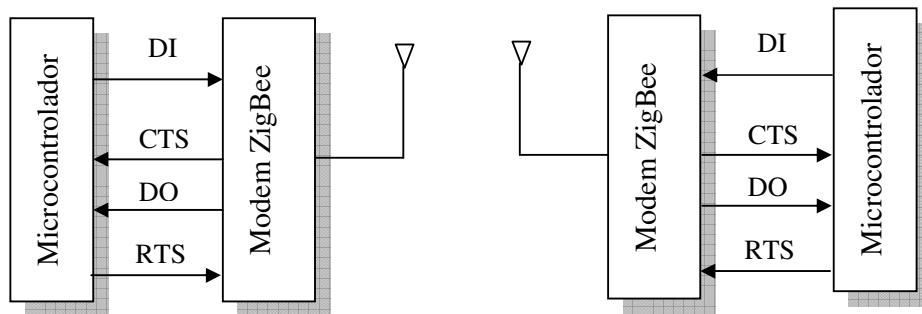


Figura 3.5– Arquitetura básica ZigBee [21].

da comunicação entre os dispositivos de uma rede de sensores sem fio. O sinal DI ou DATA IN, que significa dados que serão enviados ao modem ZigBee. O sinal DO representa os dados a serem enviados ao microcontrolador, enquanto que os sinais CTS (*Clear to send*) e RTS (*Request to send*) são responsáveis em controlar o fluxo de dados entre o modem ZigBee e o microcontrolador [29].

Os dispositivos destinados ao monitoramento de uma planta solar fotovoltaica tomando como referência a topologia básica de um dispositivo ZigBee, apresentariam a inclusão dos sensores ligados às entradas analógicas dos microcontroladores, no que se refere aos módulos sensores enquanto que os demais dispositivos seriam destinados a montagem da rede de sensores sem fio, mantendo assim sua topologia básica.

A figura 3.6 mostra a topologia de um dispositivo sensor aplicável a uma rede de sensores sem fio para a implantação do monitoramento das características de tensão, corrente e temperatura de um conjunto de módulos fotovoltaicos [30].

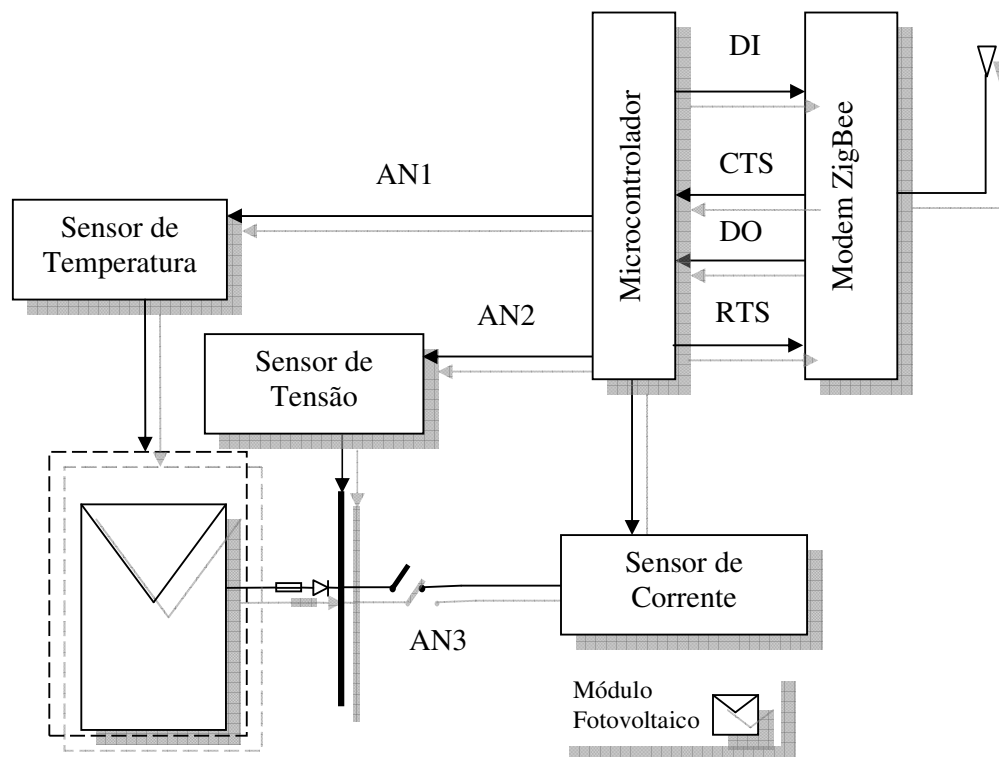


Figura 3.6 – Dispositivo sensor ZigBee para monitoramento de um módulo fotovoltaico [30].

A precisão associada a uma rede de sensores sem fio depende basicamente do correto posicionamento dos dispositivos sensores ou nós, bem como da precisão e estabilidade dos sensores, sendo entendida como estabilidade a característica que permite ao sensor manter seu nível de sinal de saída independente das variações de temperatura do ambiente [31]. A variação da temperatura do ambiente é um ponto importante no desenvolvimento de um

dispositivo de medição de uma rede de sensores sem fio, pois estes estarão continuamente expostos às condições climáticas, seja calor ou frio, além da umidade [32].

No que se refere a erros devidos à variação da temperatura ambiente, o dispositivo sensor deve ser projetado com adoção estabilidade de suas características para temperaturas de até 70°C. O sensor de corrente a ser empregado será obtido por meio da associação em paralelo de 03 WSC6927 [34] com valor de 1 Ω , de modo a compatibilizar a dissipação de potência. O sensor shunt do tipo *Low Side* foi escolhido devido a sua adequação a fontes de alimentação simples, além disto, a ausência da necessidade de monitoramento de condições de curto-circuito. No que se refere ao monitoramento da temperatura do módulo, esta será efetuada por meio do circuito integrado sensor de precisão LM35, sendo ambos os sensores vistos na figura 3.7.

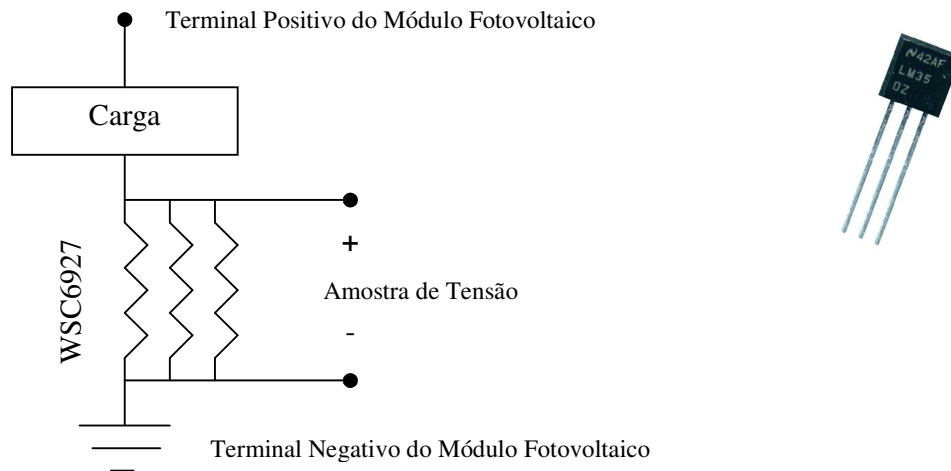


Figura 3.7 – Sensor *de corrente e de temperatura* [34].

A medição de tensão emprega o uso de um circuito divisor de tensão, responsável pela adequação da tensão de saída do módulo fotovoltaico, aos limites da entrada do módulo sensor. [34].

A figura 3.8 mostra a estrutura com a compensação por meio de um algoritmo, sendo esta técnica viável, pois o sensor de temperatura do módulo fornecerá informações sobre o

microambiente no qual o sensor está inserido. Dessa forma, para que o módulo ou para o dispositivo sensor, a temperatura será a mesma.

No que diz respeito a perturbações eletromagnéticas, os dispositivos sensores sem fio possuem boa robustez, algo que lhes é conferido devido à inexistência de cabos com comprimentos elevados. O alcance obtido com a tecnologia ZigBee é outra característica marcante, pois existem modems cujo alcance pode chegar a 3,2 km [35].

O protocolo adotado para a tecnologia ZigBee é estruturado a partir do protocolo IEEE 802.15.4 [36], cujas camadas são ilustradas na figura 3.8, onde temos a camada física e camada de controle de acesso ao meio.

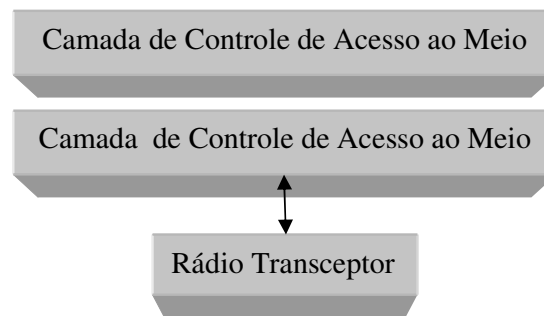


Figura 3.8 – Camadas do Protocolo IEEE 802.15.4 [36].

A camada física compreende os elementos necessários ao estabelecimento do enlace de rádio e conversão de sinais vindos do microcontrolador ou sensor, sendo estes listados conforme se pode ver abaixo:

- ***Funções da Camada Física Protocolo IEEE 802.15.4***
 - *Envio de dados a camada de acesso ao meio*
 - *Recepção e transmissão*
 - *Ativação ou não do rádio modem*
 - *Detectar energia no canal (Qualidade do link)*
 - *Seleção do canal*
 - *Indicação da qualidade o link*
 - *Múltiplo acesso*

A camada de controle de acesso ao meio tem como papel gerenciar o tráfego de dados no meio físico [36], bem como os elementos de qualidade da conexão ou link, sendo suas funções listadas a seguir:

- ***Funções da Camada de Acesso ao Meio Protocolo IEEE 802.15.4***
 - *Conexão confiável entre dispositivos*
 - *Controle do acesso múltiplo*
 - *Associação de redes*
 - *Sincronismo entre localizações*
 - *Geração de localização*
 - *Segurança do dispositivo*

O sincronismo entre localizações, bem como a geração de uma localização consistem em identificar o dispositivo por meio de um conjunto de endereços para o envio de dados ou simplesmente manter armazenado o conjunto de endereços do percurso de melhor qualidade do sinal que leva a um dispositivo.

O protocolo ZigBee é estruturado sobre o IEEE 802.15.4, que tradicionalmente se caracteriza por ser aplicado em redes de baixa taxa de transferência ou seja redes LR-WPAN (*Low rate wireless Personal Area Network*). A distinção entre o protocolos ZigBee e IEEE 802.15.4 se deve à existência de camadas adicionais, denominadas, camadas de rede e de aplicação.

A figura 3.9 apresenta a distribuição das camadas do protocolo ZigBee [25], onde se pode ver as camadas inferiores que caracterizam o protocolo IEEE 802.15.4.

A camada de rede tem como incumbência o controle do fluxo de dados, a distribuição dos endereços dos dispositivos que compõem a rede, bem como a técnica de transmissão. A técnica de transmissão determina quais tipos de dispositivos de controle ou gestão da rede devem ser empregados, sendo estes o coordenador ou roteador.

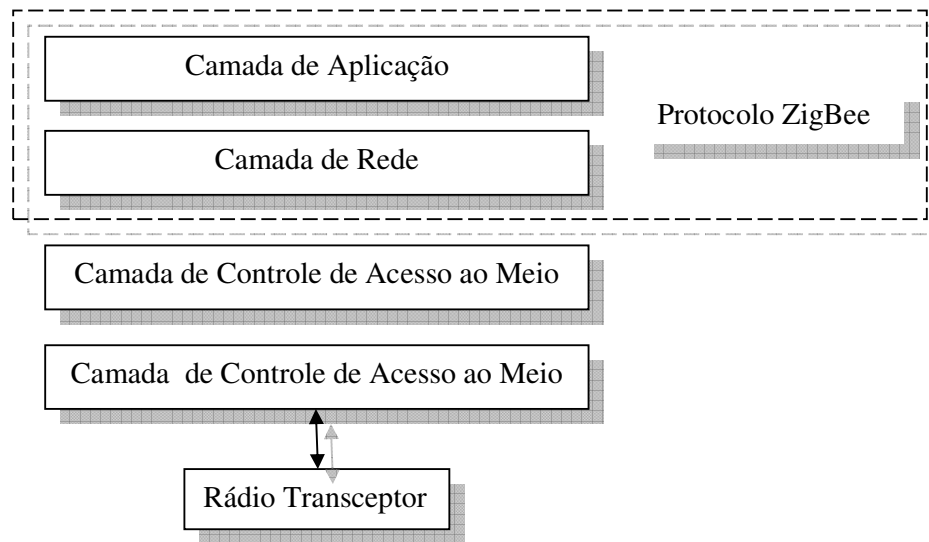


Figura 3.9 – Camadas do protocolo ZigBee [25].

O Coordenador tem como função a construção lógica da rede por meio da distribuição de endereços e identificação do canal a ser utilizado nas conexões, enquanto que o roteador distribui os dados por meio das melhores rotas, ou seja, aqueles que tem melhor sinal. O roteador e o coordenador são definidos como dispositivos de características plenas, enquanto que os dispositivos sensores são do tipo características reduzidas.

