

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

Setor de Tecnologia

Departamento de Engenharia Elétrica

**APLICAÇÃO DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS
COMO FONTE GERADORA COMPLEMENTAR DE ENERGIA
ELÉTRICA EM RESIDÊNCIAS**

CURITIBA,

2013

Ellison Cooper

Wellyngton Moralles Martins Junior

APLICAÇÃO DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS COMO FONTE GERADORA COMPLEMENTAR DE ENERGIA ELÉTRICA EM RESIDÊNCIAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado à disciplina Trabalho Final de Curso como requisito parcial à conclusão do Curso de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Profa. Dra. Thelma Solange Piazza Fernandes.

CURITIBA,

2013

TERMO DE APROVAÇÃO

Ellison Cooper

Wellyngton Moralles Martins Junior

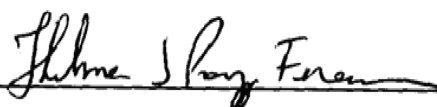
APLICAÇÃO DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS COMO FONTE GERADORA COMPLEMENTAR DE ENERGIA ELÉTRICA EM RESIDÊNCIAS

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado pelo Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná.

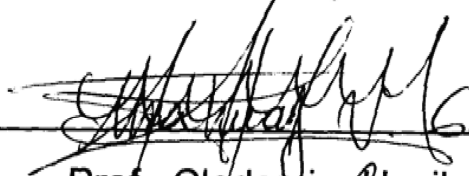


Prof.^a Thelma S. Piazza Fernandes, Dr.^a
Orientadora

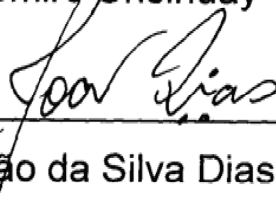
Banca Examinadora



Prof.^a Thelma Solange Piazza Fernandes, Dr.^a



Prof. Clodomiro Unsihuay Vila, Dr.



Prof. João da Silva Dias, Dr.

CURITIBA, 13 DE MARÇO DE 2013.

AGRADECIMENTOS

À nossa professora orientadora Thelma Solange Piazza Fernandes, pela disposição e paciência em toda esta longa jornada de trabalho.

Aos nossos familiares, pelo apoio durante todo o decorrer deste curso e principalmente durante esta fase de conclusão.

À colega de profissão Eliane Silva Custódio e ao professor Alexandre Rasi Aoki, que forneceram dados imprescindíveis à realização deste nosso trabalho.

RESUMO

O presente trabalho investiga a viabilidade econômica da implementação de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica de baixa tensão da cidade na cidade de Curitiba – PR, para suprir parcialmente o consumo de energia elétrica uma residência de médio/alto padrão com 4 habitantes, cujo consumo mensal é de aproximadamente 400 kWh. Considerando que a barreira técnica para a disseminação dessa forma de produção de energia descentralizada já foi superada, estudar a viabilidade econômica de sua instalação poderá ajudar na propagação dessa tecnologia no país. A questão de busca de fontes alternativas e renováveis de produção de energia elétrica, que não ocasionam graves problemas ambientais, há muito deixou de ser uma utopia. Já é uma realidade concreta e confiável, visível em muitos países considerados desenvolvidos. Hoje em dia, é possível encontrar telhados fotovoltaicos em várias edificações de diversos tipos em centros urbanos dos principais países da Europa, notadamente Alemanha e Espanha, gerando energia limpa. No Brasil, a energia solar fotovoltaica ainda não conseguiu superar a barreira econômica, pois a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos continua tendo um custo elevado em comparação à geração hidrelétrica, principal fonte energética na matriz de geração do país. Analisando os resultados obtidos na análise do projeto proposto, este trabalho mostra que a produção de energia solar fotovoltaica está em vias de se tornar um investimento ao alcance da população de classe média-alta, mas ainda necessita de um ambiente mais favorável para sua expansão onde incentivos fiscais e de produção sejam concedidos por parte do governo, justificado pelo impacto ambiental que a disseminação desta tecnologia proporcionaria.

Palavras-chave: energia solar, sistemas fotovoltaicos.

ABSTRACT

The present study investigates the economic viability of implementing an on-grid photovoltaic system connected to the low voltage grid in the city of Curitiba-PR, in order to partly supply the electricity consumption of a medium/high class residence with 4 people, whose monthly consumption is about 400 kWh. Considering that the technical barrier to spread this way of generating electricity has already been surpassed, studying the economic viability of its installation could help spreading this technology through the country. The question regarding the search for alternative and renewable energy sources, that does not harm the environment, is not utopy anymore. It is a concrete and reliable reality that can be seen in many developed countries. Nowadays you can find photovoltaic rooftops in many buildings in most of the urban centers in Europe, mostly Germany and Spain, producing clean energy. In Brasil, the solar photovoltaic energy could not surpass the economic barrier yet, because the energy generated by the solar panels has an elevated cost comparing to the hidrelectric generation, primary energy source in the country. Analysing the results in this project, this study shows that solar photovoltaic energy is becoming an practicable investment for medium/high class people, but still needs a more favorable environment for its expansion where tax and production incentives are granted by the government, justified by the environment impact that the dissemination of this technology would provide.

Keywords: Solar energy, photovoltaic systems.

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito
DNI	Irradiação Normal Direta
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPIA	European Photovoltaic Industry Association
ESF	Energia Solar Fotovoltaica
FV	Fotovoltaico
GHI	Irradiação Global Horizontal
GSF	Geração Solar Fotovoltaica
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MME	Ministério de Minas e Energia
MPPT	Maximum Power Point Tracking
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NREL	National Renewable Energy Laboratory
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
SIN	Sistema Interligado Nacional
STC	Standard Test Conditions
SWERA	Solar and Wind Energy Resource Assessment
WBGU	German Advisory Council on Global Change

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Capacidade Instalada em 31/12/2009 no SIN	13
Tabela 2.1: Políticas de incentivo ao redor do mundo	18
Tabela 2.2: Radiação solar em kWh/m ² /dia segundo fontes de dados variadas	25
Tabela 2.3: Custo de investimento em sistemas fotovoltaicos (US\$/kWp)	27
Tabela 2.4: Custo de investimento em sistemas fotovoltaicos – referência no Brasil (R\$/kWp)	28
Tabela 2.5: Competitividade da Geração Fotovoltaica – Custo nivelado de geração	29
Tabela 2.6: Tarifas homologadas na ANEEL – Valores médios regionais em 2011 (R\$/MWh)	30
Tabela 4.1: Escolha do ângulo de inclinação do módulo	55
Tabela 5.1: Parâmetros elétricos e físicos do módulo YL230P-29b em STC	58
Tabela 5.2: Parâmetros elétricos e físicos do inversor SolarEnergy-2000	59
Tabela 6.1: Estimativa de consumo e geração de energia	73
Tabela 6.2: Energia economizada por período de tempo [R\$]	74
Tabela 6.3: Valor médio da fatura de energia elétrica	76
Tabela 6.4: TIR – Taxa interna de retorno	78
Tabela 6.5: Índices econômicos para incentivos fiscais	79
Tabela 6.6: Consumidores Cativos COPEL – 2012	79
Tabela 6.7: Geração Própria Acumulada de Janeiro a Dezembro de 2011	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Projeção da matriz energética mundial	12
Figura 2.1: Preços de sistemas fotovoltaicos na Europa	26
Figura 2.2: Evolução recente dos preços dos sistemas fotovoltaicos	27
Figura 2.3: Preço unitário de sistemas completos	28
Figura 3.1: Corte transversal de uma célula fotovoltaica	34
Figura 3.2: Efeito fotovoltaico na junção P-N	34
Figura 3.3: Estrutura de uma célula fotovoltaica	35
Figura 3.4: Célula de Silício Monocristalino	36
Figura 3.5: Célula de silício policristalino	36
Figura 3.6: Célula Fotovoltaica de filme fino	38
Figura 3.7: Curvas características de tensão e corrente de módulo fotovoltaico	39
Figura 3.8: Dados técnicos do módulo fotovoltaico Kyocera SM-48 KSM	41
Figura 3.9: Influência da radiação solar na operação do módulo fotovoltaico	42
Figura 3.10: Influência da temperatura na operação do módulo fotovoltaico	43
Figura 4.1 Sistema de Conexão On-Grid	46
Figura 4.2: Funcionamento de um inversor CC-CA para conexão à rede elétrica	48
Figura 4.3: Posição do sol definida pelos ângulos azimutal, zenital e altura solar	55
Figura 5.1: Quadro de proteção de corrente contínua CC da instalação fotovoltaica ...	60
Figura 5.2: Quadro de proteção de corrente alternada CA da instalação fotovoltaica ..	60
Figura 5.3 Detalhe de conectores tipo MC4	62
Figura 5.4: Esquemático painéis solares	63
Figura 6.1: Irradiância solar global horizontal ao longo de um dia em Curitiba	67
Figura 6.2: Irradiância solar global horizontal ao longo de um dia em Curitiba	68
Figura 6.3: Irradiância solar global horizontal por estações	69
Figura 6.4: Irradiância solar global horizontal versus inclinada em Curitiba	70
Figura 6.5: Consumo de energia elétrica ao longo do dia	71
Figura 6.6: Balanço de geração e consumo de energia ao longo de um dia	72
Figura 6.7: Custo da tarifa convencional versus tarifa branca	76

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 CONTEXTO.....	12
1.2 OBJETIVOS	17
1.3 ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA	17
2 CENÁRIOS	18
2.1 VISÃO MUNDIAL	18
2.2 PANORAMA BRASILEIRO	20
2.3 POTENCIAL DE GERAÇÃO BRASILEIRO.....	25
2.4 CUSTOS DE INVESTIMENTO NO MUNDO.....	27
2.5 CUSTOS DE INVESTIMENTO NO BRASIL.....	29
3 TECNOLOGIA	32
3.1 HISTÓRICO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	32
3.2 EFEITO FOTOVOLTAICO	33
3.3 ESTRUTURA DE UMA CÉLULA FOTOVOLICA.....	36
3.4 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	39
4 APLICAÇÕES	45
4.1 TIPOS DE CONEXÃO.....	45
4.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA.....	46
4.3 INVERSORES PARA CONEXÃO À REDE	48
4.4 DEMAIS DISPOSITIVOS	52
4.5 REQUISITOS PARA CONEXÃO À REDE	53
4.6 INTEGRAÇÃO ARQUITETÔNICA	54
5 PROJETO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE	57
5.1 ENERGIA PRODUZIDA	57
5.2 MÓDULOS	58
5.3 INVERSOR.....	59
5.4 SISTEMA DE PROTEÇÃO.....	60
5.5 CABEAMENTO E CONEXÕES.....	62
5.6 SUPORTE ESTRUTURAL	65
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS	66
6.1 IRRADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL.....	67
6.2 IRRADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL POR SAZONALIDADE	69

6.3 IRRADIAÇÃO GLOBAL INCLINADA.....	70
6.4 PERFIL DE CONSUMO	71
6.5 RESULTADOS	72
6.6 ANÁLISE ECONÔMICA	74
6.8 IMPACTO NO SISTEMA.....	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

O Sol é a principal fonte de energia de nosso planeta, sendo que todas as outras fontes conhecidas de energia (eólica, hidrelétrica, biomassa) derivam de forma direta ou indireta da energia solar. O Sol fornece anualmente para a atmosfera terrestre $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia, o que corresponde a 10.000 vezes o consumo mundial de energia neste período (CRESESB, 2006).

A radiação solar, no entanto é um recurso que apresenta grande variabilidade devido à alternância de dias e noites, estações do ano, latitude e períodos de passagem de nuvens e chuvas. Esta característica induz, conforme o caso, à seleção de um sistema de estocagem de energia apropriado.

Sua utilização é extremamente relevante em instalações remotas, possibilitando vários projetos sociais, agropastoris, de irrigação e comunicações. A modularidade, baixos custos de manutenção e longa vida útil facilitam muito este tipo de instalação em lugares fora do alcance da rede de energia elétrica.

Panoramas energéticos globais do passado mostram a falta de sustentabilidade ambiental, econômica e social das tendências energéticas atuais, e a urgência em trazer uma mudança com tecnologias não emissoras de carbono.

Enquanto países ao redor do mundo negociam e realizam discussões, a exemplo da Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável de 2012, também conhecida como Rio+20, a energia sempre ocupa o coração do problema. A produção de energia é apontada como geradora de 65% da emissão global de gases do efeito estufa, conseqüentemente está no coração da solução.

A busca por fontes renováveis de energia tornou-se fator de extrema importância em um cenário mundial que tem sua matriz energética atualmente altamente dependente de combustíveis fósseis na produção de eletricidade, 30% de petróleo e 23% de carvão (*INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, WEO 2011*).

As constantes preocupações com o meio ambiente, impactos causados por emissões de gases do efeito estufa e CO₂, e escassez de recursos são os fatores que impulsionam o desenvolvimento das energias renováveis. A exemplo dos impactos econômicos, as variações do preço da energia nas últimas décadas chamam atenção para a importância da energia nas atividades econômicas e a vulnerabilidade a desequilíbrios no suprimento de combustíveis. Segundo WORLD ENERGY OUTLOOK (2009): “O aumento de preços em 2008 provavelmente colocou a economia global na pior recessão desde a segunda guerra mundial”

As projeções para a matriz energética do futuro realizadas pelo instituto WBGU – *German Advisory Council on Global Change* - apontam a energia solar, fototérmica e fotovoltaica, como uma das melhores e mais promissoras fontes de energia alternativa (Figura 1).

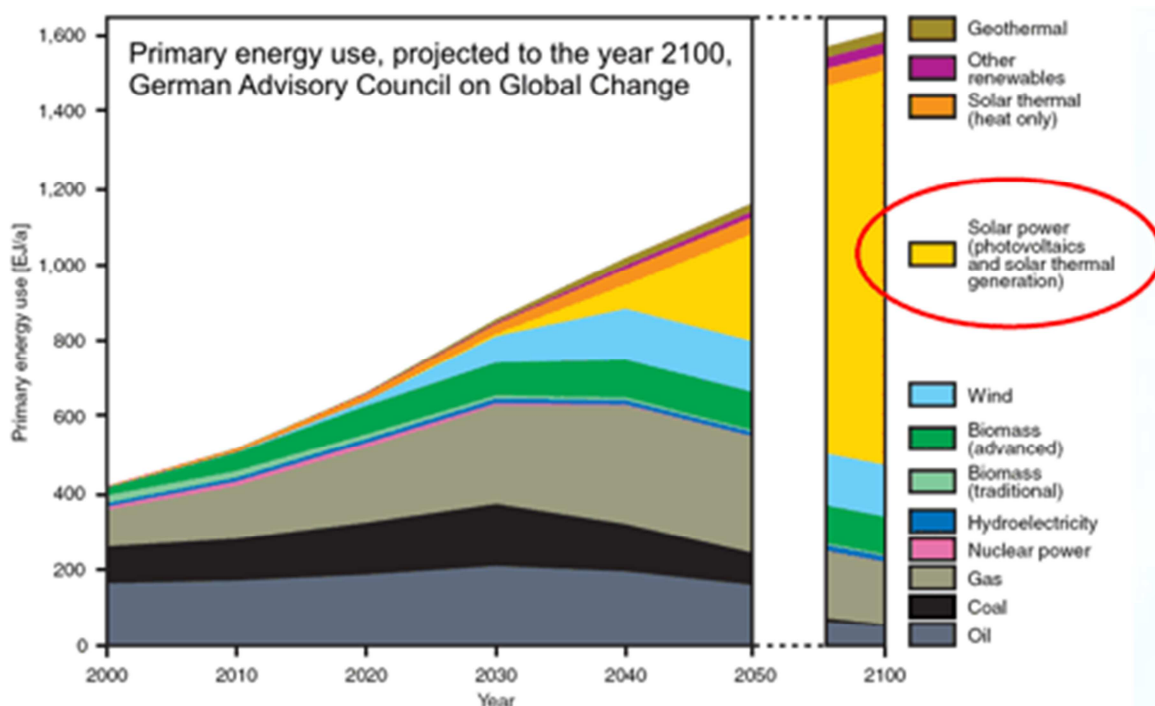


Figura 1.1: Projeção da matriz energética mundial.

FONTE: *German Advisory Council on Global Change* (2010)

Apesar de seu alto custo em relação a outras fontes de energia alternativas, que varia entre 5 a 15 vezes mais aos custos unitários de uma usina a gás natural que opera com ciclo combinado (ANEEL, 2002), a energia solar fotovoltaica está em plena fase de desenvolvimento, depois do aparecimento das primeiras células fotovoltaicas em 1953. Atualmente, as células de silício monocristalino e filmes finos dominam o mercado e apresentam ainda grandes perspectivas de diminuição de seu custo de produção, juntamente com o aparecimento de novas tecnologias, como células orgânicas e fototermovoltas.

No Brasil, a matriz energética é predominantemente hidrotérmica, sendo que 71,7% da potência instalada é de natureza hidráulica. Não obstante, o potencial hidrelétrico mais próximo a centros de consumo está saturado, e novos empreendimentos em grandes centrais hidrelétricas dependem de investimentos adicionais em transmissão e vão contra as políticas verdes, de sustentabilidade, em vigor. A Tabela 1.1 apresenta a capacidade instalada do Sistema Interligado Nacional (SIN) em 2009.

Tabela 1.1: Capacidade Instalada em 31/12/2009 no SIN

Fonte	MW	Participação (%)
Hidráulica ^(a)	74.279	71,7
Térmica	13.302	12,8
Nuclear	2.007	1,9
Fontes Alternativas	7.645	7,4
Potência Instalada	97.233	93,9
Importação Contratada ^(b)	6.365	6,1
Potência Total com Importação	103.598	100,0

(a) Inclui a parte brasileira da UHE Itaipu (7.000 MW).

(b) Importação da UHE Itaipu não consumida pelo sistema elétrico Paraguai.

FONTE: PLANO DECENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA 2020, EPE (2011)

Considerando a tecnologia disponível atualmente e o potencial energético solar do Brasil, pode-se estimar que o consumo do sistema interligado – SIN verificado em 2011 seria totalmente atendido com o recobrimento de uma área de 2.400 km², pouco mais que a metade da área do município de Salvador-BA, com painéis fotovoltaicos numa região com insolação média da ordem de 1.400 kWh/m²/ano, lembrando que a média de insolação da região central do estado da Bahia é de aproximadamente 2300 kWh/m²/ano (NOTA TÉCNICA EPE - Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira, 2012).

De acordo com Nota Técnica DEA 03/11 – Projeção da Demanda de Energia Elétrica para os próximos 10 anos (2010), o consumo de energia elétrica do setor residencial brasileiro foi de 25,57% do consumo total, onde o setor industrial e comercial aparecem com 43,85% e 16,48% respectivamente.

No Brasil, os incentivos ao uso de fontes renováveis de energia foram alavancados com o PROINFA, Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica. Instituído em 2004, tem como objetivo aumentar a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos concebidos com base em fontes eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) no Sistema Interligado Nacional (SIN), deste modo aumentando a segurança no abastecimento e redução dos impactos ao meio ambiente. O programa elaborado no âmbito do MME, adotava como meta a instalação de 3.300 MW de capacidade incorporados ao SIN. Esta energia seria adquirida pela Centrais Elétricas Brasileiras (ELETROBRÁS) a partir de contratos com as geradoras com duração de 20 anos, contados a partir da entrada em operação, prazo que encerrou-se em dezembro de 2010.

