



ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA LOCALIZAÇÃO, ÁREA E FORMA DE SÍTIOS
NO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE PEQUENA
ESCALA NO BRASIL: UM MÉTODO PARA AS FONTES SOLAR E EÓLICA

Alan Emanuel Duailibe Ribeiro

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Planejamento Energético.

Orientador: Maurício Cardoso Arouca

Rio de Janeiro


Julho de 2015

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA LOCALIZAÇÃO, ÁREA E FORMA DE SÍTIOS
NO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE PEQUENA
ESCALA NO BRASIL: UM MÉTODO PARA AS FONTES SOLAR E EÓLICA

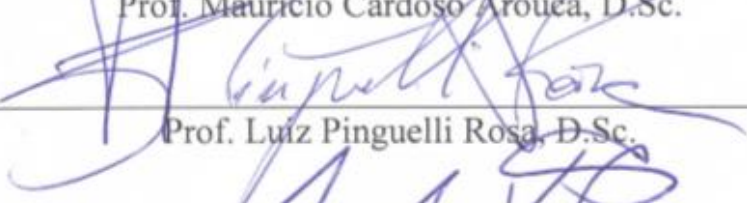
Alan Emanuel Duailibe Ribeiro

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

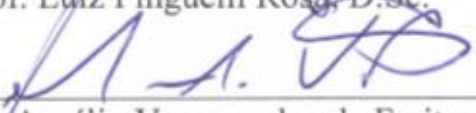
Examinada por:



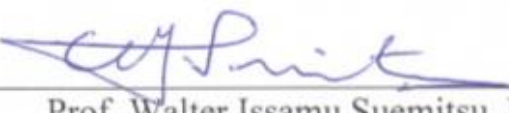
Prof. Mauricio Cardoso Arouca, D.Sc.




Prof. Luiz Pinguelli Rosa, D.Sc.



Prof. Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas, D.Sc.



Prof. Walter Issamu Suemitsu, Dr.-Ing.



Prof. Reinaldo Castro Souza, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JULHO DE 2015

Ribeiro, Alan Emanuel Duailibe

Análise da Influência da Localização, Área e Forma de Sítios no Potencial de Geração de Energia Elétrica de Pequena Escala no Brasil: Um Método para as Fontes Solar e Eólica / Alan Emanuel Duailibe Ribeiro. - Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015.

XIV, 97 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Maurício Cardoso Arouca

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Planejamento Energético, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 77-83

1. Fontes Renováveis. 2. Geração de Pequena Escala. 3. Planejamento Energético. I Arouca, Maurício Cardoso. II Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

“Ao Todo Tudo”

“Ser e Sempre Ser, Eis a Solução”.

“A consciência de uma situação, transforma essa situação”.

(Antônio Grinn)

Aos meus pais, Walter Ribeiro (in memoriam) e Maria Luiza Duailibe Ribeiro (in memoriam) e de meu irmão Walter Duailibe Ribeiro Junior (in memoriam) que estabeleceram as bases de minha formação pessoal e educacional. Aos meus avós (in memoriam) e aos bisavôs de meus filhos (in memoriam) por tanto que me ajudaram.

A meus filhos Alan Emanuel Loyola Ribeiro e Uila Loyola Ribeiro, a Nathashe Loyola Ribeiro; a meu Tio, Tias e Primos, e à extensão de minha família: sogra, cunhado, cunhada e sobrinhos pelo apoio incondicional em todos os momentos.

A todos os irmãos de afinidade de espírito.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento ao professor Maurício Cardoso Arouca, orientador desta tese, pela ideia e incentivo e o apoio além deste trabalho.

Agradeço aos professores Luiz Pinguelli Rosa, Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas, Maurício Cardoso Arouca, Reinaldo Castro Souza e Walter Issamu Suemitsu por aceitarem fazer parte da banca examinadora desta tese e pelas preciosas contribuições.

À AMPLA Energia e Serviços S.A/ANEEL, através do “Projeto Cidade Inteligente Búzios”, a oportunidade da pesquisa, a parceria, importante para a realização deste trabalho.

Aos demais professores do PPE, que me propiciaram a formação complementar que buscava ao ingressar no programa.

A todos funcionários do PPE, representados aqui pela Sandra Bernardo dos Reis e pelo Paulo Feijó pelo carinho e ajuda em muitos momentos.

Ao amigo Júlio César Bispo Neves, pela amizade, apoio, paciência e inestimável contribuição, sem a qual esse trabalho dificilmente seria realizado.

Ao Professor Getúlio Marques Martins, pela inestimável contribuição, revisão textual, amizade, paciência, incentivo e ajuda durante toda essa jornada.

Ao Daniel Moreira Coelho e a Luciana Santos Barbosa, companheiros de sala de trabalho, pela contribuição, carinho, incentivo, apoio e colaboração prestada.

Aos colegas do Programa de Planejamento Energético, por suas inestimáveis colaborações, Bettina Susanne Hoffmann, David Alves Castelo Branco, Johannes Schmidt (João da Bahia), Marcio Giannini Pereira e Victoria Emilia Neves Santos, sei que ao destacar estes, esqueço de nomear alguns outros, assim cometo uma injustiça.

Agradeço aos amigos e companheiros de muitas jornadas em diferentes fases de nossas vidas: Eduardo Rodrigues Maia, Fábio Hideki Sakatsume, Francisco Rezende Ragoni Junior, Jeronymo Nery do Amaral, John Charles Woodrow, Júlio César Bispo Neves, Maurício Cardoso Arouca, Rochael Ribeiro Filho (Rochito).

A todos demais amigos.

Resumo da Tese apresentada à COPPE / UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D. Sc.).

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA LOCALIZAÇÃO, ÁREA E FORMA DE SÍTIOS
NO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE PEQUENA
ESCALA NO BRASIL: UM MÉTODO PARA AS FONTES SOLAR E EÓLICA

Alan Emanuel Duailibe Ribeiro

Julho/2015

Orientador: Maurício Cardoso Arouca

Programa: Planejamento Energético

Esta tese visa dar uma contribuição aos estudos de planejamento energético examinando o problema da avaliação do potencial de geração de energia elétrica dos recursos energéticos renováveis de um determinado sítio. A finalidade desse exame é explicitar como e em que medida variações nos atributos *localização geográfica, área e forma geométrica* do sítio alteram esse potencial. Para tanto, além desses atributos, um sítio deve ser caracterizado pela densidade dos recursos energéticos das diferentes *fontes de energia renovável* (FERs) nele ocorrentes e pelas *oportunidades de uso das tecnologias de energia renovável* (TERs) associadas a essas FER. Em essência, o objetivo da tese é desenvolver um método para sistematizar procedimentos analíticos do exame descrito. Para facilidade de cálculo, a variável *quantidade de energia gerada* (QEG) é usada para representar o potencial de geração de energia elétrica dos recursos energéticos renováveis disponíveis do sítio. O método é testado para as fontes solar e eólica, empregando equipamentos de pequeno porte, para duas regiões brasileiras, cinco áreas específicas e duas formas geométricas por área. Os resultados comprovam que alterações de um ou mais desses atributos podem acarretar significativa variação na QEG. Além de possibilitar esse exame sistemático das alterações, o método pode também servir de instrumento para determinação do maior valor da QEG por sítio, o que reforça sua importância analítica como contribuição formal e original aos estudos de planejamento energético.

Abstract of Thesis presented to COPPE / UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

ANALYSIS OF INFLUENCE OF LOCATION, AREA AND SHAPE OF SITES ON
THE POTENTIAL OF SMALL SCALE POWER GENERATION IN BRAZIL: A
METHOD FOR SOLAR AND WIND SOURCES

Alan Emanuel Duailibe Ribeiro

July/2015

Advisor: Mauricio Cardoso Arouca

Department: Energy Planning

This thesis aims to contribute to energy planning studies. The problem of assessing the potential for electricity generation from renewable energy resources for a particular site is examined. The purpose of this exam is to explicit how and to what extent variations in the attributes of *geographical location*, *area* and *geometric shape* of the site alter this potential. To this end, in addition to those attributes, the site should be characterized by the density of energy resources of different renewable energy sources (RES) of identified occurrence, and by the opportunities of use for renewable energy technologies (RET) associated with these RES. In essence, the aim of the thesis is to develop a method to systematize analytical procedures of the described examination. For ease of calculation, the variable *amount of energy generated* (AEG) is used to represent the potential for electricity generation from renewable energy resources available on the site. The method is tested for solar and wind power, with the deployment of small size equipment, in two Brazilian regions, five specific areas and two geometric shapes per area. The results show that changes in one or more of these attributes can cause significant variation in the AEG. In addition to enabling this systematic examination of the changes, the method can also serve as a tool to determine the greatest value of AEG per site, which reinforces its analytical importance as a formal and original contribution to energy planning studies.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiv
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 APRESENTAÇÃO E RELEVÂNCIA DO TEMA.....	1
1.2 MOTIVAÇÃO, IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA DO ESTUDO.....	3
1.3 HIPÓTESE DE PARTIDA	4
1.4 DECLARAÇÃO DO PROBLEMA.....	5
1.5 “BACKGROUND” DO PROBLEMA	6
1.6 ORGANIZAÇÃO DO CONTEÚDO	9
2 A INFLUÊNCIA DOS ATRIBUTOS LOCALIZAÇÃO, ÁREA E FORMA NA EXPLORAÇÃO DAS FONTES E TECNOLOGIAS DE ENERGIA RENOVÁVEL DE PEQUENA ESCALA.....	10
2.1 CONCEITO DE ENERGIA	10
2.1.1 Energia Renovável.....	16
2.2 ENERGIA SOLAR E TECNOLOGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	18
2.2.1 Energia Solar	18
2.2.2 Tecnologia Solar.....	23
2.2.3 Tecnologia Solar Fotovoltaica.....	24
2.2.4 Determinantes para Instalação de sistemas de Captação da Energia Solar, Tecnologia Fotovoltaica	33
2.3 ENERGIA EÓLICA E TECNOLOGIA EÓLICA	36
2.3.1 Energia Eólica.....	36
2.3.2 Tecnologia Eólica	39
2.3.3 Tecnologia Eólica de Eixo Horizontal	40
2.3.4 Tecnologia Eólica de Eixo Vertical.....	43
2.3.5 Determinantes para Instalação de sistemas de Captação da Energia Eólica, Tecnologia de Eixo Horizontal.....	45
2.4 LOCALIZAÇÃO, ÁREA E FORMA	46
2.4.1 Argumentação Conceitual de Sítio, Área, Forma e Localização.....	46
2.4.2 Argumentação da influência de Localização, Área e Forma no Potencial das FERs.....	48

2.4.3	Argumentação da influência de Localização, Área e Forma no Potencial das TERs.....	49
3	MÉTODO.....	51
3.1	DESCRIÇÃO GERAL	52
3.3	FASE 1 – CARACTERIZAÇÃO DAS FERs NO SÍTIO	53
3.4	FASE 2 – IDENTIFICAÇÃO DE TERs E DETERMINAÇÃO DE ARRANJOS.....	55
3.4.1	Arranjo no Sítio	55
3.4.2	Identificação das Opções Tecnológicas (TERs).....	56
3.5	FASE 3 - CÔMPUTO DE QEG E IDENTIFICAÇÃO DO MELHOR ARRANJO.....	58
3.5.1	Cômputo de QEG	58
3.5.2	Identificação do melhor Arranjo.....	60
3.6	FASE 4 – COMPARAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE GERAÇÃO	60
4	ESTUDO DE CASO	62
4.1	FASE 1 – CARACTERIZAÇÃO DAS FERs NOS SÍTIOS	62
4.1.1	Localização.....	62
4.1.2	Área	63
4.1.3	Forma.....	63
4.1.4	Fontes de Energia	63
4.1.5	Recursos Disponíveis	63
4.2	FASE 2 - IDENTIFICAÇÃO DE TERs E DETERMINAÇÃO DE ARRANJOS.....	64
4.2.1	Identificação de TERs	64
4.2.2	Cômputo do espaçamento entre aerogeradores e arranjos eólicos	65
4.2.3	Cômputo do espaçamento entre painéis e arranjos fotovoltaicos.....	67
4.3	FASE 3 - CÔMPUTO DE QEG E IDENTIFICAÇÃO DO MELHOR ARRANJO.....	67
4.4	FASE 4 – COMPARAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE GERAÇÃO	70
5	CONCLUSÃO.....	73
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
	ANEXO A	84
	APÊNDICE A	90
	APÊNDICE B.....	92
	APÊNDICE C.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Classificações das Fontes de Energia	15
Figura 2: Fluxo de Energia	16
Figura 3 - Radiação solar incidente na superfície terrestre.	19
Figura 4 - Trajetórias radiação solar: a. Direta, b Difusa, c. Refletida.....	20
Figura 5 - Efeito do eixo da Terra sobre a radiação incidente por área.....	21
Figura 6 - Relações geométricas entre a Terra e o Sol, para o hemisfério sul (hemisfério norte).....	21
Figura 7 - Trajetória aparente do Sol no céu, durante o dia (nascente e poente)	22
Figura 8 - Influência da variação da irradiância solar na curva característica tensão versus corrente de um painel de 36 células silício cristalino na temperatura de 25 °C..	30
Figura 9 - Influência da temperatura das células sobre a curva corrente versus tensão de um painel fotovoltaico de 36 células de silício cristalino sob irradiância de 1.000 W/m2.	31
Figura 10 – Ângulo de inclinação do painel e ângulo de incidência da radiação solar..	34
Figura 11 - Espaçamento entre fileiras de painéis fotovoltaicos	35
Figura 12 - Aerogerador de Eixo Horizontal.....	41
Figura 13 - Curva do coeficiente de potência em função da velocidade do vento	43
Figura 14 - Aerogeradores de eixo vertical	44
Figura 15- Aerogerador de Eixo Vertical	44
Figura 16 - Comportamento do vento ao passar pelo plano das pás e espaçamento entre aerogeradores.....	46
Figura 17 - Ilustração do Método	52
Figura 18 - Aerogerador não exceda os limites do sítio	57
Figura 19 -Destaque da localização das cidades de Fortaleza-CE e Rio de Janeiro-RJ .	62
Figura 20 - summarizes the results achieved in the case study:	72
Figura 21 - Fluxo de corrente elétrica convertido de luz solar por uma lâmpada ligada entre os contatos da célula.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ângulo de Inclinação de Pannel Fotovoltaico.....	35
Tabela 2: Áreas e Formas dos sítios (m ²).....	63
Tabela 3: Características geográficas, radiação solar e intensidade do vento das cidades do Rio de Janeiro e de Fortaleza.....	63
Tabela 4: Relação das Tecnologias utilizadas	64
Tabela 5: Espaçamento entre Aerogeradores	65
<i>Tabela 6: Arranjos Tecnologia Eólica por Sítio por Localização, Área e Forma.....</i>	<i>66</i>
Tabela 7: Potência Eólica Instalada por Arranjo por Sítio por Localização, Área e Forma (kW).....	66
<i>Tabela 8: Arranjos Tecnologia Fotovoltaica por Sítio por Localização, Área e Forma</i>	<i>67</i>
Tabela 9: Potência Fotovoltaica Instalada por Arranjo por Sítio por Localização, Área e Forma (kW).	67
Tabela 10: Quantidade de Energia Eólica produzida anual por arranjo por Localização, Área e Forma	68
Tabela 11: Quantidade de Energia Fotovoltaica produzida anual em cada sítio por Localização, Área e Forma.....	69
Tabela 12: Melhores Arranjos Tecnologias Eólica e Fotovoltaica produzida anual em MWh em cada sítio por Localização, Área e Forma	69
Tabela 13: Análise Comparativa Variando a Localização e Fixada a Área e Forma para as Tecnologias Eólica e Fotovoltaica, em MWh/ano	70
Tabela 14: Análise Comparativa Variando a Área e Fixada a Localização e Forma para as Tecnologia Eólica e Fotovoltaica, em MWh/ano.....	71
Tabela 15: Análise Comparativa Variando a Forma e Fixada a Localização e a Área para as Tecnologia Eólica e Fotovoltaica, em MWh/ano	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	<i>Analytical Hierarchy Process</i>
A _M	Área do módulo
AM	Massa de ar
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BIPV	Sistema de energia fotovoltaico integrado a construção
BCOR	Benefícios, oportunidades, custos e riscos
CdTe	Telureto de Cádmio
CIGS	Cobre-índio-gálio-selênio
CNT	<i>Carbon nanotubes cell</i>
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
C _p	Coefficiente de potência do aerogerador
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DSSC	<i>Dye sensitized solar cell</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPIA	<i>European Photovoltaic Industry Association</i>
EUA	Estados Unidos da América
FC	Fator de Capacidade
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
FER	Fonte de energia renovável
G	Irradiância
GaAs	Arseneto de gálio
GaInP	Fosfeto de gálio índio
G _{sc}	Constante solar
HAWT	<i>Horizontal axis wind turbine</i>
Homer	<i>Hybrid Optimization Model for Electric Renewables</i>
IAC	<i>InterAcademy Council</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change

LABSOLAR	Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina
LCD	<i>Liquid crystal display</i>
NOCT	<i>Nominal operating cell temperature</i>
OECD	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
Pa	Potência máxima absorvida pelo aerogerador
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro
P _{MP}	Potência elétrica máxima gerada
PPE	Programa de Planejamento Energético
QEG	Quantidade de energia gerada
QDs	<i>Quantum dots</i>
RETScreen®	Software de suporte à tomada de decisão no setor de energia limpa.
SIN	Sistema Interligado Nacional
STC	<i>Standard test conditions</i>
SWERA	<i>Solar and Wind Energy Resources Assessment</i>
TER	Tecnologia de energia renovável
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
VAWT	<i>Vertical axis wind turbine</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampère
°C	Grau Celsius
CO ₂	Anidrido carbônico, gás carbônico ou dióxido de carbono
°F	Grau Fahrenheit
g/cm ³	Grama por centímetro cúbico
Ge	Germânio
H	Hidrogênio
h	Hora
J	Joule
MJ/kg	Megajoule por quilo
GJ/m ²	Gigajoule por metro quadrado
J/s	Joules por segundo
kg	Quilograma
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
m	Metro
km	Quilômetro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
m/s	Metro por segundo
m ³ /s	Metro cúbico por segundo
TiO ₂	Dióxido de titânio
V	Volt
W	Watt
Wp	Watt pico
GW	Gigawatt
MW	Megawatt
kW	Quilowatt ou quilowatt
kWh	Quilowatt-hora ou quilowatt-hora
TW	Terawatt
TWh	Terawatt-hora
W/m ²	Watt por metro quadrado

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO E RELEVÂNCIA DO TEMA

O Brasil é o maior país da América do Sul e o quinto do mundo em extensão territorial. Possui área de 8,5 milhões de km² e uma população de aproximadamente 191 milhões de pessoas (IBGE, 2010). Segundo Achão e Schaeffer (2009), o consumo de energia elétrica no país está crescendo e a previsão de consumo no SIN¹, ao final do ano de 2014 é de 475,1 TWh com um aumento médio de consumo no quadriênio 2014-2018 de 3,9% ao ano (EPE, 2014).

Historicamente, o Brasil dispõe de uma matriz elétrica com grande participação de renováveis, sendo 64,9% de geração hidráulica e a participação total das renováveis de 79,3% da oferta de energia interna de eletricidade em 2013 (EPE 2014; JUÁREZ et al. 2014). Com crescentes restrições ambientais à construção de novas usinas hidroelétricas, segundo Pereira et al. (2012) e Soito e Freitas (2011), em particular na Amazônia, a participação das fontes não renováveis tem crescido em anos recentes. Um indicativo disso é o aumento das emissões de gases do efeito estufa nessa matriz, representado pelo dióxido de carbono (CO₂) equivalente². As emissões no ano de 2005 foram de 26.076.000 toneladas de CO₂eq e de 31.240.000 toneladas de CO₂eq no ano de 2010. As emissões cresceram 20 % nesse período (MCTI, 2013). A explicação e justificativa para isto recaem em algumas características naturais do nosso território. Entre tais características, destacam-se uma hidrografia favorável, constituída por vários rios de planalto, fundamental para a produção de hidroeletricidade, e uma extensa área tropical, possivelmente a maior entre os países tropicais do mundo, que confere ao Brasil um diferencial positivo para a produção de energia de biomassa.

Uma estratégia para consolidar a participação de outras fontes renováveis de energia na matriz elétrica brasileira e também contribuir para a redução das emissões de gases do efeito estufa é incentivar o uso destas fontes renováveis, em particular as fontes solar e eólica, em projetos de geração de energia elétrica de grande, média e

¹ O Sistema Interligado Nacional (SIN) é o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil, é um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. Apenas 1,7% da energia requerida pelo país encontra-se fora do SIN. http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx, acesso em 10/10/2014.

² Métrica utilizada para inventários nacionais, de cálculo do Potencial de Aquecimento Global (Global Warming Potential – GWP), para se chegar à unidade comum. São os seguintes os gases que participam: Dióxido de carbono, Óxido nítrico e Metano.

pequena escala. Entende-se que esta ação é vista pela sociedade como uma alternativa positiva para sustentar o desenvolvimento econômico e social do país (ESTUDOS, 2012; NAKATA et al., 2011). Ressalta-se ainda que, a geração de energia elétrica de pequena escala ganha cada vez mais importância no Brasil, em especial a partir de 2013, devido à Resolução Normativa de nº 482 da ANEEL³ que estabelece o marco regulatório para o acesso da microgeração⁴ e da minigeração⁵ distribuída aos sistemas brasileiros de distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2012; HOLDERMANN et al., 2014).

As duas características singulares dessas fontes renováveis - a intermitência⁶ e a variabilidade natural dos recursos energéticos primários -, ao lado da complexidade e tempo de maturação das tecnologias que procuram regular sua conversão em formas de energia utilizáveis, são centrais no estudo do aproveitamento das energias renováveis, caracterizando-o como uma atividade relevante no contexto da pesquisa científica e tecnológica em energia. Esse fato é particularmente mais importante para a área de planejamento energético, que se preocupa “em complementar a dimensão tecnológica” dos estudos de engenharia “com uma análise política, econômica, social e ambiental da questão energética”, tudo isso por meio de um “enfoque transdisciplinar”.

Entre alguns motivos que justificam essa importância estão o fato de que a utilização de fontes de energia renovável pode:

- 1) Variar fortemente com a localização geográfica, área e forma geométrica do sítio onde estão disponíveis;
- 2) Valorizar a diversidade nos mercados de fornecimento de energia;
- 3) Contribuir para assegurar o suprimento de energia sustentável no longo prazo;
- 4) Ajudar a reduzir as emissões atmosféricas locais e globais, e;

³ ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, regula e fiscaliza todo serviço prestado pelas empresas de energia elétrica do Brasil.

⁴ Microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

⁵ Minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW para fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

⁶ Intermitência - grau de interrupções do fluxo de energia por intervalos de tempo de uma determinada fonte.

