



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de Guaratinguetá

GABRIEL ANTONIO FANELLI DE SOUZA

**APLICAÇÃO DO CONCEITO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
A UM SISTEMA FOTOVOLTAICO RESIDENCIAL**

Guaratinguetá
2014

GABRIEL ANTONIO FANELLI DE SOUZA

APLICAÇÃO DO CONCEITO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA A UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO RESIDENCIAL

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Feliciano Adami

Guaratinguetá

2014

S729a	Souza, Gabriel Antonio Fanelli de Aplicação do conceito de Geração Distribuída a um sistema fotovoltaico residencial/ Gabriel Antonio Fanelli de Souza – Guaratinguetá : [s.n], 2014. 70 f : il. Bibliografia: f. 60-69 Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014. Orientador: Prof. Dr. José Feliciano Adami 1. Redes inteligentes de energia 2. Energia solar 3. Geração de energia fotovoltaica. I. Título CDU 621.3.011.7
-------	--

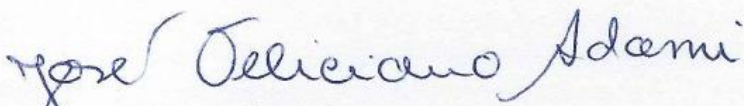
GABRIEL ANTONIO FANELLI DE SOUZA

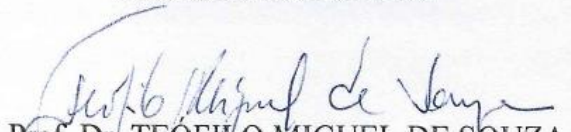
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ FELICIANO ADAMI
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA
UNESP-FEG


Prof. Dr. RUBENS ALVES DIAS
UNESP-FEG

DADOS CURRICULARES

GABRIEL ANTONIO FANELLI DE SOUZA

NASCIMENTO	20.12.1991 – SÃO PAULO/ SP
FILIAÇÃO	Vladimir Alves de Souza Cleonice Aparecida Fanelli de Souza
2010/2014	Curso de Graduação em Engenharia Elétrica Universidade Estadual Paulista – Campus de Guaratinguetá

À memória de meu pai, meu maior professor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, *Prof. Dr. José Feliciano Adami*, pela dedicação e pela ajuda, desde a escolha do tema até as correções finais.

aos meus pais *Vladimir* e *Cleonice*, que sempre me apoiaram e fizeram de tudo para que eu pudesse estudar. Sem eles eu não estaria aqui hoje.

à minha irmã *Amanda*, que sempre esteve ao meu lado.

a todos os professores que de alguma forma contribuíram para a minha formação.

aos amigos e colegas, pelo apoio durante todo o curso.

“Se você quiser descobrir os segredos do Universo, pense em termos de energia, frequência e vibrações.”

Nikola Tesla

SOUZA, G. A. F. **Aplicação do Conceito de Geração Distribuída a um Sistema Fotovoltaico Residencial**. 2014. 70 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

RESUMO

Este trabalho trata de um estudo sobre a geração distribuída de energia elétrica utilizando um sistema de painéis solares fotovoltaicos no contexto das redes inteligentes. São discutidas as características de um *Smart Grid*, os vários aspectos que envolvem este conceito – entre eles a geração distribuída – e são fornecidos exemplos de equipamentos, como os medidores inteligentes, além de exemplos de projetos, nacionais e internacionais. As peculiaridades da geração distribuída e as normas e padrões necessários para este tipo de instalação são discutidos com enfoque para o caso da geração via energia solar. No campo da geração fotovoltaica, é apresentado o princípio de funcionamento dos painéis, suas principais características elétricas e também as principais tecnologias empregadas. Por fim é realizado um estudo de caso do dimensionamento de um sistema de geração distribuída utilizando painéis fotovoltaicos em uma instalação residencial. É feita uma análise dos custos e do tempo de retorno de investimento para o caso específico considerado.

PALAVRAS-CHAVE: Redes Inteligentes. Geração Distribuída. Energia Solar. Painéis Fotovoltaicos.

SOUZA, G. A. F. **Application of the Distributed Generation Concept to a Residential Photovoltaic System**. 2014. 70 f. Graduate Work (Electrical Engineering Graduation) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

ABSTRACT

This work presents a study about distributed generation using photovoltaic systems in the context of smart grids. The characteristics of a Smart Grid and the several aspects this concept involves – distributed generation among them – are discussed. There are also examples of equipment, like smart meters, and of national and international projects. The specificities of distributed generation and the rules and standards necessary in this sort of installation are talked through with focus in the solar energy generation method. Regarding photovoltaic systems, the working principles of the panels are presented, along with its main electrical characteristics and the technologies available. Finally there is a study concerning the sizing of a distributed generation system that involves photovoltaic panels in a residential plant. An analysis of the costs and return of investment period is made about the specific case in consideration.

KEYWORDS: Smart Grid. Distributed Generation. Solar Energy. Photovoltaic Modules.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração de um sistema com três geradores.....	18
Figura 2 – Sistema com falha em duas linhas, ocasionando a formação de ilhas	18
Figura 3 – Smart Grid com redes de potência e de dados	20
Figura 4 – Exemplo de Smart Sensor	21
Figura 5 – Smart Meter monofásico do projeto Telegestore.....	23
Figura 6 – Religador automático e cabine de controle e comunicações	26
Figura 7 – Projetos Piloto de redes inteligentes	28
Figura 8 – Geração Distribuída no contexto de um Smart Grid.....	32
Figura 9 – Evolução da Padronização da Geração Distribuída com sistemas fotovoltaicos no Brasil	37
Figura 10 – Preço Médio dos sistemas fotovoltaicos na Alemanha.....	41
Figura 11 – Ângulo entre a irradiação solar e a perpendicular	42
Figura 12 – Densidade da Irradiação Solar em função do comprimento de onda.....	42
Figura 13 – Princípio de funcionamento de uma célula solar fotovoltaica	44
Figura 14 – Modelo do circuito de uma célula fotovoltaica.....	45
Figura 15 – Curvas de corrente e potência de uma célula solar fotovoltaica	46
Figura 16 – Exemplo de painel solar fotovoltaico	47
Figura 17 – Exemplo de inversor DC/AC	48
Figura 18 – Gráfico de consumo mensal de uma residência em kWh	53
Figura 19 – Análise dos custos com e sem o sistema de geração fotovoltaico	57
Figura 20 – Análise do tempo de retorno de investimento para diferentes cenários.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos mínimos dos equipamentos em função da potência instalada	38
Tabela 2 – Custos estimados dos equipamentos	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEE	Associação Brasileira de Energia Eólica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AES	<i>Advanced Encyption Standard</i>
AM	<i>Air Mass</i>
AMI	<i>Advanced Metering Infrastructure</i>
AMR	<i>Automated Meter Reading</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	American National Standards Institute
BB	<i>Broad Band</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DD	<i>Dynamic Demand</i>
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DER	<i>Distributed Energy Resources</i>
DR	<i>Demand Response</i>
DSM	<i>Demand Side Management</i>
EEG	<i>Erneuerbare-Energien-Gesetz</i> (Ato de Energias Renováveis)
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FF	Fator de Forma
GD	Geração Distribuída
GPRS	<i>General Packet Radio Sevice</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
GTES	Grupo de Trabalho de Energia Solar
HSP	Horas de Sol Pleno
IDEAL	Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina
IEC	<i>International Eletrotechnical Comission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IGP-M	Índice Geral de Preços - Mercado
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia
NB	<i>Narrow Band</i>
NBR	Norma Brasileira
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
NRL	<i>Naval Research Laboratory</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PLC	<i>Power Line Communication</i>
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>
PRODIST	Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RN	Resolução Normativa
SIM	<i>Subscriber Identity Module</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
STC	<i>Standard Test Conditions</i>

TD	Taxa de Desempenho
TWACS	<i>Two Way Automatic Communications System</i>
UNB	<i>Ultra Narrow Band</i>
URC	Unidade Remota de Controle
VCO	<i>Voltage Controlled Oscillator</i>
ZCD	<i>Zero Crossing Detector</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	15
2	SMART GRID	17
2.1	ORIGEM	17
2.2	MOTIVAÇÃO.....	17
2.3	DEFINIÇÃO	19
2.3.1	Medição	21
2.3.2	Comunicação.....	24
2.3.3	Atuação.....	25
2.4	DESVANTAGENS	27
2.5	CENÁRIO NACIONAL	27
3	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	30
3.1	CONCEITO.....	30
3.1.1	Tecnologias de Geração	30
3.1.2	Motivação	31
3.1.3	Smart Grid	31
3.2	VANTAGENS.....	32
3.3	DIFICULDADES TÉCNICAS	33
3.3.1	Sincronismo.....	34
3.3.2	Anti-Ilhamento.....	34
3.4	PADRÕES E NORMAS	35
3.4.1	Padrões Internacionais.....	35
3.4.1.1	IEEE Std 1547-2003.....	35
3.4.2	Padrões Nacionais.....	36
3.4.2.1	RN 482/2012	37
3.4.2.2	PRODIST Módulo 3.....	37
3.4.2.3	EDP – Conexão de Mini e Microgeradores.....	39
4	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	40
4.1	HISTÓRIA	40
4.2	DEFINIÇÕES.....	41
4.3	SEMICONdutoRES.....	43
4.4	TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS	44

4.5	PARÂMETROS EXTERNOS	45
4.6	INVERSORES	47
4.7	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE	48
4.7.1	Incidência Luminosa no Local de Instalação.....	49
4.7.2	Levantamento da Demanda.....	49
4.7.3	Dimensionamento do Gerador	50
4.7.4	Dimensionamento do Inversor	50
5	ESTUDO DE CASO.....	52
5.1	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA.....	52
5.1.1	Incidência Luminosa	52
5.1.2	Levantamento da Demanda.....	52
5.1.3	Dimensionamento do Gerador	53
5.1.4	Dimensionamento do Inversor	54
5.1.5	Dimensionamento dos Condutores	55
5.1.6	Dimensionamento da Proteção.....	55
5.2	CUSTOS.....	56
5.3	ANÁLISE.....	56
6	CONCLUSÃO	58
	REFERÊNCIAS	60
	ANEXO – Evolução da eficiência das células solares fotovoltaicas.....	70

1 INTRODUÇÃO

O constante crescimento da demanda por energia elétrica requer um aumento nos investimentos em geração e distribuição. Além disso, há várias preocupações ambientais envolvidas, relacionadas principalmente à emissão de gases poluentes. No caso específico do Brasil, que tem usinas hidrelétricas como a base de sua geração, os problemas de falta de água, sobrecarga das usinas termelétricas, o aumento da demanda (exemplificado pelo pico de consumo no início do ano de 2014) e o roubo de energia são os principais desafios.

Não há solução única para esses problemas, mas nos últimos anos vem se desenhando um cenário favorável às redes inteligentes, exatamente pela capacidade de melhorar a eficiência da transmissão e do consumo de energia e permitir, ou facilitar, a conexão de microgeradores baseados em fontes renováveis como a energia solar e eólica.

O objetivo deste trabalho é mostrar que o *Smart Grid* está deixando de ser um conceito e virando uma realidade com exemplos de projetos, equipamentos, desenvolvimento de regulamentação nacional e internacional. São discutidas também as tecnologias de geração solar, seu crescimento ao longo dos anos e a perspectiva no contexto da geração distribuída. Por fim há o desenvolvimento de um estudo de viabilidade de um projeto de geração fotovoltaica residencial no Brasil, considerando os padrões e normas referentes à geração distribuída.

1.1 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco seções. A introdução discorre sobre o tema, a motivação e os objetivos deste estudo.

O segundo capítulo trata das redes inteligentes, suas aplicações, seus vários aspectos, e traz exemplos de equipamentos e tecnologias utilizadas.

O terceiro capítulo apresenta as possibilidades da geração distribuída e as normas nacionais e internacionais, sobretudo na geração fotovoltaica.

O quarto capítulo fala sobre a tecnologia de geração solar fotovoltaica, seu histórico, princípios de operação, características elétricas e termina com uma descrição de como dimensionar um sistema conectado à rede.

O quinto capítulo traz um estudo de caso sobre um projeto de geração solar fotovoltaica com um inversor conectado à rede, detalhando itens do dimensionamento e custos, além de uma análise do retorno do investimento.

O sexto capítulo apresenta as considerações finais, possibilidades para o futuro considerando o resultado do estudo de caso, além de ressaltar a tecnologia de geração solar fotovoltaica dentro do conceito de geração distribuída em uma rede inteligente.

2 SMART GRID

2.1 ORIGEM

A rede de distribuição de energia elétrica sofreu poucas modificações conceituais significativas desde sua concepção na disputa entre Thomas Edison e Nikola Tesla no final do século XIX. O sistema desenvolvido por Tesla e financiado pela companhia Westinghouse tinha como base a corrente alternada e saiu vencedor principalmente devido à vantagem conferida pelo uso de transformadores, que permitiam elevar as tensões e, conseqüentemente, as distâncias de transmissão (CARLSON, 2013). De maneira simplificada, o fluxo de potência se dá do gerador, passando por um transformador elevador para a linha de transmissão, daí para uma subestação, por um transformador abaixador e finalmente para a carga. Até hoje é assim que a maior parte da rede opera, sem nenhum controle quanto à demanda (O sistema deve fornecer a potência exigida pelo consumidor, o que se torna um problema nos horários de pico), e a distribuidora depende do usuário para informar sobre falhas no fornecimento.

É neste contexto que surge a ideia de utilizar novas tecnologias de processamento e comunicação para melhorar e otimizar a operação da rede, num conceito que ficou conhecido como *Smart Grid*.

2.2 MOTIVAÇÃO

O termo *Smart Grid* foi utilizado pela primeira vez em um artigo chamado *Toward a Smart Grid* (AMIN; WOLLENBERG, 2005), em que os autores propõem a utilização de um processador em cada nó da rede, de tal modo a criar um sistema auto curável. É feita uma analogia com o sistema de controle de voo desenvolvido para o caça F-15 em caso de dano em alguma superfície de controle. Da mesma maneira que o caça é capaz de manter a estabilidade alterando as variáveis de controle ainda disponíveis, o sistema elétrico seria capaz de se ajustar para compensar uma falha automaticamente.

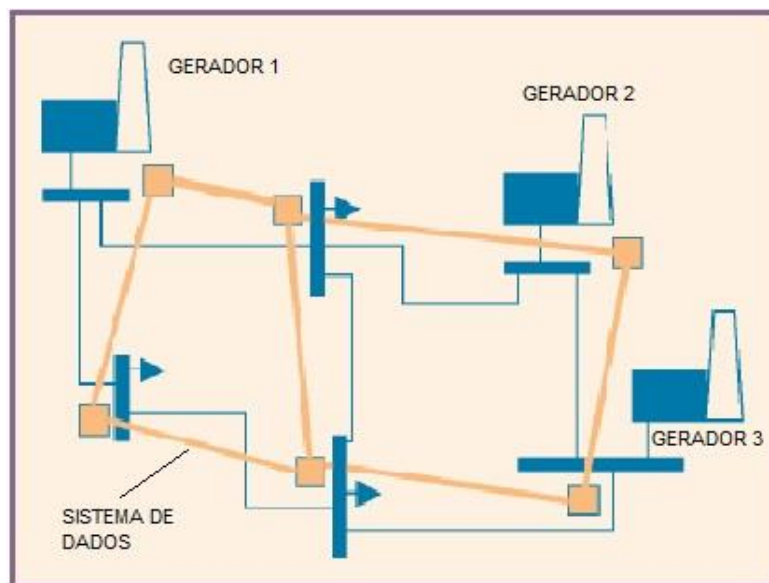
Neste trabalho é descrita uma possível situação de blackout e a sequência de eventos que levam a este tipo de falha generalizada:

1. Falha em uma linha de transmissão importante.
2. Sobrecargas em outras linhas devido à falha inicial, criando ilhas no sistema.

3. A frequência cai devido a uma sobrecarga na ilha.
4. O sistema de proteção atua devido ao erro de frequência, desligando a geração.
5. Ocorre o blackout na ilha.
6. O blackout dura muito devido ao tempo necessário para reiniciar a geração.