A camada de aplicação é organizada em três seções básicas denominadas *Application Support*, *ZigBee Device Objects* e *Application Framework*, sendo a seção *Application Support* responsável por interfacear a camada de rede com a camada de aplicação.

A camada *application framework* é responsável por armazenar os *application objects*, sendo um objeto representado por seu endereço e tipo de dispositivo ZigBee, seja este roteador, coordenador ou dispositivo final. A capacidade de controle de uma rede ZigBee está associada ao número de *application objects* existentes que é limitado a 240 [25], multiplicados por outros 240 dispositivos finais, como ilustra a figura 3.10.

A capacidade de controle é crucial na implementação de uma aplicação. Contudo a padronização associada aos diversos fabricantes de dispositivos ZigBee estabelece a garantia de interligação entre dispositivos, cada um com seu perfil de aplicação.

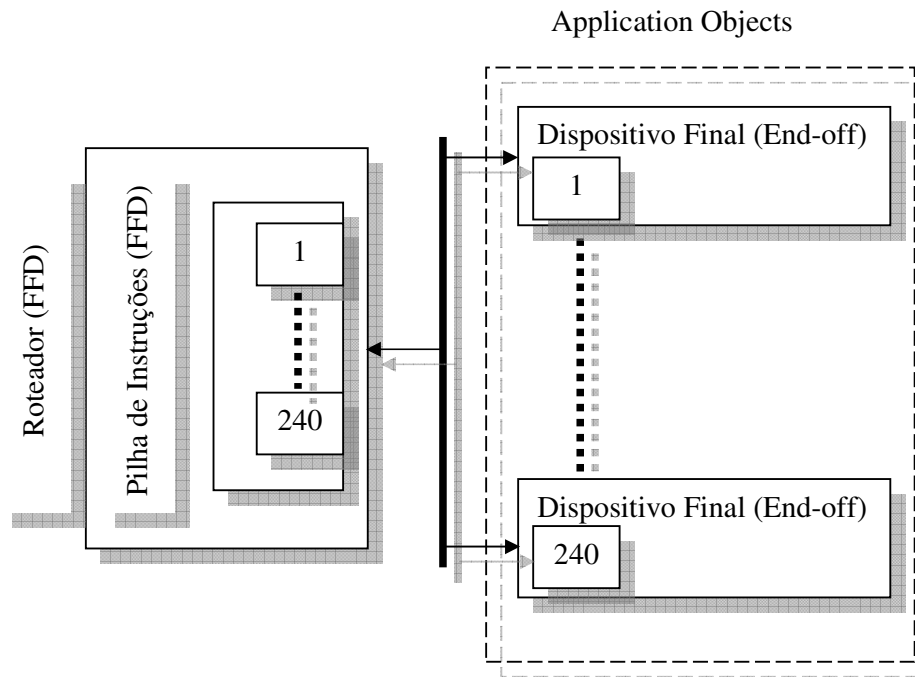


Figura 3.10 – Capacidade de controle de dispositivos de uma rede ZigBee [25].

O perfil de aplicação é o que determina as funcionalidades do dispositivo, com relação aos sensores e os dados coletados, sendo que qualquer perfil de aplicação desenvolvido por uma empresa deve seguir a estrutura do protocolo Zigbee. Esta observância garante que uma rede de sensores sem fio possa ser ampliada facilmente, mesmo com o uso de dispositivos fabricados por empresas distintas, não existindo falhas de comunicação ou instabilidades.

Diante disto a possibilidade do uso de um grande número de nós, associados à possibilidade de atualização e ampliação da rede, sem o descarte dos dispositivos com software de versão diferente, torna a tecnologia ZigBee muito mais atraente para a implementação de redes de sensores sem fio.

3.3. Conclusões

No capítulo anterior foram discutidos aspectos com relação a tecnologia *wireless* aliados as redes de sensores sem fio, sendo que a tecnologia Zigbee demonstrou ser a escolha mais adequada. No capítulo seguinte são abordadas as características da tecnologia Zigbee com atenção as técnicas de roteamento que podem impactar a topologia da rede de sensores.

4 - *Monitoramento de Plantas Fotovoltaicas*

4.1. Redes Zigbee para o Monitoramento de Plantas Solares

As plantas de geração fotovoltaica têm ganhado maior espaço no matriz energética, sendo o monitoramento da tensão, corrente e temperatura do painel as características alvo do monitoramento.

As dimensões da planta de geração fotovoltaica, bem como a sua arquitetura são elementos determinantes na escolha da topologia de rede de sensores sem fio a ser adotada. A dimensão de uma planta de geração fotovoltaica cria a necessidade de uma topologia de rede que permita o monitoramento de cada módulo com baixo custo e robustez considerando velocidade de transferência e interligação dos pontos de rede.

O arranjo físico do campo de módulos fotovoltaicos deve permitir o melhor aproveitamento das características da área, onde a planta solar deverá ser implantada. Desta forma o arranjo físico impacta a topologia da própria rede de sensores, onde elementos como cabos ou alcance dos dispositivos se tornam importantes. O emprego de cabeamento é sem dúvida a pior abordagem para implantação de uma rede de sensores, mesmo que seja apenas para permitir o alcance a um conjunto de sensores.

Tomando como base os fatores arquitetura e arranjo físico, torna-se evidente que a técnica de transmissão e roteamento da rede de sensores sem fio será determinante no desenvolvimento de uma aplicação destinada ao monitoramento de plantas fotovoltaicas.

Os dispositivos ZigBee possuem em seu protocolo duas técnicas de transmissão, sendo estas a *Broadcast* e a *Unicast* [26]. Na transmissão *Boadcast* os dados são transmitidos a partir do coordenador (C) por meio dos roteadores (R) a cada dispositivo final (E) ligado a rede, como se pode ver na figura 4.1.

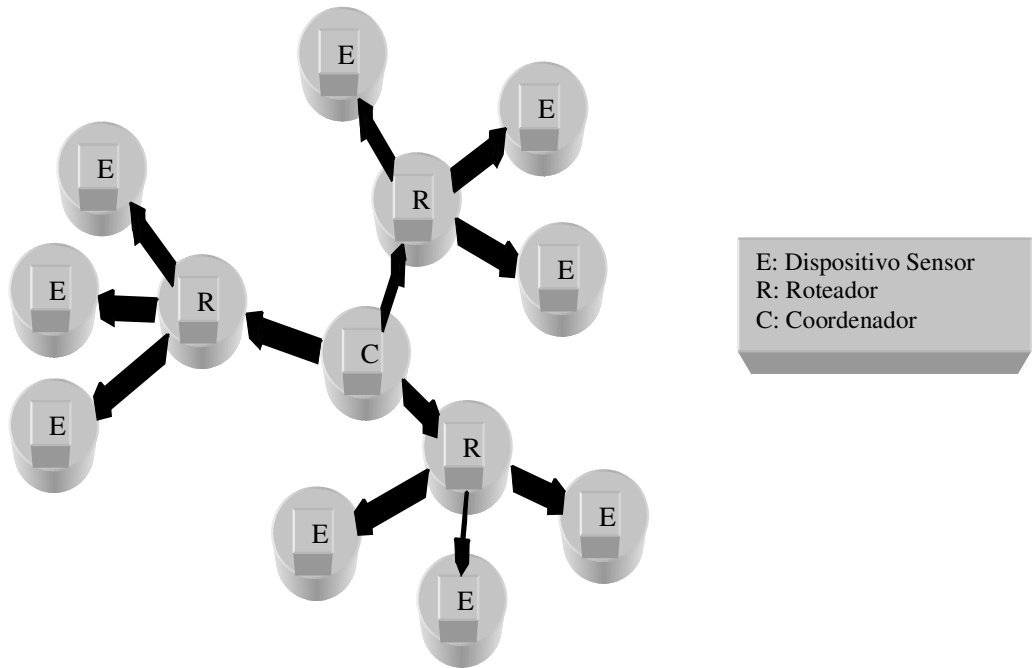


Figura 4.1 – Rede ZigBee transmitindo dados com a técnica *Broadcast* [26].

A técnica de transmissão *unicast* é utilizada para enviar diretamente a um dispositivo final o pacote de dados, sendo que a descoberta do endereço do dispositivo na rede é efetuada por meio de uma transmissão *broadcast*. A determinação do endereço de um dispositivo na rede é efetuada por meio do envio de um pacote de dados contendo o endereço do dispositivo destinatário. Quando este endereço é encontrado o dispositivo destinatário envia um pacote de resposta ao dispositivo que fez a solicitação.

Uma vez conhecido o endereço do destinatário o dispositivo que fez a solicitação envia os dados diretamente ao dispositivo final desejado, sendo que este endereço leva o pacote de dados ao roteador ligado ao dispositivo final destinatário conforme se pode ver na figura 4.2.

As técnicas de transmissão apresentadas anteriormente são os meios empregados para o envio e recepção de dados. Contudo, para redes de sensores sem fio, destinadas ao monitoramento de plantas solares as redes devem possuir um número elevado de dispositivos.

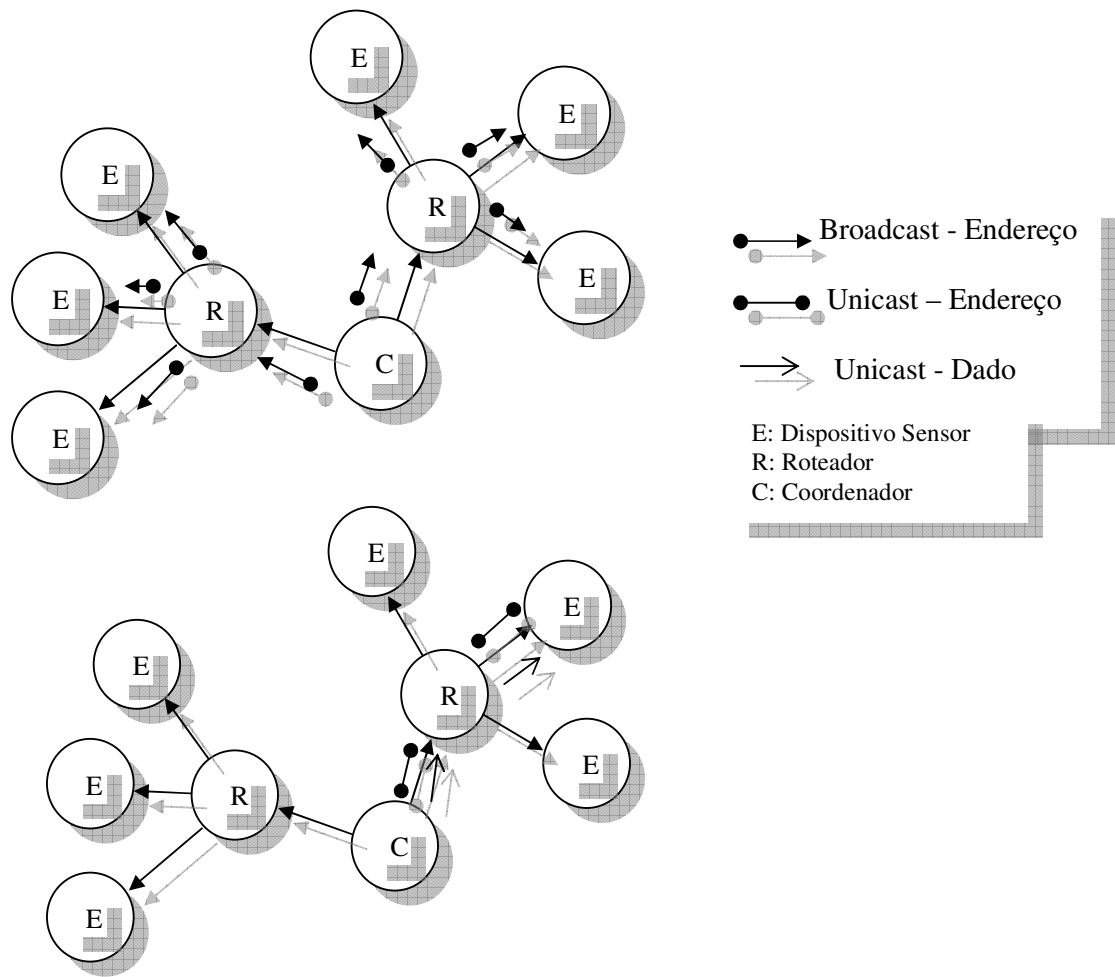


Figura 4.2 – Rede ZigBee transmitindo dados com a técnica *Unicast* [26].

Diante disto, os dispositivos finais estarão distantes do dispositivo coordenador, sendo esperado que existam mais de um roteador entre o coordenador e os dispositivos finais. Neste cenário, faz-se necessária a determinação da melhor rota para que os dados sejam enviados ou recebidos, onde o primeiro passo é identificar as rotas com melhor qualidade de sinal. A detecção da qualidade de sinal é efetuada por meio do envio de uma solicitação de verificação do estado da conexão ou *link status transmission*, que retorna com a qualidade da recepção e da transmissão [26].