- 5) Proporcionar opções comercialmente atraentes para atender necessidades específicas dos serviços de energia, em particular nos países em desenvolvimento e nas áreas rurais, criando novas oportunidades de emprego.

Essas possibilidades são um estímulo ao desenvolvimento de métodos que possibilitem determinar, entre as fontes potencialmente exploráveis em determinadas áreas ou regiões, aquelas renováveis que apresentam as melhores condições de aproveitamento para fins de geração de energia elétrica.

1.2 MOTIVAÇÃO, IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA DO ESTUDO

A motivação por estes estudos e, em especial, a motivação pelo estudo da influência dos atributos físicos de um sítio, particularmente, a localização geográfica, área e forma geométrica, como representativos de todos os demais atributos desse sítio, em suas interações com os requisitos de implantação, segurança e operação das *oportunidades de uso das tecnologias de energia renovável* (TERs), surgiu quando da revisão bibliográfica dos processos de escolha de TERs para sítios específicos, bem como também das discussões do grupo de pesquisa de Energias Renováveis e Alternativas do Programa de Planejamento Energético (PPE), da COPPE.

Nessa revisão e nessas discussões, ficou evidente que havia necessidade de estudar a questão da explicitação dessa influência no planejamento de projetos de geração de energia elétrica a partir dos recursos renováveis, particularmente nos projetos de pequena e média escala. Os parágrafos a seguir procuram esclarecer essa questão. Adianta-se, entretanto, que essa influência pode ser explicitada, i.e., descrita no que concerne às relações causais dos fatores relevantes envolvidos, e, eventualmente, determinada, através de uma análise comparativa dos parâmetros e requisitos técnicos de cada TER frente às características físico-espaciais do sítio, i.e., a localização, a área e a forma do sítio, e a densidade dos recursos energéticos primários associados às *fontes de energia renovável* (FERs) correspondentes identificadas no sítio.

Assim, quando se dispõe de um determinado sítio, no qual há ocorrência de recursos energéticos naturais primários de diferentes FERs, e se está analisando oportunidades de uso de TERs associadas a essas FERs, o que se torna necessário para

auxiliar a decisão é uma análise formal dessa influência dos atributos do sítio no cômputo da energia elétrica gerada, conforme descrito no parágrafo anterior.

Nessa análise formal, o valor da variável considerada no estudo, o valor da *quantidade de energia gerada* (QEG), depende das relações entre os parâmetros e requisitos técnicos das diferentes TERs com os atributos relevantes do sítio. Entre os parâmetros e requisitos técnicos, são considerados relevantes: a área mínima de implantação, o custo médio de implantação, a eficiência energética, a produtividade média das tecnologias de conversão entre outros, enquanto, entre os atributos ou fatores relevantes do sítio disponível, destacam-se a intensidade (densidade) dos recursos renováveis existentes, o relevo, as condições climáticas, a resiliência ambiental, e a localização geográfica, a área e a forma geométrica do sítio.

Enquanto este nível de detalhamento já seja considerado nos projetos de grande escala, embora não explicitando claramente a correlação com esses atributos, nos projetos de pequena escala deixam de ser analisados. A razão disto parece residir numa ausência de cultura ou desconhecimento dessa influência por parte dos empreendedores, resultando, dessa forma, em análises parciais, que deixam de capturar, de uma forma integrada, os efeitos relativos desses três atributos no cômputo da QEG de sítios alternativos.

Nesta tese, procura-se investigar e internalizar, de maneira explícita, os efeitos da localização geográfica, da área e da forma geométrica do sítio no valor da variável QEG. Argumentos factuais e técnico-causais para justificar tal investigação são imediatos. Tome-se para análise o caso da localização geográfica como fator determinante da ocorrência e intensidade das FERs e, por consequência, do potencial de energia gerada disponível. Ao se considerar, por exemplo, a energia eólica, será preciso analisar o sítio quanto a sua capacidade de acomodar uma ou mais turbinas de conversão, o que implica o estudo de arranjos geométricos alternativos, capazes de implantação no sítio, ou, em outras palavras, a consideração explícita da área e da forma geométrica do sítio no potencial das TERs.

1.3 HIPÓTESE DE PARTIDA

A hipótese deste estudo é que é possível capturar esses efeitos relativos e quantificá-los através do cômputo da QEG, mediante a aplicação de um método que

sistematize procedimentos para esse fim. Esse método seria composto por uma sequência de fases, envolvendo heurísticas analíticas de arranjos das TERs no sítio (respeitando critérios de segurança, de circulação interna, restrições ambientais, entre outros), rotinas computacionais das QEGs e análise comparativa dessas QEGs.

Com o objetivo de testar esta hipótese, foi desenvolvido um estudo a partir do uso de energia solar e eólica de pequena escala, que verificasse a influência de cada um desses atributos no processo, desde a incidência da energia primária no sítio, fonte de energia, até sua transformação em energia elétrica por fonte renovável, por opção tecnológica. Além disso, foi desenvolvido um método de cômputo de energia, que identificasse e trabalhasse explicitamente com esses atributos. Por fim, foi realizado um estudo de caso, no qual foi quantificado o impacto desses atributos no cômputo da energia gerada. Assim, compondo o principal objetivo desta tese, procura-se apresentar, definir, explicar, identificar e mostrar a importância destes atributos no cômputo da energia gerada.

1.4 DECLARAÇÃO DO PROBLEMA

Com essas características, o estudo do problema proposto nesta tese pode ser declarado da seguinte maneira:

“Dados (a) um sítio específico, caracterizado por sua localização geográfica (latitude, longitude e altitude), que definem um determinado conjunto de parâmetros como condições climáticas, temperatura, pressão, relevo, densidades energéticas dos recursos renováveis naturais primários, proximidade à rede elétrica (“grid”) regional e, particularmente, sua área e forma geométrica; e (b) diferentes opções tecnológicas por fonte renovável (TER1, TER2,..., TERn), identificadas como potencialmente capazes de explorar os recursos energéticos disponíveis no sítio e caracterizadas por parâmetros tecnológicos e requisitos técnicos de implantação, operação e segurança, representativos da dimensão técnica:

- 1) Estime a quantidade de energia renovável capaz de ser explorada por TER por sítio; e*
- 2) Faça uma análise quantitativa para explicitar a influência dos atributos localização, área e forma no cômputo da energia gerada.”*

Identifica-se como elemento de contribuição do trabalho a capacidade de o método quantificar os efeitos causados por variações dos atributos localização, área e forma no cômputo da energia elétrica, principalmente para sistemas de aproveitamento de energia renovável de pequena e média escala.

Na literatura internacional os efeitos dos atributos, localização, área e forma, são geralmente estudados de forma isolada. O presente estudo explicita os mesmos efeitos de forma simultânea, integrando-os no método, identificando as influências que cada um desses parâmetros acarreta no cômputo do potencial de energia de um sítio.

O conhecimento da influência desses parâmetros no cômputo do potencial de geração de energia pode ser de importância em um processo de otimização de implantação de um empreendimento de fonte de energia renovável de pequena escala.

1.5 “BACKGROUND” DO PROBLEMA

Estudos para determinar a localização, formas de instalação e estimação de energia de plantas de geração de energia renovável encontram-se disponíveis na literatura. Alguns estudos de caso como descritos a seguir apresentam diferentes metodologias para estes fins. Uma metodologia baseada em sistema de informação geográfica para instalação de sistemas fotovoltaicos em telhados de edificações em um campus universitário no Arizona (EUA) foi apresentada por (KUCUKSARI et al., 2014). Já em Ghadimi et al. (2011), foi realizado um estudo através de metodologia de consulta a mapas topográficos e visitas aos locais, que busca encontrar a melhor localização de plantas de usinas micro hidrelétricas, em áreas remotas na província de Lorestan no Irã. Em seu artigo, San Cristóbal (2012), desenvolve uma metodologia de programação de metas com base em redes *multi-sink*, para implantar cinco plantas de energias renováveis (eólica, solar, hidroelétrica e biomassa) em Cantábria (Espanha). Para estimar a eletricidade produzida por sistemas de energia fotovoltaicos integrados a construção, Massa-Bote e Caamaño-Martín (2014), apresentam uma metodologia baseada na combinação da irradiação incidente sobre a superfície do sistema fotovoltaico e a estimativa de energia elétrica gerada pelo sistema, considera um fator de perda devido ao sombreamento. Enquanto Adelaja et al. (2010), estima a energia gerada em sistemas com tecnologias de aerogeradores de eixo horizontal e painéis fotovoltaicos em zonas industriais abandonadas de Michigan (EUA), a metodologia

considera o espaçamento entre aerogeradores e ângulo de inclinação de painéis fotovoltaicos. Yunna e Geng (2014) desenvolvem uma metodologia para seleção de sítios, com base no modelo de tomada de decisão multicritério *AHP* enfatizando não somente os rankings de alternativas no âmbito do objetivo, mas também os rankings de alternativas no âmbito dos subobjetivos e os atributos de avaliação. Essa estrutura visa ajudar os gerentes de projeto a analisar as vantagens e desvantagens de locais alternativos, de modo que a probabilidade de erro de tomada de decisão possa diminuir.

Artigos do tipo estado da arte são mostrados na sequência. No estudo apresentado por Serrano González et al. (2014), é realizada uma revisão de soluções de projetos sobre parques eólicos, onde se encontra destacado que o primeiro passo é a escolha do local. O artigo informa que se tratando da localização ótima de turbinas eólicas foram identificadas duas tendências metodológicas: a primeira, de uso de algoritmos de otimização de modelo econômico de produção de energia; a segunda, o desenvolvimento de modelos realísticos do comportamento econômico do parque eólico. No artigo apresentado por Mecibah et al. (2014), é realizada uma revisão de cerca de 100 trabalhos de otimização de sistemas fotovoltaicos autônomos, híbridos e ligados à rede de distribuição. As metodologias utilizadas baseiam-se em dados de séries temporais da energia solar, na temperatura ambiente e nas condições do vento disponível nos locais. Essas metodologias calculam também o ângulo de inclinação dos painéis e demais componentes do sistema. Uma revisão de diversos artigos apresentada por Grassi et al. (2012), visa conhecer o desempenho do conjunto sistema fotovoltaico e sistema de iluminação diurna, em edifícios sustentáveis. A metodologia de avaliar a eficiência de cada um dos sistemas considera fatores como a seleção do tipo de placa empregada, a orientação do edifício, o local de instalação, a área de instalação, o ângulo de inclinação. Já Fadaee e Radzi (2012) apresentam uma visão geral de métodos multiobjetivos aplicados por meio de algoritmos evolutivos para resolver problema de otimização de posicionamento, dimensionamento, projeto, planejamento e controle, visando o aumento de confiabilidade de sistemas de energia renovável híbridos de áreas remotas. Enquanto Herbert et al. (2014) revisam alguns fatores (ambientais e de integração na rede) e técnicas (avaliação de recursos e de melhoria de desempenho de aerogeradores) a serem consideradas na instalação de turbinas eólicas. O estudo apresentado por Mcwilliam et al. (2012) tem como objetivo apresentar uma ferramenta simples para atividades preliminares de implantação de um projeto de parques eólicos

de grande escala. Utiliza diversos modelos matemáticos e a província de Alberta (Canadá) como estudo de caso. O algoritmo é voltado para encontrar a configuração que produza eletricidade a um custo mínimo. Vários cenários econômicos e regulatórios são usados.

Entre alguns artigos do tipo genérico, estão o da utilização do algoritmo genético, que busca o posicionamento de aerogeradores em parques eólicos, apresentados por Grady et al. (2005), que considera três condições de vento e que a área do parque é cultivada, aplica a metodologia em sítios com forma quadrada. Enquanto Kusiak e Song (2010), semelhante ao indicado por Grady et al. (2005), utiliza um algoritmo genético na determinação do layout do parque eólico, destacando a influência da rugosidade⁷ do terreno e a utilização de turbinas de mesmo porte, e propondo que todas as turbinas estejam colocadas dentro de um espaço na forma circular. O modelo ainda considera perdas de energia devido ao efeito esteira criado pelos aerogeradores. Em seu artigo Grossmann et al. (2013), apresentam um método de otimização de geração e armazenamento de energia solar, que objetiva reduzir o fenômeno da intermitência na geração. Para isso, eles propõem a construção de uma rede de plantas solares distribuídas por todas as regiões do mundo. A abordagem otimiza dois aspectos, primeiro, a seleção de sítios na rede, segundo, o tamanho, a geração e a capacidade de armazenamento de cada local. Lee et al. (2009) em seu artigo propõem uma metodologia para selecionar adequadamente fazendas eólicas, baseada no modelo de tomada de decisão multicritério AHP com BCOR, caracterizado por fazer comparações paritárias entre os critérios utilizados, considerando benefícios (B), oportunidades (O), custos (C) e riscos (R) de cada alternativa. Chen et al. (2010), acrescenta o ferramental da lógica *Fuzzy*, a abordagem anterior a fim de levar em consideração a subjetividade e vagueza inerente a opinião dos experts, a metodologia proposta por Lee et al. (2009), para sistemas de geração de energia híbridos, solar e eólica.

Os artigos citados nos parágrafos anteriores de uma maneira geral utilizam mesmo que de forma implícita os três atributos estudados, porém não identificam ou quantificam os efeitos que esses atributos têm no cálculo do potencial de energia renovável de um sítio.

⁷ Rugosidade é uma medida das variações do relevo (irregularidades) de uma superfície.

Neste trabalho, o impacto desses atributos é explicitado por meio de método que compara a energia gerada em sítios com localidades, áreas e formas diferentes, utilizando-se para isso de tecnologias específicas de placa fotovoltaica de silício policristalino e aerogerador de eixo horizontal, por serem essas tecnologias as mais utilizadas no Brasil.

1.6 ORGANIZAÇÃO DO CONTEÚDO

O restante desta tese está organizado da seguinte forma. No capítulo 2, são apresentadas:

- Uma classificação concisa das características das fontes de energia, com a finalidade de explicitar as diferenças conceituais existentes entre fontes renováveis, fontes alternativas e fontes convencionais;
- As propriedades da energia e da tecnologia solar fotovoltaica e eólica de eixo horizontal e vertical, bem como os determinantes para instalação dos sistemas de captação dessas tecnologias;
- Uma argumentação sobre a influência dos atributos localização, área e forma no potencial das FERs e das TERs.

No Capítulo 3, é feita uma apresentação e descrição do Método proposto. O objetivo do capítulo é apresentar a estrutura e a sistemática metodológica tomando por base os conceitos estudados (capítulo2).

O Capítulo 4 apresenta um estudo de caso de aplicação do método para cada uma das duas fontes renováveis: a solar e a eólica, em duas localidades, com cinco diferentes dimensões de áreas e duas formas geométricas, com o objetivo de melhor explicitar as etapas, passos e procedimentos do método.

No capítulo 5, faz-se uma síntese da tese, reforçando os principais argumentos apresentados, descobertas e as principais conclusões sobre os resultados obtidos com a aplicação do método. Algumas sugestões para pesquisa futura são incluídas ao final.

2 A INFLUÊNCIA DOS ATRIBUTOS LOCALIZAÇÃO, ÁREA E FORMA NA EXPLORAÇÃO DAS FONTES E TECNOLOGIAS DE ENERGIA RENOVÁVEL DE PEQUENA ESCALA

Neste capítulo são apresentados os conceitos de energia renovável, de tecnologia de energia renovável solar e eólica, restritos aos interesses desta pesquisa. Procura-se, neste capítulo, fornecer ao leitor o entendimento de algumas questões técnicas que influenciam o cômputo da energia em um sítio, permitindo a avaliação da importância de atributos como localização, área e forma. Em seguida, os esforços de análise são direcionados para a apresentação do significado de sítio e para o esclarecimento de como os atributos de localização, área e forma do sítio influenciam os potenciais das FERs e das TERs nesses.

2.1 CONCEITO DE ENERGIA

Uma característica presente de nossa sociedade ao longo do tempo é a demanda crescente por energia. Parece ser a condição para a existência de nossa sociedade como a conhecemos.

A energia está presente das mais diversas maneiras em nossas vidas, como também expressa aspectos da realidade cotidiana das pessoas. É reconhecida nos dispositivos tecnológicos (automóveis), movimentos de nosso corpo (músculos) entre outros (SANTOS, 2006). Uma definição comum de energia, no campo da física, “*é a medida da capacidade de realizar trabalho*”. Outra, mais exata, proposta por Maxwell em 1872, é que “*energia é aquilo que permite uma mudança na configuração de um sistema, em oposição a uma força que resiste à esta mudança*”. Nesta definição, a energia é a causa de mudança na configuração do sistema.

Segundo Goldemberg (2003), uma propriedade essencial da energia é a sua capacidade de conversão. Todos os processos de conversão energética são regidos por duas leis fundamentais: a Lei da Conservação da Energia e a Segunda Lei da Termodinâmica.

No livro “Pensando a Energia”, Machado (1998) apresenta e argumenta que a energia está presente em vários campos do conhecimento. Os cientistas verificaram que a energia podia se transformar de uma forma para outra e que era a mesma para todas

elas. A energia foi definida ao longo da história da humanidade, nos mais diversos campos da ciência, primeiro, na mecânica, a seguir, na termodinâmica, no eletromagnetismo, na relatividade e na mecânica quântica. Mesmo que o conceito físico de energia permita definições precisas, ele não é inteiramente claro, no sentido de uma única definição, compreensão, de certa forma a palavra energia orbita em torno de um núcleo comum de entendimento e está mais precisamente definido na termodinâmica. Fica a mensagem de que é mais fácil perceber e sentir a energia, sua existência, como a causa e origem primeira de todas as mudanças do que a definir.

Classificam-se como recursos energéticos, os fluxos ou as reservas de energia disponíveis na Natureza que podem ser utilizados para atender a sociedade. Esses são comumente chamados de fontes de energia. Como exemplos, tem-se o solar, petróleo, gás natural, carvão, biomassa e outros. De uma forma geral, sem esgotar, as fontes de energia caracterizam-se pelo (a):

- Concentração geográfica que determina o volume da reserva;
- Densidade energética;
- Natureza da reserva ser renovável ou não;
- Disponibilidade técnica ou econômica de acesso;
- Tamanho das cadeias de transformação até o uso final;
- Condição, nível de utilização de tecnologias (consolidadas ou não);
- Nível de intermitência;
- Participação numa determinada matriz energética; e
- Finalidade do uso da energia a que se destina, se para o Sistema Interligado Nacional (SIN) ou para um sistema isolado (EPE, 2014b).

As várias fontes nem sempre se encontram na forma que se deseja utilizar, principalmente quanto a sua disponibilidade em relação a necessidade do homem. Elas necessitam ser transformadas, processadas ou convertidas, para poderem ser utilizadas, armazenadas ou distribuídas. Em razão disso, existem diferentes terminologias para denominar as fontes em relação a essas transformações, resultando numa classificação que se baseia no número de transformações, na inserção na matriz energética local, no restabelecimento do fluxo de energia e na localização na cadeia de transformação. São apresentadas abaixo algumas delas:

1. Quanto ao número de transformações:

- a) Fonte primária – a energia ou a fonte de energia é considerada primária, quando se acha na forma em que é encontrada na natureza, que não tenha sido submetida a qualquer processo de transformação ou conversão, exemplo petróleo, gás natural, energia hídrica, energia eólica, biomassa, solar;
- b) Fonte secundária – chama-se de fonte de energia secundária, a energia primária transformada por um processo para outra forma conveniente, uso mais adequado para a sociedade. Como exemplo, o caso da energia elétrica que é derivada da energia hidráulica ou da queima dos combustíveis fósseis;
- c) Fonte terciária - quaternária e assim por diante – havendo necessidade de a fonte secundária ser transformada consecutivamente em outras formas será chamada de fonte terciária, quaternária e assim sucessivamente.

2. Quanto à inserção na matriz energética local:

- a) Fontes convencionais - podem ser definidas como fontes utilizadas por uma sociedade dentro de um contexto sócio/político e técnico/econômico e possuem:
 - Uma participação relevante na matriz energética, exemplo no caso Brasil de natureza fóssil - carvão, petróleo e gás natural, natureza não fóssil - nuclear, hidroeletricidade (de grande escala) e etanol;
 - Tecnologias maduras;
 - Maior densidade energética (GJ/m²), ver anexo “A”, no caso do Brasil;
 - Uma lógica de distribuição adequada à geração elétrica para o SIN, para os derivados de petróleo, setor industrial e de transporte.
- b) Fontes alternativas - podem ser definidas como uma alternativa de produção de energia através de fontes não convencionais. De uma forma geral apresentam as seguintes características:

- Maioria delas são fontes de energias renováveis (ver item 2.2.1);
- Advêm de fonte primaria e abundante, solar, eólica, biomassa e hidroeletricidade (de pequena escalar) no Brasil são as mais importantes;
- Têm baixa densidade energética (GJ/m²), no caso do Brasil;
- São intermitentes, solar fotovoltaica, solar térmica e eólica;
- Possuem baixo fator de capacidade, ver definição no anexo “A”;
- Possuem cadeia de transformação até o uso final, em geral, mais curta que as convencionais;
- Maioria não se encontram concentradas geograficamente;
- São menos competitivas que as convencionais, principalmente sob o aspecto econômico, menor infraestrutura e necessidade de amortização de investimentos, pequenos estímulos governamentais;
- Possuem menor capacidade de geração de impostos, e;
- Possui pequena participação da matriz energética.

As fontes alternativas de energias podem se tornar fontes convencionais em alguns casos, geralmente a partir de políticas de governo, posse e acesso a fonte, amadurecimento de tecnologia, amortização de investimentos ou incorporação de subsídios, criação de mercado interno ou externo, como foi o caso do etanol na matriz energética brasileira.

3. Quanto ao restabelecimento do fluxo de energia:

- a) Fontes renováveis - Segundo IPCC (2012), *energia renovável é qualquer forma de energia advinda de fonte solar, geofísica ou biológica que seja restabelecida através de processos naturais, a uma taxa igual ou maior que a sua taxa de utilização*. Para uma descrição mais detalhada, ver item 2.2.1.
- b) Fontes não renováveis - são aquelas que se encontram na natureza em quantidades limitadas e cujo restabelecimento se dá num período de tempo longo, incapaz de atender a sua taxa de utilização. Quer dizer, uma vez esgotadas, as reservas dessas fontes não podem ser regeneradas (no tempo desejado). Caracterizam-se por possuírem reservas finitas e distribuição geográfica não homogênea. Exemplos de fontes de energia não renováveis são os combustíveis fósseis (carvão, petróleo bruto e gás natural) e o urânio.

4. Quanto à localização na cadeia de transformação:

- a) A fonte de energia que é utilizada pelo consumidor (uso final). Algumas vezes também chamada de energia final, é, por exemplo, aquela energia disponível nas tomadas do sistema elétrico de uma residência;
- b) A fonte de energia que o consumidor dispõe após a última conversão feita nos seus próprios equipamentos é chamada de energia útil. Trata-se da energia final, a energia fornecida aos equipamentos, diminuída das perdas na conversão. É considerada como a energia que é transformada no trabalho desejado pelo consumidor. Exemplos: iluminação, força motriz, refrigeração etc.