Os resultados do PROINFA foram 119 empreendimentos, constituído por 41 eólicas, 59 pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e 19 térmicas a biomassa, implantadas até 31 de dezembro de 2011. Juntos, os 119 empreendimentos têm capacidade instalada de 2.649,87 MW, compreendendo 963,99 MW em usinas eólicas, 1.152,54 MW em PCHs e 533,34 MW em plantas de biomassa. Segundo nota em sítio eletrônico oficial do programa PROINFA da ELETROBRÁS, a energia elétrica gerada anualmente por essas usinas é suficiente para abastecer o equivalente a cerca de 4,5 milhões de brasileiros ou três cidades do porte de Recife.

Por outro lado, a maior tendência no cenário energético atual é o conceito *Smart Grids*, que segundo D.M. Falcão (2009), baseia-se na utilização intensiva de tecnologia de automação, computação e comunicações para monitoração e controle da rede elétrica, as quais permitirão a implantação de estratégias de controle e otimização da rede que engloba a geração distribuída. Isto fez com que a utilização de mini e micro-geração conectada á rede de baixa tensão tenha

ganhado evidência nos últimos meses, com iniciativas de regulamentações do mercado, a exemplo das resoluções normativas N° 481 e 482 da ANEEL lançadas em Abril de 2012, que incentivam a utilização da energia solar:

“Art. 3º-A Para a fonte solar referida no art. 1º fica estipulado o desconto de 80% (oitenta por cento), para os empreendimentos que entrarem em operação comercial até 31 de dezembro de 2017, aplicável nos 10 (dez) primeiros anos de operação da usina, nas tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição – TUST e TUSD, incidindo na produção e no consumo da energia comercializada.”(RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 481, DE 17 DE ABRIL DE 2012, ANEEL)

“ Art. 1º Estabelecer as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica.” (RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012, ANEEL)

“Art. 3º As distribuidoras deverão adequar seus sistemas comerciais e elaborar ou revisar normas técnicas para tratar do acesso de microgeração e minigeração distribuída, utilizando como referência os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, as normas técnicas brasileiras e, de forma complementar, as normas internacionais.” (RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012, ANEEL)

Esta regulamentação da conexão da geração solar à rede para micro e mini geração vem solucionar um grande problema destes sistemas cuja fonte de energia é variável: a acumulação de energia, que torna necessário o uso de acumuladores, geralmente um banco de baterias. Neste caso, a rede faz o papel do armazenador, reduzindo o custo de instalação do sistema. Desse modo a energia injetada na rede é controlada através de medidores bidirecionais e transformada em créditos com a concessionária para posterior consumo.

Todos estes fatores de redução de custo e regulamentação deixam a energia solar fotovoltaica residencial como geração complementar de energia a ponto de tornar-se economicamente viável. Aliado a um projeto de eficiência energética, promete reduzir custos para o consumidor e melhorar o desempenho do sistema economizando recursos naturais não renováveis.

1.2 OBJETIVOS

A constante e rápida evolução da tecnologia solar fotovoltaica requer um estudo de viabilidade técnica e econômica da mesma. Por isso, este trabalho visa propor uma solução de instalação e conexão com a rede de um sistema solar fotovoltaico, com previsão de custos com base em tecnologias disponíveis no mercado. Por se tratar de um investimento com taxa de retorno de investimento limítrofe, o foco deste trabalho é para residências de classe alta e média-alta, onde a integração arquitetônica e o fator ambiental sustentável têm um peso que justifica a sua instalação.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA

Esta monografia está estruturada em 7 capítulos, sendo que o Capítulo 1 é introdutório. O Capítulo 2, intitulado “Cenários”, apresenta o “estado da arte” do problema em nível internacional e nacional, levando em consideração aspectos tecnológicos, econômicos, naturais e políticos.

No Capítulo 3 explora-se ainda mais a tecnologia envolvida no processo de geração de energia solar fotovoltaica, descrevendo detalhadamente materiais e processos.

O Capítulo 4 apresenta as várias aplicações da tecnologia fotovoltaica e seus tipos de conexão, como em sistemas isolados ou conectados à rede elétrica. No Capítulo 5 é especificado um projeto de sistema conectado à rede elétrica que é a base para as análises posteriores do presente trabalho.

No Capítulo 6 são feitas análises dos resultados obtidos com o projeto do Capítulo 5, e por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões referentes ao trabalho desenvolvido.

2 CENÁRIOS

2.1 VISÃO MUNDIAL

No final de 2009 havia no globo 23 GW de potência instalada em sistemas de energia solar fotovoltaica, o equivalente a 15 termoelétricas a carvão de médio porte (*SOLAR GENERATION 6 – Full Report*, EPIA, 2011).

Ainda segundo o *SOLAR GENERATION 6 – Full Report* (EPIA, 2011), alguns indicadores mostram o quão longe a indústria fotovoltaica tem chegado:

- o custo de produção de energia solar cai cerca de 22% cada vez que a capacidade instalada mundial dobra, atingindo um custo médio de geração de 15 c€/kWh na Europa;

- a eficiência dos módulos solares tem melhorado em alguns pontos percentuais a cada ano. Os painéis mais eficientes de silício cristalino atingiram 19,5% em 2010 com a promessa de atingir 23% em 2020, ajudando a reduzir custos;

- mais de 1000 companhias estão envolvidas na produção da tecnologia estabelecida atualmente na produção de células fotovoltaicas (silício cristalino), e mais de 30 companhias produzindo células de filmes finos;

- em um cenário seguindo o padrão de expansão industrial atual incluindo políticas de suporte razoáveis, a energia fotovoltaica pode chegar a prover 345 GW em 2020, algo em torno de 4% do consumo mundial..

Como resposta, algumas nações têm lançado políticas governamentais relacionadas à energia, tais como as apresentadas na Tabela 2.1.

TABELA 2.1: Políticas de incentivo ao redor do mundo

País/Região	Política	Detalhes
China	<i>Programa Golden Sun</i>	Subsídio de 50% do investimento no custo de projetos solares <i>on-grid</i> (com mais de 500 MW) e 70% para projetos <i>off-grid</i> , 2009-2011.
China	Tarifa de <i>feed-in</i> para usinas de geração eólica	Quatro categorias de tarifa <i>off-grid</i> para novos projetos eólicos, baseados em regiões com condições eólicas variáveis.
União Européia	Pacote 20-20-20	Corte geral na emissão de gases do efeito estufa em 20% abaixo dos níveis de 1990 em 2020. Metas nacionais de uso de energias renováveis para redução de emissões e importações. Incluem um mínimo de 10% de alternativa de combustíveis para gasolina e diesel até 2020. Revisão das diretrizes de ajuda estatal para proteção ambiental para suporte do desenvolvimento e uso seguro de captação e armazenamento de carbono (CSS).
Japão	Subsídio e tarifas <i>feed-in</i> para uso residencial de sistemas fotovoltaicos (PV)	Subsídio: JPY 70000/kW com um orçamento total de JPY 20 bilhões (Abril de 2009 a Janeiro de 2010). Tarifa <i>feed-in</i> : Excedente de energia elétrica a ser comprada por usuários pelo dobro da tarifa de varejo (JPY 48/kWh).

FONTE: EPIA, 2011

Uma nação em destaque é a Alemanha, que tem mostrado ao resto do mundo como se pode alcançar um desenvolvimento ambiental e industrial ao mesmo tempo. A Alemanha é líder em pesquisa e desenvolvimento em energia solar fotovoltaica e primeiro país a introduzir um sistema de tarifas *feed-in*, onde o consumidor é premiado por gerar energia limpa e por exportá-la à rede, através de tarifas pré-estabelecidas por contrato.

Não obstante, a Alemanha tem um índice de radiação solar entre 900 e 1250 kWh/m²/ano, segundo Nota Técnica da EPE, índice muito inferior a países com baixas latitudes, incluindo a região sul do Brasil, como por exemplo a costa norte do estado de Santa Catarina que apresenta média de 1551 kWh/m²/ano. (EPE, 2011).

2.2 PANORAMA BRASILEIRO

Ao contrário de países europeus e asiáticos bem como dos Estados Unidos, que apresentam forte crescimento do parque solar instalado, o uso desta tecnologia no Brasil é praticamente inexistente.

Dada a atual situação de competitividade e avanços tecnológicos da energia fotovoltaica, fica claro que esta diferença existe devido aos diferentes interesses e incentivos por parte dos governos.

No entanto, torna-se cada vez mais iminente a viabilização desta tecnologia no Brasil, devido à crescente redução nos custos e aumento da eficiência das células e painéis solares e pelo enorme potencial de radiação solar brasileiro.

Isto fez com que em 2012 fosse bastante produtivo em termos de incentivos e regulamentações na área de energia fotovoltaica, principalmente por parte da ANEEL.

A energia solar fotovoltaica, não incluída no principal programa brasileiro de incentivo a fontes alternativas de geração de energia - PROINFA – é destacada em 3 publicações de grande relevância:

- ANEEL: Chamada nº 013/2011 Projeto Estratégico: “Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira” Agosto de 2011;

- Resolução Normativa Nº 482, da ANEEL sobre inserção da geração fotovoltaica no Brasil;

- Nota Técnica EPE: Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira – Maio de 2012.

A chamada da ANEEL nº 013/2011, intitulada de Projeto Estratégico: “Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira” de agosto de 2011, é uma chamada para projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) nessa área, destinada às empresas concessionárias de distribuição e geração de energia, que devem investir, de forma compulsória, uma fração de suas receitas operacionais líquidas em P&D. Esta chamada teve como objetivos o desenvolvimento científico e tecnológico da cadeia produtiva de geração solar fotovoltaica(GSF), da capacitação profissional e da infraestrutura laboratorial de empresas e institutos de pesquisa, contribuindo para a redução de custos e aumento da competitividade, além de demandar aprimoramentos normativos e regulatórios.

Os projetos deveriam obedecer aos seguintes requisitos:

- capacidade instalada entre 0,5 MWp e 3,0 MWp;
- sistema de monitoração para avaliação de desempenho;
- contrapartida de recursos financeiros (na proporção do benefício econômico do empreendimento);
- estudo das tecnologias atuais e dos impactos da GSF na rede elétrica;
- análise da legislação pertinente (geração, conexão e comercialização);
- intercâmbio com especialistas estrangeiros de notório saber;
- inventário de locais mais adequados/promissores à GSF;
- análise de custo dos componentes e de formação de tecnologia nacional;

Com isto, eram esperados os seguintes resultados:

- estudo de viabilidade econômica do projeto, incluindo todos os custos e os benefícios econômicos da GSF;
- sugestões de adequação das tecnologias existentes às condições de operação em território nacional;
- estudo da longevidade e do desempenho dos componentes ao longo da vida útil do projeto;
- propostas de arranjos técnicos e comerciais para a viabilidade da energia solar fotovoltaica no sistema elétrico nacional;
- sugestões de mecanismos regulatórios de incentivo à GSF;
- proposta de transferência de tecnologia.

Ao final da chamada, 18 projetos foram encaminhados à ANEEL, totalizando 25 MW de potência instalada e R\$ 395 milhões em investimentos, com limite de 180 dias para início da execução da obra e 36 meses para sua conclusão.

Em 17 de Abril de 2012 a ANEEL lançou o que pode ser considerado um marco regulatório para a inserção da geração fotovoltaica no Brasil: a Resolução Normativa N^o 482, que “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.”

A resolução adota as seguintes definições:

1. Microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, **solar**, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;
2. Minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW para

fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

3. Sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa gerada por unidade consumidora com microgeração distribuída ou minigeração distribuída compense o consumo de energia elétrica ativa.

O acesso ao sistema de distribuição deve ser feito utilizando as normas técnicas da distribuidora em questão. Estas têm 240 dias a partir da data de publicação desta resolução para elaborar ou revisar suas normas de acesso, utilizando como referência os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST.

Assim, ao contrário de sistemas *feed-in tariff*, como é o caso da Alemanha, o Brasil adotou o sistema de compensação, também chamado *Net Metering*. O sistema de compensação (*Net Metering*) leva em conta a diferença entre a energia consumida e injetada (em kWh), levando-se em conta as tarifas em diferentes horários. Caso a energia injetada seja superior à energia consumida, são gerados créditos com validade de 36 meses (3 anos) para posterior compensação, possibilitando ao consumidor compensar o consumo e sua própria geração sem levar em consideração os períodos de consumo ou de geração de energia. Caso a energia consumida seja menor que a energia injetada, o consumidor somente paga a diferença entre o que consumiu e o que gerou.

A compensação poderá ser feita na própria unidade consumidora ou em outra unidade cadastrada e atendida pela mesma distribuidora e tendo o mesmo proprietário como titular.

Contudo, para fins de faturamento, mesmo se o saldo de geração de energia for positivo para o consumidor, o mesmo está sujeito a uma tarifa mínima mensal referente ao custo de disponibilidade definido pela distribuidora para o consumidor do tipo B ou da demanda contratada no caso do consumidor do tipo

A. Todas estas informações referentes ao saldo deverão estar presentes na fatura mensal do consumidor.

A medição deve ser feita por medidores eletrônicos bidirecionais instalados no ponto de conexão com a rede, cujos custos são de responsabilidade do consumidor. Porém, devem atender as especificações do PRODIST e da distribuidora. Uma vez instalados, a manutenção e operação fica por conta da própria distribuidora.

As diretrizes para conexão com a rede esperadas pelas distribuidoras aliado ao sistema *Net Metering* adotado no Brasil pela ANEEL como mecanismos de incentivo e regulamentação, constituem um ponto crucial no avanço e disseminação do uso de geração distribuída e energias renováveis no Brasil tal como a energia solar.

A mais recente publicação da EPE de grande impacto ao setor de GSF é a Nota Técnica EPE: Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira – Maio de 2012.

Neste âmbito regulatório, esta-se a um passo de tornar possível a conexão com a rede de micro e mini sistemas de geração distribuída, faltando somente a normatização que deve ser disponibilizada por cada concessionária de energia elétrica. Com esta normatização, espera-se garantir dois pontos de extrema importância neste novo modelo de rede de distribuição de energia elétrica:

1. **Qualidade da energia**, que deve a princípio atender as normas NTC e módulo tal do PRODIST;
2. **Segurança**, tanto de pessoas em caso de manutenção em linhas, onde não deve haver presença de tensão ou injeção de corrente por parte da mini ou microgeração através dos inversores, e também a proteção dos equipamentos.

2.3 POTENCIAL DE GERAÇÃO BRASILEIRO

A energia utilizada pelas células fotovoltaicas provenientes da irradiação solar são medidas geralmente em Irradiação Global Horizontal (GHI) e Irradiação Normal Direta (DNI). A irradiação normal direta é a quantidade que atinge o solo diretamente, e é muito variável ao longo do dia. Não obstante, os painéis solares atualmente fabricados não são sensíveis à DNI, mas tem sua eficiência relacionada à GHI, que é pouco variável durante o dia. A GHI é a soma das irradiações direta (DNI) e difusa, que consiste na quantidade de luz incidente sobre uma superfície horizontal, levando em conta as parcelas atenuadas e dispersas por nuvens e poluição, o que faz com que os painéis continuem gerando eletricidade mesmo em dias nublados.

Para o cálculo do potencial de geração solar fotovoltaica, dois dados básicos são necessários: eficiência ou rendimento das placas e radiação solar, geralmente representada em kWh/m². Os dados de eficiência são dados de placa das células, obtidos em laboratório. O ponto mais importante torna-se portanto uma análise da radiação solar do local onde pretende-se instalar um sistema de geração fotovoltaico.

Alguns institutos formulam mapas de fluxo de radiação o que é comumente chamado de Atlas Solarimétrico. Entre eles o Atlas Brasileiro de Energia Solar, de 2006, desenvolvido pelo INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - e NASA – *National Aeronautics and Space Administration* em parceria com o projeto SWERA – *Solar and Wind Energy Resource Assessment*, e também o Atlas Solarimétrico do Brasil, de 2000, desenvolvido pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica, Sergio de Salvo Brito – CRESESB.

O Brasil possui um ótimo potencial de geração solar, sendo o litoral leste a região mais beneficiada pelo Sol. A cidade de Curitiba registra uma média de aproximadamente 3,9 kWh/m²/dia seguindo as principais fontes de dados apresentados na Tabela 2.2.

TABELA 2.2: Irradiação solar em kWh/m²/dia segundo fontes de dados variadas

	CRESESB	INPE	NREL	NASA	SolarGIS	Média
Curitiba	3,7	4,6	4,2	4,3	-	4,20
Berlim	-	-	-	2,7	3,2	2,95
Fortaleza	5,6	5,3	4,0	5,8	-	5,18

FONTE: Elaboração própria

Ainda segundo NOTA TÉCNICA EPE - Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira (2012), a irradiação média anual brasileira varia entre 1.200 e 2.400 kWh/m²/ano, valores que são significativamente superiores a maioria dos países europeus, cujas estatísticas indicam intervalos entre 900 e 1.250 kWh/m²/ano na Alemanha, entre 900 e 1.650 kWh/m²/ano na França e entre 1.200 e 1.850 kWh/m²/ano na Espanha.

Mesmo sendo bastante inferior às áreas de maior insolação, como as regiões secas de baixas latitudes como o nordeste brasileiro, Curitiba apresenta uma média de irradiação solar superior à Alemanha, que é ícone mundial em produção e consumo de energia solar fotovoltaica e em 2009 contava com cerca de 15 GW de potência instalados, correspondendo a cerca de 53% do potencial instalado mundial (EPIA, 2011).

Assim, tendo em vista os incentivos nacionais, os avanços tecnológicos na geração fotovoltaica, assim como o uso crescente da mesma em todo o mundo, fica claro a importância que ela tem e terá na matriz energética mundial. Sendo assim importante desenvolver aplicações da mesma, procurando difundi-la e divulgá-la.

2.4 CUSTOS DE INVESTIMENTO NO MUNDO

O custo de investimento em sistemas fotovoltaicos pode ser decomposto em três itens principais: os painéis fotovoltaicos, inversor de linha e o *Balance of the System* – BoS, que engloba as estruturas mecânicas de sustentação, equipamentos elétricos auxiliares, cabos e conexões e a engenharia necessária para a adequação dos componente do sistema, assim como os custos gerais de instalação e montagem. (NOTA TÉCNICA EPE - Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira, 2012).

Do início do século para cá, o preço dos painéis solares vêm caindo, enquanto o preço do BoS e dos inversores vêm se mantendo praticamente estáveis.

No ano de 2000, o preço europeu do painel era de 4,2 euros/Wp e caiu para 1,2 euros/Wp em 2011.



Figura 2.1: Preços de sistemas fotovoltaicos na Europa

Fonte: EPIA (2011)

Uma vez que os painéis solares correspondem a 60% do custo total do sistema (10% é atribuído ao inversor e 30% ao BoS), a sua queda de preço, observada na Figura 2.1 e 2.2, tem diminuído o preço total final do produto que têm caído acentuadamente ao longo dos anos.

