



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PAULO MARCOS CARNEIRO TELES FILHO

**ESTUDOS DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA MICRO E MINIGERAÇÃO
FOTOVOLTAICA À LUZ DA RESOLUÇÃO N° 482 DA ANEEL**

FORTALEZA

2015

PAULO MARCOS CARNEIRO TELES FILHO

**ESTUDOS DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA MICRO E MINIGERAÇÃO
FOTOVOLTAICA À LUZ DA RESOLUÇÃO N° 482 DA ANEEL**

Tese ou Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestrado em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Demercil de Souza Oliveira Júnior.

FORTALEZA

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

T272e

Teles Filho, Paulo Marcos Carneiro.

Estudos da viabilidade econômica da micro e minigeração fotovoltaica à luz da resolução normativa nº 482 da ANEEL / Paulo Marcos Carneiro Teles Filho. – 2015.

76 f. : il. color., enc. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2015.

Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientação: Prof. Dr. Demercil de Souza Oliveira Júnior.

1. Engenharia elétrica. 2. Energia solar. 3. Geração de energia fotovoltaica. I. Título.

CDD 621.3


PAULO MARCOS CARNEIRO TELES FILHO

**ESTUDOS DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA MICRO E MINIGERAÇÃO
FOTOVOLTAICA CONSIDERANDO O SISTEMA DE COMPENSAÇÃO DA
ENERGIA ELÉTRICA**

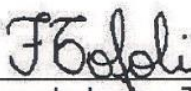
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Sistema de Energia Elétrica.

Aprovada em: 27/10/2015

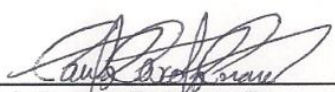
BANCA EXAMINADORA




Prof. Demercil de Souza Oliveira Júnior, Dr. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (DEE-UFC)



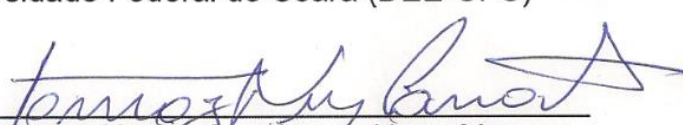
Prof. Fernando Lessa Tofoli, Dr.
Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ)



Prof. Paulo Peixoto Praça, Dr.
Universidade Federal do Ceará (DEE-UFC)



Prof. Luiz Henrique Silva Colado Barreto, Dr.
Universidade Federal do Ceará (DEE-UFC)



Prof. Tomaz Nunes Cavalcante Neto, Msc.
Universidade Federal do Ceará (DEE-UFC)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Paulo Teles e Tereza Neuma, que sempre cuidaram para que eu tivesse uma boa educação e me apoiarem nas decisões que tomei ao longo de minha vida. Por estarem sempre me incentivando a atingir os meus objetivos.

Ao meu falecido avô, Cristiano, que sempre foi um exemplo de pessoa para mim e me ensinou valores que eu carrego comigo até hoje. Uma pessoa que sempre quis me ver atingir os meus sonhos e objetivos e que não pretendo decepcionar.

Aos meus irmãos, Matheus e Samara, por estarem sempre contribuindo para que o meu dia a dia seja divertido. Duas pessoas que eu tenho muito carinho e espero ver seus sonhos sendo concretizados.

À minha adorável companheira, Tayná Braga, por sempre estar torcendo pelo meu sucesso, procurando me ajudar no que pode e me proporcionando dias incríveis ao seu lado. Uma pessoa que tenho grande afeição e espero que realize todos os seus sonhos.

Ao meu grande amigo, Jordano Teixeira, por todos os anos de camaradagem e por ser alguém que está sempre querendo ver o melhor de mim. Um verdadeiro amigo e espero que consiga atingir suas metas e se torne o excelente escritor que ele merece ser.

Aos meus queridos amigos, Crescêncio, Victor, Gerhan, Thiago, Ítalo, Nathan, Leonard, Hugo, Guga, Jão e Caio por me proporcionarem boas recordações e por fazerem parte de diversos momentos agradáveis durante o decorrer de minha vida.

Ao meu orientador, Demercil de Souza, pela orientação na dissertação, estando sempre disposto a auxiliar nos problemas que foram surgindo durante o percurso do trabalho. E também ao Professor Tomaz pela contribuição no desenvolvimento do trabalho.

Aos meus colegas do GPEC, pelo companheirismo e pelas diversas horas de trabalho que partilhamos no laboratório em busca de finalizarmos nossos projetos.

À instituição CAPES que contribuiu com o apoio financeiro necessário à realização desse trabalho e desenvolvimento científico.

RESUMO

CARNEIRO, P. M. T. F. “**Estudos da viabilidade econômica da micro e minigeração fotovoltaica à luz da resolução normativa nº 482 da ANEEL**”, Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará – UFC. Fortaleza, 2015.

O presente trabalho trata de realizar um estudo econômico de sistemas fotovoltaicos de micro e minigeração para a região Nordeste do Brasil, considerando o Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Uma revisão literária aprofundada é apresentada e focada no conceito de energia solar, bem como suas potenciais aplicações e as vantagens e desvantagens inerentes. Para entender a situação atual do mercado com relação à energia fotovoltaica no cenário brasileiro, são apresentados preços de aquisição das componentes que compõem o sistema solar e exemplificados os impostos envolvidos. A fim de mensurar o recurso solar da região de análise e avaliar a quantidade de energia elétrica gerada em um ano, são apresentados e discutidos três exemplos de sistemas com as potências de 1,5 kW, 100 kW e 1 MW. A partir dos dados de investimentos iniciais adotados, taxa de geração, custos de operação e manutenção, energia gerada são calculados o Valor Presente Líquido e a Taxa Interna de Retorno para cada sistema escolhido, tendo como resultados o VPL negativo para o sistema fotovoltaico de 1,5 kW e positivo para os sistemas de 100 kW e 1 MW, e a TIR inferior a taxa de atratividade financeira para o sistema de 1,5 kW e superior para os demais sistemas fotovoltaicos analisados.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica, micro e minigeração de energia, análise de retorno de investimentos, VPL e TIR.

ABSTRACT

CARNEIRO, P. M. T. F. “**Studies of economic viability of photovoltaic micro and minigeneration considering ANEEL’s regulatory resolution number 482**”, Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará – UFC. Fortaleza, 2015.

This work consists in performing an economic study regarding the implementation of photovoltaic micro and minigeneration in the Northeast region of Brazil, considering the Compensation System for Electric Energy. A thorough literature review is presented focused on concept of solar energy, as well as potential applications and inherent advantages and disadvantages. In order do understand the current market scenario comprising photovoltaic generation in Brazil, the costs associated to several system components and involved taxes are evaluated. In order to assess solar resources in a given study region and evaluate the amount of energy that generated during one year, three examples regarding systems rated at 1.5 kW, 100 kW and 1 MW are presented and discussed. Based on key parameters such as initial investments, generation rate, operation and maintenance costs, and energy generated, the Net Present Value (NPV) and the Internal Rate of Return are calculated of each aforementioned case. It can be seen that a negative NPV is obtained for the 1.5-kW systems, while the positive values exist for the 100-kW and 1-MW ones. Besides, the Internal Rate of Return (IRR) is lower than the financial ends for the 1.5-kW system and higher for the remaining others.

Keywords: Photovoltaic solar energy, micro and minigeneration of energy, return of investments analysis, NPV and IRR.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Balanço energético do planeta Terra.....	4
Figura 2.2. Componentes da radiação solar.....	5
Figura 2.3. Rotação terrestre ao redor do Sol.....	6
Figura 2.4. Gráfico do espectro solar.....	8
Figura 2.5. Composição de uma célula fotovoltaica.....	10
Figura 2.6. Esquema de uma junção pn.....	11
Figura 2.7. Painel fotovoltaico.....	12
Figura 2.8. Célula de silício monocristalino.....	13
Figura 2.9. Célula de silício policristalino.....	14
Figura 2.10. Célula de silício amorfo.....	15
Figura 2.11. Célula de filme fino flexível de CIS.....	15
Figura 2.12. Associação em paralelo de módulos em paralelo.....	17
Figura 2.13. Associação em série de módulos fotovoltaicos.....	17
Figura 3.1. Módulo solar <i>Yingli</i> YL250P 29b.....	24
Figura 3.2. Módulo solar <i>Kyocera</i> KD250GH-4FB2.....	25
Figura 3.3. Exemplos de inversores solares.....	27
Figura 3.4. Exemplos de cabos e conectores para sistemas solares fotovoltaicos.....	29
Figura 4.1. Média anual do total diário de irradiação solar global incidente no Brasil.....	36
Figura 4.2. Médias sazonais de irradiação global no Brasil.....	37
Figura 4.3. Variabilidade média anual de irradiação solar no Brasil.....	40
Figura 4.4. Variabilidade média sazonal de irradiação solar no Brasil.....	41
Figura 4.5. Dados de irradiação solar média para Fortaleza - CE.....	43
Figura 4.6. Dados de irradiação solar em Campinas - SP.....	47
Figura 4.7. Dados de irradiação solar em Parnaíba - PI.....	48
Figura 4.8. Dados de irradiação solar em Blumenau - SC.....	49
Figura 4.9. Dados de irradiação solar em Recife - PE.....	49
Figura 4.10. Dados de irradiação solar em Belo Horizonte - MG.....	51
Figura 5.1. Exemplo gráfico de fluxo de caixa.....	54
Figura 5.2. Fluxo de caixa para o sistema fotovoltaico de 1,5 kW.....	59
Figura 5.3. Fluxo de caixa para o sistema fotovoltaico de 100 kW.....	61
Figura 5.4. Fluxo de caixa para o sistema fotovoltaico de 1 MW.....	62

Figura 5.5. Gráfico da TIR em função da irradiação solar para diferentes cidades no estado do Ceará para um sistema fotovoltaico de 1 MW.65

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Custos de sistemas de geração fotovoltaica por diferentes potências instaladas...	23
Tabela 3.2. Especificações do módulo <i>Yingli</i> YL250P 29b.	25
Tabela 3.3. Especificações do módulo <i>Kyocera</i> KD250GH-4FB2.	26
Tabela 3.4. Custos de inversores para sistemas fotovoltaicos para diferentes potências.	27
Tabela 4.1. Coordenadas para localidade em Fortaleza - CE.	42
Tabela 4.2. Energia gerada mensal e anual para um sistema de 1,5kW.	45
Tabela 4.3. Energia gerada mensal e anual de um sistema de 100kW.	45
Tabela 4.4. Energia gerada mensal e anual para um sistema de 1 MW.	46
Tabela 4.5. Energia gerada mensal e anual para um sistema de 1MW em Campinas.	47
Tabela 4.6. Energia gerada mensal e anual para um sistema de 1MW em Parnaíba.	48
Tabela 4.7. Energia gerada mensal e anual para um sistema de 1MW em Blumenau.	50
Tabela 4.8. Energia gerada mensal e anual para um sistema de 1MW em Recife.	50
Tabela 4.9. Energia gerada mensal e anual para um sistema de 1MW em Belo Horizonte.	52
Tabela 5.1. Especificações da análise para cada sistema escolhido.	57
Tabela 5.2. VPL e TIR para o sistema de 1,5 kW.	60
Tabela 5.3. VPL e TIR para o sistema de 100 kW.	61
Tabela 5.4. VPL e TIR para o sistema de 1 MW.	62

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

<i>a</i>	Ano
ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
A _o	área de incidência solar
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CdTe	Telureto de Cádmio
CE	Ceará
CIS	Dissulfeto de Cobre e Índio
COELCE	Companhia Energética do Ceará
COFINS	Contribuição para Financiamento da Seguridade Social
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
<i>d</i>	Dia
DPS	Dispositivo de proteção contra surtos
DQM _d	Desvio Quadrático Médio
E	Energia solar incidente em determinado lugar
E _g	Energia gerada
E _{Ga}	Energia gerada anualmente
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
E _R	Energia recebida
GaAs	Arseneto de Gálio
HSP	Horas de Sol Pleno
<i>i_{af}</i>	Taxa de atratividade financeira
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços
I _d	Valor médio do total diário de irradiação
I _{d, a}	Total diário de irradiação global
IEA	<i>International Energy Agency</i>
i _G	Taxa de geração de energia elétrica
I _{MP}	Corrente de Máxima Potência
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

I_0	Investimento inicial
IP67	Proteção à prova de poeira e imersão temporária
I_{saz}	Valor médio da irradiação global na estação do ano
I_{sc}	Corrente de Curto-Circuito
ISS	Imposto sobre Serviços de Qualquer Natureza
LER	Leilão de Energia de Reserva
MC4	Tipo de Condutor – <i>Multi Contact</i>
MG	Minas Gerais
MME	Ministério de Minas e Energia
N_a	Número de anos com dados válidos
N_d	Número de dias com dados válidos
O&M	Custos de Operação e Manutenção
OMM	Organização Mundial de Meteorologia
PE	Pernambuco
PI	Piauí
PIS	Programa de Integração Social
P_M	Potência Máxima
P_T	Potência Nominal
REIDI	Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura
R_x	Receita Líquida
SC	Santa Catarina
SIN	Sistema Interligado Nacional
SP	São Paulo
SWERA	<i>Solar and Wind Energy Resource Assessment</i>
TIR	Taxa Interna de Retorno
TÜV	<i>Technischer Überwachungsverein</i>
UV	Ultravioleta
V_{anual}	Variabilidade anual
$V_{d, a}$	Variabilidade interanual
V_{MP}	Tensão de Máxima Potência
V_{OC}	Tensão de Circuito Aberto
VPL	Valor Presente Líquido
V_{saz_a}	Variabilidade inter-sazonal

$V_{sazonal}$	Variabilidade sazonal
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
$\eta_{CC/CA}$	Rendimento do Inversor
γ	Ângulo de Incidência solar

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampere
eV	Elétron-volt
g	Gramma
h	Hora
J	Joule
J/a	Joules por ano
m	Metro
m ²	Metro ao quadrado
R\$	Real
R\$/W	Real por watt
US\$	Dólar
V	Volt
W	Watt
Wh	Watt-hora
W/m ²	Watt por metro quadrado
Wh/m ²	Watt-hora por metro quadrado
€	Euro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVO DO TRABALHO	2
1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2. GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E SEUS FUNDAMENTOS	4
2.1. ENERGIA SOLAR.....	4
2.1.1. Espectro Solar	7
2.1.2. Instrumentos de medição da radiação solar.....	8
2.2. SISTEMA DE CONVERSÃO DA ENERGIA SOLAR – CÉLULAS FOTOELÉTRICAS	9
2.2.1. Célula Fotovoltaica	12
2.3. GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	16
2.3.1. Módulo Fotovoltaico	16
2.3.2. Demais componentes do sistema fotovoltaico	18
2.3.3. Configurações de um sistema fotovoltaico	20
2.3.4. Vantagens e desvantagens	22
2.4. CONCLUSÃO	22
3. CUSTOS DE AQUISIÇÃO DOS COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO	23
3.1. CUSTO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	23
3.2. CUSTOS DAS COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	24
3.2.1. Painel Fotovoltaico.....	24
3.2.2. Inversor.....	26
3.2.3. Estrutura de fixação.....	28
3.2.4. Cabeamento e equipamentos de proteção	28
3.2.5. Demais custos.....	29
3.3. IMPOSTOS E INCENTIVOS	30

3.3.1. Impostos	30
3.3.2. Incentivos	31
3.3.3. Resolução normativa nº 482 da ANEEL.....	33
3.4. CONCLUSÃO	34
4. IRRADIAÇÃO SOLAR NO NORDESTE DO BRASIL.....	35
4.1. DADOS DE IRRADIAÇÃO SOLAR BRASILEIROS	35
4.2. VARIABILIDADE ANUAL E SAZONAL.....	38
4.3. AVALIAÇÃO DO RECURSO SOLAR	42
4.4. CONCLUSÃO	52
5. ANÁLISE DA ATRATIVIDADE FINANCEIRA DE UM SISTEMA FOTVOLTAICO	54
5.1. EQUACIONAMENTO FINANCEIRO	54
5.2. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	56
5.2.1. Especificações	56
5.2.2. Cálculo do VPL e da TIR.....	59
5.2.3. Comparação com o cenário da Alemanha.....	66
5.3. CONCLUSÃO	67
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	69
REFERÊNCIAS	72

1. INTRODUÇÃO

Mediante a necessidade de uma vida confortável para a humanidade, a evolução da tecnologia no mundo é um fator decorrente e, com isso, a cada dia que passa a demanda de energia elétrica cresce (FILHO, 2013). Para suprir o aumento do consumo de energia, é necessário que novas fontes geradoras de eletricidade sejam exploradas. Dentre os processos conhecidos de geração de energia elétrica, o mais utilizado no planeta é conversão de energia por meio da queima de combustíveis fósseis, como o carvão e o petróleo. O maior problema desse tipo de fonte de energia está ligado ao impacto ambiental causado devido à liberação de gás carbônico na atmosfera, oriundo do processo de combustão. Devido a esta desvantagem, existe uma necessidade de se usar fontes de energia menos danosas ao meio ambiente. Elas são denominadas de fontes alternativas de energia, ou energias renováveis. Dentre elas, se destaca a energia solar.

A energia solar fotovoltaica tem como fonte de energia o Sol. A conversão dos raios solares em energia é realizada através de células fotoelétricas. Duas vantagens notáveis podem ser observadas para a energia fotovoltaica. Primeiro, a fabricação de seus módulos pode ser realizada em larga escala. Em segundo, é uma tecnologia que pode ser utilizada em pequenas quantidades, o que abre uma gama de aplicações possíveis. Os sistemas podem ser pequenos, como aplicações em calculadoras, ou grandes, como no caso de usinas de geração fotovoltaica (IEA, 2014). Sua principal desvantagem está no fato de a luz do Sol ser uma fonte intermitente de energia, ou seja, não é um recurso que está disponível a qualquer hora e depende de condições climáticas.

De acordo com dados da IEA (*International Energy Agency*), para o ano de 2015, estima-se que a produção de energia fotovoltaica, considerando as usinas em funcionamento e os projetos de instalação, seja superior a 200 TWh no mundo. No final do ano de 2013, a capacidade global de energia fotovoltaica atingiu 128 GW instalados (IEA, 2014). Os países que lideram a produção de energia solar são a Alemanha e a Itália, seguidos pela China, Estados Unidos e Japão.

No Brasil, a matriz de energia é predominantemente renovável. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética, EPE, para o ano de 2014, a maior parte da energia gerada no país ainda pertence à fonte de geração hidrelétrica, que corresponde a 65,2% da produção

total de energia no país, com cerca de 410 TWh de energia gerada (EPE, 2015). A geração de energia fotovoltaica ainda não representa uma quantidade de peso na geração de energia no território brasileiro, apesar da disponibilidade do recurso solar, que supera países como Alemanha.

Até o ano de 2012, 99% dos painéis fotovoltaicos em operação no Brasil eram usados em regiões isoladas onde não se tinha conexão com a rede elétrica. Apenas a partir de 2012, com a resolução normativa nº 482 da ANEEL, que permite ao usuário realizar a troca de energia com a rede elétrica, é que a energia fotovoltaica começou a crescer (SOLAR, 2015).

Apesar dos benefícios proporcionados pelo uso da energia fotovoltaica e da disponibilidade do recurso solar, no Brasil, ainda existem muitas barreiras que fazem com que os investidores pensem com cuidado antes de investir em um sistema fotovoltaico, seja este de pequeno ou grande porte. Primeiramente, o custo de aquisição do sistema é alto mediante aos impostos envolvidos na geração e compra dos componentes. A falta de financiamento com juros baixos é um dos principais obstáculos da energia solar no país (SOLAR, 2015).

Existe uma necessidade de se realizar um estudo de viabilidade econômica na área de energia solar, visto que o governo recentemente anda realizando programas de incentivos para isenção de impostos para micro e minigeração (COLAÇO, 2015). Um trabalho que aponte os custos de financiamento e o tempo de retorno do investimento na geração fotovoltaica irá contribuir para o incentivo de investimentos.

1.1. OBJETIVO DO TRABALHO

O presente trabalho tem como objetivo principal realizar a análise financeira de viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos com diferentes tipos de potências instaladas, enquadrados no quesito de micro e minigeração de energia (potência máxima de 1MW). Para comprovar a possibilidade de se implantar um sistema fotovoltaico e obter um retorno financeiro, será definido o investimento inicial do sistema e sua receita líquida para se calcular o Valor Presente Líquido e a Taxa Interna de Retorno.

Serão apresentados dados de custos para cada componente do sistema com o objetivo de mostrar a situação atual do mercado de energia solar no Brasil, para ter-se um

entendimento do investimento inicial necessário para embarcar num projeto fotovoltaico na região Nordeste do país.

Além dos custos, também serão discutidos dados de irradiação solar para a região Nordeste, objetivando comprovar que a localidade apresenta uma boa avaliação do recurso solar, o que torna favorável o retorno do dinheiro investido no decorrer dos anos.

1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em seis capítulos: Introdução, Geração de energia solar e seus fundamentos, Custos de aquisição das componentes de um sistema fotovoltaico, Irradiação solar no Nordeste do Brasil, Análise financeira de um investimento solar e Considerações Finais. O primeiro capítulo trata da introdução, objetivos e estrutura do trabalho.

O segundo capítulo é composto por uma revisão bibliográfica do conceito de energia solar e seus fundamentos, começando pela fonte de energia até as tecnologias envolvidas em todo o sistema de geração e suas configurações de aplicações.

O terceiro capítulo trata do levantamento dos custos individuais de cada componente de um sistema fotovoltaico no mercado, contendo os custos estimados de sistemas completos para determinadas faixas de potências instaladas. Também são citados os impostos envolvidos no processo de geração e aquisição dos componentes.

O capítulo quatro é constituído de dados de irradiação solar obtidos por uma pesquisa governamental para se entender o quanto se pode gerar de energia anualmente para os sistemas de estudo escolhidos no trabalho.