A Figura 1, a seguir, faz uma síntese dessa classificação.

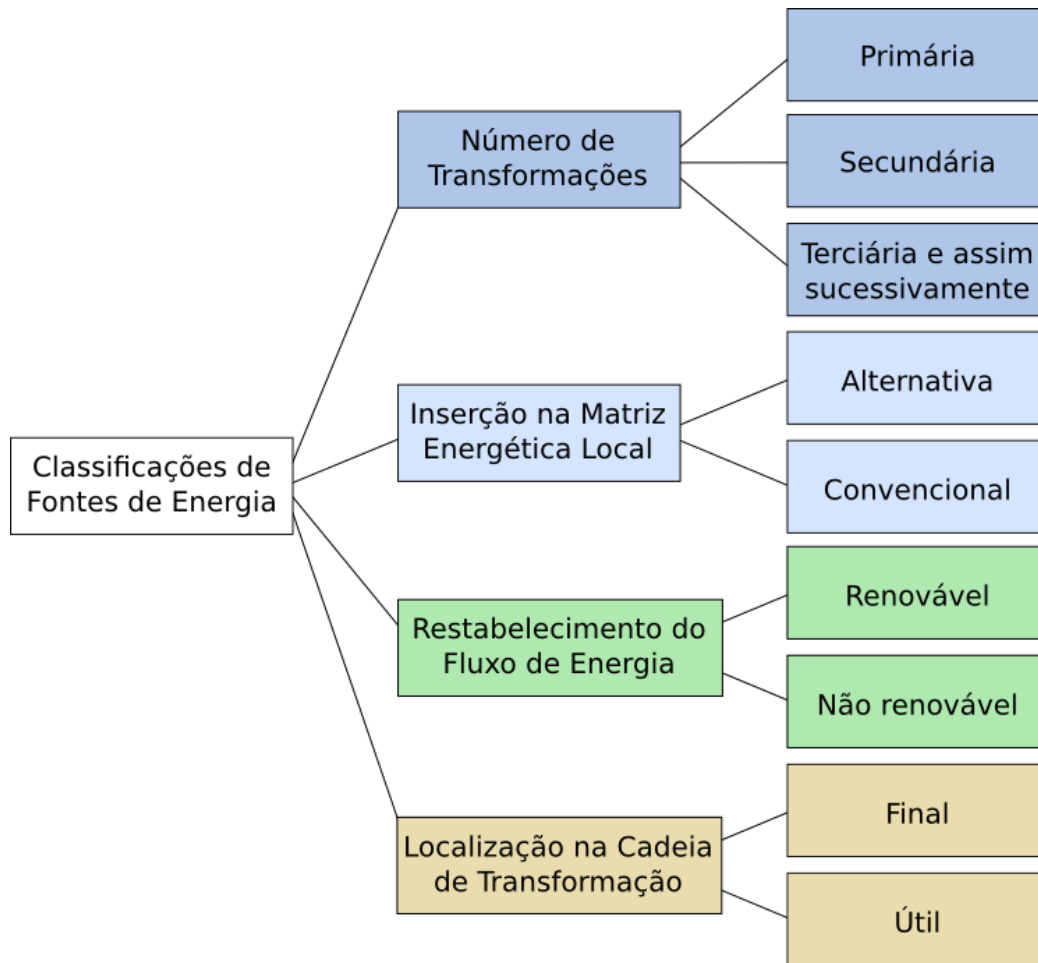


Figura 1- Classificações das Fontes de Energia

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao longo de uma cadeia de conversão de energia, desde a captação ou extração da fonte de energia primária até os usos finais, a energia assume diferentes formas. As formas mais comuns são a radiante, química, nuclear, térmica (calor ou frio), mecânica (força mecânica), elétrica (eletricidade), magnética e elástica (GOLDEMBERG, 2003). A conversão de energia se faz por intermédio de um centro de transformação, um aparato tecnológico de conversão, uma TER.

Como exemplos de centros de captação ou extração, tem-se:

- A lavra de carvão a céu aberto ou subterrâneo, sonda de perfuração de poços de petróleo, sistema de captação e adução de água, painéis fotovoltaicos, colheitadeiras, aerogerador, entre outros.

Como exemplos de Centros de transformação, tem-se:

- A moenda, refinaria, destilaria, usina hidroelétrica, usina térmica, entre outros.

De maneira esquemática, abaixo é apresentado o que é reconhecido, no setor, como fluxo de energia:

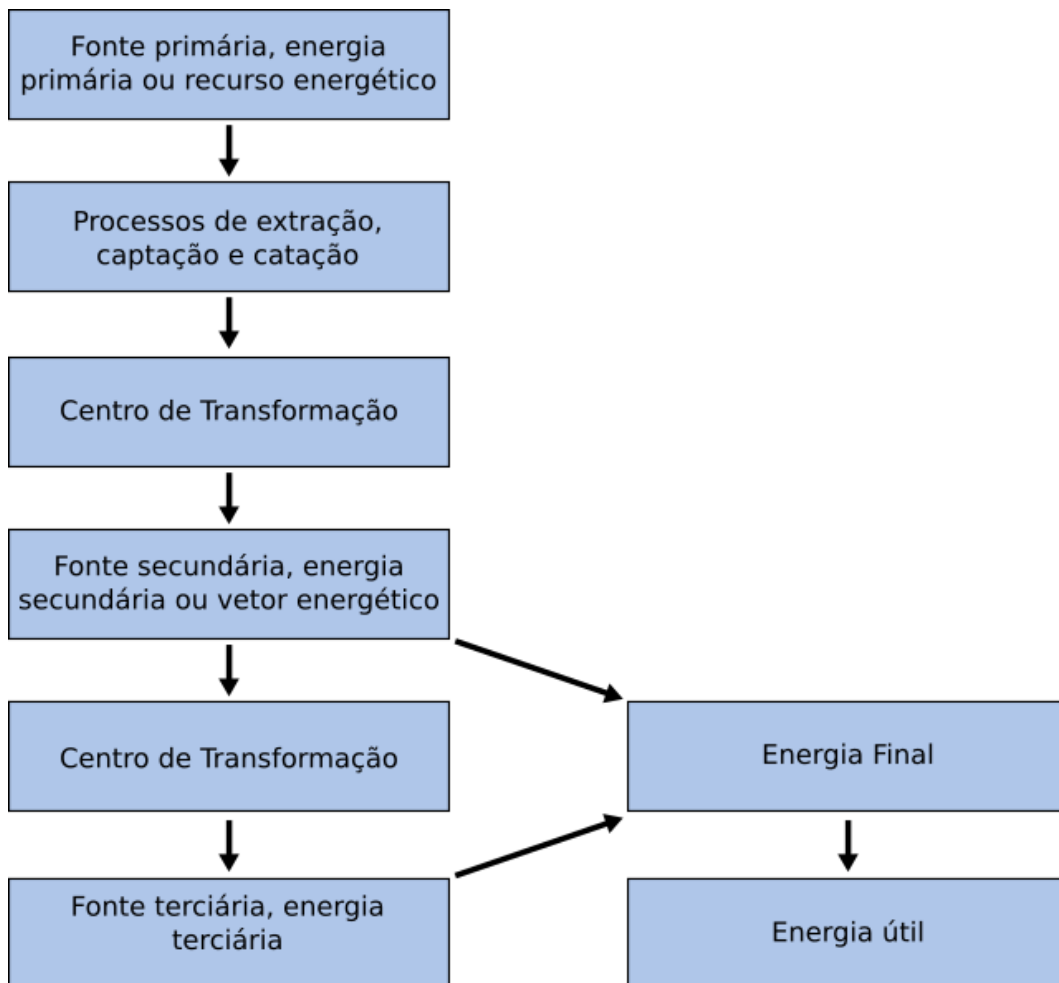


Figura 2: Fluxo de Energia
Fonte: Elaborado pelo autor

2.1.1 Energia Renovável

O Sol é a fonte de energia externa da Terra. A energia que dele incidiu e continua a incidir é convertida em diversas formas, dada à dinâmica e composição da atmosfera do planeta; a presença de hidrocarbonetos no solo, a reação de fotossíntese; os ventos e ondas; e as diferenças térmicas entre regiões do planeta. O fluxo de energia que chega a sua superfície é estimado em cerca de 175.000 TW. As altas temperaturas no interior da

Terra são devidas a atividade original do planeta desde a sua formação (ANGELIS; DIMAKIS et al., 2011).

Num horizonte de alguns milhares de anos, tanto a irradiação solar quanto o calor primordial do interior da crosta do planeta podem ser admitidos infinitos e constantes. Alguns autores consideram estas formas de energia como as únicas FERs para a humanidade. (ANGELIS; DIMAKIS et al., 2011).

Neste trabalho, no entanto, outras formas de energias derivadas da energia solar - o vento, o deslocamento e queda da água, energias das ondas e marés, variação de temperatura na terra e nos oceanos e a biomassa - são também consideradas FERs. Observe que, enquanto a biomassa é incluída aqui como uma fonte de energia renovável, ela pode ser sazonal ou lentamente renovável, em contraste com outras fontes, como energia solar, eólica, geotérmica e oceânica, que estão disponíveis em termos mais ou menos permanentes.

Todas essas FERs, com a exceção da biomassa, caracterizam-se por possuírem um fluxo contínuo e, dependendo da forma de utilização, podem ser consideradas de estoque infinito (JANNUZZI, 1998). Outras características importantes das FERs são ainda sua *distribuição espacial assimétrica* por todo o planeta e sua *intermitência* (i.e., sua irregularidade no provimento da energia, com exceção dos reservatórios de água doce que podem ser controlados).

Corroborado o descrito anteriormente, o InterAcademy Council (IAC)⁸, uma colaboração de academias do mundo da ciência, identificou a energia da biomassa, a energia eólica, a solar, a hidroelétrica, a geotérmica e a energia das ondas e marés como fontes de energia renováveis (INTER ACADEMY COUNCIL, 2007).

⁸ O InterAcademy Council (IAC) é uma organização multinacional, criada em maio de 2000 pelas academias de ciências do mundo para produzir relatórios sobre questões científicas, tecnológicas e de saúde, relacionadas aos grandes desafios globais de nosso tempo, e prestar e assessoria aos governos nacionais e organizações internacionais.

2.2 ENERGIA SOLAR E TECNOLOGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

As TERs tornam-se importantes com o aumento das preocupações ambientais. Os atributos das TERs, que incluem a modularidade, flexibilidade e baixos custos operacionais, são consideravelmente diferentes daquelas para as tecnologias tradicionais, à base de energias fósseis, cujos atributos incluem investimentos de capital, longos prazos de implementação e custos operacionais incertos sobre futuros preços dos combustíveis (DINCER; ROSEN, 2005).

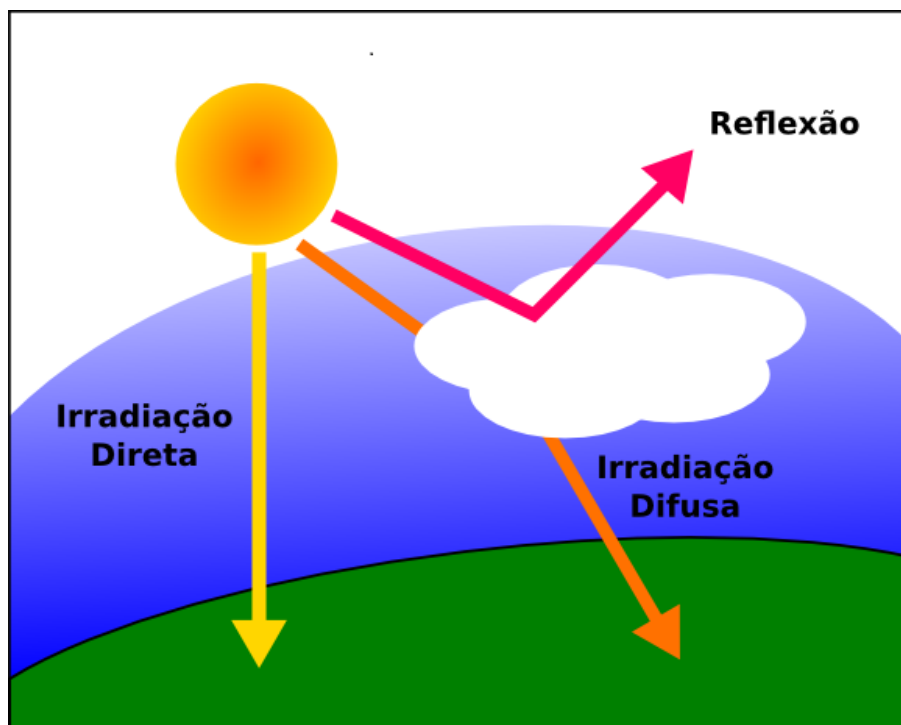
Os benefícios das TERs são avaliados diferentemente, quando comparados com as tecnologias fósseis tradicionais. Uma das dificuldades de avaliação refere-se ao fato de que as tecnologias de energias renováveis são por vezes vistas como substitutas diretas das tecnologias existentes, seus benefícios e custos são avaliados com instrumentos desenvolvidos para a tecnologia existente (DINCER; ROSEN, 2005).

2.2.1 Energia Solar

A energia solar é gerada no núcleo do Sol, através de um processo de fusão nuclear, no qual hidrogênio é transformado em hélio. O Sol tem forma esférica, constituído de matéria gasosa, com diâmetro de $1,39 \times 10^9$ m, a uma distância média de aproximadamente $1,5 \times 10^{11}$ km da Terra. A radiação emitida pelo Sol chega à superfície da Terra em 8 minutos e 20 segundos. Anualmente, a atmosfera terrestre recebe um percentual do total da radiação emitida pelo Sol, em torno de $1,5 \times 10^{18}$ kWh, que corresponde a 10.000 vezes o consumo mundial anual de energia (CRESESB, 2014; KALOGIROU, 2009).

Como a órbita da Terra é uma elipse suave, a excentricidade da Terra é pequena, a distância entre o Sol e a Terra pouco varia, as características do Sol e suas relações espaciais com a Terra resultam em uma incidência de radiação solar extraterrestre praticamente constante (PETTI, 2004). A constante solar (G_{sc}) é definida, como sendo a energia por unidade de tempo emitida pelo Sol e recebida por uma unidade de área de uma superfície perpendicular à direção de propagação da radiação situada fora da atmosfera terrestre e possui um valor de 1367 W/m^2 (DUFFIE; BECKMAN, 2013; SEN, 2008). Este é o valor da constante solar atualmente empregado em cálculos estimativos de radiação solar (PETTI, 2004).

A radiação emitida pelo Sol ao chegar a Terra é alterada ao atravessar a atmosfera. Parte dessa radiação sofre espalhamento pelas moléculas do ar e parte é absorvida pelas moléculas de ozônio, vapor d'água e gás carbônico contidas na atmosfera, além de poluentes de atividades humana e material particulado (poeira) que se interagem a radiação. Essas interações reduzem a radiação solar incidente na superfície terrestre e introduz a componente difusa da radiação solar (PETTI, 2004). Parte da radiação difusa retorna para o espaço e outra porção alcança a superfície da Terra (SEN, 2008). A radiação direta é a porção da radiação solar que vem diretamente do Sol, não sofre mudança de direção, nem espalhamento. A componente difusa é a porção restante da radiação global, que sofreu alteração de direção e espalhamento na atmosfera.



*Figura 3 - Radiação solar incidente na superfície terrestre.
Fonte: Elaborado pelo autor*

Além da radiação difusa, existe a radiação refletida, que é a produzida pela reflexão da radiação direta ou da radiação difusa na superfície da Terra. Logo os três diferentes tipos de radiação solar que chegam à superfície terrestre são: direta, difusa (ou espalhada) e refletida. Ver Figura 3 e Figura 4 (SEN, 2008). A intensidade dessas radiações que chegam ao solo dependem da espessura e da composição da camada de ar da atmosfera (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

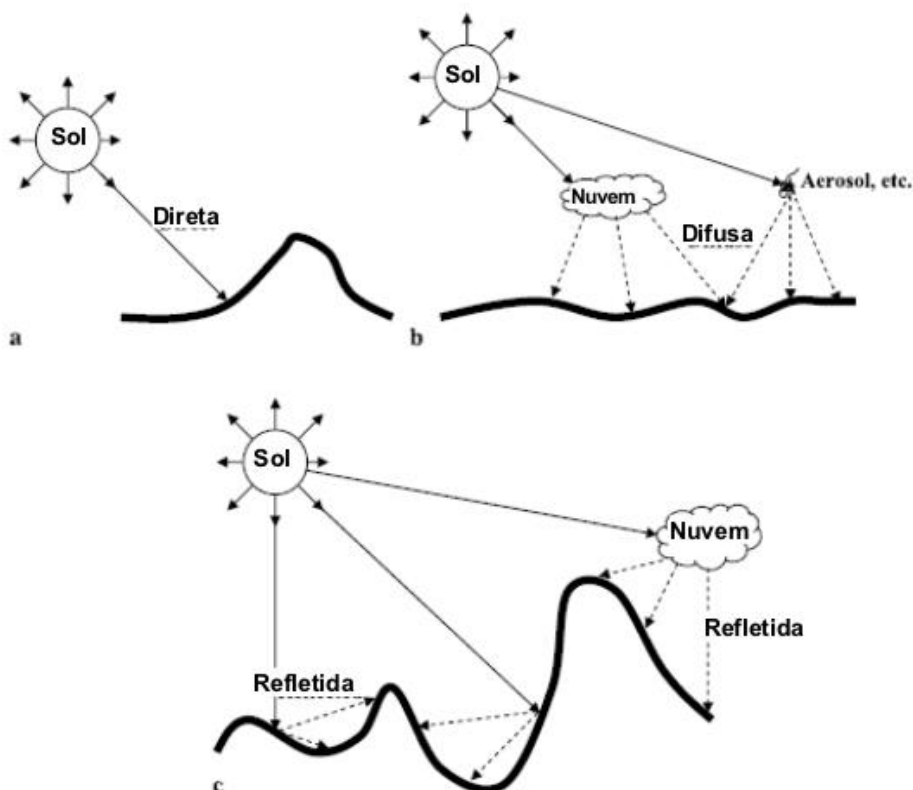


Figura 4 - Trajetórias radiação solar: a. Direta, b Difusa, c. Refletida
 Fonte: (SEM, 2008), adaptado pelo autor

A radiação solar, que chega ao solo terrestre denomina-se de radiação global, é a soma da radiação direta e da difusa. A radiação direta normal representa 90% da radiação global, em dias claros, sem a presença de nuvens e a radiação difusa pode representar um porcentual maior da radiação global quando em áreas com nebulosidade e/ou que apresentam poluição atmosférica. A radiação refletida é considerada no cômputo da radiação direta ou difusa.

A fim de conhecer a radiação solar incidente em uma área na superfície da atmosfera da Terra, é útil representar a Terra como uma esfera, como mostrado na Figura 5. Isto implica que, se a área se localizar na linha do Equador, iria receber 1.367 W/m^2 (SEN, 2008). Se deslocada ao longo da mesma longitude, receberá menos

radiação solar à medida que se afasta do Equador em direção as regiões polares (SEN, 2008). O eixo no qual a Terra gira em torno de si mesma está inclinado em relação ao plano Terra-Sol, de $23,45^\circ$, e é responsável pelas estações do ano, conforme apresentado na Figura 6. Por conseguinte, a área recebe diferentes quantidades de radiação solar em diferentes dias e horas em um dia ao longo do ano. De outra forma, as estações do ano influenciam o valor da radiação solar incidente (SEN, 2008).