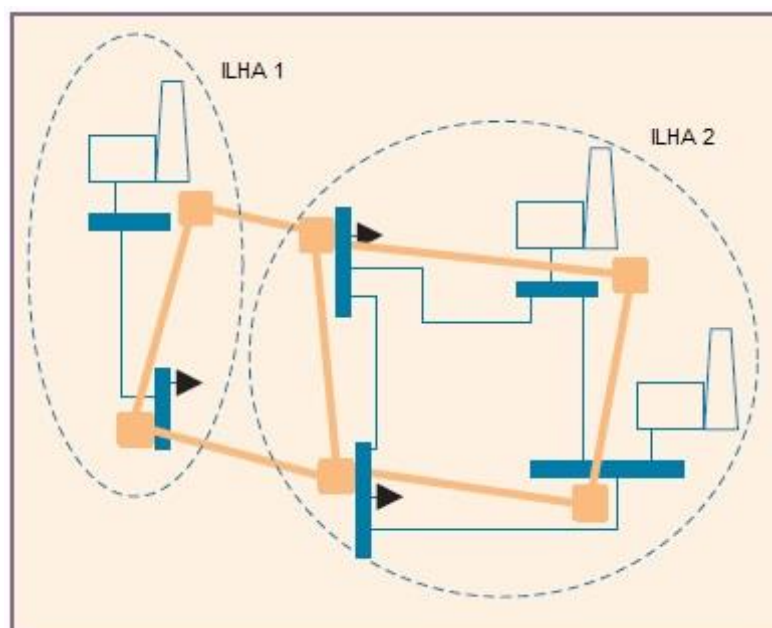
As Figuras 1 e 2 ilustram a formação de uma ilha.

Figura 1 – Ilustração de um sistema com três geradores.



Fonte: (AMIN; WOLLENBERG, 2005)

Figura 2 – Sistema com falha em duas linhas, ocasionando a formação de ilhas.



Fonte: (AMIN; WOLLENBERG, 2005)

O sistema de potência, em azul, é constituído por três geradores que estão conectados entre si e fornecem energia às cargas por meio de uma série de barramentos. O sistema de informação complementar é mostrado em amarelo.

Os processadores (em amarelo) teriam que determinar a frequência em cada ilha, quais cargas e quais geradores estão conectados à ilha, qual a relação entre geração e demanda e quais as ações de controle possíveis para restaurar o equilíbrio. Essa análise e as decisões subsequentes são feitas de maneira muito mais rápida pela rede de processadores do que se dependessem de um sistema central de computação.

2.3 DEFINIÇÃO

Apesar do conteúdo descrito na seção anterior contemplar apenas a questão do controle de falhas, o conceito de *Smart Grid* se ampliou, uma vez que a simples utilização de medidores associados ao poder de processamento e a capacidade de comunicação (interligação em rede) permitem diferentes níveis de atuação sobre o sistema elétrico.

Atualmente são várias as definições possíveis ao termo *Smart Grid*, sendo uma das mais simples a que descreve o sistema elétrico como uma “via de mão dupla” ou um sistema bidirecional em que tanto energia como informação são transmitidas entre os consumidores e a companhia elétrica.

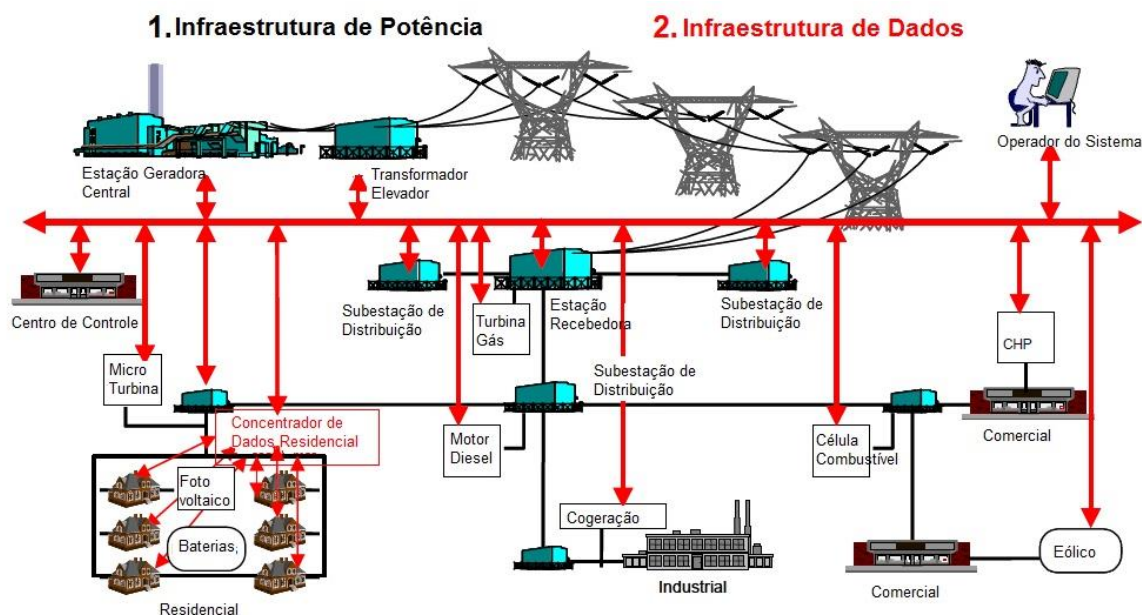
Segundo o relatório *Smart Grid* do Grupo de Trabalho de Redes Elétricas Inteligentes do Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2010), a modernização da rede deve ter como foco a confiabilidade, a eficiência, a segurança, as questões ambientais e a competitividade. Este relatório ainda define como principais funções requeridas a auto-recuperação, motivar os consumidores a serem mais participativos, resistir a ataques físicos e cibernéticos, fornecer uma energia de melhor qualidade, permitir vários tipos de geração e armazenagem de energia e permitir uma geração intermitente de energia. Baseado nisto, é possível enumerar alguns dos “produtos” associados às redes inteligentes:

- AMI (*Advanced Metering Infrastructure*): Permite a leitura automática do consumo de energia, inclusive com tarifas variáveis – horossazonais.
- DSM (*Demand Side Management*): Capacidade do sistema de controlar ativamente a demanda em eventos de pico. Isso pode ser obtido de duas maneiras:

- DR (*Demand Response*): O usuário final da energia é o responsável por diminuir o consumo nos horários de pico, incentivado por tarifas variáveis.
- DD (*Dynamic Demand*): O sistema é capaz de controlar o ciclo de funcionamento dos equipamentos conectados à rede de forma que eles não se sobreponham, diminuindo assim o pico de demanda.
- DER (*Distributed Energy Resources*): Consiste em contar com pequenas unidades produtoras de energia, ou de armazenamento, mais próximas à carga, aliviando as grandes usinas nos horários de pico.
 - GD (Geração Distribuída): Capacidade do consumidor final gerar sua própria energia – especialmente de fontes renováveis – e vender o excedente para a rede nos momentos de baixa utilização.

A implementação, de forma gráfica, do *Smart Grid* é mostrada na Figura 3, apresentando as duas infraestruturas necessárias, a de potência e a de comunicação de dados.

Figura 3 – Smart Grid com redes de potência e de dados.



Fonte: (EPRI, 2003).

As principais ramificações deste conceito e algumas particularidades e aplicações estão descritos nas próximas seções deste capítulo. Os próximos itens abordam o tema em três níveis: Medição, Comunicação e Atuação. Cada um deles apresenta uma descrição e

exemplos de tecnologias existentes (detalhando especificações, condições de operação e casos de uso).

2.3.1 Medição

São várias as grandezas que podem ser medidas relacionadas ao sistema elétrico. Algumas que podem ser citadas são: tensão, corrente (identificar faltas ou picos de corrente), frequência, temperatura do condutor, fator de potência, qualidade (distorção harmônica), forma de onda, potência, além de estatísticas de confiabilidade como tempo médio de reparo e tempo médio entre falhas.

Já existem diversos fabricantes de *smart sensors*, capazes de transmitir as informações coletadas, normalmente via rádio, a um sistema supervisor. Isso permite ao operador do sistema agir não só mais rapidamente, mas até programar ações automáticas dependendo da situação – possivelmente realizando chaveamentos à distância utilizando os religadores automáticos discutidos no item 2.3.3. Como exemplo, são discutidos a seguir modelos de sensores disponíveis no mercado atualmente.

Um dos tipos de sensores existente tem tamanho pequeno e é afixado diretamente nos condutores, como mostra a Figura 4. Este é um sensor para médias tensões, alimentado pela própria rede, às vezes dispondo de uma bateria.

Figura 4 – Exemplo de Smart Sensor



Fonte: (COOPER INDUSTRIES, 2014).

O sensor mostrado na Figura 4 é fabricado pela Cooper Industries e segue o padrão IEEE para teste de falta em circuitos (IEEE Std 495-2007). Além disso, ele possui bateria e entrada para cartão SIM (*Subscriber Identity Module*) para se conectar à rede GSM (*Global System for Mobile Communications*). A tensão máxima de operação é de 69 kV. Outro sensor similar é o fabricado pela Tollgrade, capaz de suportar até 46 kV, ele mede tensão, corrente, temperatura, fator de potência, distorção harmônica e também a forma de onda. Este modelo não possui bateria e se conecta à rede celular ou a uma rede WiFi. No site do fabricante são também informados casos de uso deste equipamento por empresas do setor elétrico. Este ainda é um mercado pequeno e caro, mas com muitas oportunidades de crescimento no futuro (MOGHE; LAMBERT; DIVAN, 2012).

Outro tipo de sensor, este já um pouco mais difundido, é o *smart meter*, que substitui o medidor analógico que registra o consumo de energia elétrica. São medidores capazes de transmitir os dados coletados, normalmente energia ativa, reativa, tensão instantânea e estatísticas de interrupção. Trata-se de um dos equipamentos mais importantes na implantação de um sistema inteligente, já que ele é responsável por medir o consumo e eventual geração do consumidor (informação necessária para a tarifação), determinar a qualidade da energia elétrica, tempos de interrupção e realizar a interface (comunicação) entre a fornecedora e o cliente. Essa transferência de informações é que permite a tomada de decisões capazes de diminuir o consumo total e o pico de demanda, fatores chave para demonstrar a viabilidade do *Smart Grid*.

Em 2001, na Itália, a companhia elétrica ENEL iniciou um processo de substituição dos medidores comuns por *smart meters*. Além disso, foi criada uma rede com concentradores nas subestações e um sistema central de gestão remota (ENEL, 2014). O objetivo deste desenvolvimento era automatizar a leitura do consumo de energia.

Os medidores adotados neste projeto, chamado de Telegestore, são como o mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Smart Meter monofásico do projeto Telegestore



Fonte: (ROGAI, 2007).

Suas principais características são (ROGAI, 2007):

- Leitura de energia ativa e reativa de acordo com os padrões IEC 62053, 62052-11 (ex-IEC 61036) Classe 1 e 62053-22 (ex-IEC 61268) Classe 2
- Garantia de 15 anos
- Taxa de falha $< 0,3\%$
- Consumo de potência $< 2W/fase$;
- Faixa de temperatura de operação: $-25^{\circ}C +55^{\circ}C$;
- Temperatura limite de operação: $-40^{\circ}C +70^{\circ}C$;
- Potência média e curva de carga (5 semanas em intervalos de leitura de 15 min)
- Download de software
- Auto diagnóstico em componentes e funções essenciais
- Detecção de todos os acessos ao hardware e software, ligado ou desligado.
 - Remoção do medidor da base
 - Reprogramação
- Possibilidade de tarifas variáveis com 4 faixas de preço e com diferentes combinações por dia da semana
- Demanda máxima programável de 10 kW (em intervalos de 0,1 kW)
- Disjuntor operado manualmente e eletronicamente.
- Detecção de interrupção no fornecimento e de variações na tensão

Além disso, desde 2007 os medidores instalados são bidirecionais, ou seja, já estão habilitados para permitir que o consumidor venda energia à companhia elétrica, num dos aspectos da rede inteligente conhecido como geração distribuída e que é discutido em mais detalhes no capítulo seguinte.

Existem outros exemplos de uso de medidores inteligentes nos Estados Unidos pela XCel em Boulder, Colorado e também pela PG&E que atua na costa oeste. Em ambos existe a possibilidade do consumidor acessar em tempo real, via internet, o consumo de energia de sua residência. O acesso a essas informações permite saber se o consumo vem aumentando ou diminuindo e em que horário está se gastando mais, ou seja, o usuário é capaz de tomar decisões mais eficazes para diminuir seu gasto. Este é outro aspecto interessante do *smart grid*: fazer com que o consumidor participe mais ativamente do processo.

2.3.2 Comunicação

Um dos aspectos fundamentais de uma rede inteligente é a capacidade de comunicação entre os dispositivos conectados, sensores, medidores, concentradores e o sistema supervisorio. A tecnologia necessária já existe na forma de PLC (*Power Line Communication*), GSM, GPRS (*General Packet Radio Service*) e ZigBee, cada um participando em um nível do sistema: Entre os eletrodomésticos e o *smart meter*, entre os *smart meters* e os concentradores e entre os concentrados e o supervisorio.

O PLC envia um sinal modulado sobre o próprio sinal elétrico da rede. Parece natural que este método de comunicação seja utilizado nas redes inteligentes, já que aproveita a infraestrutura já existente, além de manter o controle exclusivo da Cia. elétrica, sem envolver outras empresas de telecomunicação.

Existem três tipos principais de tecnologias PLC: UNB (*Ultra Narrowband*), NB (*Narrowband*) e BB (*Broadband*). A primeira é extremamente lenta, porém alcança distâncias maiores. Opera em frequências de até 3 kHz. Já existem tecnologias muito utilizadas nesta categoria chamadas AMR (*Automated Meter Reading*) Turtle System e TWACS (*Two-Way Automatic Communications System*) (GALLI; SCAGLIONE; WANG, 2012). A segunda faixa opera de 3 kHz a 500 kHz, já com maior capacidade de transmissão de dados chegando até a 500 kb/s. A faixa BB opera entre 1,8 MHz e 250 MHz podendo oferecer velocidades de megabits por segundo, porém a distâncias reduzidas.

A tecnologia PLC já vem sendo utilizada para comunicação entre a distribuidora e as unidades consumidoras, como no caso da ENEL, citado no item 2.3.1, que utiliza o PLC entre os medidores e os concentradores ou ainda pela Florida Power and Light, que vem utilizando a tecnologia TWACS não só para leitura automática dos medidores, mas também para um controle ativo sobre a demanda de 700 mil consumidores. (GALLI; SCAGLIONE; WANG, 2012).

A tecnologia GSM também é considerada como alternativa para comunicação nas redes inteligentes. Trata-se da tecnologia utilizada nas redes celulares e tem como vantagem o fato de que a infraestrutura necessária já existe, ainda que em alguns pontos existam buracos na cobertura do sinal. Esta tecnologia utiliza duas faixas de 25 MHz, entre 890 e 915 MHz e entre 935 e 960 MHz (GU; PENG, 2010). Neste caso é preciso levar em consideração os custos da cooperação com a empresa de telecomunicação responsável pela rede. As tecnologias GSM e GPRS (tecnologia que permite aumentar a taxa de transmissão de uma comunicação GSM) são utilizadas pela ENEL para transmitir os dados dos concentradores aos supervisórios.

Outro tipo de tecnologia de comunicação disponível é o ZigBee, um conjunto de protocolos de comunicação sem fio com diversas aplicações e bastante utilizado para a comunicação entre os eletrodomésticos e o *smart meter*. O protocolo ZigBee *Smart Energy* contempla este tipo de comunicação e já é utilizado por companhias como a Pacific Gas and Electric Company, San Diego Gas & Electric, Smart Meter Texas e Southern California Edison para permitir que o usuário tenha informações sobre o consumo individual de cada equipamento.