A qualidade da conexão é representada não apenas por informações sobre a potência atribuída a cada rádio modem, mas também da sensibilidade de cada um.

Dessa forma, este recurso confere robustez à informação de qualidade da conexão, permitindo a interligação entre redes com rádio modems distintos. Esta característica do protocolo ZigBee torna o emprego da tecnologia muito interessante, pois ao se pensar na durabilidade de uma rede de sensores sem fio é de se esperar que surja a necessidade de substituição de módulos sensores, substituição esta que, sem a determinação robusta do estado da conexão, poderia levar a geração de instabilidades na rede oriundas da substituição de módulos com características do rádio modem diferentes.

4.2. Técnicas de Roteamento

As diferentes técnicas de roteamento empregada nas redes de sensores ZigBee são apresentadas na tabela 3, onde se pode destacar sua aplicação [29].

Tabela 3 – Técnicas de roteamento para redes ZigBee.

<i>Técnica de Roteamento</i>	<i>Aplicação</i>
<i>On Demand Distance Vector Mesh</i>	<i>Redes com no máximo 40 módulos</i>
<i>Many to One</i>	<i>Redes com coordenador gateway</i>
<i>Source</i>	<i>Redes com mais de 40 módulos</i>

Nas redes *On-Demand-Vector-Mesh* as rotas são criadas entre remetente e destinatário, onde cada módulo tem o endereço e o estado da conexão do módulo seguinte. No caso *Many-to-One*, um coordenador ou gateway estabelece as rotas por meio de transmissões em *broadcast* [29]. No que se refere à técnica de roteamento *Source*, são inseridos nos pacotes todos os endereços dos dispositivos que compõem a rota desejada [30].

A determinação da topologia a ser utilizada em caráter específico para o monitoramento de uma usina solar fotovoltaica demanda a correta escolha da técnica de roteamento. Deste modo, nas páginas seguintes são estudadas as técnicas com maior potencial.

A escolha da técnica tem como alvo a eliminação de dois problemas ligados a redes de sensores sem fio de grandes dimensões, que são evitar a perda de dados, bem como evitar a perda de conexão dos dispositivos.

A técnica de roteamento *Many-to-one* adota como meio para evitar este problema, o estabelecimento das rotas entre os dispositivos finais e um dispositivo central que coleta os dados de toda rede, por meio de uma transmissão *broadcast* única, onde cada dispositivo final armazenará a rota de envio de dados ao dispositivo coordenador.

A técnica *Many-to-one* se vale do envio de um pacote de requisição de roteamento que contem o endereço do coordenador central, sendo que, ao receber este pacote, cada módulo final cria em sua memória uma tabela com o endereço de retorno como se pode ver na figura 4.3.

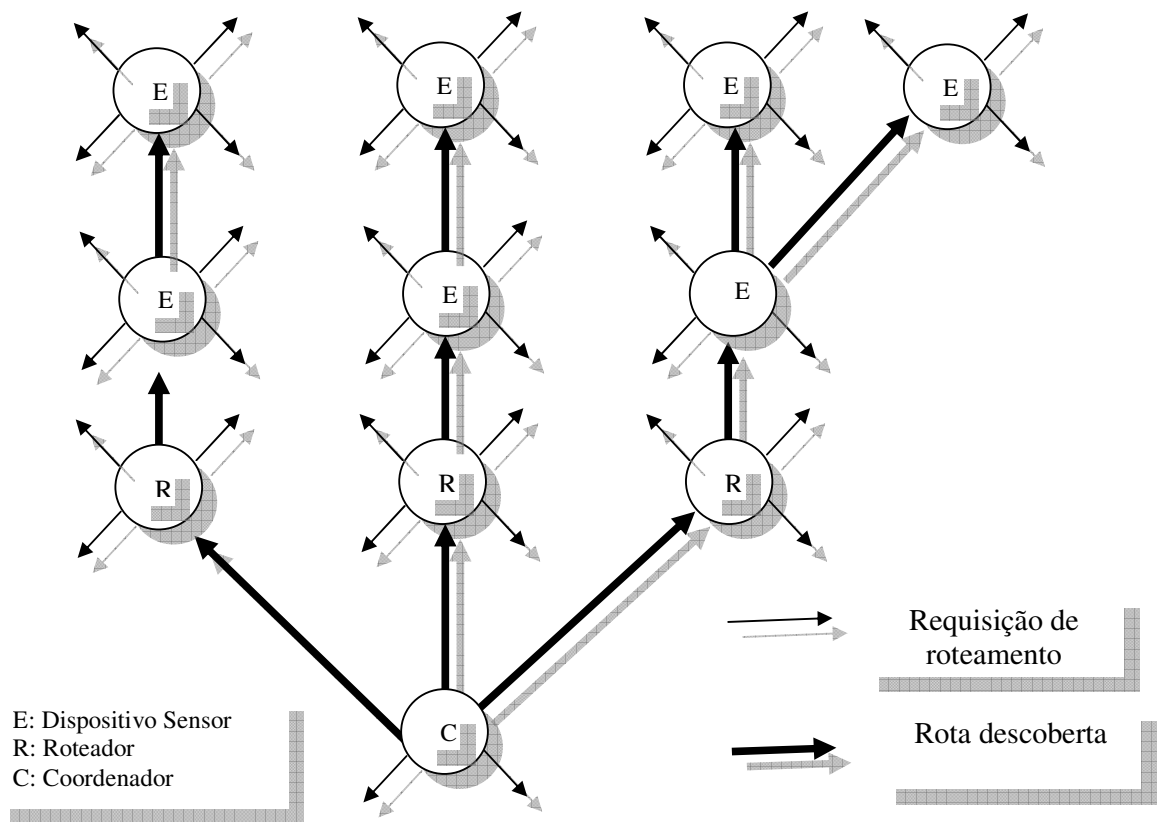


Figura 4.3 – Roteamento *Many-to-one* [29].

A requisição de roteamento pode ser atualizada periodicamente de modo a manter a confiabilidade da conexão com os dispositivos que compõem a rede, bem como detectar falhas em dispositivos, que possam não estar operando corretamente.

A técnica de roteamento *Many-to-one* permite o emprego de mais de um coordenador central (C), onde um grupo de dispositivos, seja final (E) ou roteador (R), estará conectado

a um coordenador específico. Esta técnica, diante do foco deste trabalho, assume um papel importante pois devido às dimensões associadas a uma planta solar fotovoltaica, a possibilidade do uso de mais de um coordenador central permite evitar perdas de dados devido a atualizações na rede, com a requisição de roteamento associada a agrupamento de dispositivos finais a coordenadores específicos, como se pode ver na figura 4.4.

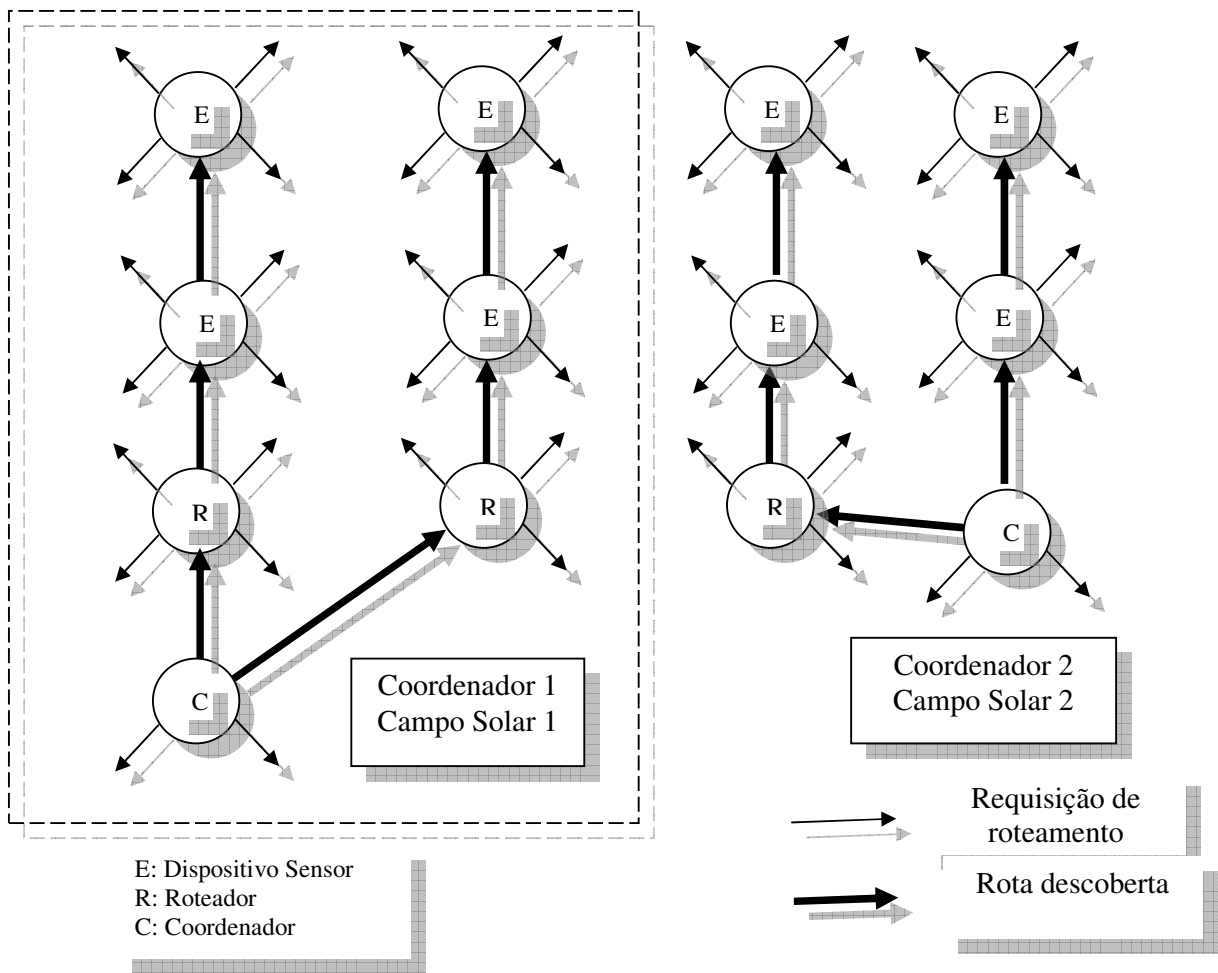


Figura 4.4 – Rede ZigBee empregando roteamento *Many-to-one*.

A possibilidade do uso de mais de um coordenador na técnica de roteamento *Many-to-one* torna possível explorar o local de instalação da planta solar de geração, respeitando a disposição dos módulos fotovoltaicos, garantindo qualidade de conexão entre módulos e evitando perda de dados durante o envio destes a um coordenador. Não obstante, nesta topologia, a figura do coordenador central não existirá. No âmbito do protocolo ZigBee

este continua exercendo suas funções conforme a necessidade da técnica de roteamento *Many-to-one*.

A técnica de roteamento *Many-to-one* resolve o problema de perda de dados no envio, devido às dimensões da rede de sensores. Contudo, em situações onde um número elevado de sensores possa existir, a rede poderia sobrescrever endereços na tabela de roteamento de um coordenador (C). Uma forma de minimizar este problema seria o emprego de um grande número de coordenadores (C), algo que diminuiria a eficácia desta técnica. Em resposta ao problema de perda de endereços na tabela de roteamento, o protocolo ZigBee, dispõe de outra técnica de roteamento *Source* já citada na tabela 3, cujo foco é o tratamento de rotas com número elevado de dispositivos finais [30].

A técnica de roteamento *Source* emprega a requisição de roteamento no formato *broadcast* como a técnica *Many-to-one* como se pode ver na figura 4.5, contudo cada módulo final (E) e roteador (R) que responde envia um comando de gravação da rota.

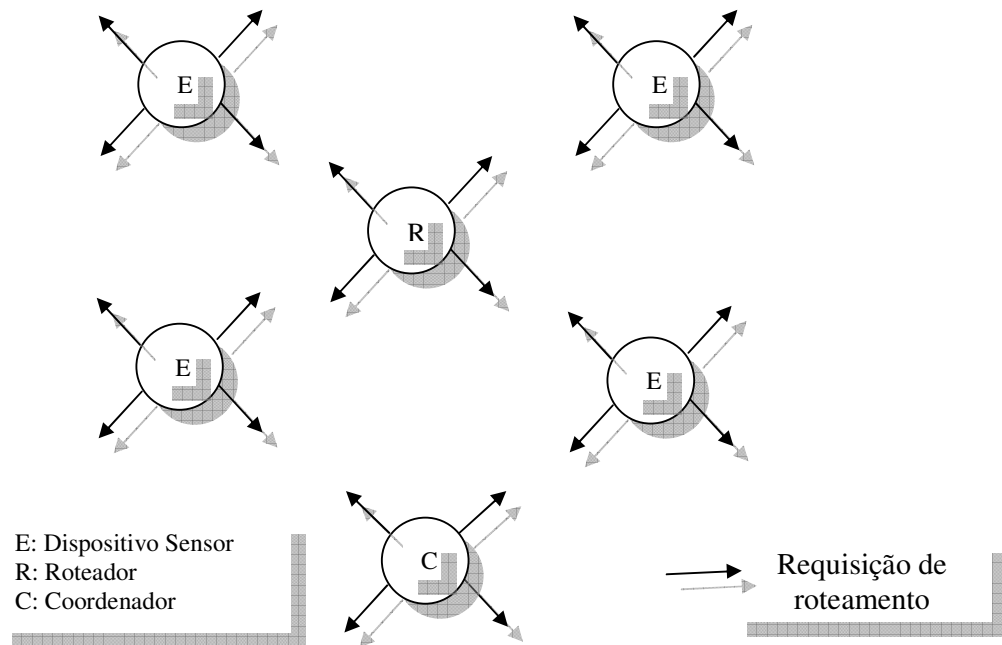


Figura 4.5 – Rede ZigBee empregando roteamento *Source* [30].