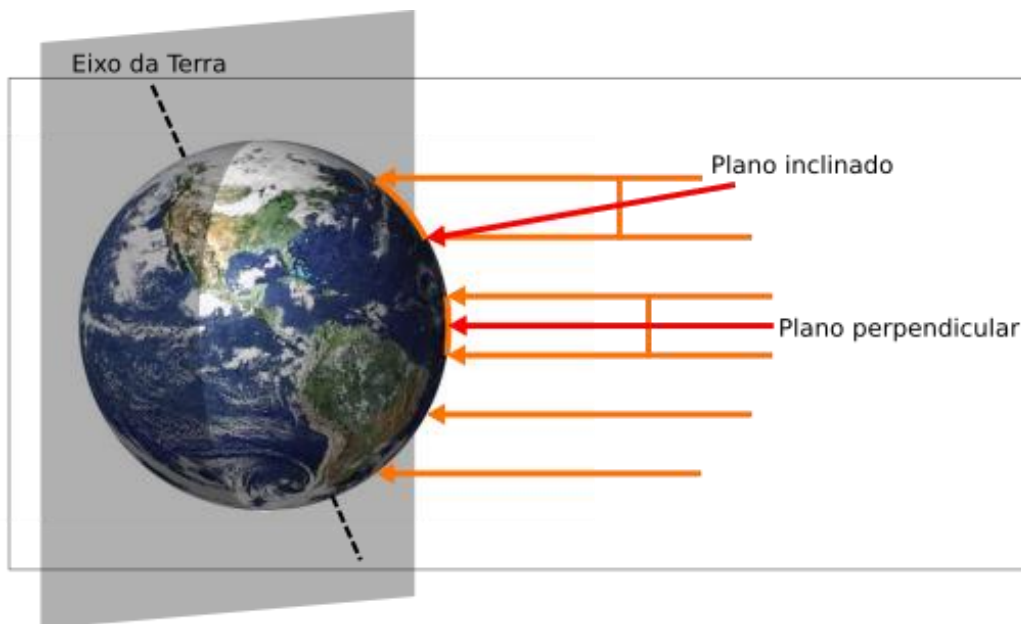


Figura 5 - Efeito do eixo da Terra sobre a radiação incidente por área
 Fonte: (SEM, 2008), adaptado pelo autor

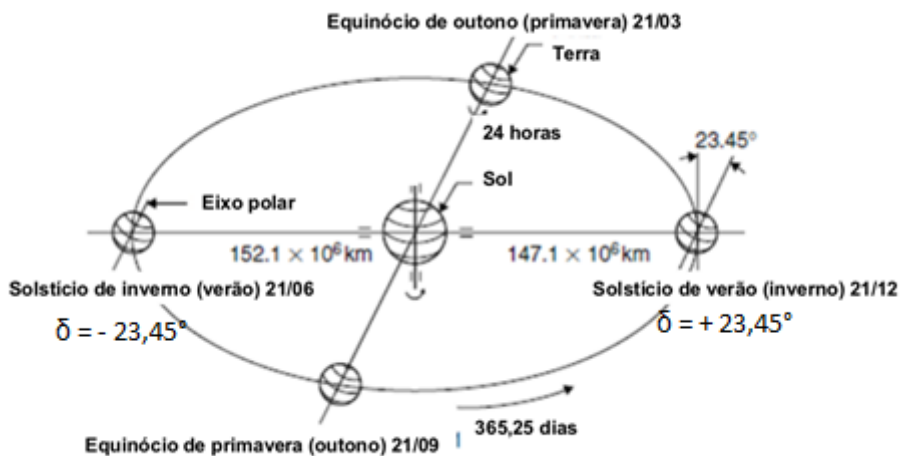


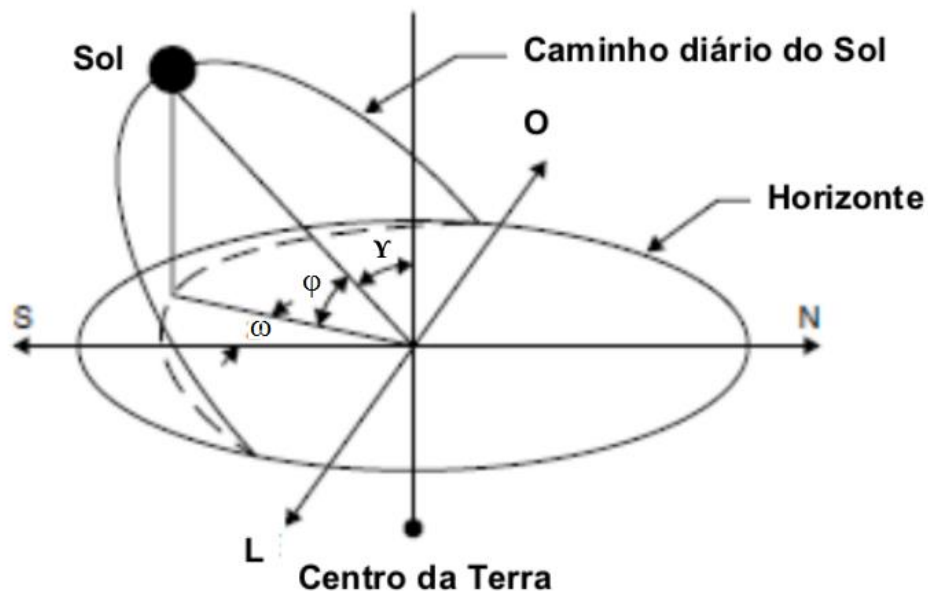
Figura 6 - Relações geométricas entre a Terra e o Sol, para o hemisfério sul
 (hemisfério norte)

Fonte: (KALOGIROU, 2009), adaptado pelo autor

Ainda, para estimar a radiação solar incidente em um sítio na superfície da Terra, é necessário conhecer a trajetória do Sol no céu (LODI, 2011). Uma vez que todo

o movimento é relativo, é conveniente considerar a terra fixa e descrever o movimento virtual do Sol em um sistema de coordenadas fixas na Terra com a sua origem no local de interesse. Para a maioria das aplicações de energia solar, é preciso conhecer onde o Sol vai estar no céu em um determinado momento do dia e do ano (KALOGIROU, 2009). Dois ângulos especificam a localização do Sol no espaço: o azimute solar (ω) e a altura solar (ϕ). O azimute solar é o ângulo formado entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e o eixo norte-sul, a partir do sul. Este ângulo pode variar entre $+180^\circ$ e -180° , sendo positivo a leste do sul. A altura solar é o ângulo entre o raio solar e a projeção do mesmo sobre o plano horizontal. Além dos ângulos azimutal e altura solar, há, também o ângulo zenital solar (γ), que é aquele formado entre os raios do Sol e a vertical (KALOGIROU, 2009), conforme apresentado na Figura 7 (KALOGIROU, 2009; VILLALVA; GAZOLI, 2012).

A radiação solar incidente é influenciada pela espessura da camada atmosférica que deve ser atravessada até o solo e depende do comprimento do trajeto. Este trajeto depende do ângulo de inclinação do Sol com relação à linha do zênite, ou ângulo zenital solar (γ), conforme apresentado na Figura 7 que mostra a trajetória aparente do Sol no céu no hemisfério norte (VILLALVA; GAZOLI, 2012).



*Figura 7 - Trajetória aparente do Sol no céu, durante o dia (nascente e poente)
Fonte: (KALOGIROU, 2009), adaptado pelo autor*

A Terra tem um movimento ao redor do Sol (translação), em uma trajetória elíptica, ao longo de um ano, 365,25 dias, e outro em torno de seu eixo geométrico (rotação), a cada 24 horas (KALOGIROU, 2009). Chama-se de declinação solar (δ) o

ângulo formado pela linha do Equador e a reta que une os centros do Sol e da Terra, como pode ser observada, a declinação varia entre 0° nos equinócios e entre $-23,45^\circ$ a $+23,45^\circ$ nos solstícios, ver Figura 6 que apresenta a declinação durante os equinócios e os solstícios (DUFFIE; BECKMAN, 2013; KALOGIROU, 2009). De acordo com a posição aparente do Sol, ao longo do ano, varia em 47° ($-23,45^\circ$ a $+23,45^\circ$) sentido Norte / Sul. A declinação, por convenção, ao sul da linha do Equador é negativa, e positiva quando é ao norte.

A espessura da camada atmosférica é identificada por um coeficiente denominado Massa de Ar (do inglês *Air Mass*, AM). Esta massa de ar pode ser interpretada também como o comprimento relativo que a radiação solar direta percorre até atingir a superfície terrestre. Denomina-se de AM 1 quando a massa de ar é igual a 1, ou seja, o Sol encontra-se no zênite (ângulo zenital igual a 0°). Outras denominações são dadas, por exemplo, AM 2, quando o ângulo zenital é igual a 60° e AM 0 (sem massa atmosférica para a radiação solar atravessar), definida como a massa de ar no topo da atmosfera (radiação extraterrestre) (CEPEL, 2014; KALOGIROU, 2009). A distribuição AM 1,5 (ângulo zenital igual a $48,5^\circ$) corresponde ao comportamento médio da radiação solar ao longo de um ano nos países temperados do hemisfério norte. A massa de ar AM 1,5 e sua respectiva distribuição espectral de energia tornaram-se padrões para o estudo e a análise de sistemas fotovoltaicos, pois a tecnologia fotovoltaica surgiu e desenvolveu-se em países do hemisfério norte. Esse valor de massa de ar é usado mundialmente como referência e citada em praticamente todos os catálogos de fabricante de painéis fotovoltaicos (KALOGIROU, 2009; VILLALVA; GAZOLI, 2012).

2.2.2 Tecnologia Solar

As diversas tecnologias de aproveitamento da FER solar convertem a energia solar para a forma de: eletricidade, calor ou força motriz e as três principais tecnologias são a fotovoltaica, a termossolar e a solar termoelétrica (ESTUDOS, 2012). Em outras palavras, elas têm por função, respectivamente, a(o):

- Geração de eletricidade, pela conversão direta da luz solar em eletricidade;
- Aquecimento de processo;
- Geração de eletricidade, por meios óticos de concentração de energia solar para elevar fluidos ou materiais a alta temperatura.

2.2.3 Tecnologia Solar Fotovoltaica

O mercado fotovoltaico cresceu a um ritmo notável ao longo da última década. Em 2011 teve um crescimento recorde. Em 2012 ficou estabilizado e voltou a crescer significativamente em 2013. A capacidade acumulada instalada fotovoltaica no mundo ao final de 2013 era de 138,9 GW capaz de produzir pelo menos 160 TWh de energia elétrica por ano (EPIA, 2012).

A tecnologia solar fotovoltaica foi originalmente desenvolvida para fornecer energia elétrica para o programa espacial em meados do século 20 (JACKSON; OLIVER, 2000). Tendo evoluído de células de silício cristalino até os atuais filmes finos de silício amorfo, a tecnologia fotovoltaica vem progredindo para novos conceitos, tais como as nano-células solares e as células solares orgânicas (LUND, 2007).

Estudos sobre a viabilidade da tecnologia fotovoltaica têm previsto a sua integração na própria concepção construtiva de estruturas e edifícios. Na prática, tanto a energia solar fotovoltaica quanto a solar térmica são principalmente sistemas de telhado integrados usando uma armação e estrutura de apoio. Um desenvolvimento tecnológico relativamente recente envolve a concentração de luz solar antes de sua conversão em eletricidade. Enquanto seu uso tenha sido mais voltado para estações geradoras de energia de escala industrial em áreas abertas, esforços recentes têm-se concentrado no desenvolvimento de microssistemas para uso doméstico (KRISBUS et al., 2006). Estes sistemas forneceriam tanto eletricidade para alimentar os aparelhos quanto calor para aquecimento de água.

A célula fotovoltaica é o componente básico de um sistema fotovoltaico. As células fotovoltaicas são interconectadas para formar um módulo, ou painel fotovoltaico, cuja capacidade típica situa-se entre 50 e 250 W (ESTUDOS, 2012).

2.2.3.1 Células

A célula é o elemento básico do sistema fotovoltaico, tipicamente possui potência elétrica da ordem de 1,5 W. A energia solar, a luz do Sol é convertida diretamente em eletricidade pelo efeito fotovoltaico, para definição ver anexo “A”, que é o método mais simples de produzir eletricidade sem partes móveis, emissões ou ruído (GREEN, 2000; HOFFMANN, 2006; JACKSON; OLIVER, 2000). O efeito fotovoltaico, ocorre quando a luz do Sol incide sobre um material semicondutor de duas camadas produzindo uma

diferença de potencial, ou tensão, entre as duas camadas. A tensão produzida na célula, inserida em um circuito é capaz de conduzir uma corrente elétrica.

Nos dias de hoje, as células fotovoltaicas possuem mais de duas camadas de silício dopado, porém o princípio de funcionamento permanece o mesmo do das células de duas camadas. As células fotovoltaicas disponíveis no mercado são de silício ou de filme fino.

Em desenvolvimento se destacam as células orgânicas/polímeros, híbrida e *dye-sensitized* (célula solar sensibilizada por corante) (TYAGI et al., 2013). Existe ainda, novas tecnologias de células, baseadas no conceito de nanotecnologia. Onde materiais em escala manométrica são utilizados na busca de maior eficiência de conversão da energia solar. As principais tecnologias são células de nanotubos de carbono (*CNT - carbon nanotubes cell*), *quantum dots (QDs)* e *hot carrier solar cells* (El CHAAR et al., 2011).

A. Célula de silício monocristalino

As células fotovoltaicas de silício cristalino são as mais comercializadas no mercado. A célula de silício monocristalino é obtida por um procedimento de banho, usinagem, corte de lâminas, lapidação, ataque químico, polimento e dopagem de um monocristal com silício fundido de alta pureza (ESTUDOS, 2012). Este processo de obtenção de lingotes de silício monocristalino conhecido como método de Czochralski (ARNBERG et al., 2012).

A eficiência dessa célula encontra-se em experiências de laboratório, por volta de 27% e em produtos comerciais entre 13,3 a 16,2%. Apresenta custo elevado em função da quantidade de material e energia utilizada no processo de fabricação (TYAGI et al., 2013).

B. Célula de silício policristalino

A célula de silício policristalino é constituída de um aglomerado de pequenos cristais de tamanhos e orientações diferentes, possui um arranjo cristalino variado, possui eficiência na ordem de 12,7 a 15,7% inferior que a célula de silício monocristalino (ESTUDOS, 2012; TYAGI et al., 2013). Por outro lado, necessita de menor quantidade de energia e tem um processo de produção mais simples que a célula monocristalina.

C. Célula de arseneto de Gálio (GaAs)

A célula de Gálio (GaAs) foi originalmente desenvolvida para o uso no espaço (IPCC, 2012). Possui estrutura similar à as células de silício e foi desenvolvida por tecnologia de multi-junção, isto é, utiliza elementos semicondutores das colunas da tabela periódica III e V, por exemplo, o arseneto de gálio (GaAs) e fosfeto de gálio índio (GaInP), que tem a finalidade de capturar uma fração maior do espectro solar (RAZYKOV et al, 2011). Estas células solares são de alta eficiência (IPCC, 2012). A célula mais comumente utilizada é um dispositivo de tripla junção baseada em GaInP / GaAs / germânio (Ge), tem eficiência registrada de 41,6% (IPCC, 2012).

D. Célula de silício amorfo

A célula de silício amorfo foi a primeira a ser desenvolvida entre as tecnologias de filmes finos (ESTUDOS, 2012). Estas células são menos eficientes que as células de silício policristalino. O processo de produção do silício amorfo ocorre a temperatura inferior a 300°C, o que possibilita que o filme fino seja depositado sobre substratos de baixo custo, como vidro, aço inox e alguns plásticos.

Pode ser fabricada em diversas dimensões e possui alta absorvidade a radiação solar em torno de 40 vezes maior que as células de silício monocristalino. Possui menor sensibilidade à variação da temperatura, quando comparada com as tecnologias cristalinas, menor variação na produção de energia com mudança na temperatura. Se degradam mais facilmente que as células cristalinas e são mais sensíveis ao efeito de sombreamento.

Devido a sua característica construtiva e aparência estética, a célula de silício amorfo tem sido utilizada em diversas aplicações arquitetônicas, como em substituição de materiais de cobertura de telhados e fachadas na construção civil. Possui eficiência na ordem de 5 a 7%, podendo atingir a 8 e 10% quando de dupla e tripla junção (PARIDA et al., 2011).

E. Célula de telureto de cádmio (CdTe)

A célula de telureto de Cádmio (CdTe) é de tecnologia de filmes finos. O processo de fabricação da célula CdTe é feita sobre um substrato de vidro com uma camada de condutor transparente, normalmente, óxido de estanho-índio. Em seguida, é revestido por uma camada transparente, do tipo n, de sulfeto de cádmio e, depois, por uma camada absorvente, do tipo p, de telureto de cádmio. Na sequência a célula é exposta a temperatura em torno de 450°C o que provoca cristalização parcial do semiconductor, isso permite a dopagem do sulfeto de cádmio com cobre no mesmo processo (HEGEDUS; MCCANDLESS, 2005).

Apesar de apresentarem a maior eficiência entre as tecnologias de filmes finos ainda não alcançaram a produção em larga escala. Os principais motivos para isso é o fato do cádmio ser um material tóxico e o telúrio um material raro.

F. Célula de cobre-índio-gálio-selênio (CIGS)

As células de cobre-índio-gálio-selênio (CIGS) ainda estão em fase de desenvolvimento. A eficiência dos módulos fotovoltaicos é da ordem de 12% (POWALLA; DIMMLER, 2003). Apresentam a vantagem de não utilizar materiais tóxicos e atualmente sua produção está sendo afetada devido à falta de índio, pois o material é utilizado em telas de LCD.

Nesse tipo de célula, não ocorre um modelo como o da junção pn (silício cristalino), mas sim um modelo de heterojunção mais complexo. A mais alta eficiência, na categoria dos filmes-finos, foi conseguida com as células CIGS.

G. Células Orgânicas

As células orgânicas são células fotovoltaicas que efetuam a absorção da luz solar e o transporte de cargas elétricas a partir de pequenas moléculas orgânicas e polímeros condutores. Assim como as células de cobre-índio-gálio-selênio (CIGS) a célula orgânica também é uma tecnologia que ainda está em desenvolvimento. Apresenta baixa eficiência, da ordem de 4-5%. Uma característica importante da célula orgânica é a sua flexibilidade mecânica e o fato de ser descartável (GOETZBERGER et al., 2002).

As células orgânicas são fabricadas a partir de finas películas de semicondutores orgânicos, como polímeros e outros compostos de pequenas moléculas como o

pentaceno, vinileno polifenileno, ftalocianina de cobre e fulereno carbono. Apresentam alto rendimento de fabricação com baixo custo de matéria prima e menor complexidade quando comparado com a fabricação tradicional de células de silício. Não necessita de altas temperaturas ou condições de vácuo. As células orgânicas apresentam alto coeficiente de absorção óptica, o que permite absorver grande quantidade de luz com pequena área de material.

H. Células Híbridas

As células híbridas são originárias da combinação da célula cristalina com a de filme fino. A Sanyo, fábrica japonesa de células solares, desenvolve célula solar híbrida e já atingiu eficiência de 21% (TYAGI et al., 2013). Esse tipo de célula não apresenta degradação da eficiência como ocorre em célula de filme fino de silício amorfo e consome pouca matéria prima no seu processo de fabricação, importando em custo de material menor.

I. Células sensibilizadas por corante

As células solares sensibilizadas por corante (DSSC - *dye sensitized solar cell*) são formadas por materiais orgânicos e inorgânicos. Foram originalmente desenvolvidas por Grätzel e apresentam as seguintes partes principais: suporte mecânico revestido com óxido condutor transparente, filme semicondutor de dióxido de titânio (TiO_2), sensibilizador adsorvido sobre a superfície do semicondutor, eletrólito com mediador redox e eletrodo capaz de regenerar o mediador redox como a platina. A célula deve ser selada para que não haja vazamentos e o eletrólito não seja drenado (TYAGI et al., 2013).

2.2.3.2 Painel Fotovoltaico

Este subitem aborda os seguintes pontos referentes aos painéis fotovoltaicos: as características elétricas, o desempenho, a associação de painéis e o efeito do sombreamento sobre os painéis.

Um painel fotovoltaico é formado por célula ou células, para obter potências maiores, as células são normalmente conectadas eletricamente em arranjos para produzir tensão e corrente suficientes para a utilização prática da energia, ao mesmo tempo em que promove a proteção das células (CEPEL, 2014). O número de células varia em função da tensão de saída que se deseja fornecer, por exemplo, painéis

fotovoltaicos de silício cristalino disponíveis no mercado possuem potência entre 50 e 250 W, apresentam tensões máximas de até 30 V e capacidade de corrente elétrica em torno de 8 A (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Por outro lado, os painéis fotovoltaicos de tecnologia de filme fino, são formados por uma célula única com as dimensões do próprio painel, estão disponíveis no mercado em potências de 50 a 100 W (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Ainda os painéis fotovoltaicos, apresentam uma característica particular, não se comportam como uma fonte elétrica convencional, sua tensão de saída não é constante. A tensão e a corrente no painel fotovoltaico dependem da carga que for ligada em seus terminais, esta é uma característica única do painel fotovoltaico. Para o painel existe um único ponto, valor de tensão e corrente, no qual o painel fornece a potência máxima. Idealmente o painel deve operar nesse ponto, para fornecer a maior quantidade de energia.

A. Características elétricas do painel fotovoltaico

O painel normalmente é identificado por sua potência elétrica de pico (W_p), que é definida em condições-padrão de ensaio (STC, do inglês *standard test conditions*), considerando irradiância solar de 1.000 W/m^2 sob uma distribuição espectral padrão para AM 1,5 e temperatura de célula de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Além do W_p , os valores de potência, tensão e corrente máximas, tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito são os cinco parâmetros que especificam o painel sob dadas condições de radiação, temperatura de operação de célula e massa de ar (CEPEL, 2014; KALOGIROU, 2009).

A eficiência (η) do painel é obtida através da relação entre a potência elétrica máxima gerada (P_{MP}) e a potência luminosa incidente no módulo. Quando este número é determinado nas condições-padrão de ensaio, a irradiância (G) é igual a 1.000 W/m^2 e a potência luminosa incidente no módulo pode ser calculada multiplicando-se este valor pela área do módulo (A_M).

$$\eta = \frac{P_{MP}}{G \cdot A_M} \times 100 [\%] \quad (1)$$

B. Desempenho do painel

O desempenho do painel fotovoltaico é influenciado pela irradiância incidente e sua distribuição espectral, bem como pela temperatura de operação da célula (CEPEL, 2014). Empiricamente foi comprovado como a irradiância solar incidente afeta a corrente elétrica e a tensão de um painel fotovoltaico de silício cristalino, mantido na temperatura de 25 °C. A corrente gerada no painel aumenta linearmente com o aumento da irradiância solar incidente, enquanto que a tensão de circuito aberto aumenta de forma logarítmica, se mantida a mesma temperatura, ver Figura 8 (CEPEL, 2014).

A corrente elétrica gerada pelo módulo aumenta com o aumento da irradiância solar. A corrente de curto-circuito tem um aumento linear com a irradiância, como mostra a Figura 8.

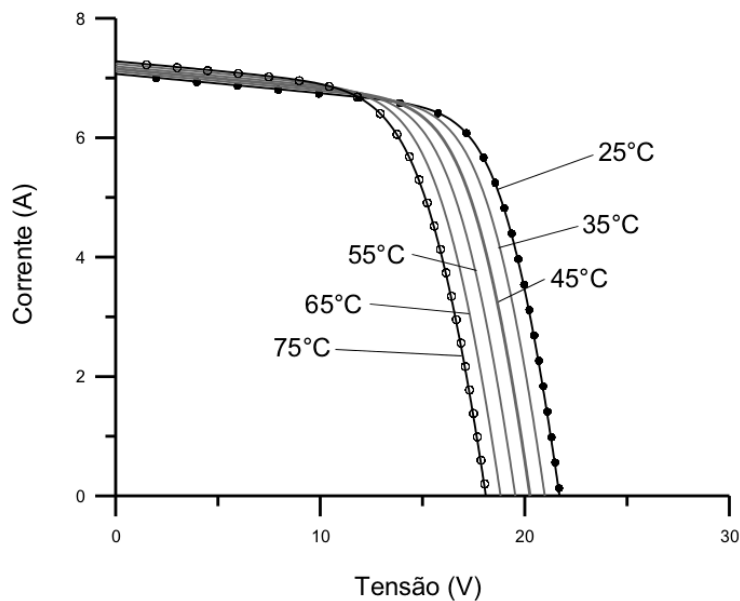
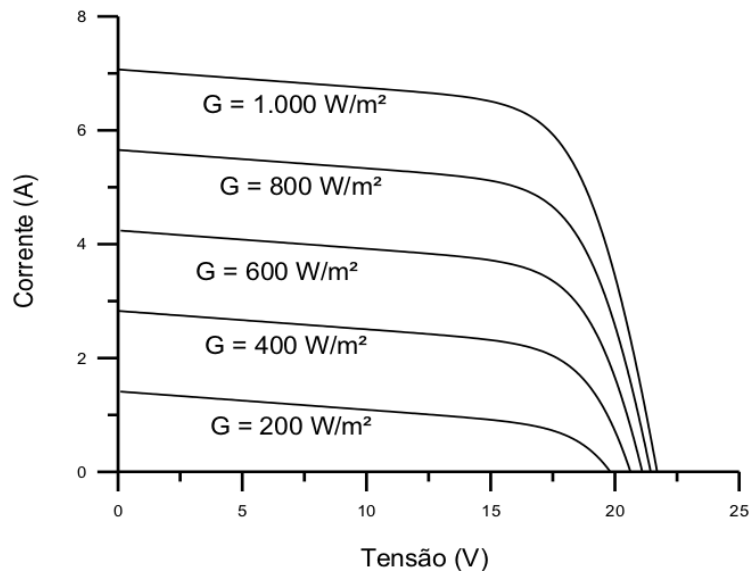


Figura 8 - Influência da variação da irradiância solar na curva característica tensão versus corrente de um painel de 36 células silício cristalino na temperatura de 25 °C.