Algumas das características do ZigBee, segundo Ramya são:

- Operação Global na faixa de frequência de 2,4 GHz
- Operação em 915 MHz na América e 868 MHz na Europa
- Baixa potência de operação e baixo custo
- Alcance de até 150 metros
- Protocolo de segurança AES (*Advanced Encryption Standard*)-128
- Trabalha em conjunto com o padrão de rede IEEE802.15.4

2.3.3 Atuação

Após a coleta das informações pelos dispositivos de medição e a transmissão pelos dispositivos de comunicação haverá algum tipo de atuação, direta ou indireta, sobre a rede baseada nesses dados. Esta atuação pode ocorrer no nível residencial, com o usuário recebendo a informação do consumo de seu ar condicionado e tomando a decisão de diminuir sua potência (atuação indireta), ou então a própria Cia. elétrica, percebendo um pico de demanda, enviando um sinal para o ar condicionado de várias residências alterarem sua temperatura em 1 °C por alguns minutos (atuação direta). De maneira ilustrativa, considerando um ar condicionado de 10000 BTU/h (1400W) sendo desativado em 10000 residências (10% da população da cidade de Guaratinguetá) poderia significar uma diminuição de 1,4 MW na demanda.

Outra possibilidade de atuação disponível nas redes inteligentes é o chaveamento remoto. Um equipamento que possibilita esta ação é o religador automático. Os religadores já são utilizados em larga escala, porém se tiverem a funcionalidade de chaveamento a distância permitem reduzir o tempo de interrupção, melhorando a confiabilidade do sistema. Um exemplo de religador automático com capacidade de comunicação é o OSM da Noja Power. Operando com tensões de até 38 kV este dispositivo está habilitado para comunicação via RS232, USB, Ethernet, WiFi e tem espaço para instalação de um módulo de rádio, permitindo utilizar as tecnologias GSM e GPRS. A Figura 6 mostra o equipamento instalado em um poste e a cabine de controle e comunicações.

Figura 6 – Religador automático e cabine de controle e comunicações



Fonte: (NOJA, 2014).

Uma funcionalidade adicional deste equipamento é a medição das tensões, correntes, curva de carga, harmônicos, fator de potência e tempos de interrupção para cálculo de DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora).

Esta é outra possibilidade de atuação indireta, por meio da coleta de estatísticas sobre interrupções de forma mais completa e precisa é possível identificar as regiões – e até os equipamentos - em que as falhas são mais frequentes e direcionar os recursos diretamente à resolução do problema.

2.4 DESVANTAGENS

Um dos problemas a serem encarados na implantação de uma rede inteligente é a existência de preocupações com privacidade relacionadas ao uso dos *smart meters*. Nos locais em que esta tecnologia já está sendo utilizada há uma pressão por parte de alguns grupos que temem o monitoramento de suas redes e principalmente a possibilidade da Cia. elétrica controlar o funcionamento de seus eletrodomésticos. Em 2008, por exemplo, a Comissão de Energia da Califórnia (*California Energy Commission*) foi forçada a abandonar planos de exigir que novas instalações residenciais tivessem termostatos capazes de se comunicar via rádio e ter sua temperatura alterada em caso de um pico de demanda (MICHAELS; DONNELLY,

2010). Espera-se, entretanto, que este receio diminua com o tempo, à medida que este tipo de funcionalidade se torne mais comum.

O principal entrave para a implantação em larga escala do *Smart Grid* é o custo elevado. Segundo um relatório de 2011 da EPRI (*Electric Power Research Institute*) o investimento necessário para estabelecer uma rede inteligente nos Estados Unidos nos próximos 20 anos está entre U\$338 e U\$476 bilhões. Apesar de se tratar de um valor elevado, neste mesmo relatório se projeta uma razão entre benefício e custo entre 2,8 e 6, ou seja, o retorno excede substancialmente o investimento inicial.

2.5 CENÁRIO NACIONAL

O Brasil é um país cuja maior parte da geração de energia elétrica se baseia em usinas hidrelétricas, que apresentam um impacto ambiental reduzido comparado a outras fontes. Apesar disso, o sistema se encontra no limite de sua capacidade de geração forçando o ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) a acionar as usinas termelétricas, principalmente em períodos de seca, como é o caso do ano de 2014. Em 5 de fevereiro de 2014 o SIN (Sistema Interligado Nacional) registrou a demanda recorde de 85708 MW, evidenciando a necessidade de investimentos no setor (ONS, 2014). Uma vez constatada esta lacuna, cabe inserir na discussão o tema das redes inteligentes, que podem ajudar na eficácia destes investimentos e diminuir o tempo de retorno.

As principais motivações para a implementação de redes inteligentes no Brasil, diferentemente dos países da América do Norte e da União Europeia citados nos itens anteriores, são a redução de perdas não técnicas, a melhoria da continuidade e a eficiência energética (LAMIN, 2013).

As perdas não técnicas são referentes à energia consumida não faturada, seja por fraude ou por erro. Segundo o relatório do Ministério de Minas e Energia o índice de perdas não técnicas no Brasil é de 6,7%. Este valor elevado se deve principalmente ao furto de energia. O uso de redes inteligentes como ferramenta para prevenir o roubo é justificado pela maior facilidade em detectar desvios de energia e pela dificuldade em adulterar os medidores eletrônicos. Ainda segundo este relatório o uso das tecnologias de *Smart Grid* poderiam contribuir na redução das perdas não técnicas ao patamar de 4,3%.

Não existem projetos de grande escala de redes inteligentes operando no Brasil, porém já existem alguns projetos pilotos, conforme exibido na Figura 7.

Figura 7 – Projetos pilotos de redes inteligentes



Fonte: (LAMIN, 2013)

Abaixo são apresentados mais detalhes de alguns dos principais projetos implantados no Brasil.

Em Aparecida(SP) – projeto da EDP Bandeirante – foram instalados 15400 medidores com tecnologia Zigbee Mesh em unidades consumidoras e mais 460 medidores para balanço energético. O custo total de implantação foi de R\$ 8.387.518,00 ou R\$ 544,64 por ponto.

Em Sete Lagoas(MG) – projeto da Cemig – foram instalados 950 medidores com tecnologia PLC. O custo total foi de R\$ 1.001.224,12 ou R\$1.053,92 por ponto.

Em Parintins(AM) – projeto da Eletrobrás Amazonas Energia – foram instalados 3317 medidores em unidades consumidoras e 90 medidores para balanço energético. O custo total foi de R\$ 3.396.169,10 ou R\$ 996,82 por ponto.

3 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

3.1 CONCEITO

A definição de Geração Distribuída, segundo Massey (2010), é a prática de instalar pequenas unidades geradoras de energia elétrica próximas ao ponto de consumo. Este tipo de geração pode ou não estar interconectada à rede de distribuição e normalmente é baseada em fontes limpas. As principais tecnologias utilizadas na geração distribuída são: Microturbinas, células de combustível, motores de combustão, turbinas eólicas e painéis fotovoltaicos.

3.1.1 Tecnologias de Geração

As microturbinas e os motores de combustão não são fontes limpas uma vez que dependem de combustíveis como o Diesel (exceção feita ao biodiesel) e o gás natural, mas são utilizadas principalmente devido ao menor custo comparado às outras tecnologias. Os motores de combustão são mais utilizados em aplicações de fornecimento de emergência e as microturbinas são utilizadas em sistemas industriais de cogeração (BORBELY; KREIDER, 2001).

As células de combustível são dispositivos que combinam Hidrogênio e Oxigênio de forma controlada para produzir eletricidade. Trata-se de um processo não poluente, sendo a água o único subproduto, porém a maior dificuldade de implantação deste método é o preço elevado (BORBELY; KREIDER, 2001).

A energia eólica é obtida por meio de turbinas instaladas no alto de torres de 10 a 30 metros de altura para pequenos geradores. A potência de saída é variável e depende da velocidade do vento no momento (MASSEY, 2010). Este é um tipo de geração que já vem sendo utilizado – No Brasil são 226 unidades produtoras (ABEE, 2014) – e pode ser incluído no contexto da geração distribuída, apesar de ficar limitado a localidades com vento suficiente e também apresentar custo relativamente elevado.

A energia solar é gerada por meio de painéis fotovoltaicos que obtêm eletricidade na forma de corrente contínua – necessitando, portanto, de inversores para gerar o sinal de 60 Hz da rede. Apesar de não precisar de nenhum combustível a geração solar é intermitente e a potência produzida depende da luminosidade momentânea (MASSEY, 2010). A grande

vantagem deste tipo de microgeração distribuída é a possibilidade de uso residencial – qualquer telhado que receba radiação solar pode ser utilizado – principalmente no Brasil em que há grande incidência solar, porém o maior entrave continua sendo o preço. Os painéis solares fotovoltaicos são discutidos em mais detalhes no Capítulo 4.

3.1.2 Motivação

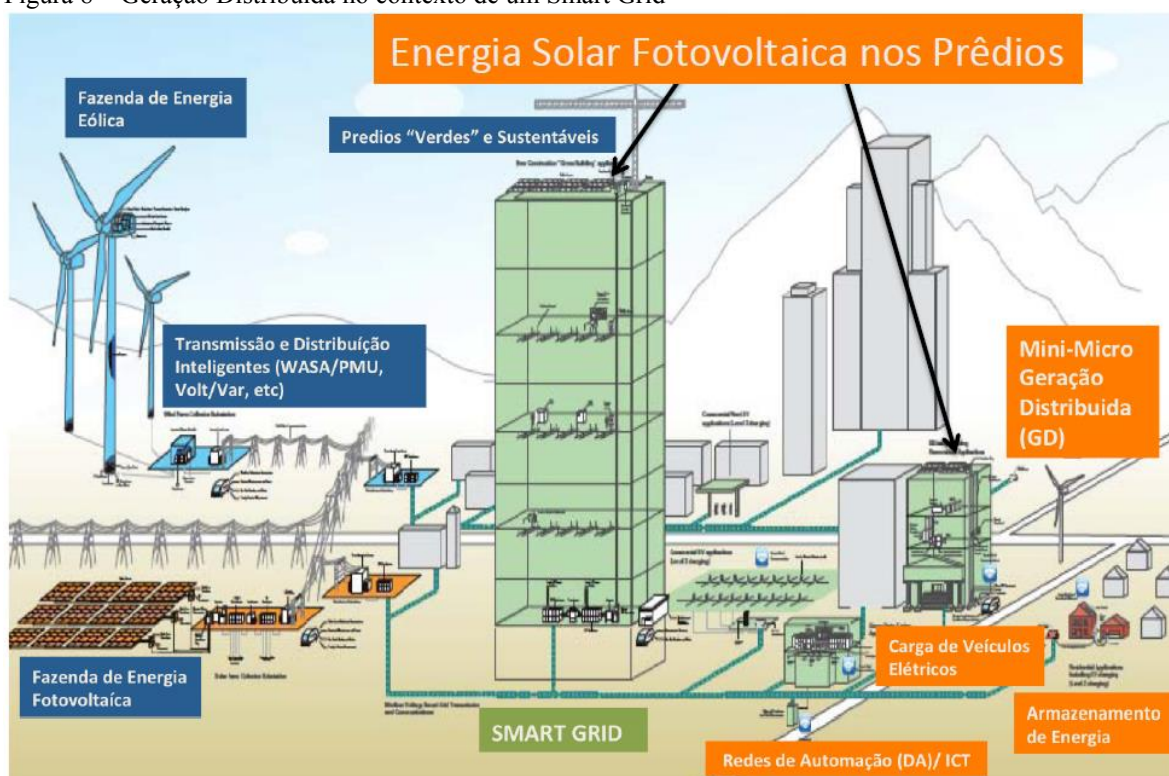
Além das vantagens e benefícios provenientes da geração distribuída discutidos no item 3.2, o relatório *Plugging in the Consumer* realizado em 2007 mostra que os consumidores interessados em instalar, manter e operar seus próprios sistemas de geração de energia caso exista a possibilidade de vender a energia não consumida de volta à Cia. Elétrica somam mais de 60% dos entrevistados (IBM, 2007). Este interesse somado a uma queda dos preços dos equipamentos necessários pode representar uma mudança fundamental no sistema elétrico em um futuro próximo.

3.1.3 Smart Grid

A noção de geração distribuída é anterior ao *smart grid*, mas sua incorporação é uma consequência natural dos equipamentos inteligentes como o *smart meter*, que permite medir o fluxo de potência nas duas direções e até utilizar tarifas diferenciadas, conforme discutido no Capítulo 2. Além disso, caso a geração distribuída se torne mais comum, será preciso gerenciar a potência fornecida à rede, visando manter a estabilidade do sistema, principalmente a estabilidade da tensão em um processo de ordem elevada e com muitas variáveis como o sistema elétrico (QIAN, 2013).

A Figura 8 mostra a importância da geração distribuída e o seu papel em uma rede inteligente. É possível observar o uso de painéis solares nos prédios e a presença de uma pequena turbina eólica próxima às residências. Estes sistemas são complementados por grandes fazendas de energia eólica e fotovoltaica.

Figura 8 – Geração Distribuída no contexto de um Smart Grid



Fonte: (LIMA, 2014)

3.2 VANTAGENS

Algumas das vantagens associadas ao uso da geração distribuída, segundo Massey, são:

- Reduzir as contas de eletricidade: A energia gerada pelo consumidor não precisa ser comprada da rede e o excesso pode ser vendido, ou seja, há um ganho econômico real.
- Aumentar a confiabilidade da energia elétrica: Se o consumidor possui seu próprio sistema de geração diminui a probabilidade de ele ficar sem energia, mesmo em caso de falha no fornecimento da rede.
- Aumentar o retorno em sistemas de geração obrigatórios: Em instalações em que se faz necessária a presença de geradores (Como em hospitais, por exemplo) a possibilidade de conectar seu dispositivo à rede e vender energia permite que os custos de instalação sejam recuperados mais rapidamente.
- Fazer da eletricidade um item vendável: A eletricidade passa a ser um produto que pode ser comprado e vendido e não apenas um serviço fornecido pelas companhias elétricas.

- Geração de energia a partir de fontes renováveis: A geração distribuída permite que fontes limpas se tornem mais comuns, o que é uma vantagem para o bem estar social.

Além destes itens, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) cita como benefícios:

“o adiamento de investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição, o baixo impacto ambiental, a redução no carregamento das redes, a minimização das perdas e a diversificação da matriz energética” (ANEEL,2014)

O próprio site da ANEEL apresenta também a possibilidade de vender a produção excedente diretamente à rede, ou seja, o sistema de geração distribuída passa a usar a rede como bateria, armazenando energia quando a produção ultrapassa o consumo interno e disponibilizando energia quando o consumo é maior. Esta é uma característica a ser apresentada nos itens posteriores neste trabalho.

3.3 DIFICULDADES TÉCNICAS

A conexão de um sistema de geração à rede elétrica envolve algumas questões técnicas relacionadas à sincronização de tensões e da frequência e também deve levar em consideração as possíveis faltas que podem ocorrer para evitar o chamado “ilhamento”, quando a rede deveria estar desenergizada, mas o equipamento de geração continua a alimentar a rede. Existem ainda preocupações quanto à necessidade de redimensionar os sistemas de proteção ou ainda sobre os níveis de harmônicos e outros problemas relacionados ao fato de que a rede de distribuição não foi projetada para o fluxo bidirecional de energia (ANEEL, 2011). Dadas tais dificuldades e que a produção de eletricidade deve se ater aos requisitos de segurança, qualidade da energia e também ambientais foram desenvolvidas normas, nacionais e internacionais, as quais são discutidas no item 3.4.

O foco deste trabalho está nos sistemas de geração distribuída fotovoltaicos, os quais dependem do uso de inversores para se conectar à rede. Por esse motivo são discutidos alguns dos métodos que podem ser utilizados por esses equipamentos para evitar a perda de sincronia e o ilhamento.

3.3.1 Sincronismo

Dentre os métodos possíveis para a sincronização do sinal gerado pelo inversor com o sinal da rede, Sen e Sharma (2012) destacam:

- ZCD (*Zero Crossing Detector*): Circuito capaz de detectar a transição de polaridade do sinal da rede, gerando um pulso nos pontos de fase 0° e 180° . Sofre com problemas de qualidade.
- PLL (*Phase Locked Loop*): Circuito com *feedback* capaz de gerar um sinal sincronizado em fase e frequência utilizando um oscilador controlado por tensão (VCO) baseado no sinal de entrada (tensão da rede). Os tipos de PLL são:
 - PLL Linear: Utilizado principalmente em circuitos monofásicos.
 - PLL com Referencial Síncrono (*Synchronous Reference Frame*): Mais utilizado em circuitos trifásicos.
 - PLL com Referencial Síncrono Duplo (*Double Synchronous Reference Frame*): Combinação de dois PLL com referencial síncrono, cada um atuando na sequência positiva ou negativa.