O quinto capítulo é composto pela análise financeira dos sistemas em estudo. Serão definidas as equações envolvidas nos processos de obtenção dos resultados esperados nos objetivos do trabalho.

O capítulo seis é dedicado às considerações finais do trabalho, a conclusão do estudo e os possíveis trabalhos futuros em que esta pesquisa pode influenciar.

2. GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E SEUS FUNDAMENTOS

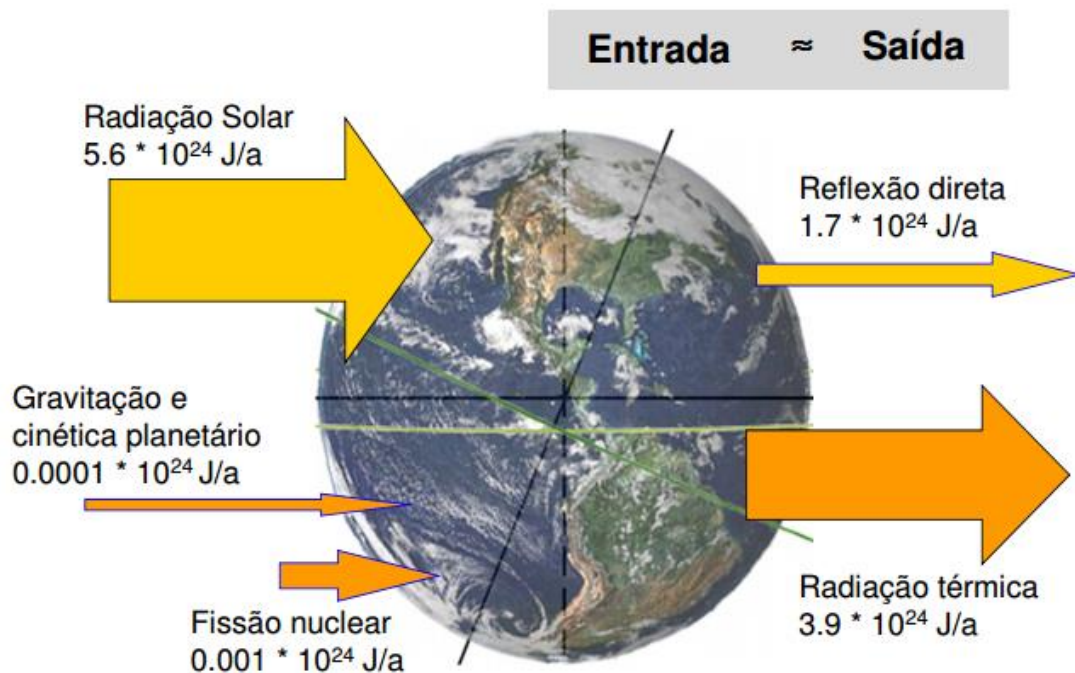
O presente capítulo apresenta uma revisão bibliográfica da geração de energia elétrica proveniente da irradiação solar, discorrendo sobre seus fundamentos, sua fonte de energia e as tecnologias envolvidas no processo de geração.

2.1. ENERGIA SOLAR

Entender a origem de uma fonte de energia primária e como utilizá-la para a produção de energia elétrica são fatores essenciais. Na geração de energia fotovoltaica, a fonte de energia primária envolvida é o Sol.

O Sol fornece anualmente, para a atmosfera terrestre, cerca de $5,445 \times 10^{24}$ joules ou $1,5125 \times 10^{18}$ kWh (quilowatts hora) de energia (FADIGAS, 2011). O balanço de energia no planeta terra é demonstrado na Figura 2.1.

Figura 2.1. Balanço energético do planeta Terra.



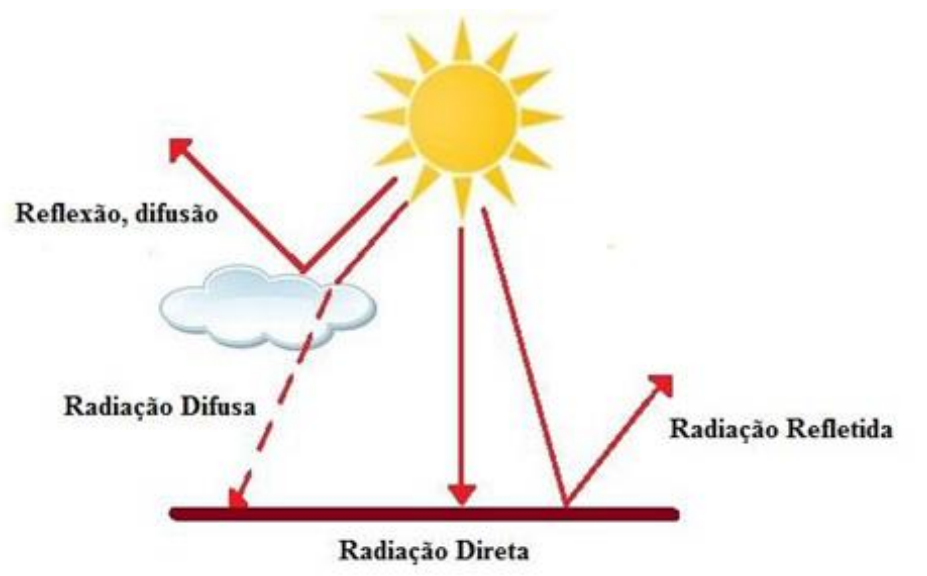
Fonte: (SCHWAB, 2013).

A forma de transferência da energia oriunda do Sol dá-se através da propagação de ondas eletromagnéticas (VIANA, 2014), onde 97% da radiação solar está contida entre comprimentos de onda de 0,3 a 3,0 μm , o que é caracterizada como uma radiação de ondas curtas.

Para a obtenção de uma análise da radiação na superfície terrestre é importante o conhecimento da intensidade da radiação solar e sua composição. A radiação advinda do Sol que incide no limite superior da atmosfera sofre uma série de reflexões, dispersões e absorções durante o seu percurso até o solo devido às mudanças climáticas (FADIGAS, 2011).

A incidência total da radiação solar sobre um corpo localizado no solo é o somatório das componentes direta, difusa e refletida, como é ilustrado na Figura 2.2 (VIANA, 2014), (FADIGAS, 2011).

Figura 2.2. Componentes da radiação solar



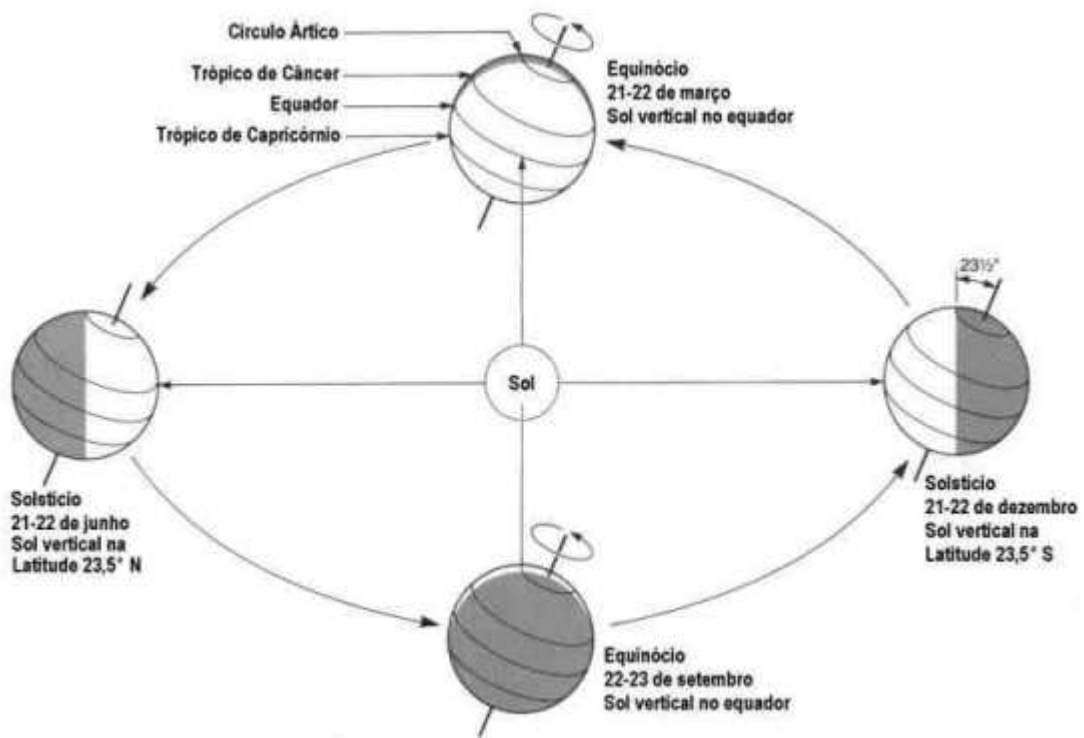
Fonte: (FOCUSOLAR, 2015).

A radiação direta é a parcela da radiação proveniente diretamente do Sol que não sofreu nenhuma mudança de direção de direção além da provocada pela refração atmosférica. A radiação difusa é aquela recebida por um corpo após a direção dos raios solares ter sido modificada por reflexão na atmosfera. A radiação refletida é a parte dos raios solares

reenviados para o espaço devido a sua reflexão por nuvens ou superfícies terrestres. Ela depende das características do solo e da inclinação do equipamento captador (FADIGAS, 2011). A razão entre a radiação refletida e incidente é denominada albedo.

Os níveis de radiação solar em um plano horizontal na superfície terrestre variam com as estações do ano, devido principalmente à inclinação do seu eixo de rotação em relação ao plano da órbita em torno do Sol. Esta inclinação faz com que a orientação da Terra em relação ao Sol mude continuamente enquanto a Terra gira em torno do Sol (GRIMM, 1999). No hemisfério de verão as alturas do Sol são maiores, os dias mais longos e há mais radiação solar. No hemisfério de inverno as alturas do Sol são menores, os dias mais curtos e há menos radiação solar. Os níveis de radiação também variam com a região, devido especialmente às diferenças de latitude, condições meteorológicas e altitudes (FADIGAS, 2011). A relação do movimento de rotação terrestre com o Sol está demonstrada na Figura 2.3.

Figura 2.3. Rotação terrestre ao redor do Sol.



Fonte: (GRIMM, 1999).

A energia solar recebida em um local depende do ângulo de incidência solar, como mostra a Equação 2.1 (SCHWAB, 2013).

$$E_R = E \cdot A_0 \cdot \text{seno}(\gamma) \quad (2.1)$$

Onde E_R é a Energia recebida em W, E a energia solar que incide no determinado lugar em W/m^2 , A_0 a área de incidência deitada na superfície da Terra em m^2 e γ é o ângulo de incidência solar.

Com as condições atmosféricas ótimas, em outras palavras, céu aberto sem a presença de nuvens, a iluminação máxima observada ao meio-dia em um local situado ao nível do mar se eleva a 1kW/m^2 (FADIGAS, 2011). Atinge $1,05\text{kW/m}^2$ a uma altura de 1000 metros acima do nível marítimo $1,1\text{kW/m}^2$ nas alturas das montanhas. A radiação emitida pelo Sol que atinge a camada externa da atmosfera é chamada de Constante Solar (VIANA, 2014) que possui um intensidade média de $1,366\text{ kW/m}^2$.

O Brasil possui um ótimo índice de radiação solar, especialmente o Nordeste brasileiro. Nesta região se encontram os melhores índices, com valores típicos de 200 a 250 W/m^2 de potência contínua, o que equivale entre 1752 kWh/m^2 a 2190 kWh/m^2 por ano de radiação incidente. Este fato coloca o local entre as regiões do mundo com maior potencial de energia solar (FADIGAS, 2011).

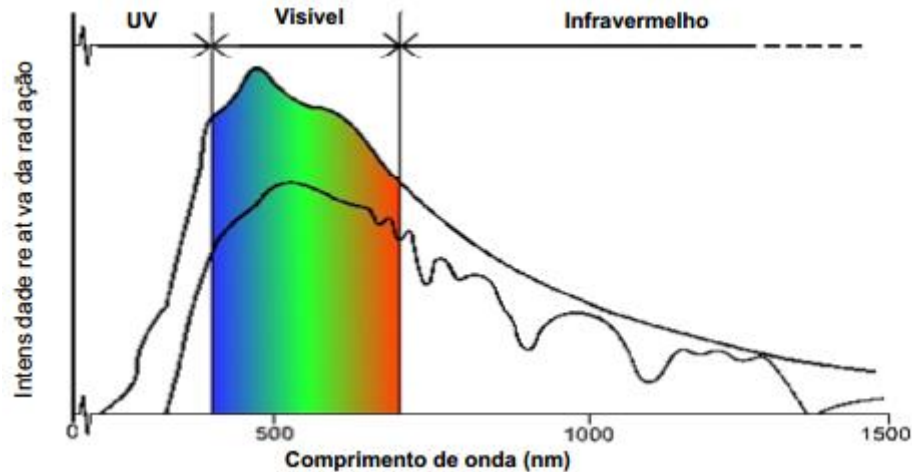
2.1.1. Espectro Solar

O espectro solar está inserido na ampla gama de radiações eletromagnéticas, que estão compreendidas as ondas de rádio, televisão, radar, raios γ e raios x (VIANA, 2014). A radiação solar apresenta três grandes faixas: ultravioleta (UV), luz visível e infravermelho, conforme é ilustrado na Figura 2.4.

Os raios ultravioleta estão compreendidos numa faixa de comprimento de onda de 200 a 390 nm, enquanto que os raios infravermelhos compreendem uma faixa de comprimento superior a 760 nm (SCHWAB, 2013). O espectro de luz visível corresponde ao comprimento de onda de tamanho superior ao ultravioleta e inferior ao infravermelho.

O aproveitamento da energia solar é dado pelas faixas de maior comprimento, ou seja, pelas ondas de luz visível e infravermelha (VIANA, 2014).

Figura 2.4. Gráfico do espectro solar.



Fonte: (VIANA, 2014).

2.1.2. Instrumentos de medição da radiação solar

Os instrumentos de medição da radiação solar medem a potência incidente por unidade de superfície, integrada sobre vários comprimentos de onda. De acordo com as regras estabelecidas pela OMM (Organização Mundial de Meteorologia), são determinados limites de precisão para quatro tipos de instrumentos: de referência ou padrão, instrumentos de primeira, segunda e terceira classe (WORDPRESS, 2008). As medições padrões são a radiação total e componente difusa no plano horizontal e a radiação direta normal. Existem diversos instrumentos de medição da radiação solar, onde os com mais destaque serão citados nos parágrafos seguintes.

Heliógrafo – Instrumento que registra a duração da insolação, ou seja, o período de tempo em que a radiação solar supera um dado valor de referência. A radiação solar é focalizada por uma esfera de cristal de 10 cm de diâmetro sobre uma fita que, pela ação da radiação é enegrecida. O comprimento desta fita exposta à radiação solar mede o número de horas do brilho solar.

Piranômetros – São instrumentos que medem a radiação total, ou seja, a radiação oriunda de todas as direções do hemisfério. Este instrumento caracteriza-se pelo uso da termopilha que mede a diferença de temperatura entre duas superfícies. A expansão sofrida pelas superfícies provoca uma diferença de potencial que, ao ser medida, mostra o valor da energia solar. Um outro modelo de piranômetro é o que utiliza uma célula fotovoltaica de silício monocristalino para coletar medidas solarimétricas.

Piroheliômetros – São instrumentos que medem a radiação direta, pois apresentam uma pequena abertura que visualiza apenas o disco solar e a região próxima denominada circunsolar. O aparelho segue o movimento solar onde é constantemente ajustado para focalizar melhor a região do sensor.

Actinógrafo – São utilizados para medição da radiação total ou sua componente difusa, possuindo sensor e registrador na mesma unidade. Consiste essencialmente em um receptor com três tiras metálicas, a central de cor preta e as laterais brancas. As tiras brancas estão fixadas e a preta está livre entre as extremidades, e irão se curvar, quando iluminadas, em consequência dos diferentes coeficientes de dilatação dos metais que a compõem.

Devido à natureza estocástica da radiação solar incidente na superfície da Terra, é conveniente basear as estimativas e previsões do recurso solar em informações solarimétricas levantadas durante prolongados períodos de tempo (FADIGAS, 2011). Os dados de medição de radiação solar são apresentados habitualmente na forma de energia coletada ao longo de um dia, sendo este parâmetro uma média mensal ao longo de muitos anos.

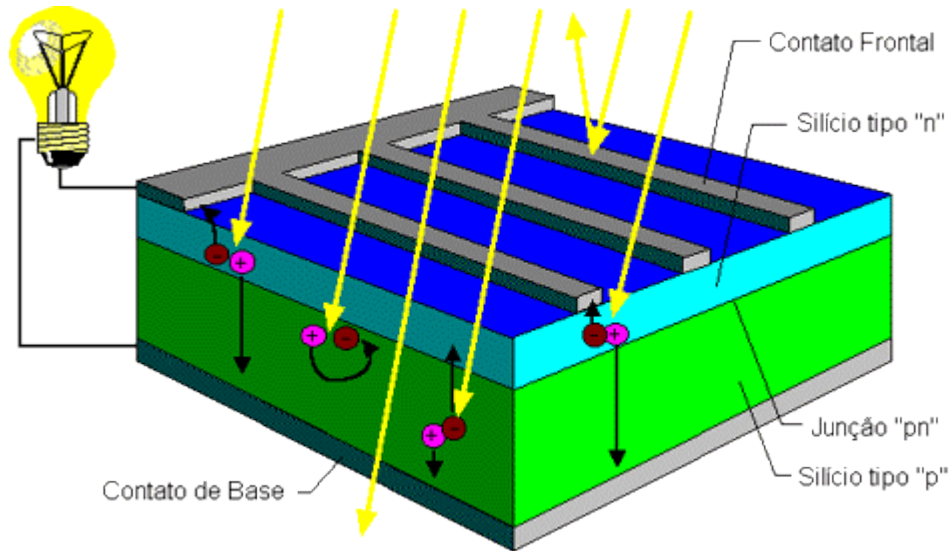
2.2. SISTEMA DE CONVERSÃO DA ENERGIA SOLAR – CÉLULAS FOTOELÉTRICAS

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade através do efeito fotovoltaico (FADIGAS, 2011).

Na natureza, existem materiais classificados como semicondutores, que se caracterizam por possuírem uma banda de valência completamente preenchida por elétrons e uma banda de condução totalmente vazia a temperaturas baixas. Estes materiais apresentam características intermediárias entre um condutor e um isolante e são utilizados na fabricação de células fotovoltaicas (NASCIMENTO, 2004).

A formação de uma célula fotovoltaica é ilustrada na Figura 2.5.

Figura 2.5. Composição de uma célula fotovoltaica



Fonte: (BLUESOL, 2011).

A separação entre as duas bandas de energia permitida nos semicondutores é da ordem de 1 eV. Tal fato permite aos semicondutores apresentarem determinadas características úteis ao processo de conversão de energia da luz solar. Uma delas é o aumento da condutividade com a temperatura, devido à excitação térmica de portadores da banda de valência para a banda de condução. Uma propriedade fundamental das células fotovoltaicas é a possibilidade de fótons excitarem elétrons à banda de condução. Este fenômeno, que é observado em semicondutores intrínsecos, também denominados de puros, não é suficiente por si só para o funcionamento da célula. Para isso, é necessária uma estrutura apropriada para que os elétrons excitados possam ser coletados, gerando uma corrente útil (FADIGAS, 2011).

O semicondutor mais utilizado é o silício. Seus átomos são caracterizados por possuírem quatro elétrons de ligação que ligam aos vizinhos, formando uma estrutura cristalina. O cristal de silício puro não possui elétrons livres, o que faz com este seja um mal condutor elétrico (NASCIMENTO, 2004). Ao adicionar átomos com cinco elétrons de ligação, como o fósforo, haverá um elétron em excesso que não poderá ser emparelhado e que ficará sobrando. Isso faz com que, com pouca energia térmica, este elétron se liberte, indo

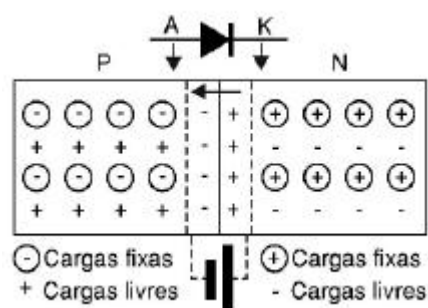
para a banda de condução. Assim, o fósforo é caracterizado como um dopante doador de elétrons e é denominado de dopante tipo n (FADIGAS, 2011).

Por outro lado, ao introduzir átomos com apenas três elétrons de ligação, como é o caso do boro, haverá falta de um elétron para satisfazer as ligações com os átomos de silício. Esta falta é denominada de lacuna e ocorre que, com pouca energia térmica, um elétron de um sítio vizinho passar para esta posição, fazendo com que a lacuna se desloque. Desse modo o boro é um dopante aceitador de elétrons ou dopante tipo p (FADIGAS, 2011).

À temperatura ambiente, há energia térmica suficiente para que praticamente todos os elétrons em excesso dos átomos de fósforo estejam livres, assim como as lacunas criadas pelos átomos de boro possam se deslocar.

Se em um silício puro forem introduzidos átomos de fósforo em uma de suas metades e átomos de boro na outra, será obtida uma junção denominada pn (FADIGAS, 2011). O que ocorre nesta junção é que os elétrons que estão livres na dopagem n se deslocam para o lado p, onde encontram as lacunas que os capturam, fazendo com que haja um acúmulo de elétrons na dopagem p, o que a torna negativamente carregada e uma redução do número de elétrons no lado n, o que o torna positivamente carregado. Estas cargas aprisionadas geram um campo elétrico permanente que dificulta o tráfego de mais elétrons da camada n para p. O processo atinge seu ponto de equilíbrio quando o campo elétrico forma uma barreira capaz de impedir a passagem dos elétrons livres remanescentes no lado n. O efeito descrito na junção pn é demonstrado na Figura 2.6.