Fonte: (CEPEL, 2014)

As variações da irradiância solar incidente e da temperatura ambiente influenciam a temperatura de operação do painel fotovoltaico. A Figura 9 apresenta curvas tensão versus corrente para diversas temperaturas de um painel fotovoltaico, com irradiância de 1.000 W/m². O aumento da irradiância incidente e/ou da temperatura ambiente produz um aumento da temperatura do painel e, conseqüentemente, tende a reduzir a sua eficiência. Isto se deve ao fato de que a tensão do painel diminui

significativamente com o aumento da temperatura, enquanto que sua corrente sofre uma elevação muito pequena, quase desprezível (CEPEL, 2014; VILLALVA; GAZOLI, 2012).



*Figura 9 - Influência da temperatura das células sobre a curva corrente versus tensão de um painel fotovoltaico de 36 células de silício cristalino sob irradiância de 1.000 W/m².
Fonte: (CEPEL, 2014)*

O efeito da temperatura nas características dos painéis pode ser determinado pelo cálculo do coeficiente de temperatura de cada uma das variáveis de tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito e de potência máxima. Geralmente os valores desses coeficientes de temperatura são fornecidos pelo fabricante do painel e variam em função da tecnologia da célula. Quanto menores os coeficientes, menor é a perda de potência do painel devido à temperatura (CEPEL, 2014).

(CEPEL, 2014), a título de exemplo, apresenta a influência da temperatura em um painel de silício cristalino, que sob uma temperatura ambiente de 30°C e sob uma irradiância de 1000 W/m², tem temperatura de operação de 60°C. Sendo um painel de silício cristalino de 250Wp e seu coeficiente de temperatura de potência máxima de -0,5%/°C, nessas condições passa a ter uma potência de pico de ~206Wp, o que corresponde a uma perda de cerca de 17,5%. Ainda, tendo uma corrente de curto-circuito, nas condições-padrão de ensaio, de 8,79 A e um coeficiente de corrente de curto-circuito de 0,06%/°C, nessas condições passa a ter uma corrente de curto-circuito de 8,88 A. Considerando também uma tensão de circuito aberto, nas condições-padrão

de ensaio, de 38,4 V (60 células) e um coeficiente de circuito aberto de $-0,33\%/^{\circ}\text{C}$, a tensão de circuito aberto passa a ser de 33,9 V.

Ainda (CEPEL, 2014) apresenta que, se as condições-padrão de ensaio (STC) não refletem a maioria das condições reais operacionais, as normas definem uma temperatura nominal para a operação das células nos painéis, na qual as características elétricas podem se aproximar mais das características efetivas verificadas em campo. Cada fabricante de painel tem uma temperatura nominal para suas células, medida na condição do painel exposto em circuito aberto a uma irradiância de 800 W/m^2 em um ambiente com temperatura do ar a 20°C e sob a ação de vento com velocidade de 1 m/s. Esta temperatura pode ser encontrada nas folhas de dados técnicos dos painéis, identificada pela sigla NOCT (*nominal operating cell temperature*) e ordinariamente está entre 40 e 50°C . Supondo painéis de mesmos coeficientes de temperatura, aquele que tiver a menor NOCT terá menos perdas relacionadas à temperatura.

C. Associação de Painéis Fotovoltaicos

Os painéis podem ser conectados em ligações série e/ou paralelo com objetivo de formar sistemas fotovoltaicos com potência mais elevada, para produzir a quantidade de energia elétrica desejada.

A conexão em série é feita quando da ligação do terminal positivo de um painel ao terminal negativo de outro, e assim por diante. Desse modo o valor das tensões dos painéis é somado e o de corrente em cada painel permanece a mesma, ou seja, as correntes que fluem por cada painel são sempre iguais entre si. Caso haja uma dispersão de características elétricas ou um sombreamento parcial, a corrente do conjunto conectado em série é limitada pelo painel com a menor corrente individual (CEPEL, 2014; KALOGIROU, 2009).

A conexão em paralelo é feita unindo-se os terminais positivos dos painéis entre si, e da mesma forma, ligando os terminais negativos entre si. Esta conexão resulta na soma das correntes sem alteração da tensão (CEPEL, 2014).

D. Efeito de sombreamento

Sombreamento no painel fotovoltaico é a obstrução da radiação solar por árvores, elementos rochosos, construções ou de painel para painel. O efeito de sombreamento ocorre quando uma ou mais das células do painel fotovoltaico recebe menos radiação solar do que as outras da mesma associação, essa corrente afetada vai limitar a corrente de todo o conjunto série. O efeito de redução de corrente no conjunto de células do painel acaba sendo propagado para todos os painéis conectados em série. Os painéis de filmes finos normalmente têm melhor desempenho na presença de sombreamento do que os de silício cristalino, sofrendo menores reduções em seu rendimento (CEPEL, 2014).

2.2.4 Determinantes para Instalação de sistemas de Captação da Energia Solar, Tecnologia Fotovoltaica

A orientação do painel fotovoltaico objetiva a captação da radiação direta, pois a radiação difusa chega à superfície da Terra de maneira irregular e aleatória é importante para determinar a posição do ou dos painéis fotovoltaicos em um sítio. A posição do Sol no céu determina a inclinação dos raios solares incidentes na superfície de um painel fotovoltaico. Um painel fotovoltaico para captar a maior quantidade desses raios deve acompanhar o movimento diário do Sol (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

O Sol em sua trajetória diária, do nascente ao leste ao poente ao oeste, descreve diversos ângulos azimutais. Um observador localizado no hemisfério sul, voltado para a direção do Norte geográfico, verá o Sol descrever diversos ângulos azimutais, no período da manhã a sua direita e a tarde a sua esquerda.

A maneira de direcionar um painel fotovoltaico, sem sistema de rastreamento solar é orienta-lo com sua face voltada para o norte geográfico, no caso de instalações no hemisfério Sul. Caso estivesse orientado para o Leste receberia a radiação solar direta apenas pela manhã e para voltado para o Oeste receberia somente a radiação solar direta à tarde. Voltado para o Norte, o painel receberá luz solar durante todo o dia, aproveitando a maior incidência do dia, ao meio dia solar, com os raios incidindo diretamente na sua face, com ângulo de azimute solar zero.

Outro ângulo importante para a instalação de um painel fotovoltaico é a altura solar que especifica a localização do Sol no espaço. Devido a existência da declinação solar, o Sol nasce e se põe em diferentes localizações no globo terrestre e descreve trajetórias com diferentes inclinações em cada dia do ano. Um observador localizado no hemisfério sul, voltado para o Norte geográfico, verá o Sol descrevendo uma trajetória circular no dia. A altura do Sol no céu é maior nos dias de verão, e no inverno, para aquele observador, o Sol descreve uma trajetória mais baixa. O ângulo da altura solar (φ), da Figura 7, depende da localização geográfica do observador e do ângulo de declinação solar (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Sabe-se que para o melhor aproveitamento da radiação solar ocorre quando os raios solares incidem perpendicularmente ao painel, isto é, idealmente quando a inclinação do painel coincide com o valor da altura solar, ou seja, na Figura 10 o ângulo (β) é igual a zero. A Figura 10 mostra como a radiação solar incide em um painel.

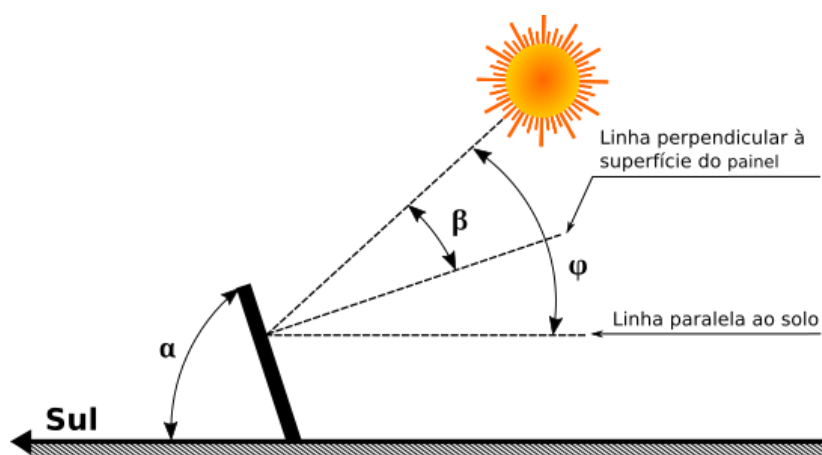


Figura 10 – Ângulo de inclinação do painel e ângulo de incidência da radiação solar
 Fonte: (VILLALVA; GAZOLI, 2012), adaptado pelo autor

Onde: α = ângulo de inclinação dos painéis [°];
 β = ângulo de incidência da radiação solar faz com a linha perpendicular à superfície do painel [°];
 φ = altura solar [°].

Pelo exposto, o painel fotovoltaico deveria acompanhar o movimento do Sol e assim permitir a geração da maior quantidade de energia possível no dia. Sendo fixo o ângulo de inclinação do painel fotovoltaico, deve-se optar por um valor de ângulo que máxime a exposição do painel à radiação solar. Não existe, na literatura, um consenso sobre qual seja o melhor ângulo de inclinação do painel. Alguns fabricantes de painéis fotovoltaicos recomendam, por uma regra simples, um ângulo que possibilite uma boa produção média de energia anual para diversas faixas de latitudes geográficas. A Tabela

1, recomendada por Villava, dá exemplo de alguns ângulos para latitudes específicas. Além disso, não é recomendado a instalação de painéis fotovoltaicos com ângulos de inclinação inferiores a 10° para evitar o acúmulo de poeira no painel.

Tabela 1: Ângulo de Inclinação de Painel Fotovoltaico

Latitude do Local	Ângulo de Inclinação Recomendado
0° A 10°	$\alpha = 10^\circ$
11° a 20°	$\alpha = \text{latitude}$
21° a 30°	$\alpha = \text{latitude} + 5^\circ$
31° a 40°	$\alpha = \text{latitude} + 10^\circ$
41° ou mais	$\alpha = \text{latitude} + 15^\circ$

Fonte: (VILLALVA; GAZOLI, 2012)

Sombreamento de painéis devido à proximidade de outro painel

Foi apresentado, no item 2.2.3.2, que o efeito de sombreamento em uma ou mais células de um painel fotovoltaico acarreta em uma redução de corrente, redução de energia gerada no painel ou no conjunto de painéis se estes estiverem ligados em série. De forma a evitar áreas de sombreamento devido à proximidade de outro painel ou fileira de painéis, faz-se necessário conhecer o espaçamento entre painéis ou fileiras de painéis (y) e a dimensão da projeção destes sobre o plano horizontal (x) que é dado pela equação 2, ver Figura 11 (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

$$D = y + x \quad (2)$$

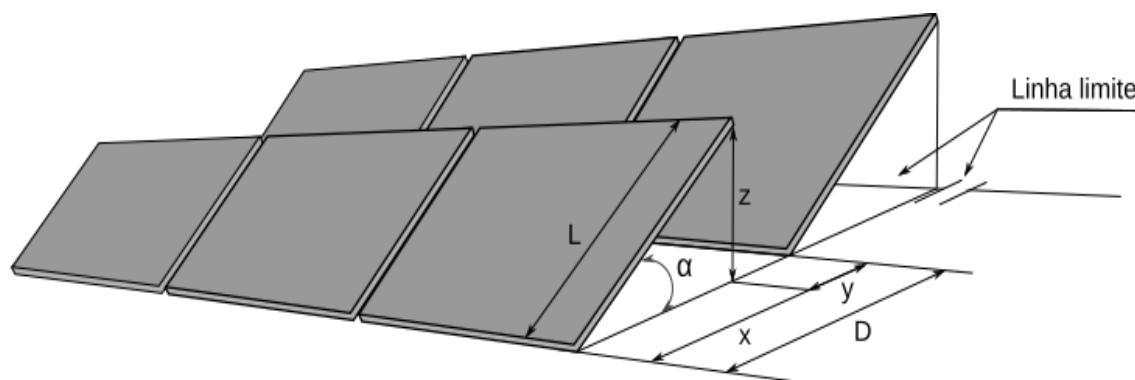


Figura 11 - Espaçamento entre fileiras de painéis fotovoltaicos

Fonte: Elaborado pelo autor

Onde:

D = espaçamento entre bases de painéis de fileiras consecutivas [m];

$y = 3,5 z$ = dimensão livre entre fileiras de painéis [m]⁹;

$z = L \sin \alpha$ = dimensão da projeção do ponto mais elevado do painel ao plano horizontal do ponto mais baixo do módulo [m];

$x = L \cos \alpha$ = dimensão da projeção do painel sobre o plano horizontal [m];

L = altura do painel [m];

α = ângulo de inclinação dos painéis [°].

A orientação, o ângulo de inclinação do painel fotovoltaico e a distância entre painéis ou fileiras de painéis são determinantes na captação da radiação solar, além da observância dos elementos já citados: agentes geológicos, climáticos e atmosféricos no sítio e no entorno; restrições legais e ambientais.

2.3 ENERGIA EÓLICA E TECNOLOGIA EÓLICA

2.3.1 Energia Eólica

A energia eólica é uma combinação do efeito da energia solar (aquecimento) e do movimento de rotação da Terra, cuja fonte é o vento. O aquecimento desigual da superfície terrestre produz correntes de convecção de ar na forma de vento por todo o planeta. As regiões tropicais, próximas à linha do Equador recebem a radiação solar com valor de 1.367 W/m^2 ou próxima a este, assim são mais aquecidas do que as regiões polares. Por conseguinte, a massa de ar tropical a baixa altitude é mais quente e tende a subir, sendo substituído por massa de ar mais frio que se desloca das regiões polares (ACKERMANN, 2009). Agregada a rotação da Terra, características geográficas (altura, obstáculos e relevo) e gradientes de temperatura determinam uma caracterização da localização e a natureza local dos ventos (BURTON et al., 2011).

Uma classificação para ventos perenes, chamados de ventos planetários ou constantes, é:

- Alísios, sopram dos trópicos para o Equador, em baixas altitudes;
- Contra-Alísios, sopram do Equador para os polos, em altas altitudes;
- Ventos do Oeste, sopram dos trópicos para os polos;
- Polares, frios que sopram dos polos para as zonas temperadas.

⁹ Segundo Villalva e Gazoli (2012), a constante 3,5 é um valor determinado empiricamente, que visa definir o espaçamento entre as fileiras de painéis fotovoltaicos e, por conseguinte, maximizar a eficiência do sistema.

A declinação solar, inclinação do eixo da Terra, causa variações sazonais na intensidade e duração dos ventos, na superfície terrestre dando origem aos denominados ventos continentais ou periódicos, que compreendem as monções e as brisas (BURTON, et al. 2011). As brisas são ventos periódicos formados entre superfícies que têm diferente capacidade de absorver e emitir a radiação solar, por exemplo, a terra e o mar, ventos sopram do mar para o continente e do continente para o mar. À noite, a temperatura da terra diminui mais rapidamente do que a temperatura da água do mar, ocorre a brisa terrestre que sopra da terra para o mar. Durante o dia a terra por possuir maior capacidade de refletir a radiação solar, a temperatura do ar na terra aumenta mais rapidamente do que no mar, forma-se uma brisa marinha, que sopra do mar para a terra. As monções também são ventos periódicos em geral associados à alternância entre a estação das chuvas e a estação seca, que ocorrem em grandes áreas das regiões costeiras tropicais e subtropicais.

Burton et al. (2011) e Pinto (2013) citam que a característica mais marcante do recurso eólico é sua variabilidade, natureza estocástica. O vento é variável, tanto geograficamente quanto temporalmente. Além disso, esta variabilidade pode ser persistente ao longo de uma gama vasta de escalas (diurna, mensal e anual), tanto no espaço quanto no tempo que se traduz em variação constante de direção e velocidade. Estas variações de longo prazo não sendo bem compreendidas, pode trazer transtornos na etapa de previsões de viabilidade econômica em projetos de parques eólicos, por exemplo. A variação anual da velocidade do vento, em um determinado local, tendo comportamento sazonal, significa que todo ano o mesmo comportamento se repete, ou seja, o vento tende a repetir um determinado perfil de velocidade.

Localmente, a topografia tem efeito considerável sobre o regime dos ventos, por exemplo, nos vales e montanhas, durante o dia, o ar quente produzido na encosta da montanha se eleva e o ar mais frio desce sobre o vale para substituir o ar que subiu. À noite, a direção dos ventos é invertida e o ar frio das montanhas desce e se acumula nos vales. Ainda, a velocidade do vento é alterada, reduzida, por obstáculos como árvores ou edificações, como também varia com a altura do solo (BURTON et al., 2011). Resumindo os procedimentos para avaliar a velocidade do vento em determinada localização devem levar em consideração os atributos que o influenciam, entre os principais destacam-se:

- A variação da altura;
- A rugosidade do terreno, vegetação, utilização da terra e construções;
- Presença de obstáculos nas redondezas do sítio.

Informações para conhecimento de condições regionais podem ser obtidas de mapas topográficos, para avaliar e modelar a rugosidade e os obstáculos, visita ao local de interesse é recomendado. O uso de imagens aéreas e dados de satélites também contribui para a análise.

A distribuição da direção do vento geralmente é apresentada sob a forma de rosa dos ventos. A rosa dos ventos é uma imagem que representa os quatro pontos cardeais norte, sul, leste e oeste; os colaterais nordeste, sudeste, noroeste e sudoeste e os subcolaterais.

O conhecimento da velocidade do vento é fundamental para se estimar o potencial de energia disponível no local. Chama-se de energia eólica (E) a energia cinética do movimento do vento. Assim, uma massa de ar (m) em movimento a uma velocidade (v) (CUSTÓDIO, 2007; PINTO, 2013):

$$E = \frac{1}{2} (m \cdot v^2) \quad (3)$$

Onde:

E = energia cinética do movimento [J/s];

m = massa do ar [kg];

v = velocidade do vento [m/s]

Pode-se notar da equação 3 que a energia cinética varia com o quadrado da velocidade do vento.

De modo a compreender as características do recurso eólico, fundamental para o aspecto da exploração da energia eólica, pode-se mostrar que a potência disponível do vento que passa por uma seção (A), transversal ao fluxo de ar de um cilindro imaginário de mesma massa de ar (m) a uma velocidade (v), é dada por (CUSTÓDIO, 2007; PINTO, 2013):

$$P = \frac{1}{2} (\rho \cdot A \cdot v^3) \quad (4)$$

Onde:

P = potência do vento [W];

ρ = massa específica do ar [kg/m^3];

A = área da seção transversal [m^2]

A equação 4 também pode ser escrita por unidade de área definindo, desta forma, a densidade de potência (DP), ou fluxo de potência (CUSTÓDIO, 2007; PINTO, 2013):

$$DP = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} (\rho \cdot A \cdot v^3) \quad (5)$$

Onde:

DP = densidade de potência do vento [W/m^2];

A potência varia diretamente em função da velocidade do vento elevada ao cubo, o que implica que uma pequena alteração de velocidade do vento resulta em uma grande variação na potência disponível. Por isso a preferência por locais com elevadas médias de velocidades de vento. A equação 4 indica que, um acréscimo de velocidade no vento de 10%, por exemplo, implica numa elevação de 33% da potência disponível no eixo do aerogerador.

Além disso, a massa específica do ar influencia a potência disponível no vento, ver a equação 4. A massa específica do ar varia com a altitude e com a temperatura ambiente (ACKERMANN; SODER, 2002 e PINTO, 2013).

Como o vento tem características estocásticas sua análise normalmente é feita por uma discretização de seu comportamento, na forma de histogramas. Geralmente esses histogramas apresentam as horas de atuação do vento por faixa de velocidade do vento. A função de densidade de probabilidade que mais se ajusta à distribuição do vento é chamada de distribuição de Weibull (PINTO, 2013).

2.3.2 Tecnologia Eólica

A energia eólica tem sido utilizada pelo homem há milhares de anos, para gerar eletricidade (em pequena escala), desde o início e meados dos anos 1900. Em 1995, estimava-se que havia 17 mil turbinas eólicas comerciais nos Estados Unidos (CLEVELAND, 2004).

Segundo OECD e IEA (2013), a previsão da participação da geração de eletricidade no mundo por energia eólica em 2050 se situará entre 15 a 18 %, superior

aos 12% previstos anteriormente em 2009, o que mostra um crescimento de implantação da tecnologia.

As tecnologias de aproveitamento da FER eólica convertem a energia cinética do vento em energia mecânica para realização de trabalho ou em energia elétrica.

A turbina eólica ou aerogerador é um equipamento que absorve parte da potência cinética do vento através de um rotor aerodinâmico, convertendo em potência mecânica do eixo (torque x rotação), a qual é convertida em potência elétrica (tensão x corrente) através de um gerador elétrico (CLEVELAND, 2004; CUSTÓDIO, 2007; PINTO, 2013). O aerogerador é composto de estrutura suporte (torre que o sustenta), pás uniformemente espaçadas, rotor, caixa de engrenagens (ou conexão direta ao gerador), gerador e interface de conexão (PINTO, 2013). Os tipos de aerogeradores são geralmente classificados em dois grupos: os de eixo horizontal e os de eixo vertical.

2.3.3 Tecnologia Eólica de Eixo Horizontal

A tecnologia eólica de eixo horizontal de equipamentos de grande escala está comprovada e madura, está sendo utilizada em todo o mundo, havendo na literatura dados de desempenho desses equipamentos (OECD; IEA, 2013). Para equipamentos de pequeno e médio porte de geração de energia, escopo deste trabalho, as tecnologias ainda se encontram em fase de desenvolvimento.

Uma maneira de classificar os aerogeradores é em termos do eixo ao redor do qual as pás giram. Os aerogeradores de eixo horizontal (*horizontal axis wind turbine* – HAWT), ou do tipo hélice, são os mais utilizados no mundo, principalmente para geração de grandes potências. Para que ocorra o maior aproveitamento do vento, os aerogeradores de eixo horizontal devem ser posicionados perpendicularmente a direção do vento. Normalmente o gerador é instalado junto com a turbina (AKERMANN; SODER, 2002). A Figura 12 apresenta um exemplo de um aerogerador de eixo horizontal de pequeno porte.



*Figura 12 - Aerogerador de Eixo Horizontal
Fonte: (AYHAN; SAĞLAM, 2012)*

O número de pás dos aerogeradores de eixo horizontal é função da finalidade da turbina e do vento. Duas ou três pás por turbina são normalmente utilizados para a geração de energia elétrica. Turbinas com vinte ou mais lâminas são usadas para bombeamento mecânico de água (AKERMANN; SODER, 2002).

Segundo Pinto (2013), a tecnologia de aerogeradores de eixo horizontal é dominante, devido principalmente as características de poder controlar através do ângulo das pás a velocidade do rotor, a saída de potência e a possibilidade de otimizar aerodinamicamente o formato das pás do rotor.