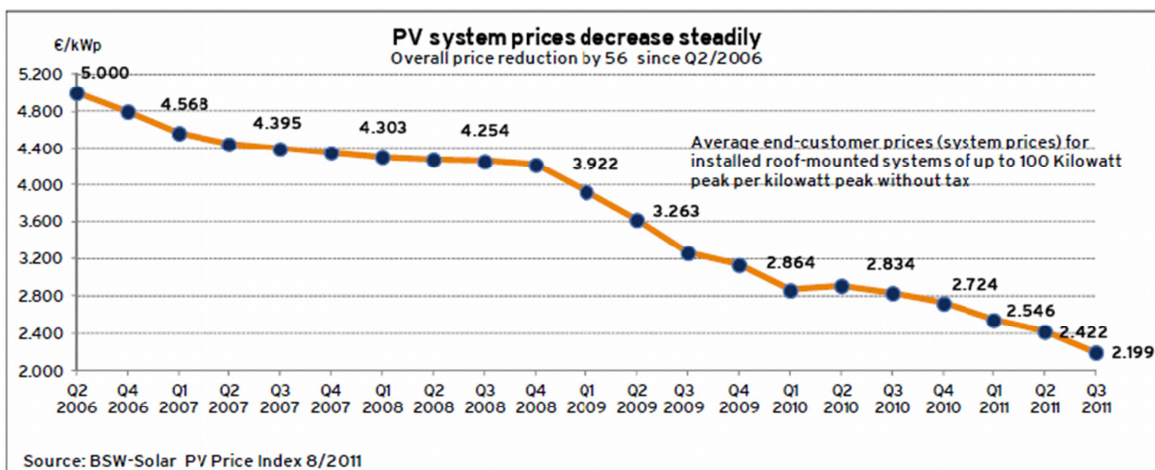


Figura 2.2: Evolução recente dos preços dos sistemas fotovoltaicos

FONTE: BSW-Solar PV Price Index 08/2011

De acordo com a *Solar Energy Industries Association – SEIA*, o preço médio de sistemas fotovoltaicos não residenciais alcançou US\$ 4,94/Wp no terceiro trimestre de 2011. Já o preço médio final *turn key* de sistemas residenciais alcançou US\$ 6,24/Wp no mesmo período.

Em resumo, o preço médio internacional, já com impostos nos seus mercados de origem, e custo de montagem, que corresponde a 20% do investimento, estão apresentados na Tabela 2.3.

TABELA 2.3: Custo de investimento em sistemas fotovoltaicos (US\$/kWp)

Potência	Painéis	Inversores	Instalação & Montagem	TOTAL
Residencial (4-6kW _n)	2,23	0,57	0,70	3,50
Residencial (8-10kW _n)	2,02	0,50	0,63	3,15
Comercial (100kW _n)	1,74	0,42	0,54	2,70
Industrial (≥1.000kW _n)	1,60	0,30	0,48	2,38

Nota: Preços com impostos nos seus mercados de origem.

Fonte: Elaboração própria a partir de pesquisa diretamente em "sites" de lojas especializadas norte-americanas (Solar Electric Supply, DM Solar e outras).

FONTE: Nota Técnica EPE – Análise da Inserção da Energia Solar na Matriz Energética Brasileira, EPE, 2012

2.5 CUSTOS DE INVESTIMENTO NO BRASIL

2.5.1 Custos dos Equipamentos

No Brasil, deve-se considerar a incidência de impostos de importação, IPI, ICMS, PIS e COFINS, o que resulta em um sobrepreço de 32,5%, segundo seguinte análise do Grupo Setorial Fotovoltaico da ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica.

Carga Tributária									
Exemplo instalação Corporativa									
100 kWp									
Componente	Preço cliente final	II	ICMS	IPI	PIS	COFINS	ISS	Carga tributária cliente final	Sistema sem impostos
Modulo	R\$ 406.802	12%	0%	0%	1,65%	7,65%	0%	R\$ 71.802 18%	R\$ 335.000
Inversor	R\$ 156.402	14%	12%	15%	1,65%	7,65%	0%	R\$ 58.594 37%	R\$ 97.808
Estruturas, cabos, conexão	R\$ 195.000	0%	18%	10%	1,65%	7,65%	0%	R\$ 60.937 31%	R\$ 134.063
Projeto, registro, instalação *	R\$ 78.000	0%	0%	0%	1,65%	7,65%	5%	R\$ 14.235 18%	R\$ 63.765
	R\$ 836.203							R\$ 205.567	R\$ 630.636
								→ 25%	75%
Preço sistema R\$/ Wp	R\$ 8,36							R\$ 2,06	R\$ 6,31

Figura 2.3: Preço unitário de sistemas completos

FONTE: Grupo Setorial Fotovoltaico da Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica

Considerando-se uma taxa de câmbio de US\$ 1,00 = R\$ 1,75 criou-se a seguinte tabela em referência ao custo de investimento no Brasil (Tabela 2.4):

Tabela 2.4: Custo de investimento em sistemas fotovoltaicos – referência no Brasil (R\$/kWp)

Potência	Painéis (2)	Inversores	Instalação & Montagem	TOTAL
Residencial (4-6kW _p)	4,88	1,25	1,53	7,66
Residencial (8-10kW _p)	4,42	1,09	1,38	6,89
Comercial (100kW _p)	3,81	0,92	1,18	5,91
Industrial (≥1.000kW _p)	3,50	0,66	1,04	5,20

FONTE: Nota Técnica EPE – Análise da Inserção da Energia Solar na Matriz Energética Brasileira, EPE, 2012

2.5.2 Custo Nivelado

O custo nivelado calculado na Nota Técnica da EPE conforme metodologia sugerida pela EPIA – *Solar photovoltaics Competing in the Energy Solar* – leva em consideração fluxos de entrada e saída de caixa correspondente às despesas e receitas durante a vida útil dos equipamentos. A seguir os parâmetros utilizados na base de cálculos:

Parâmetros econômicos:

- taxa de desconto: 6% ao ano (taxa real, isto é, descontada a inflação; para uma inflação anual de 4,5%, por exemplo, a taxa nominal de desconto seria de 10,8% ao ano);
- vida útil das instalações: 20 anos (exceto inversores: 10 anos);
- custo anual de operação e manutenção: 1% do custo de investimento parâmetros técnicos;
- prazo de maturação do investimento (construção): 3 meses;
- perda de eficiência dos painéis: 0,65% ao ano, com correspondente decréscimo da energia produzida;
- fator de capacidade: 15,1%.

A Tabela 2.5 apresenta os resultados do custo nivelado de geração:

Tabela 2.5: Competitividade da Geração Fotovoltaica – Custo nivelado de geração

Aplicação	Potência (kW_p)	Investimento inicial (R\$ mil)	Custo nivelado de geração (R\$/MWh)
Residencial	5	38	602
	10	69	541
Comercial	100	591	463
Industrial	1.000	5.185	402

FONTE: Nota Técnica EPE – Análise da Inserção da Energia Solar na Matriz Energética Brasileira, EPE, 2012

A Tabela 2.6 apresenta os valores médios cobrados pelas concessionárias no Brasil. Foi usado uma alíquota de 6% de PIS/COFINS, 25% de ICMS para Residencial e 21% para Comercial e Industrial. A faixa de consumo residencial utilizada foi de consumo mensal igual ou superior a 500 kWh e as tarifas foram homologadas pela ANEEL.

Tabela 2.6: Tarifas homologadas na ANEEL – Valores médios regionais em 2011 (R\$/MWh)

Setor	Mínimo	Máximo	Média
Residencial	444	464	457
Comercial	387	443	406
Industrial	318	432	336

FONTE: Nota Técnica EPE – Análise da Inserção da Energia Solar na Matriz Energética Brasileira, EPE, 2012

Apesar da diferença entre o valor médio cobrado pela concessionárias e o custo nivelado da geração, vale ressaltar que, segundo dados da ANEEL de tarifas para o início de 2011, 10 concessionárias tinham tarifas superiores ao custo nivelado de geração para 5 kWp (R\$602/MWh): entre elas Energisa Minas Gerais (Minas Gerais), Cemar (Maranhão), Cepisa (Piauí), Ampla (Rio de Janeiro) e Cemig (Minas Gerais).

Ainda que não se possa afirmar que a geração fotovoltaica é economicamente viável no Brasil, já existem situações em que existe nítida competitividade de custo.

Ainda assim, fica clara a necessidade de medidas de incentivos a geração fotovoltaica distribuída.

3 TECNOLOGIA

3.1 HISTÓRICO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A conversão direta da luz em energia elétrica através do efeito fotovoltaico é denominada Energia Solar Fotovoltaica.

O efeito fotovoltaico foi relatado primeiramente em 1839 pelo físico francês Edmond Becquerel, que observou o surgimento de uma diferença de potencial nas extremidades de um material semiconductor quando exposto à luz.

A partir de 1956, momento das novas descobertas da microeletrônica, começaram a ser produzidas as primeiras células fotovoltaicas industriais.

Devido a seu alto custo e baixa eficiência, não eram viáveis em aplicações residenciais, comerciais e mesmo industriais de pequeno porte.

Um de seus primeiros usos significativos foi em satélites, onde o custo não é fator limitante e a quantidade de radiação solar é contínua e de alta intensidade. Com o tempo, começaram a ser implantadas em estações remotas de telecomunicações.

Em 1973 ocorreu o segundo momento impulsionador desta tecnologia, quando o mundo procurava investir em fontes de energia renováveis frente à crise do petróleo. Outras fontes foram mais adotadas pois o alto custo de produção e baixo rendimento ainda assombravam as células fotovoltaicas disponíveis na época.

Um desenvolvimento mais acelerado da indústria de células fotovoltaicas ocorreu somente na década de 90, visando ampliar os horizontes da utilização em massa da energia solar, amparado por inúmeros programas no mundo todo, demonstrando a viabilidade técnico-comercial em projetos como os de eletrificação rural nos países em desenvolvimento.

Mesmo passada a crise do petróleo, o fortalecimento do movimento de defesa ao meio ambiente e desenvolvimento sustentável continuaram impulsionando o desenvolvimento da indústria. A produção mundial passava de 1 MWp/ano para 10 MWp/ano em 1998.

Atualmente, a redução de custo dos sistemas ainda é um desafio, mas os valores foram significativamente reduzidos, e propostas como Rio + 20 prometem incentivos fiscais e subsídio a projetos que envolvem tecnologias verdes.

Pode-se observar um forte investimento em pesquisas, com recentes aperfeiçoamentos na terceira geração das células solares, que envolvem filmes finos com aplicações semi-transparentes até a produção de células com material orgânico.

3.2 EFEITO FOTOVOLTAICO

As células fotovoltaicas são produzidas com material semicondutor, ou seja, material com valor condutividade entre isolantes e condutores. São caracterizados por terem banda de valência e condução separadas por uma faixa de energia (*gap*) menor ou igual a 3 eV.

O principal representante dos semicondutores é obtido através da dopagem de silício. Este é encontrado naturalmente em forma de areia, e através de métodos adequados obtêm-se o cristal puro de silício. O cristal de silício possui 4 elétrons na sua camada de valência em ligação covalente e não possui elétrons livres, caracterizando portanto um mal condutor de eletricidade.

O cristal de silício é então adicionado de outros elementos para alterar suas características, processo este chamado de dopagem.

Dopando o silício com um elemento como o fósforo, que possui 5 elétrons na camada de valência, a cada átomo de fósforo de adicionado resulta em um

elétron livre na banda de condução. Isto caracteriza um material semicondutor de tipo N, ou portador de carga negativa.

Se por outro lado, adicionamos um elemento com 3 elétrons na camada de valência, como o Boro, teremos lacunas de elétrons facilmente preenchidas por elétrons ligados a átomos vizinhos movendo as lacunas, ou cargas positivas, caracterizando um material semicondutor tipo P.

Separadamente, cada material semicondutor tipo N ou P é eletricamente neutro. Ao unir-se um semicondutor tipo P a um condutor tipo N, ou mesmo utilizando uma única estrutura de silício e dopando-se uma extremidade com um elemento doador e outra com um elemento receptor, cria-se uma junção P-N.

Nesta região, os elétrons livres da porção N do semicondutor movem-se para a região P preenchendo as lacunas. Como a princípio as duas partes eram eletricamente neutras, com o decorrer desta migração de elétrons da região tipo N para a região tipo P cria-se um potencial elétrico negativo na região P e positivo na região N. Esta migração ocorre até que a diferença de potencial entre as regiões cria um campo elétrico que atua como barreira impedindo a migração de elétrons e estabelecendo um equilíbrio elétrico.

Este valor de campo elétrico de equilíbrio estabelece o valor do *gap* de energia necessária para que novamente um elétron atravesse a junção.

Quando a junção é exposta à incidência de fótons com energia maior que o *gap*, ocorre a geração de pares elétron-lacuna. Se isto ocorre onde o campo elétrico é diferente de zero ocorre a aceleração de cargas, e os elétrons na região P movem-se para a região N, gerando uma corrente através da junção. Neste caso, gera-se uma ddp nos terminais externos das junções, e se forem conectadas através de um condutor cria-se uma circulação de corrente.

As Figuras 3.1 e 3.2 ilustram o funcionamento de uma célula fotovoltaica.

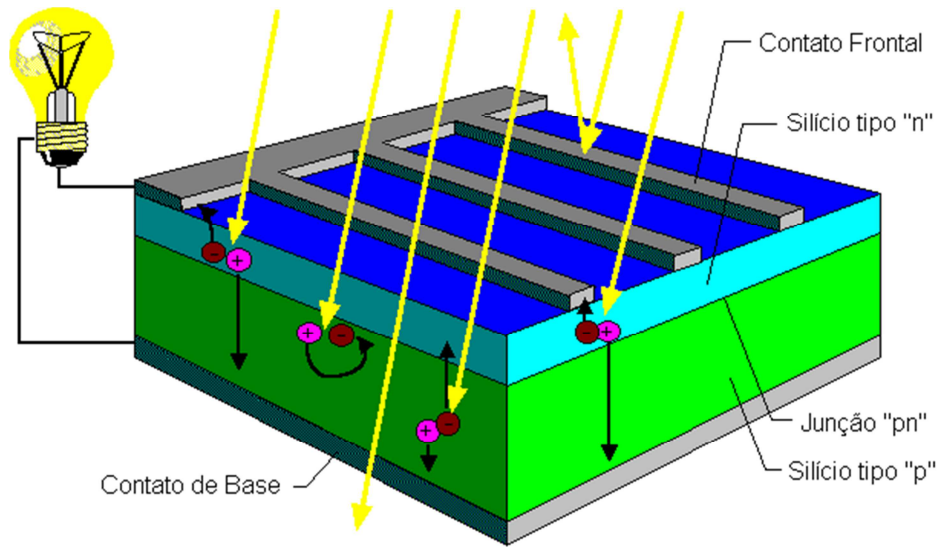


Figura 3.1: Corte transversal de uma célula fotovoltaica.
FONTE: TUTORIAL DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA, CRESESB (2012)

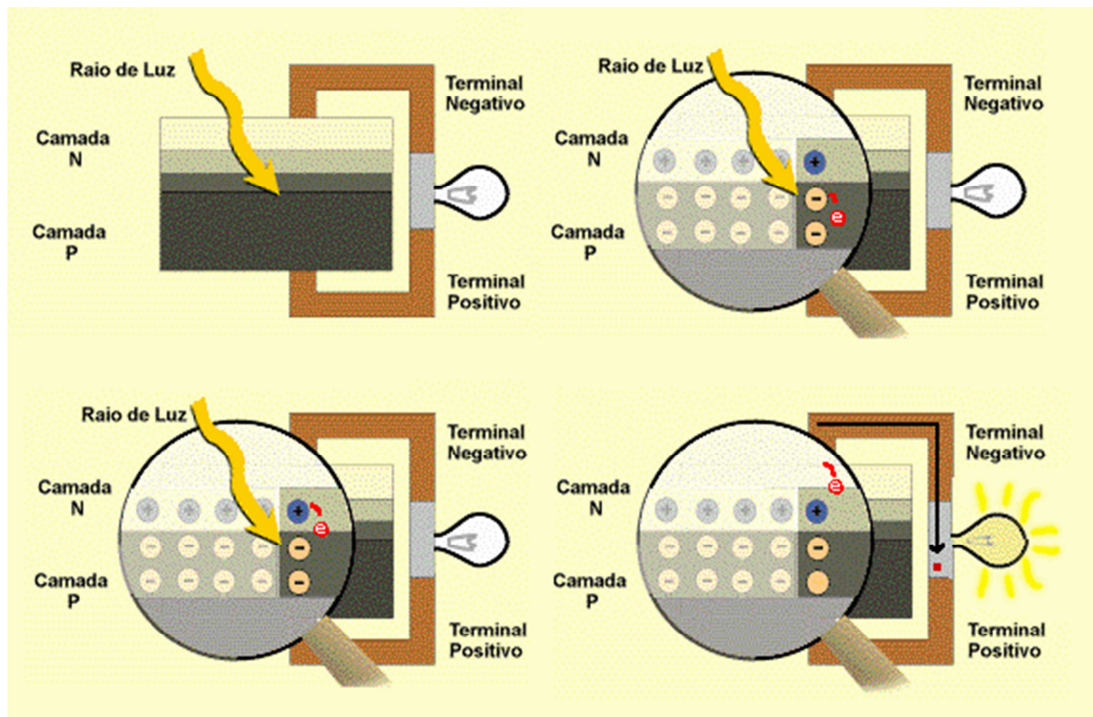


Figura 3.2: Efeito fotovoltaico na junção P-N
FONTE: TUTORIAL DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA, CRESESB (2012)

3.3 ESTRUTURA DE UMA CÉLULA FOTOVOLICA

As células fotovoltaicas são construídas utilizando-se uma fina camada de óxido de silício, transparentes e com alta condutividade elétrica. Estas células são fabricadas em sua maioria sendo constituídas de cristais monocristalinos, policristalinos ou amorfos (Figura 2.3).

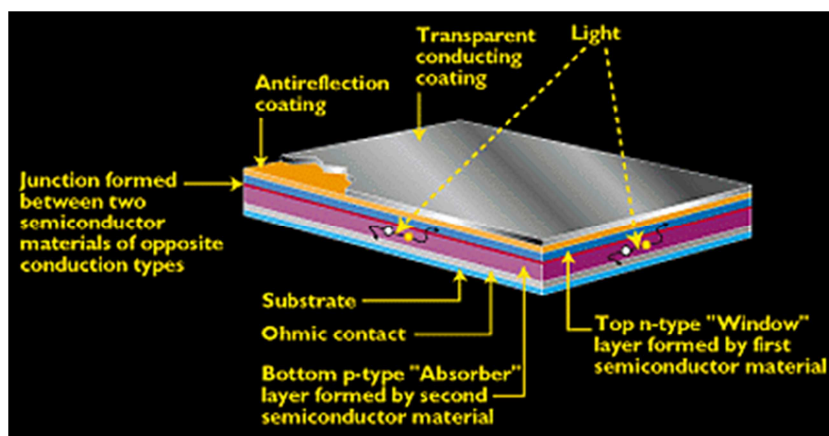


Figura 3.3: Estrutura de uma célula fotovoltaica

FONTE: <http://www.eletrica.ufpr.br/edu/Sensores/2000/> (acesso em 03.04.2012)

3.3.1 Silício Monocristalino

A célula de silício monocristalino é a mais amplamente utilizada comercialmente, de processo construtivo relativamente simples e boa eficiência comparada às células de cristal policristalino e amorfo, entre 12% e 15% para uso comercial.