Figura 2.6. Esquema de uma junção pn.



Fonte: Adaptado de (SABERELETRÔNICA, 2011).

Se uma junção pn for exposta a fótons com energia maior do que a sua separação, ou do termo em inglês *gap*, ocorrerá a formação de pares elétrons-lacuna. Quando esse fenômeno ocorre na região onde o campo elétrico é diferente de zero, as cargas são aceleradas, gerando uma corrente através da junção. Este deslocamento das cargas origina uma diferença de potencial, conhecida como Efeito Fotovoltaico (FADIGAS, 2011).

O Efeito Fotovoltaico é entendido pela conversão da luz (fótons) diretamente em eletricidade, portanto uma célula fotovoltaica não armazena energia elétrica. Ela apenas mantém um fluxo de elétrons estabelecidos num circuito elétrico enquanto houver incidência de luz sobre a mesma (NASCIMENTO, 2004), (VIANA, 2014).

2.2.1. Célula Fotovoltaica

As células fotovoltaicas são os elementos responsáveis pela conversão direta de luz solar em energia elétrica, devido ao efeito fotovoltaico explicado anteriormente. As primeiras células possuíam um rendimento baixo, em torno de 2% e tinham um custo médio de US\$ 600/W (BRAGA, 2008). Elas podem ser fabricadas utilizando-se diversos tipos de materiais semicondutores. As mais utilizadas são as células compostas de silício, que podem ser constituídos e classificados de acordo com a sua estrutura molecular. O exemplo de um painel fotovoltaico é ilustrado na Figura 2.7.

Figura 2.7. Painel fotovoltaico.



Fonte: (PAINEISFOTOVOLTAICOS, 2011).

O painel fotovoltaico é constituído por um arranjo de células fotovoltaicas, como mostra a Figura 2.7, e é a unidade geradora de energia solar.

Segundo (HILLE, ROTH e SCHMIDT, 1995), os critérios considerados importantes para se avaliar uma tecnologia de célula fotovoltaica são:

- Bom potencial para alta eficiência;
- Disponibilidade do material necessário;
- Preço aceitável do material utilizado;
- Potencial para uma produção de baixo custo;
- Estabilidade das propriedades ao passar das décadas;
- Processos de produção e produtos não agressivos ao meio ambiente.

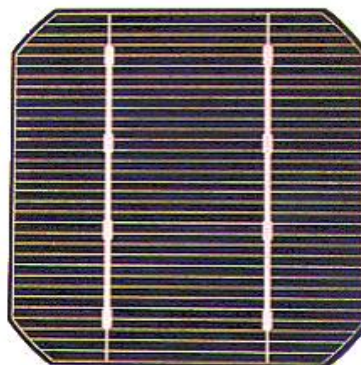
Os vários tipos de células fotovoltaicas que podem ser construídas para gerar um painel fotovoltaico serão exemplificadas a seguir.

Silício Monocristalino

A célula de silício monocristalino é historicamente a mais usada e comercializada como conversor direto de energia solar em elétrica e a tecnologia para a sua fabricação trata-se de um processo básico muito bem constituído (BRAGA, 2008).

Dentre as células fotovoltaicas que utilizam o silício como material base, as monocristalinas são as que apresentam maiores eficiências. As fotocélulas comerciais atingem uma eficiência de 15%, podendo chegar até 18% em células construídas em laboratórios (BRAGA, 2008). A célula tipo monocristalina é mostrada na Figura 2.8.

Figura 2.8. Célula de silício monocristalino.



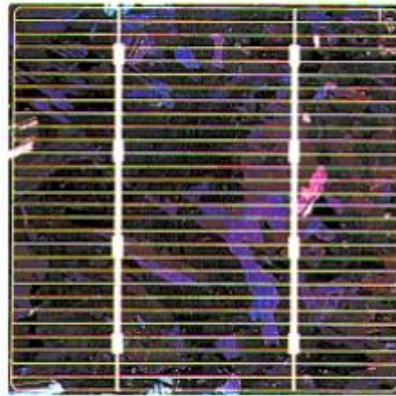
Fonte: (BRAGA, 2008).

Silício Policristalino

As células de silício policristalino, também conhecido como silício multicristalino, são mais baratas que as células de silício monocristalino pelo fato de exigirem um processo de preparação menos rigoroso. No entanto, há uma queda na eficiência, se comparada com o modelo anterior (BRAGA, 2008).

Segundo (HILLE, ROTH e SCHMIDT, 1995), a célula de silício policristalino ocupa a segunda posição no mercado de grande escala de células fotovoltaicas. A célula de silício policristalino é mostrada na Figura 2.9.

Figura 2.9. Célula de silício policristalino



Fonte: (BRAGA, 2008).

Silício Amorfo

Uma célula de silício amorfo se difere das demais estruturas cristalinas por apresentar alto grau de desordem na estrutura dos átomos. A utilização de silício amorfo em células fotoelétricas apresenta vantagens tanto nas propriedades elétricas quanto no processo de fabricação (BRAGA, 2008). Por apresentar uma absorção da radiação solar na faixa da luz visível e podendo ser fabricado mediante deposição de diversos tipos de substratos, o silício amorfo vem se tornando uma forte tecnologia para sistemas fotovoltaicos de baixo custo. As desvantagens deste modelo são a baixa eficiência de conversão em comparação com as células mono e policristalinas de silício e o fato das células serem afetadas por um processo

de degradação logo nos primeiros meses de operação, o que reduz a sua eficiência ao longo de sua vida útil. A célula de silício amorfo é mostrada na Figura 2.10.

Figura 2.10. Célula de silício amorfo.



Fonte: (BRAGA, 2008).

Células de filme finos

São células construídas tendo como base o silício amorfo e outros elementos semicondutores, tais como o Arseneto de Gálio (GaAs), CIS – Dissulfeto de Cobre e Índio ou Telureto de Cádmio (CdTe) (OLIVEIRA, 2008).

A principal aplicação desta tecnologia está em calculadoras, relógios e em outros produtos onde o consumo de energia é baixo. No mercado, estão disponíveis painéis fotovoltaicos com células de filme fino que são mais leves e flexíveis que os de silício clássicos. Sua eficiência, no entanto, ainda não se compara com a do silício monocristalino, atingindo uma faixa de 8 a 9% de eficiência para as células de filme fino compostas de silício amorfo hidrogenado (NASCIMENTO, 2004). Uma célula flexível de filme fino composta de CIS é mostrada na Figura 2.11.

Figura 2.11. Célula de filme fino flexível de CIS.



Fonte: (OLIVEIRA, 2008).

2.3. GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Um sistema de geração de energia solar fotovoltaica é composto por um ou mais painéis fotovoltaicos e por um conjunto de componentes complementares, como baterias, inversores, condicionadores de potência, equipamentos de proteção e estruturas de suporte. Todos estes componentes são considerados no orçamento de um sistema fotovoltaico, além dos custos com cabeamento, instalação e os impostos considerados na compra de cada componente.

2.3.1. Módulo Fotovoltaico

Uma célula fotovoltaica isolada possui baixa tensão e corrente de saída. Para se obter níveis de tensão e corrente de saída adequados para utilização é realizado o agrupamento de várias células, formando um módulo fotovoltaico, também conhecido como painel fotovoltaico (BRAGA, 2008). O agrupamento de células é indispensável para a geração de energia elétrica visto que uma célula individualmente produz pouca energia, em uma tensão de 0,4 V no ponto de máxima potência. O tipo de arranjo e o número de células agrupadas irão depender da tensão de utilização e da corrente desejada na aplicação.

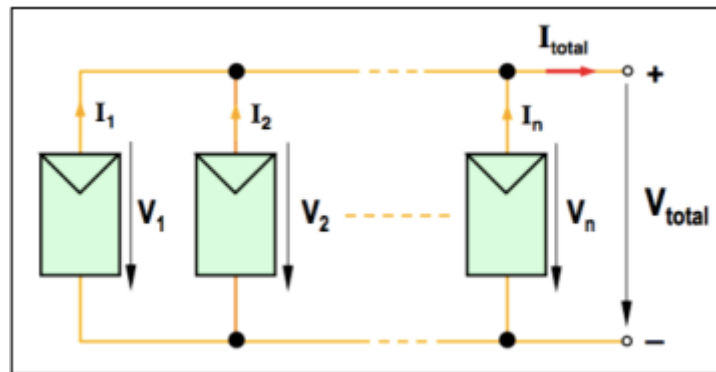
Quanto ao arranjo, os módulos fotovoltaicos podem ser agrupados em uma associação em paralelo ou em série.

Associação em paralelo

Associar módulos fotovoltaicos em paralelo significa que estas irão apresentar terminais do mesmo tipo ligados a um ponto em comum. Deste modo, todos os terminais positivos estão ligados em um ponto, e os negativos em outro (BRAGA, 2008).

Este tipo de associação é utilizado quando se deseja atingir correntes elevadas e manter o nível de tensão estipulado pelo módulo (CARNEIRO, 2010). A representação sistemática de uma associação em paralelo de n módulos fotovoltaicos é ilustrada na Figura 2.12.

Figura 2.12. Associação em paralelo de módulos em paralelo.



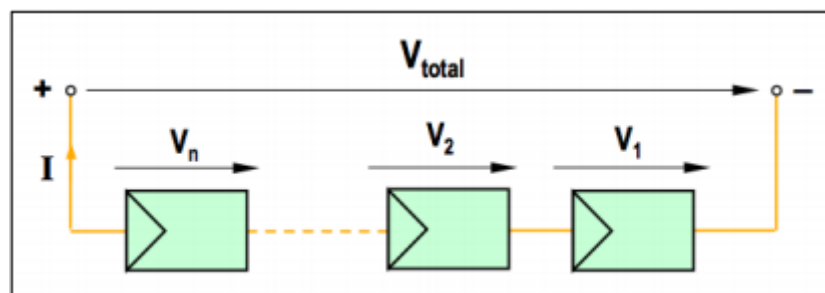
Fonte: (CARNEIRO, 2010).

Associação em série

Na associação em série de módulos fotovoltaicos, o terminal positivo de uma é ligado ao terminal negativo de outra. Nesse caso, a corrente será igual às correntes individuais, mas a tensão total será a soma das tensões individuais (BRAGA, 2008).

A representação esquemática da associação em série é mostrada na Figura 2.13.

Figura 2.13. Associação em série de módulos fotovoltaicos.



Fonte: (CARNEIRO, 2010).

Características elétricas dos módulos fotovoltaicos

A potência dos módulos fotovoltaicos é dada pela potência de pico, expressa em Watt pico (Wp). No entanto, existem outras características elétricas que melhor caracterizam a funcionalidade do módulo (BRAGA, 2008). As principais são:

- Tensão em Circuito Aberto (V_{OC}): Máxima tensão que um dispositivo pode entregar em condições determinadas de radiação e temperatura, correspondendo à situação de circulação de corrente nula;
- Corrente de Curto-Circuito (I_{SC}): Máxima corrente que pode entregar um dispositivo em condições determinadas de radiação e temperatura, correspondendo à situação de tensão nula;
- Potência Máxima (P_M): É o valor máximo de potência que pode entregar o dispositivo. Corresponde ao ponto da curva em que o produto tensão x corrente é máximo;
- Tensão de Máxima Potência (V_{MP}): É a única tensão para qual a potência máxima poderá ser extraída;
- Corrente de Máxima Potência (I_{MP}): Corrente que o dispositivo entrega para máxima potência em condições determinadas de radiação e temperatura.

2.3.2. Demais componentes do sistema fotovoltaico

Como já citado anteriormente, um sistema fotovoltaico requer mais do que o painel fotovoltaico para a geração de energia. A seguir, serão citadas algumas das componentes auxiliares no sistema e suas funções.

Bateria

Baterias são acumuladores de energia, então a função prioritária desse componente num sistema de geração fotovoltaico é acumular a energia que se produz durante horas de luminosidade a fim de poder ser utilizada à noite ou durante períodos prolongados de fraca irradiação solar (BRAGA, 2008).

Outra função das baterias é a estabilização de corrente e tensão na hora de alimentar cargas elétricas, suprimindo transitórios que possam ocorrer no período de geração.

Em todos os casos em que o armazenamento de energia elétrica é necessário, a clássica bateria eletroquímica é a forma de armazenar energia mais conveniente para um sistema fotovoltaico, especialmente pelo fato de que sua característica em corrente contínua permite a

conexão direta entre a bateria e o módulo fotovoltaico, sem a necessidade de conversão da energia (HILLE, ROTH e SCHMIDT, 1995).

Infelizmente, a bateria é conhecida como o componente “ponto fraco” do sistema, em sistemas fotovoltaicos autônomos, considerando que sua vida útil é bem inferior a dos outros componentes do sistema (HILLE, ROTH e SCHMIDT, 1995).

Inversores

Conversores de CC/CA são denominados de inversores. Podem ser usados para alimentar uma carga isolada, mas também para fazer a interligação de um módulo fotovoltaico à rede. A principal função dos inversores num sistema de geração fotovoltaica é converter corrente contínua em corrente alternada, visto que a corrente gerada por um painel é CC (BRAGA, 2008).

As características do inversor tem influência decisiva na operação de um sistema fotovoltaico conectado à rede. O conversor CC/CA tem que converter a corrente contínua do módulo solar para corrente alternada síncrona com a rede. Também tem que se adequar às características de tensão e corrente do gerador fotovoltaico (HILLE, ROTH e SCHMIDT, 1995).

Para gerar a corrente CA, os inversores contam com um dispositivo interruptor, que gera pulsos ao “quebrar” o fluxo de corrente contínua em determinadas etapas. Existem vários tipos de comutadores utilizados, sendo os mais conhecidos os MOSFETs, os IGBTs e os transistores (BRAGA, 2008).

Equipamentos de proteção

O correto dimensionamento e a adequada utilização de dispositivos de proteção contribuem para minimização ou até mesmo a eliminação de falhas. Para a proteção do sistema fotovoltaico e para garantir uma boa operação são necessários equipamentos como disjuntores, chaves e fusíveis (BRAGA, 2008).

As chaves possibilitam a interrupção do fluxo de corrente em situações de emergência ou para fins de manutenção.

Os fusíveis e os disjuntores protegem equipamentos e condutores contra correntes elevadas provocadas por curto-circuitos, consumo elevado ou falha no aterramento.

2.3.3. Configurações de um sistema fotovoltaico

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em três configurações principais (BRAGA, 2008):

- Sistemas isolados;
- Sistemas híbridos;
- Sistemas interligados à rede.

O emprego de cada sistema depende diretamente da finalidade, da avaliação econômica, do nível de confiabilidade e de características específicas de projeto.

Sistemas isolados

Também conhecidos como sistemas autônomos, são sistemas fotovoltaicos que não se encontram conectados à rede elétrica. São sistemas que alimentam diretamente as cargas que irão consumir a energia produzida. Sua maior aplicabilidade está em locais remotos. Ao se dimensionar um sistema isolado, deve ser levado em consideração o cálculo de consumo da carga e utilizar como base os piores índices de radiação solar par a área onde irá ser implantado (SOLAR, 2015).

Esse tipo de sistema pode ou não utilizar algum tipo de armazenamento de energia e não apresentam fontes de energia complementares à geração de energia advinda do Sol, sendo denominados de puramente fotovoltaicos (BRAGA, 2008).

Alguns exemplos de aplicações de sistemas isolados são (SOLAR, 2015):

- Sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água;
- Eletrificação de cercas;
- Postes de iluminação solar;
- Estações replicadoras de sinal;

- Casas isoladas da rede elétrica.

Sistemas Híbridos

Os sistemas híbridos consistem da combinação de sistemas fotovoltaicos com outras fontes de energia com o intuito de assegurar a carga de baterias na ausência do Sol. As fontes de energia auxiliares são a geração eólica, diesel, gás e outros combustíveis (BRAGA, 2008).

A aplicabilidade geral de sistemas híbridos é para sistemas de médio a grande porte, onde atinge um número maior de consumidores. Como é uma configuração onde existem várias possibilidades de arranjos energéticos e escolhas, cada sistema deve ser estudo de forma particular para melhor otimização do conjunto.

Sistemas interligados à rede

Esses sistemas representam uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual estão conectados. No caso do Brasil, ao SIN (Sistema Interligado Nacional). Estes sistemas não contam com unidades de armazenamento de energia devido a toda a geração ser entregue diretamente à rede elétrica (CÂMARA, 2011). Todo o arranjo de painéis é conectado em inversores que fazem a injeção de energia na rede. Esses inversores devem satisfazer severas exigências de qualidade e segurança.

Para que estes sistemas não afetem negativamente a rede elétrica, os inversores devem ser projetados considerando sistemas anti-ilhamento, distorção harmônica, em consonância com as normas aplicáveis, saída CA com forma de onda senoidal pura, proteções contra sobretensões e sobrecorrentes (CÂMARA, 2011).

A potência instalada para esta configuração de sistema varia em virtude do tipo de aplicação desejada, podendo atingir centenas de kWp em centrais fotovoltaicas e dezenas de kWp no caso de alimentação de cargas residenciais (BRAGA, 2008).

2.3.4. Vantagens e desvantagens

Partindo do ponto de se tratar de uma fonte de energia limpa, que não produz poluentes no seu processo de geração de energia elétrica, a energia fotovoltaica apresenta diversas vantagens e de acordo com (BRAGA, 2008), algumas das vantagens são:

- Não consome combustível;
- Não produz poluentes nem contaminação ambiental;
- Não gera poluição sonora;
- Tem uma vida útil superior a 25 anos;
- Possui resistência a condições climáticas extremas como granizo, ventos fortes, temperaturas elevadas e umidade;
- Não possui peças móveis, o que exige pouca manutenção;
- A potência instalada pode ser aumentada com adesão de novos painéis.

Suas principais desvantagens são:

- A fabricação de células fotovoltaicas necessita de tecnologia sofisticada;
- O custo de investimento é elevado;
- O rendimento real de conversão de um módulo é reduzido;
- O rendimento é dependente do índice de radiação solar na área.

2.4. CONCLUSÃO

Ao término do presente capítulo, é possível ter-se uma compreensão do assunto que está sendo tratado neste trabalho. Foram demonstrados, de forma sucinta, os fundamentos da energia solar fotovoltaica, destacando desde a fonte primária de energia utilizada até as tecnologias que convertem a energia da fonte em energia elétrica.

Foi apresentada a célula fotovoltaica e os componentes que participam do processo de geração de energia, que serão considerados nos capítulos seguintes.

3. CUSTOS DE AQUISIÇÃO DOS COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

No presente capítulo serão apresentados os custos de aquisição de componentes que compõe o sistema fotovoltaico como painéis solares, inversores, reguladores e dispositivos de proteção. Também serão considerados os custos com instalação dos painéis, cabeamentos e qualquer custo que esteja ligado ao processo de instalação de uma geradora de energia solar.

3.1. CUSTO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

O custo de um sistema de energia solar fotovoltaica depende do tamanho deste, da potência instalada desejada e da complexidade de instalação (SOLAR, 2015). A variação no preço entre os fornecedores está relacionada a fatores como a qualidade dos componentes utilizados e o tamanho da empresa fornecedora.

Uma pesquisa realizada pela Solar, apresenta valores estimados de custos de um sistema de geração solar completo, incluindo custos com painéis, inversores, cabeamento, instalação e tarifas. Os custos estão demonstrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Custos de sistemas de geração fotovoltaica por diferentes potências instaladas.

Custo total de um Sistema Fotovoltaico	
Potência instalada	Custo em R\$
Sistema de 1,5 kW	12 mil a 18 mil
Sistema de 2 kW	16 mil a 24 mil
Sistema de 3 kW	25 mil a 35 mil
Sistema de 4 kW	32 mil a 45 mil
Sistema de 5 kW	47 mil a 55 mil
Sistema de 10 kW	75 mil a 100 mil
Sistema de 100 kW	650 mil a 900 mil
Sistema de 500 kW	3 milhões a 3,5 milhões
Sistema de 1 MW	5 milhões a 6 milhões

Fonte: (SOLAR, 2015).

3.2. CUSTOS DAS COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Nesta seção serão abordados os preços de aquisição no mercado de cada componente que integra um sistema de geração de energia fotovoltaica.

3.2.1. Painel Fotovoltaico

O custo de um painel fotovoltaico depende da potência do módulo e do fabricante que fornece o painel. Desde modo, os módulos apresentam uma determinada faixa de preço. Para fins de análise, serão apresentados painéis com a mesma capacidade de potência para se comparar os seus preços e suas características.

Serão analisados dois módulos fotovoltaicos com a potência de 250W, um do fabricante *Yingli Solar*, e o outro do fabricante *Kyocera Solar*.

Painel Solar Fotovoltaico *Yingli YL250P 29b*

É constituído de silício policristalino e está mostrado na Figura 3.1. Suas especificações serão apresentadas a seguir (NEOSOLARENERGIA, 2015).

Figura 3.1. Módulo solar *Yingli YL250P 29b*.



Fonte: (NEOSOLARENERGIA, 2015).

As especificações às condições padrões de teste (CPT) que correspondem a Irradiação de 1000 W/m^2 , espectro de massa de ar de 1,5, e temperatura da célula de 25°C , estão demonstradas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Especificações do módulo *Yingli* YL250P 29b.

Parâmetro	Valor
Preço	R\$ 850,00
Potência Máxima (P_M)	250 W
Tolerância	0 – 2 %
Tensão de Máxima Potência (V_{MP})	30,4 V
Corrente de Máxima Potência (I_{MP})	8,24 A
Tensão em Circuito Aberto (V_{OC})	38,4 V
Corrente de Curto-Circuito (I_{SC})	8,79 A
Tensão Máxima do Sistema	1000 V
Dimensões	(1650 x 990 x 40) mm
Tipo	Silício Policristalino
Peso	19,1 kg

Fonte: Adaptada de (NEOSOLARENERGIA, 2015).