Cita ainda como vantagens do aerogerador de eixo horizontal:

- Acesso a ventos de maiores velocidades devido da altura da torre;
- O controle proporcionado devido ao ajuste do ângulo de passo;
- Alta eficiência, uma vez que as pás estão dispostas perpendicularmente vento.

E como desvantagens do aerogerador de eixo horizontal:

- As necessidades demandadas na instalação de uma torre de aerogerador de grande porte;
- O transporte dos equipamentos;
- A necessidade do sistema de controle para orientar as pás com a direção ao vento;
- Construção complexa da torre para suportar o aerogerador.

O diâmetro das pás de um aerogerador está diretamente ligado a potência de geração do equipamento. A equação 4, item 2.3.1, mostra que a potência do vento é proporcional à área varrida pelo rotor do aerogerador de eixo horizontal. Tem-se que para uma turbina de eixo horizontal, a área (A) é igual a:

$$A = \frac{(\pi \cdot D^2)}{4} \quad (6)$$

Onde:

D = diâmetro das pás da turbina [m].

Logo quanto maior for a área varrida pelas pás, maior será a potência que o aerogerador aproveitará do vento. A potência do vento é proporcional ao quadrado do diâmetro das pás. Duplicar o diâmetro das pás é aumentar a potência disponível em quatro vezes (BURTON et al., 2011; PINTO, 2013).

Os aerogeradores possuem uma limitação física de captação da energia cinética do vento, há um máximo de potência (P_a) que pode ser absorvida. Apenas uma parte da potência do vento pode ser aproveitada para geração de energia. Essa parcela é expressa pelo coeficiente de potência (C_p) que representa o máximo de potência que uma turbina eólica pode extrair do vento. O valor máximo do coeficiente de potência é de 16/27, que representa 59,3%. Esse valor é conhecido como coeficiente de Betz (BETZ, 1920). Sendo assim, a potência absorvida por um aerogerador pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$P_a = \frac{(C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3)}{2} \quad (7)$$

Onde:

C_p = coeficiente de potência do aerogerador [adimensional];

O valor do coeficiente de potência varia em função da velocidade do vento conforme mostrado na Figura 13, isso ocorre devido à variação da eficiência aerodinâmica das pás do rotor do aerogerador em função da variação da velocidade do vento (CUSTÓDIO, 2007).

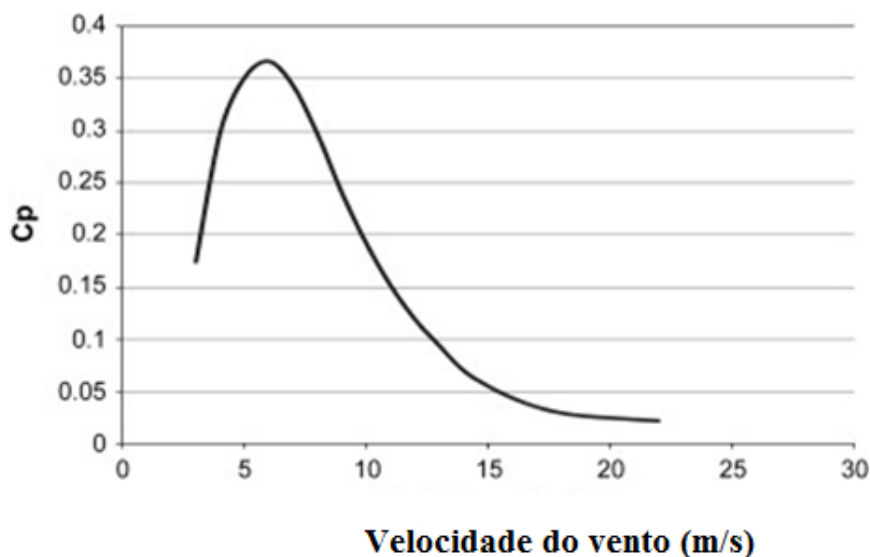


Figura 13 - Curva do coeficiente de potência em função da velocidade do vento
Fonte: (LANZAFAME; MESSINA, 2010)

Segundo Eriksson et al. (2008), para um aerogerador HAWT, o valor (C_p) geralmente situa-se entre 0,40 e 0,50.

2.3.4 Tecnologia Eólica de Eixo Vertical

A principal característica dos aerogeradores de eixo vertical (*vertical axis wind turbine* – VAWT) é poder captar o vento em qualquer direção, isso evita o uso de sistemas de controle de posição em relação ao vento dos HAWT. São adequados a operar em locais de ventos turbulentos, produzem menos ruído quando comparados aos HAWT e são considerados mais apropriados para as áreas urbanas (ERIKSSON et al., 2008).

A Figura 14 apresenta exemplo de três tipos diferentes de aerogeradores de eixo vertical:

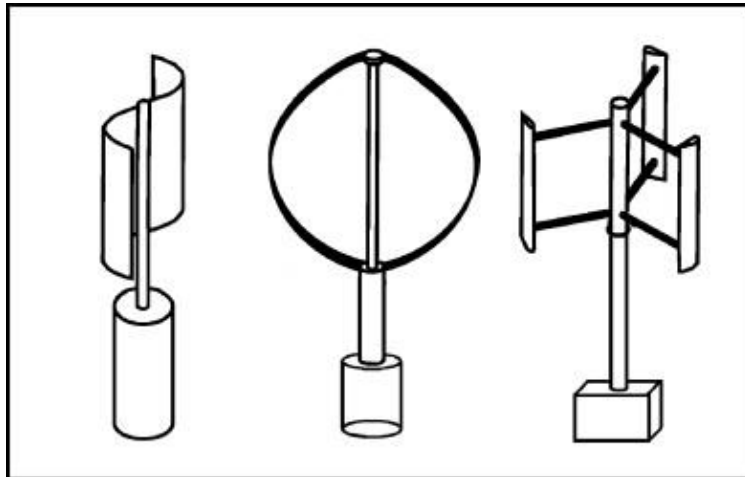


Figura 14 - Aerogeradores de eixo vertical
Fonte: (ERIKSSON et al., 2008)

O equipamento mostrado a esquerda da Figura 14, é do tipo Savonius, o do centro do tipo Darrieus e a da direita é conhecido como rotor H. Os aerogeradores são divididos basicamente em dois grupos: turbinas de arraste (onde o vento empurra as pás, forçando o rotor a girar) e turbinas de sustentação (as turbinas utilizam aerofólios como pás, similares às asas dos aviões).

Entre os aerogeradores de eixo vertical os mais comuns são os do tipo Savonius e Darrieus. A Figura 15 mostra exemplo de dois aerogeradores de eixo vertical.



Figura 15- Aerogerador de eixo vertical
Fonte: (AYHAN; SAĞLAM, 2012)

Com referência ao coeficiente de potência (C_p), Eriksson et al. (2008) afirmam ser difícil determinar um valor para os VAWT já que existem poucos aerogeradores deste tipo operando. Valores de (C_p) são, portanto, com base em estudos teóricos e em resultados experimentais e são geralmente situam-se em torno de 0,40. Cabe ressaltar

que, os dados de desempenho de equipamentos de HAWT e VAWT de pequena e média escala não são necessariamente os mesmos dos equipamentos da grande escala.

2.3.5 Determinantes para Instalação de sistemas de Captação da Energia Eólica, Tecnologia de Eixo Horizontal

O conhecimento do comportamento do vento, direção predominante e intensidade é importante para determinar a posição do ou dos aerogeradores em um sítio. A direção predominante indica que maior parte da energia do vento encontra-se nessa direção, então se deseja ter o mínimo de obstáculos nessa direção. Outro parâmetro determinante na instalação de sistemas de captação da energia eólica de tecnologia de eixo horizontal, é a proximidade entre o aerogerador de um obstáculo ou de outro aerogerador (CUSTÓDIO, 2007; PINTO, 2013).

Nesse momento o interesse é apresentar o efeito da proximidade entre aerogeradores. Um aerogerador absorve a energia cinética do vento incidente em suas pás, conseqüentemente o vento a jusante que passa pelas pás tem menos velocidade, menos energia. É chamado de *efeito de esteira*, o efeito provocado pelo vento de velocidade reduzida e turbulento que se forma na parte de trás da turbina. Gradualmente, a velocidade do vento é recuperada após a passagem pelo aerogerador, o escoamento praticamente recupera as condições de velocidade de antes da passagem pelo aerogerador a uma certa distância.

O efeito de turbulência no vento ocorre para aerogeradores instalados próximos. Existindo mais de um aerogerador instalado no sítio estes devem guardar uma distância que minimize as perdas de desempenho causadas pelo efeito da proximidade.

Na prática, essa distância varia com a velocidade do vento, as condições de operação da turbina, a rugosidade de terreno e a condição de estabilidade térmica vertical da atmosfera. De modo geral, uma distância considerada segura para a instalação de mais de um aerogerador em um sítio é da ordem de 10 vezes o diâmetro, se o aerogerador for instalado a jusante e 5 vezes o diâmetro se instalado ao lado (PINTO, 2013).

A Figura 16 ilustra o comportamento do vento ao passar pelo plano das pás de um aerogerador.

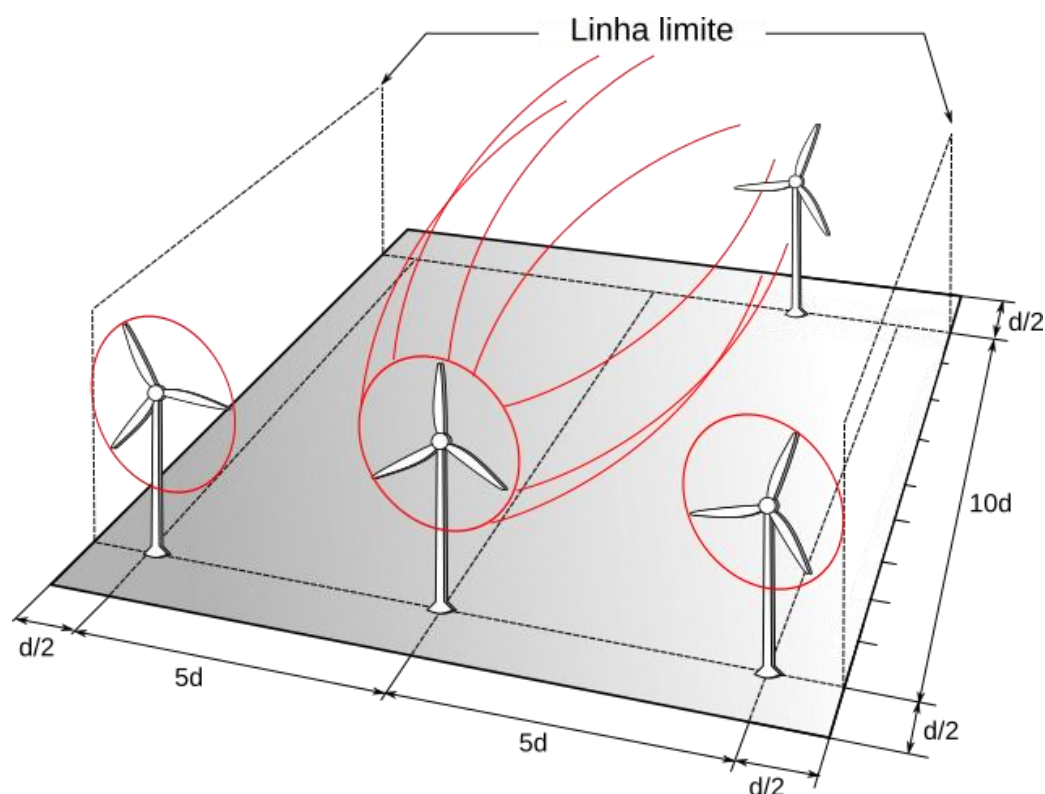


Figura 16 - Comportamento do vento ao passar pelo plano das pás e espaçamento entre aerogeradores.

Fonte: Elaborado pelo autor

2.4 LOCALIZAÇÃO, ÁREA E FORMA

Esta seção tem por finalidade apresentar o significado de sítio aqui adotado e apresentar como os atributos de localização, área e forma de sítios alternativos podem influenciar os potenciais das FERs e das TERs e, por consequência, também o cômputo da QEG adotado nesta abordagem. Para tanto, utiliza-se uma argumentação analítica apoiada em conceitos topográficos, geométricos e nas desigualdades de manifestação dos recursos energéticos primários na superfície terrestre. Nesse contexto, inicia-se com uma definição de sítio.

2.4.1 Argumentação Conceitual de Sítio, Área, Forma e Localização

Sítio é o local examinado e disponível para aproveitamento dos recursos naturais energéticos nele existentes. Possui, portanto, área, forma e localização. Para fins destas argumentações, desconsideram-se os efeitos da curvatura resultante da esfericidade da

Terra. Estes efeitos, levando-se em conta a escala dos sítios examinados, não envolvem alterações significativas.

Segundo Van de Walle (2009), área é o espaço bidimensional que caracteriza o sítio dentro de uma região, ou seja, é um número dimensional (m^2) que expressa o tamanho da superfície do sítio. Na cartografia, corresponde à projeção num plano horizontal de uma parte da superfície terrestre (neste caso o próprio sítio). O conceito de área está associado a um número (medida de área) e a uma configuração bidimensional, isto é, o conjunto de pontos que lhe dá a forma geométrica¹⁰ regular ou irregular. A área do sítio pode ser calculada ou estimada, baseando-se em fórmulas que utilizam o conceito de dimensões (comprimento versus largura) ou pela representação da área total do sítio por um somatório de superfícies geométricas (círculos, quadrados, hexágonos, por exemplo) equivalentes.

Inferre-se, portanto, que a forma do sítio corresponde ao aspecto geométrico do seu contorno, i.e., linha que o limita exteriormente, que lhe confere um feitiço, uma configuração ou uma determinada aparência, um formato (uma poligonal) da projeção de sua configuração num plano horizontal¹¹. Essa forma pode ser definida espacialmente pelas coordenadas cartesianas, dentro de um sistema cartográfico convencional, dos pontos que constituem sua poligonal. Para fins de avaliação, a essa forma devem também ser incluídos atributos de rugosidade e orografia¹².

Localização é o termo usado para designar a posição do sítio na superfície terrestre. Ela é comumente expressa pelas coordenadas geográficas de um ponto que sirva como referencial do sítio, dentro seus limites topográficos. Neste caso, a localização é descrita pelos valores de latitude e longitude¹³ do ponto de referência.

¹⁰ Geometria ramo da matemática interessado em designar propriedades que relacionam forma, área e posição relativa de elementos no espaço. Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Forma_geom%C3%A9trica.

¹¹ Forma é conjunto dos contornos exteriores de uma superfície (cf. Dicionário eletrônico da Língua Portuguesa – Porto Editora, < <http://www.infopedia.pt/lingua-portuguesa/forma> > Acesso em: 15 Set. 2013).

¹² Orografia é o estudo das nuances do relevo de uma região, das características do relevo terrestre (cf. Dicionário eletrônico da Língua Portuguesa – Porto Editora, < <http://www.infopedia.pt/lingua-portuguesa/orografia> > Acesso em: 15 Set. 2013).

¹³ Latitude: de um ponto da superfície terrestre é o ângulo formado entre o paralelo deste ponto e o plano do Equador. Sua contagem é feita com origem no Equador e varia de 0° a 90°, positivamente para o norte (N) e negativamente para o sul (S). Longitude: de um ponto da superfície terrestre é o ângulo formado entre o meridiano de origem, conhecido por Meridiano de Greenwich (na Inglaterra), e o meridiano do

2.4.2 Argumentação da influência de Localização, Área e Forma no Potencial das FERs

As FERs solar, eólica, hídrica e biomassa, exceto a geotérmica, como se sabe, têm origem nas reações de fusão do hidrogênio no núcleo do sol. A radiação solar que chega à Terra sofre interferência dos elementos que constituem a atmosfera terrestre, como por exemplo, a atenuação por nuvens ou poluição e devido à forma esférica do planeta. A radiação solar incide de forma desigual na superfície terrestre (DUFFIE; BECKMAN, 1991). Essa incidência desigual é a origem dos ventos e do ciclo da água. A inclinação do eixo de rotação da Terra em relação a perpendicular ao plano definido pela órbita desta em torno do Sol e os seus movimentos de rotação e translação causam as estações do ano, contribuindo também para esse ciclo.

Além dessas causas, outros agentes climáticos e geológicos (temperatura, altitude em relação ao nível do mar, vegetação, composição do solo, espessura da crosta terrestre (proximidade do magma), obstáculos, rugosidade) contribuem para que as FERs se manifestem de forma desigual na superfície do planeta. Nas FERs solar e eólica, por exemplo, além dessas desigualdades, existe ainda a característica de intermitência dessa manifestação, constituindo variações momentâneas e imprevisas no tempo, com efeitos na disponibilidade dos recursos primários e, por consequência, na sua intensidade.

A localização do sítio, ao representar a posição do sítio na superfície terrestre e incorporar essas desigualdades, implica variabilidades específicas dos recursos energéticos primários, compondo o que se pode chamar de identidade FER do sítio. Dessa forma, dois sítios de mesma área e forma geométrica, com diferentes localizações (isto é, situados em diferentes coordenadas geográficas), ou, dois sítios de áreas e/ou formas diferentes e mesma localização, dificilmente possuem FERs iguais em tipo e intensidade. Quer dizer, ter-se-iam, nestes dois casos, sítios com identidades FER diferentes entre si. Esta constatação, obviamente, constitui um indicativo de que a localização, a área e a forma do sítio influenciam os potenciais de FERs no sítio.

lugar (aquele que passa pelo ponto em questão). Sua contagem é feita de 0° a 180°, positivamente para a direção oeste e negativamente para leste.

Na ótica do cômputo da QEG, que implica no conhecimento das diferenças relativas entre os potenciais de FER, seria útil dispor de um índice ou fator que representasse essas identidades. A determinação desse índice poderia explorar formas heurísticas ou determinísticas de agregar ou integrar os indicadores representativos desses atributos em um único fator de influência.

2.4.3 Argumentação da influência de Localização, Área e Forma no Potencial das TERs

O interesse desta seção é descrever de que maneira a localização, a área e a forma de um sítio influenciam o potencial energético de uma TER.

Uma definição para o vocábulo tecnologia, segundo Longo (2007) é:

Tecnologia é um conjunto de atividades práticas voltadas para alterar o mundo e não, necessariamente, compreendê-lo. A ciência busca formular as “leis” às quais se subordina a natureza, a tecnologia utiliza tais formulações para produzir bens e serviços que atendam às suas necessidades. Ou ainda, o conjunto organizado de todos os conhecimentos científicos, empíricos ou intuitivos empregados na produção e comercialização de bens e serviços.

Aproveitando parte da definição acima no contexto desejado, tem-se a tecnologia como sendo a possibilidade de um conjunto de atividades práticas voltadas à captação e transformação de energia renovável. A localização do sítio, assim como no subitem 2.4.2 influencia as FERs, o mesmo ocorre com respeito ao potencial energético das TERs, por exemplo, na exploração da tecnologia fotovoltaica, a eficiência de captação é afetada com a variação do parâmetro temperatura em função de sua localização. A área do sítio, por sua vez, afeta a QEG das TERs, condicionando a implantação da tecnologia, sua quantidade e tipo que pode ser utilizada no sítio, enquanto a forma do sítio, condicionando o modo pelo qual tais tipos e quantidades de tecnologias vão ser arrançados ou acomodados no sítio.

Na busca por apropriar as influencias dos atributos localização, área e forma no potencial energético das TERs, destacam-se os seguintes elementos: agentes geológicos, climáticos e atmosféricos no sítio e no entorno; restrições legais e ambientais e área para instalação de equipamentos e infraestrutura. A contribuição dos elementos agente geológico, climático e atmosférico em um sítio pode ser entendido com base no exposto no subitem acima, no qual foi apresentado que as FERs se distribuem de forma desigual

na superfície do planeta e concluiu-se que dois sítios de mesmas área e forma geométrica, com diferentes localizações, ou, dois sítios de áreas e/ou formas diferentes e mesma localização, dificilmente possuem FERs iguais em tipo e intensidade. Sendo a FER, a energia a ser transformada, o combustível da TER, conclui-se que os atributos localização, área e forma, na dependência das singularidades dos agentes citados, influenciam as TERs.

Restrições legais ou ambientais que requeiram o uso parcial do sítio implicam também em uma influência na TER, de poder limitar o potencial energético de exploração. A área do sítio condiciona o portfólio de tecnologias possíveis de serem utilizadas, enquanto a forma geométrica condiciona o modo pelo qual tais tecnologias serão arranjadas ou acomodadas no sítio. Uma TER define determinado conjunto de captação, de conversão e de infraestrutura para o transporte ou uso local da energia, além de espaço para a manutenção dos equipamentos e acesso e circulação no sítio. A área e a forma do sítio, considerando orografia e rugosidade, devem ser capazes de acomodar esses sistemas.

Conforme pode ser apreciado nesta argumentação, a influência aqui discutida altera o valor da QEG representativa das TERs. Nos itens a seguir, é apresentado o método que permite quantificar o efeito dos atributos localização, área e forma no cálculo da energia, principalmente quando abordada a geração de energia a partir de fonte renovável de pequena escala.

3 MÉTODO

Para alcançar o objetivo da pesquisa foi desenvolvido um método para quantificação dos efeitos que os atributos localização, área e forma geram no cômputo de energia elétrica a partir do uso de fontes renováveis, solar fotovoltaica e eólica de eixo horizontal de pequena escala.

O método aqui proposto tem como objetivo validar duas premissas:

- Os atributos de localização, área e forma dos sítios alternativos, para os quais se examinam opções de uso de fontes renováveis, afetam as variáveis descritivas das TERs, revelando diferenciais importantes possíveis de serem apropriados; e
- Associada a premissa anterior, que essa afetação, embora complexa, é possível de ser explicitada de forma a permitir simular e quantificar o efeito que a alteração de um ou mais desses parâmetros, localização, área e forma, podem acarretar no cômputo da energia a ser gerada em um sítio.

A influência que o atributo localização causa, no cômputo final da energia a ser aproveitada de um determinado sítio, já é um fator considerado na maioria dos aplicativos existentes e de certa forma, presente no subconsciente popular (intuitivo). Nesse contexto, o presente estudo amplia o foco ao considerar os efeitos que variações nos atributos do sítio área e forma causam, tanto na escolha de uma potencial TER como no cômputo da energia.

A interação desses três parâmetros pode explicitar ganhos ou perdas nos valores das variáveis representativas das TERs. Contudo, o método aqui proposto não tem a pretensão, num primeiro momento, de incluir e considerar outras variáveis, como por exemplo, a acomodação de todos os demais componentes e facilidades do sistema de conversão, tais como unidades de armazenamento, via internas, espaços entre equipamentos, transporte etc. Cada um desses aspectos envolve a elaboração de estudos e análises específicas, cujos impactos, amplitude, condições de contorno e profundidade extrapolam o escopo e objeto do presente trabalho.