São obtidas a partir de barras de silício monocristalino produzidas em fornos especiais, que garantem um alto grau de pureza, devendo chegar a faixa de 99,9999%. O silício é fundido juntamente com uma pequena quantidade de dopante tipo P, normalmente o Boro, e então cortada em finas fatias de aproximadamente 0,3 mm. Após o corte e limpeza de impurezas, é adicionado o dopante tipo N.

A Figura 3.4 ilustra uma célula de silício monocristalino.

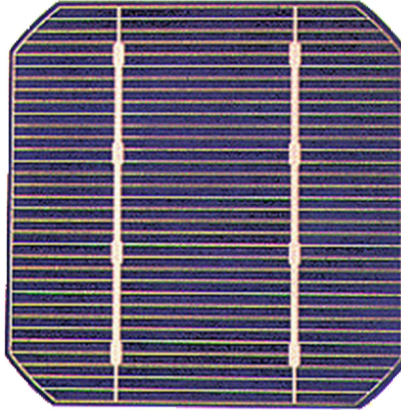


Figura 3.4: Célula de Silício Monocristalino

FONTE: TUTORIAL DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA, CRESESB (2012)

3.3.2 Silício Policristalino

O processo de fabricação de células de silício policristalino é menos rigoroso que das células de silício monocristalino, o que acarreta uma perda na eficiência, chegando no máximo a 12,5%, mas ganha-se no baixo custo de fabricação. Consiste na fusão de silício em moldes e resfriado lentamente, onde os átomos se reorganizam não em um único, mas em vários cristais (Figura 3.5).

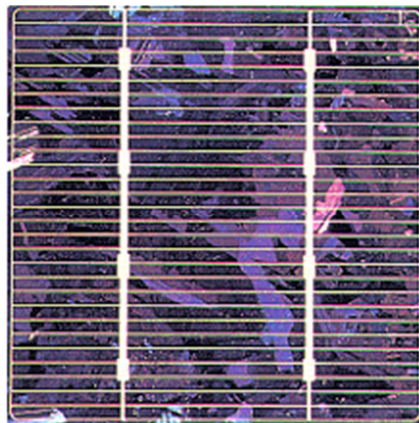


Figura 3.5: Célula de silício policristalino

FONTE: TUTORIAL DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA, CRESESB (2012)

3.3.3 Silício Amorfo

As células de silício amorfo são as de mais baixo custo, produzidas a partir da disposição de camadas finas de silício sobre vidro ou outros substratos. Apresenta alto grau de desordem entre os cristais, desse modo atingindo baixas taxas de eficiência, entre 5% e 7%. Outra desvantagem é sua acelerada deterioração.

3.3.4 Células de filmes finos

Estas células se diferenciam das de outras tecnologias pela espessura das lâminas de material semiconductor utilizado em suas estruturas (geralmente na faixa de 1 μm contra 300 a 400 μm das células de C-Si).

Estes filmes finos são depositados sobre substratos de baixo custo, como vidro, aço, inox e alguns plásticos. Apesar de sua menor eficiência, cerca de 8% a 9% no mercado, as características mecânicas destes filmes, flexíveis, leves e semitransparentes, aliados ao seu reduzido custo devido à quantidade de material envolvido, estão ampliando o mercado fotovoltaico e dando uma maior versatilidade ao uso das células solares na arquitetura (Figura 3.6).

Entre os materiais e tecnologias utilizados para construção de filmes finos estão o silício amorfo (**a-Si**), Telureto de Cádmiio (**CdTe**), Disseleneto de Cobre e Índio (**CIS**) e Arseneto de Gálio (**GaAs**).

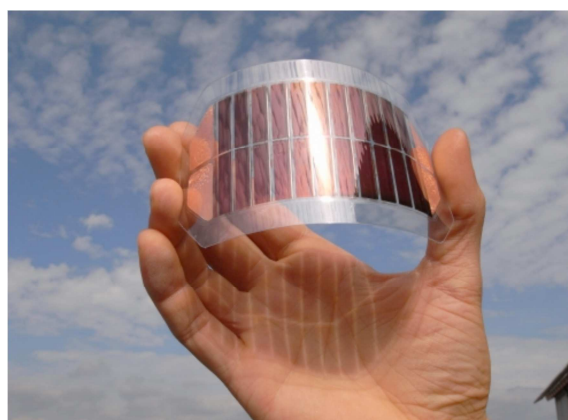


Figura 3.6: Célula Fotovoltaica de filme fino

FONTE: <http://www.newhome.com.br/HTMLs/Ekohome/Solar/Fotovoltaico/> (Acesso em 20 de Agosto de 2012)

3.4 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos consistem basicamente dos seguintes elementos:

1. Módulos fotovoltaicos para coleta da radiação solar: São conjuntos de células fotovoltaicas;
2. Inversores: equipamentos que convertem a energia gerada em corrente contínua pelos módulos fotovoltaicos para corrente alternada. Isto faz com que o sistema seja compatível com as redes de distribuição de energia e equipamentos elétricos/eletrônicos comumente utilizados para transformação da corrente contínua gerada pelos módulos para corrente alternada;
3. Conjunto de baterias (no caso de um sistema isolado);
4. Suportes estruturais para orientação espacial dos módulos.

3.4.1 Módulos Fotovoltaicos

As células fotovoltaicas, devido a suas dimensões construtivas, apresentam baixa tensão e corrente de saída, tipicamente 3 A e 0,7 V para células de silício monocristalino. Sendo assim, agrupam-se várias células fotovoltaicas para compor um módulo fotovoltaico. Este arranjo geralmente é feito em série, para se obter uma tensão de saída mais elevada e compatível com as tensões de consumo, geralmente 12 ou 24 V.

A gráfico da Figura 3.7 apresenta as curvas características de tensão e corrente padrão de módulo fotovoltaico.

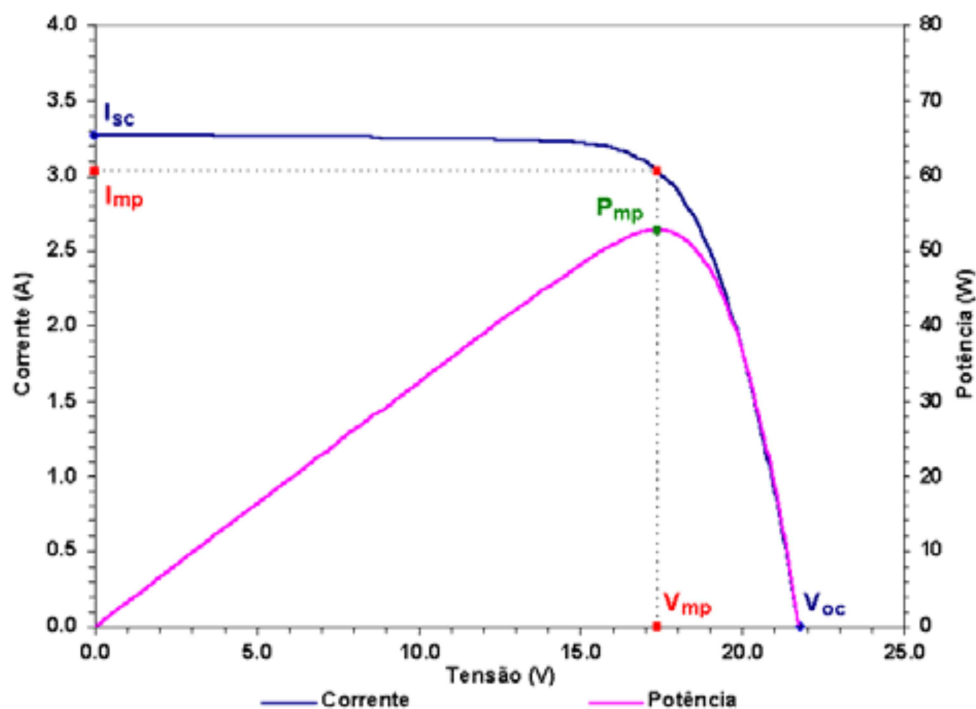


Figura 3.7: Curvas características de tensão e corrente de módulo fotovoltaico
 FONTE: <http://www.solenerg.com.br/> (acesso em 04.04.2012)

No gráfico da Figura 3.7, pode-se observar o comportamento de um módulo fotovoltaico. Nota-se que o mesmo não se comporta como uma fonte elétrica convencional, uma vez que não apresenta tensão de saída constante, pois esta depende da corrente de saída e vice-versa. Este módulo somente opera com valores de tensão e corrente que estejam de acordo com as curvas I – V e P – V. Seu ponto de operação depende da carga conectada aos terminais. Se a carga consome muita corrente, a tensão tende a cair, se a corrente diminui, a tensão tende à tensão de curto-circuito (V_{oc}) conforme a curva azul I – V.

Nota-se na curva P – V um ponto P_{mp}: este é o ponto de potência máxima do módulo ou sistema, e é neste ponto que devemos operá-lo.

Os principais parâmetros de um módulo fotovoltaico incluem:

- Tensão de curto-circuito (V_{oc}): valor de tensão na saída do módulo em circuito aberto, quando I = 0. É a máxima tensão de saída do módulo;
- Corrente de curto-circuito (I_{sc}): corrente de curto circuito, quando V = 0. É a máxima corrente fornecida pelo módulo;

- Potência de pico ou Máxima Potência (Pmp): potência máxima que pode ser extraída da célula, referente ao ponto Pmp do gráfico da Figura 3.7;
- Tensão de máxima potência (Vmp): tensão para qual ocorre a potência máxima, referente ao ponto de máxima potência mostrado no gráfico da Figura 3.7;
- Corrente de máxima potência (Imp): corrente para a qual ocorre a potência máxima, referente ao ponto de máxima potência mostrado no gráfico da Figura 3.7;
- Eficiência do módulo (η): A eficiência de um módulo é a taxa de desperdício na conversão de energia em forma de irradiação solar para energia elétrica. Embora não esteja presente em algumas folhas de dados de equipamentos pode ser calculada através da seguinte fórmula:

$$\eta_p = P_{\text{máx}} / (A_p \times 1000) \quad (3.1)$$

onde $P_{\text{máx}}$ é a máxima potência do módulo e A_p é a área do módulo, calculada a partir das dimensões fornecidas na folha de dados.

Os parâmetros dos módulos são definidos para uma radiação de 1000 W/m² (valor médio de superfície terrestre em dia claro, ao meio dia), e temperatura de 25° (a eficiência da célula é reduzida com o aumento da temperatura), padronização denominada STC (*Standard Test Conditions*) que torna possível a comparação entre módulos de diversos fabricantes.

A seguir, é apresentada parte da folha de dados do Módulo Fotovoltaico SM-48 KSM da Kyocera, módulo de Silício Multicristalino de 48 W.

High-efficiency photovoltaic module using multicrystalline solar cells.



Performance

Rated power [P_{max}]	48W
Power tolerance	+10, -5%
Limited Warranty	20 years

Electrical Performance under Standard Test Conditions(*STC)

Maximum power [P_{max}]	48W
Open-circuit voltage [Voc]	22.1V
Short-circuit current [Isc]	2.89A
Maximum power voltage [Vpm]	18.6V
Maximum power current [Ipm]	2.59A
Maximum Series fuse rating	6A
Maximum system voltage	600VDC

*STC : Irradiance 1000W/m², AM1.5 spectrum, module temperature 25°C

Electrical Performance at 800W/m², NOCT*, AM1.5

Maximum power [P_{max}]	34W
Open-circuit voltage [Voc]	20.5V
Short-circuit current [Isc]	2.26A
Maximum power voltage [Vpm]	17.1V
Maximum power current [Ipm]	2.02A

*NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) : 47°C

Mechanical Characteristics

Dimensions	Length : 560mm Width : 680mm Depth : 38mm (tolerance \pm 2 mm)
Weight	4.5kg
Solar Cells	36cells in a 4 x 9 matrix connected in series
Output Cables	Cable with polarized weatherproof DC rated connectors; Cable length:1000mm (+ -)
Construction	Front: High-transmission 3.2mm low iron tempered glass; White back sheet Encapsulant; EVA
Frame	Anodized aluminum frame; Color: silver

Manufactured by S-ENERGY, KOREA

Figura 3.8: Dados técnicos do módulo fotovoltaico Kyocera SM-48 KSM
FONTE: Catálogo do fabricante

Na folha de dados apresentada, nota-se a presença de duas condições para os parâmetros, uma em STC, e uma em NOTC (*Normal Operation Cell Temperature*), que representa condições mais próximas das condições reais de operação do módulo.

3.4.2 Principais fatores de influência

Segundo VILLALVA M.G. (2012), além das características da carga conectada ao sistema, dois fatores são de fundamental importância na geração de energia a partir das células solares:

- radiação solar: a corrente que o módulo solar fornece é diretamente proporcional à radiação solar incidente sobre ele;
- temperatura: a tensão fornecida pelo módulo solar é inversamente proporcional à temperatura do mesmo.

Ambos os fatores influenciam diretamente na potência fornecida pelo módulo, conforme ilustrado nas Figuras 3.8 e 3.9.

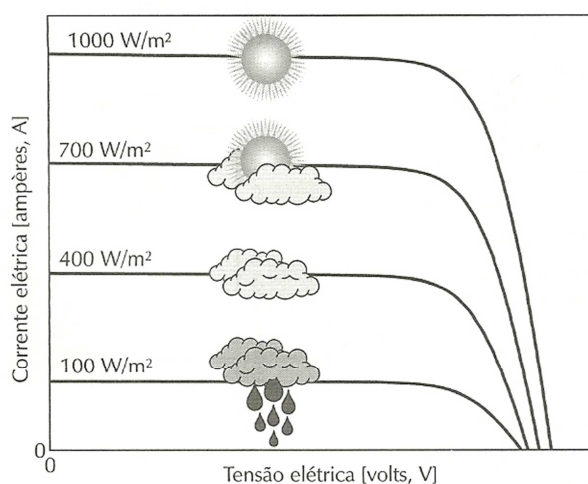


Figura 3.9: Influência da radiação solar na operação do módulo fotovoltaico.
FONTE: ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA – CONCEITOS E APLICAÇÕES,
VILLALVA M.G., 2012.

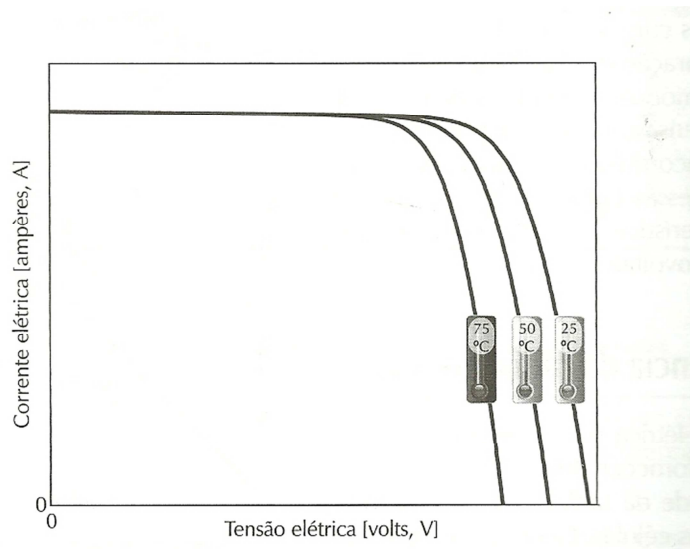


Figura 3.10: Influência da temperatura na operação do módulo fotovoltaico.
FONTE: ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA – CONCEITOS E APLICAÇÕES,
VILLALVA M.G., 2012.

4 APLICAÇÕES

4.1 TIPOS DE CONEXÃO

De acordo com as necessidades e recursos disponíveis, pode-se adaptar e classificar os sistemas fotovoltaicos em 3 tipologias básicas:

1. **Sistemas Isolados ou Autônomos:** nesse caso não há conexão com a rede de distribuição, por esta ser inexistente no local ou se o sistema é dedicado à alimentação de cargas específicas. Faz-se necessário o uso de baterias para garantir continuidade de fornecimento, controlador de carga e inversores para equipamentos CA. Como exemplos de aplicação, pode-se citar estações meteorológicas, de telecomunicação, sistemas de bombeamento d'água e até carregadores para celular.
2. **Sistemas Híbridos:** têm como característica o uso de mais de uma fonte de energia. Um bom exemplo é um sistema solar/eólico/diesel, onde a variedade de fontes garante um suprimento mais confiável, utilizando as fontes solar e eólica como primárias e o diesel como fonte reserva. Este sistema geralmente ainda utiliza baterias como acumuladores de energia, necessita de uma unidade de controle de condicionamento e potência para diferentes fontes. Pode ser aplicado em locais fora do alcance da rede elétrica, como pequenas comunidades rurais.
3. **Sistemas conectados à rede:** os sistemas conectados à rede tem como característica principal o fato de estarem ligadas à rede de distribuição da concessionária. Sua principal vantagem é o fato de não precisar utilizar baterias, uma vez que na falta de suprimento por parte do sistema fotovoltaico, a energia consumida é proveniente da rede de distribuição.

Uma vez que o presente trabalho está focado nos sistemas conectados à rede, passaremos a analisar este tipo de conexão e não nos aprofundaremos nos sistemas isolados e híbridos.

4.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA

Inicialmente, os sistemas de conexão à rede elétrica se desenvolveram somente para centrais fotovoltaicas de grande porte, já que se pensava que poderiam, no futuro, resolver certos problemas existentes na geração e distribuição de energia convencional. A medida em que avançou o mercado da eletrônica, começaram também a ser desenhados sistemas de menor porte com a finalidade de atender a pequenas centrais domésticas.

Recentemente, os sistemas solares fotovoltaicos têm sido utilizados de forma integrada à rede elétrica pública. Estas instalações podem apresentar duas configurações distintas: instaladas de forma integrada à edificação (no telhado ou fachada) e, portanto próximo ao ponto de consumo, ou de forma centralizada, como em uma usina geradora convencional, neste caso, mais distante do ponto de consumo.

O sistema integrado junto ao ponto de consumo auxilia na redução do pico de demanda e diminui a dependência das fontes convencionais de energia, de forma não poluente e não prejudicial ao meio ambiente. Além disto, dado o caráter complementar da geração hidrelétrica e solar, onde períodos chuvosos acarretam pouco sol e vice versa, a geração solar em grande escala pode contribuir significativamente para melhor balancear a grande dependência do setor elétrico brasileiro em uma fonte geradora dominante e sazonal como é a geração hidráulica.

A Figura 4.1 ilustra uma instalação de módulos fotovoltaicos de uma residência conectada na rede elétrica.