Considerando a fração de R\$ por Watt, ou seja, dividindo o preço do painel pela sua potência, o preço por potência do painel fotovoltaico apresentado é de 3,40 R\$/W.

Painel Solar Fotovoltaico *Kyocera* KD250GH-4FB2

O material das células é o silício policristalino e está ilustrado na Figura 3.2.

Figura 3.2. Módulo solar *Kyocera* KD250GH-4FB2.



Fonte: (MINHACASASOLAR, 2015).

As especificações às condições padrões de testes estão apresentadas na Tabela 3.3 (MINHACASASOLAR, 2015).

Tabela 3.3. Especificações do módulo *Kyocera* KD250GH-4FB2.

Parâmetro	Valor
Preço	R\$ 1099,00
Potência Máxima (P_M)	250 W
Tolerância	-3 – 5 %
Tensão de Máxima Potência (V_{MP})	29,8 V
Corrente de Máxima Potência (I_{MP})	8,39 A
Tensão em Circuito Aberto (V_{OC})	36,9 V
Corrente de Curto-Circuito (I_{SC})	9,09 A
Tensão Máxima do Sistema	1000 V
Dimensões	(1662 x 990 x 46) mm
Tipo	Silício Policristalino
Peso	20 kg

Fonte: Adaptada de (MINHACASASOLAR, 2015).

Considerando a fração de R\$ por Watt, o preço do painel fotovoltaico apresentado é de 4,40 R\$/W. Comparado com o painel solar anterior, este possui uma maior relação preço por watt. A vantagem é que sua faixa de tolerância é superior ao primeiro módulo e em sua estrutura na parte de trás do módulo conta com duas barras transversais o que confere uma maior resistência contra torção, ventos fortes e tempestades.

A escolha do painel mais adequado depende das condições de operação em que será aplicado o módulo fotovoltaico.

3.2.2. Inversor

O tipo de inversor para sistemas fotovoltaicos mais comumente utilizado no mercado é o inversor *grid tie*, que tem a função de conectar o sistema fotovoltaico à rede elétrica. A escolha do inversor a ser utilizado depende do sistema que se deseja instalar. Utilizando o exemplo de um sistema de microgeração de 5kW, sem a intenção de aumentar o número de painéis no futuro, então é necessário um inversor de 5kW para este sistema. Se houver a intenção de aumentar a potência do sistema no futuro, um inversor de maior potência como 6kW ou 7kW deve ser instalado (SOLAR, 2015).

Em residências, o inversor é normalmente instalado próximo ao quadro de luz, em um local que esteja protegido de calor e água. Em usinas de microgeração distribuída, sejam comerciais ou industriais, como os inversores para este tipo de aplicação são maiores e ocupam mais espaço físico, é interessante construir uma sala para abrigá-los.

Os inversores são vendidos principalmente por sua potência nominal. Quanto maior for o inversor, mais barato é o preço pela potência, ou seja, a relação R\$/W é menor. Os valores de preços médios de inversores *grid tie* no varejo, de acordo com (SOLAR, 2015), estão demonstrados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4. Custos de inversores para sistemas fotovoltaicos para diferentes potências.

Custo de inversores <i>grid tie</i>	
Potência	Custo em R\$
Inversor de 1,5 kWp	3 mil a 9 mil
Inversor de 2,5 kWp	5 mil a 10 mil
Inversor de 5 kWp	10 mil a 20 mil
Inversor de 10 kWp	15 mil a 30 mil
Inversor de 100 kWp	60 mil a 150 mil
Inversor de 500 kWp	300 mil a 600 mil

Fonte: Adaptada de (SOLAR, 2015).

Exemplos de inversores solares são mostrados na Figura 3.3. O inversor da esquerda é utilizado para aplicações de menor potência e o inversor da direita, é conhecido como inversor central e são projetados para aplicações de grande porte, que apresentem potências mais elevadas.

Figura 3.3. Exemplos de inversores solares.



Fonte: (SOLAR, 2015).

3.2.3. Estrutura de fixação

Para quantificar os custos com estruturas de suporte para sistemas solares é preciso saber o tipo de aplicação, se o painel será instalado no telhado de alguma edificação ou em um terreno específico.

Os preços de sistemas de fixação variam de acordo com a quantidade de painéis podem ser fixados por este, do tamanho dos módulos que serão instalados, do fabricante que vende a estrutura e do material utilizado para construção do suporte.

Segundo um estudo realizado por (LIMA, 2014), o custo com estruturas de fixação para um sistema de geração de 3 kW chega a R\$ 3750,00 em média. Para um sistema fotovoltaico de 30 kW, os custos com estruturas de suporte são em média de R\$ 24000,00.

3.2.4. Cabeamento e equipamentos de proteção

Na escolha de um condutor adequado para uso em sistemas fotovoltaico é importante que este tenha certificação TÜV Rheinland o que garante uma maior confiabilidade do produto. Estes devem ser próprios para instalações externas, com uma alta vida útil compatível com o sistema fotovoltaico onde será aplicada (MINHACASASOLAR, 2015).

São utilizados cabos flexíveis desenvolvidos para aplicações em sistemas fotovoltaicos. Estes cabos devem ser próprios para a conexão dos módulos entre si, entre arranjos de painéis e para conexão do sistema com inversores *grid tie*. Como são usados em instalações externas, é de suma importância que tenha resistência a intempéries, como o Sol, chuvas e ventos fortes, além de resistência ao calor e a variações de temperatura.

Os conectores do tipo MC4 são os mais comuns para aplicações de sistemas fotovoltaicos, devido à elevada segurança, durabilidade e praticidade (MINHACASASOLAR, 2015).

Conectores para sistemas fotovoltaicos devem possuir grande resistência mecânica e isolamento de grau IP67, o que corresponde a um isolamento à prova de água e que possui elevada resistência ao vento. Além dessas características, devem ser resistentes a mudanças de temperatura, considerando que estarão sendo utilizados em aplicações de ambiente externo.

Exemplos de cabos e conectores utilizados em sistemas fotovoltaicos são ilustrados na Figura 3.4. Os cabos estão à esquerda e os conectores à direita.

Figura 3.4. Exemplos de cabos e conectores para sistemas solares fotovoltaicos.



Fonte: (MINHACASASOLAR, 2015).

Para equipamentos de proteção de sistemas solares, devem ser considerados dispositivos como disjuntores, chaves seccionadoras, fusíveis e dispositivos de proteção contra surtos (DPS).

O dimensionamento destes dispositivos depende das características do sistema em que serão aplicados, devendo ser considerado parâmetros como tensões de sobrecarga e correntes de curto circuito.

De acordo com (LIMA, 2014), os custos com cabeamento e equipamentos de proteção para um sistema de geração de 3 kW chega a R\$ 2250,00 em média. Considerando um sistema de geração de 30 kW, os custos com cabos e equipamentos de proteção são em média de R\$ 18000,00.

3.2.5. Demais custos

Além dos custos com aquisição de painéis fotovoltaicos, inversores, estruturas de suporte, cabos e equipamentos de proteção, devem também ser considerados, quando se deseja mensurar todos os gastos para se instalar um sistema de geração solar por completo, os custos com serviços e projetos.

Estes incluem gastos com projeto básico e executivo de engenharia, autorização da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), licenciamento e instalação dos componentes do sistema (LIMA, 2014).

No estudo realizado por (LIMA, 2014), os custos com projeto e serviços para um sistema de geração de 3 kW chega a R\$ 3750,00 em média. Para um sistema de maior potência, como no caso de 30 kW, os gastos com projeto e serviços atingem uma média de R\$ 30000,00.

3.3. IMPOSTOS E INCENTIVOS

Para se instalar um sistema fotovoltaico, é importante para os cálculos de custos totais com o sistema, considerar os custos com impostos que incidem na geração da energia e na aquisição dos componentes.

3.3.1. Impostos

ICMS

Significa Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços. É um imposto que pode ser instituído por todos os Estados e o Distrito Federal, como determina a Constituição Federal de 1988 (SECRETARIADAFAZENDA, 2015).

Na maioria dos casos, o ICMS está embutido no preço, correspondendo ao percentual de 18 % do valor. É um imposto não cumulativo, compensando-se o valor devido em cada operação ou prestação com o montante cobrado anteriormente. Em cada etapa da circulação de mercadorias e em toda prestação de serviço sujeita ao ICMS deve haver emissão da nota fiscal ou cupom fiscal. Atualmente, a alíquota do ICMS no estado do Ceará está em 17%.

PIS

Significa Programa de Integração Social. Como ele, o empregado da iniciativa privada tem acesso aos benefícios determinados por lei.

Os contribuintes do PIS são as pessoas jurídicas de direito privado em geral e as que lhe são equiparadas pela legislação do Imposto de Renda, inclusive empresas prestadoras de serviços, empresas públicas e sociedades de economia mista e suas subsidiárias, excluídas as microempresas e as empresas de pequeno porte submetidas ao Simples Nacional (PORTALTRIBUTÁRIO, 2015).

COFINS

Significa Contribuição para Financiamento da Seguridade Social e foi instituído pela Lei Complementar 70 de 30/12/1991 (PORTALTRIBUTÁRIO, 2015).

São contribuintes do COFINS as pessoas jurídicas de direito privado em geral, inclusive as pessoas a elas equiparadas pela legislação do Imposto de Renda, exceto as microempresas e as empresas de pequeno porte submetidas ao Simples Nacional, como define a Lei Complementar 123/2006.

ISS

Significa Imposto Sobre Serviços de Qualquer Natureza. É de competência dos Municípios e do Distrito Federal e tem como fato gerador a prestação de serviços constantes ainda que esses não se constituam como atividade preponderante do prestador (PORTALTRIBUTÁRIO, 2015).

O contribuinte é o prestador do serviço. O serviço considera-se prestado e o imposto devido no local do estabelecimento prestador ou, na falta do estabelecimento, no local domiciliar do prestador.

3.3.2. Incentivos

No Brasil, a geração de energia proveniente do Sol tem sido alvo de estímulos. Este tipo de energia ainda necessita de incentivos para tornar menos elevados os custos com implementação se comparada com outras fontes de energia mais consolidadas no país (SILVA, 2015).

Ao longo dos anos, incentivos nessa área vêm sendo realizados, como a isenção de alguns impostos relacionados à geração de energia fotovoltaica.

Um dos incentivos é o desconto na Tarifa de Uso dos Sistemas de Transmissão e na Tarifa de Uso de Sistemas de Distribuição em 80% para empreendimentos cuja potência injetada nos sistemas de transmissão ou distribuição seja menor ou igual a 30000 kW e que entrem em operação até 31 de dezembro de 2017 (SILVA, 2015).

Outro ponto a favor da energia solar é o Sistema de Compensação e Energia Elétrica para a Microgeração e Minigeração Distribuídas, instituído pela Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, da ANEEL. Esse sistema garante que consumidores interessados em fornecer energia para a rede da distribuidora na qual estão conectados poderão fornecer e somente pagarão para as distribuidoras a diferença entre a energia consumida e injetada. Porém, este procedimento só é válido para empreendimentos com potência máxima de 1 MW (SILVA, 2015).

O Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura (REIDI) promove a suspensão da contribuição do PIS e do COFINS, no caso de venda ou de importação de máquinas, aparelhos, instrumentos e equipamentos novos, de materiais de construção e de serviços utilizados e destinados a obras de infraestrutura, entre as quais as usinas de geração de energia solar, destinadas ao ativo imobilizado. O projeto deve ser aprovado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e o benefício é válido por cinco anos, a contar da habilitação do titular do projeto (SILVA, 2015).

Cabe mencionar que o MME promoveu o Leilão de Energia de Reserva de 2014 (LER/2014). Este foi o primeiro leilão em que foi contratada energia proveniente de empreendimentos fotovoltaicos no mercado regulado. A Nota Técnica LER/2014 apresenta números de cadastros e habilitação técnica, bem como apresenta o perfil de projetos vencedores do leilão. O documento apresenta uma comparação dos preços contratados no Brasil em relação a referências internacionais (EPE, 2015).

Um incentivo à geração fotovoltaica recente é o fato de que foi decretado que a partir de primeiro de setembro de 2015, a produção de energia elétrica por microgeração e minigeração, ou seja, até o máximo de 1 MW, será isenta do ICMS. A medida autoriza a adesão dos estados do Ceará e Tocantins à determinação da isenção do tributo (COLAÇO, 2015). Anteriormente, os estados de Pernambuco, São Paulo, Goiás e Minas Gerais já possuíam autorização para conceder o benefício, sendo Minas o estado pioneiro onde a isenção já era oferecida desde 2012.

3.3.3. Resolução normativa nº 482 da ANEEL

A Resolução normativa nº 482, criada pela ANEEL, 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 (ANEEL, 2012).

Para efeitos da resolução, fica definida a microgeração distribuída como central distribuidora 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.

Deste modo, minigeração distribuída é definida como central distribuidora 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.

O Sistema de compensação de energia elétrica, segundo define a resolução, é o sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração distribuída ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa dessa mesma unidade consumidora ou de outra unidade consumidora de mesma titularidade da unidade consumidora onde os créditos foram gerados, desde que possa o mesmo Cadastro de Pessoa Física (CPF) ou Cadastro de Pessoa Jurídica (CNPJ) junto ao Ministério da Fazenda.

Segundo a resolução, para fins de compensação, a energia ativa injetada no sistema de distribuição pela unidade consumidora, será cedida a título de empréstimo gratuito para a distribuidora, passando a unidade consumidora a ter um crédito em quantidade de energia ativa a ser consumida por um prazo de trinta e seis meses.

Então, o consumo de energia elétrica ativa a ser faturado é a diferença entre a energia consumida e a injetada, por posto tarifário, quando for o caso, devendo a distribuidora utilizar o excedente que não tenha sido compensado no ciclo de faturamento corrente para abater o consumo medido em meses subsequentes (ANEEL, 2012).

3.4. CONCLUSÃO

O presente capítulo apresentou subsídios para se determinar os custos de um sistema de geração fotovoltaica, onde são destacados os gastos com cada componente do sistema que são os painéis, os inversores, as estruturas de suporte, cabeamento, equipamentos de proteção e até os gastos com projeto e instalação.

Também são citados os impostos envolvidos na instalação de uma geradora de energia solar e na aquisição de seus componentes para o entendimento do leitor sobre algumas das limitações tributárias que podem contribuir para os custos do sistema.

Um ponto importante do capítulo foi a introdução da Resolução Normativa nº 482 da ANEEL que define os conceitos de micro e minigeração distribuída e fala sobre o sistema de compensação de energia elétrica. Esse sistema é a base e a motivação para o desenvolvimento do presente trabalho, considerando que a análise financeira dos investimentos que serão apresentados será concretizada para sistemas fotovoltaicos que se enquadram nos quesitos definidos pela resolução.

4. IRRADIAÇÃO SOLAR NO NORDESTE DO BRASIL

Este capítulo irá apresentar dados de irradiação solar para analisar a viabilidade de geração energética na Região Nordeste do Brasil, através do cálculo de aproveitamento de energia pelos os painéis fotovoltaicos.

4.1. DADOS DE IRRADIAÇÃO SOLAR BRASILEIROS

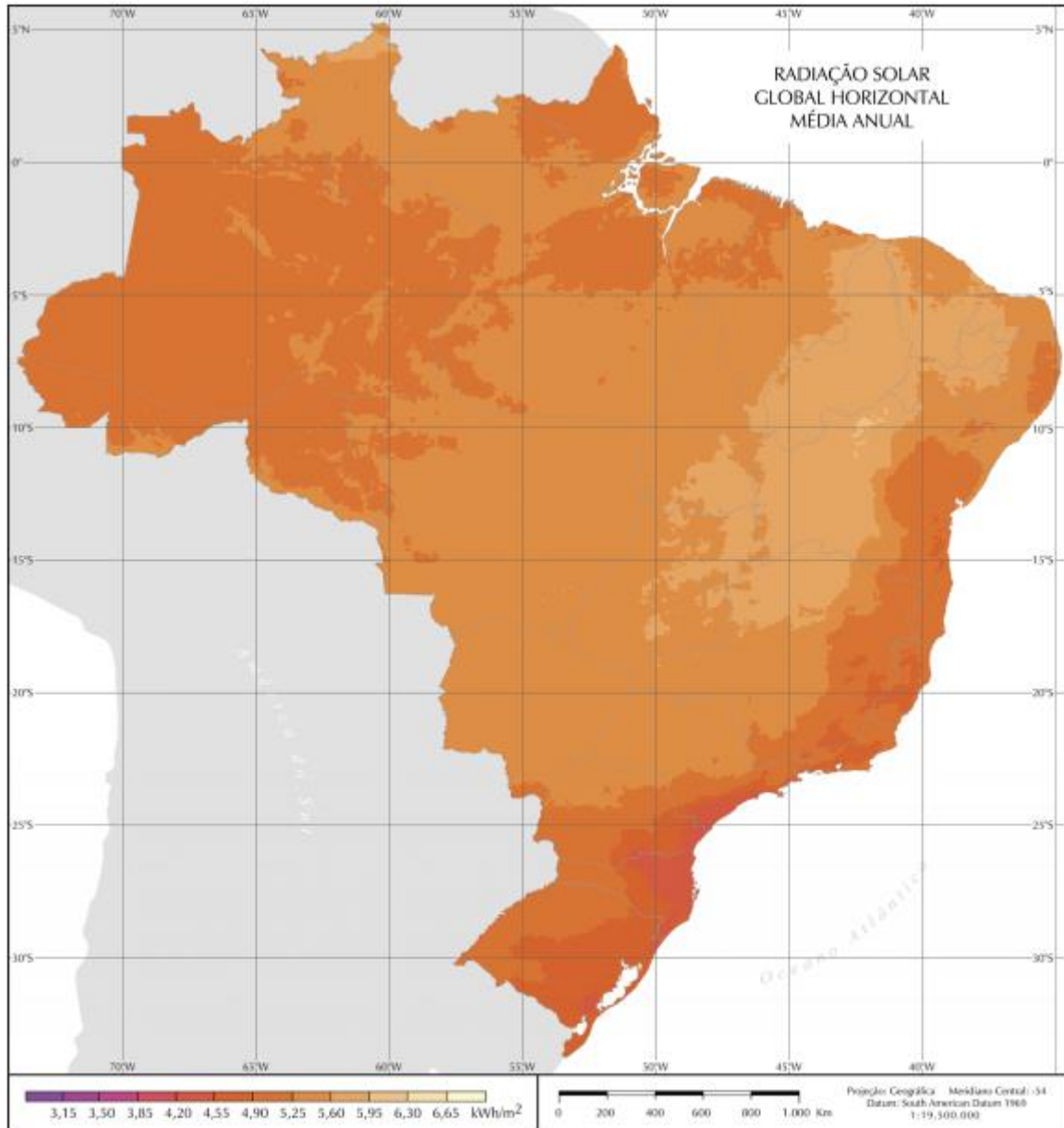
No ano de 2006, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) publicou o documento intitulado de Atlas Brasileiro de Energia Solar, desenvolvido dentro do escopo do projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*). Esta pesquisa apresenta valores médios das estimativas do total diário de irradiação solar durante um período de análise de uma década completa de dados, que correspondeu ao período de julho de 1995 a dezembro de 2005.

De acordo com (PEREIRA, 2006), a média anual de irradiação global observada no Brasil apresenta boa uniformidade, com médias anuais relativamente altas em toda a extensão do país. Segundo a pesquisa, o menor valor de irradiação global no território brasileiro é de 4,25 kWh/m², registrado no litoral norte de Santa Catarina, na região Sul do país, que é caracterizado pela precipitação bem distribuída ao longo do ano. O valor máximo de irradiação global é de 6,5 kWh/m², registrado no norte do estado da Bahia, próximo à fronteira com o estado do Piauí, na região Nordeste. Esta área apresenta a média anual de cobertura de nuvens mais baixa do Brasil, além de apresentar um clima semi-árido com baixa precipitação ao decorrer do ano.

Em virtude dos valores de irradiação apresentados, a irradiação solar global incidente em qualquer região do território nacional tem uma variação de 1500 a 2500 kWh/m²/ano, valores superiores aos da maioria dos países da União Européia, como no caso da França com a variação de 900 a 1650 kWh/m²/ano, da Alemanha com 900 a 1250 kWh/m²/ano e da Espanha com 1200 a 1850 kWh/m²/ano, onde projetos para aproveitamento dos recursos solares, alguns com fortes incentivos por parte do governo, são amplamente disseminados (PEREIRA, 2006).

Os índices de irradiação global horizontal média anual incidente no território brasileiro são demonstrados na Figura 4.1.