3.1 DESCRIÇÃO GERAL

Este item descreve o método proposto de análise dos impactos dos atributos localização, área e forma em um sítio, utilizando o valor da quantidade de energia gerada de fonte renovável de pequena escala como parâmetro de comparação.

A análise comparativa utilizada pressupõe como otimização a escolha ou seleção discreta entre alternativas de geração de energia a partir fontes renováveis. Essa geração é computada por aplicativos já reconhecidos e aceitos no setor ou por cálculos manuais, utilizando as formulas pertinentes. Tanto no uso de aplicativos quanto nos cálculos manuais, já se encontram incorporados parâmetros que capturam a natureza estocástica dos recursos energéticos das fontes consideradas, bem como também, a forma pela qual as tecnologias se apropriam desses recursos.

O método adotado é composto por quatro fases conforme apresentado na Figura 17. A primeira, por meio da qual se caracteriza os potenciais de energia das FERs no sítio estudado, explicitando aquelas mais capazes de aproveitamento. A segunda fase se inicia com a identificação das TERs que potencialmente atendam a uma determinada FER e se encerra com a determinação dos arranjos possíveis de TERs no sítio. A terceira fase apresenta o cômputo de QEG por arranjo possível e a identificação do melhor arranjo. A quarta fase se constitui na análise comparativa de QEG em função dos atributos localização, área e forma.

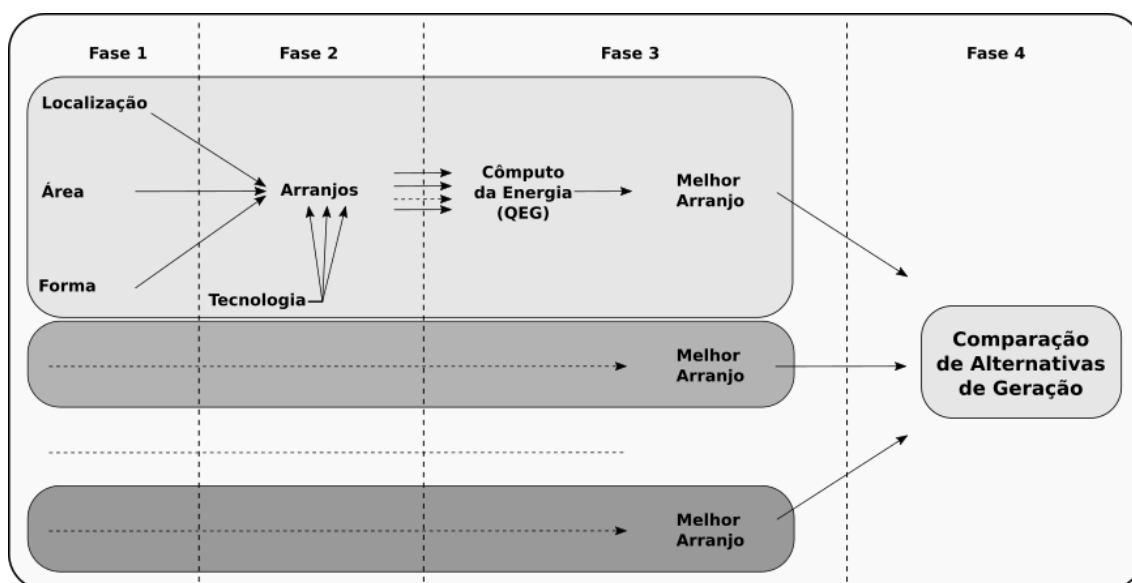


Figura 17 - Ilustração do Método
Fonte: Elaborado pelo autor

3.2 FASE 1 – CARACTERIZAÇÃO DAS FERs NO SÍTIO

A fase 1 do método objetiva caracterizar as FERs existentes no determinado sítio, e identificar aquelas mais capazes de aproveitamento. A identificação da existência de FER no sítio está atrelada basicamente ao levantamento dos recursos energéticos primários disponíveis, isto é, insolação e velocidade média dos ventos, nas condições horárias, diárias ou anual deste trabalho.

As FERs encontram-se distribuídas de forma desigual pela superfície terrestre. Alguns lugares apresentam maior concentração de uma fonte de energia em relação a outras, logo, a localização do sítio, que corresponde às suas coordenadas geográficas, latitude, longitude e altitude, é fundamental para identificar a existência e o nível de concentração de recursos energéticos.

A partir da identificação da FER no sítio, a primeira estimativa de seu potencial energético pode ser obtida por meio de observação pessoal (sensorial ou instrumental) ou consulta aos atlas de potenciais energéticos existentes e disponíveis para aquela localização.

Entende-se por observação sensorial, aquela realizada sem ajuda de instrumentos de medição ou uso de atlas de potencial de fontes. Emprega-se para isso a percepção dos indivíduos aos fenômenos ambientais que traduzam intensidade dos recursos lá disponíveis. Esta observação depende do conhecimento do especialista com relação ao sítio ou da sua capacidade de eliciar estes conhecimentos junto a um conhecedor da região.

O ato de medir ou avaliar um ou vários parâmetros com instrumentos de medição apropriados é chamado de observação instrumental. Esta constitui outra forma de identificar a intensidade da ocorrência de recurso no sítio. A seguir, são apresentados e descritos alguns instrumentos utilizados para a observação instrumental das fontes solar e eólica.

- Anemômetro – mede a direção (graus), sentido e a velocidade dos ventos (m/s).

- Anemógrafo – registra continuamente a direção (graus) e o sentido da velocidade instantânea do vento (m/s), a distância total (km) percorrida pelo vento em relação ao instrumento e as rajadas (m/s).
- Piranômetro – mede a radiação global ou difusa solar incidente sobre uma superfície plana (W/m²).
- Piranógrafo – registra continuamente as variações da intensidade da radiação solar global (W/m²).
- Pireliômetro – mede a radiação solar direta do sol.
- Heliógrafo – registra o número de horas durante o dia que os raios solares atingem diretamente a superfície da terra num determinado local, a duração do brilho solar (horas e décimos).

Com a latitude e longitude de referência do sítio, é possível obter dados por avaliação *in loco* ou utilizando-se de atlas de potencial de fontes energéticas, da biblioteca do software RETScreen¹⁴®, por exemplo, que possui registros de dados climáticos e geográficos para diversas cidades do Brasil e do mundo, por exemplo, ou do programa SunData¹⁵ que fornece registros de radiação solar de qualquer ponto do território nacional.

O mapeamento do recurso eólico e solar brasileiro vem sendo desenvolvidos por diferentes instituições, abaixo algumas são apresentadas:

- Atlas do Potencial Eólico Brasileiro Publicação realizada pela Camargo Schubert e Truewind Solutions com suporte técnico e financeiro do Ministério de Minas e Energia no ano de 2001 - Eletrobrás - CEPEL;
- Atlas Eólico do Estado de São Paulo. – São Paulo: Governo do Estado de São Paulo - Secretaria de Energia, no ano de 2012;
- Atlas de Irradiação Solar no Brasil, elaborado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e pelo Laboratório de Energia Solar (LABSOLAR) da Universidade Federal de Santa Catarina, no ano de 1998;

¹⁴ RETScreen® – é uma ferramenta de software para projetos de energia baseada no Excel destinada a apoiar os tomadores de decisão a determinar de forma rápida e sem custo a viabilidade técnica e financeira de projetos de cogeração, eficiência energética e de potencial de energia renovável. A ferramenta RETScreen® é desenvolvida e mantida pelo Governo do Canadá por meio do Natural Resources Canada's CanmetENERGY Research Centre, em Varennes, Quebec, e é apoiada por uma rede internacional de “experts” da indústria, governo e academia.

¹⁵ SunData - CRESESB (<http://www.cresesb.cepel.br/sundata/index.php>)

- Atlas Solarimétrico do Brasil, elaborado pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), em parceria com o Centro de Pesquisas da Eletrobrás (CEPEL), no ano de 2000;
- Atlas Brasileiro de Energia Solar, foi publicado no âmbito do projeto SWERA (Solar and Wind Energy Resources Assessment), coordenado pelo INPE em associação com o CEPEL e o LABSOLAR/UFSC, no ano de 2006;
- Projeto Sonda – Rede Nacional de Estações para coleta de dados meteorológicos, recursos de energia solar e eólica no Brasil. Desenvolvido pelo CPTEC/INPE com financiamento FINEP e PETROBRÁS em 2000.

A aquisição de uma série histórica longa, períodos superiores a 2 anos, dos recursos energéticos primários de um sítio reduz o risco de ocorrência de eventuais anomalias, e permite um dimensionamento mais efetivo do sistema de geração (SEN, 2008).

Identificadas as FERs no sítio, pode-se passar para fase 2: a identificação de TERs e determinação dos arranjos possíveis no dado sítio.

3.3 FASE 2 – IDENTIFICAÇÃO DE TERs E DETERMINAÇÃO DE ARRANJOS

Como já se dispõe da caracterização das FER no sítio, identificadas na fase 1, resta, agora, proceder à identificação das opções de TER por FER a ser estudada e realizar a avaliação de arranjos possíveis.

3.3.1 Arranjo no Sítio

Arranjo é a disposição física de uma tecnologia em um sítio. É um processo de tentativas, de alocar um ou mais equipamentos no sítio. Consiste em associar as características físicas do sítio (localização, área e forma) com as da TER mais adequada, além de outras questões como: áreas de circulação, manutenção, restrições tecnológicas, ambientais ou legais (SLACK et al, 2002). Por exemplo, para o caso de se estudar, diversos sítios, isto é, (*i*) localizações, (*j*) áreas, (*k*) formas e (*t*) tecnologias, o universo dos arranjos possíveis (N_A) de serem analisados é igual ao produto:

$$N_A = i . j . k . t \quad (8)$$

3.3.2 Identificação das Opções Tecnológicas (TERs)

Iniciar o processo de identificação por TERs de FER de potencial energético mais elevado. O argumento aqui é que potenciais mais altos indicam a produção de volumes de energia mais expressivos, embora em alguns casos ao final possa-se adotar a FER de potencial mais baixo em função de eventuais restrições para algumas variáveis técnicas, econômicas ou ambientais envolvidas. As TERs são de número finito, de uma maneira geral, com características técnico-econômicas conhecidas.

A identificação das TERs demanda o conhecimento de parâmetros e seus efeitos, no sítio e no seu entorno, como o relevo e obstáculos entre outros. Altas rugosidades e obstáculos significativos interferem no acesso ao recurso natural de algumas fontes e na produção de energia função das características das TERs. De posse desses parâmetros e conhecido o conjunto de TERs aplicáveis, é possível projetar os potenciais arranjos para o sítio estudado.

Vale ressaltar, que quando da avaliação do espaço necessário da TER, instalação de uma ou mais de uma unidade da TER, com a determinação do arranjo dela no sítio, deve-se ter em mente uma ideia da quantidade potencial de energia a ser gerada (item ligado à potência dos equipamentos), as dimensões dos modelos dos equipamentos, e os espaçamentos necessários entre os mesmos, que podem ser causa de redução de eficiência de captação de energia, de circulação no sítio ou de manutenção nos equipamentos. Normalmente o estudo do arranjo de uma TER tem como objetivo o aproveitamento máximo do recurso disponível no sítio (CUSTÓDIO, 2007; VILLALVA; GAZOLI, 2012).

A avaliação da aplicabilidade da TER no sítio destina-se a aferir se a área requerida para instalação da opção tecnológica é compatível com a área e a forma do sítio. A área disponível para instalação da TER pode constituir um fator limitador do emprego da tecnologia, quando os requisitos de área forem superiores à área do sítio. De forma similar, pode ocorrer que a forma do sítio não se preste à acomodação de determinada TER. Com isso pode-se rejeitar algumas TERs. Essa avaliação é complexa e detalhada, pois diversos conhecimentos e ferramentas são demandados (CUSTÓDIO, 2007). Para as TERs da fonte eólica, por exemplo, vários instrumentos computacionais têm sido desenvolvidos para auxiliar tal avaliação. Quanto maior for o interesse do

investidor pelo projeto, mais detalhada pode ser esta etapa. Ressalta-se que para a pequena e média escala, objeto principal desse trabalho, essas questões geralmente não são consideradas ou muitas vezes as possibilidades de arranjos são limitadas pelo tamanho de área a ser explorado ou pela restrição de porte da tecnologia estudada, em função de restrições ambientais, econômicas.

Arranjo de Tecnologia Eólica no Sítio

Os principais parâmetros a serem considerados na identificação de um arranjo para a tecnologia eólica, empregando aerogeradores de eixo horizontal, são o diâmetro das pás, a distância entre aerogeradores e a direção predominante dos ventos (CUSTÓDIO, 2007; PINTO, 2013). Além disso, o aerogerador não deve exceder os limites do sítio, ver Figura 18 que mostra a instalação de aerogerador próximo à borda do sítio. Havendo a possibilidade de acomodar mais de um aerogerador no sítio, o espaçamento entre equipamentos deve ser tal que um não interfira na captação de vento do outro, ver item 2.3.5.

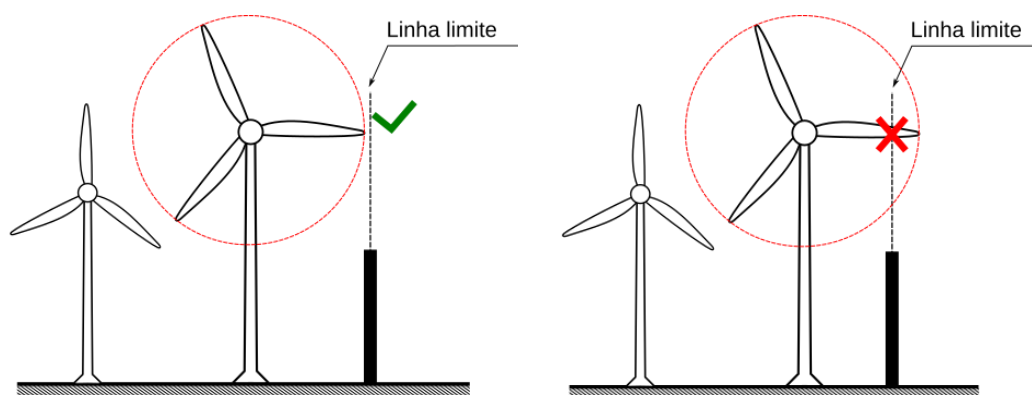


Figura 18 - Aerogerador não exceda os limites do sítio
Fonte: Elaborado pelo autor

Este método considera o espaçamento semelhante entre aerogeradores ao adotado em parques eólicos. Segundo Pinto (2013) e Custódio (2007), as distâncias variam de $3d$ a $5d$ para aerogeradores instalados lateralmente e $5d$ a $7d$ quando um estiver a jusante do outro, sendo d o diâmetro das pás do aerogerador. Afirma ainda que, dependendo da situação, esses valores podem ser alterados para mais ou para menos. Sabe-se que, quando aumenta a distância entre aerogeradores aumenta também a produção de energia de cada aerogerador, por conseguinte, do parque eólico. Desta forma, são adotadas neste

método as seguintes distâncias entre aerogeradores: 10 vezes a medida do diâmetro quando o aerogerador for instalado a jusante do outro e 5 vezes o diâmetro quando instalado ao lado, ver Figura 16, item 2.3.5, que ilustra o comportamento do vento ao passar pelo plano das pás do aerogerador.

Arranjo de Tecnologia Fotovoltaica no Sítio

Para a tecnologia solar, empregando-se painéis fotovoltaicos, o arranjo varia basicamente em função da dimensão, do espaçamento entre fileiras e da orientação geográfica assumida para os painéis (VILLALVA; GAZOLI, 2012). O painel fotovoltaico ou os painéis não devem exceder os limites do sítio, ver Figura 11 que mostra a instalação de painéis próximos à borda do sítio. Para evitar a ocorrência de áreas de sombreamento nos painéis, o arranjo deve prever espaçamento entre fileiras de painéis como apresentado no item 2.2.4. De posse dos principais parâmetros das TERs o passo seguinte é identificar os arranjos possíveis de serem implantados no sítio.

Arranjos possíveis de serem analisados, para uma determinada tecnologia estudada, se definem quando todas as características e questões da tecnologia adotada se adequam às características do sítio. O procedimento de obtenção de tais arranjos pode ser realizado através de simulações de alternativas, utilizando-se planilhas eletrônicas. A partir da obtenção de um arranjo em um determinado sítio é possível saber o número de equipamentos da TER e a potência instalada.

3.4 FASE 3 - CÔMPUTO DE QEG E IDENTIFICAÇÃO DO MELHOR ARRANJO

A terceira fase objetiva o cálculo da quantidade de energia por arranjo e identificar o melhor arranjo, o que é capaz de gerar a maior quantidade de energia entre os possíveis para o sítio.

3.4.1 Cômputo de QEG

A quantidade de energia gerada (QEG) é o fator determinante para a escolha do melhor arranjo de uma TER. A determinação da QEG de fontes de energia renováveis está sujeita a incertezas na determinação dos recursos locais. Em função de variações sazonais ou de intermitência dos recursos energéticos, a QEG é normalmente determinada em base anual.

O cômputo da QEG de fonte renovável depende dos seguintes elementos de informação ou dados:

- Frequência de ocorrência dos recursos energéticos primários, isto é, o tempo de ocorrência daquela intensidade de recurso. Os recursos energéticos podem ser, por exemplo, velocidade média de vento, insolação média, vazão de água e outros;
- Curva de potência da TER a ser utilizada, ou seja, a potência gerada para cada intensidade de recurso.

O primeiro elemento incorpora todos os fatores que entram no computo da QEG influenciados pela localização, área e forma do sítio, representando a existência, variabilidade e intermitência dos recursos energéticos, enquanto o segundo elemento incorpora e representa os requisitos da TER considerada. Assim, ao se alterar a localização, a área ou a forma de um sítio, se está, na realidade, tratando de outro sítio.

A energia gerada é calculada através do cruzamento da estatística dos recursos energéticos, isto é, a curva de frequência dos recursos e a curva de potência do equipamento de transformação de energia.

Pode-se utilizar uma equação para identificar a energia gerada anualmente por uma determinada tecnologia.

$$QEG = \Sigma [f(r).P(r)].8760 [kWh] \quad (9)$$

Onde:

QEG = energia gerada no ano [kWh];

r = recurso energético [m/s, w/m², m³/s];

$f(r)$ = frequência de ocorrência do recurso [%];

$P(r)$ = potência produzida pelo equipamento de conversão de energia [kW];

8760 = número de horas no ano.

Desta forma pode-se calcular a energia produzida anualmente por diversas TERs e diferentes fontes renováveis de energia. A estatística dos recursos pode ser obtida através da curva de densidade de probabilidade da existência do recurso energético no local em estudo ou por meio de medições. Assim como a curva de potência pode ser obtida a partir de catálogo de fabricantes dos equipamentos de conversão de energia ou através de medições. Cabe ressaltar que os dados obtidos a partir de medições no local apresentam maiores certezas. Porém nem sempre é possível a realização das medidas

devendo ser adotado nesses casos os dados disponíveis na literatura. Existem modelos computacionais, como o RETScreen® ou Homer¹⁶, que dispõem de biblioteca, com dados de recursos energéticos de localidades e curva de potência de equipamentos e realizam o cômputo de QEG.

3.4.2 Identificação do melhor Arranjo

Através da comparação do valor da quantidade de energia gerada para cada um dos arranjos possíveis em um determinado sítio, é identificado o melhor arranjo. O melhor arranjo é aquele que acarreta o melhor aproveitamento do potencial energético, que maximiza a produção de energia, que leva em consideração as questões orográficas do sítio de seu entorno e as características das tecnologias utilizadas.

Utilizando-se dos melhores arranjos identificados para os sítios estudados pode ser realizada numa quarta fase, uma análise comparativa de energia obtida em função dos atributos localização, área e forma e tecnologia adotada.

3.5 FASE 4 – COMPARAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE GERAÇÃO

Nesta etapa do trabalho, o interesse é apresentar um processo de análise que tem por objetivo identificar a influência dos atributos localização, área e forma na quantidade de energia elétrica gerada por fonte de energia renovável.

Uma vez identificado o melhor arranjo de um determinado sítio, o modo proposto para identificar o efeito dos atributos localização, área e forma, é o de comparar o valor da energia gerada em dois sítios, que contenham dois dos atributos estudados iguais e o terceiro diferente, de modo a identificar os possíveis impactos. Ou seja, sítios com diferentes localizações e mesma área e forma, ou diferentes áreas e mesma localização e forma, e por fim, ou diferentes formas e mesma localização e área. Essa comparação pode ser feita para cada fonte de energia renovável estudada separadamente ou incluindo a comparação entre diferentes fontes de energia. Essas comparações também poderão ser realizadas objetivando uma hierarquização de custos, geração de emprego, emissões de gases evitadas, entre outros parâmetros de outras naturezas.

¹⁶ Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (HOMER) é um modelo de computador que simplifica a tarefa de projetar sistemas de Geração Distribuída - tanto on quanto off-grid. Algoritmos de análise de sensibilidade e de otimização do HOMER's permitem avaliação técnica e econômica de um grande número de opções tecnológicas e explicar variações nos custos dessas opções e na disponibilidade dos recursos energéticos. Originalmente desenvolvido pelo National Renewable Energy Laboratory (uma divisão do U.S. Department of Energy), o HOMER encontra-se agora licenciado à HOMER Energy.

O próximo capítulo apresentará um estudo de caso, utilizando-se do método aqui desenvolvido, para quantificar o impacto que uma variação de um ou mais dos atributos localização, área e forma, causam no cálculo de energia a partir de fonte renovável de pequeno porte.

4 ESTUDO DE CASO

O presente capítulo tem como objetivo, apresentar um estudo de caso do método proposto no capítulo anterior. Com objetivo de promover uma análise mais abrangente dos resultados o estudo de caso é desenvolvido para diversos sítios com diferentes formas, áreas e localizações.

Espera-se ao final com os resultados obtidos, conhecer o impacto que os atributos localização, área e forma exercem na produção de energia gerada por fontes renováveis, de pequena escala no Brasil, solar fotovoltaica e eólica de eixo horizontal, objetivo central do trabalho.

4.1 FASE 1 – CARACTERIZAÇÃO DAS FERs NOS SÍTIOS

A seguir são apresentados os parâmetros físicos envolvidos e as premissas adotadas no estudo de caso.

4.1.1 Localização

O estudo de caso é desenvolvido para a *localização* geográfica da cidade de Fortaleza e do Rio de Janeiro situadas nos estados do Ceará e Rio de Janeiro, respectivamente situadas no Brasil, ver Figura 19.