3.3.2 Anti-Ilhamento

A condição de ilhamento fica caracterizada quando uma região não abastecida pelo sistema elétrico permanece energizada pelo sistema de geração distribuída. Além da perda de referência de tensão e frequência – o que pode trazer danos aos equipamentos no momento da reconexão por falta de sincronia – existe o risco de segurança sobre os funcionários que eventualmente estiverem realizando a manutenção das linhas, e também para os consumidores, além do risco de aterramento inadequado da ilha. (VIEIRA et al, 2008).

Os inversores do sistema de geração distribuída devem ser capazes de detectar a formação de uma ilha e interromper o fornecimento. Os principais métodos de detecção podem ser classificados em passivos ou ativos. Os métodos passivos se caracterizam por interromper o fornecimento quando for detectada uma variação nas grandezas elétricas (normalmente tensão e frequência) que extrapole os limites estabelecidos pelos padrões. Estes métodos são mais simples e fáceis de serem implementados, porém podem falhar no caso da

potência requisitada pelas cargas na ilha estar próxima da potência gerada. Alguns dos métodos passivos são: detecção de tensão e frequência, detecção por salto de fase de tensão, e detecção de harmônicos. Já os métodos ativos provocam deliberadamente uma perturbação na rede, caso seja detectada uma influência grande nos parâmetros da rede devido a esta perturbação, significa que ocorreu a formação de uma ilha. Os métodos ativos, ao contrario dos passivos, podem interferir entre si, tal que não devem ser aplicados a sistemas conectados à mesma rede de distribuição e são mais recomendados para sistemas trifásicos de média e grande capacidade. Alguns métodos ativos são a distorção na corrente de saída, detecção de impedância, medição de impedância com frequência fixa e o deslocamento de frequência (SEVERO, 2011).

3.4 PADRÕES E NORMAS

3.4.1 Padrões Internacionais

A padronização é um item importante na implantação destes sistemas para garantir uma operação adequada e segura, conforme discutido anteriormente. Dentre os padrões internacionais relacionados à geração distribuída – e também padrões específicos da geração com sistemas fotovoltaicos - é possível citar:

- IEEE Std 1547-2003: Padrão para conexão de geração distribuída ao sistema elétrico de potência.
- IEEE Std 929-2000: Práticas recomendadas de interface entre a rede e sistemas fotovoltaicos.
- IEC 62446 (2009): Requisitos e documentação necessária para sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

3.4.1.1 IEEE Std 1547-2003

Este padrão é a principal referência internacional para a conexão de sistemas de geração distribuída e estabelece os requisitos e especificações técnicas a serem cumpridos no ponto de conexão com a rede.

Dentre as determinações deste padrão cabe destacar:

- Regulação de tensão: O sistema instalado não pode ativamente regular a tensão no ponto de conexão e não pode fazer a tensão ficar fora do requerido pela norma ANSI C84.1-1995
- Integração com aterramento do Sistema Elétrico: O aterramento não pode interferir com a coordenação da proteção de faltas da rede.
- Sincronização: A tensão no ponto de conexão deve se manter entre $\pm 5\%$ da tensão prevalecente da rede.
- Energização inadvertida: O sistema de geração distribuída não deve energizar a rede quando ela estiver desenergizada. Em caso de detecção de ilhamento o sistema deve ser desativado em no máximo 2 segundos.
- Resposta a condições anormais de operação: São estabelecidos intervalos de tempo em que o sistema deve cessar de alimentar a rede caso sejam detectadas anomalias na tensão ou na frequência.
- Qualidade do sinal: O sistema não pode injetar uma corrente DC (*Direct Current*) maior do que 0,5% da corrente nominal do ponto de conexão. O padrão também estabelece os limites de distorção harmônica em 5%.

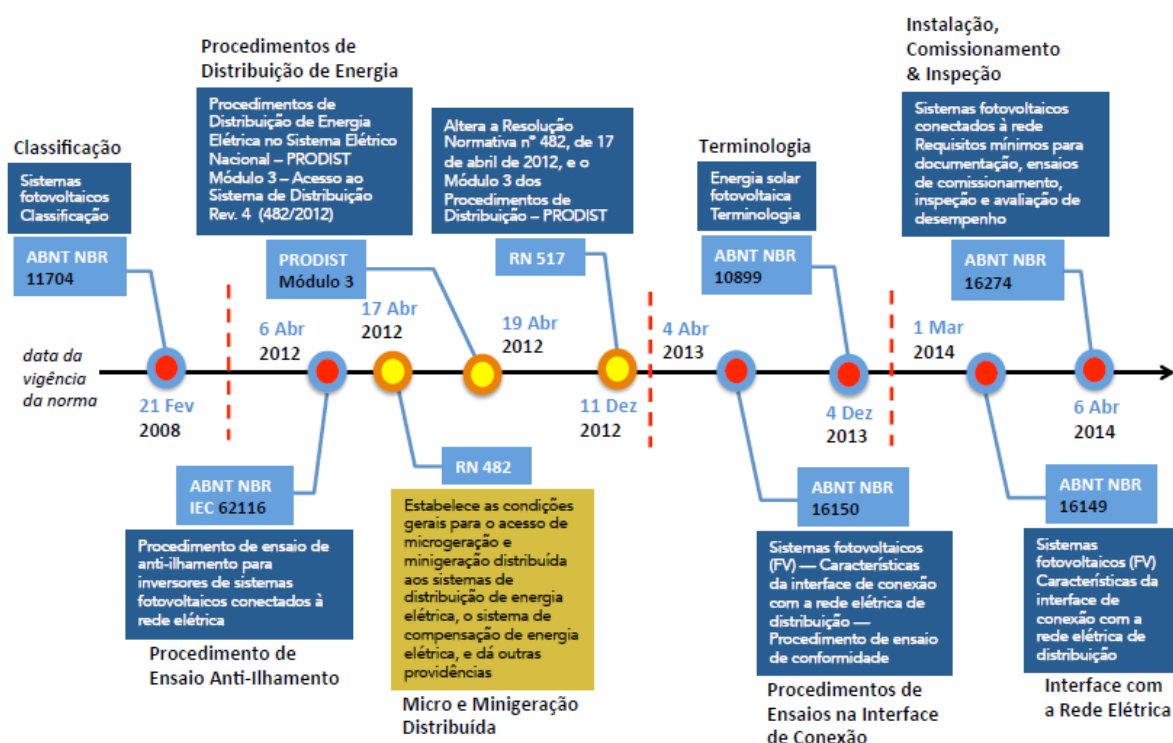
Por fim o padrão também estabelece os requisitos dos testes para demonstrar que os equipamentos são capazes de obedecer aos itens citados anteriormente.

Complementar a este padrão há ainda o IEEE Std 1547.6-2011, que trata das práticas recomendadas para a conexão de sistemas de geração distribuída à rede de distribuição secundária.

3.4.2 Padrões Nacionais

Os padrões nacionais referentes à geração distribuída, principalmente os relacionados aos sistemas fotovoltaicos, são bastante recentes. O principal documento referente à conexão destes sistemas com a rede é o PRODIST (Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) Módulo 3. A Figura 9 mostra a evolução desta padronização ao longo do tempo.

Figura 9 – Evolução da Padronização da Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos no Brasil



Fonte: (LIMA, 2014)

3.4.2.1 RN 482/2012

Segundo a Resolução Normativa N°482 de 2012, considera-se como microgeração distribuída a central geradora com potência menor ou igual a 100 kW e minigeração distribuída entre 100 kW e 1MW, ambas tendo como fonte a energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração. Além disso, esta Resolução define o sistema de compensação de energia, na qual a energia ativa gerada pelo consumidor é computada como crédito a ser compensado com o consumo de energia da mesma unidade.

3.4.2.2 PRODIST Módulo 3

O módulo 3 do PRODIST trata do acesso ao sistema de distribuição e a seção 3.7 do acesso de micro e mini geração distribuída.

O documento descreve as etapas para viabilização do acesso, a solicitação de acesso (requerida pelo acessante - responsável pela geração) e o parecer de acesso (apresentado pela

acessada – concessionária responsável pela distribuição). São discutidos também os critérios técnicos e operacionais e os requisitos de projetos. A Tabela 1 mostra os requisitos mínimos dos equipamentos em função da potência instalada.

Tabela 1 – Requisitos mínimos dos equipamentos em função da potência instalada

EQUIPAMENTO	Potência Instalada		
	Até 100 kW	101 kW a 500 kW	501 kW a 1 MW
Elemento de desconexão	Sim	Sim	Sim
Elemento de interrupção	Sim	Sim	Sim
Transformador de acoplamento	Não	Sim	Sim
Proteção de sub e sobretensão	Sim	Sim	Sim
Proteção de sub e sobrefrequência	Sim	Sim	Sim
Proteção contra desequilíbrio de corrente	Não	Não	Sim
Proteção contra desbalanço de tensão	Não	Não	Sim
Sobrecorrente direcional	Não	Não	Sim
Sobrecorrente com restrição de tensão	Não	Não	Sim
Relé de sincronismo	Sim	Sim	Sim
Anti-ilhamento	Sim	Sim	Sim
Estudo de curto-circuito	Não	Sim	Sim
Medição	Sistema de Medição Bidirecional	Medidor 4 Quadrantes	Medidor 4 Quadrantes
Ensaaios	Sim	Sim	Sim

Fonte: (PRODIST, 2012)

O elemento de desconexão deve ser uma chave seccionadora visível – não necessário quando do uso de inversores. O elemento de interrupção automático deve ser acionado por proteção para microgeradores e também por comando para minigeradores. Para as situações de sub e sobretensão ou frequência não é necessário utilizar um relé específico, somente um sistema eletrônico capaz de gerar um sinal lógico que acione o dispositivo de proteção.

Com relação ao sistema de medição, fica determinado que é responsabilidade da distribuidora instalar o medidor bidirecional (para baixa tensão podem ser utilizados dois medidores unidirecionais), entretanto o consumidor fica responsável por ressarcir a distribuidora pelos custos de adequação.

3.4.2.3 EDP – Conexão de Mini e Microgeradores

A concessionária responsável pela distribuição na cidade de Guaratinguetá, a EDP Bandeirante, disponibiliza um procedimento para a conexão de mini e microgeradores ao sistema de distribuição em baixa tensão (EDP, 2014a). Este procedimento tem como referência o PRODIST e muitas de suas definições são semelhantes às do padrão IEEE 1547.

Os requisitos para a viabilização do acesso são os mesmos descritos no PRODIST. Com relação aos requisitos técnicos é interessante destacar:

Só são permitidas conexões utilizando inversores homologados pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia) ou que possuam certificação de laboratórios internacionais acreditados pelo INMETRO.

A cintilação não pode ultrapassar os níveis estabelecidos em IEC 61000-3-3 para correntes inferiores a 16A, IEC 61000-3-11 para correntes entre 16A e 75A e IEC/TS 61000-3-5 para correntes maiores que 75A.

Caso a injeção de corrente contínua ultrapasse 0,5% da corrente nominal do inversor, o sistema deve se desconectar da rede.

A distorção harmônica total deve ser inferior a 5% da corrente fundamental.

O fator de potência para sistemas com potência inferior a 3 kW deve ficar entre 0,98 capacitivo e 0,98 indutivo. Para sistemas entre 3 kW e 6 kW, deve ser superior a 0,95. Para sistemas com mais de 6 kW, deve ser maior que 0,90.

A proteção contra ilhamento deve atuar em até 2 segundos e a reconexão não pode ocorrer por um período de 20 s a 300 s após o retorno da operação da rede.

O aterramento, a proteção contra curto-circuito e os dispositivos de isolamento e seccionamento devem estar de acordo com a norma IEC 60364-7-712.

Com relação à tensão de operação, caso fique abaixo de 80% da tensão nominal, o tempo máximo de desligamento é de 0,4s. Caso a tensão ultrapasse 110% da nominal, este tempo é de 0,2s.

Com relação à frequência, o sistema pode operar normalmente entre 57,5 Hz e 60,5 Hz. Na faixa entre 60,5 Hz e 62 Hz a potência deve cair linearmente até 40% da potência máxima. Abaixo de 57,5 Hz e acima de 62 Hz, o sistema deve ser desligado em até 0,2s.

Este documento ainda determina que a medição bidirecional deverá ser feita por um medidor eletrônico e a coleta remota da leitura será feita por uma Unidade Remota de Controle (URC). O custo de instalação deste equipamento não é repassado ao cliente.

4 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

4.1 HISTÓRIA

A energia solar é utilizada desde os tempos da Grécia antiga como fonte de calor, porém a utilização direta do poder do sol só se tornou possível após a descoberta do efeito fotovoltaico. Este efeito, observado pela primeira vez por Edmond Becquerel em 1839, consiste na transferência de energia dos fótons para os elétrons na camada de valência de determinado material (VALLÊRA; BRITO, 2006). A compreensão deste fenômeno só foi possível após desenvolvimentos na física, principalmente a explicação do efeito fotoelétrico (similar ao efeito fotovoltaico) por Albert Einstein em 1905, que não só mostrou a quantização da radiação eletromagnética em pacotes de energia, mas também relacionou a energia dos fótons à sua frequência. (ADAMS; EVANS; ZWIEBACH, 2013)

A primeira célula solar a explorar de maneira prática estes efeitos para gerar uma corrente elétrica foi criada em 1954 pelos pesquisadores Gerald Pearson, Daryl Chapin, e Calvin Fuller trabalhando na Bell Labs. (CHAPIN; PEARSON; FULLER, 1954). Esta célula tinha 6% de eficiência e era capaz de gerar 5 mW.

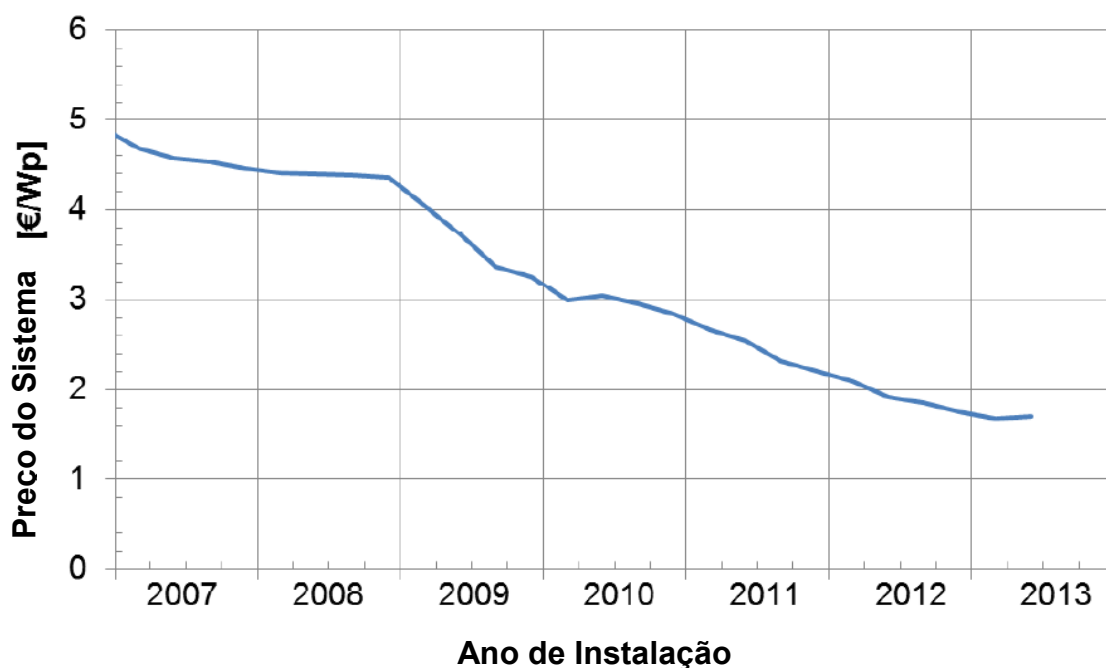
O primeiro uso das células solares se deu no programa espacial americano no satélite Vanguard I lançado em 1958 (NRL, 2014). Inicialmente o uso das células fotovoltaicas ficou restrito ao mercado aeroespacial, principalmente devido ao custo elevado comparado a outras tecnologias. Apesar disso o desenvolvimento dos sistemas fotovoltaicos ao longo dos anos tem permitido maior eficiência e menores custos, de tal forma que há um grande crescimento em aplicações visando a geração de energia para uso residencial. Em setembro de 2013 o instituto Fraunhofer anunciou um novo recorde de eficiência de 44,7% utilizando uma tecnologia de concentradores fotovoltaicos em uma célula com quatro junções.