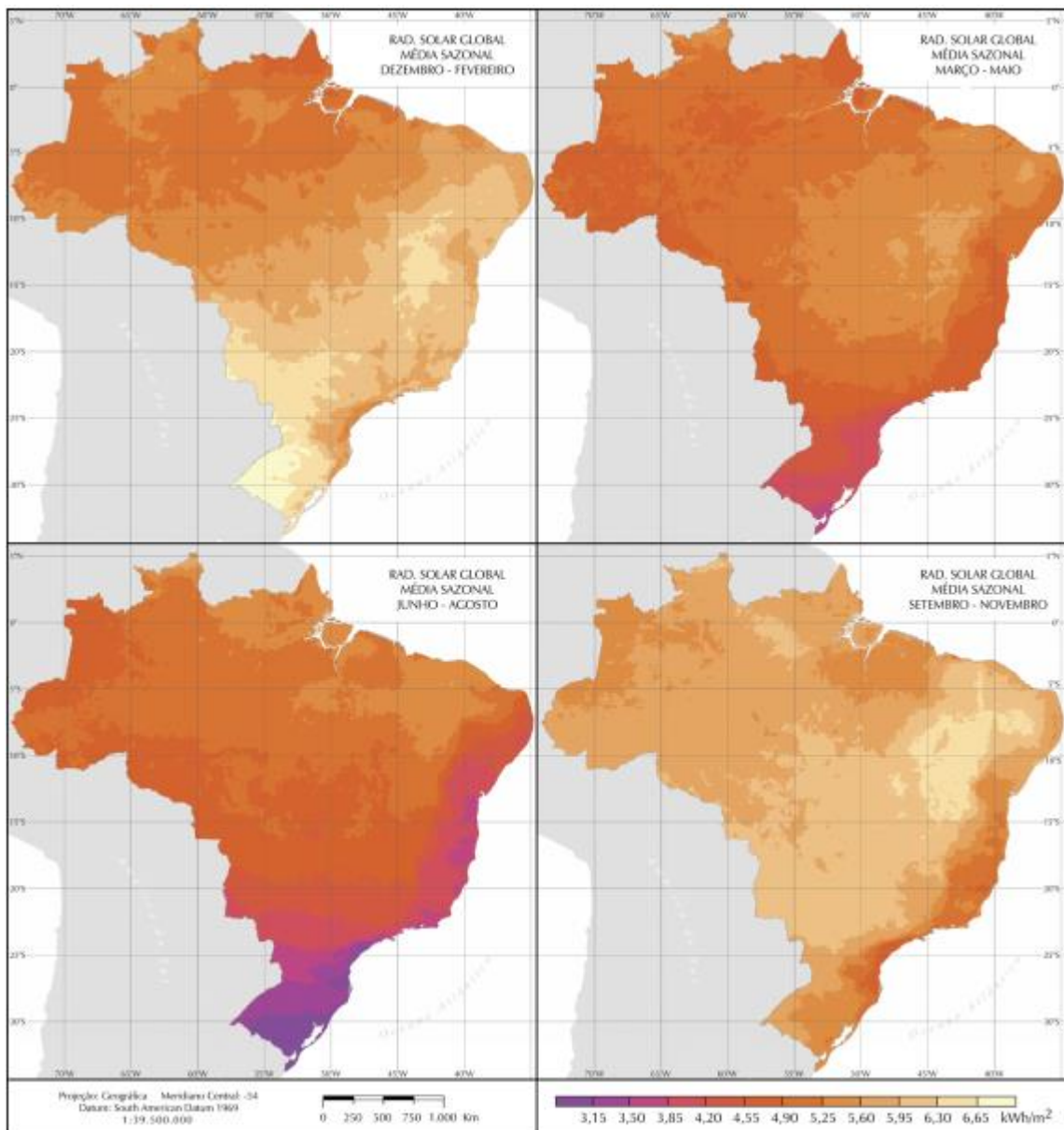
Figura 4.1. Média anual do total diário de irradiação solar global incidente no Brasil.



Fonte: (PEREIRA, 2006).

Também foram analisadas as médias sazonais da irradiação global diária, como ilustra a Figura 4.2. Os meses do ano foram classificados em quatro estações de modo que o período de dezembro a fevereiro refere-se ao Verão, de março a maio ao Outono, de junho a agosto ao Inverno e de setembro a novembro à Primavera.

Figura 4.2. Médias sazonais de irradiação global no Brasil.



Fonte: (PEREIRA, 2006).

Ao analisar a Figura 4.2, é observável que a região Norte recebe menor incidência de radiação solar do que a região Sul, apesar de sua localização próxima a linha do Equador. Durante o período do Inverno, ocorre uma inversão e a região amazônica recebe uma maior irradiação solar. Esse fenômeno ocorre devido às características climáticas da região amazônica que apresenta fração de cobertura de nuvens e precipitação elevadas no Verão por causa da forte influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (PEREIRA, 2006). A variação de incidência solar na região Norte entre o Verão e o Inverno é menor se comparada com as regiões Sul e Sudeste.

O deslocamento da ZCIT está associado à incursão dos ventos Alísios provindos do Oceano Atlântico é responsável pelas altas taxas de precipitação no nordeste da região amazônica e também explica a menor irradiação solar no litoral e região costeira do Nordeste do Brasil.

Para o Nordeste brasileiro, os valores máximos são observados a oeste do território nordestino. Durante todo o ano é marcado por um regime estável de baixa nebulosidade e alta irradiação solar para essa região (PEREIRA, 2006).

Em termos de radiação solar diária incidente sobre um plano inclinado, onde não é considerada a topografia do local, o que possibilita a máxima captação de energia solar incidente, os maiores níveis ocorrem na faixa que se estende da região Nordeste à região Sudeste.

Para a componente difusa do total diário da irradiação solar, em termos de média anual, a região Norte é a que se observam maiores níveis de radiação difusa. Isso ocorre devido à nebulosidade do local em decorrência da Zona de Convergência Intertropical (PEREIRA, 2006).

4.2. VARIABILIDADE ANUAL E SAZONAL

Segundo (PEREIRA, 2006), a variabilidade anual é definida como a média da variabilidade interanual observada para cada dia do ano. Essa variabilidade interanual é determinada por meio da razão entre o desvio quadrático médio e valor médio do total diário do fluxo solar para cada dia do ano durante o período de análise, como é descrito na Equação 4.1:

$$V_{anual} = \frac{V_{d,a}}{N_d} = \frac{\sum_{d=1}^{365} \left[\frac{DQM_d}{I_d} \right]}{N_d} \quad (4.1)$$

Sendo DQM_d o desvio quadrático médio, definido por:

$$DQM_d = \sqrt{\frac{\sum_{a=1995}^{2005} (I_{d,a} - I_d)^2}{N_a}} \quad (4.2)$$

Onde V_{anual} é a variabilidade anual, $V_{d,a}$ é a variabilidade interanual, N_d é o número de dias com dados válidos, N_a é o número de anos com dados válidos, $I_{d,a}$ representa o total diário de irradiação solar global para o dia d no ano a I_d é o valor médio de $I_{d,a}$ no período de julho de 1995 a dezembro de 2005.

Ainda de acordo com (PEREIRA, 2006), a variabilidade sazonal é definida como a média da variabilidade intra-sazonal observada para cada ano do período de 1995 a 2005. A variabilidade sazonal pode ser determinada pela Equação 4.3.

$$V_{sazonal} = \frac{\sum_{a=1995}^{2005} V_{saz_a}}{N_a} \quad (4.3)$$

Sendo V_{saz_a} a variabilidade inter-sazonal, definida pela Equação 4.4.

$$V_{saz_a} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{d=n1}^{n2} (I_{d,a} - I_{saz})^2}{N_d}}}{I_{saz}} \quad (4.4)$$

Onde $V_{sazonal}$ é variabilidade sazonal e I_{saz} é o valor médio da irradiação solar global na estação do ano.

A variabilidade média anual para o Brasil é mostrada na Figura 4.3. Os valores apresentados podem ser interpretados como a dispersão média do total diário em torno de sua média no período de estudo que compreende uma década de dados. Deste modo, uma variabilidade anual igual a 0,45 significa que o total diário de irradiação global média de 45% em torno do valor médio apresentado na Figura 4.1 (PEREIRA, 2006). Quanto menor for esta variabilidade, implica que a região tem uma variação pequena de valor de irradiação solar ao decorrer do ano.

Ao analisar a Figura 4.3, é observável que a região Nordeste, além de possuir um valor elevado de irradiação solar, também apresenta uma dispersão pequena de 0,25 na maioria de seu território. A região que apresenta maior dispersão é o Sul do país.

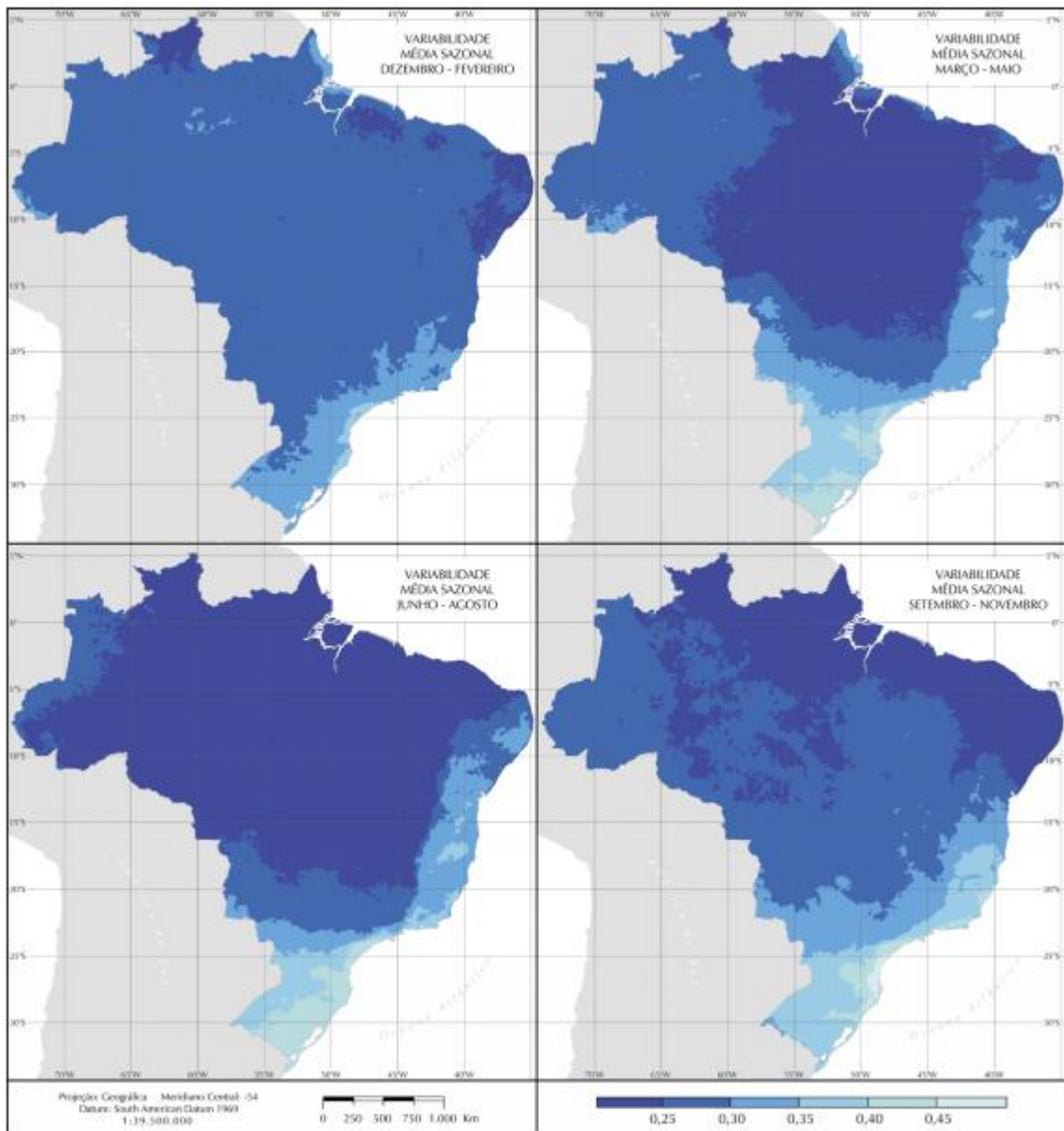
Figura 4.3. Variabilidade média anual de irradiação solar no Brasil.



Fonte: (PEREIRA, 2006).

A variabilidade sazonal para cada estação do ano com períodos definidos na seção anterior é ilustrada na Figura 4.4.

Figura 4.4. Variabilidade média sazonal de irradiação solar no Brasil.



Fonte: (PEREIRA, 2006).

Analisando a Figura 4.4, é observável que a o período do ano com maior estabilidade em uma parte considerável do território brasileiro é o Inverno e o com maior nível de dispersão é o Verão. Como observado na variabilidade anual, a região Sul foi a que apresentou maior dispersão para todas as estações. O Nordeste do país teve baixos resultados de dispersão para todas as estações.

4.3. AVALIAÇÃO DO RECURSO SOLAR

Primeiramente, para analisar o recurso solar de uma região é necessário que se saiba onde se quer instalar o sistema fotovoltaico. O CRESESB disponibiliza dados de irradiação de uma região de acordo com os valores de Latitude e Longitude fornecidos.

Com o intuito de calcular a energia gerada anualmente como forma de avaliação do recurso solar, serão utilizadas três aplicações distintas como exemplos para encontrar seus valores de energia gerada por ano de acordo com os dados fornecidos de irradiação. Estas estão divididas em três exemplos, organizados por faixa de potência instalada:

- Aplicação residencial de 1,5 kW de potência;
- Microgeração fotovoltaica com 100 kW de potência;
- Minigeração fotovoltaica com 1 MW de potência.

Para às aplicações apresentadas, o local escolhido para a avaliação está situado na região metropolitana da cidade de Fortaleza, no estado do Ceará, na região Nordeste do país, lembrando que para as aplicações de microgeração e minigeração deve ser escolhido um local onde haja disponibilidade de terreno para se implantar a usina. As coordenadas do local estão definidas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Coordenadas para localidade em Fortaleza - CE.

Localidade	Fortaleza (CE)
Latitude	3,7° Sul
Longitude	38,543055° Oeste

Fonte: Elaborada pelo autor.

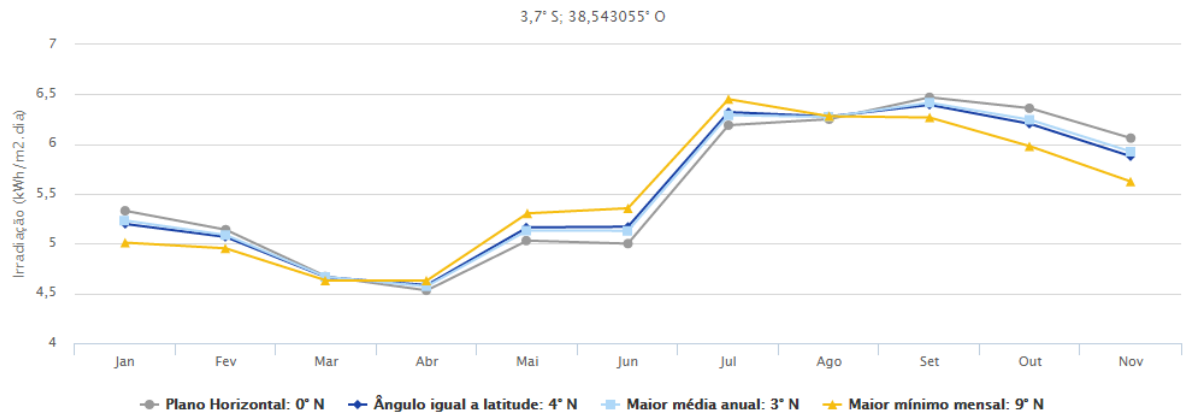
Para a localidade apresentada, os dados de irradiação solar incidentes no período de um ano, segundo dados do CRESESB, estão apresentados na Figura 4.5. A corrente gerada pelo módulo fotovoltaico é dada pela multiplicação da corrente gerada com o ângulo de incidência do Sol normal à superfície horizontal com cosseno do ângulo de incidência do Sol com relação à normal. Esse ângulo é obtido pelo valor de latitude do local onde se deseja instalar os painéis (FADIGAS, 2011).

Figura 4.5. Dados de irradiação solar média para Fortaleza - CE.

Estação: Fortaleza
 Município: Fortaleza , CE - BRA
 Latitude: 3,7° S
 Longitude: 38,543055° O
 Distância do ponto de ref. (3,73° S; 38,56° O):3,8 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
✓	Plano Horizontal	0° N	5,33	5,14	4,67	4,53	5,03	5,00	5,69	6,19	6,25	6,47	6,36	6,06	5,56	1,94
✓	Ângulo igual a latitude	4° N	5,20	5,07	4,66	4,58	5,16	5,17	5,88	6,32	6,28	6,39	6,20	5,88	5,57	1,81
✓	Maior média anual	3° N	5,23	5,09	4,67	4,57	5,13	5,13	5,83	6,29	6,27	6,42	6,24	5,92	5,57	1,84
✓	Maior mínimo mensal	9° N	5,01	4,95	4,63	4,63	5,30	5,36	6,08	6,45	6,28	6,27	5,98	5,62	5,55	1,82

Irradiação Solar no Plano Inclinado –Fortaleza–Fortaleza, CE-BRA



Fonte: (CRESESB, 2015).

Os valores a serem utilizados para o cálculo da energia gerada são os apresentados na coluna onde apresenta a inclinação de 4°, que é a que mais se aproxima da latitude da área escolhida. O maior valor de irradiação solar observado foi no mês de outubro e o menor no em abril.

O gráfico apresentado na Figura 4.5 mostra o comportamento dos níveis médios de irradiação ao decorrer do ano. O segundo semestre apresentou maiores valores em kWh/m² do que o primeiro, isso devido a este período ser marcado pela estação do Verão na região, onde os níveis de precipitação são menores.

Uma grandeza que deve ser considerada para o cálculo da energia gerada é o número de horas de sol pleno, HSP. Seu valor reflete o número de horas em um dia em que a radiação solar deve permanecer em 1000 W/m², de forma que a energia resultante seja a mesma coletada no dia (FADIGAS, 2011). O HSP pode ser calculado a partir da Equação 4.5.

$$HSP = \frac{Irradiação}{1000 \text{ W/m}^2} \quad (4.5)$$

Onde o valor da Irradiação é dado em Wh/m² e corresponde ao valor médio encontrado para o dia de análise.

A energia gerada por um sistema fotovoltaico, em kWh, depende da potência nominal do gerador fotovoltaico, dada em kW, o rendimento do inversor utilizado no sistema e do número de horas em sol pleno. Segundo (OLIVEIRA e JÚNIOR, 2011), a expressão da energia gerada pode ser interpretada pela Equação 4.6.

$$E_g = P_T \cdot HSP \cdot \eta_{CC/CA} \quad (4.6)$$

Onde:

- E_g é a energia gerada pelo sistema fotovoltaico, em kWh;
- P_T é a potência nominal do sistema fotovoltaico, em kW;
- HSP é o número de horas em Sol pelo, expresso em horas;
- $\eta_{CC/CA}$ é o rendimento do inversor.

A energia gerada anualmente pelo sistema fotovoltaico será calculada com o somatório das médias obtidas em cada mês, considerando o número de dias de cada período. Os valores de energia para aplicação no sistema residencial de 1,5kW será apresentado na Tabela 4.2. A energia gerada por mês pode ser obtida pela Equação 4.7.

$$E_g(mês) = d \cdot E_g \quad (4.7)$$

Onde d é o número de dias presentes no mês de análise.

Para as três aplicações, serão consideradas as eficiências dos inversores em 97%.

O número de horas de Sol pleno foi obtido a partir dos dados de irradiação encontrados para cada mês, aplicados na Equação 4.5.

Tabela 4.2. Energia gerada mensal e anual para um sistema de 1,5kW.

Mês	Dias	Horas de Sol pleno (HSP)	Potência do sistema (kW)	Rendimento do inversor	Energia Gerada (kWh/mês)
Janeiro	31	5,2	1,5	0,97	234,546
Fevereiro	28	5,07	1,5	0,97	206,5518
Março	31	4,66	1,5	0,97	210,1893
Abril	30	4,58	1,5	0,97	199,917
Mai	31	5,16	1,5	0,97	232,7418
Junho	30	5,17	1,5	0,97	225,6705
Julho	31	5,88	1,5	0,97	265,2174
Agosto	31	6,32	1,5	0,97	285,0636
Setembro	30	6,28	1,5	0,97	274,122
Outubro	31	6,39	1,5	0,97	288,22095
Novembro	30	6,2	1,5	0,97	270,63
Dezembro	31	5,88	1,5	0,97	265,2174
Total					2958,08775

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores de energia para aplicação no sistema de microgeração de 100 kW serão apresentados nas Tabelas 4.3.

Tabela 4.3. Energia gerada mensal e anual de um sistema de 100kW.

Mês	Dias	Horas de Sol pleno (HSP)	Potência do sistema (kW)	Rendimento do inversor	Energia Gerada (kWh/mês)
Janeiro	31	5,2	100	0,97	15636,4
Fevereiro	28	5,07	100	0,97	13770,12
Março	31	4,66	100	0,97	14012,62
Abril	30	4,58	100	0,97	13327,8
Mai	31	5,16	100	0,97	15516,12
Junho	30	5,17	100	0,97	15044,7
Julho	31	5,88	100	0,97	17681,16
Agosto	31	6,32	100	0,97	19004,24
Setembro	30	6,28	100	0,97	18274,8
Outubro	31	6,39	100	0,97	19214,73
Novembro	30	6,2	100	0,97	18042
Dezembro	31	5,88	100	0,97	17681,16
Total					197205,85

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores de energia para aplicação no sistema de minigeração de 1 MW serão apresentados nas Tabelas 4.4.

Tabela 4.4. Energia gerada mensal e anual para um sistema de 1 MW.

Mês	Dias	Horas de Sol pleno (HSP)	Potência do sistema (kW)	Rendimento do inversor	Energia Gerada (kWh/mês)
Janeiro	31	5,2	1000	0,97	156364
Fevereiro	28	5,07	1000	0,97	137701,2
Março	31	4,66	1000	0,97	140126,2
Abril	30	4,58	1000	0,97	133278
Maio	31	5,16	1000	0,97	155161,2
Junho	30	5,17	1000	0,97	150447
Julho	31	5,88	1000	0,97	176811,6
Agosto	31	6,32	1000	0,97	190042,4
Setembro	30	6,28	1000	0,97	182748
Outubro	31	6,39	1000	0,97	192147,3
Novembro	30	6,2	1000	0,97	180420
Dezembro	31	5,88	1000	0,97	176811,6
Total					1972058,5

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como apresentado nas tabelas, o sistema de 1,5kW de potência instalada tem capacidade para gerar aproximadamente 2,96 MWh de energia por ano, dado as condições médias de irradiação solar apresentadas. O sistema de microgeração de 100 kW de potência instalada tem capacidade para gerar aproximadamente 197,2 MWh por ano e o sistema de minigeração de 1MW tem capacidade de produzir aproximadamente 1,97 GWh de energia por ano.