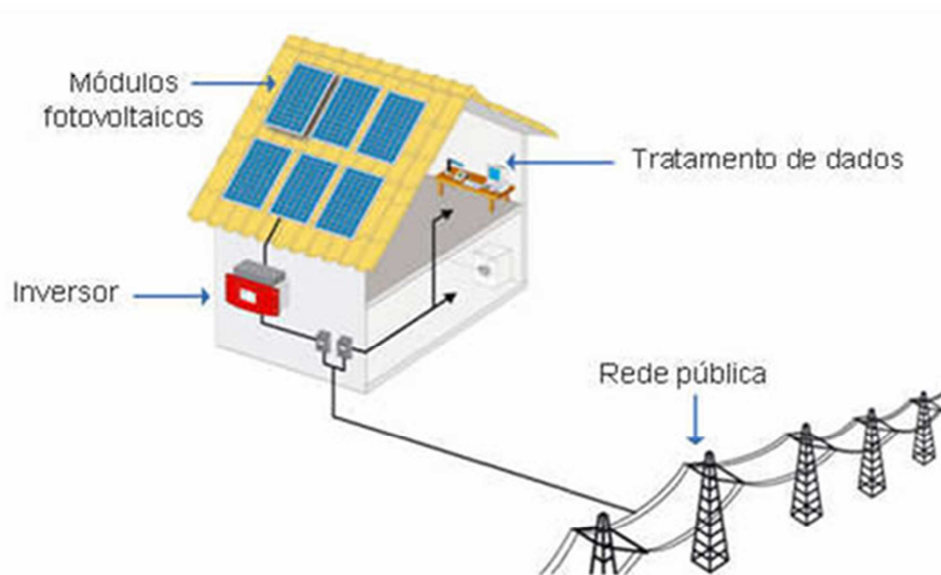


Figura 4.1 Sistema de Conexão *On-Grid*

FONTE: <http://www.energiadosol.net/v2> (Acesso em 18 de Agosto de 2012)

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede podem ser classificados em três categorias, segundo seu tamanho, conforme definições utilizadas pelas ANEEL:

1. Microgeração: potência instalada até 100 kW;
2. Minigeração: potência instalada entre 100 kW e 1 MW;
3. Usinas de eletricidade: potência acima de 1 MW;

As usinas de geração de energia elétrica contam com conjuntos de módulos, inversores centrais com potências que vão além de 1 MW, e transformadores que conectam a usina diretamente às redes de transmissão. Atualmente, a maior usina no mundo conectada à rede está instalada em Ravenna, Itália, com potência de 124 MW.

Os sistemas de minigeração são geralmente instalados em consumidores industriais e comerciais, construídos com o objetivo de suprir parcialmente a demanda de energia elétrica destes consumidores.

Por terem uma característica modular e terem poucos componentes, são de fácil instalação, geralmente sendo fixados aos telhados com técnicas semelhantes às empregadas na instalação de coletores térmicos.

Sua estrutura ainda permite que o sistema seja conectado a redes monofásicas ou trifásicas, dependendo da rede pública de distribuição.

Os sistemas de geração microvoltaica se assemelham à estrutura dos sistemas de minigeração, tendo como diferença sua menor potência instalada, geralmente em consumidores residenciais.

4.3 INVERSORES PARA CONEXÃO À REDE

Os inversores de frequência utilizados em sistemas elétricos fotovoltaicos fazem-se necessários para converter a corrente contínua coletada nos terminais dos módulos fotovoltaicos em corrente alternada, padrão da rede elétrica pública e dos equipamentos eletro-eletrônicos convencionais.

No entanto, há uma diferença básica entre os inversores utilizados em sistemas autônomos e em sistemas conectados. Em sistemas autônomos, os inversores CC-CA funcionam como fonte de tensão para os equipamentos, sendo a única fonte geradora.

Já nos sistemas conectados à rede, cuja tensão e frequência já estão regulados, o inversor CC-CA funciona como fonte de corrente elétrica. Neste caso, os inversores possuem sofisticados sistemas de controle para garantir a injeção de uma corrente senoidal pura e sincronizada com a tensão senoidal na rede de distribuição.

Outra importante função do sistema de controle do inversor é o desligamento automático do mesmo em caso de falha no fornecimento de energia elétrica pela distribuidora. Esta é uma medida de segurança para proteger pessoas que possam estar efetuando a manutenção da rede e também dos próprios equipamentos.

A Figura 4.2 mostra o esquema de funcionamento de um inversor CC-CA conectado à rede.

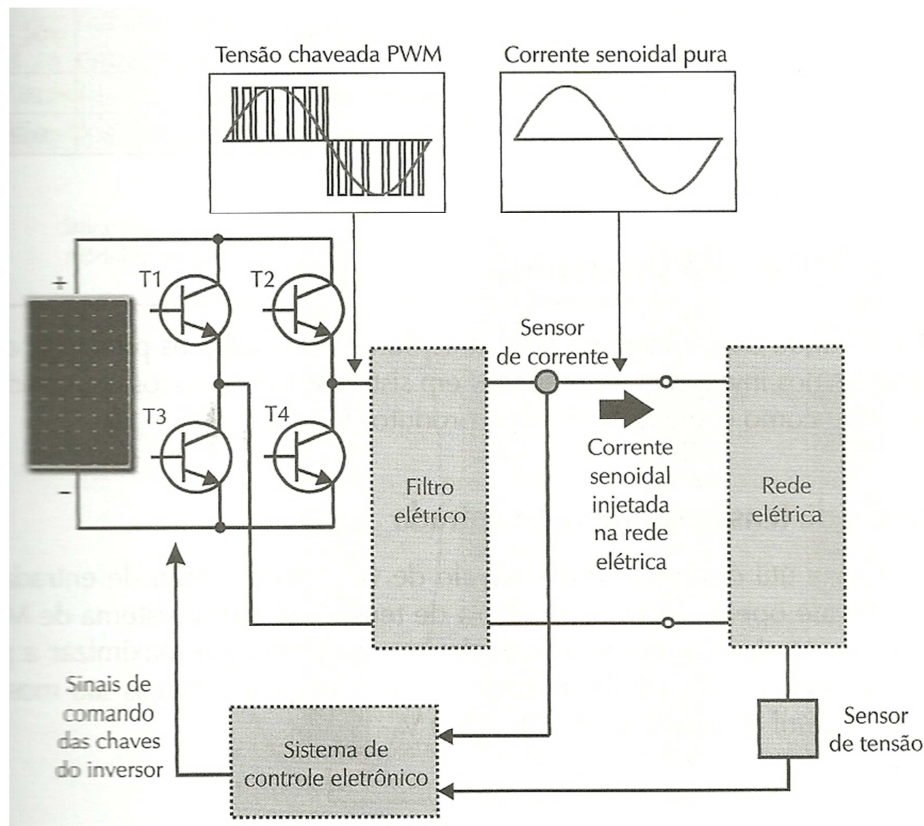


Figura 4.2: Funcionamento de um inversor CC-CA para conexão à rede elétrica.
FONTE: ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA – CONCEITOS E APLICAÇÕES,
VILLALVA M.G., 2012.

Os inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos de pequeno porte têm sua faixa de potência variando de 250 W, compatível com um único painel fotovoltaico, até aproximadamente 5 kW. Podem ser conectados à sistemas trifásicos utilizando inversores monofásicos em conexões trifásicas, embora isto seja mais comum em usinas de geração e inversores com vários kW de potência.

4.3.1 Principais Características dos Inversores

1. Faixa útil de tensão contínua na entrada (MPPT *range*): é o intervalo de valores nos quais o inversor consegue operar maximizando a

produção de energia dos painéis fotovoltaicos. O ponto de máxima potência do conjunto de módulos deve estar dentro dessa faixa.

2. Tensão contínua máxima na entrada: máximo valor de tensão de entrada CC suportado pelo inversor sem sofrer danos. Deve ser superior à tensão de curto-circuito do conjunto de módulos.
3. Número máximo de *strings* na entrada: *Strings* são módulos conectados em série, afim de aumentar a tensão do conjunto. Adicionalmente, *strings* são conectadas em paralelo para aumentar a potência do conjunto. Inversores comerciais geralmente tem 4 entradas MC4, conexão padrão para painéis solares. No caso do sistema conter mais *strings*, devem ser utilizados conectores paralelos ou *string box*.
4. Número de entradas independentes com MPPT (*Maximum Power Point Tracking*): Os inversores comerciais para conexão à rede dispõem de um sistema de rastreamento que força o inversor a operar no ponto de máxima potência. Caso haja mais de uma entrada independente, os sistemas MPPT são individuais para cada entrada, ou seja, para cada *string* ou conjunto de *strings*. Desse modo, se uma *string* está operando com potência diferente, como por efeito de sombreamento, esta compensação se dá automaticamente.
5. Tensão de operação na conexão com a rede: tensão nominal de saída CA do inversor, tipicamente nas faixas ao redor de 120 V e 220 V com faixa de tolerância de aproximadamente 15%.
6. Frequência da rede elétrica: frequência de saída CA, padrão de 60 Hz no Brasil.
7. Distorção da corrente injetada na rede: percentual de distorção da onda de corrente CA. Em geral, as normas permitem 5% de distorção.
8. Grau de proteção (IP): define a capacidade do equipamento de operar em diversos ambientes agressivos, suportando chuva, calor, frio e poeira.

9. Temperatura de operação: faixa de temperatura dentro da qual o inversor opera normalmente.
10. Umidade relativa do ambiente: valor máximo de umidade relativa do ar para operação do inversor em condições normais.
11. Consumo de energia parado: consumo do inversor mesmo não estando em operação, pelos circuitos internos.
12. Consumo de energia em *stand-by*: energia consumida à noite, ou quando o inversor está desligado, para manter suas funções mínimas.
13. Potência de corrente contínua na entrada: valor máximo de potência CC aproveitada proveniente dos painéis fotovoltaicos. Deve estar o mais próximo possível, pois módulos de menor potência subutilizarão o inversor e módulos de maior potência subutilizarão os módulos.
14. Potência de corrente alternada de saída: máxima potência injetada pelo inversor na rede elétrica.
15. Rendimento: este valor indica a relação entre a potência de saída e a potência de entrada do inversor. Este valor é obtido em laboratório, possuindo valores normalmente superiores à 90%.

4.3.2 Recursos e Funções dos Inversores

1. Chave de desconexão de corrente contínua: chave manual de desligamento para manutenção dos equipamentos.
2. MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) – Rastreamento do Ponto de Máxima Potência: recurso que garante a operação no ponto de máxima potência, maximizando constante e instantaneamente a produção de energia.
3. Detecção de ilhamento e reconexão automática: recurso exigido pelas normas de conexão à rede elétrica (ABNT NBR IEC 62116:2012), necessário para garantir a segurança de pessoas e equipamentos em situações de interrupção no fornecimento de energia pela rede pública.

4.4 DEMAIS DISPOSITIVOS

Além dos principais componentes dos sistema – Conjuntos de módulos FV e Inversores – existem dispositivos importantes a serem adicionados em um projeto de instalação de um sistema fotovoltaico conectado à rede.

- *String Box*: caixa de conexões que concentra os cabos elétricos das diversas fileiras de *strings*, protegida contra intempéries e geralmente possuindo fusíveis de proteção;
- Quadro de proteção de corrente contínua (CC): é o quadro que incorpora a caixa de *strings* e os fusíveis de proteção e adiciona uma chave de desconexão CC, um dispositivo de proteção contra surto (DPS) e o barramento de aterramento. Necessária para manutenção e segurança do sistema (Figura 4.5);
- Quadro de proteção de corrente alternada (CA): faz a conexão entre os inversores do sistema FV e a rede elétrica, de modo semelhante às instalações convencionais de baixa tensão. Observa-se a presença de um disjuntor diferencial residual (DDR) e um dispositivo de proteção de surto (DPS) (Figura 4.6);
- Dispositivos de proteção de surto: Protegem as instalações contra surtos elétricos (sobretensão) geralmente provenientes de descargas atmosféricas. É baseado no princípio de funcionamento de um para-raios, composto de um varistor e um centelhador que na mudança de um estado de tensão normal para alta tensão muda sua propriedade de alta resistência para baixa resistência, permitindo a passagem da corrente elétrica de descarga.

4.5 REQUISITOS PARA CONEXÃO À REDE

A literatura internacional liderada pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) dos EUA e IEC (*International Electrotechnical Commission*), reúne diversas normas e procedimentos referentes à padronização de conexões de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica. Esta padronização e regulamentação não está consolidada, devido à constante evolução dos sistemas FV.

Como exemplo, podemos citar algumas normas importantes relacionadas à conexão de sistemas FV à rede:

- IEEE 1547: *Standard for interconnecting distributed resources with electric power systems;*
- IEEE 929-2000: *Recommended practice for utility interface of photovoltaic systems;*
- IEC 61727: *Characteristics of the utility interface;*
- IEC 62116: *Testing procedure of islanding prevention methods for utility-interactive photovoltaic inverters;*
- VDE 0126-1-1: *Automatic disconnection device between a generator and the public low-voltage grid.*

Estes documentos abordam assuntos como faixa de tensão e frequência de operação de inversores aceitáveis, limites de injeção de corrente contínua na rede por parte dos inversores, distorção harmônica admissível, fator de potência e atuação na detecção de ilhamento.

Os procedimentos e requisitos para conexão à rede no Brasil ainda não estão definidos, mas estão em fase de desenvolvimento, tendo seu primeiro passo com a publicação da norma ABNT NBR IEC 62116:2012 – Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

4.6 INTEGRAÇÃO ARQUITETÔNICA

No passado, eram projetados módulos somente para geração de energia e a estética e integração com o entorno construído eram negligenciadas. Recentemente, arquitetos e engenheiros se depararam com a necessidade de buscarem uma parceria para estudar uma maior integração arquitetônica destes elementos. Assim surge uma maior variabilidade de modelos, tamanhos e cores, tornando-os mais versáteis e possibilitando uma integração com *design* agradável.

Considerações apontam para elementos construtivos que podem ter a dupla função: gerar energia elétrica e funcionar como elemento arquitetônico na cobertura de telhados, paredes, fachadas ou janelas; e servir como substituição de vidros, mármore ou outros elementos decorativos, diminuindo, assim, o custo final da instalação.

O sistema fotovoltaico tem um grande potencial para o *design* dos edifícios, tornando-se, possivelmente, um elemento importante não somente para os sistemas construtivos, mas para o meio ambiente. Cada vez mais os países desenvolvidos vêm utilizando este sistema, não somente para uso residencial, mas também em edificações industriais, comerciais e públicas, pois estas muitas vezes apresentam grandes áreas planas, que são bastante adequadas à integração de geradores fotovoltaicos.

A utilização do sistema fotovoltaico tem sido viável em muitos casos onde as exigências mínimas para seu bom funcionamento são cumpridas e em locais onde o custo para geração de energia elétrica é muito alto. Os painéis fotovoltaicos interligados à rede elétrica podem ser integrados a qualquer edificação, sendo o único requisito uma orientação solar favorável (superfícies voltadas para norte, leste ou oeste), sendo que a orientação ideal são as superfícies voltadas para o norte geográfico, no hemisfério sul, pois permitem uma maior captação da energia gerada pelo sol.

Considerações arquitetônicas também são necessárias a fim de minimizar ou eliminar o efeito de sombreamento em parte ou totalidade das placas, onde o

movimento do sol durante o dia pode prejudicar o potencial total de geração do sistema fotovoltaico.

4.6.1 Posicionamento dos Módulos

A irradiação incidente sobre os módulos depende diretamente de sua posição em relação ao Sol. Sistemas avançados de rastreamento automático da posição do Sol são amplamente utilizados em sistemas de energia solar heliotérmica e em algumas usinas fotovoltaicas, mantendo os painéis alinhados ao longo do dia, mas devido ao seu alto custo de instalação e manutenção esta não é uma opção viável para micro e mini sistemas fotovoltaicos.

Como os painéis solares de aplicações residenciais são fixos, é necessário uma correta escolha do posicionamento e ângulo dos módulos solares, otimizando a captação de energia.

Além de evitar o sombreamento, o ângulo de inclinação dos painéis deve ser escolhido observando-se alguns critérios referentes aos ângulos azimutal e zenital, como sugere VILLALVA M.G.(2012).

Ângulo Azimutal: É o ângulo de orientação com relação ao norte geográfico, tendo o ângulo nulo quando o sol está na metade de seu trajeto desde o instante em que nasce até se pôr. Este é o melhor ângulo de posicionamento para o painel quando se está no hemisfério sul, uma vez que aproveita tanto a luz da manhã quanto da tarde, tendo seu ponto de máxima captação ao meio dia solar.

Ângulo Zenital: É o ângulo formado entre o ponto em questão e o zênite. Devido à inclinação do eixo de rotação terrestre em relação à sua órbita em torno do Sol, este assume diferentes ângulos zenitais durante o ano, o que define a altura solar. O ideal seria ter um painel com a mesma inclinação zenital que o Sol a cada dia. Como isto não é viável, podemos utilizar diferentes métodos para escolher um ângulo que possibilite uma boa média de captação de energia solar durante o ano. Um deles, apresentado no "*Installation and Safety Manual of the*

Bosch Solar Modules” consiste em escolher um ângulo de inclinação baseado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Escolha do ângulo de inclinação do módulo

Latitude Geográfica do Local	Ângulo de inclinação recomendado
0° a 10°	$\alpha = 10^\circ$
10° a 20°	$\alpha = \text{latitude}$
21° a 30°	$\alpha = \text{latitude} + 5^\circ$
31° a 40°	$\alpha = \text{latitude} + 10^\circ$
41° ou mais	$\alpha = \text{latitude} + 15^\circ$

FONTE: ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA – CONCEITOS E APLICAÇÕES, VILLALVA M.G., 2012.

A Figura 4.3 ilustra as definições de ângulos azimutal, zenital e altura solar.

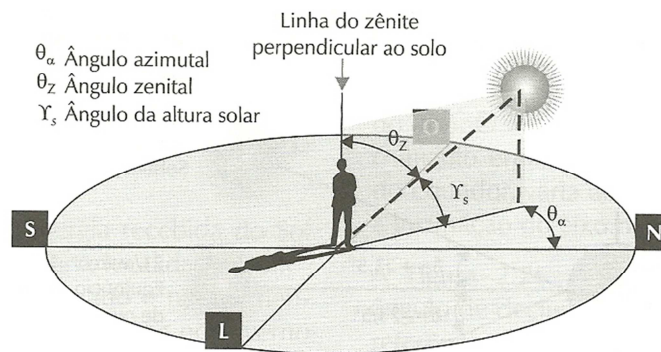


Figura 4.3: Posição do sol definida pelos ângulos azimutal, zenital e altura solar.
 FONTE: ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA – CONCEITOS E APLICAÇÕES, VILLALVA M.G., 2012.

5 PROJETO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

A seguir, será apresentada uma solução baseada em painéis solares com conexão à rede elétrica de baixa tensão para uma residência de consumo equivalente a 400 kWh/mês, consumo típico de uma família de classe média/alta com 4 moradores.

A casa onde estarão instalados os painéis situa-se à rua Salgado Filho, Curitiba – PR, e está inclinada à 50° Leste em relação ao norte geográfico.