O comando de gravação da rota permite ao dispositivo coordenador central armazenar em sua tabela de roteamento os endereços que compõem as rotas para todos os dispositivos.

Logo, esta característica da técnica de roteamento *Source* torna possível o envio de informações a um dispositivo específico.

A figura 4.6 ilustra a técnica *source* e como a solicitação de roteamento em *broadcast*, associada ao comando de gravação da rota com transmissão em *unicast* são empregados para permitir o envio de dados sem a possibilidade de ocorrer perda de algum endereço da tabela de roteamento.

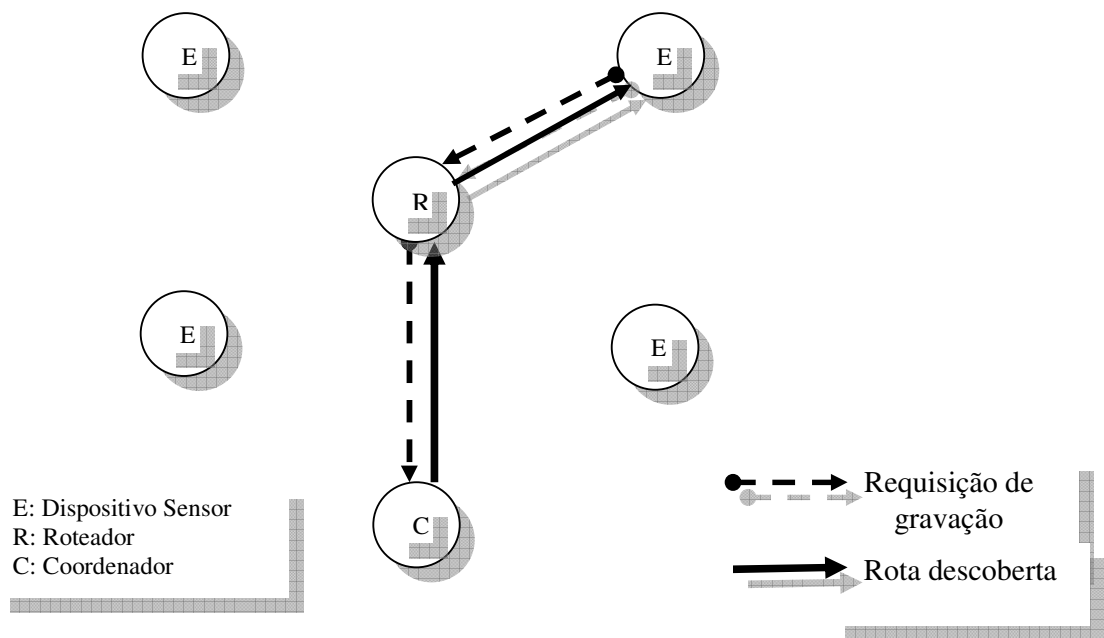


Figura 4.6 – Rede ZigBee empregando roteamento *Source* com solicitação de gravação da rota [30].

4.3. Topologias de Redes Zigbee para o Monitoramento de Plantas Solares

Uma vez entendidas as técnicas de roteamento, é necessário identificar qual topologia de rede melhor se adapta ao monitoramento de módulos fotovoltaicos, considerando a confiabilidade da transmissão de dados, bem como a robustez da rede quanto ao

roteamento de cada dispositivo, seja este um dispositivo final (*End-Point*) ou Roteador [38].

As topologias de redes mais conhecidas são a tipo estrela e a *peer-to peer*, sendo que esta última se divide em topologia *Mesh* e *Árvore*.

A topologia estrela, como se pode ver na figura 4.7, é composta por um dispositivo coordenador (C) ligado a um conjunto de dispositivos finais (E), onde todos os dispositivos finais devem se comunicar com o coordenador que monta e controla a rede.

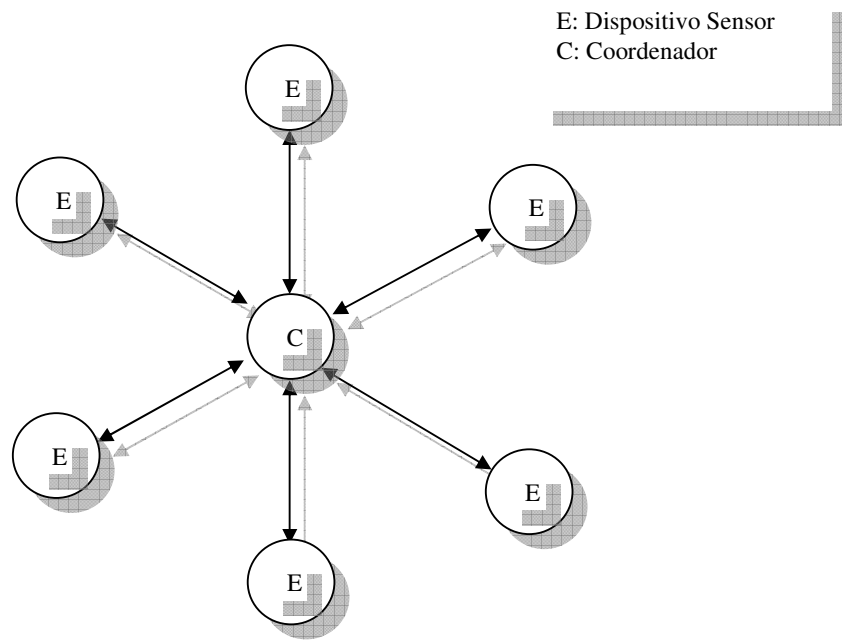


Figura 4.7– Rede Estrela ZigBee [38].

A maior limitação da topologia estrela é a impossibilidade de roteamento, logo o seu emprego em aplicações ligadas ao monitoramento de plantas fotovoltaicas que necessitam de um grande número de módulos finais não é uma opção adequada.

A topologia *Mesh* por sua vez ilustrada na figura 4.8, é constituída por roteadores que assume sua função de estabelecer as rotas de acesso entre os coordenadores e os dispositivos finais, bem como entre outros roteadores. A única limitação de acesso dos módulos finais aos roteadores e conseqüentemente aos dispositivos coordenadores é a

qualidade do *link* de comunicação, ou seja, a potência disponível para comunicação entre rádio modems [39].

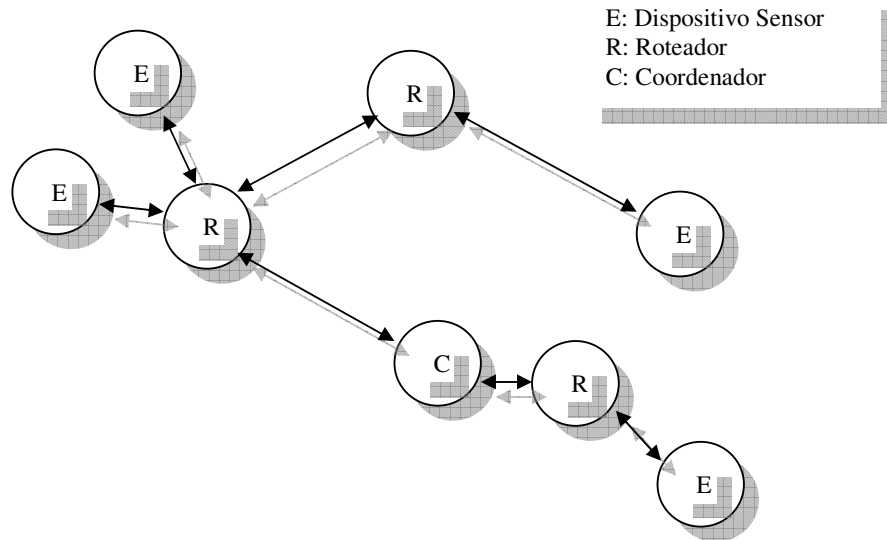


Figura 4.8– Rede *Mesh* ZigBee [39].

A rede *Mesh* não possui critérios de crescimento e organização definidos, sendo, portanto o ambiente e o tipo de monitoramento determinante na arquitetura final da rede. No que se refere a inserção de novos dispositivos, esta pode ser efetuada por meio da inserção de novos roteadores ou por meio da inclusão de novos dispositivos roteadores, cuja capacidade não esteja saturada.

No que se refere à aplicação no monitoramento de plantas de geração fotovoltaica a topologia de rede tipo *Mesh* pode ser empregada com ressalva ao número de dispositivos, pois a técnica de roteamento será o fator decisivo na aplicação desta topologia [40]. Uma rede *Mesh* pode apresentar instabilidades quanto ao monitoramento de áreas distintas do campo solar, devido à maior concentração de sensores ou simplesmente a distância entre roteadores e dispositivo coordenador.

A topologia tipo árvore possui como característica determinante a necessidade de crescimento ordenado [41], sendo que somente é possível agregar novos sensores se existir um roteador capaz de receber os novos dispositivos, ou mediante a inclusão de um novo roteador. Os roteadores nesta topologia assumem um papel análogo a galhos, sendo que os

dispositivos finais são análogos as folhas, daí se origina o nome dado a esta topologia que pode ser vista na figura 4.9.

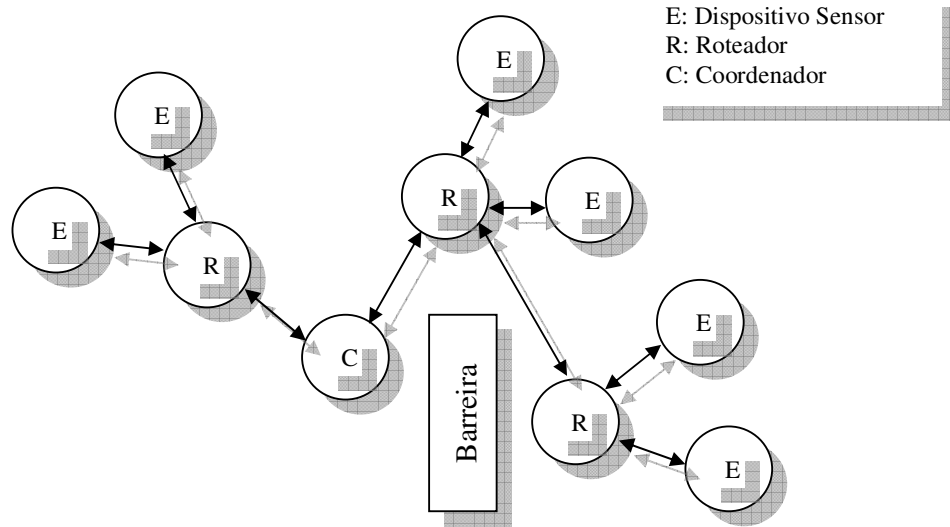


Figura 4.9– Rede Árvore ZigBee [41].

A topologia tipo árvore, devido às suas características, confere à rede de sensores sem fio uma vantagem em relação às topologias anteriores, pois devido a possibilidade de crescimento mediante a inclusão ou disponibilidade de roteadores, as barreiras físicas podem ser contornadas [42].

As barreiras podem ser, por exemplo, a distância entre arranjos fotovoltaicos que acompanham o perímetro do campo solar, algo que certamente acontecerá em plantas fotovoltaicas de geração de grande capacidade. A topologia tipo árvore se apresenta, portanto, como uma opção muito interessante para a implantação de redes de sensores sem fio, destinadas ao monitoramento de plantas de geração fotovoltaica, permitindo o emprego das técnicas de modulação *Many-to-one* ou *Source* [43]. A técnica de roteamento *Source* pode ser utilizada para a interligação da área do campo solar que tem entre ela e o coordenador central ou não uma barreira, portanto a técnica de roteamento *Many-to-one* será empregada para o controle de diversos grupos de coordenadores, roteadores e dispositivos finais associados a diversos agrupamentos ou *strings* de módulos fotovoltaicos.

4.4. Dimensionamento de uma rede de sensores sem fio

O potencial da tecnologia ZigBee tem sido discutido ao longo deste trabalho, sendo determinantes a capacidade de endereçamento aliado às técnicas de roteamento [44]. A qualidade das interligações da rede é outro fator primordial que pode ser representado por dois fatores dados a seguir:

- A perda por propagação;
- Erros de transmissão.

O tempo de atraso e o consumo de energia não foram tratados. No que se refere ao atraso, as plantas fotovoltaicas não estão submetidas a fenômenos que apresentem variações de tempo na casa de milisegundos [45]. Diante disto, em qualquer arranjo da rede esta terá tempo suficiente para garantir a propagação da informação.