Para comparar a geração de energia no ponto escolhido da região Nordeste do Brasil, foi também analisado somente para 1MW a geração de energia em um ponto na região Sudeste do país, localizado em Campinas, São Paulo, que apresenta Latitude de 22,8° ao Sul e Longitude de 47,060833° a Oeste. Os valores de irradiação fornecidos pelo CRESESB estão demonstrados na Figura 4.6.

Como a latitude é bem maior nessa região, por consequência, a inclinação dos painéis fotovoltaicos é maior, o que leva a um menor aproveitamento da irradiação se comparada com a localidade na região Nordeste.

Figura 4.6. Dados de irradiação solar em Campinas - SP.

Estação: Campinas
 Município: Campinas , SP - BRA
 Latitude: 22,8° S
 Longitude: 47,060833° O
 Distância do ponto de ref. (22,87° S; 47,1° O): 8,8 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
<input checked="" type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	5,33	5,56	5,22	4,53	4,06	3,56	4,19	4,58	4,75	5,58	5,86	5,53	4,90	2,30
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	23° N	4,83	5,30	5,38	5,14	5,08	4,65	5,46	5,45	5,06	5,45	5,36	4,94	5,18	,81
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	22° N	4,86	5,33	5,38	5,13	5,05	4,61	5,42	5,42	5,06	5,47	5,39	4,97	5,18	,85
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	26° N	4,73	5,23	5,35	5,18	5,17	4,75	5,58	5,51	5,06	5,39	5,25	4,83	5,17	,85

Fonte: (CRESESB, 2015).

Analisando a média de cada uma das regiões, Fortaleza apresentou uma média de 5,57 kWh/m², valor superior à média de Campinas que foi de 5,18 kWh/m².

Considerando as mesmas condições de inversor e potência instalada de 1 MW, os valores de energia gerada em um ano para um local situado em Campinas são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5. Energia gerada mensal e anual para um sistema de 1MW em Campinas.

Mês	Dias	Horas de Sol pleno (HSP)	Potência do sistema (kW)	Rendimento do inversor	Energia Gerada (kWh/mês)
Janeiro	31	4,83	1000	0,97	145238,1
Fevereiro	28	5,3	1000	0,97	143948
Março	31	5,38	1000	0,97	161776,6
Abril	30	5,14	1000	0,97	149574
Maio	31	5,08	1000	0,97	152755,6
Junho	30	4,65	1000	0,97	135315
Julho	31	5,46	1000	0,97	164182,2
Agosto	31	5,45	1000	0,97	163881,5
Setembro	30	5,06	1000	0,97	147246
Outubro	31	5,45	1000	0,97	163881,5
Novembro	30	5,36	1000	0,97	155976
Dezembro	31	4,94	1000	0,97	148545,8
Total					1832320,3

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para Campinas, uma usina fotovoltaica de minigeração de 1MW, a partir dos dados apresentados, teria uma capacidade de geração de aproximadamente 1,83 GWh por ano. Este

valor é inferior se comparado com a geração anual da mesma usina se fosse situada em Fortaleza, no Nordeste do país, que apresentou uma geração anual média de 1,97 GWh.

Dentro do Nordeste, também foi escolhida para a análise para uma usina de 1 MW um ponto situado no estado do Piauí, na cidade de Parnaíba cujas coordenadas geográficas correspondem a 2,9° ao Sul de latitude e 41,7767° ao Oeste de longitude. Os valores de irradiação fornecidos pelo CRESESB estão demonstrados na Figura 4.7.

Figura 4.7. Dados de irradiação solar em Parnaíba - PI.

Estação: Parnaíba
Município: Parnaíba, PI - BRA
Latitude: 2,9° S
Longitude: 41,776666° O
Distância do ponto de ref. (2,9° S; 41,7733° O): 4 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
☑	Plano Horizontal	0° N	5,08	5,00	5,00	4,78	5,08	5,25	5,83	6,44	6,47	6,78	6,61	5,89	5,68	2,00
☑	Ângulo igual a latitude	3° N	4,99	4,95	4,99	4,82	5,18	5,39	5,97	6,54	6,49	6,72	6,48	5,76	5,69	1,89
☑	Maior média anual	3° N	4,99	4,95	4,99	4,82	5,18	5,39	5,97	6,54	6,49	6,72	6,48	5,76	5,69	1,89
☑	Maior mínimo mensal	6° N	4,88	4,88	4,98	4,86	5,27	5,51	6,11	6,63	6,50	6,64	6,34	5,61	5,68	1,78

Fonte: (CRESESB, 2015).

Considerando as mesmas condições de inversor e potência instalada de 1 MW, os valores de energia gerada em um ano para um local situado em Parnaíba são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6. Energia gerada mensal e anual para um sistema de 1MW em Parnaíba.

Mês	Dias	Horas de Sol pleno (HSP)	Potência do sistema (kW)	Rendimento do inversor	Energia Gerada (kWh/mês)
Janeiro	31	4,99	1000	0,97	150049,3
Fevereiro	28	4,95	1000	0,97	134442
Março	31	4,99	1000	0,97	150049,3
Abril	30	4,82	1000	0,97	140262
Maio	31	5,18	1000	0,97	155762,6
Junho	30	5,39	1000	0,97	156849
Julho	31	5,97	1000	0,97	179517,9
Agosto	31	6,54	1000	0,97	196657,8
Setembro	30	6,49	1000	0,97	188859
Outubro	31	6,72	1000	0,97	202070,4
Novembro	30	6,48	1000	0,97	188568
Dezembro	31	5,76	1000	0,97	173203,2
Total					2016290,5

Fonte: Elaborada pelo autor.

Comparando as médias, Parnaíba apresenta uma média superior de 5,69 kWh/m² se comparada com a média de irradiação de Fortaleza apresentada.

Com base nos dados apresentados, uma usina de 1MW instalada na cidade de Parnaíba, no Piauí, tem uma capacidade média anual de geração fotovoltaica de 2,016 GWh, valor superior ao encontrado na cidade de Fortaleza.

Com o intuito de analisar situações diferentes e apontar possíveis extremos em comparação com a cidade de Fortaleza, foram as escolhidas as cidades de Blumenau em Santa Catarina, com coordenadas de 26,9° ao Sul de Latitude e 49,06611° ao Oeste de Longitude, e Recife em Pernambuco, cujas coordenadas são de 8,05° ao Sul de Latitude e 34,8811° ao Oeste de Longitude. Os valores de irradiação fornecidos pelo CRESESB estão demonstrados nas Figura 4.8 e 4.9.

Figura 4.8. Dados de irradiação solar em Blumenau - SC.

Estação: Blumenau
Município: Blumenau , SC - BRA
Latitude: 26,9° S
Longitude: 49,066111° O
Distância do ponto de ref. (26,28° S; 48,8549° O):72,1 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
✓	Piano Horizontal	0° N	5,17	4,81	4,39	3,50	3,08	2,53	2,83	3,08	3,36	4,28	4,97	5,03	3,92	2,64
✓	Ângulo igual a latitude	26° N	4,67	4,60	4,55	4,00	3,91	3,33	3,69	3,64	3,56	4,19	4,56	4,49	4,10	1,34
✓	Maior média anual	21° N	4,81	4,69	4,57	3,95	3,80	3,21	3,56	3,57	3,56	4,25	4,68	4,63	4,11	1,60
✓	Maior mínimo mensal	36° N	4,32	4,35	4,43	4,04	4,08	3,51	3,87	3,71	3,51	4,00	4,24	4,14	4,02	,92

Fonte: (CRESESB, 2015).

Figura 4.9. Dados de irradiação solar em Recife - PE.

Estação: Recife
Município: Recife , PE - BRA
Latitude: 8,0539° S
Longitude: 34,881111° O
Distância do ponto de ref. (8,03° S; 34,36° O):57,5 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
✓	Piano Horizontal	0° N	6,56	6,40	5,92	5,38	4,72	4,37	4,57	5,06	5,88	6,41	6,63	6,59	5,71	2,26
✓	Ângulo igual a latitude	8° N	6,23	6,22	5,92	5,55	4,99	4,68	4,87	5,27	5,95	6,29	6,33	6,22	5,71	1,65
✓	Maior média anual	4° N	6,41	6,32	5,93	5,47	4,87	4,53	4,73	5,18	5,93	6,36	6,49	6,41	5,72	1,96
✓	Maior mínimo mensal	26° N	5,22	5,51	5,61	5,63	5,34	5,12	5,28	5,48	5,80	5,69	5,37	5,12	5,43	,68

Fonte: (CRESESB, 2015).

Considerando as mesmas condições de inversor e potência instalada de 1 MW, os valores de energia gerada em um ano para um local situado em Blumenau e em Recife são apresentados na Tabela 4.7 e 4.8, respectivamente.

Tabela 4.7. Energia gerada mensal e anual para um sistema de 1MW em Blumenau.

Mês	Dias	Horas de Sol pleno (SP)	Potência do sistema (kW)	Rendimento do inversor	Energia Gerada (kWh/mês)
Janeiro	31	4,67	1000	0,97	140426,9
Fevereiro	28	4,6	1000	0,97	124936
Março	31	4,55	1000	0,97	136818,5
Abril	30	4	1000	0,97	116400
Maio	31	3,91	1000	0,97	117573,7
Junho	30	3,33	1000	0,97	96903
Julho	31	3,69	1000	0,97	110958,3
Agosto	31	3,64	1000	0,97	109454,8
Setembro	30	3,56	1000	0,97	103596
Outubro	31	4,19	1000	0,97	125993,3
Novembro	30	4,56	1000	0,97	132696
Dezembro	31	4,49	1000	0,97	135014,3
Total					1450770,8

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 4.8. Energia gerada mensal e anual para um sistema de 1MW em Recife.

Mês	Dias	Horas de Sol pleno (SP)	Potência do sistema (kW)	Rendimento do inversor	Energia Gerada (kWh/mês)
Janeiro	31	6,23	1000	0,97	187336,1
Fevereiro	28	6,22	1000	0,97	168935,2
Março	31	5,92	1000	0,97	178014,4
Abril	30	5,55	1000	0,97	161505
Maio	31	4,99	1000	0,97	150049,3
Junho	30	4,68	1000	0,97	136188
Julho	31	4,87	1000	0,97	146440,9
Agosto	31	5,27	1000	0,97	158468,9
Setembro	30	5,95	1000	0,97	173145
Outubro	31	6,29	1000	0,97	189140,3
Novembro	30	6,33	1000	0,97	184203
Dezembro	31	6,22	1000	0,97	187035,4
Total					2020461,5

Fonte: Elaborada pelo autor.

Comparando as médias de irradiação, Blumenau apresenta uma média de 4,1 kWh/m², valor inferior à média de Fortaleza, enquanto que Recife apresenta uma média superior, com o valor de 5.71 kWh/m².

Em termos de energia gerada por ano, a cidade de Blumenau apresentou uma geração de energia de 1,45 GWh por ano, valor inferior ao calculado para cidade de Fortaleza. Já em Recife, a energia gerada foi de 2,02 GWh por ano, sendo este valor superior ao calculado para Fortaleza e também superior ao encontrado para a cidade de Parnaíba.

A fim de comparar a geração de energia com uma cidade no estado pioneiro da isenção do ICMS para micro e minigeração, Minas Gerais. Foi escolhida a capital do estado, Belo Horizonte, com uma Latitude de 19,9° ao Sul e uma Longitude de 43,9378° ao Oeste. Os valores de irradiação fornecidos pelo CRESESB estão demonstrados na Figura 4.10.

Figura 4.10. Dados de irradiação solar em Belo Horizonte - MG.

Estação: Belo Horizonte
Município: Belo Horizonte , MG - BRA
Latitude: 19,9° S
Longitude: 43,937777° O
Distância do ponto de ref. (19,9° S; 43,96° O): 2,3 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
<input checked="" type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	4,28	5,56	4,06	4,28	3,69	3,72	3,97	4,36	4,69	4,44	4,81	4,33	4,35	1,87
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	20° N	3,95	5,31	4,11	4,71	4,36	4,62	4,86	4,98	4,92	4,33	4,46	3,96	4,55	1,36
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	21° N	3,93	5,29	4,10	4,72	4,38	4,66	4,90	5,00	4,92	4,31	4,44	3,93	4,55	1,36
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	12° N	4,12	5,46	4,13	4,59	4,14	4,31	4,56	4,78	4,88	4,42	4,64	4,14	4,51	1,35

Fonte: (CRESESB, 2015).

Considerando as mesmas condições de inversor e potência instalada de 1 MW, os valores de energia gerada em um ano para um local situado em Belo Horizonte são apresentados na Tabela 4.9.

Em comparação com a cidade em análise do trabalho, Fortaleza, a média de irradiação solar para o município de Belo Horizonte é inferior, com uma média de 4,55 kWh/m².

Fortaleza, com cerca de 1,97 GWh por ano de geração de energia, dadas as condições apresentadas de uma usina de minigeração de 1 MW, apresentou uma maior quantidade de energia gerada anualmente do que Belo Horizonte, com apenas 1,607 GWh por ano.

Tabela 4.9. Energia gerada mensal e anual para um sistema de 1MW em Belo Horizonte.

Mês	Dias	Horas de Sol pleno (SP)	Potência do sistema (kW)	Rendimento do inversor	Energia Gerada (kWh/mês)
Janeiro	31	3,95	1000	0,97	118776,5
Fevereiro	28	5,31	1000	0,97	144219,6
Março	31	4,11	1000	0,97	123587,7
Abril	30	4,71	1000	0,97	137061
Mai	31	4,36	1000	0,97	131105,2
Junho	30	4,62	1000	0,97	134442
Julho	31	4,86	1000	0,97	146140,2
Agosto	31	4,98	1000	0,97	149748,6
Setembro	30	4,92	1000	0,97	143172
Outubro	31	4,33	1000	0,97	130203,1
Novembro	30	4,46	1000	0,97	129786
Dezembro	31	3,96	1000	0,97	119077,2
Total					1607319,1

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4. CONCLUSÃO

Foram apresentados dados de irradiação solar através de mapas solarimétricos desenvolvidos por programas do governo que quantificam os valores em cada região e servem como base para estudos de viabilidade na área de atuação. Foi comprovada que a região Nordeste do Brasil apresenta altos índices de radiação solar e que sua variação de irradiação ao longo do ano é pequena, torando-a um ponto atrativo para investimentos fotovoltaicos.

Para a micro e minigeração solar, com potências instaladas de 100 kW e 1 MW, foram encontrados valores de geração anual em torno de 191 MWh e 1,9 GWh, respectivamente. Como forma de comparação, foram apresentados os cálculos de energia gerada para a mesma usina de 1MW se esta estivesse situada na região Sudeste, comprovando que o Nordeste do país tem melhor potencial para geração de energia solar se comparado com essa região. Porém, para outro ponto no Nordeste, situado no estado do Piauí, foi encontrada, para a mesma usina, um potencial de geração anual de 2,016 GWh, mostrando que Fortaleza não é a região com o maior potencial solar do Nordeste, apesar de já apresentar bons resultados de irradiação.

Fazendo uma análise para pontos extremos, foram comparados os resultados para as cidades de Blumenau, em Santa Catarina, na região Sul do país e em Recife, no estado de Pernambuco, no Nordeste. A partir dos valores encontrados, é possível afirmar que Fortaleza apresenta uma geração de energia por ano para uma usina de 1 MW próxima dos valores encontrados para a cidade de Recife, que apresentou 2,02 GWh por ano, se comparados com Blumenau, que o valor calculado de energia gerada foi de 1,45 GWh por ano.

Em comparação com uma cidade do estado em que recebeu por primeiro o benefício da isenção do ICMS para micro e minigeração de energia, Minas Gerais, o município de Fortaleza apresentou, para uma usina de 1 MW sob as mesmas condições de projeto, uma geração de energia elétrica anual superior aos 1,607 GWh por ano calculados para Belo Horizonte, outro fator que comprova que Fortaleza é um ponto atrativo para se instalar uma usina de geração de energia fotovoltaica.

Para o consumidor residencial que tem o interesse de investir em um sistema fotovoltaico em sua residência, o presente trabalho demonstrou o quanto de energia pode ser gerada em média para uma aplicação de 1,5 kW.

5. ANÁLISE DA ATRATIVIDADE FINANCEIRA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

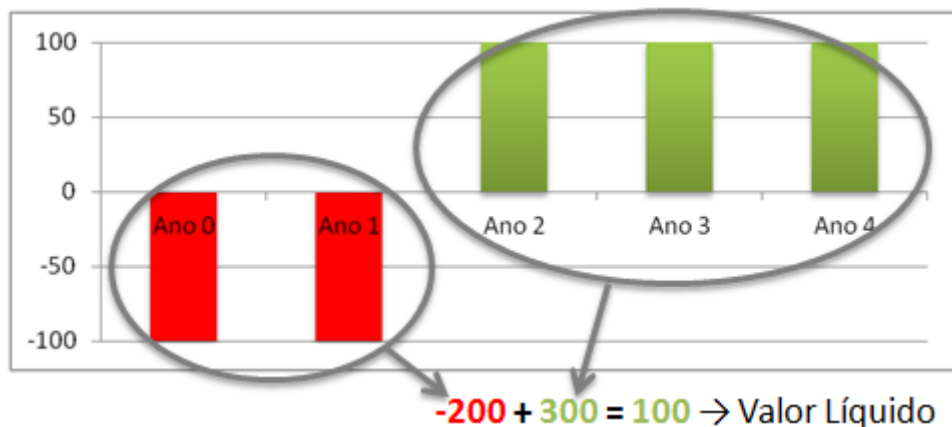
Este capítulo tem como objetivo mostrar todos os custos envolvidos para implantar um sistema fotovoltaico na região Nordeste do Brasil e calcular a taxa de retorno do investimento, usando como base a receita líquida e a energia produzida encontrada no capítulo anterior, além de envolver os custos com manutenção e operação.

5.1. EQUACIONAMENTO FINANCEIRO

Para se compreender a viabilidade financeira de um projeto ou novo negócio, a partir de seu fluxo de caixa, que é entendido pelas estimativas dos investimentos iniciais e dos retornos futuros, é importante determinar o Valor Presente Líquido e a Taxa Interna de Retorno do investimento em análise (FAZACONTA, 2015).

Em um fluxo de caixa, os valores negativos representam o período em que os investimentos são maiores que os retornos. Os valores positivos representam os retornos. O exemplo de um fluxo de caixa é demonstrado na Figura 5.1.

Figura 5.1. Exemplo gráfico de fluxo de caixa.



Fonte: (FAZACONTA, 2015).

Para o presente trabalho, onde se deseja analisar a viabilidade de projetos de sistemas fotovoltaicos, o fluxo de caixa será composto pelo Investimento inicial no ano zero, e os anos seguintes serão estimados os retornos através do cálculo da receita líquida para cada ano, por um período total de 20 anos de análise de retorno financeiro.

O investimento inicial é encontrado a partir de todos os custos envolvidos para o funcionamento do sistema solar, incluindo os custos de aquisição de cada componente do sistema, os custos de projeto e custos de instalação, ou seja, corresponde aos custos totais do sistema e pode ser determinado pela Equação 5.1.

$$I_o = \sum \text{Custos do projeto} \quad (5.1)$$

Onde I_o é o investimento inicial e o seu valor é dado em R\$.

A receita líquida é determinada pela equação 5.2.

$$R_x = (E_{Ga} \cdot i_G) - O\&M \quad (5.2)$$

Onde, R_x é a Receita líquida, dada em R\$, E_{Ga} é a Energia gerada anualmente pelo sistema fotovoltaico em kWh, i_G é a tarifa da energia elétrica e O&M são os custos anuais com operação e manutenção do sistema.

O Valor Presente Líquido, ou VPL, é a fórmula matemática-financeira utilizada para calcular o valor presente de uma série de retorno futuros descontando uma taxa de custo de capital estipulada. Quanto maior for o VPL, mais lucrativo será o projeto ou novo negócio (FAZACONTA, 2015). Seu valor indica o lucro monetário que o projeto trará ao investidor. De acordo com (PEREIRA e ALMEIDA, 2006), o cálculo do VPL pode ser interpretado pela Equação 5.3.

$$VPL = \sum_{x=1}^n \frac{R_x}{(1 + i_{af})^x} - I_o \quad (5.3)$$

Onde, R_x é a receita líquida para o ano, n é o número de anos de estudo, i_{af} é a taxa de atratividade financeira e I_o é o investimento inicial do projeto.

A determinação do VPL por si só não é suficiente para determinar a viabilidade de se investir em um projeto. Também é importante se calcular a Taxa Interna de Retorno.

A Taxa Interna de Retorno, ou TIR, é entendida pela taxa de juros para a qual o VPL é nulo. Quanto maior o valor da TIR, melhor e mais lucrativo será o projeto. Um projeto viável deve apresentar uma Taxa Interna de Retorno superior à taxa de atratividade financeira (FAZACONTA, 2015).

Para calcular a TIR, basta aplicar valor nulo na Equação 5.3, como mostra na Equação 5.4.

$$0 = \sum_{x=1}^n \frac{R_x}{(1 + TIR)^x} - I_0 \quad (5.4)$$

Calculados os VPL e a TIR, é possível analisar se um projeto fotovoltaico tem viabilidade financeira para se implantado.

5.2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.2.1. Especificações

Os projetos a serem analisados neste trabalho correspondem aos exemplos de sistemas usados no capítulo 4. Para cada um dos investimentos, foi calculado o VPL e a TIR, considerando todos os custos envolvidos em sua instalação e os retornos proporcionados devido à energia gerada anualmente pelo sistema em questão, de acordo com os dados calculados no capítulo anterior.