Atualmente a Alemanha é o país onde há a maior utilização de células solares para geração de energia para uso residencial, devido a um forte incentivo por parte do governo. Uma das ferramentas utilizadas para incentivar a instalação de painéis solares foi o Ato de Energias Renováveis, ou EEG na sigla em alemão. Neste Ato foi estipulado o sistema de tarifas *feed-in*, que consiste em oferecer contratos de longo prazo que preveem tarifas maiores pela energia produzida por painéis solares no período inicial da instalação. As tarifas vão diminuindo ao longo do tempo, mas este sistema garante o retorno do investimento inicial mais rapidamente. Em alguns locais já se atingiu inclusive a paridade com a rede, ou seja, o

custo de produção por kWh é igual ou menor que o custo da eletricidade oferecida pela rede de distribuição (WIRTH, 2014).

A Figura 10 mostra a evolução dos preços da energia solar fotovoltaica na Alemanha de 2007 a 2013 e a clara tendência de diminuição de valor. Considerando ainda que o preço da energia oriunda de outras fontes têm aumentado, mostra-se que a energia solar terá um papel crucial na geração de energia em um futuro próximo.

Figura 10 – Preço médio dos sistemas fotovoltaicos na Alemanha



Fonte: (WIRTH, 2014)

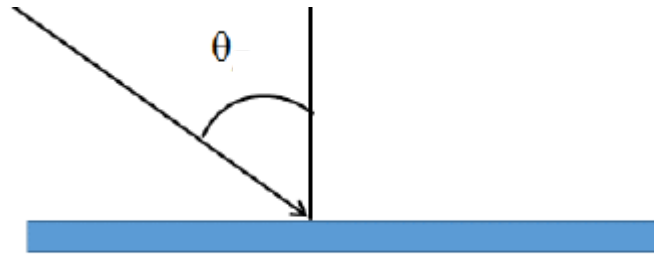
4.2 DEFINIÇÕES

O projeto de um sistema fotovoltaico tem de levar em consideração o local da instalação, já que a produção total de energia está relacionada diretamente à luminosidade do lugar. O primeiro fator que afeta a irradiação solar é o ângulo entre a posição do sol e a perpendicular no local da instalação (θ), conforme a Figura 11.

Quanto maior o ângulo, maior a espessura da atmosfera que a luz deve atravessar. Por isso define-se o conceito de Massa de Ar através da equação (1):

$$AM = 1/\cos\theta \quad (1)$$

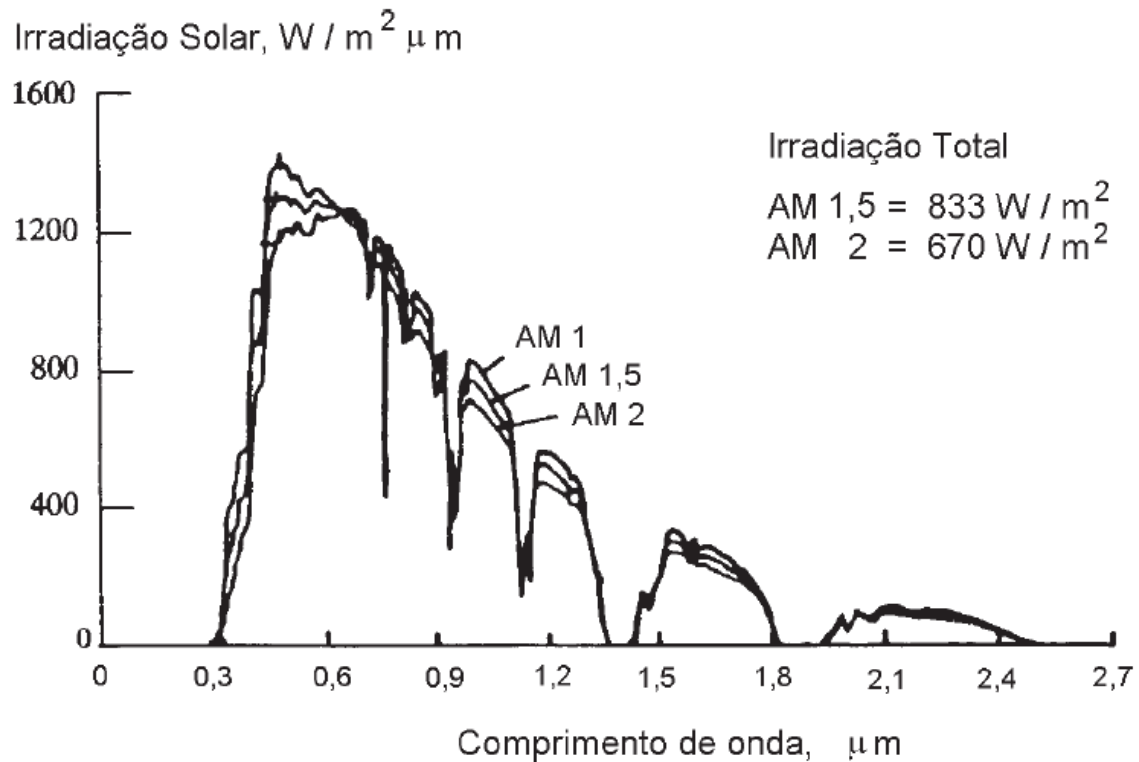
Figura 11 – Ângulo entre a irradiação solar e a perpendicular



Fonte: (GTES, 2014)

A irradiação solar depende também do comprimento de onda. A Figura 12 mostra o perfil da irradiação solar para diferentes massas de ar.

Figura 12 – Densidade de irradiação solar em função do comprimento de onda



Fonte: (GTES, 2004)

A irradiação que pode ser aproveitada por determinada célula solar depende da faixa de frequência que ela é capaz de converter em eletricidade, ou seja, a irradiação total aproveitável pode ser calculada conforme a equação (2).

$$I = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$P(\lambda)$ é a densidade de irradiação (mostrada na Figura 12), λ é o comprimento de onda e λ_1 e λ_2 definem o intervalo em que a célula é capaz de operar. A irradiação total emitida pelo sol corresponde à integração sobre todo o espectro emitido.

Assumindo uma irradiação de 1000 W/m^2 define-se como uma hora-sol 1 kWh/m^2 .

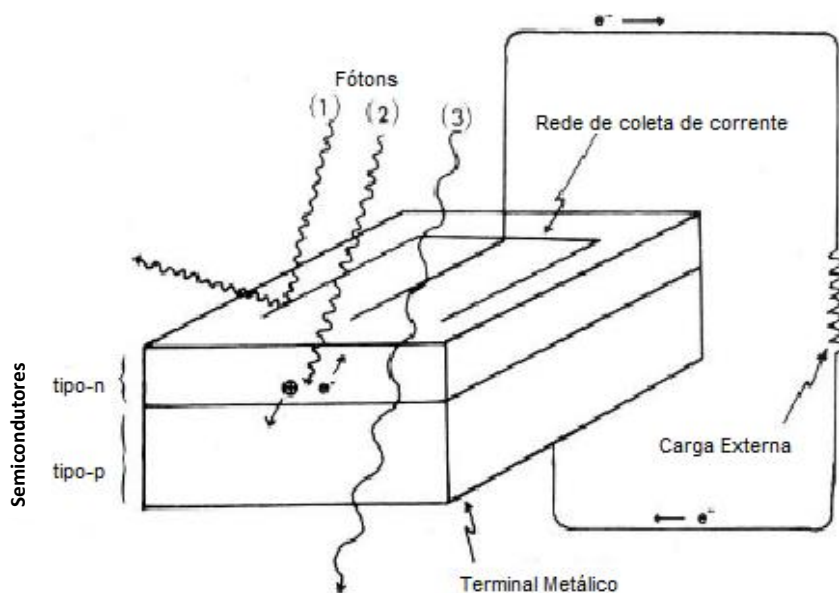
Dessa forma a potência nominal de um painel solar pode ser definida sob condições padronizadas (*Standard Test Conditions*, ou STC) que levam em conta uma irradiação de 1000 W/m^2 , AM=1,5 e temperatura de 25°C . Esta potência é medida em watts pico (W_p).

4.3 SEMICONDUTORES

A operação das células solares é baseada em uma construção similar à de um diodo. O funcionamento pode ser entendido tomando o exemplo mais simples de uma célula de silício cristalino com uma junção p-n. A região “n” tem como portadores majoritários de carga os elétrons (carga negativa) e a região “p” tem como portadores majoritários os buracos (carga positiva). Na junção ocorre a difusão de cargas, gerando uma zona de depleção, com um campo elétrico impedindo que mais cargas se recombinem. A incidência de um fóton, por exemplo na região “p”, com energia suficiente para que um elétron deixe a camada de valência e pule para a camada de condução, cria um par buraco-elétron. O elétron é então coletado na região de depleção e forçado pelo campo elétrico a se deslocar para a região “n”. Caso o circuito esteja fechado (seja por um curto ou uma carga conectada à célula) o elétron irá seguir seu caminho até se recombinar com um buraco no terminal da região “p”.

A Figura 13 ilustra o mesmo processo, porém com um fóton incidindo na camada “n”. Neste caso o buraco é levado à camada “p” atravessando a região de depleção, enquanto o elétron completa o circuito para se recombinar com um buraco no terminal da camada “p”. A mesma figura mostra ainda outras possibilidades como a reflexão do fóton na superfície da célula ou então um fóton com energia insuficiente para excitar um elétron atravessando a placa.

Figura 13 – Princípio de funcionamento de uma célula solar fotovoltaica.



Fonte: (MICKEY,1981)

4.4 TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS

As primeiras células solares baseavam-se somente em silício cristalino, porém foram desenvolvidas outras tecnologias, com outros semicondutores e utilizando mais de uma junção (visando obter energia de todo o espectro da irradiação solar). Algumas das tecnologias que podem ser citadas como de maior destaque são (GTES, 2014):

- **Silício Monocristalino:** As tecnologias de silício monocristalino e policristalino dominam o mercado de células solares, sendo que o silício monocristalino aparece em segundo lugar devido ao seu maior custo. Neste tipo de célula os átomos de silício são ordenados de forma a criar uma única estrutura cristalina. A eficiência pode chegar até a 25%.
- **Silício Policristalino:** A forma mais comum de célula solar e a mais simples de se fabricar. Nesta tecnologia são formadas várias regiões cristalinas no material, mas desalinhadas entre si, o que dá origem ao nome policristalino. A eficiência pode chegar até 20%.
- **Thin-Film: Silício Amorfo:** Nesta tecnologia os átomos de silício se encontram desordenados. A eficiência pode chegar até 10%.

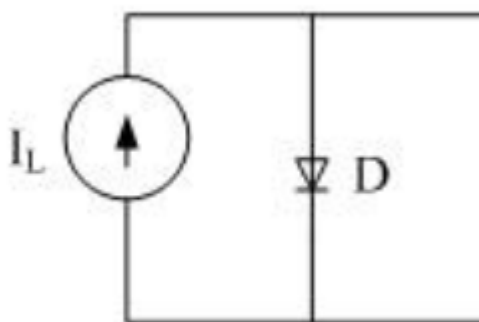
- Multi-junção: São utilizadas várias junções, cada uma com características diferentes, capazes de converter uma parte diferente do espectro solar em energia elétrica, resultando em células solares capazes de atuar sobre praticamente todo o espectro solar. Consequentemente há um aumento na eficiência, chegando a valores próximos de 40%.

O gráfico disponível no Anexo mostra o avanço na eficiência dos vários tipos de tecnologias diferentes de células solares.

4.5 PARÂMETROS EXTERNOS

Considerando o item 4.3 e a similaridade construtiva da célula solar com um diodo, fica evidente a possibilidade de se modelar o circuito como uma fonte de corrente em paralelo com um diodo, conforme a Figura 14.

Figura 14 – Modelo do circuito de uma célula fotovoltaica



Fonte: (GTES, 2004)

Considerando este modelo, a corrente fornecida por uma célula solar é dada pela equação (3).

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{qV}{mKT}} - 1 \right) \quad (3)$$

Em que I_L é a corrente gerada pela luz incidente na célula solar e o outro termo corresponde à corrente no diodo. K representa a constante de Boltzmann, T a temperatura absoluta, q é a carga do elétron, V é a tensão nos terminais da célula, m é o fator de idealidade

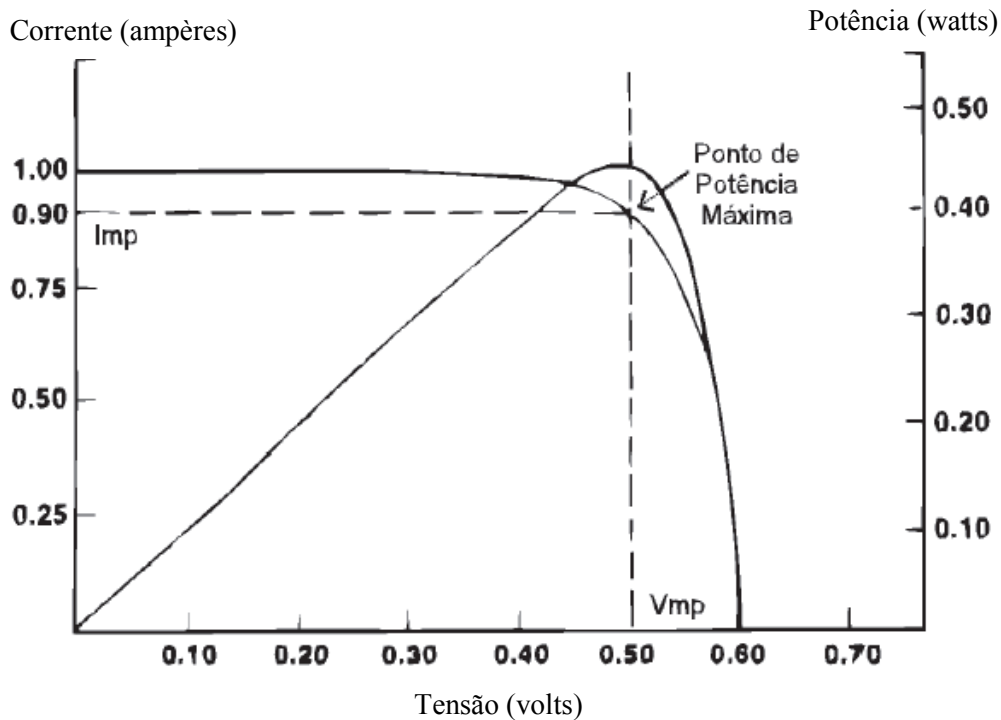
do diodo (valor adimensional obtido experimentalmente) e I_0 é a corrente de saturação reversa do diodo.

A Figura 15 mostra o gráfico $I \times V$ de uma determinada célula. A corrente de curto circuito I_{SC} , quando $V=0$, corresponde a I_L . Já a tensão de circuito aberto (V_{OC}), quando $I=0$, é obtida através da equação (4).

$$V_{OC} = m \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (4)$$

A Figura 15 mostra também a curva da potência e o ponto de potência máxima, com a respectiva tensão de máxima potência (V_{MP}) e corrente de máxima potência (I_{MP}).

Figura 15 – Curvas de corrente e potência de uma célula solar fotovoltaica



Fonte: (GTES, 2004)

Outra grandeza definida a partir destes valores é o fator de forma (FF), que relaciona a potência máxima com a forma da curva $I \times V$, conforme a equação (5).

$$FF = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{OC} I_{SC}} \quad (5)$$

Considerando ainda a eficiência do painel solar fotovoltaico, dada pela razão entre a potência máxima fornecida e a potência disponível da irradiação solar total (P_L), obtém-se a equação (6).