Em sistemas de rádio comunicação sejam estes de voz ou dados, tem-se em mente que um sinal será propagado no espaço por alguns metros ou vários quilômetros. Contudo, a distância percorrida está diretamente ligada às frequências do sinal.

Em outras palavras, quanto mais alta a frequência, menor a distância alcançada [46]. Porém, a distância alcançada é diretamente proporcional a potência de transmissão do dispositivo.

A predição do nível de sinal *wireless* em ambientes internos ou externos tem por objetivo garantir uma cobertura eficaz da área desejada. Em ambientes *indoor* a cobertura depende notavelmente da geometria do lugar, cujos limites afetam a propagação e prejudicam o funcionamento da rede [47]. Os ambientes outdoor apresentam como característica marcante a ausência de obstáculos, ou seja as antenas estão em visada direta.

Diversos modelos de predição podem ser empregados para avaliar a capacidade de cobertura dos rádio modems de uma rede sem fio. Os modelos mais empregados são genéricos, mas apresentam resultados satisfatórios, sendo um dos mais utilizados o modelo *One Slope* que assume uma dependência linear entre a perda de trajeto (dB) e a distância logarítmica.

A equação 5 representa o modelo *One Slope* é dada a seguir:

$$L = L(d0) + 10n \log(d) \quad (5)$$

Onde:

- L : Perda por propagação do sinal em função da distância [dB];
- d : Distância entre base e terminal em metros;
- $L(d0)$: Perda de propagação de referência a um metro de distância em dB;
- n : Gradiente de potência-distância.

Neste modelo, o gradiente de potência-distância é influenciado por características do ambiente, sejam estas relativas a geometria ou fatores ambientais como existência de vegetação. A tabela 4 apresenta alguns valores atribuídos ao gradiente potência-distância, onde se pode ver a variação entre 2 a 6 para o melhor caso e o pior respectivamente.

Tabela 4 – Gradiente potência-distância

<i>Gradiente Potência-Distância (n)</i>	
Espaço Livre	2
Área Urbana	2,7 a 3,5
Indoor em Corredores	1,6 a 1,8
Indoor Pouco Obstruído	2,2 a 2,7
Indoor Obstrução Média	2,8 a 3,5
Ambientes Parcialmente Livres	3 a 4
Indoor com Obstrução Elevada	4 a 6

Sendo a frequência de 2.4 GHz utilizada na tecnologia *Zigbee*, o valor de $L(d0)$ fica estimado em torno de 40,2 dB e em se tratando de um ambiente interno pouco obstruído o valor de n pode variar entre 2,2 e 2,7 [48].

A qualidade de comunicação pode ser avaliada considerando a taxa de erros detectados entre o transmissor e o receptor sendo consideradas taxas de erros por bit ou por pacote de bits.

Sendo estas denominadas BER (*Bit Error Rate*) BKER (*Block Error Rate*) elas são dadas pelas equações 6 e 7 respectivamente

$$BER = \frac{Be}{Bt} \quad (6)$$

Onde:

- *BER*: Taxa de erros por *bit*;
- *Be*: Bits com erro de transmissão;
- *Bt*: Bits transmitidos.

$$BKER = \frac{BKe}{BKt} \quad (7)$$

Onde:

- *BKER*: Taxa de erros por bloco
- *BKe*: Blocos com erro de transmissão;
- *BKt*: Blocos transmitidos.

O dimensionamento de uma rede de sensores sem fio destinada ao monitoramento de uma planta de geração solar pode ser representada basicamente por dois cenários, podendo estes serem multiplicados conforme as dimensões da planta de geração [50].

Os cenários básicos são apresentados na tabela 5, onde se pode ver que estes são determinados em função da técnica de roteamento e dos dispositivos participantes da rede.

Tabela 5 – Cenários básicos para redes de sensores sem fio em plantas solares

<i>Cenário 1</i>	
Dispositivo:	Coordenador associado ao roteador
Roteamento:	<i>Many-to-one</i>
Transmissão:	<i>Broadcast</i>
<i>Cenário 2</i>	
Dispositivo:	Roteador associado ao dispositivo final
Roteamento:	<i>Source</i>
Transmissão:	<i>Unicast</i>

Os cenários básicos apresentados acima tem seu papel melhor entendido quando considerarmos as dimensões de uma planta de geração fotovoltaica, onde se pode ter um

número expressivo de painéis fotovoltaicos, normalmente com números acima de 1000 painéis.

O cenário 1 surge da associação entre o coordenador, cujo papel é a formação da rede de sensores e o roteador, cujo papel é estabelecer a comunicação com os diversos dispositivos finais. Considerando as dimensões de uma planta solar, um dispositivo coordenador deve ficar situado entre os roteadores como se pode ver na figura 4.10, de modo que a perda por propagação e o nível de recepção se mantenham em níveis que não comprometam a qualidade da conexão.

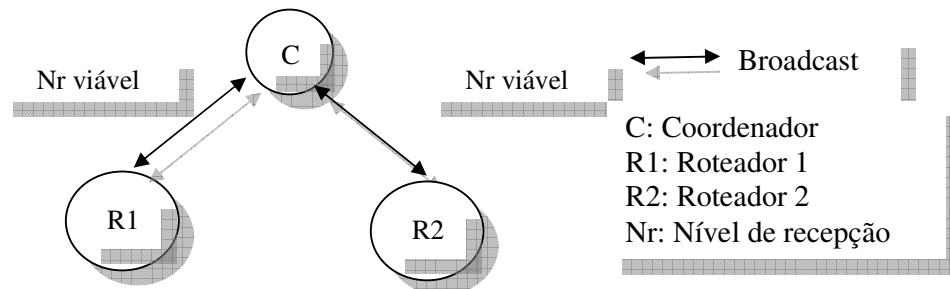


Figura 4.10 – Cenário básico Coordenador - Roteadores [50].

O cenário 2 por sua vez surge devido a necessidade de rotas de acesso aos diversos dispositivos finais que monitoram os painéis fotovoltaicos conforme a figura 4.11. O monitoramento dos diversos painéis fotovoltaicos que compõem uma planta solar associado as dimensões da planta colocarão dispositivos finais fora do alcance do coordenador, ou resultariam em conexões de baixa qualidade. O emprego da técnica de roteamento *Source* permite que cada dispositivo final entre o roteador e o dispositivo final que se deseja ler assumam o papel de retransmissor, garantindo assim a viabilidade da conexão.

Tomando como base os elementos descritos até o momento, torna-se possível estabelecer um procedimento para o projeto de redes de sensores sem fio destinadas ao monitoramento de plantas fotovoltaicas.

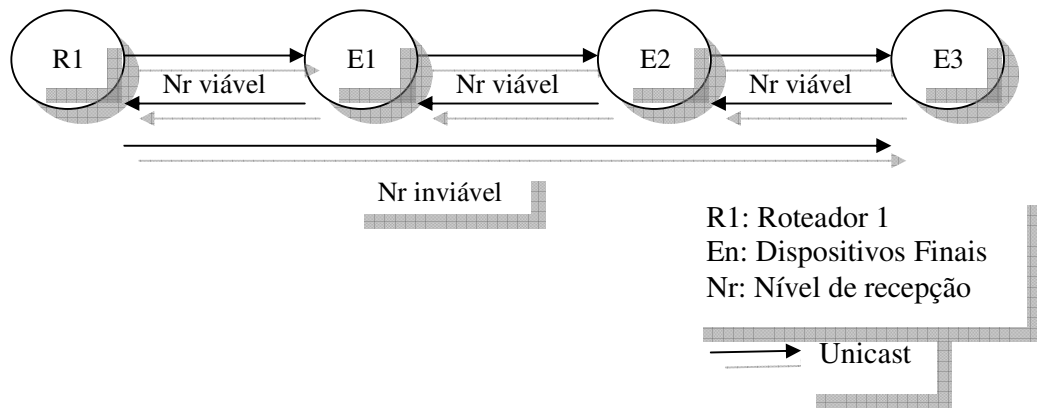


Figura 4.11 – Cenário básico Roteadores - Dispositivos finais [50].

De modo a ilustrar este procedimento, será empregado como exemplo, uma planta fotovoltaica que está sendo construída na cidade de Sete Lagoas cuja planta baixa pode ser vista na figura 4.12.

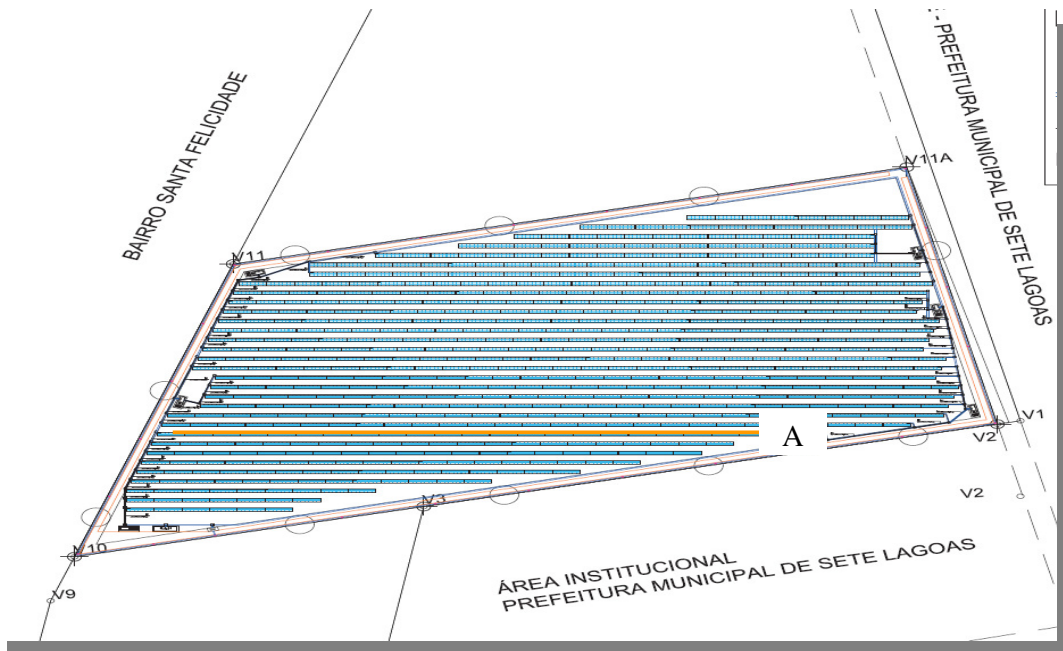


Figura 4.12– Planta Fotovoltaica 3MW - Sete lagoas.

A planta fotovoltaica em foco possui potência de 3MW, sendo construída com painéis fotovoltaicos cuja potência se situa em torno de 60W, desta forma a planta será composta

de 50000 módulos fotovoltaicos. A planta é composta de *strings* de 30 módulos, sendo estes agrupados em conjuntos de 24 a 27 *strings* totalizando 1667 *strings*.

Tomando como referência o agrupamento identificado na figura 4.12 como A, o *string* mais distante está a aproximadamente a 500 metros de distância dos inversores. Diante deste arranjo físico tomando como base o módulo Xbee série s XB24-Z [49] seriam necessários no mínimo 17 módulos, para garantir a cobertura do agrupamento. De posse do número estimado de módulos seria necessário calcular a perda por propagação, bem como o nível de recepção. Executados os cálculos com o emprego do software X-CTU seria possível confirmar os níveis dos sinais para transmissão e recepção, bem como avaliar a qualidade da conexão por meio da quantidade de pacotes entregues com êxito.

4.5. Conclusões

Neste capítulo foram abordados aspectos relativos ao roteamento de redes, sendo este que determina a topologia e adequação desta as dimensões de uma planta fotovoltaica. A identificação da técnica correta de roteamento, para redes de grandes dimensões é de vital importância para evitar a perda de dados ou a perda de falha de conexão sensores. Dentro deste enfoque a combinação das técnicas de roteamento *Source* e *Many-to-One* são a melhor escolha para a implementação de redes de sensores sem fio de grandes dimensões. A topologia mais adequada ao monitoramento de plantas fotovoltaicas é a tipo árvore, pois permite contornar barreiras naturais que poderiam prejudicar a operação da rede. Uma vez estabelecida a técnica de roteamento e a topologia da rede cabe a definição da técnica de teste, tendo sido determinada a *One Slope*. No capítulo seguinte serão abordados os resultados obtidos com o Software X-CTU, onde foram avaliados os cenários identificados neste capítulo.

5 - Resultados

5.1. Experimento

Na realização dos testes referentes ao alcance de comunicação, foram utilizados os seguintes materiais:

- 2 módulos XBee série 2;
- Placa de configuração CON-USBEE;
- Adaptador PROTOBEE;
- *Software* X-CTU destinado a testes e configuração de módulos ZigBee.

Os módulos sensores são construídos com base nos módulos Xbee que são apresentados na figura 5.1, sendo empregado para a configuração o adaptador COM-USBEE como se pode ver na figura 5.2



Figura 5.1– Módulo Xbee – rádio modem [Digi International Inc].