Para o estudo de caso levou-se em conta a localidade da cidade de Curitiba-PR, com as seguintes coordenadas: latitude: -25°36' ; longitude: -49°16'.

A partir dos dados de insolação combinados com o potencial de geração do painel solar escolhido foi possível determinar a energia gerada pelo painel, que comparada com a variação de carga da residência tornará possível avaliar a real compensação de geração e consumos diários.

Para a escolha dos produtos e elaboração do projeto, foi escolhido o sistema SolarEnergy 300, que será detalhado nos itens a seguir.

5.1 ENERGIA PRODUZIDA

A quantidade de energia que se pretende produzir é o primeiro item a ser definido e depende do tipo de sistema a ser implementado. No caso de um sistema conectado à rede nos moldes do padrão brasileiro com sistema *Net Metering*, é vantajoso planejar uma geração ligeiramente inferior ao consumo, uma vez que o excedente de geração não poder ser comercializado, mas gera créditos com data de vencimento de 36 meses. Neste caso, a geração solar fotovoltaica funciona como fonte complementar de energia, suprimindo parcialmente a demanda de energia do consumidor.

Assim sendo, para um consumidor com média mensal de 400 kWh será considerada uma parcela de 80% de carga a ser suprida, o que implica em um projeto de 320 kWh de energia mensal gerada.

Um segundo item a ser considerado é o posicionamento dos painéis. Um posicionamento ótimo é dificilmente conseguido quando o painel solar é integrado a uma construção já existente como uma residência. Neste caso, é necessário uma análise exclusiva da construção em questão para definição do melhor posicionamento. Neste estudo, será feito um cálculo para posicionamento ótimo e um cálculo adequado às possibilidades estruturais da casa em questão e um comparativo entre os resultados.

O terceiro ponto refere-se às características do módulo, especificamente a potência máxima de pico P_{mp} , área do módulo e eficiência, que serão abordados no item a seguir.

5.2 MÓDULOS

Os módulos fotovoltaicos disponíveis comercialmente são compostos geralmente de 36, 48 ou 60 células, o que define sua faixa de potência de pico, que varia entre 130 e 140 W para módulos de 36 células até 240 a 250 W para módulos de 60 células.

Para os sistemas conectados à rede, são indicados os módulos de 60 células, uma vez que os níveis de tensão costumam ser mais elevados do que em sistemas autônomos.

Para este estudo serão utilizados módulos YL230P-29b, de silício policristalino, com potência nominal de 230 W, da fabricante de painéis solares chinesa Yingli Solar. A escolha desse produto foi atrelada a questões econômicas e disponibilidade comercial. A ficha técnica completa do módulo é apresentada a seguir:

Tabela 5.1: Parâmetros elétricos e físicos do módulo YL230P-29b em STC

Potência Máxima de Pico (Pmax)	230 W
Eficiência do Módulo (η)	14.1 %
Tensão em MPPT (Vmppt)	29.5 V
Corrente em MPPT (Imppt)	7.80 A
Tensão de circuito aberto (Voc)	37.0 V
Corrente de curto-circuito (Icc)	8.40 A
Dimensões (Comprimento/Largura/Espessura)	1650mm/990mm/40mm
Peso	19.1 kg

Fonte: Catalogo do fabricante

O sistema será composto de 10 módulos de 230 Wp, resultando em um sistema fotovoltaico de 2,3 kWp.

5.3 INVERSOR

Como visto anteriormente, o inversor ca-cc de conexão à rede é responsável pela transformação da energia de corrente contínua proveniente dos painéis para corrente alternada senoidal, em sincronismo de tensão e frequência com a rede de distribuição pública.

Como são equipamentos de pequeno porte, não possuem partes móveis e não apresentam ruído, portanto podem ser instalados dentro da edificação, ou ainda junto aos módulos fotovoltaicos, desde que protegidos das intempéries e com grau de proteção (IP) adequado.

O inversor escolhido para o sistema foi um inversor SolarEnergy de 2 kW. Apesar do sistema projetado ter uma potência de 2,3 kW, este valor é o valor de máxima potência, referente à uma irradiação de 1000 W/m^2 , mas a máxima potência na localidade de Curitiba é de aproximadamente $592,5 \text{ W/m}^2$, conforme gráfico apresentado na Figura 6.1, gerando uma potência instantânea máxima de 1,36 kW.

Tabela 5.2: Parâmetros elétricos e físicos do inversor SolarEnergy-2000

Potência de saída (Contínua)	2000 W
Potência de saída (Pico)	4000 W
Tensão nominal de entrada	12V (10~15V) / 24 (20~30V)
Tensão Nominal de Saída (AC)	115VAC OU 230VAC
Frequência	50 ou 60Hz
Eficiência	90~95%
Proteção Térmica	65°C + / - 5°C
Sobrecarga	Desliga e soa o alarme
Proteção Contra Inversão de Polaridade da Bateria	Fusível de Proteção
Curto-Circuito	Proteção contra curto-circuito
Refrigeração (com ventilador)	Sim
Fusível Substituível	12V –12x25 A/24V –12x10 A
Dimensões (cm)	43 X 19,8 X 7
Peso (Kg)	5,2

FONTE: Catálogo do fabricante

5.4 SISTEMA DE PROTEÇÃO

Após a passagem dos cabos em eletrodutos separados por pólos, os condutores de corrente contínua devem chegar a um quadro de proteção antes de serem conectados ao inversor. Essa proteção serve para seccionar o circuito de alimentação em cc, seja para manutenção ou qualquer ajuste do inversor. Adicionalmente, este quadro pode ter a função de caixa de *strings*.

No mesmo quadro devem estar presentes:

- Barramento de aterramento para estruturas metálicas e carcaças de módulos FV;
- Fusíveis para conexão das *strings*;
- Chave de desconexão;
- Dispositivo de proteção contra surto (DPS);

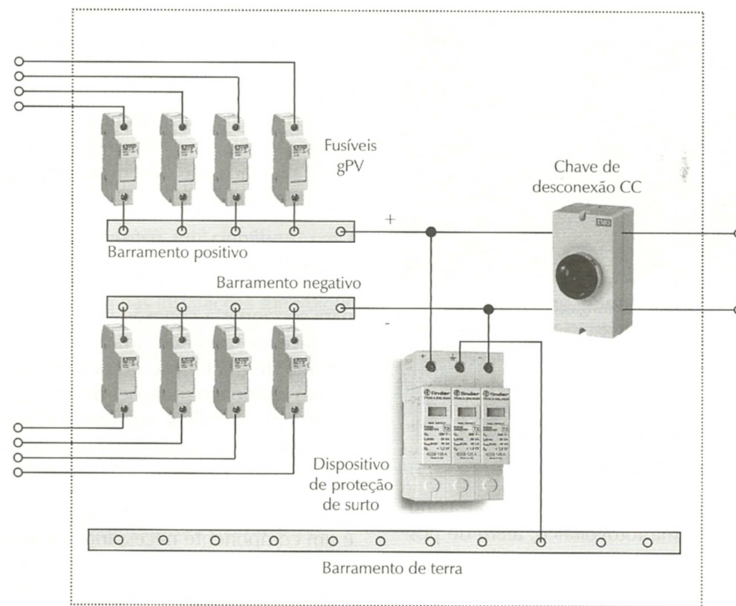


Figura 5.1: Quadro de proteção de corrente contínua CC da instalação fotovoltaica
 FONTE: ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA – CONCEITOS E APLICAÇÕES,
 VILLALVA M.G., 2012.

O quadro de proteção de corrente alternada faz a conexão entre os inversores do sistema fotovoltaico e a rede elétrica.

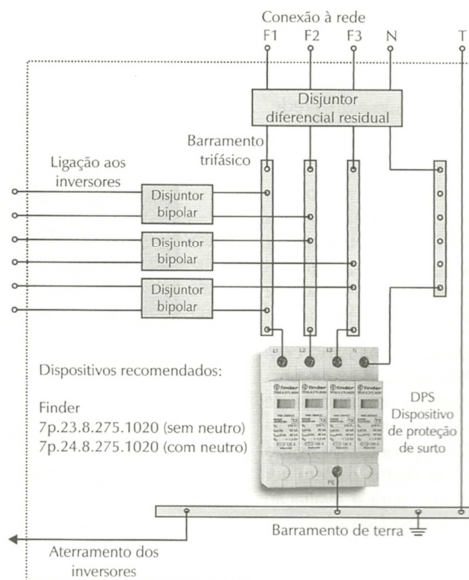


Figura 5.49: Quadro de proteção de corrente contínua (CA) da instalação fotovoltaica. Cortesia: Finder.

Figura 5.2: Quadro de proteção de corrente alternada CA da instalação
 fotovoltaica
 FONTE: ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA – CONCEITOS E APLICAÇÕES,
 VILLALVA M.G., 2012.

Os dispositivos e o dimensionamento são os mesmos utilizados nas instalações elétricas de baixa tensão e atendem à norma NBR 5410, cujos principais componentes são:

- Barramento de terra;
- Disjuntor diferencial residual;
- Barramento trifásico ou monofásico;
- Dispositivo de proteção contra surto.

5.5 CABEAMENTO E CONEXÕES

Os sistemas fotovoltaicos estão sujeitos aos rigores da intempérie e das singularidades de instalações com painéis que podem emitir grande quantidade de calor nas suas caixas de ligações. Portanto, os cabos que farão a conexão entre os módulos e o inversor em corrente contínua:

- Limitar ao máximo a queda de tensão;
- Ser unipolares;
- Possuir duplo isolamento;
- Estar separados por pólos (positivo e negativo) em eletrodutos distintos;
- Possuir caixa de passagem e conexão com boa vedação e isolamento, também separadas por pólos;
- Possuir isolamento que suporte temperaturas elevadas.

Como a temperatura dos módulos fotovoltaicos pode ultrapassar os 50° C, nessas condições, de acordo com a norma brasileira NBR 5410, a capacidade de condução de corrente fica limitada a aproximadamente a 40% daquela a 30° C.

Devido ao uso em ambiente externo e às necessidades de conexão entre os painéis em série e paralelo, foram desenvolvidos os conectores tipo MC4, especiais para sistemas FV, que juntamente com as caixas de conexão formam o sistema de conexões.



Figura 5.3 Detalhe de conectores tipo MC4
FONTE: <http://www.neosolar.com.br>.

Esses requisitos asseguram maior confiabilidade ao sistema fotovoltaico, pois diminuem a chance de ocorrer curto-circuitos entre os potenciais positivo e negativo decorrente de possíveis falhas. Toda a instalação deve ser feita seguindo-se as normas para instalações elétricas de baixa tensão NBR 5410.

Os 10 painéis fotovoltaicos podem ser organizados com topologias diversas. Uma alternativa de projeto seria considerar 2 *strings* de 5 painéis conectados em série, ligadas em paralelo. Cada conjunto gera um potencial de 147 V, com uma corrente de saída de 7,8 A, que ligados em paralelo geram uma saída de $V_{cc} = 147 \text{ V}$ e $I = 15,6 \text{ A}$ para alimentar o inversor. A área ocupada pelo conjunto dos módulos é de aproximadamente 16 m^2 .

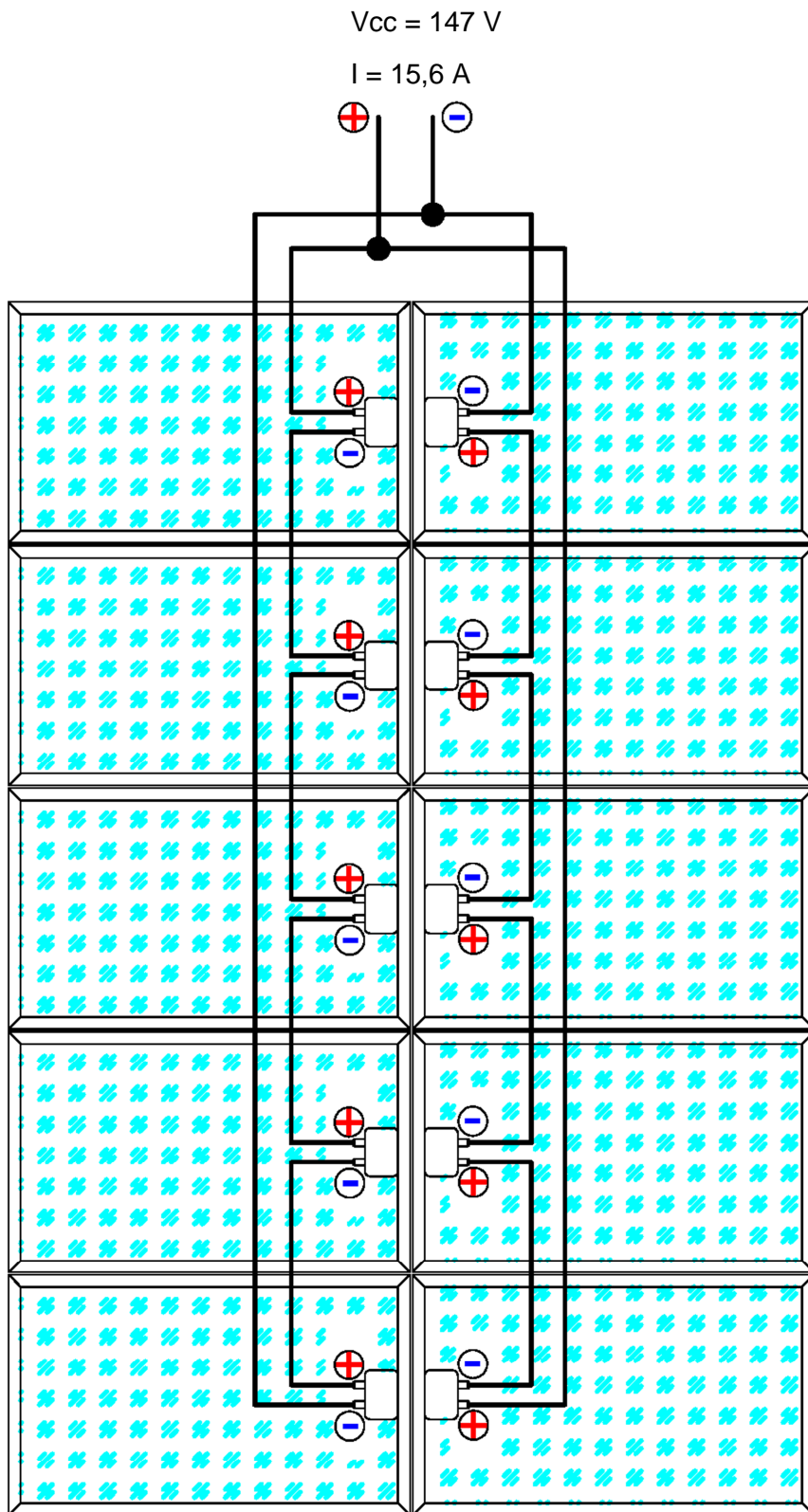


Figura 5.4: Esquemático painéis solares.
 FONTE: Elaboração própria.

5.6 SUPORTE ESTRUTURAL

A estrutura de suporte dos módulos fotovoltaicos deve ser montada de forma a facilitar tanto a instalação quanto a manutenção. Também deve ser projetada para não a estética e não quebrar a harmonia arquitetônica da edificação onde será montada. Recomenda-se ser instalada o mais próximo possível do ponto de conexão afim de diminuir o comprimento dos cabos que fazem a conexão com o inversor.

Independente do modelo essas estruturas necessitam atender à algumas exigências que, segundo Lorenzo e Zilles (1994), são as seguintes:

- suportar ventos de até 150 km/h;
- posicionar os módulos a uma altura de no mínimo 1 metro do solo;
- ser fabricada com materiais não corrosivos, como ferro galvanizado ou alumínio;
- estar aterrada eletricamente, de acordo com as normas vigentes;
- assegurar que as estruturas dos painéis tenham um bom contato com o aterramento;
- propiciar a integração estética com a edificação onde vai ser instalado.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir do projeto especificado no Capítulo 5, foram propostos diferentes cenários de geração, consumo e desempenho, expostos e comparados a seguir.

Para o cálculo da energia produzida foi utilizado o método da irradiação global, método utilizado em sistemas MPPT onde durante todo o tempo o módulo funciona em seu ponto de máxima potência. Segundo VILLALVA M.G. (2012), a energia produzida pode ser calculada da seguinte maneira:

$$E_p = E_s \times A_m \times \eta \quad (6.1)$$

Onde:

E_p : Energia produzida pelo módulo diariamente [kWh]

E_s : irradiação global diária [kWh/m²/dia]

A_m : Área da superfície do módulo [m²]

η : Eficiência do módulo

Ainda segundo VILLALVA M.G.(2012), quando não se tem a eficiência do módulo, esta pode ser calculada utilizando-se a seguinte fórmula:

$$\eta = P_{\text{máx}} / (A_m \times 1000) \quad (6.2)$$

Onde:

η : Eficiência do módulo

$P_{\text{máx}}$: Potência máxima de pico do módulo [Wp]

A_m : Área da superfície do módulo [m²]

Obs.: A constante 1000 refere-se à taxa de irradiação padronizada de 1000 W/m² em STC.

Alternativamente, energia produzida pode ser calculada diretamente a partir da irradiação solar global diária e da potência máxima de pico do módulo:

$$E_p = (E_s \times P_{\text{máx}}) / 1000 \quad (6.3)$$

Onde:

E_p : Energia produzida pelo módulo diariamente [kWh]

E_s : irradiação global diária [kWh/m²/dia]

$P_{\text{máx}}$: Potência máxima de pico do módulo [Wp]

6.1 IRRADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL

Nesta análise foi considerado o índice GHI – *Global Horizontal Irradiance* (Irradiância Global Horizontal), índice mais utilizado como parâmetro em estudos de sistemas fotovoltaicos. É possível encontrar bases de dados de irradiação global horizontal provenientes de diversas fontes, como NASA, INPE e NREL. A base de dados escolhida para esta análise foi a base de dados do NREL – *National Renewable Energy Laboratory* - por apresentar uma média anual mais próxima da média obtida na Tabela 2.2 deste trabalho, por apresentar dados de uma estação solarimétrica mais próxima do local do projeto e por apresentar valores diários e horários, que serão utilizados na análise do próximo item.

A partir de dados de irradiação solar global horizontal diária, tomada de hora em hora, foi construído o gráfico da Figura 6.1. Foram consideradas as médias de medidas de 9 anos completos entre 1973 e 1998, calculados a partir de dados obtidos na estação Meteorológica Curitiba/Afonso Pena (Lat: -25,52; Long: -49,17) da NREL.