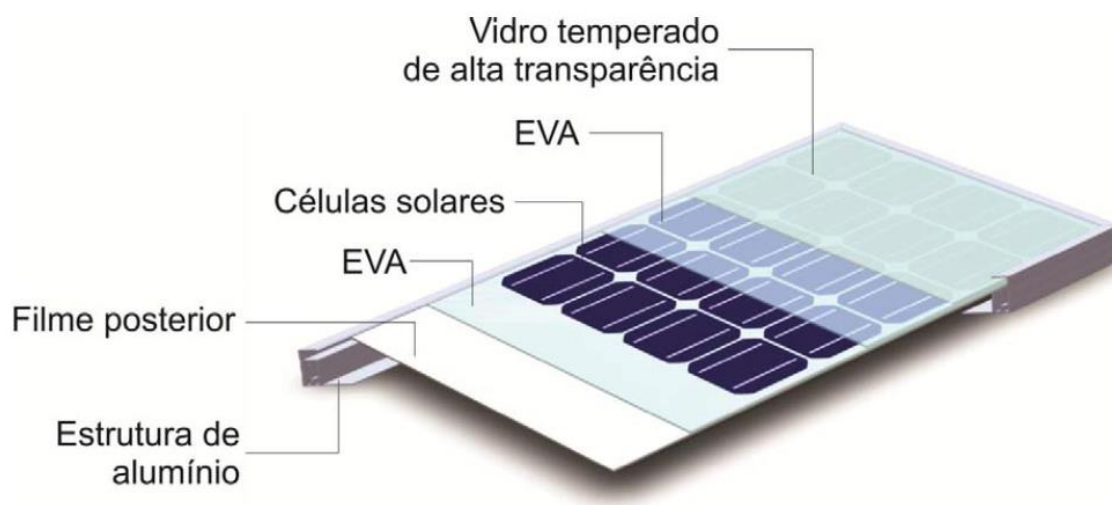
$$\eta = \frac{V_{MP} I_{MP}}{P_L} = \frac{FF V_{OC} I_{SC}}{P_L} \quad (6)$$

A potência P_L pode ser obtida multiplicando a área do painel solar pela irradiação total no local.

Considerando as informações acima, constata-se que um painel solar fica caracterizado pela corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, potência nominal, fator de forma e eficiência. Cabe ainda observar que os módulos podem ser conectados em série ou paralelo para obter diferentes valores de tensão e corrente.

A Figura 16 mostra um exemplo de painel solar fotovoltaico e seus componentes.

Figura 16 – Exemplo de painel solar fotovoltaico



Fonte: (GTES,2014)

4.6 INVERSORES

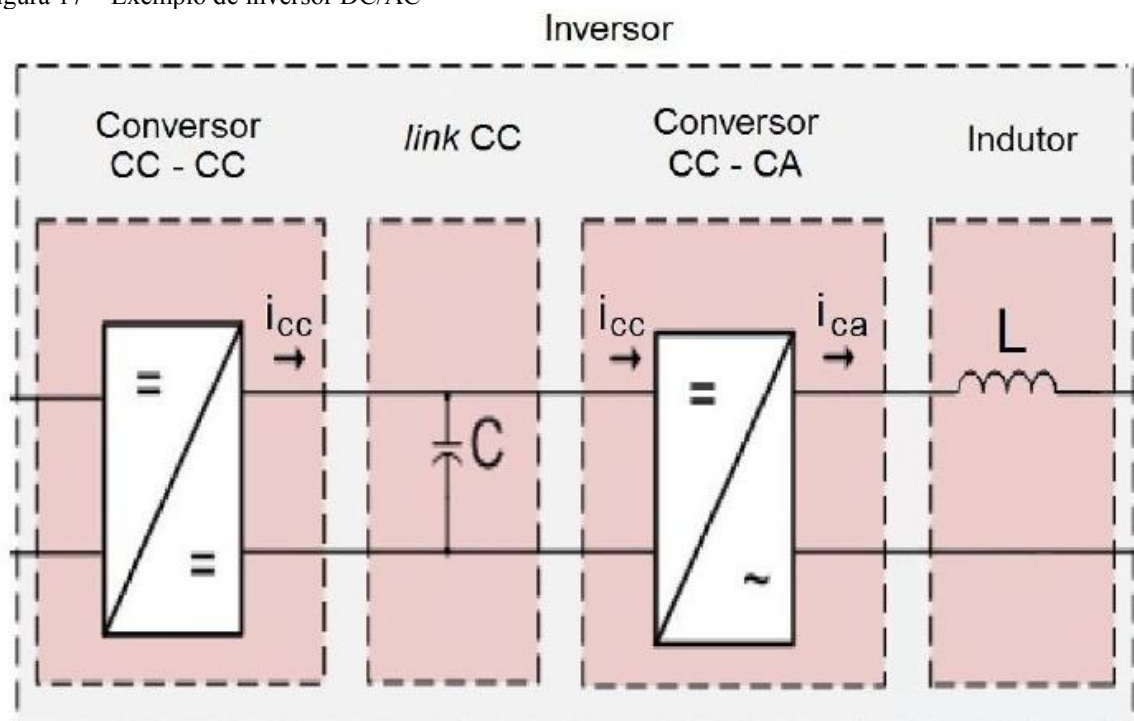
Os inversores são equipamentos fundamentais em sistemas fotovoltaicos, uma vez que permitem a conversão da corrente contínua gerada pelas células solares em corrente alternada a ser utilizada pelos equipamentos e pela rede de distribuição. Segundo Markvart e Castañer (2003) os inversores podem ser divididos em duas categorias: aqueles para sistemas isolados e

os que são conectados à rede. A principal diferença está no algoritmo de controle implementado por um microprocessador. Em ambos os casos, a maioria dos inversores atuais trabalha com a tecnologia PWM (*Pulse Width Modulation*) para gerar o sinal alternado.

Os inversores, além de garantir a qualidade (baixo teor de harmônicos) e a segurança (sistema anti-ilhamento) conforme os padrões apresentados no Capítulo 3, devem ser capazes de rastrear o ponto de máxima potência, o qual varia de acordo com a luminosidade que incide sobre o painel fotovoltaico.

A Figura 17 mostra um modelo de inversor DC/AC.

Figura 17 – Exemplo de inversor DC/AC



Fonte: (GTES,2014)

4.7 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

O dimensionamento de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede pode ser feito seguindo alguns passos, como determinar a incidência luminosa no local da instalação, realizar o levantamento da demanda e dimensionar os painéis e o inversor. Por se tratar de um sistema conectado à rede não há a necessidade de se utilizar baterias, uma vez que a energia gerada em excesso pode ser enviada para o sistema diretamente. Outros pontos a serem considerados durante o projeto são: o dimensionamento dos condutores, disjuntores ou outros

dispositivos de proteção, a estrutura de fixação dos painéis solares e um eventual sistema de aterramento. O Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (GTES, 2014) fornece informações valiosas sobre o processo de dimensionamento descrito nos itens a seguir.

4.7.1 Incidência Luminosa no Local de Instalação

A avaliação do recurso solar disponível no local da instalação pode ser obtida em tabelas que fornecem o valor médio anual de Horas de Sol Pleno (HSP), que corresponde à quantidade de horas com uma irradiância de 1 kW/m^2 tal que a energia total seja igual à irradiação solar durante o dia. Em um dia em que a irradiação total seja de 5 kWh/m^2 , por exemplo, pode-se dizer que foram 5 HSP.

É preciso também levar em conta a localização dos painéis, os possíveis efeitos de sombra e reflexões decorrentes de construções próximas, além dos aspectos arquitetônicos e estéticos. Para maximizar a potência coletada recomenda-se que os painéis estejam voltados para o Norte (no hemisfério sul) com ângulo de inclinação igual à latitude local. Na determinação da direção Norte utilizando uma bússola é preciso que se leve em consideração a declinação magnética do local (diferença em graus entre o norte geográfico e o norte magnético). O valor da declinação pode ser obtido por meio de mapas disponibilizados, por exemplo, pelo Observatório Nacional.

4.7.2 Levantamento da Demanda

No caso de um sistema de geração distribuída com a tarifação estabelecida pela ANEEL, ou seja, o *Net Metering*, não é interessante que a energia produzida seja superior à média de consumo anual. O guia de Microgeradores Fotovoltaicos do Instituto IDEAL (2013) recomenda que o sistema seja projetado de forma a fornecer 90% da demanda média.

O valor da demanda média anual pode ser determinado pelos valores dos consumos mensais obtidos das faturas subtraindo o custo da disponibilidade mínima de energia. A disponibilidade para uma unidade consumidora da classe B, se monofásico ou bifásico a 2 condutores, corresponde ao valor em moeda corrente equivalente a 30 kWh (RN 414/2010).

4.7.3 Dimensionamento do Gerador

A potência total dos painéis fotovoltaicos a serem instalados deve ser determinada de acordo com a demanda local estabelecida. O cálculo da potência de pico do painel pode ser feito por meio da equação (7) (GTES,2014)

$$P_{FV}(W_P) = \frac{E/TD}{HSP} \quad (7)$$

Sendo:

P_{FV} : potência do painel fotovoltaico (W_P);

E: fração (90%) do consumo médio anual (Wh/dia);

HSP: média diária anual das horas de sol pleno incidentes no painel solar (h);

TD: taxa de desempenho (adimensional).

A TD relaciona o desempenho real do sistema com o desempenho máximo teórico possível. O desempenho real está sujeito a vários tipos de perdas, seja por queda de tensão devido às resistências dos cabos e conexões, eficiência do inversor ou sombreamento nos painéis. O manual de engenharia do GTES (2014) sugere que a TD no Brasil pode situar-se entre 70% e 80%.

Depois da determinação da potência necessária é preciso escolher o tipo de painel a ser utilizado considerando o local em que será feita a instalação, a área disponível e a relação custo benefício. É preciso dimensionar também os suportes para fixação destes painéis.

4.7.4 Dimensionamento do Inversor

O dimensionamento do inversor a ser utilizado deve levar em consideração as especificações de qualidade e segurança descritas anteriormente. Além disso, o dimensionamento dos parâmetros do inversor depende da configuração utilizada, sendo possível utilizar um inversor central ou um micro inversor para cada painel.

A potência do inversor pode ser menor do que a do painel uma vez que mesmo a irradiância atingindo 1000 W/m^2 , normalmente a temperatura elevada impede que seja atingida a potência nominal. Em uma abordagem conservadora pode ser escolhido um

inversor com potência igual à gerada pelos painéis, ou então visando minimizar os custos é possível selecionar um inversor com até 75% da potência gerada.

Outros parâmetros a serem considerados no dimensionamento são a tensão de entrada e a corrente máxima de entrada.

A tensão de entrada deve ser tal que permaneça dentro da faixa que permite o inversor rastrear o ponto de máxima potência. O número de painéis conectados em série fica limitado, no mínimo, à razão entre a tensão limite inferior do inversor e a tensão de potência máxima na maior temperatura de operação, e no máximo à razão entre a tensão limite superior do inversor e a tensão de potência máxima na menor temperatura de operação.

A corrente máxima do inversor deve ser maior que a corrente de curto circuito de cada painel multiplicado pelo número de associações em paralelo dos painéis.

5 ESTUDO DE CASO

O estudo desenvolvido neste capítulo se refere à implantação de um sistema de geração distribuída classificado como microgeração utilizando um sistema de geração solar fotovoltaica. É considerada para o dimensionamento uma residência no município de Guaratinguetá. A requisição e instalação deste sistema deve seguir o procedimento da EDP para conexão de Mini e Microgeradores, além de atender aos requisitos do PRODIST (ANEEL, 2012). Os equipamentos selecionados também devem se adequar às especificações descritas nestes documentos.

Inicialmente é feito o dimensionamento do sistema, conforme o procedimento descrito no item 4.7, e uma vez escolhidos os equipamentos a serem utilizados é feita uma análise dos custos e do tempo de retorno de investimento para este cenário específico.

5.1 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

5.1.1 Incidência Luminosa

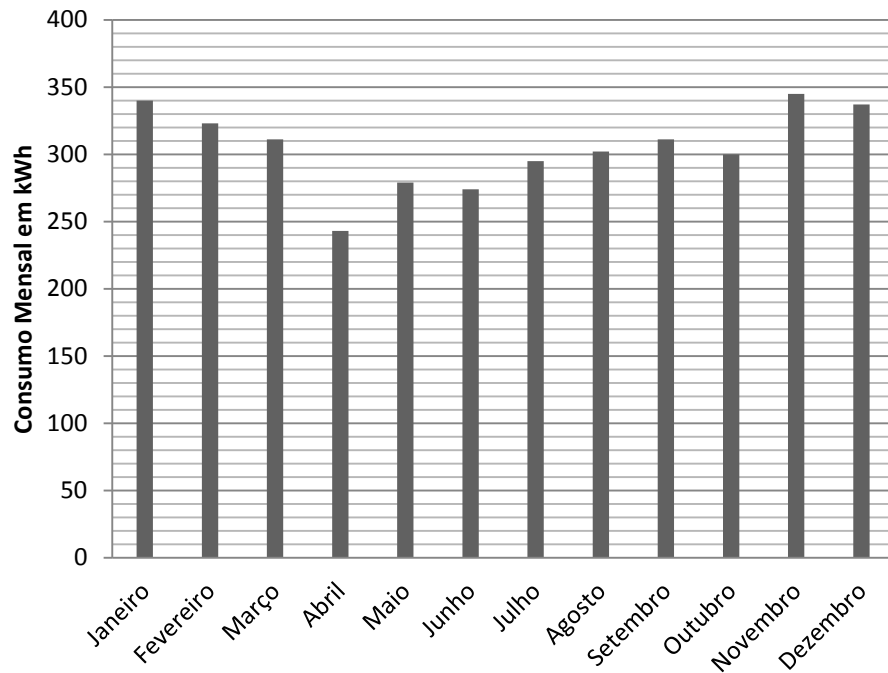
O recurso solar disponível na região de Guaratinguetá, segundo o Levantamento do Potencial de Energia Solar Paulista realizado pela Secretaria de Energia do Governo do Estado de São Paulo, é de 5,13 kWh/m²dia ou 5,13 HSP (Valor anual médio).

Para este estudo será considerado o cenário ideal, ou seja, os painéis solares instalados num local livre de sombras de outras construções e posicionados com a inclinação igual à latitude, visando obter a maior média anual de horas de sol pleno. Ainda assim, a irradiação real disponível tende a ser um pouco menor, portanto nesse dimensionamento será considerado o valor de 5 HSP.

5.1.2 Levantamento da Demanda

A demanda considerada neste estudo é conforme o gráfico da Figura 18. Os valores foram obtidos do histórico de consumo de uma residência de três pessoas.

Figura 18 – Gráfico de consumo mensal de uma residência em kWh.



Fonte: (EDP, 2014b)

O valor médio da demanda anual é de 305 kWh/mês. Desconsiderando o custo da disponibilidade é necessário subtrair 30 kWh do consumo mensal, resultando em 275 kWh/mês ou 9,17 kWh/dia. Considerando que o sistema será dimensionado para suprir 90% das necessidades desta residência, a geração deve ser de 8,25 kWh/dia.

Uma observação a ser feita é que antes de se investir no sistema é interessante realizar um estudo da instalação elétrica e dos hábitos de consumo, já que isto pode levar a uma diminuição da demanda média, o que caracterizaria uma economia nas contas e possivelmente na instalação do sistema fotovoltaico.

5.1.3 Dimensionamento do Gerador

Utilizando a equação (8) é calculado o valor da potência dos painéis solares, utilizando para a TD o valor de 80%:

$$P_{FV}(W_P) = \frac{E/TD}{HSP} = \frac{8250Wh/0,8}{5h} = 2062 W_P \quad (8)$$

Dentre os modelos disponíveis no mercado foi escolhido para este estudo o painel solar da fabricante Yingli Solar, YL250P-29b, com potência nominal de 250 W_P. A utilização de 8 painéis deste modelo fornece uma potência de 2000 W_P, adequando-se à necessidade calculada na equação (8).

Cada painel fotovoltaico tem dimensões de 1640 mm x 990 mm, espessura de 35 mm e peso de 18,5 kg. As 8 placas necessárias cobrem, portanto uma área de 13 m² e o telhado deve ser capaz de suportar um peso total de 148 kg.