O adaptador COM-USBEE permite a configuração do rádio modem via porta USB. Na figura 5.2 é possível ainda ver o adaptador PROTOBEE com uma interface RS232 e um

regulador de 5V na mesma placa que permite o desenvolvimento de módulos sensores a partir do protoboard.

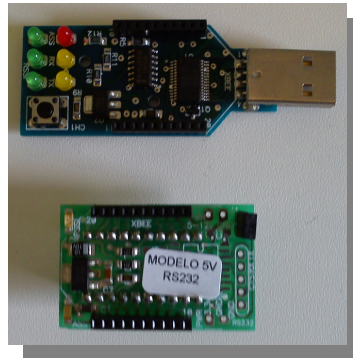


Figura 5.2 – Adaptadores COMBEE e PROTOBEE com interface RS232 [Digi International Inc].

O *software* X-CTU é uma ferramenta que permite não somente a configuração dos módulos Zigbee, mas também a análise de parâmetros da rede, por meio da aba Range test conforme se vê na figura 5.3. O *Range teste* consiste na avaliação da potência de transmissão/recepção de rádio frequência, bem como da qualidade da conexão entre módulos de uma rede Zigbee.

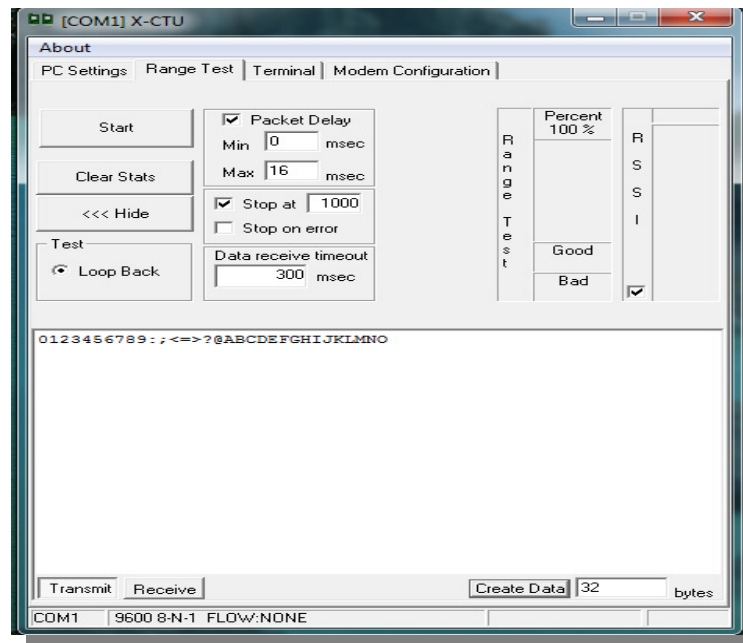


Figura 5.3– Software X-CTU Range test

A avaliação da qualidade da transmissão é efetuada através do envio de pacotes de dados no formato 0123456789::<=>, onde o retorno destes é avaliado e estabelecido um percentual de dados íntegros (Bons). No que se refere a recepção esta é avaliada através da medição da energia do sinal recebido por meio da opção RSSI (*Receiver Signal Strenght Indicator*) conforme se pode ver na figura 5.4.

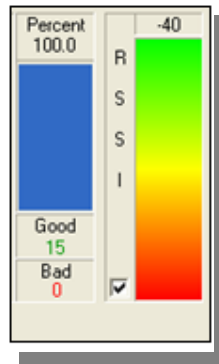


Figura 5.4 – Relação RSSI e a quantidade de pacotes enviados

5.2. Análise de cenários

De modo a avaliar a qualidade da conexão foram efetuadas avaliações do nível RSSI, bem como do percentual de pacotes enviados e recebidos com sucesso. As medições foram colhidas em um local livre de obstruções com comprimento igual a 60 m de comprimento por 40 de largura, estando as antenas em visada. Os testes foram repetidos sem que isto apresentasse modificação nos resultados, conforme se pode ver nas tabelas 6 e 7.

Tabela 6 – Avaliação do cenário 1 para um Coordenador e um roteador Zigbee

<i>Cenário 1</i>		
Dispositivo:	Coordenador associado ao roteador	
Roteamento:	<i>Many-to-one</i>	
Transmissão:	<i>Broadcast</i>	
BER = 0	Be = 0	Bt=32000
BKER = 0	Bke = 0	BKt =1000
RSSI	-68 dB	Distância = 60m

Tabela 7 – Avaliação do cenário 2 para um Roteador e um dispositivo final Zigbee

<i>Cenário 2</i>		
Dispositivo:	Roteador associado ao dispositivo final	
Roteamento:	<i>Source</i>	
Transmissão:	<i>Unicast</i>	
BER = 0	Be = 0	Bt=32000
BKER = 0	Bke = 0	BKt =1000
RSSI	- 68 dB	Distância = 60m

A sensibilidade nominal dos rádio modems Zigbee é de -96 dB, logo o nível RSSI obtido é satisfatório com relação a distancia de 60 m, sendo que o alcance nominal é de 120m. As medições foram repetidas para uma distância de 100m, resultando em um sinal com nível - 89 dB, sendo os demais indicadores listados na tabela 8.

Tabela 8 – Avaliação do cenário 2 para um Roteador e um dispositivo final Zigbee a 100 m.

<i>Cenário 2</i>		
Dispositivo:	Roteador associado ao dispositivo final	
Roteamento:	<i>Source</i>	
Transmissão:	<i>Unicast</i>	
BER = $1,99 \times 10^{-3}$	Be = 23808	Bt=119296
BKER = $1,99 \times 10^{-3}$	Bke = 2.976	BKt = 14912
RSSI	- 89 dB	Distância = 100m

5.3. Latência da rede e consumo de corrente

A latência de uma rede pode ser entendida como o tempo necessário ao envio e recebimento de dados, sendo portanto um parâmetro de grande importância para redes de grandes dimensões. As redes de sensores sem fio destinadas ao monitoramento de plantas fotovoltaicas empregam tecnologias de baixa taxa de transferência, logo é esperado um

tempo de transferência de dados de milésimos de segundos até alguns segundos. O tempo de trânsito de pacotes para redes ZigBee pode ser calculado tomando como base a equação 8 [51], onde se pode calcular o tempo de transferência de pacotes com base na velocidade do modem e no número máximo de bytes.

$$T_{time} = \frac{(aMaxPHYPacket + SHR + PHR).8}{Datarate} \quad (8)$$

Onde:

- T_{time} : Tempo de transferência do *frame*;
- $aMaxPHYPacket$: Número máximo de bytes de dados a serem enviados;
- SHR : Delimitador do *frame*;
- PHR : Número de bytes do *frame*;
- $Datarate$: Velocidade do modem em Kbits/s

Durante as simulações foi empregado um programa elaborado com auxílio do ambiente Matlab, permitindo assim a simulação de configurações de redes de sensores, de grandes dimensões. O programa tem sua interface apresentada na figura 5.5 onde se podem ver os elementos de dimensionamento da rede, como número de roteadores e sensores acessados.

A interface gráfica é dividida em duas partes, sendo uma de dimensionamento da rede, onde se tem o número de roteadores, o número de sensores por roteador bem como o número de sensores acessados por leitura. O número de sensores acessados foi fixado em um, pois esta é a condição de operação real, enquanto que o número de roteadores pode ser entendido como o número de dispositivos necessários a composição da rota ao sensor.

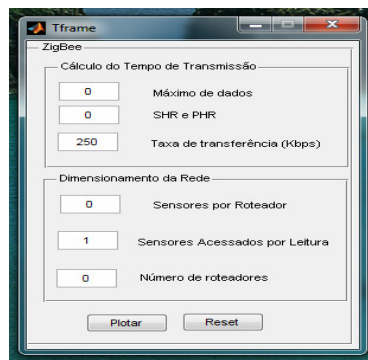


Figura 5.5 – Interface do Programa de Cálculo da Latência

O numero de roteadores em uma rota se deve ao fato do sensor estar posicionando a uma distância maior que o máximo possível de ser acessado por um link de rádio direto, ou seja, para os modems Zigbee em uso neste trabalho, distancias maiores que 100m.

Os parâmetros de cálculo do tempo de transmissão são apresentados juntamente com a equação 8, contudo no cálculo do programa, o tempo do percurso é calculado por meio da soma de tempo para cada roteador enviar o seu pacote de dados.

A latência é caracterizada por ser o tempo de envio e recebimento, logo o tempo obtido deve ser multiplicado por duas vezes, pois se faz necessário o envio de um *frame* de estabelecimento da rota (Roteamento *Source*) e no retorno do *frame* com os dados do sensor lido.

A rede de sensores sem fio destinada ao monitoramento de plantas fotovoltaicas possui dimensões elevadas, logo esta deverá ser dividida em agrupamentos redes, desta forma os tempos de latência para os sensores mais distantes se situarão em torno de alguns segundos. O dimensionamento para a planta de Sete lagoas foi estabelecido tomando como base a potência de 3 MW a ser obtida com o emprego de painéis solarex MX64, logo a configuração da redes de sensores é dada na tabela 9.

Tabela 9 – Dimensionamento da RSSF para a planta de Sete Lagoas.

<i>Dimensionamento da Rede</i>	
Potência nominal:	3 MW
Número de painéis	50000 (Solarex MX64)
Número de Roteadores:	250
Sensores por roteador:	200
Distância entre roteadores Horizontal	200 m
Distância entre roteadores Vertical	200 m
Distância entre roteadores Diagonal	100 m
Roteadores por rota Horizontal	3
Roteadores por rota Vertical	3
Roteadores por rota Diagonal	3

O dimensionamento apresentado na tabela 9 tem como vantagem o número menor de roteadores, pois ao posicionar os roteadores com um elemento na diagonal se tornou possível a cobertura de 4000 sensores com apenas 5 roteadores. O posicionamento sem o roteador na diagonal implicaria no uso de até 9 roteadores para cobrir sem sobreposição os mesmos 4000 sensores, como pode se visualizar na figura 5.6.

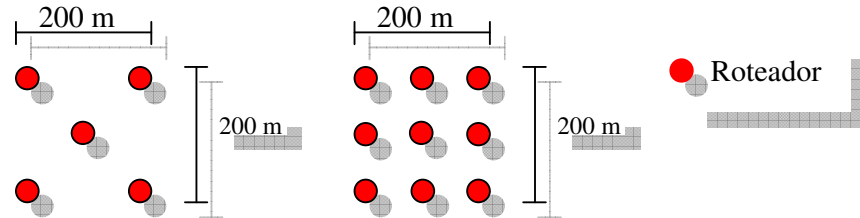


Figura 5.6 – Arranjo físico para a planta de Sete Lagoas

Considerando a tabela 9 e o arranjo da figura 5.6 é possível concluir que a cada rota existirão dois roteadores comuns, compartilhados para compor a rota com três roteadores.

Quanto ao caso da planta de Sete lagoas foi estipulado um agrupamento de redes de 8000 pontos, permitindo na condição do roteamento *Source* a obtenção de tempos de latência de aproximadamente 35 ms, como se pode ver na figura 5.7.

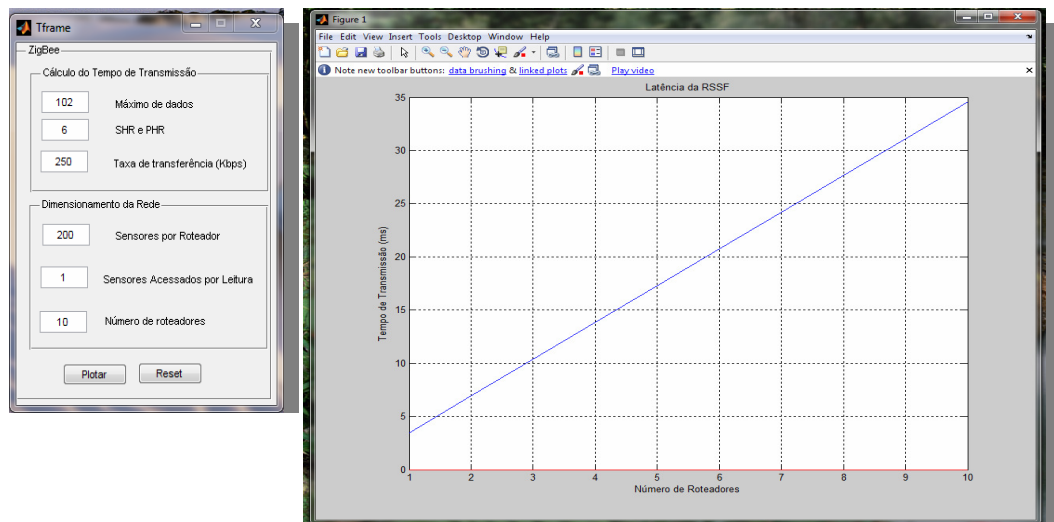


Figura 5.7 – Latência para um agrupamento de sensores e roteadores na planta de Sete Lagoas

O consumo de corrente para a RSSF está condicionado ao número de dispositivos participantes da conexão, a partir da técnica de roteamento *Source* teremos trios de agrupamento de roteadores associados ao sensor que esta sendo lido.