É necessário que os dados escolhidos tenham concordância com os encontrados em um cenário real para poder obter resultados, por isso, os valores adotados para cada parâmetros dos cálculos devem ser justificados. Cada uma das especificações adotadas na análise será fundamentada.

As especificações de projeto e investimento para os três exemplos de sistemas solares fotovoltaicos estão apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Especificações da análise para cada sistema escolhido.

Especificações	1, 5kW	100kW	1MW
Investimento (I_o)	R\$ 15.000,00	R\$ 775.000,00	R\$ 5.500.000,00
Energia gerada anual (E_{Ga})	2958,08 kWh	197205,85 kWh	1972058,5 kWh
Taxa de Geração (i_G)	0,46296 R\$/kWh	0,65042 R\$/kWh	0,65042 R\$/kWh
O&M	1% de I_o	1% de I_o	1% de I_o
i_{af}	12 % a.a	12 % a.a	12 % a.a
Anos de análise	20	20	20

Fonte: Elaborada pelo autor.

Investimento

O valor adotado de Investimento inicial para cada sistema fotovoltaico em estudo teve como base o valor médio da faixa de preços para custo total de sistemas solares ilustrada no Capítulo 3, na Tabela 3.1. De acordo com (SOLAR, 2015), a faixa de custos apresentada corresponde a valores estimados com base nos preços encontrados no mercado dos componentes e dos serviços envolvidos na implantação de um projeto de geração de energia solar. Não foram considerados os custos com aquisição de terreno nos projetos de investimentos dos sistemas fotovoltaicos, apenas os custos dos componentes, projeto e instalação.

Portanto, para o sistema de 1,5 kW foi adotado um investimento inicial de 15 mil reais, que corresponde à média da faixa de 12 mil a 18 mil reais. Para o sistema de 100 kW foi adotado o valor médio de investimento de 775 mil reais, e para o sistema de 1 MW, um investimento médio de 5,5 milhões de reais.

Energia gerada anual

Os valores escolhidos para a energia gerada no período de um ano correspondem aos calculados a partir dos dados de irradiação solar encontrados para o ponto situado na região Nordeste do Brasil, na cidade de Fortaleza. Valores obtidos nos cálculos do Capítulo 4.

Taxa de Geração

Para a o sistema de 1,5 kW, que corresponde a uma aplicação residencial, o retorno financeiro do investimento será obtido a partir da compensação de energia em sua conta de energia devido à geração de energia dos painéis fotovoltaicos, como é estabelecido na Resolução Normativa nº 482 da ANEEL que define o Sistema de Compensação de Energia Elétrica, onde a energia ativa injetada no sistema de distribuição pela unidade consumidora, será cedida a título de empréstimo gratuito para a distribuidora, passando a unidade consumidora ter um crédito em quantidade de energia ativa a ser consumida dentro de um prazo de 36 meses (ANEEL, 2012). Como os sistemas de 100 kW e 1 MW se enquadram respectivamente nos casos de micro e minigeração, estes também estão inclusos no Sistema de Compensação de Energia Elétrica.

Para o sistema de 1,5 kW, a tarifa considerada será o preço da energia elétrica para um consumidor residencial do grupo B definida pela concessionária de Fortaleza, a COELCE. Assim, o valor adotado foi de (COELCE, 2015):

Tarifa residencial: 0,46296 R\$/kWh.

Para as demais aplicações, que consideram um uso em uma indústria, o preço da energia adotado será equivalente ao de um consumidor industrial optante pelo grupo B. Deste modo, a tarifa de energia adotada para os cálculos da receita líquida anual será correspondente ao preço médio da energia elétrica da concessionária da cidade de estudo.

Preço médio da energia elétrica: 0,65042 R\$/kWh.

Custos de Operação e Manutenção

Para os custos de operação e manutenção (O&M), foi adotado o valor de 1% do capital total do investimento inicial. Segundo a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE), este é o valor de estimativa comum para o custo anual de operação em análises de investimentos para projetos (ABINEE, 2012). Portanto, os custos de operação e manutenção estimados para o presente trabalho foram de 1% do investimento inicial ao ano. Deste modo, para cada sistema solar em análise:

- O&M_{1,5kW}: R\$ 150,00;
- O&M_{100kW}: R\$ 7750,00;
- O&M_{1MW}: R\$ 55000,00.

Taxa de atratividade financeira e número de anos de análise

A taxa de atratividade financeira teve o valor adotado de 12%, essa percentagem é a utilizada em todos os projetos de engenharia econômica de análise financeira.

O número de anos de análise adotado foi de 20 anos de análise. É um valor comum para cálculos de análise de viabilidade econômica de investimentos.

5.2.2. Cálculo do VPL e da TIR

Com base nas especificações adotadas na Tabela 5.1, os valores de Valor Presente Líquido e Taxa Interna de Retorno para os três exemplos de sistemas solares podem ser calculados com o auxílio das Equações 5.2, 5.3 e 5.4.

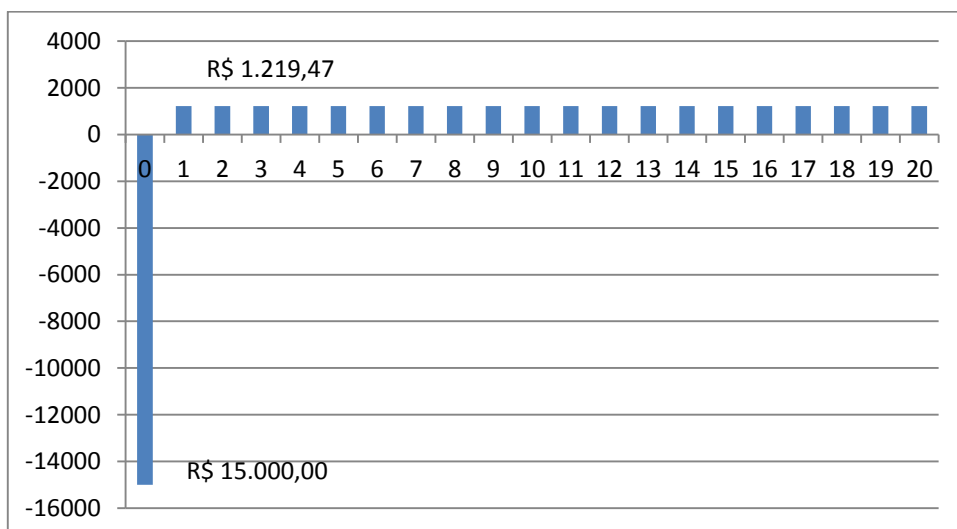
Sistema fotovoltaico de 1,5 kW

É necessário encontrar a receita líquida através da Equação 5.2 para se determinar o fluxo de caixa e calcular o VPL e a TIR. Nesse caso:

$$R_x(1,5 kW) = R\$ 1.219,47$$

Com a receita líquida anual, é possível montar o fluxo de caixa do investimento. Este está ilustrado na Figura 5.2. Devido ao fato de se estar trabalhando com valores médios de geração de energia ao ano, custos de operação e manutenção e taxa de geração, as parcelas de receita líquida são iguais para todos os anos do fluxo.

Figura 5.2. Fluxo de caixa para o sistema fotovoltaico de 1,5 kW.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir das Equações 5.3 e 5.4 é possível calcular o VPL e a TIR para o sistema fotovoltaico de 1,5 kW. Os valores encontrados estão descritos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. VPL e TIR para o sistema de 1,5 kW.

Parâmetro	Sistema fotovoltaico de 1,5 kW
VPL	R\$ - 5.891,24
TIR	5%

Fonte: Elaborada pelo autor.

O VPL encontrado apresenta um valor negativo, o que significa que o projeto não retorna lucros ao investidor. A TIR encontrada foi de 5%, valor inferior à taxa de atratividade financeira de 12%, indicando que o projeto não é viável financeiramente.

Com os valores encontrados, dados as condições adotadas, pode-se concluir que não é viável um consumidor residencial investir em um projeto fotovoltaico de 1,5 kW de potência pois no prazo de 20 anos não haverá um retorno do dinheiro investido. Como o VPL negativo apresentou um valor baixo se comparado com o investimento inicial e a TIR um valor próximo à taxa de atratividade financeira, é possível que o mesmo projeto seja viável se o investidor conseguir uma proposta com um preço menor.

Apesar da inviabilidade do projeto, este ainda serve para compensar os custos de energia da residência onde for instalado, o que é uma vantagem na redução da conta de luz do consumidor.

Sistema fotovoltaico de 100 kW

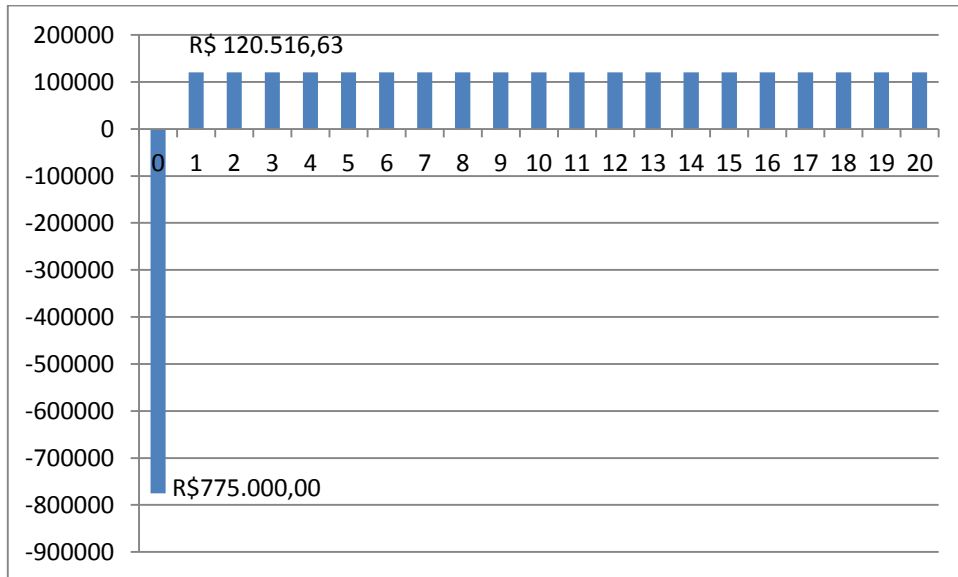
A receita líquida pode ser calculada através da Equação 5.2 para se determinar o fluxo de caixa e calcular o VPL e a TIR. Então:

$$R_x(100 \text{ kW}) = R\$ 120.516,63$$

Com a receita líquida anual, é possível montar o fluxo de caixa do investimento. Este está demonstrado na Figura 5.3. Devido ao fato de se estar trabalhando com valores médios de

geração de energia ao ano, custos de operação e manutenção e taxa de geração, as parcelas de receita líquida também são iguais para todos os anos do fluxo.

Figura 5.3. Fluxo de caixa para o sistema fotovoltaico de 100 kW.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir das Equações 5.3 e 5.4 é possível calcular o VPL e a TIR para o sistema fotovoltaico de 100 kW. Os valores encontrados estão descritos na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. VPL e TIR para o sistema de 100 kW.

Parâmetro	Sistema fotovoltaico de 100 kW
VPL	R\$ 125.192,17
TIR	15%

Fonte: Elaborada pelo autor.

O VPL encontrado apresenta um valor positivo de R\$ 125.192,17, indicando que o projeto irá trazer lucro monetário ao investidor. A TIR encontrada foi de 15%, superior à taxa de atratividade financeira de 12%, o que significa que o investimento é economicamente viável, dadas as condições apresentadas, para o investidor.

De acordo com os resultados encontrados, mediante aos dados adotados, um projeto de microgeração solar fotovoltaica de 100 kW cujo investimento seja de 775 mil reais é viável financeiramente para um consumidor que queria instalar este tipo de geração na cidade de

Fortaleza, Ceará. Esse retorno financeiro é possível devido ao sistema de microgeração estar enquadrado no Sistema de Compensação de Energia Elétrica.

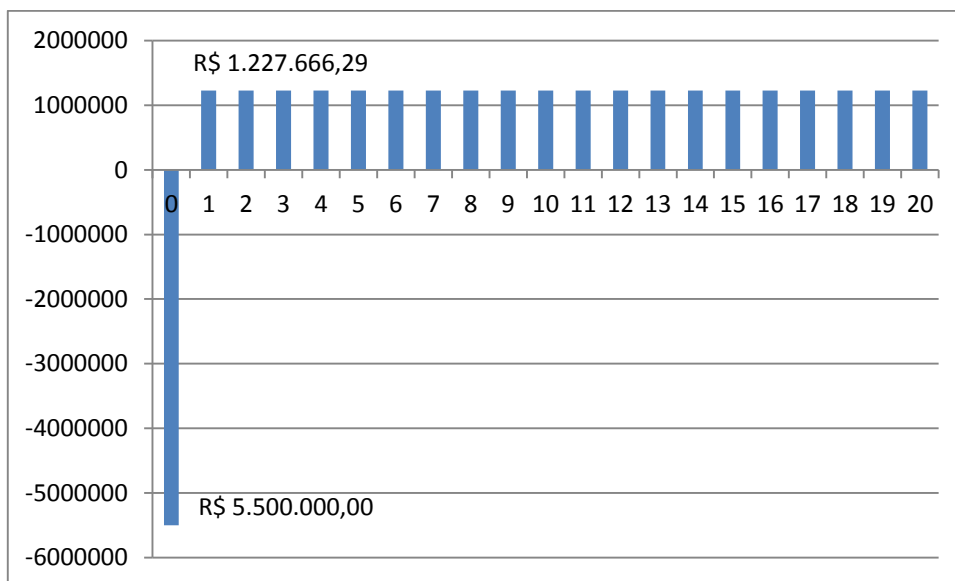
Sistema fotovoltaico de 1 MW

A receita líquida pode ser calculada através da Equação 5.2 para se determinar o fluxo de caixa e calcular o VPL e a TIR. Deste modo:

$$R_x(1 \text{ MW}) = \text{R\$ } 1.227.666,29$$

Com a receita líquida anual, é possível montar o fluxo de caixa do investimento. Este está demonstrado na Figura 5.4. Devido ao fato de se estar trabalhando com valores médios de geração de energia ao ano, custos de operação e manutenção e taxa de geração, as parcelas de receita líquida também são iguais para todos os anos do fluxo.

Figura 5.4. Fluxo de caixa para o sistema fotovoltaico de 1 MW.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir das Equações 5.3 e 5.4 é possível encontrar o VPL e a TIR para o sistema fotovoltaico de 1 MW apresentado. Os valores calculados estão descritos na Tabela 5.4.

Tabela 5.4. VPL e TIR para o sistema de 1 MW.

Parâmetro	Sistema fotovoltaico de 1 MW
VPL	R\$ 3.669.984,14
TIR	22%

Fonte: Elaborada pelo autor.

O VPL calculado teve seu valor positivo de R\$ 3.669.984,14, comprovando que o projeto irá proporcionar lucro monetário a quem investir. A TIR calculada foi de 22%, um valor superior à taxa de atratividade financeira adotada de 12%, e é outro fator que reforça que o investimento trará lucros ao investidor.

O projeto de minigeração de 1 MW apresentado, ainda enquadrado no Sistema de Compensação de Energia Elétrica, sob as devidas condições adotadas, cujo custo total esteja em torno de 5,5 milhões de reais é viável financeiramente de ser implementado na cidade de Fortaleza, Ceará. A relação entre o lucro do VPL e investimento foi maior se comparada com o projeto de microgeração de 100 kW, o que também resultou em uma diferença maior entre a TIR encontrada para o sistema de minigeração em comparação com a taxa de atratividade financeira. A conclusão é que um sistema solar fotovoltaico de minigeração de 1 MW é melhor de se investir do que um sistema de microgeração de 100 kW. Porém, o sistema de menor potência necessita de um investimento inicial bem menor, apesar de tudo. Então, a escolha entre as aplicações depende das necessidades do consumidor que deseja implementar a usina solar.

Ao analisar os três investimentos estudados, pode se afirmar que quanto maior for a potência do sistema solar fotovoltaico, maior será os lucros com relação ao capital inicial investido. Isso acontece devido a todos os três exemplos estarem regidos pelo Sistema de Compensação da Energia Elétrica o que define os lucros anuais de cada um sendo mensurados através do desconto de consumo de energia mediante a energia elétrica injetada pelos sistemas. Caso, fosse um sistema superior a 1 MW, que não é mais considerado micro ou minigeração, a taxa de geração a ser utilizada seria diferente, o que poderia resultar em valores menores de VPL e TIR para os sistemas apresentados no presente trabalho.

Existem várias variáveis que podem apontar os motivos para o sistema de 1 MW ter uma maior rentabilidade que os demais projetos analisados. Uma delas está no fato que o crescimento dos custos com os inversores não é diretamente proporcional ao crescimento de sua potência, como foi ilustrado na Tabela 3.4. Outros componentes do sistema, como estruturas de fixação, custos de cabeamento, proteção e custos de projeto e instalação também não tem seu crescimento de preço diretamente proporcional ao crescimento de potência instalada do sistema, o que contribui para que projetos de maior potência tenham um menor custo de R\$/kW. Até na aquisição dos painéis fotovoltaicos, onde uma compra em larga

escala de painéis pode acarretar numa redução de preço se comparada com a compra individual de cada módulo.

Com exceção do sistema de 1,5 kW, os projetos de micro e minigeração avaliados apresentam rentabilidade, onde há garantia de retorno financeiro do capital investido. Um investidor que tenha interesse em iniciar um projeto de mini ou microgeração de energia fotovoltaica em Fortaleza irá obter lucros se os custos totais forem condizentes com os adotados neste trabalho.

Considerando os valores de preço médio de energia elétrica, custos com operação e manutenção e taxa de atratividade financeira adotados neste trabalho, a partir de qual potência instalada o sistema iria trazer lucros ao investidor? Com base nos dados fornecidos e os sistemas com faixas de preços mostrados no capítulo 3, o menor sistema fotovoltaico que apresenta um retorno do investimento é o de 10 kW, como será mostrado a seguir.

O investimento inicial deste projeto, seguindo a mesma regra utilizada para o sistemas anteriores seria dado pela média das faixas de valores mostrados no capítulo 3, portanto:

$$I_0(10 \text{ kW}) = 87.500,00 \text{ R\$}$$

Para o cálculo da viabilidade do sistema fotovoltaico de 10 kW, serão considerados dois investimentos, um com a tarifa residencial de 0,46296 R\$/kWh e outro com a tarifa industrial de 0,65042 R\$/kWh.

A receita líquida pode ser calculada através da Equação 5.2 para se determinar o fluxo de caixa e calcular o VPL e a TIR. Então, para a tarifa residencial:

$$R_x(10 \text{ kW}) = \text{R\$ } 11.951,66$$

Para a tarifa industrial:

$$R_x(10 \text{ kW}) = \text{R\$ } 11.951,66$$

A partir das Equações 5.3 e 5.4 é possível encontrar o VPL e a TIR para o sistema fotovoltaico de 10 kW apresentado. Os valores calculados estão descritos na Tabela 5.5.

Tabela 5.5. VPL e TIR para o sistema de 10 kW.

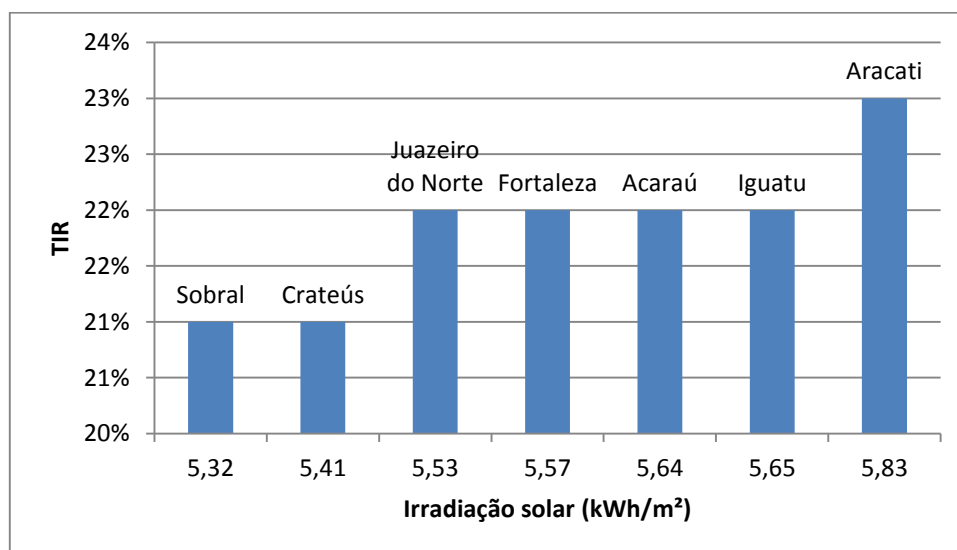
Parâmetro	Tarifa Residencial	Tarifa Industrial
VPL	R\$ - 25.840,94	R\$ 1.772,25
TIR	7%	12%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como é observado na Tabela 5.5, o sistema fotovoltaico de 10 kW apresentou um Valor Presente Líquido positivo e uma Taxa Interna de Retorno não inferior à taxa de atratividade financeira, para um projeto de 10 kW para um consumidor industrial que esteja interessado em montar uma usina de microgeração para compensar parte do seu consumo, conferindo que o sistema mostrado tem retorno financeiro para o investidor. Porém, para um consumidor residencial que queira instalar um sistema fotovoltaico de 10 kW, como foi mostrado nos resultados, não teria retorno do dinheiro investido, já que o seu VPL foi negativo e a TIR inferior à taxa de atratividade financeira.