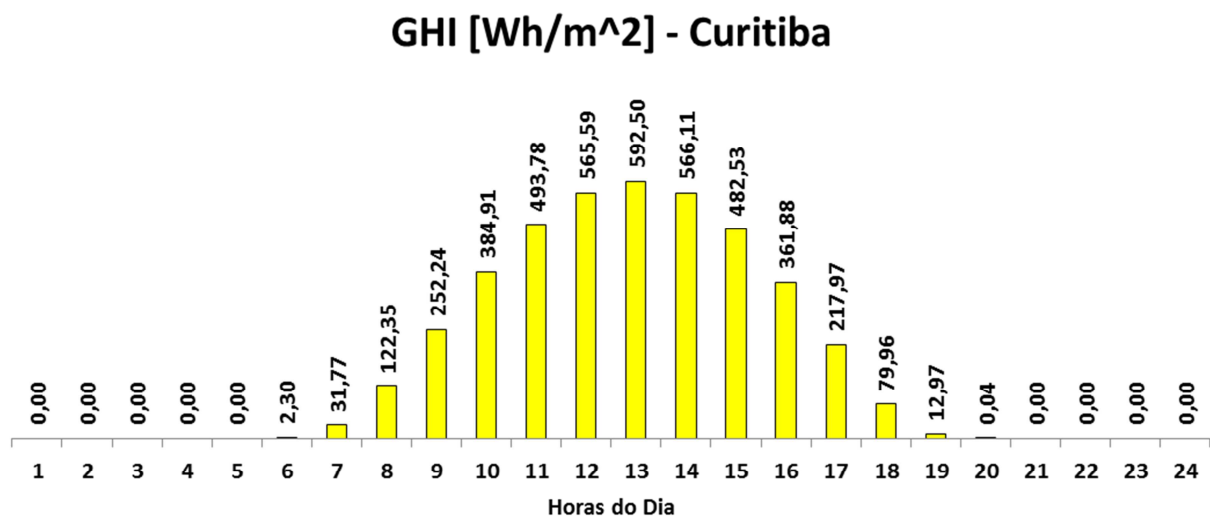


Figura 6.1: Irradiância Global Horizontal ao longo de um dia em Curitiba.
 FONTE: Elaboração própria.

Os valores representam o montante de energia recebida durante a hora imediatamente anterior à hora registrada.

Apesar da variância e grande imprevisibilidade da irradiação solar direta ao longo de um dia devido à nebulosidade, pode-se observar um gráfico de irradiância média bem distribuído, como o de um dia típico de sol sem nuvens. Este fato ocorre porque o índice GHI é a soma das irradiações direta e difusa, esta última não sendo muito afetada pela nebulosidade, conforme detalhado anteriormente.

A partir destes dados de irradiância global horizontal e das especificações e características do sistema fotovoltaico definido em projeto anteriormente, pode-se calcular o total de energia gerado durante o período desejado. A seguir, é apresentado o gráfico do total de energia gerado pelo sistema fotovoltaico proposto, calculado a partir da equação 6.3, considerando os dados do NREL e uma potência instalada de 2,3 kWp:

Energia Produzida [Wh] - Curitiba - Sistema SolarEnergy

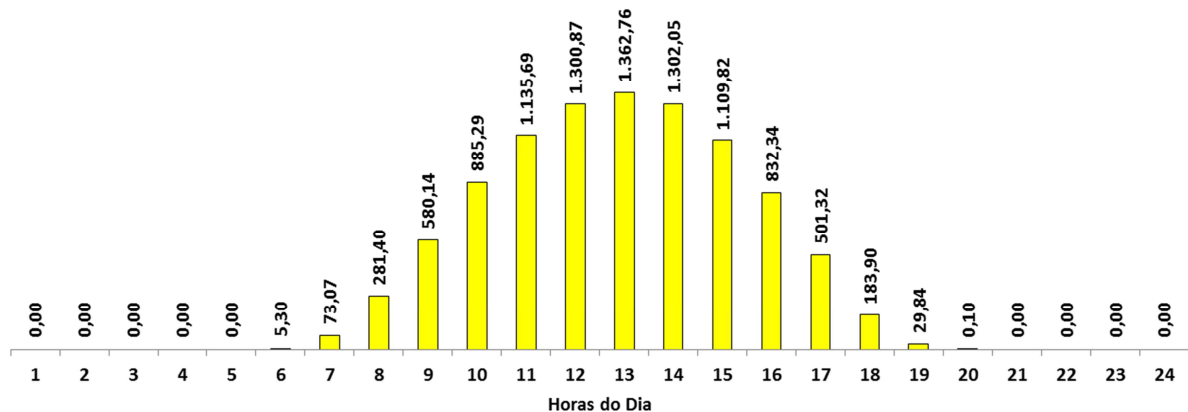


Figura 6.2: Energia gerada pelo sistema SolarEnergy ao longo de um dia em Curitiba

FONTE: Elaboração própria

Totalizando a energia diária produzida, chega-se ao valor de 9,584 kWh de energia gerada em um dia, o que corresponde a 287,52 kWh em um mês, ou ainda 3498,12 kWh produzido em um ano de operação.

Este é o perfil de geração padrão para o sistema proposto. Nos itens a seguir, são explorados dois casos alternativos para busca da otimização dos resultados.

6.2 IRRADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL POR SAZONALIDADE

Uma segunda análise a partir do banco de dados da NREL foi realizada a partir da classificação dos dias do ano nas 4 estações: Verão, Outono, Inverno e Primavera. Com esta análise, pode-se comprovar a diferença de irradiação de acordo com a inclinação da terra, que no pico de geração, às 13 horas, apresenta uma diferença de 662,91 Wh/m² no verão contra 525,17 Wh/m² no inverno, o que representa uma queda de 22,1% no potencial solar.

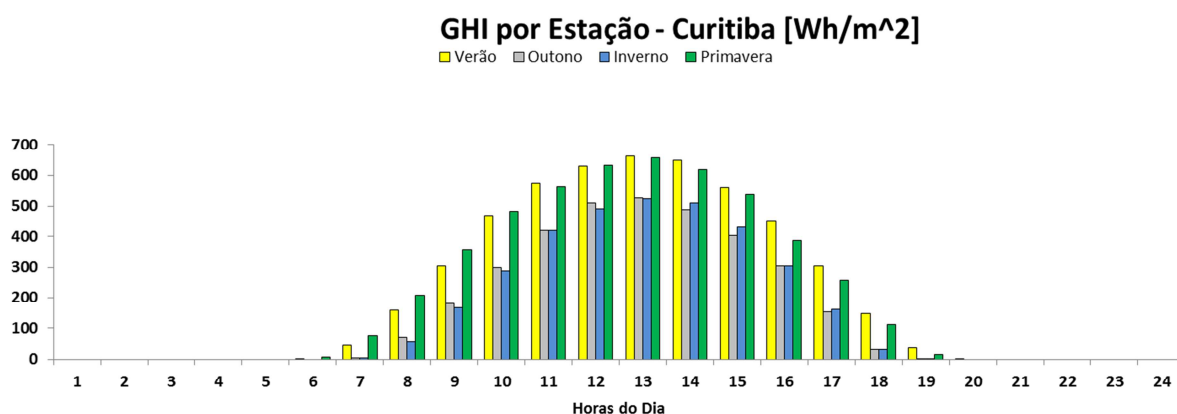


Figura 6.3: Irradiância solar global horizontal por estações.
 FONTE: Elaboração própria

Este resultado é importante do ponto de vista estrutural do sistema elétrico como um todo, pois implica na necessidade de uma potência instalada na rede em forma de fontes energéticas não afetadas pela sazonalidade, como é o caso das hidrelétricas com reservatório e termelétricas, que garantam a falta de geração de energia solar fotovoltaica no inverno.

Entretanto, para uma análise econômico-financeira do ponto de vista do consumidor residencial, o impacto fica diluído nos meses do ano, sobressaindo somente o total de energia gerada durante o ano.

6.3 IRRADIAÇÃO GLOBAL INCLINADA

Devido à inclinação do eixo de rotação da terra em relação à componente de translação ao redor do sol, existe uma diferença de exposição diária aos raios solares dependendo da época do ano. A amplitude desta diferença é tão maior quanto a latitude em questão.

Para verificar a influência deste fator no local do projeto, cidade de Curitiba – PR, foi utilizado o software Radasol 2.0, desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da UFRGS. Este software utiliza a base de dados SWERA, e permite calcular a irradiação média de cada mês variando-se a inclinação dos painéis do sistema fotovoltaico. Conforme detalhado no item 4.6.1, uma inclinação

ótima para a latitude em questão seria um ângulo de inclinação de 30°. Os resultados obtidos resultam em uma diferença de 4,22 kWh/m²/dia para posição horizontal contra 4,58 kWh/m²/dia para uma inclinação de 30° dos painéis solares, representando um aumento de 8,5% no potencial de geração.

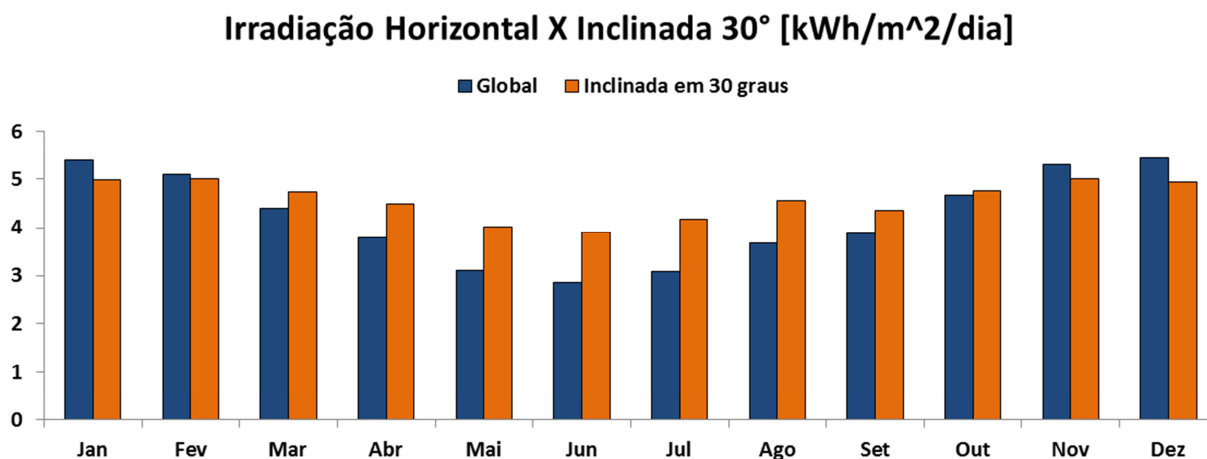


Figura 6.4: Irradiância solar global horizontal versus inclinada em Curitiba
FONTE: Elaboração própria

6.4 PERFIL DE CONSUMO

Conforme definido anteriormente, o projeto visa atender a uma residência cujo consumo médio é de aproximadamente 400 kWh/mês.

Além desta informação de consumo total, foi feito um levantamento do perfil de consumo desta residência ao longo do dia, coletando-se valores de tensão, corrente e potência por fase a cada intervalo de 10 minutos, para a construção de uma curva de carga. A coleta dos dados foi realizada utilizando-se analisadores de energia RMS MARCH-21, com classe de exatidão igual a 0,5%.

Foram analisados os dados destes medidores durante um período de sete dias, e então criada uma tabela de valores instantâneos de potência a cada 10 minutos.

Para gerar um gráfico de energia consumida foi suposto que cada valor de potência instantânea permanecia constante durante 10 minutos, até o momento da próxima medida. Após este procedimento, obteve-se a curva característica de consumo, que foi então ajustada em amplitude a partir de um coeficiente “k” para corresponder à média real de consumo mensal de 400 kWh.

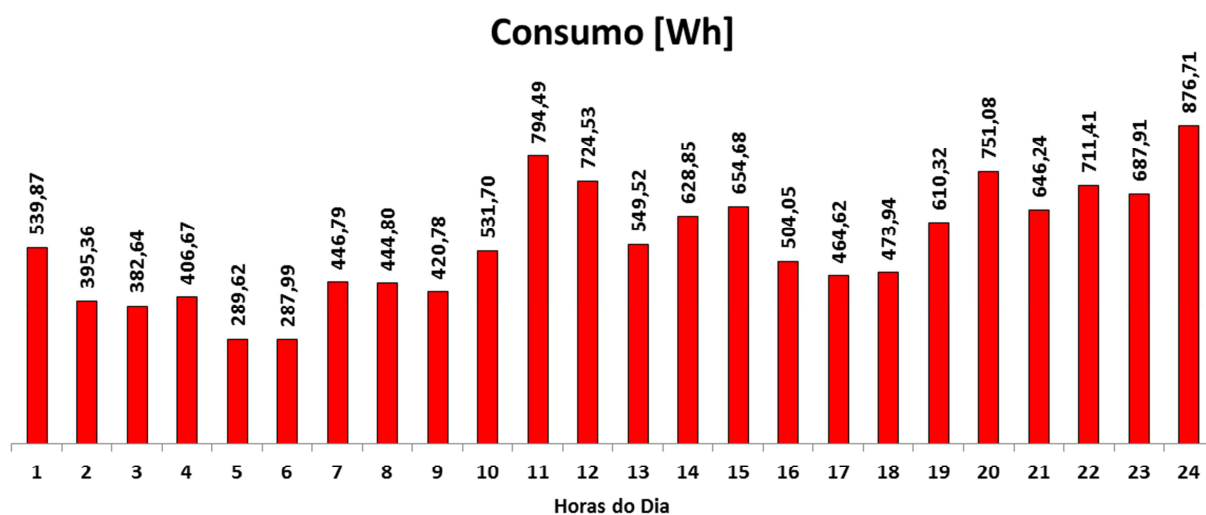


Figura 6.5: Consumo de energia elétrica ao longo do dia
FONTE: Elaboração própria

Nota-se um perfil de consumo razoavelmente constante, não apresentando picos ou vales de consumo significativos, totalizando um consumo de 13,22 kWh/dia e 396,74 kWh/mês.

6.5 RESULTADOS

De posse do perfil de geração do sistema fotovoltaico SolarEnergy projetado, baseado nos dados de Irradiação Global Horizontal obtidos na base de dados do NREL apresentados na figura 6.2 e do perfil de consumo de energia diário apresentado na figura 6.5, foi possível projetar a característica de consumo versus geração da residência em questão subtraindo-se a quantidade de energia consumida da energia gerada em cada hora do dia.

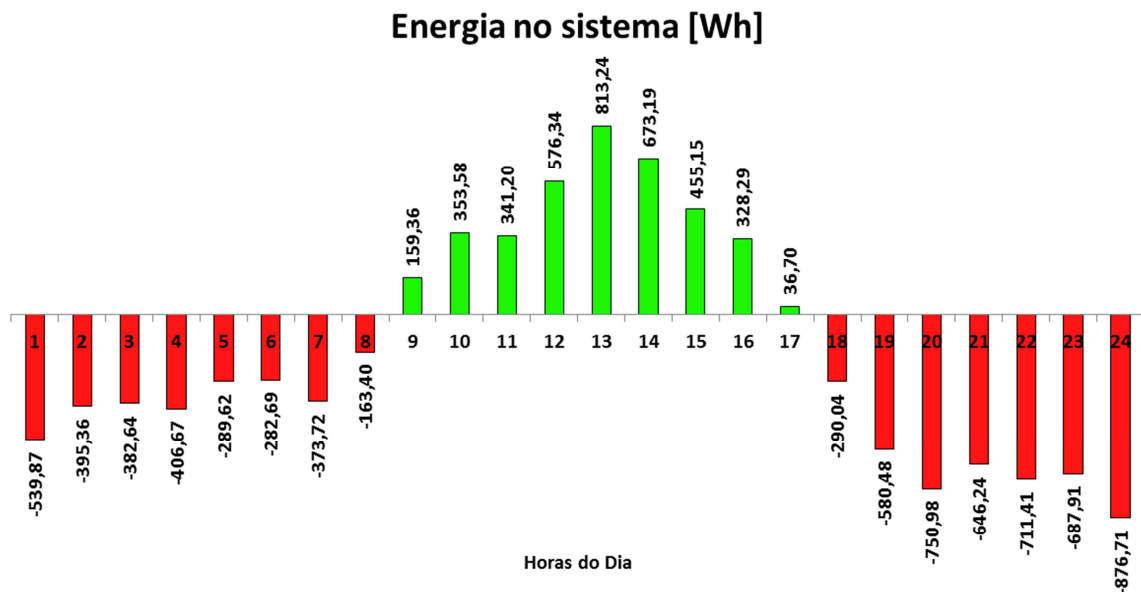


Figura 6.6: Balanço de geração e consumo de energia ao longo de um dia
 FONTE: Elaboração própria

Valores positivos (em verde) indicam geração de energia maior que consumo e consequente injeção de energia elétrica na rede da concessionária, gerando créditos para o consumidor.

Valores negativos (em vermelho) representam consumo maior que geração, utilizando assim a energia proveniente da rede elétrica.

Pode-se notar um pico positivo coincidente com o pico de geração de energia solar, uma vez que o gráfico de consumo tem um perfil relativamente constante devido às cargas presentes na residência.

Neste caso foram gerados 9,58 kWh e consumidos 13,22 kWh, equivalente a um excedente de 3,64 kWh consumidos diariamente. Se este valor for considerado durante o período de um mês, obtemos um total de 109,2 kWh fornecidos pela concessionária de energia.

A seguir é apresentada uma estimativa da produção e do consumo mensal durante um ano, inclinação horizontal e inclinada, baseados na aplicação do

sistema proposto SolarEnergy em conjunto com os valores obtidos da base de dados do SWERA apresentados na figura 6.4:

Tabela 6.1: Estimativa de consumo e geração de energia [kWh]

	Horizontal			Inclinado 30°		
	Geração	Consumo	Saldo	Geração	Consumo	Saldo
Janeiro	372,6	400,0	-27,4	343,6	400,0	-56,4
Fevereiro	352,6	400,0	-47,4	346,4	400,0	-53,6
Março	303,6	400,0	-96,4	327,1	400,0	-72,9
Abril	261,5	400,0	-138,5	309,1	400,0	-90,9
Mai	214,6	400,0	-185,4	276,7	400,0	-123,3
Junho	197,3	400,0	-202,7	268,4	400,0	-131,6
Julho	212,5	400,0	-187,5	287,7	400,0	-112,3
Agosto	253,9	400,0	-146,1	314,6	400,0	-85,4
Setembro	267,0	400,0	-133,0	300,2	400,0	-99,9
Outubro	321,5	400,0	-78,5	327,8	400,0	-72,3
Novembro	365,7	400,0	-34,3	345,7	400,0	-54,3
Dezembro	374,7	400,0	-25,3	341,6	400,0	-58,5
Média Anual	291,5	400,0	-108,5	315,73	400,0	-84,27

FONTE: Elaboração própria

6.6 ANÁLISE ECONÔMICA

Para a instalação do sistema solar fotovoltaico já descrito, composto de 10 painéis de 230 kWp totalizando 2,3 kWp instalados, mais inversor de 2 kW e acessórios, foram consultados três fornecedores e optou-se pela empresa SolarEnergy especializada em soluções *turn-key* para geração de energia solar fotovoltaica que apresentou o melhor custo por kWp instalado. O valor total do sistema proposto foi apresentado em orçamento no valor de R\$ 21.413,00, incluindo todas as despesas: impostos, taxas, frete e instalação.