Segundo as especificações fornecidas pelo fabricante este modelo de painel conta com células solares de silício multicristalino com eficiência de até 15,4%. A tensão no ponto de máxima potência é 27,2 V. A corrente no ponto de máxima potência é de 6,71 A. A tensão de circuito aberto é 34,7 V e a corrente de curto circuito é 7,21 A. Todos estes valores são válidos para as condições de teste padrão (STC).

Para a fixação foi escolhida uma estrutura, capaz de suportar 4 painéis, do modelo CK-990x4. Para os 8 painéis são necessárias duas unidades deste equipamento.

O manual do fabricante dos painéis recomenda o aterramento da estrutura externa e também do pólo negativo.

5.1.4 Dimensionamento do Inversor

Considerando o exposto em 4.7.4 existe a possibilidade de subdimensionar o inversor. Apesar disso as altas temperaturas a que este equipamento pode ser submetido – em uma instalação dos painéis no telhado é razoável supor que o inversor ficará em um local próximo, normalmente na laje – leva a um dimensionamento mais conservador. Seguindo este raciocínio foi selecionado um inversor de potência nominal também igual a 2000 W. Foi escolhido o modelo Fronius Galvo 2.0-1 light, que possui certificações internacionais do IEC que garantem os requisitos da EDP descritos em 3.4.2.3.

A corrente máxima de entrada é 17,8 A. A faixa de tensão em que o rastreador de máxima potência é capaz de atuar é de 120 V a 335 V. Com estas informações e as especificações dos módulos solares conclui-se que estes devem ser conectados em série. Neste caso a corrente de curto-circuito é de 7,21 A. A tensão máxima de circuito aberto na menor temperatura de operação - aqui considerada 10°C – é de 38,7 V por módulo, ou 309,6 V na associação em série (Estes valores foram calculados utilizando os coeficientes de temperatura

disponíveis na folha de dados do painel solar). A tensão máxima no ponto de máxima potência na menor temperatura de operação é de 31,31 V por módulo ou 250,5 V na associação em série. A tensão mínima no ponto de máxima potência na maior temperatura de operação – aqui considerada de 70 °C – é de 24,45 V por módulo ou 195,6 V na associação em série. Conclui-se que para este arranjo de inversor e painéis fotovoltaicos são atendidos os requisitos técnicos básicos com a associação dos 8 painéis em série.

Outro ponto a ser observado é que a tensão de saída deste inversor é de 220 V. Uma vez que a tensão da rede em Guaratinguetá é de 127 V (Fase – Neutro), o inversor deve ser conectado entre duas fases.

5.1.5 Dimensionamento dos Condutores

Os condutores a serem utilizados na associação em série dos painéis são fornecidos juntamente com os módulos. O manual do fabricante recomenda a utilização de condutores com seção mínima de 4mm². Neste estudo é considerado que o inversor se encontra próximo dos painéis, não havendo, portanto, a necessidade de se dimensionar os cabos quanto à queda de tensão.

Os condutores que ligam o inversor ao ponto de conexão com a rede, entretanto, tendem a cobrir distâncias maiores. Nesta análise a distância considerada para o dimensionamento é de 10 metros. A folha de dados do inversor Fronius mostra como corrente máxima de saída 9,7 A. Tomando como referência a NBR – 5410/2004 para condutores de cobre isolados em eletroduto de seção circular embutido em alvenaria, a seção deve ser de 0,75 mm². Apesar disso a mesma norma determina que para circuitos de força a seção mínima é de 2,5 mm².

Para estes valores de seção dos condutores, comprimento de 10 m, tensão de 220V e potência de 2000 W, obtém-se uma queda de tensão menor do que 1%, o que é um valor aceitável. Para a instalação em questão são necessários 3 condutores de 10 m de comprimento e seção de 2,5 mm² (2 condutores carregados e 1 condutor de proteção ou aterramento).

5.1.6 Dimensionamento da Proteção

O inversor utilizado já possui dispositivo de proteção e interrupção da corrente contínua na entrada, restando, portanto, dimensionar os disjuntores a serem utilizados na proteção do circuito de saída do inversor.

Sabendo que a corrente máxima de saída do inversor é de 9,7 A e que a capacidade de condução de corrente para dois condutores de 2,5 mm² (conforme o método de instalação escolhido) é de 24 A, conclui-se que disjuntores de corrente nominal igual a 15 A são suficientes para cumprir o exigido pela NBR 5410.

5.2 CUSTOS

Os custos dos equipamentos necessários são exibidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Custos estimados dos equipamentos

Equipamento	Quantidade	Preço por Unidade (R\$)	Preço Total (R\$)
Painel Solar YingLi	8	863,04	6.904,32
Inversor Fronius	1	6.038,40	6.038,40
Suporte para os Painéis	2	699,00	1.398,00
Condutores	3	7,00	21,00
Disjuntores	2	8,99	17,98
TOTAL	-	-	14.379,70

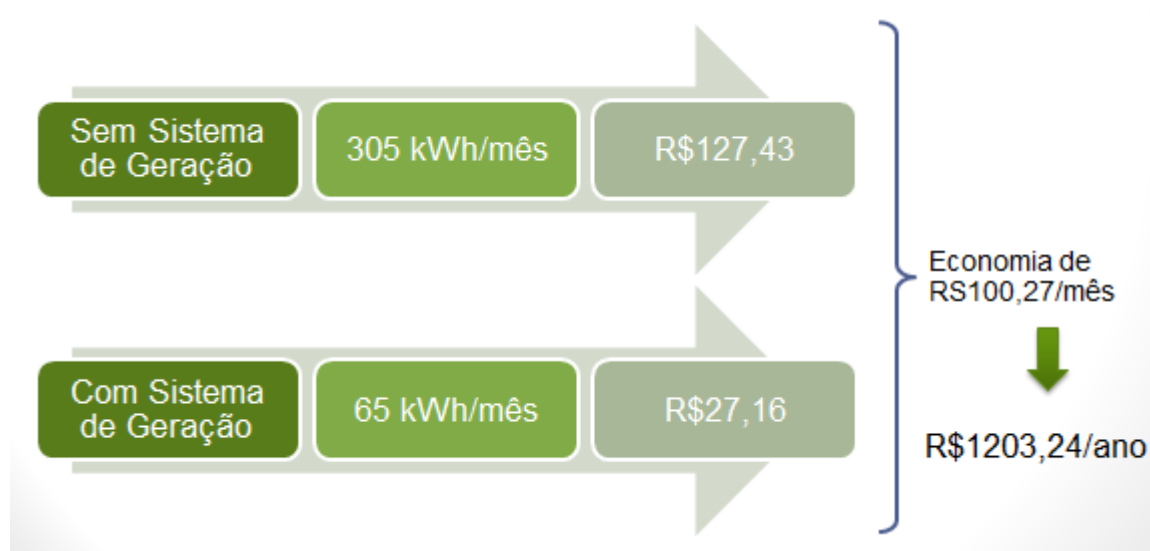
Fonte: (NEOSOLAR ENERGIA, 2014; MINHA CASA SOLAR, 2014; C&C, 2014)

Além destes custos é preciso considerar também outras despesas referentes ao processo de solicitação de acesso, a mão-de-obra e os custos de instalação. Para simular estes custos será considerado um acréscimo de 20% no valor dos equipamentos, resultando em gasto total de R\$ 17.255,64.

5.3 ANÁLISE

O preço médio da energia cobrada pela EDP Bandeirante é R\$ 0,4178 por kWh. Em uma análise simplificada e também conservadora, assume-se que o sistema projetado será capaz de fornecer uma média de 8 kWh/dia, ou 240 kWh por mês. Lembrando que a demanda média é de 305 kWh, obtém-se que o gasto com energia por mês sem o sistema de geração é de R\$ 127,43 e com o sistema de geração é de R\$ 27,16. Economiza-se, então, R\$ 100,27 por mês ou R\$ 1.203,24 por ano, conforme esquematizado na Figura 19.

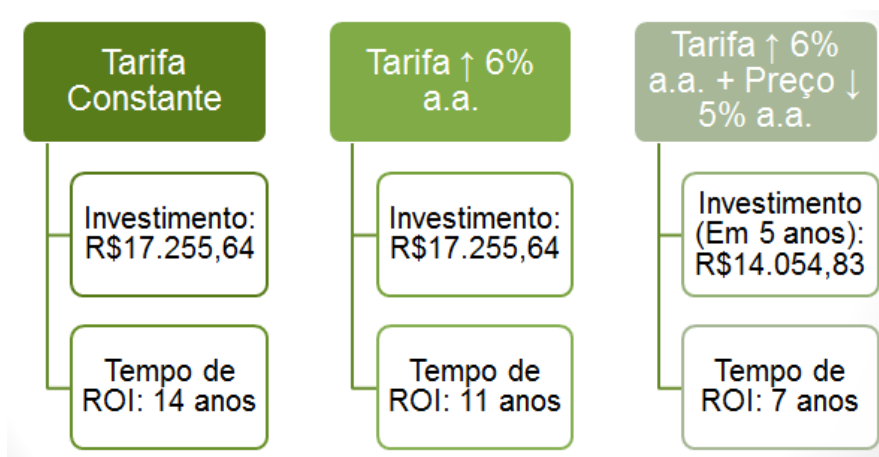
Figura 19 – Análise dos custos com e sem o sistema de geração fotovoltaico



Fonte: (AUTOR, 2014)

Assumindo que a tarifa não mude, o investimento de R\$ 17.255,64 é recuperado em 14 anos. Fazendo uma projeção e assumindo que a tarifa de energia suba 6% ao ano – valor baseado na média da inflação registrada pelo IGP-M (2014) nos últimos anos – o investimento será recuperado em 11 anos. Considerando ainda a hipótese de que os custos dos painéis fotovoltaicos diminuam conforme a tendência atual, é possível analisar a situação em que esta instalação seja feita daqui a 5 anos. Assumindo uma queda nos custos de 5% ao ano, o investimento total necessário seria de R\$ 14.054,83. Mantendo ainda a consideração sobre o aumento de 6% ao ano da tarifa de energia, chega-se à conclusão de que o investimento seria recuperado em 7 anos. Os três cenários discutidos estão apresentados na Figura 20.

Figura 20 – Análise do tempo de retorno de investimento para diferentes cenários



Fonte: (AUTOR, 2014)

6 CONCLUSÃO

O contexto energético atual, tanto no Brasil quanto no mundo, é preocupante e a necessidade de medidas rumo a um sistema mais eficiente é evidente. As tecnologias que compõe as chamadas redes inteligentes são ferramentas importantes para melhorar a distribuição de energia em vários aspectos, desde a eficiência até a qualidade e a disponibilidade da energia. As tecnologias de sensores inteligentes e medidores inteligentes são alguns exemplos que demonstram que o *Smart Grid* é uma realidade, já implantado em larga escala em locais como a Itália e ainda em fase de testes como em Aparecida - SP, no Brasil. Apesar dos custos envolvidos em alterações de larga escala, a perspectiva para o futuro é que todas as redes se tornem inteligentes se considerados os possíveis e prováveis ganhos.

Dentro do ferramental do *Smart Grid* está a Geração Distribuída, facilitada pela infraestrutura de dados, e que permite a utilização de fontes renováveis de energia (solar e eólica são os principais exemplos), ajudando a desafogar a geração centralizada, diminuindo assim a necessidade de investimentos em grandes usinas e ao mesmo tempo transformando a matriz energética e deixando-a mais limpa. Além disso, a Geração Distribuída permite que um consumidor residencial de energia elétrica se torne um produtor, economizando e contribuindo com o sistema elétrico ao mesmo tempo.

Dentre as tecnologias passíveis de utilização em um sistema de Geração Distribuída estão os painéis solares fotovoltaicos. Estes vêm se desenvolvendo rapidamente nos quesitos eficiência e também preço. Além de ser uma fonte completamente limpa de energia, os painéis podem ser instalados nos telhados das residências, sem gerar qualquer tipo de ruído ou inconveniente aos moradores enquanto absorve a energia dos fótons provenientes do Sol, tornando-os o método perfeito para a geração distribuída residencial.

Por fim, baseado nas informações colhidas, realizou-se um estudo de caso para um sistema de geração distribuída utilizando módulos solares fotovoltaicos em uma instalação residencial. Escolhidos os equipamentos necessários de acordo com o dimensionamento realizado e as normas disponíveis, nacionais e internacionais, obteve-se um custo total de instalação. Uma análise de viabilidade mostra que o tempo de retorno de investimento ainda é longo, mesmo se considerado um cenário de aumento do preço médio da energia. Apesar disso, levando em conta uma queda nos preços dos equipamentos necessários há uma queda significativa no tempo de retorno, o que é um indicativo do futuro promissor da tecnologia solar. É preciso lembrar também que em regiões onde há uma média de Horas de Sol Pleno maior os custos de investimento serão menores e consequentemente o tempo de retorno

também o será. Cabe ainda observar que são poucas as opções disponíveis no mercado de equipamentos inversores capazes de se conectar à rede. Se for considerado um cenário de aumento na procura por este tipo de produto é razoável assumir que surgirão novas marcas no mercado nacional, seguido por uma queda nos preços capaz de alavancar este segmento. Outra possibilidade seria uma política de incentivos por parte do governo de forma a diminuir os custos envolvidos, o que aceleraria o processo de evolução do setor.

REFERÊNCIAS

ADAMS A.; EVANS M.; ZWIEBACH B. **8.04 Quantum Physics I, Spring 2013**. MIT OpenCourseWare: Massachussets Institute of Technology. Disponível em: <<http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-04-quantum-physics-i-spring-2013>>. Acesso em: 28 nov. 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Geração Distribuída**. Brasília, 2014. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=757&idPerfil=2&idiomaAtual=0>>. Acesso em: 28 nov. 2014

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Nota Técnica nº 0004/2011-SRD/ANEEL**. Brasília, 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa Nº 414**: Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada. Brasília, 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa Nº 482**: Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Brasília, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**: Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição. Brasília, 2012.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI C84.1-2006. Revision of ANSI C84.1-1995**: For Electric Power Systems and Equipment - Voltage Ratings (60 Hertz). Rosslyn, 2006.

AMIN, S. M.; WOLLEMBERG, B. F. Toward a Smart Grid. **IEEE Power and Energy Magazine**, New York, v. 3, n. 5, p. 34 – 41, sept. 2005. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1109/MPAE.2005.1507024> >. Acesso em: 28 nov. 2014

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **Números do Setor**. São Paulo, 2014. Disponível em: < <http://www.portalabeeolica.org.br/> >. Acesso em: 28 nov. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410**: Instalações Elétricas de Baixa Tensão. Rio de Janeiro, 2004.

BORBELY, A. M.; KREIDER, J. F. **Distributed Generation**: The Power Paradigm for the New Millennium. Boca Raton: CRC Press, 2001. 416 p.

BRASIL. Grupo de Trabalho de Redes Elétricas Inteligentes. Ministério de Minas e Energia. **Smart Grid**. Brasília, 2010. 105 p. Disponível em: < http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/acoes/Energia/Relatxrio_GT_Smart_Grid_Portaria_440-2010.pdf >. Acesso em 01 nov. 2014

CARLSON, W. B. **Tesla**: Inventor of the Electrical Age. Princeton: Princeton University Press, 2013. 511 p.