Os resultados encontrados são para cálculos considerando as condições de potencial solar na cidade de Fortaleza. Ao analisar o recurso de diversas cidades no estado do Ceará, onde estas também possuem a mesma taxa de geração de Fortaleza, pois também tem a COELCE como distribuidora de energia, a relação entre a TIR, considerando um sistema fotovoltaico de 1 MW, e a média de irradiação solar das cidades de Fortaleza, Sobral, Aracati, Juazeiro do Norte, Iguatu, Crateús e Acaraú está ilustrada na Figura 5.5.

Figura 5.5. Gráfico da TIR em função da irradiação solar para diferentes cidades no estado do Ceará para um sistema fotovoltaico de 1 MW.



Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com o gráfico apresentando, das cidades escolhidas, Aracati apresenta a maior TIR entre elas, com uma taxa de 23%, pois detém a maior média de irradiação solar. As menores taxas internas de retorno foram de Sobral e Crateús, com 21% cada. Entretanto, a TIR para todas as cidades cearenses analisadas apresentou uma faixa de valor compreendida entre 21-23%, desde que todas apresentem as mesmas condições de projeto, sem considerar os eventuais custos com aquisição de terreno. A pouca divergência entre os valores de retorno encontrados é devido aos valores de irradiação solar serem similares, o que implica em uma boa distribuição do recurso solar no estado.

5.2.3. Comparação com o cenário da Alemanha

O país que lidera em energia solar é a Alemanha, segundo a IEA. Porém, como mostrado no Capítulo 4, o território alemão possui uma variação de irradiação solar global incidente de 900 a 1250 kWh/m²/ano enquanto que o Brasil possui uma variação de irradiação de 1500 a 2500 kWh/m²/ano, onde em termos de valor máximo da variação o território brasileiro possui praticamente o dobro de irradiação solar se comparado com a Alemanha. Mesmo assim, o país europeu lidera em termos de capacidade instalada para a energia fotovoltaica enquanto que no Brasil a tecnologia ainda está em crescimento, encontrando dificuldades e barreiras para se inserir com peso no mercado.

Um dos principais problemas no Brasil, com relação à Alemanha, está no preço da energia solar fotovoltaica para a nação brasileira. Ainda é uma energia cara, como foi mostrado no presente capítulo, um sistema de 1,5 kW conta com um investimento inicial de 15 mil reais, podendo ainda ser mais caro do que o valor adotado. No Capítulo 3 foi mostrada a relação de preço por watt-pico dos painéis escolhidos onde o mais barato apresentou uma relação de 3,40 R\$/Wp, enquanto que na Alemanha a relação média de preços está em 0,57 €/Wp (PVXCHANGE, 2015), o que convertendo para reais tem o valor aproximado de 2,28 R\$/Wp. Portanto, o preço de aquisição dos painéis fotovoltaicos na Alemanha é inferior se comparado com o Brasil, o que contribui para a redução dos custos de implantação de um sistema, e como usinas de geração fotovoltaica de grande porte necessitam de enormes quantidades de módulos para atingir a sua potência desejada, uma relação R\$/Wp menor já indica uma redução significativa nos investimentos iniciais do projeto.

Na Alemanha existem vários incentivos por parte do governo para que investidores arrisquem no mercado de geração de energia renováveis. No ano de 2013, o governo federal alemão fez um compromisso de um total de instalação de 52 GWp suportados por *feed-in tariff* (GRIGOLEIT, 2014), que é uma política econômica criada para promover o investimento e produção na área de energia renováveis, fazendo uso de acordos de longo prazo e preços amarrados aos custos de produção para produtores de energias renováveis. Também é o país com maior densidade de institutos empresas que realizam pesquisas em energia fotovoltaica. Mais de 70 organizações são capazes de atender aos desafios de pesquisa e desenvolvimento em todos os estágios de produção (GRIGOLEIT, 2014). O acesso à produção de tecnologia de ponta e processos ajuda de forma significativa na redução dos preços para todos os componentes do sistema, dessa forma, não só os painéis apresentam um custo por potência menor, mas também em todos os outros componentes do sistema se comparado com o mercado brasileiro.

No Brasil, apesar de programas de incentivo à energia solar estarem sendo efetuados, como a isenção do ICMS para a micro e minigeração de energia, ainda existem muitas barreiras que tornam esta tipo de energia cara aos olhos dos investidores. Pode ter a isenção do ICMS para a geração de energia, porém este imposto ainda está presente nos custos de aquisição dos componentes do sistema fotovoltaicos, o que contribui para tornar o projeto caro. O incentivo do ICMS para micro e minigeração é apenas um pequeno passo de muitos que devem ser tomados para tornar a energia fotovoltaica uma fonte de energia de peso considerável no Brasil.

Além do incentivo da redução de preços e impostos, também há uma necessidade de um maior incentivo em pesquisa e desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica no país como existe na Alemanha. Pois quando o país é capaz de desenvolver a sua própria tecnologia e esta tem uma boa qualidade, contribui para baratear o preço da tecnologia.

5.3. CONCLUSÃO

No presente capítulo, foi apresentada a análise financeira dos sistemas fotovoltaicos definidos no capítulo anterior: o sistema residencial de 1,5 kW, o sistema de microgeração de 100 kW e o sistema de minigeração de 1 MW. Para cada sistema em análise, foram definidos

parâmetros como o investimento inicial, os custos de operação e manutenção, o preço médio da energia elétrica, a energia gerada por ano e a taxa de atratividade financeira. Cada escolha de valor foi devidamente justificada.

Os valores de Valor Presente Líquido e Taxa Interna de Retorno para cada um dos casos foram calculados, considerando um fluxo de caixa de 20 anos. O sistema de 1,5kW apresentou um VPL negativo e uma TIR inferior à taxa de atratividade financeira, indicando que não é um investimento economicamente viável. Já os outros dois casos apresentaram tanto um VPL positivo quando uma TIR superior a 12%, comprovando que estes são projetos com rentabilidade. O sistema de minigeração de 1 MW foi o projeto com melhor retorno do capital investido, apresentando o maior VPL e TIR das três aplicações. O valor limite observado, segundo a metodologia adotada, foi de 10 kW para que um sistema fotovoltaico traga retorno financeiro ao investidor.

A partir da análise de sete cidades distintas no estado do Ceará, pode ser concluído que a região tem uma boa distribuição do recurso solar em seu território, o que resulta em valores similares de TIR, o que implica numa garantia de retorno financeiro em qualquer uma das cidades, caso se queira iniciar um investimento de sistema de minigeração fotovoltaica.

Apesar dos investimentos de 100 kW e 1 MW apresentarem uma viabilidade financeira, ainda existem muitas barreiras a serem derrubadas e incentivos a serem realizados para que a energia solar fotovoltaica possa ser melhor explorada no Brasil, um país que possui uma grande e quantidade de recurso solar se comparado com outros países em que os incentivos governamentais e de pesquisa e desenvolvimento para a geração a partir de fontes de energia renovável são maiores.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou um estudo de engenharia econômica na área de sistemas de energia elétrica, com relação à implementação de usinas de micro e minigeração de energia solar fotovoltaica usando como base de análise o município de Fortaleza, no estado do Ceará.

Ao final da leitura do presente trabalho, é possível ter uma ideia dos custos individuais envolvidos e dos componentes que compõem todo o processo de se instalar um sistema de energia solar, que envolve vários componentes além do módulo fotovoltaico e sua instalação, como as estruturas de fixação, o cabeamento, o inversor e os aparelhos de proteção. Além dos componentes, devem ser considerados os custos de projeto e instalação. Portanto, não só o preço de aquisição dos painéis fotovoltaico deve ser levando em consideração para se calcular o investimento inicial de um projeto de sistema fotovoltaico, apesar dos painéis apresentarem uma considerável parte do investimento, pois um módulo de 250 Wp custa numa faixa de R\$ 850,00 a 1.100,00, e um sistema de 1 MW iria precisar de 4000 painéis de 250 Wp para atingir a sua potência nominal.

Como demonstrado no Capítulo 4, o Nordeste do Brasil é uma das regiões brasileiras com maior irradiação solar, onde o maior índice de radiação se encontra ao norte da Bahia, próximo da fronteira com o Piauí. A cidade de análise, Fortaleza, apresentou boa irradiação solar, demonstrada nos cálculos de energia gerada por ano realizados para os três exemplos de sistemas fotovoltaicos adotados: 1,5 kW, 100 kW e 1 MW. Comparando a energia gerada anualmente a partir dos dados de irradiação solar em Fortaleza para uma usina de minigeração de 1 MW com uma em Campinas e outra em Blumenau, foi constatado que a localidade nordestina apresentou uma geração de energia superior, porém ainda não sendo a melhor do Nordeste, como foi mostrado na comparação com a cidade de Parnaíba, no Piauí, e com uma usina em Recife, Pernambuco. Equiparando a energia gerada de um sistema fotovoltaico de 1 MW em Fortaleza com um em Belo Horizonte em Minas, foi comprovado que a capital cearense apresenta uma melhor irradiação solar, o que leva a uma maior geração anual de energia do que a capital de Minas Gerais, estado que foi o pioneiro da isenção do ICMS. Uma análise regional, demonstrada no Capítulo 5, considerando cidades no estado do Ceará, e desta vez os investimentos e os custos para uma usina de 1 MW, onde Fortaleza apresentou

uma TIR de 22%, se situando no meio do intervalo de 21-23%, o que indicou e um valor maior do que Sobral e Crateús, porém inferior a Aracati.

Analisando os investimentos para os três exemplos adotados, através do cálculo do VPL e da TIR, foi concluído que o sistema de 1,5 kW é inviável financeiramente devido ao seu VPL ser negativo e sua TIR inferior à taxa de atratividade financeira. Os demais sistemas apresentaram tanto um VPL positivo quanto uma TIR superior, mostrando-se investimentos com garantia de retorno do capital investido. O retorno monetário dos projetos foi calculado considerando o Sistema de Compensação de Energia Elétrica onde a energia gerada é injetada na rede e descontada da energia consumida pelo usuário. As regras desse sistema são válidas para usinas de micro e minigeração, o que oferecem uma vantagem para residências, comércios e indústrias que desejem investir em um projeto fotovoltaico para tentar reduzir os seus custos com energia consumida.

Apesar dos sistemas de micro e minigeração terem sido viáveis economicamente para os investidores, como foi mostrado no Capítulo 5, estes sistemas ainda possui um custo inicial elevado para a potência nominal de instalação. Incentivos para o uso da energia solar vêm sendo realizados no Brasil, como a isenção do ICMS para sistema com potência igual ou inferior a 1 MW para alguns dos estados do país, porém ainda existem barreiras a serem superadas que ainda tornam este tipo de energia cara. Como mostrado, o preço dos painéis fotovoltaicos ainda é elevado, e uma comparação com o preço médio por watt do mercado alemão, país que tem mais usinas fotovoltaicas instaladas no globo, defende essa afirmação.

Meios para reduzir o preço da energia fotovoltaica no Brasil existem, um deles seria a possibilidade do país produzir os seus próprios módulos e tecnologia. Entretanto, é necessário que seja investido em pesquisa e desenvolvimento nessa área para que o país possa produzir uma tecnologia de ponta que esteja a par da já produzida e circulada no mercado. Na Alemanha, existem várias instituições que trabalham no desenvolvimento de tecnologias em energias renováveis, um dos fatores que explica como mesmo a irradiação solar no país europeu sendo bastante inferior a do Brasil, a Alemanha possui mais capacidade instalada de energia solar.

Para trabalhos futuros, pode ser realizado um estudo com maiores potências, que não estão enquadradas no Sistema de Compensação de Energia para fazer um comparativo de rentabilidade entre uma usina com maior potência e uma usina de minigeração de energia. Também pode ser realizado um estudo de uma usina de 1 MW na Alemanha para destacar as

diferenças financeiras entre os componentes e seus preços de aquisição e custo final de projeto com o cenário brasileiro.

Outra linha de estudo pode ser voltada para desenvolver projetos de como reduzir os custos dos sistemas fotovoltaicos, apontando medidas e linhas de pesquisa onde seria possível fabricar painéis de boa qualidade a um preço menor.

REFERÊNCIAS

- ABINEE. **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira**. Grupo Setorial de Sistemas Fotovoltaicos da ABINEE. Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica - ABINEE. [S.l.], p. 176. 2012.
- ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012**. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. [S.l.], p. 5. 2012.
- BLUESOL. Energia Solar: Como funciona? - Efeito Fotovoltaico. **Blue Sol Educacional**, 2011. Disponível em: <<http://www.blue-sol.com/energia-solar/energia-solar-como-funciona-o-efeito-fotovoltaico/>>. Acesso em: 21 Julho 2015.
- BRAGA, R. P. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos e Aplicações**. Monografia - Universidade Federal do Rio de Janeiro Escola Politécnica. Rio de Janeiro, p. 80. 2008.
- CÂMARA, C. F. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. Monografia - Universidade Federal de Lavras. Departamento de Engenharia. Lavras, p. 68. 2011.
- CARNEIRO, J. **Módulos Fotovoltaicos Características e Associações**. Escola de Ciências. Departamento de Física. Universidade do Minho. Braga, p. 18. 2010.
- COELCE. Tarifas. **Portal Coelce**, 2015. Disponível em: <<https://www.coelce.com.br/sobrecoelce/tarifas.aspx>>. Acesso em: 26 Agosto 2015.
- COLAÇO, J. Micro e minigeração serão isentas de ICMS. **Diário do Nordeste**, 2015. Disponível em: <<http://diariodonordeste.verdesmares.com.br/cadernos/negocios/micro-e-minigeracao-serao-isentas-de-icms-1.1332794>>. Acesso em: 04 Agosto 2015.
- CRESESB. Potencial Solar - SunData. **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito**, 2015. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em: 12 Agosto 2015.
- EPE. **Balanco Energético Nacional 2015 - Relatório Síntese - Ano Base de 2014**. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, p. 61. 2015.

EPE. EPE lança Nota Técnica sobre participação dos projetos solares no LER/2014. **Empresa de Pesquisa Energética - EPE**, 2015. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/leiloes/Paginas/Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20de%20Reserva%202014/EPElan%C3%A7aNotaT%C3%A9cnicaSobreparticipa%C3%A7%C3%A3odosprojetossolaresnoLER2014.aspx?CategoriaID=6942>>. Acesso em: 04 Agosto 2015.

FADIGAS, E. A. F. A. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos Conversão e Viabilidade Técnico-econômica**. Grupo de Energias PEA - Escola Politécnica Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 71. 2011.

FAZACONTA. VPL e TIR. **Faz a conta - Simplificando a matemática financeira**, 2015. Disponível em: <<http://fazaconta.com/matematica-financeira-val-tir.htm>>. Acesso em: 18 Agosto 2015.

FILHO, P. M. C. T. **Análise de Modelos Numéricos para Cálculo dos Parâmetros da Distribuição de Weibull: Estudo de Caso para o Campus do Pici da UFC**. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, p. 87. 2013.

FOCUSOLAR. Potencial Solar Brasileiro. **Focusolar**, 2015. Disponível em: <<http://focusolar.com.br/potencial-solar-brasileiro/>>. Acesso em: 20 Julho 2015.

GRIGOLEIT, T. **Industry Overview The Photovoltaic Market in Germany**. Germany Trade & Invest. Berlin, p. 16. 2014.

GRIMM, A. M. Radiação Solar Terrestre. Balanço de Calor. **Departamento de Física - UFPR**, 1999. Disponível em: <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-1.html>>. Acesso em: 20 Julho 2015.

HILLE, G.; ROTH, W.; SCHMIDT, H. **Photovoltaic Systems**. First Edition. ed. Freiburg: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 1995.

IEA. About Solar Photovoltaics. **International Energy Agency**, 2014. Disponível em: <<http://www.iea.org/topics/renewables/subtopics/solar/>>. Acesso em: 13 Agosto 2015.

LIMA, J. L. B. **Energia Fotovoltaica como Alternativa Energética Viável**. Projeto de Graduação - Curso de Engenharia dos Materiais. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 47. 2014.

MINHACASASOLAR. Painel Solar Fotovoltaico Policristalino de 250W Kyocera Solar – KD250GH-4FB2. **Minha Casa Solar**, 2015. Disponível em: <<http://minhacasasolar.lojavirtualfc.com.br/prod,idloja,14743,idproduto,4467157,painel-solar-fotovoltaico-painel-de-205w-a-260w-painel-solar-fotovoltaico-policristalino-de-250w-kyocera-solar---kd250gh-4fb2>>. Acesso em: 03 Agosto 2015.

MINHACASASOLAR. Par de Cabos Fotovoltaicos Flexíveis de 6mm - 01m Vermelho + 01m Preto. **Minha Casa Solar**, 2015. Disponível em: <<http://minhacasasolar.lojavirtualfc.com.br/prod,idloja,14743,idproduto,4402361,acessorios-energia-solar-condutores-eletricos-par-de-cabos-fotovoltaicos-flexiveis-de-6mm---01m-vermelho---01m-preto>>. Acesso em: 04 Agosto 2015.

MINHACASASOLAR. Par de conectores fotovoltaicos tipo MC4 para cabos com seção de 4mm² ou 6mm² - MC40406. **Minha Casa Solar**, 2015. Disponível em: <<http://minhacasasolar.lojavirtualfc.com.br/prod,idloja,14743,idproduto,4384194,acessorios-energia-solar-conectores-e-terminais-par-de-conectores-fotovoltaicos-tipo-mc4-para-cabos-com-secao-de-4mm--ou-6mm----mc40406>>. Acesso em: 04 Agosto 2015.

NASCIMENTO, C. A. D. **Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica**. Monografia - Universidade Federal de Lavras. Lavras, p. 21. 2004.

NEOSOLARENERGIA. Painel Solar Fotovoltaico Yingli YL250P 29b (250Wp). **Neo Solar Energia**, 2015. Disponível em: <<http://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-yingli-yl250p-29b-250wp.html>>. Acesso em: 03 Agosto 2015.

OLIVEIRA, H. E. **Tecnologia Fotovoltaica em filmes finos (películas delgadas)**. Monografia - Universidade Federal de Lavras. Lavras, p. 56. 2008.

OLIVEIRA, R. D. E.; JÚNIOR, J. C. D. M. V. Análise Econômica da Geração Fotovoltaica de Energia Elétrica no Município de São Carlos (SP). **Revista Brasileira de Energia**, São Carlos, v. 17, n. 2^a, p. 157-174, 2^o Semestre 2011.

PAINEISFOTOVOLTAICOS. Funcionamentos de Painéis Fotovoltaicos. **PaineisFotovoltaicos.com**, 2011. Disponível em: <<http://www.paineisfotovoltaicos.com/funcionamento.php>>. Acesso em: 23 Julho 2015.

PEREIRA, E. B. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Centro de Previsão de Tempos e Estudos Climáticos. Ministério da Ciência e Tecnologia. Divisão de Clima e Meio Ambiente. São José dos Campos, p. 64. 2006.

PEREIRA, W. A.; ALMEIDA, L. D. S. **Método Manual para Cálculo da Taxa Interna de Retorno**. Faculdade Objetivo. Goiânia, p. 13. 2006.

PORTALTRIBUTÁRIO. IMPOSTO SOBRE SERVIÇOS DE QUALQUER NATUREZA - ISS. **Portal Tributário**, 2015. Disponível em: <<http://www.portaltributario.com.br/tributos/iss.html>>. Acesso em: 04 Agosto 2015.

PORTALTRIBUTÁRIO. PIS E COFINS – ASPECTOS GERAIS. **Portal Tributário**, 2015. Disponível em: <http://www.portaltributario.com.br/guia/pis_cofins.html>. Acesso em: 04 Agosto 2015.

PVXCHANGE. News - Price Index. **PvXchange Your Pv Marketplace**, 2015. Disponível em: <<http://www.pvxchange.com/priceindex/Default.aspx?langTag=en-GB>>. Acesso em: 28 Agosto 2015.

SABERELETRÔNICA. Estudo dos Semicondutores - Parte 2. **Saber Eletrônica**, 2011. Disponível em: <<http://www.sabereletronica.com.br/artigos/2705-estudo-dos-semicondutores-parte-2>>. Acesso em: 23 Julho 2015.

SCHWAB, T. **Fundamentos das Energias Renováveis**. GIZ - Energias Renováveis e Eficiência Energética. Brasília, p. 57. 2013.

SECRETARIADAFAZENDA. ICMS. **Governo do Estado de São Paulo Secretaria da Fazenda**, 2015. Disponível em: <http://www.fazenda.sp.gov.br/oquee/oq_icms.shtm>. Acesso em: 04 Agosto 2015.

SILVA, R. M. D. **Energia Solar no Brasil: dos incentivos aos desafios**. Textos para discussão 166. Núcleo de Estudos e Pesquisa da Consultoria Legislativa/CONLEG/Senado. Brasília, p. 53. 2015.

SOLAR. Energia Solar no Brasil. **Portal Solar**, 2015. Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br/energia-solar-no-brasil.html>>. Acesso em: 13 Agosto 2015.

SOLAR. O Inversor Solar. **Solar**, 2015. Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br/o-inversor-solar.html>>. Acesso em: 03 Agosto 2015.

SOLAR. Quanto custa a energia solar fotovoltaica. **Portal Solar**, 2015. Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br/quanto-custa-a-energia-solar-fotovoltaica.html>>. Acesso em: 30 Julho 2015.

SOLAR. Tipos de Sistema Fotovoltaico. **Portal Solar**, 2015. Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br/tipos-de-sistema-fotovoltaico.html>>. Acesso em: 27 Julho 2015.

VIANA, T. **Energia Solar Fotovoltaica Fundamentos e Aplicações**. CEFET/RJ. Rio de Janeiro, p. 36. 2014.

WORDPRESS. Solarimetria e Instrumentos de Medição. **Energia Solar**, 2008. Disponível em: <<https://turma1422.wordpress.com/2008/09/08/solarimetria-e-instrumentos-de-medicao/>>. Acesso em: 20 Julho 2015.