A partir do total de energia gerada, pode-se calcular o valor total de energia em R\$ economizado pelo consumidor. Como o consumidor é alimentado em baixa tensão trifásico, 220/127 V, o mesmo é classificado como consumidor classe B1 – Residencial. Neste caso, multiplica-se o valor da tarifa de energia vigente em R\$/kWh pela quantidade de energia gerada em determinado período. Como o valor a ser pago incide o ICMS de 29%, o real valor financeiro correspondente à energia economizada é dada pela equação abaixo:

$$R\$(economia) = Eg(p) \cdot (1,29 \cdot T) \quad (6.4)$$

Onde:

R\$(economia): valores em reais economizados durante um período;

Eg(p): energia gerada durante um período, que deixará de ser comprada;

T: Tarifa de energia da concessionária, em R\$/kWh.

Assim, considerando-se o valor da tarifa igual a R\$ 0,451776, como registrado na última fatura do consumidor em questão, o valor economizado referente aos valores obtidos na Tabela 6.1 é mostrado na Tabela 6.2:

Tabela 6.2: Energia economizada por período de tempo [R\$]

Período	Horizontal	Inclinado 30°
Janeiro	217,15	200,26
Fevereiro	205,49	201,87
Março	176,94	190,61
Abril	152,41	180,15
Maio	125,06	161,25
Junho	115,01	156,43
Julho	123,85	167,69
Agosto	147,98	183,37
Setembro	155,62	174,92
Outubro	187,39	191,01
Novembro	213,13	201,47
Dezembro	218,35	199,05
Anual	2038,38	2208,07
Média Mensal	169,86	184,01

FONTE: Elaboração própria

6.6.1 Tarifa Branca

No terceiro ciclo de revisões tarifárias 2011-2014, a ANEEL estabeleceu tarifas horárias opcionais para as unidades consumidoras conectadas em baixa tensão, modalidade denominada Tarifa Branca. As tarifas horárias possuem duas grandes funções: induzir a modulação de carga para a otimização do carregamento do sistema e atribuir aos usuários distintas responsabilidades pelo uso da rede.

No caso da tarifa branca, a adesão é opcional. Neste caso, os horários ficam divididos da seguinte forma:

Ponta: entre as 18h00min e 20h59min;

Intermediário: compreende uma hora imediatamente anterior e uma hora imediatamente posterior ao posto ponta;

Fora de ponta: demais horários.

Obs.: Se aplicada no horário de verão, o horário de ponta compreende o período entre 19h00min e 21h59min.

De acordo com Nota Técnica nº 070/2012-SRE-SRD/ANEEL, de 26 de março de 2012, o fator *kz* que relaciona o valor da tarifa convencional com o valor da tarifa branca fora de ponta fica definido como 0,502 para o consumidor da classe B1 – Residencial, resultando em economia quando utilizado neste horário. Porém, o horário intermediário fica definido como sendo 3 vezes o valor da tarifa no horário fora de ponta, e o horário de ponta 5 vezes o valor da tarifa fora de ponta, representando um aumento de aproximadamente 150% em relação à tarifa convencional.

Custo Tarifa Branca x Convencional

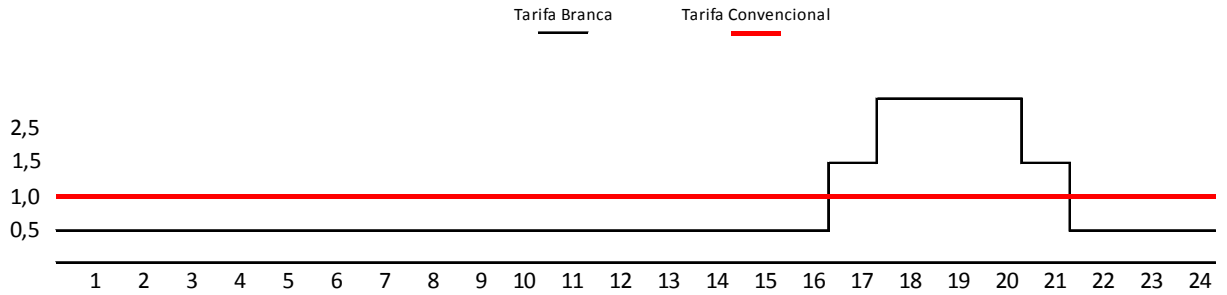


Figura 6.7: Custo da tarifa convencional versus tarifa branca
 FONTE: Elaboração própria

Levando em consideração a adesão do consumidor à modalidade de tarifa branca, podemos calcular a diferença final na conta de energia elétrica mensal em relação ao perfil de consumo do gráfico da Figura 6.5, cujo consumo mensal residual médio de energia elétrica é de 109 kWh.

Tabela 6.3: Valor médio da fatura de energia elétrica

	Convencional	Branca
Com sistema FV	R\$ 67,63	R\$ 125,89
Sem sistema FV	R\$ 245,66	R\$ 219,44

FONTE: Elaboração própria

Como já comentado anteriormente, tecnologias em desenvolvimento necessitam de uma avaliação financeira dos custos de investimento e rentabilidade do sistema.

O período de *payback* simples é uma ferramenta útil que mede o prazo necessário para se recuperar o investimento realizado, resultando da relação entre o investimento inicial com o sistema e as economias de energia obtidas por período de tempo.

$$\text{Payback} = \text{investimento inicial(R\$)} / \text{economia por ano(R\$)} \quad (6.5)$$

Neste caso, para uma aplicação de um sistema em posição horizontal (H) obtém-se o seguinte resultado:

$$\text{Payback}(H) = 21.413,00 / (169,86 * 12)$$

$$Payback(H) = 10,5 \text{ anos}$$

Já para o caso mais eficiente, inclinado em 30°(I), obtemos o seguinte resultado:

$$Payback(I) = 21.413,00 / (169,86 * 12)$$

$$Payback(I) = 9,7 \text{ anos}$$

Além do período de *payback*, é interessante utilizarmos outras ferramentas de análise financeira como o ROIC – *Return On Invested Capital* – que apresenta uma taxa de retorno do capital investido e é calculado pela seguinte fórmula:

$$ROIC = \text{receita} / \text{investimento} \quad (6.6)$$

Tomando o período de um ano como base, obtemos os seguintes valores para um projeto com inclinação horizontal (H) e inclinado 30° (I):

$$ROIC(H) = 9,5\% \text{ a.a.}$$

e

$$ROIC(I) = 10,3\% \text{ a.a.}$$

Um outro indicador de larga aceitação e um dos mais utilizados como parâmetro de decisão é a Taxa Interna de Retorno - TIR. A TIR é a taxa de desconto que equaliza o valor presente dos benefícios/receitas e dos custos de investimento de um projeto. Para ser utilizada como critério de aceitação de um projeto, deve ser comparada à taxa mínima de atratividade estabelecida pelo investidor.

A TIR de um projeto é a taxa de juros “i” que satisfaz a equação:

$$\sum_{t=0}^n \frac{Ft}{(1+i)^t} = 0 \quad (6.7)$$

Para o projeto de sistema fotovoltaico proposto, tanto com posição horizontal (H) como inclinado 30° (I), foi feita uma análise da TIR através de ferramenta computacional MS-EXCEL, levando em consideração os períodos de

20 anos, que é o tempo de garantia dos painéis, e de 30 anos, tempo estimado de vida útil dos mesmos. Os seguintes resultados foram obtidos:

Tabela 6.4: TIR – Taxa interna de retorno

TIR – Taxa interna de retorno		
Período	Horizontal	Inclinado 30°
20 anos	8,0% a.a	9,0% a.a
30 anos	9,1% a.a	10,0% a.a

FONTE: Elaboração própria

Tanto os resultados de *payback* como os resultados de TIR indicam uma viabilidade econômica no investimento em energia solar para abastecimento dessa residência.

Comparando-se as taxas de retorno calculadas, girando em torno dos 10%, com a taxa da poupança, investimento mais popular no Brasil que gira em torno dos 6% a.a., encontra-se uma boa atratividade nesse investimento para o longo prazo.

6.6.2 INCENTIVOS FISCAIS

Como comentado no Capítulo 2.5, o sobre preço devido a tributação no Brasil (impostos de importação, IPI, ICMS, PIS e COFINS) é de 32,5% do produto final.

Caso houvesse uma isenção de impostos para esse tipo de investimento, este se tornaria ainda mais atrativo, gerando uma taxa de retorno de 14% ao ano, e um *Pay Back* de apenas 7 anos. É possível considerar um terceiro cenário no qual a carga tributária, ao invés de ser zerada, teria um desconto de 50%.

Tabela 6.5: Índices econômicos para incentivos fiscais

Tributação	Investimento (R\$)	Retorno Mensal (R\$)	Pay Back (anos)	ROIC a.a.
Com Imposto	21.413	170	10,5	9,5%
Sem Impostos	14.454	170	7,1	14,1%
50% da carga atual	17.933	170	8,8	11,4%

FONTE: Elaboração própria

Com essa política de incentivo fiscal, reduzindo a carga tributária em 50%, a investimento inicial cairia em 16%, tornando mais viável para o consumidor final, o que aumentaria o número de residências de classe média com geração distribuída, assim causando um positivo impacto no sistema.

6.8 IMPACTO NO SISTEMA

Depois de analisar a viabilidade técnica e econômica, do ponto de vista do consumidor, da instalação de um sistema solar fotovoltaico para geração de energia elétrica, nos interessa agora o impacto que a implementação dessa tecnologia teria para a rede elétrica como um todo. Especificamente, nos interessa o quanto de energia deixaria de ser necessariamente produzida por fontes geradoras que causam grande impacto ao meio ambiente, aliando desse modo tecnologia e meio ambiente e ampliando os horizontes da aplicação do conceito de *smart grids* e geração distribuída.

Os seguintes dados foram retirados do relatório RI 01/03 da COPEL, concessionária distribuidora de energia elétrica que atende Curitiba e a maior parte do estado do Paraná.

Tabela 6.6: Consumidores Cativos COPEL - 2012

Setor	Numero de consumidores	Energia vendida [GWh]
Industrial	86.717	7.391
Residencial	3.196.457	6.559
Comercial	327.244	5.048
Rural	372.640	2.025
Outros	54.512	2.211
Total	4.037.570	23.234

FONTE: COPEL – RI 01/13

Foi projetado um cenário onde 20% dos consumidores residenciais tivessem um sistema FV instalado em suas residências e que suprisse 80% da sua energia consumida. Podemos supor também que 20% dos consumidores correspondam a 20% da energia consumida no setor.

Aplicando esta projeção aos valores da COPEL de 2012, a geração dos sistemas fotovoltaicos residenciais corresponderia a uma geração - e consequente alívio no sistema - de 1024 GWh/ano, cerca de 4,5% do total de energia consumida em toda a rede de distribuição de consumidores cativos da COPEL.

A seguir é apresentada uma tabela com a geração verificada pelas unidades de geração próprias da COPEL, onde se pode ter uma noção da redução de recursos que estes 1024 GWh representam quando comparados ao somatório de geração de energia de 13 usinas hidrelétricas mais uma usina termelétrica que totalizam 582 GWh ao ano.

Tabela 6.7: Geração Própria Acumulado de Janeiro a Dezembro de 2011

Usinas	Capacidade Instalada (MW)	Energia Assegurada (MWmed)	Geração Verificada	
			GWh	MWmed
Hidrelétricas	4.529,61	1.948,33	25.717,14	2.935,75
Gov. Bento Munhoz da Rocha Netto	1.676	576	8.195,18	935,52
Gov. Ney Aminthas de B. Braga	1.260	603	7.661,72	874,63
Gov. José Richa	1.240	605	7.762,94	886,18
Gov. Pedro V. Parigot de Souza	260	109	1.586,35	181,09
Guaricana	36	16,08	178,46	20,37
Chaminé	18	11,6	87,64	10,00
Apucarantina	10	6,71	63,05	7,20
Mourão	8,2	5,3	58,12	6,63
Derivação do Rio Jordão	6,5	5,85	50,02	5,71
Marumbi	4,8	2,96	23,43	2,68
São Jorge	2,3	1,62	12,25	1,40
Chopim I	1,98	1,48	13,78	1,57
Rio dos Patos	1,72	1,02	9,01	1,03
Cavernoso	1,3	0,96	5,45	0,62
Melissa	1	0,64	6,09	0,69
Salto do Vau	0,94	0,6	3,33	0,38
Pitangui	0,87	0,51	0,33	0,04
Termelétrica	20,00	10,30	71,75	8,19
Figueira	20,00	10,30	71,75	8,19
TOTAL	4.549,61	1.958,63	25.788,89	2.943,94

FONTE: COPEL, 2012

7 CONCLUSÕES

No momento em que o mundo se encontra, em meio a crises ambientais e em busca da diminuição do impacto ao meio ambiente, como redução da emissão global de gases do efeito estufa, juntamente com a racionalização de recursos e crescente aumento do custo de energias estabelecidas como uso de petróleo, a necessidade do estudo e da implementação de fontes alternativas de energia se torna cada vez mais premente.

O uso da tecnologia solar fotovoltaica é uma realidade presente em vários países do chamado primeiro mundo, com grande inserção no sistema elétrico em países como a líder mundial neste segmento, Alemanha, em pleno funcionamento. Ainda segundo *EPIA Market Report 2012*, em 2012 a potência instalada mundial em sistemas fotovoltaicos superou os 100 GW, fatos que verificam a eficiência desta tecnologia.

No Brasil, o potencial de geração de energia solar é ótimo em quase toda a sua extensão, e mesmo as áreas menos privilegiadas tem médias comparáveis à líder mundial em energia solar.

Um importante passo na caminhada para a disseminação do uso de sistema fotovoltaicos conectados à rede foi a resolução da ANEEL nº 482, publicada em Abril de 2012, que regulamenta a conexão de sistemas de micro e mini geração de energia à rede elétrica.

Apesar do potencial disponível, regulamentação e conhecimento técnico disponível, que foi demonstrado neste presente trabalho a sua facilidade de implementação, a aplicação do uso de energia solar fotovoltaica no Brasil ainda é inviável por fatores econômicos. Podemos citar a falta de incentivos por parte do governo como diferença crucial e decisiva entre o Brasil e países desenvolvidos que já fazem uso desta tecnologia. Incentivos estes que podem e devem ir desde redução ou isenção de taxas e impostos sobre materiais e produtos para o consumidor até o desenvolvimento de uma política de produção de empregos incentivando a implementação de fábricas de montagem e fabricação de módulos fotovoltaicos e inversores CC/CA.

Uma contribuição deste trabalho foi o cálculo da energia produzida pelos atuais sistemas disponíveis no mercado, analisando variáveis de posicionamento e épocas do ano, baseado no tratamento de dados de irradiação solarimétrica disponíveis em bancos de dados de institutos como NASA, NREL e SWERA.

O cálculo do balanço energético entre geração e produção foi realizado baseado em uma curva de consumo real de uma residência, dando uma ideia de como seria o comportamento deste sistema para um padrão de consumo residencial.

Foram verificadas as tarifas vigentes e realizado um estudo final de viabilidade econômico-financeira, verificando um *turning point* na situação atual onde a aplicação de sistemas fotovoltaicos está prestes a tornar-se economicamente viável para o consumidor.

Entretanto, devido ao constante desenvolvimento desta tecnologia, longe de estar consolidada, torna-se necessário um estudo periódico dos índices e valores obtidos no presente trabalho para acompanhar a evolução do mercado.

Apesar do presente trabalho estar dedicado à análise do ponto de vista do consumidor individual, podemos perceber que a principal contribuição dos sistemas fotovoltaicos não se trata da redução de despesas financeiras da população, mas sim ao impacto à rede elétrica e conseqüente redução de consumo de recursos naturais não-renováveis. Este fator que atinge a esfera ambiental é o que merece mais atenção e que deve ser explorado como fator de incentivo à tecnologia solar fotovoltaica.

Para complementar este trabalho, algumas tarefas ainda podem ser concluídas como futuros estudos nesta área:

- Execução do projeto e análise dos dados reais de geração de energia;
- Análise de regulamentação, legislação e proposta de incentivos fiscais e políticos à implementação de sistemas fotovoltaicos;

- Análise do impacto da inserção de geração distribuída por fonte solar fotovoltaica na rede elétrica, sob aspectos de qualidade e segurança;
- Análise do impacto ambiental e gerenciamento de recursos naturais a partir da inserção da geração de energia solar fotovoltaica na rede elétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABINEE - Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica, **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira**, 2012.

ABNT **NBR IEC 60364: Instalação de sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2012.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento e Eficiência Energética – SPE, **CHAMADA NO 013/2011 - PROJETO ESTRATÉGICO: “ARRANJOS TÉCNICOS E COMERCIAIS PARA INSERÇÃO DA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA”**, Brasília, DF: 2011.

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica, **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, 2002.

BURATTINI, M. P.T.C. **Energia: Uma abordagem multidisciplinária**. Livraria da Física, 2008.

CARVALHO PINTO NETO, AIMÈ F., **Qualificação e etiquetagem de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede**, São Paulo, 2011.

COMETTA, E. **Energia Solar: Utilização e empregos práticos**. Hemus, 2004.

CRESESB Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, **Tutorial de Energia Fotovoltaica**, 2006.

DEMBIKSI, D. **Análise da nova regulamentação de acesso ao sistema de distribuição pela micro e minigeração distribuída com fontes renováveis**. Curitiba, 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2020**. Brasília, 2011.

EPE Empresa de Pesquisa Energética, **Nota Técnica EPE – Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Energética Brasileira**, 2012.

EPE Empresa de Pesquisa Energética, **Nota Técnica DEA 03/11 – Projeção da Demanda de Energia Elétrica**, 2011.

EPIA European Photovoltaic Industry Association, **Solar Generation 6 – Solar Photovoltaic Electricity Empowering the World**, 2011.

FALCÃO, D.M., **"Smart Grid e Microrredes: O Futuro já é Presente"**, Anais do VIII SIMPASE, Rio de Janeiro RJ, 9-14 Agosto de 2009.

IEA International Energy Agency, **World Energy Outlook 2009**, 2009.

LISITA JÚNIOR, ORLANDO, **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede: Estudo de caso – 3 kWp instalados no estacionamento do IEE –USP**, São Paulo, 2005.

OLIVEIRA, SÈRGIO H. F., **Geração distribuída de eletricidade: inserção de edificações fotovoltaicas conectadas à rede no estado de São Paulo**, São Paulo, 2002.

OLIVEIRA, SÈRGIO H.F. **Geração distribuída de eletricidade: Inserção de edificações fotovoltaicas conectadas à rede no estado de São Paulo**. São Paulo, 2002.

PALZ, W. **Energia Solar e Fontes Alternativas**. Hemus, 2002.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RÜHTER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**, São José dos Campos : INPE, 2006.

RELATÓRIOS DO PROGRAMA PROINFA – ELETROBRÁS, Disponível em <<http://www.eletronbras.com>>, Acesso em Dez 2012.

SALAMONI, ISABEL T. **METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM ÁREAS URBANAS APLICADA A FLORIANÓPOLIS E BELO HORIZONTE**, Florianópolis, 2004.

SMA SOLAR TECHNOLOGY AG. **Sunny Island System Guide**. Alemanha.

SOLAR ENERGY INTERNATIONAL. **Photovoltaics design and installation manual**. New Society Publishers, 2004.

VILLALVA, M.G.; GAZOLI J.R., **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**, 1. Ed, São Paulo : Érica, 2012.