Diante deste cenário o maior consumo será associado ao sensor mais distante do coordenador, logo ao determinar o consumo para esta condição os demais sensores permanecem em repouso com consumo de $1\mu\text{A}$.

A figura 5.8 ilustra a distribuição dos dispositivos para a rede em estudo, sendo possível a partir desta determinar as rotas prováveis e conseqüentemente o consumo para o pior caso.

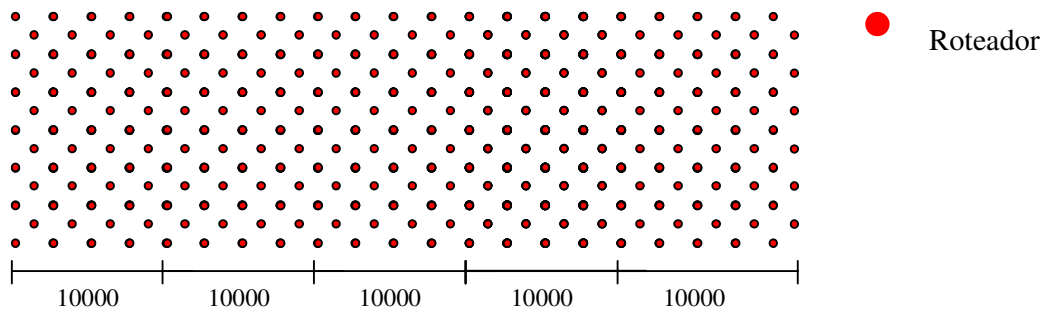


Figura 5.8 – Distribuição de roteadores a planta de Sete Lagoas

O consumo de corrente é dependente do número de sensores que fazem parte da rota necessária para alcançar um sensor, diante disto o pior caso é uma rota com 12 roteadores e um dispositivo sensor, logo a corrente associada a rede no momento de leitura é dada na tabela 10.

Tabela 10 – Consumo de corrente para leitura de um sensor na rota mais distante.

<i>Consumo de Corrente da Rede durante a Leitura</i>	
Pior caso (Última posição)	390 mA
Melhor caso (Primeira posição)	120 mA
Caso intermediário:	180 mA

A figura 5.9 ilustra a rota descrita para o cálculo da corrente associada as rotas indicadas na tabela 10, sendo que a técnica de roteamento empregada sempre será a *Source* no que se refere ao percurso roteadores para sensor.

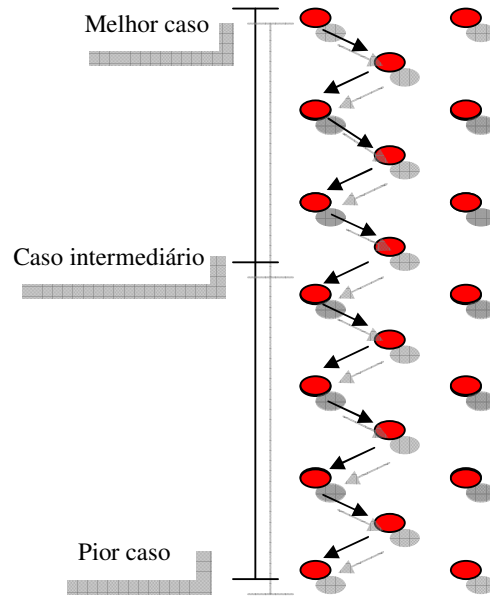


Figura 5.9 – Dispositivos por rota para a planta de Sete Lagoas

A alocação de dispositivos para a construção de uma rota sempre implicará na soma de tristos, além disto a leitura deve ser sempre de um sensor por vez de modo a limitar a corrente drenada. A figura 5.10 ilustra as técnicas de roteamento *Many to One* e *Source*, para o estabelecimento de rota aos sensores mais distantes. Desta forma pode se ver que o número de dispositivos da rota para acesso ao sensor se situará em torno de 20 dispositivos, entre estes o coordenador, os roteadores o sensor que no qual se deseja efetuar a leitura.

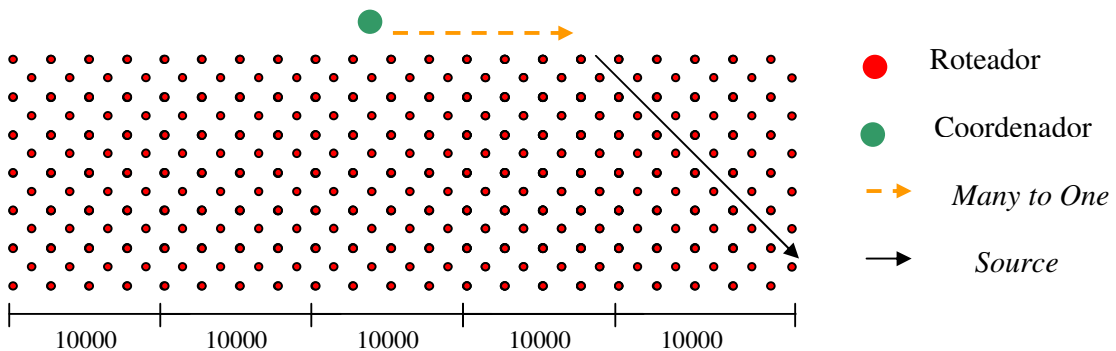


Figura 5.10 – Roteamento de dispositivos para a planta de Sete Lagoas

O consumo de corrente então será sempre uma fração da corrente total admissível para toda rede, desta forma o impacto do consumo de corrente da RSSF será minimizado como se pode ver na seqüência de figuras a seguir.

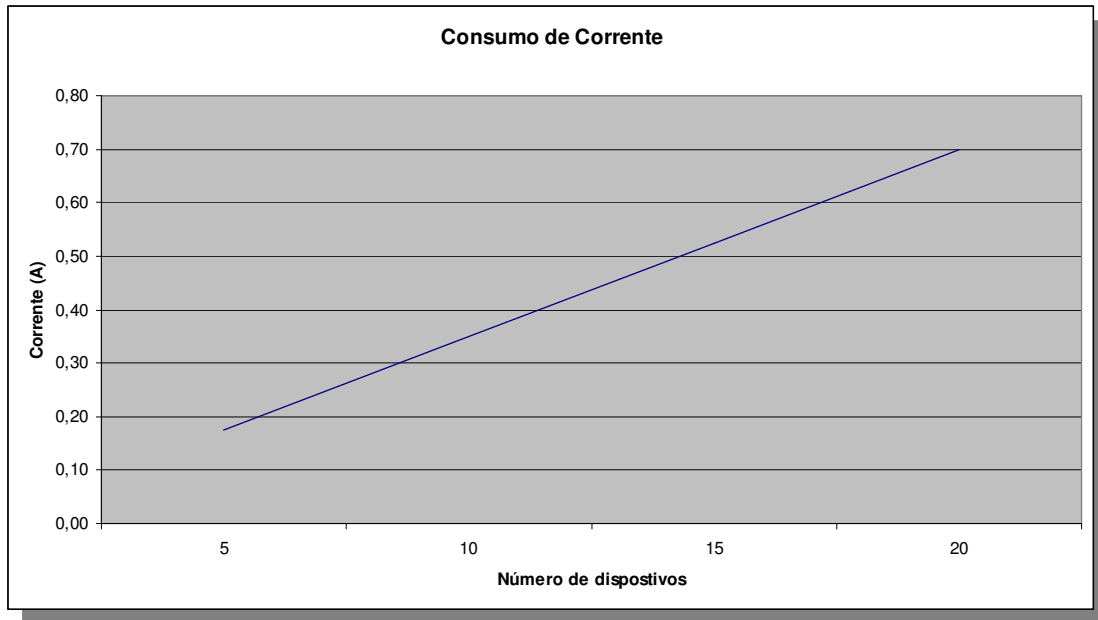


Figura 5.11 – Consumo de corrente para a leitura de um sensor distante considerando as técnicas de roteamento *Many to One* e *Source*.

Desta forma para a leitura de um sensor a corrente será de aproximadamente 0,7 A, contudo o consumo de corrente é diretamente proporcional ao número de dispositivos na rota como pode se ver nas figuras 5.12 a 5.13.

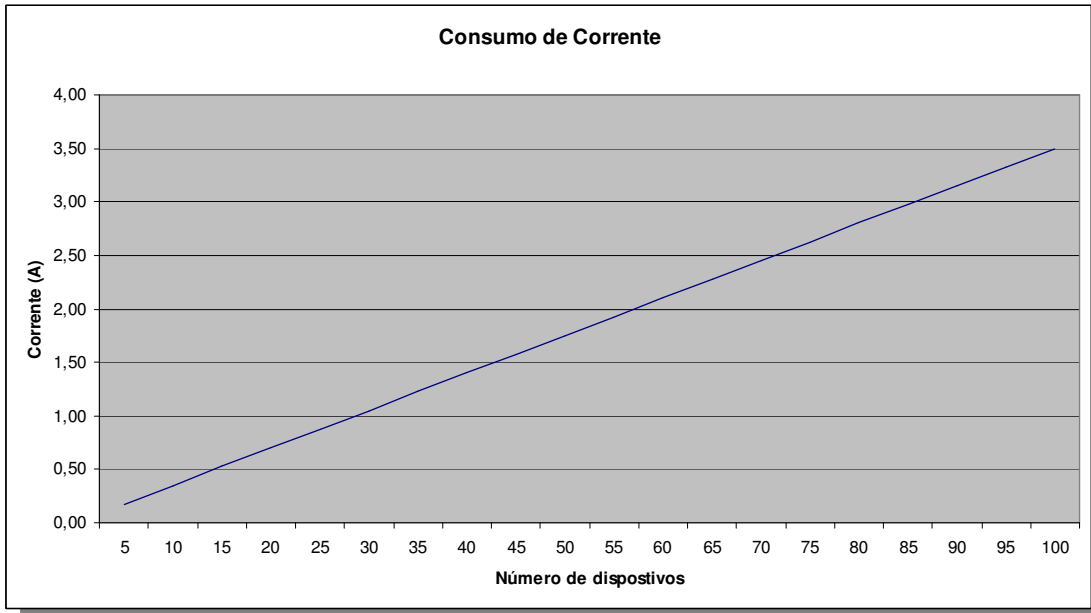


Figura 5.12 – Consumo de corrente para rotas contendo 100 dispositivos.

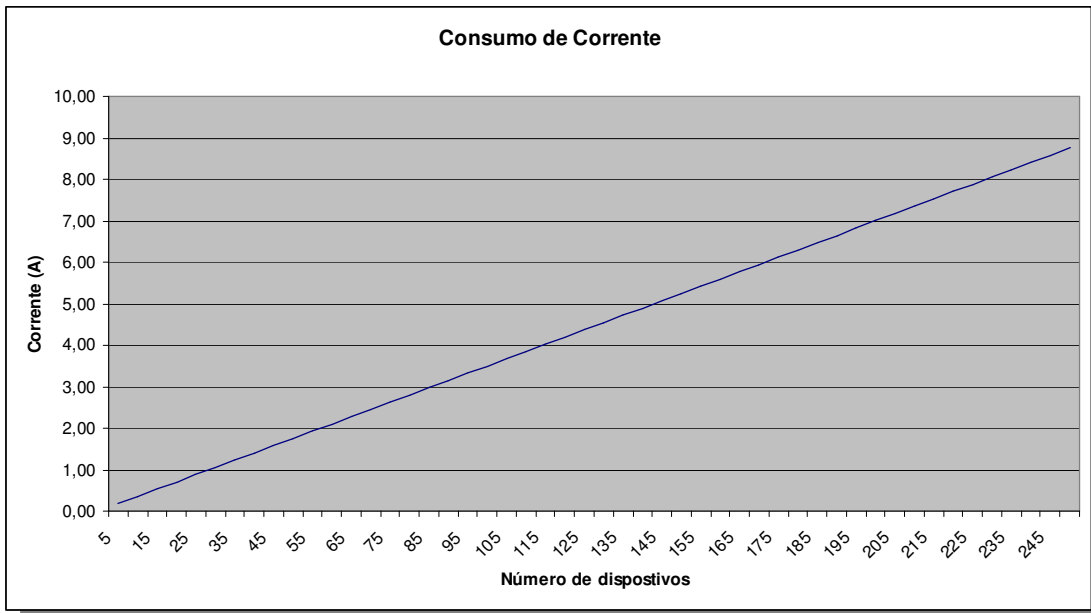


Figura 5.13 – Consumo de corrente para rotas contendo 250 dispositivos.

A corrente para agrupamentos de dispositivos sejam estes para leitura simultânea de mais de um sensor implica em correntes maiores que 0.7 A, podendo alcançar valores até 10 vezes maiores que estes como demonstram as figuras 5.12 e 5.13.

Desta forma o estabelecimento de rotas do coordenador para os roteadores na horizontal com o roteamento *Many to One*, associados a técnica *Source* para o roteamento até os sensores na diagonal garante um consumo de no máximo 0.7 A conforme pode se ver na figura 5.14.