C&C CASA E CONSTRUÇÃO LTDA. **Material Elétrico**. São Paulo, 2014. Disponível em: <http://www.cec.com.br/material-eletrico>. Acesso em 28 nov. 2014

CHAPIN, D. M.; PEARSON, C. S.; FULLER, G. L. A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power. **Journal of Applied Physics**, Melville, v. 25, n. 5, p. 676-677, 1954. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1063/1.1721711>>. Acesso em: 28 nov. 2014

COOPER INDUSTRIES. **GridAdvisor Series II Product Details**. Houston, 2014. Disponível em: <http://www.cooperindustries.com/content/public/en/power_systems/products/automation_and_control/reliability-optimization/outage_detection/gridadvisor-seriesii.html>. Acesso em 28 nov. 2014

EDP BANDEIRANTE. **PR.DT.PDN.03.14.002**: Conexão de Mini e Microgeradores ao Sistema de Distribuição em Baixa Tensão. São Paulo, 2014a

EDP BANDEIRANTE. **Agência Virtual**: Cliente Baixa Tensão. São Paulo, 2014b. Disponível em: <<http://agenciavirtual.edpbandeirante.com.br/cliente-baixa-tensao>>. Acesso em: 28 nov. 2014

ENEL. **Telegestore – Italy**. Roma, 2014 Disponível em: <http://www.enel.com/en-GB/innovation/smart_grids/smart_metering/telegestore/>. Acesso em: 28 nov. 2014

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **The Integrated Energy and Communication Systems Architecture**. Palo Alto, 2003. Disponível em: <http://www.intelligrid.info/IntelliGrid_Architecture/IECSA_Volumes/IECSA_VolumeIV.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2014

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **Estimating the Costs and Benefits of the Smart Grid**: A Preliminary Estimate of the Investment Requirements and the Resultant Benefits of a Fully Functioning Smart Grid. Palo Alto, 2011. Disponível em: <<http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=000000000001022519>>. Acesso em: 28 nov. 2014

FRAUNHOFER ISE. **World Record Solar Cell with 44.7% Efficiency**. Freiburg, 23 sept. 2013. Disponível em: <<http://www.ise.fraunhofer.de/en/press-and-media/press-releases/presseinformationen-2013/world-record-solar-cell-with-44.7-efficiency>> Acesso em: 28 nov. 2014

FRONIUS INTERNATIONAL. **Fronius Galvo 2.0-1 Technical Data**. Pettenbach, 2014. Disponível em: <http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-E1663E46-2A10C5C3/fronius_international/hs.xsl/83_28033_ENG_HTML.htm> Acesso em: 28 nov. 2014

GALLI, S.; SCAGLIONE, A.; WANG, Z. For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid. In: FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART GRID COMMUNICATION (SMARTGRIDCOMM), 1, 2010, Gaithersburg. **2010 First International Conference on Smart Grid Communications**. Gaithersburg: IEEE, 2010. p. 303 – 308. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/SMARTGRID.2010.5622060>>. Acesso em: 28 nov. 2014

GRUPO DE TRABALHO DE ENERGIA SOLAR – GTES. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL/CRESESB, 2004. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2004.pdf> Acesso em: 28 nov. 2014

GRUPO DE TRABALHO DE ENERGIA SOLAR – GTES. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL/CRESESB, 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf> Acesso em: 28 nov. 2014

GU, G.; PENG, G. The survey of GSM wireless communication system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AND INFORMATION APPLICATION, 2010, Tianjin. **International Conference on Computer and Information Application**. New York: IEEE, 2010. p. 121 – 124. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/ICCIA.2010.6141552>>. Acesso em: 29 nov. 2014

IBM GLOBAL SERVICES. **Plugging in the Consumer**: Innovating utility business models for the future. Somers, 2007. 26 p. Disponível em: <<http://www-05.ibm.com/de/energy/pdf/plugging-in-the-consumer.pdf>> Acesso em: 29 nov. 2014

INTERNATIONAL ELETROTECHNICAL COMISSION. **IEC 61000-3-3**: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-3: Limits - Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems, for equipment with rated current ≤ 16 A per phase and not subject to conditional connection. Geneva, 2013.

INTERNATIONAL ELETROTECHNICAL COMISSION. **IEC 61000-3-5**: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-5: Limits - Limitation of voltage fluctuations and flicker in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 75 A. Geneva, 2009.

INTERNATIONAL ELETROTECHNICAL COMISSION. **IEC 61000-3-11**: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-11: Limits - Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems - Equipment with rated current ≤ 75 A and subject to conditional connection. Geneva, 2000.

INTERNATIONAL ELETROTECHNICAL COMISSION. **IEC 62052-11**: Electricity metering equipment (AC) - General requirements, tests and test conditions - Part 11: Metering equipment. Geneva, 2003

INTERNATIONAL ELETROTECHNICAL COMISSION. **IEC 62052-22**: Electricity metering equipment (AC) – Particular requirements – Part 22: Static meters for active energy (classes 0,2 S and 0,5 S). Geneva, 2003

INTERNATIONAL ELETROTECHNICAL COMISSION. **IEC 60364-7-712**: Electrical installations of buildings – Part 7-712: Requirements for special installations or locations – Solar photovoltaic (PV) power supply systems. Geneva, 2002.

INTERNATIONAL ELETROTECHNICAL COMISSION. **IEC 62446**: Grid connected photovoltaic systems - Minimum requirements for system documentation, commissioning tests and inspection. Geneva, 2009.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 802.15.4:** IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). New York, 2011.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 495-2007:** IEEE Guide for Testing Faulted Circuit Indicators. New York, 2007.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 929-2000:** IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems. New York, 2000.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 1547-2003:** IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. New York, 2003.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 1547.6-2011:** IEEE Recommended Practice for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems Distribution Secondary Networks. New York, 2011.

ÍNDICE GERAL DE PREÇOS - MERCADO. Sistema Gerenciador de Séries Temporais. **Banco Central do Brasil.** Brasília, 2014. Disponível em: <<https://www3.bcb.gov.br/sgspub/>>. Acesso em: 29 nov. 2014

INSTITUTO PARA O DESENVOLVIMENTO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS NA AMÉRICA LATINA. **Guia de Microgeradores Fotovoltaicos.** 2014. Disponível em: <<http://www.americadosol.org/guiaFV/>>. Acesso em: 29 nov. 2014

LAMIN, H. **Análise de Impacto Regulatório da Implantação de Redes Inteligentes no Brasil**. 2013. 300 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2013. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/biblioteca/trabalhos/trabalhos/Tese_%20Hugo_Lamin.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2014

LIMA, C. **Geração Distribuída Baseada em Normas e Padrões Técnicos**. In: SEMINÁRIO MICRO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA – IMPACTOS DA RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL RN 482/2012. Brasília: ANEEL, 2014. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/hotsite/mmgd/slides/Claudio_Lima.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2014

MARKVART, T.; CASTAÑER, L. **Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications**. Oxford: Elsevier, 2003. 984 p.

MASSEY, G. W. **Essentials of Distributed Generation Systems**. Sudbury: Jones & Bartlett Learning, 2010. 202 p.

MICHAELS, H.; DONNELLY, K. Architecting the Smart Grid for Energy Efficiency. In: 2010 ACEEE SUMMER STUDY ON ENERGY EFFICIENCY IN BUILDINGS, 2010, Pacific Grove. **2010 Summer Study Conference Proceedings**. Washington, D.C.: ACEEE, 2010. Disponível em: <<http://www.aceee.org/files/proceedings/2010/data/papers/2263.pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2014

MICKEY, C. D. Solar Photovoltaic Cells. **Journal of Chemical Education**, Washington D.C., v. 58, n. 5, p. 418 – 423, maio 1981. Disponível em: <<http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ed058p418>>. Acesso em: 29 nov. 2014

MINHA CASA SOLAR - L&F COMÉRCIO, PROJETOS E CONSULTORIA LTDA. **Produtos**. Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <<http://minhacasasolar.lojavirtualfc.com.br/home.asp?IDLoja=14743>>. Acesso em: 28 nov. 2014

MOGHE, R.; LAMBERT, F. C.; DIVAN, D. Smart “Stick-on” Sensors for the Smart Grid. **IEEE Transactions on Smart Grid**. New York, v. 3, n. 1, p. 241 – 252, mar. 2012. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1109/TSG.2011.2166280>>. Acesso em: 29 nov. 2014

NEOSOLAR ENERGIA. **Energia Solar Fotovoltaica**. São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://neosolar.com.br/>>. Acesso em: 28 nov. 2014

NOJA POWER. **Religador Automático OSM - Guia do Produto**. Campinas, 2014. Disponível em: <[http://www.nojapower.com.br/dl/pdf/Religador - Guia do Produto Religador Automatico 15kV 27kV 38kV NOJA-580-03.pdf](http://www.nojapower.com.br/dl/pdf/Religador%20Automatico%2015kV%2027kV%2038kV%20NOJA-580-03.pdf)>. Acesso em: 29 nov. 2014

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **Research Cell Efficiency Records**. Washington D.C., 2014. Disponível em: <http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg>. Acesso em: 29 nov. 2014

NAVAL RESEARCH LABORATORY. **Vanguard Program**. Washington D.C., 2014. Disponível em: <<http://www.nrl.navy.mil/accomplishments/rockets/vanguard-project/>>. Acesso em: 29 nov. 2014

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Boletim Diário**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://www.ons.org.br/resultados_operacao/boletim_diario/index.htm>. Acesso em: 29 nov. 2014

PACIFIC GAS & ELECTRIC COMPANY. **What is a SmartMeter™?**. San Francisco, 2014. Disponível em: <<http://www.pge.com/en/myhome/customerservice/smartmeter/index.page>>. Acesso em: 29 nov. 2014

QIAN, A.; XIAOHONG, W.; XING, H. The impact of large-scale distributed generation on power grid and microgrids. **Renwable Energy**. Maryland Heights, v. 62, feb. 2014. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.07.032>>. Acesso em: 29 nov. 2014

RAMYA, C.M; SHANMUGARAJ, M; PRABAKARAN, R. Study on ZigBee technology. In: 3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS COMPUTER TECHNOLOGY, 2011, Kanyakumari. **International Conference on Electronics Computer Technology**. New York: IEEE, 2011, v. 6, p. 297 - 301. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/ICECTECH.2011.5942102>>. Acesso em: 29 nov. 2014

ROGAI, S. Telegestore Project Progresses And Results. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER LINE COMMUNICATIONS AND ITS APPLICATIONS, 2007, Pisa. **International Symposium on Power Line Communication and its Applications**. New York: IEEE, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/ISPLC.2007.371050>>. Acesso em: 29 nov. 2014

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Energia do Governo do Estado de São Paulo. **Levantamento do Potencial de Energia Solar Paulista**. São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://www.energia.sp.gov.br/portal.php/atlas-solar>>. Acesso em: 29 nov. 2014

SEN, B.; SHARMA, D. **Grid Synchronization Algorithm for Distributed Generation System During Grid Abnormalities**. 2012. 80 f. Thesis (Bachelor of Technology Degree in Electrical Engineering) – Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, Odisha, 2012. Disponível em: <http://ethesis.nitrkl.ac.in/3607/1/THESIS_binita%26_dushyant.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2014

SEVERO, L. **Estudo e implementação de métodos de proteção de anti-ilhamento aplicados a sistemas fotovoltaicos**. 2011. 291 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011. Disponível em: <<http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/95161>>. Acesso em: 29 nov. 2014

TOLLGRADE COMMUNICATIONS. **Tollgrade LightHouse® Medium Voltage (MV) Sensors**. Cranberry Township, 2014. Disponível em: <<http://www.tollgrade.com/smartgrid/smart-grid-products/smart-grid-mv-sensor/>>. Acesso em: 29 nov. 2014

VALLÊRA, A. M.; BRITO, M. C. Meio Século de História Fotovoltaica. **Gazeta de Física**. Lisboa, v. 29, n. 1 e 2, p. 10 – 15, jan. 2006. Disponível em: <<http://gazedefisica.spf.pt/magazine/article/472/pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2014

VIEIRA, J. C. M. et al. Um método prático para a definição dos ajustes de relés baseados em medidas de frequência usados para detecção de ilhamento de geração distribuída. **Sba Controle & Automação**, Natal, v. 19, n. 2, jun. 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-17592008000200008&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 29 nov. 2014

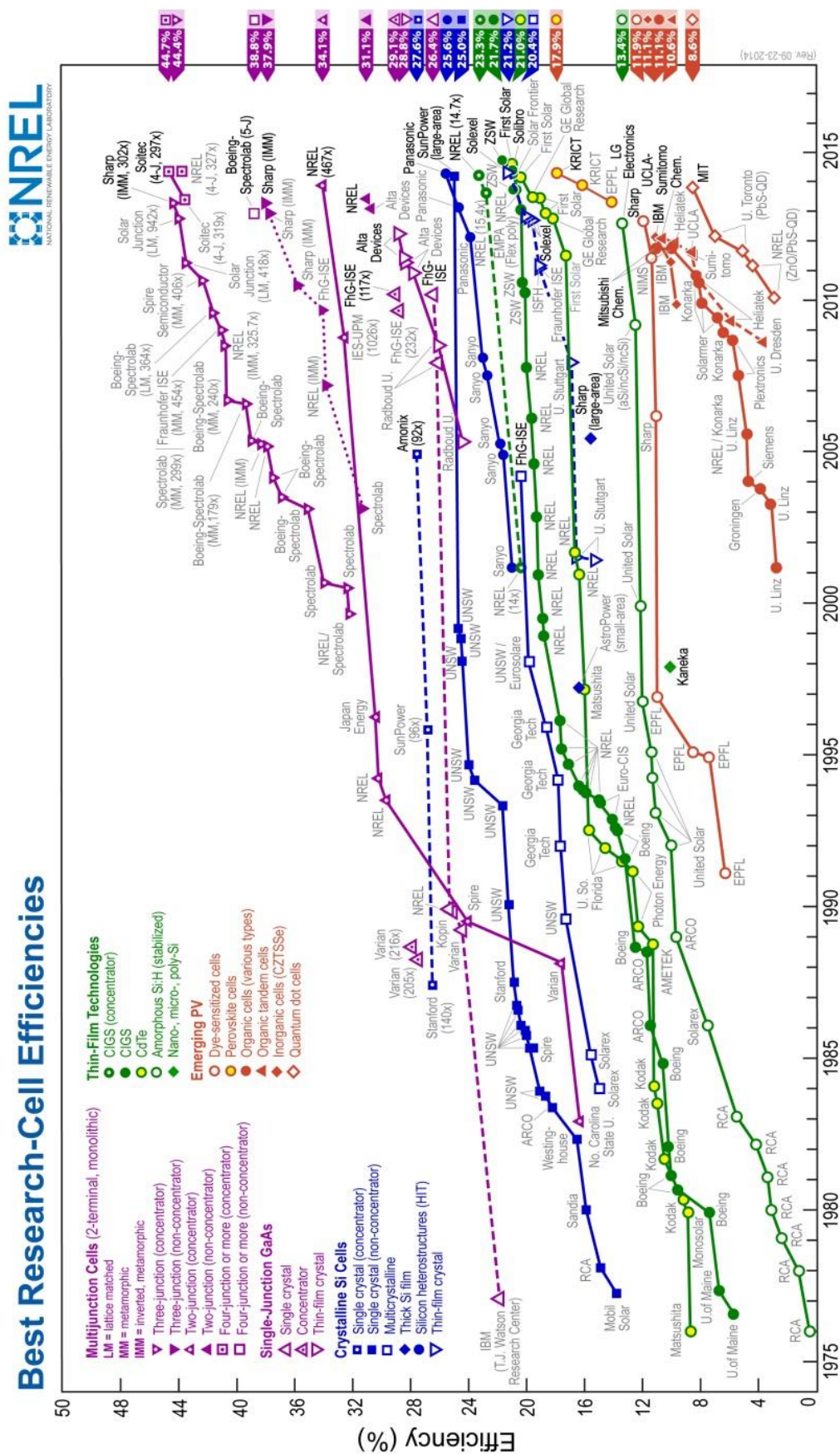
WIRTH, H. **Recent Facts about Photovoltaics in Germany**. Fraunhofer ISE. Freiburg, 2014. Disponível em: <<http://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/veroeffentlichungen-pdf-dateien-en/studien-und-konzeptpapiere/recent-facts-about-photovoltaics-in-germany.pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2014

XCEL ENERGY. **SmartGridCity**. Boulder, 2014. Disponível em: <<http://smartgridcity.xcelenergy.com/index.asp>> Acesso em: 29 nov. 2014

YINGLI SOLAR. **Folha de Dados YGE 60 Cell 35mm SERIES**. Disponível em: <<http://d9no22y7yqre8.cloudfront.net/assets/uploads/products/downloads/YGE-60Cell-29b-35mm.PDF>>. Acesso em: 29 nov. 2014

YINGLI SOLAR. **YingLi Solar PV Modules Installation and User Manual**. Disponível em: <http://d9no22y7yqre8.cloudfront.net/assets/uploads/manual/downloads/2014.9.4-_InstallationManual_IEC_EN_20140905_v2.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2014

ANEXO – Evolução da eficiência das células solares fotovoltaicas



Fonte: (NREL, 2014)