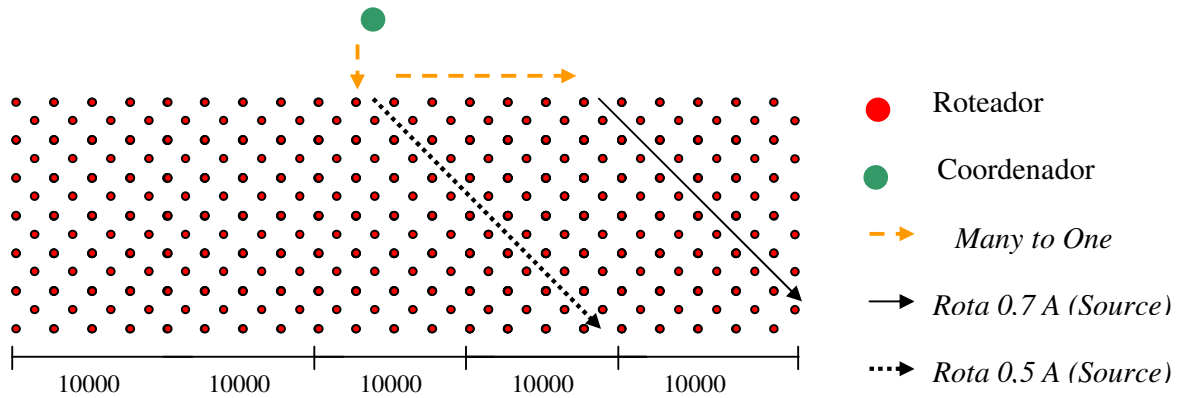


Figura 5.14 – Roteamento de dispositivos para o menor consumo de corrente.

Devido ao caráter simétrico do arranjo de dispositivos as rotas serão similares para as duas metades da RSSF, logo o consumo de corrente durante as leituras, impactará a planta de geração solar com os mesmos valores máximos e mínimos identificados na figura 5.14.

5.4. Conclusões

Neste capítulo foram avaliados os cenários associados a implantação de redes de sensores sem fio, destinadas ao monitoramento de plantas solares fotovoltaicas de grandes dimensões. As medições para 60 metros e 100 metros apresentaram níveis de sinal acima do limite de sensibilidade do rádio modem, bem como uma taxa de transmissão com sucesso de 80%. O arranjo físico da No capítulo seguinte serão apresentadas as propostas de continuidade deste trabalho, além das conclusões obtidas quanto a topologia de rede e a técnica de roteamento as plantas de geração solar.

6 - Conclusões e Propostas de Continuidade

6.1. Conclusões

O monitoramento de plantas solares fotovoltaicas, com base na tecnologia *wireless* estruturada no protocolo Zigbee é uma opção importante para a implantação de redes de sensores sem fio. A possibilidade de alocação de até 65.000 dispositivos por rede é um dos pontos mais fortes associados a esta tecnologia, aliadas às técnicas de roteamento que permitem o ajuste da rede à distribuição de *strings* ao longo da área ocupada.

Elementos como autoconfiguração, custo reduzido por dispositivo, bem como a facilidade de substituição de dispositivos e rádio *modems*, conferem à rede estabilidade e confiabilidade. A possibilidade de adoção das técnicas de roteamento *Many-to-one* e *Source* são condizentes com os requisitos necessários para operação das plantas de geração fotovoltaica, que são a cobertura de grandes dimensões com geometria ajustada ao terreno e à estabilidade da rede.

A taxa de transferência bem como o número de nós associáveis a uma rede Zigbee, se mostraram adequados às exigências ligadas as dimensões e ao tráfego de dados próprios de uma planta de geração fotovoltaica. As medições efetuadas demonstraram que é possível estabelecer uma conexão com a distância mínima de 100 metros, algo que pode ser melhorado com o emprego dos módulos Xbee Pro cujo alcance segundo o fabricante pode chegar a 1,6 Km.

O dimensionamento da rede poderá ser efetuado a partir do posicionamento dos roteadores a intervalos de no mínimo 100 metros, seja entre roteadores ou entre roteador e coordenador. No que se refere aos nós sensores, estes estão posicionados a distância inferiores a 100 metros dos roteadores, conforme a topologia árvore empregando o roteamento *Source*.

6.2. Propostas de Continuidade

Há a necessidade de maior estudo e desenvolvimento de tecnologias destinadas ao monitoramento e controle de plantas de geração fotovoltaica. Diante de tal cenário, as propostas de continuidade deste trabalho são:

Criação de um perfil de aplicação destinado ao monitoramento de plantas fotovoltaicas.

- Desenvolvimento de um sistema de supervisão a partir de ambientes SCADA
- Desenvolvimento de modelos computacionais da operação de uma planta fotovoltaica.

Um perfil de aplicação consiste, em um “hardware” e *firmware* dedicados que conferem ao aos nós da rede, uma diversidade de funções específicas, tornando o desenvolvimento mais rápido.

O desenvolvimento de sistemas de supervisão é outra necessidade que garante não somente a operação confiável da planta, mas o registro de dados vitais. O emprego de ambientes SCADA torna possível a rápida modificação e adequação ao projeto, gerando ferramentas que possam ser empregadas em qualquer planta fotovoltaica.

Os modelos computacionais podem ser um instrumento valioso do ponto de vista do planejamento e gerenciamento da operação de uma planta solar. Os modelos computacionais gerados a partir dos dados colhidos possibilitam não somente a elaboração de planos de manutenção detalhados, como também a previsão de fornecimento ao longo do ano.

Um plano de manutenção elaborado com critérios sólidos, bem como a previsão da demanda a ser suprida ao longo de um período são elementos estratégicos para as concessionárias de energia bem como do operador nacional de sistemas. A continuidade deste trabalho com base nos pontos listados acima pode contribuir para desenvolvimento da tecnologia associada ao projeto de redes de sensores sem fio com foco na geração fotovoltaica.

Referências Bibliográficas

- [1] Coddington *et all*, Photovoltaic systems interconnected into secondary network distribution systems – Success stories, Technical Report NREL/TP-550-45061 April 2009

- [2] Villalva, Marcelo Gradella Conversor eletrônico de potência trifásico para sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica / Marcelo Gradella Villalva. --Campinas, SP: [s.n.], 2010.

- [3] Assunção Maria C. Alice, Integração de microgeração em larga escala nas redes de baixa tensão, IBP, Dezembro 2008.

- [4] Pereira Shimoda V Dante, Conversor CC-CC Boost com MPPT alimentado por painéis fotovoltaicos para aplicação em geração distribuída, UFC, Dezembro 2010.

- [5] Valente, A. S. Miguel, Caracterização automática de um painel fotovoltaico, Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2011.

- [6] Rashid *et. all*, wireless Zigbee system for performance monitoring of photovoltaic panels, Simon Fraser University, 2011

- [7] Ramos B.S. Jadeilson, Instrumentação eletrônica sem fio, Editora Érica, 2012.

- [8] Katsioulis Vasileios, Design of a wireless monitoring system based on the ZigBee protocol for photovoltaic systems, Tese de Mestrado, Brunel University, 2011

- [9] Ribeiro M. Cláudio *et all*, Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos, Rio de Janeiro, CRESESB, 1999

- [10] Freris Leon, Infield David, Renewable energy in power systems, John Wiley & Sons Ltd, 2008.

- [11] Patel, Mukund R., Wind and solar power systems: Design, analysis, and operation / Mukund R. Patel, 2nd ed., 2010
- [12] Pomílio, J.A. Eletrônica de potência, Florianópolis, Ed. do Autor, 2010.
- [13] Almeida P. Marcelo, Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados a rede, Tese de Mestrado, USP,2012.
- [14] Eram, T. Chapman, P.L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques, IEEE Transactions on Energy Conversion, v 22,p.439-449, junho 2007
- [15] Holm, D. P. Ropp,M,E. Comparative study of maximum power point tracking algorithms, Progress In Phtovoltaics: Research and Applications, v.11,p.47-62,2003
- [16] Junior. L. Orlando, Sistemas fotovoltaicos conectados a rede estudo de caso – 3KWp instalados no IEE-USP, Tese de Mestrado, USP,2010.
- [17] Michele Sclocchi, Distributed MPPT to improve the efficiency of solar system, application, vol. 12, pp. 42–43, 2009.
- [18] Molina *et all*, Modeling and Control of grid-connected photovoltaic energy conversion system used as a dispersed generator, , IEEE, 2008.
- [19] P. Z. Wang, Research on fault analysis of photovoltaic array, Anhui Hefei, Hefei University of Technology, 2005.
- [20] Luque et all Handbook of photovoltaic science and Eengineering, Wiley, 2002
- [21] Microchip Technology Inc, rfPIC12F675K Datasheet 20-Pin FLASH-Based 8-Bit CMOS microcontroller with UHF ASK/FSK transmitter, 2003.
- [22] Kobayashi Y. Carlos, A Tecnologia bluetooth e aplicações, USP, 2004.

[23] Soares, L. F. G. *et all.* – Redes de computadores - das LANs, MANs e WANs às redes ATM - Ed. Campus, 1995.

[24] Zhengming Li, *et all.*, A Monitoring system of photovoltaic array based on ZigBee technology, Jiangsu University, 2011

[25] Han, J. and Lee, H. and Park, K.R., Remote-controllable and energysaving room architecture based on ZigBee communication, IEEE Transactions on Consumer Electronics (TCE), 2009.

[26] Zhang, Q. and Sun, Y. and Cui, Z., Application and analysis of ZigBee technology for Smart Grid, IEEE International Conference on Computer and Information Application (ICCIA), 2010.

[27] Minet Pascale, Mahfoudh Saoucene, Energy, bandwidth and time efficiency in data gathering applications, INRIA, 2010

[28] Gburzynski Pawel *et all.*, A Tiny and Efficient wireless Ad-hoc Protocol for Low-cost Sensor Networks University of Alberta, 2009.

[29] Casone Luca, Improving many-to-one traffic flowing in multi-hop 802.15.4WSNs Using a MAC-Level fair Scheduling, University of Lecce, 2007

[30] Wu Yao-Ting, ZigBee source route technology in home application, Networks and Multimedia Institute, Institute for Information Industry, 2008

[31] National Semiconductor Corporation, LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors, www.national.com, 2000

[32] Solarex, MSX-60 and MSX-64 Photovoltaic modules,, <http://www.solarex.com/>, 1998.

.

[33] Digi International Inc, Xbee/Xbee-Pro ZB RF modules, <http://www.digi.com>, 2012.

- [34] Manjunath, C.T *et all*, Design, Development & implementation of a temperature Sensor using Zigbee Concepts, International Journal of Electrical and Computer Engineering 3:12 2008
- [35] G Ding, Z Sahinoglu, B Bhargava, P Orlik, J Zhang , Reliable broad cast en Zigbee networks, Proc. of IEEE conference on Zigbee, 2007
- [36] Koubâa, A., Alves, M., E Tovar, E. IEEE 802.15.4 for wireless sensor networks: A technical overview. Relatório Técnico TR-050702, Polytechnic Institute of Porto, Portugal, 2005.
- [37] Lima *et all*, Controlador de carga com supervisão ampere-hora para sistemas fotovoltaicos de potência, UFMA, 2010.
- [38] H. Karl, A. Willig. Protocols and architectures for wireless sensor networks. England: John Wiley& Sons, Ltd, West Sussex, p. 234-7, 2005,
- [39] H. Liu, S. Y. Zhang, Y. G. Zhang, Y. C. Wang, CC2430 ZigBee-based wireless temperature and humidity monitoring network, Metallurgical Industry Institute, China Metrology Association, pp. 821–823, 2008.
- [40] Yacoub, M. D.; wireless technology protocols, standards, and techniques. Florida: CRC PRESS LCC., 2002.
- [41] Teixeira, Luis Marcelo. Desenvolvimento de uma aplicação com o protocolo ZigBee aplicado em Instrumentação de Ensaio de Vôo. 162f. Tese de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2006.
- [42] Sanches, C. A., Projetando redes WLAN – conceitos e práticas.1. ed. São Paulo:Editora Érica. 2005.
- [43] Ricardo, C. A, Redes de sensores: ZigBee, Tese de mestrado em informática aplicada PUC/PR. 2006

- [44] Baronti, P.; Pillai, *et all*. Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and de 802.15.4 and ZigBee standards, *Computer Communications* 30, 1655-1695, 2007.
- [45] Shanmugaraj M and Prabakaran R., Monitoring of risky parameters using ZigBee based , *International Journal of Computer Science Issues*, Vol. 1, Issue 1, 2011.
- [46] Xinwei Wang *et all*, Localization in wireless Ad-hoc sensor networks using multilateration with RSSI for logistic applications, *Procedia Chemistry* 1, 461–464, 2009.
- [47] Y. Zhang, Z. Fang, R. Li, and W. Hu, The Design and implementation of a RSSI-based localization system, 5th International Conference on wireless Communications, Networking and Mobile Computing, pp. 1-4, Sep. 2009.
- [48] Vieira, Marcos., *et all*, Survey on wireless sensor network devices, In *IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, 2003.
- [49] Soares F. A. Sérgio and Silva P.S. Bruno, Mini-curso - Introdução ao XBee, Universidade Federal do Vale do São Francisco, 2011
- [50] Forero N, *et all*, Development of a monitoring system for a PV solar plant, *Energy Conversion and Management* 47, 2329–2336, 2006.