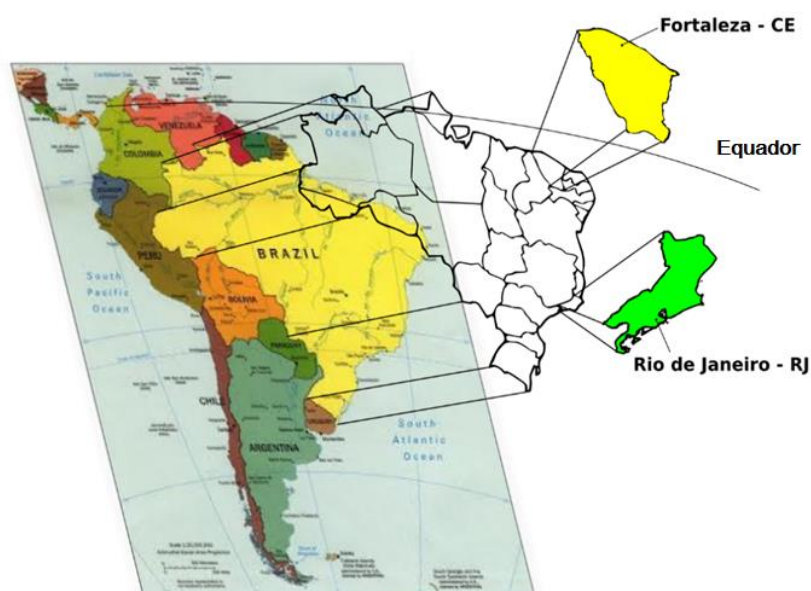


Figura 19 -Destaque da localização das cidades de Fortaleza-CE e Rio de Janeiro-RJ
Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.2 Área

Outro aspecto considerado na caracterização dos sítios é a definição das *áreas* analisadas. Define-se por estudar áreas com as seguintes dimensões: 64, 100, 2.500, 4.900 e 10.000 m², por serem áreas características no Brasil para implantação de plantas em unidades residências, comerciais até de uma pequena ou média indústria.

4.1.3 Forma

Em seguida definem-se as *formas* dos sítios adotadas no estudo. Optou-se por escolher sítios com forma geométrica quadrada e retangular. Apresenta-se na Tabela 2 abaixo, as áreas e as formas escolhidas para estudo:

Tabela 2: Áreas e Formas dos sítios (m²)

Área (m ²)	64		100		2.500		4.900		10.000	
Forma (mxm)	4 x 16	8 x 8	5 x 20	10x10	25 x 100	50x50	28 x 175	70 x 70	50 x 200	100x100

Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.4 Fontes de Energia

A fonte de energia renovável a ser utilizada é função de sua intensidade no local. Foram consideradas no estudo de caso duas fontes de energia, a solar e a eólica, por possuírem potencial energético reconhecido nos locais estudados.

4.1.5 Recursos Disponíveis

Os dados geográficos, da radiação solar e velocidade do vento das localidades escolhidas são e apresentados na Tabela 3, a partir de consulta à base do software RETScreen®, dados consultados em 2014, que possui registros para diversas cidades do Brasil e do mundo.

Tabela 3: Características geográficas, radiação solar e intensidade do vento das cidades do Rio de Janeiro e de Fortaleza

Dados	Unidade	Rio de Janeiro	Fortaleza
Latitude	°S	22,90	3,80
Longitude	°O	43,20	38,60
Altitude	m	0	26,00
Radiação solar diária horizontal anual	kWh/m ² /d	4,49	5,56
Velocidade do vento anual medido a 10 m	m/s	3,20	4,70

Fonte: RETScreen®, 2014

4.2 FASE 2 - IDENTIFICAÇÃO DE TERs E DETERMINAÇÃO DE ARRANJOS

A segunda fase consiste na identificação dos arranjos possíveis de cada TER, para cada um dos sítios estudados.

4.2.1 Identificação de TERs

Foi escolhida a tecnologia eólica de eixo horizontal e a fotovoltaica de silício policristalino, em função do porte e potência adequada dos equipamentos às áreas dos sítios estudados, além de serem tecnologias comercialmente disponíveis.

Os seguintes equipamentos, aerogeradores e painel fotovoltaico, foram identificados como capazes de serem utilizados, ver Tabela 4. Destes equipamentos são disponíveis dados técnicos.

Tabela 4: Relação das Tecnologias utilizadas

Tecnologia *	TECe 1	TECe 2	TECe 3	TECe 4	TECe 5	TECe 6	TECe 7	TS
Diâmetro (m)	3,6	8	10	18	27	48	54,2	---
Fabricante	Redriven	Redriven	Vergent	Wind Energy Solutions	Nordex	Enercon	Siemens	Kyocera
Potência (kW)	2	10	20	80	150	800	1000	0,215

Fonte: Elaborado pelo autor

* TECe i - Tecnologia eólica de eixo horizontal i, i= 1,2,3,4,5,6 ou 7 e TS – Tecnologia solar fotovoltaica.

Com objetivo de comparar os sítios estudados na quarta fase do estudo de caso é necessário fazer algumas premissas:

- A orografia e rugosidade no interior e no entorno dos sítios são análogas, possuem baixa rugosidade semelhante à superfície de um lago. Superfície suave ocasiona baixa resistência ao vento, a variação da velocidade do vento com a altura é pequena. Esta consideração permite que as tecnologias estudadas possam ocupar toda a área do sítio;
- Para o sistema fotovoltaico, sítios com forma retangular, o lado maior estar voltado para o norte geográfico, assim as fileiras dos painéis estarão voltadas para o norte geográfico;

- A inclinação dos painéis fotovoltaicos seguir a recomendação da Tabela 1, item 2.2.4;
- O espaçamento entre as fileiras dos painéis é de forma a evitar a ocorrência de áreas de sombreamento nos painéis fotovoltaicos conforme equação 2, Figura 11, item 2.2.4;
- É possível instalar painéis até que a projeção do painel sobre o plano horizontal coincida com a extremidade do sítio, ver Figura 11, item 2.2.4;
- Para o sistema eólico, sítios com forma retangular, a direção predominante do vento ser perpendicular ao lado maior do sítio;
- O valor do espaçamento entre aerogeradores ser de 5d (diâmetro) e 10d, para aerogeradores instalados lateralmente e a jusante respectivamente;
- É possível instalar aerogeradores próximos à borda do sítio, como mostrado na Figura 18, item 3.4.2, e a vizinhança em volta do sítio, não influencia o desempenho do aerogerador próximo à borda;
- Usar mais de um modelo de tecnologia para o sistema eólico de eixo horizontal e um para o sistema fotovoltaico;
- Toda a área do sítio ser destinada à captação de energia, isto é, ocupada por painéis fotovoltaicos ou aerogeradores.

4.2.2 Cômputo do espaçamento entre aerogeradores e arranjos eólicos

É utilizado no cômputo do espaçamento entre aerogeradores, a medida de dez vezes o diâmetro quando o aerogerador for instalado a jusante do outro e cinco vezes o diâmetro quando instalado ao lado de outro, como apresentado na fase 2 do método. Na Tabela 5 é apresentado os espaçamentos entre os aerogeradores das tecnologias escolhidas.

Tabela 5: Espaçamento entre Aerogeradores

Tecnologia *	TECe 1	TECe 2	TECe 3	TECe 4	TECe 5	TECe 6	TECe 7
Diâmetro (m)	3,6	8	10	18	27	48	54,2
Distância Lado (m)	18	40	50	90	135	240	271
Distância a Jusante (m)	36	80	100	180	270	480	542

Fonte: Elaborado pelo autor

De posse do diâmetro das pás dos aerogeradores, do cômputo da distância entre eles, considerando que a ponta das pás dos aerogeradores pode chegar até o limite do sítio, é possível determinar os arranjos eólicos por sítio, ver apêndice “A”, a Tabela 6 apresenta o número de aerogerador por arranjo, por localização, área e forma do sítio.

Tabela 6: Arranjos Tecnologia Eólica por Sítio por Localização, Área e Forma

Localização	Área (m ²)	Forma (mxm)	TECe 1	TECe 2	TECe 3	TECe 4	TECe 5	TECe 6	TECe 7
Rio de Janeiro e Fortaleza	64	8 x 8	1	1	---	---	---	---	---
		4 x 16	1	---	---	---	---	---	---
	100	10 x 10	1	1	1	---	---	---	---
		5 x 20 m	1	---	---	---	---	---	---
	2.500	50 x 50	2	1	1	1	1	1	---
		25 x 100	5	2	1	1	---	---	---
	4.900	70 x 70	3	1	1	1	1	1	1
		28 x 175	9	4	3	1	1	---	---
	10.000	100 x 100	10	2	1	1	1	1	1
		50 x 200	10	4	3	2	1	1	---

Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se notar que com os aerogeradores estudados, a maioria dos sítios possui mais de um arranjo. Com os arranjos possíveis eólicos por sítio é apresentado na Tabela 7, a potência instalada por arranjo, por localização, área e forma de cada sítio.

Tabela 7: Potência Eólica Instalada por Arranjo, por Sítio, por Localização, Área e Forma (kW).

Localização	Área (m ²)	Forma (mxm)	TECe 1	TECe 2	TECe 3	TECe 4	TECe 5	TECe 6	TECe 7
Rio de Janeiro e Fortaleza	64	8 x 8	2	10	---	---	---	---	---
		4 x 16	2	---	---	---	---	---	---
	100	10 x 10	2	10	20	---	---	---	---
		5 x 20 m	2	---	---	---	---	---	---
	2.500	50 x 50	2	10	20	80	150	800	---
		25 x 100	10	20	20	80	---	---	---
	4.900	70 x 70	6	10	20	80	150	800	1000
		28 x 175	18	40	60	80	150	---	---
	10.000	100 x 100	20	20	20	80	150	800	1000
		50 x 200	20	40	60	160	150	800	---

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.3 Cômputo do espaçamento entre painéis e arranjos fotovoltaicos

O cômputo do espaçamento entre painéis ou entre fileiras de painéis é realizado através da equação 2, item 2.2.4. Considera a dimensão do painel escolhido e o ângulo de inclinação para as localidades de Rio de Janeiro e Fortaleza, ver apêndice “B”. É adotado no estudo de caso o arranjo que contém o maior número de painéis nas condições propostas, conforme Tabela 8.

Tabela 8: Arranjos Tecnologia Fotovoltaica por Sítio por Localização, Área e Forma

Localização	Área (m ²)	64		100		2.500		4.900		10.000	
	Forma (mxm)	4 x 16	8 x 8	5 x 20	10x10	25 x 100	50x50	28 x 175	70 x 70	50 x 200	100x100
Rio de Janeiro	Nº painéis	16	16	40	30	700	750	1400	1400	3000	2900
Fortaleza	Nº painéis	32	24	40	40	1000	1050	2100	2030	4200	4200

Fonte: Elaborado pelo autor

Associado a determinação dos arranjos é apresentado a potência instalada por arranjo na Tabela 9, por localização, área e forma de cada sítio.

Tabela 9: Potência Fotovoltaica Instalada por Arranjo, por Sítio, por Localização, Área e Forma (kW).

Localização	Área (m ²)	64		100		2.500		4.900		10.000	
	Forma (mxm)	4 x 16	8 x 8	5 x 20	10x10	25 x 100	50x50	28 x 175	70 x 70	50 x 200	100x100
Rio de Janeiro	Nº painéis	3	3	9	6	151	161	301	301	645	624
Fortaleza	Nº painéis	7	5	9	9	215	226	452	436	903	903

Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 FASE 3 - CÔMPUTO DE QEG E IDENTIFICAÇÃO DO MELHOR ARRANJO

A terceira fase objetiva o cômputo da quantidade de energia e identificar o melhor arranjo entre os possíveis para o sítio. O cômputo da quantidade de energia pode ser realizado com suporte de cálculos manuais ou por software livre do tipo RETScreen®

ou Homer. Este trabalho utiliza o RETScreen®, para detalhes do cálculo ver apêndice “C”.

Para a tecnologia eólica, o cômputo da quantidade de energia por arranjo, a partir dos parâmetros considerados, chega-se ao valor de energia gerada no ano, ver na Tabela 10:

Tabela 10: Quantidade de Energia Eólica produzida anualmente por arranjo por Localização, Área e Forma

Localização	Área (m ²)	Forma (mxm)	TECe 1	TECe 2	TECe 3	TECe 4	TECe 5	TECe 6	TECe 7
Rio de Janeiro	64	8 x 8	2	5	---	---	---	---	---
		4 x 16	2	---	---	---	---	---	---
	100	10 x 10	2	5	4	---	---	---	---
		5 x 20 m	2	---	---	---	---	---	---
	2.500	50 x 50	4	5	4	26	71	248	---
		25 x 100	10	10	4	26	---	---	---
	4.900	70 x 70	6	5	4	26	71	248	273
		28 x 175	18	20	10	26	71	---	---
	10.000	100 x 100	20	10	4	26	71	248	273
		50 x 200	20	20	10	52	71	248	---
Fortaleza	64	8 x 8	5	15	---	---	---	---	---
		4 x 16	5	---	---	---	---	---	---
	100	10 x 10	5	15	16	---	---	---	---
		5 x 20 m	5	---	---	---	---	---	---
	2.500	50 x 50	10	30	16	82	229	828	---
		25 x 100	25	45	16	82	---	---	---
	4.900	70 x 70	15	30	16	82	229	828	949
		28 x 175	15	75	48	82	229	---	---
	10.000	100 x 100	50	90	16	82	229	828	949
		50 x 200	50	75	48	164	229	828	---

Fonte: Elaborado pelo autor

Para a tecnologia fotovoltaica o cômputo da quantidade de energia a partir dos parâmetros considerados, chega-se ao valor de energia gerada por ano, Tabela 11:

Tabela 11: Quantidade de Energia Fotovoltaica produzida anualmente em cada sítio por Localização, Área e Forma

Localização	Área (m²)	64		100		2.500		4.900		10.000	
	Forma (mxm)	4 x 16	8 x 8	5 x 20	10x10	25 x 100	50x50	28 x 175	70 x 70	50 x 200	100x100
Rio de Janeiro	(MWh/ano)	4	4	11	8	184	197	368	368	788	762
Fortaleza	(MWh/ano)	10	7	12	12	302	318	635	614	1270	1270

Fonte: Elaborado pelo autor

Identificação do melhor arranjo por sítio

O melhor arranjo é o que possui maior valor de energia gerada, ver Tabela 12, onde é apresentada uma comparação entre os melhores arranjos por sítio e por tecnologia.

Tabela 12: Melhores Arranjos Tecnologias Eólica e Fotovoltaica produzida anualmente em MWh em cada sítio por Localização, Área e Forma

Área	Localização	Forma	TS	TECe 1	TECe 2	TECe 3	TECe 4	TECe 5	TECe 6	TECe 7
64 m²	Rio	4 x 16	4	2	---	---	---	---	---	---
		8 x 8	4	---	5	---	---	---	---	---
	Fortaleza	4 x 16	10	5	---	---	---	---	---	---
		8 x 8	7	---	15	---	---	---	---	---
100 m²	Rio	5 x 20	11	2	---	---	---	---	---	---
		10 x 10	8	---	5	---	---	---	---	---
	Fortaleza	5 x 20	12	5	---	---	---	---	---	---
		10 x 10	12	---	---	16	---	---	---	---
2.500 m²	Rio	25 x 100	184	---	---	---	26	---	---	---
		50 x 50	197	---	---	---	---	248	---	---
	Fortaleza	25 x 100	302	---	---	---	82	---	---	---
		50 x 50	318	---	---	---	---	828	---	---
4.900 m²	Rio	28 x 75	368	---	---	---	---	71	---	---
		70 x 70	368	---	---	---	---	---	---	273
	Fortaleza	28 x 75	635	---	---	---	---	229	---	---
		70 x 70	614	---	---	---	---	---	---	949
10.000 m²	Rio	50 x 200	788	---	---	---	---	---	248	---
		100 x 100	762	---	---	---	---	---	---	273
	Fortaleza	50 x 200	1270	---	---	---	---	---	828	---
		100 x 100	1270	---	---	---	---	---	---	949

Fonte: Elaborado pelo autor

Como mencionado na segunda fase do método, item 3.4.1, ao se estudar diversos sítios, o universo dos arranjos possíveis é função do número de localizações, áreas, formas e tecnologias abordadas no estudo de caso realizado. Considerando que são duas localidades, cinco tamanhos de áreas, dois tipos de forma de sítio, uma tecnologia solar e sete tecnologias eólicas, o universo dos arranjos possíveis de serem analisados é igual a 160.

De posse dos melhores arranjos identificados para os sítios estudados pode ser realizada numa quarta fase, a análise comparativa de energia obtida em função dos atributos localização, área e forma e tecnologia adotada.

4.4 FASE 4 – COMPARAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE GERAÇÃO

A análise realizada neste estudo, para evidenciar a influência dos atributos localização, área e forma, foi realizada segundo o método de fixar dois dos atributos e avaliar a variação do terceiro atributo. Verifica-se os efeitos da variação da localização e mantendo fixa a área e a forma, ver Tabela 13:

Tabela 13: Análise Comparativa Variando a Localização e Fixada a Área e Forma para as Tecnologias Eólica e Fotovoltaica, em MWh/ano

Localização	Área (m ²)	Forma	Tecnologia Eólica (MWh/ano)	Tecnologia Solar (MWh/ano)
Rio de Janeiro	2.500	50x50	248	197
Fortaleza	2.500	50x50	828	318

Fonte: Elaborado pelo autor

Pode ser visto que a energia elétrica foi de 248 MWh no Rio de Janeiro e de 848 MWh em Fortaleza na tecnologia eólica e de 197 MWh no Rio de Janeiro e de 318 MWh na tecnologia solar.

Verifica-se os efeitos da variação da área e mantendo fixa a localização e a forma, ver Tabela 14:

Tabela 14: Análise Comparativa Variando a Área e Fixada a Localização e Forma para as Tecnologia Eólica e Fotovoltaica, em MWh/ano

Área (m ²)	Forma	Localização	Tecnologia Eólica (MWh/ano)	Tecnologia Solar (MWh/ano)
2.500	25x100	Fortaleza	82	302
4.900	28x175	Fortaleza	229	635

Fonte: Elaborado pelo autor

Pode ser visto que a energia elétrica foi de 82 MWh na área de 2.500 m² e de 229 MWh na área de 4.900 m² na tecnologia eólica e de 302 MWh na área de 2.500 m² e de 635 MWh na área de 4.900 m² na tecnologia solar.

Verifica-se os efeitos da variação da forma e mantendo fixa a localização e a área, ver Tabela 15.

Tabela 15: Análise Comparativa Variando a Forma e Fixada a Localização e a Área para as Tecnologia Eólica e Fotovoltaica, em MWh/ano

Forma	Área (m ²)	Localização	Tecnologia Eólica (MWh/ano)	Tecnologia Solar (MWh/ano)
5x20	100	Rio de Janeiro	2	11
10x10	100	Rio de Janeiro	5	8

Fonte: Elaborado pelo autor

Pode ser visto, que a energia elétrica foi de 2 MWh na forma de 5 x 20 m² e de 5 MWh na forma de 10 x 10 m² na tecnologia eólica e de 11 MWh na forma de 5 x 20 m² e de 8 MWh na forma de 10 x 10 m² na tecnologia solar.

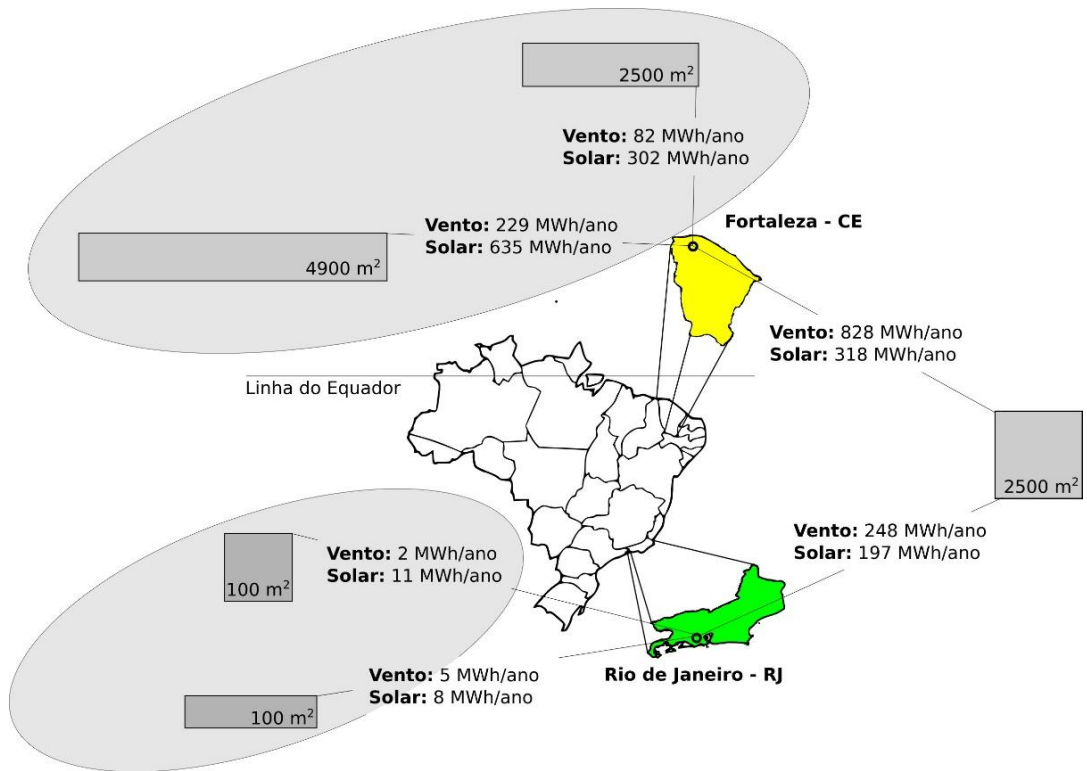


Figura 20 - Resumo dos resultados obtidos no estudo de caso:

Fonte: Elaborado pelo autor

5 CONCLUSÃO

Nesta tese, abordou-se o problema da avaliação do potencial de geração de energia elétrica a partir de fontes de energia renováveis, para um determinado sítio, um problema básico no processo de planejamento energético. No contexto desse problema, o propósito foi o de examinar como e em que medida alterações na localização geográfica, área e forma geométrica do sítio altera esse potencial. O interesse era *explicitar* esse ‘como’ e essa ‘medida’ das alterações.

Na análise do problema, ficou evidente que a necessidade de estudar a questão da explicitação dessa influência no planejamento de projetos de geração de energia elétrica a partir dos recursos renováveis mostrava-se, particularmente importante, nos projetos de pequena e média escala.

O principal objetivo da tese foi, em essência, desenvolver um método para sistematizar os procedimentos analíticos desse exame. Este objetivo foi alcançado, mediante a aplicação do método desenvolvido, através das seguintes instâncias:

- Apresentando a importância de utilizar de forma integrada os três atributos localização, área e forma no cômputo da QEG.
- Identificando que esses atributos são capazes de incorporar e representar as manifestações primárias dos recursos energéticos de fontes renováveis, as características físicas do sítio (rugosidade, orografia, seu entorno) e a acomodação dos arranjos das TERs.
- Demonstrando a possibilidade de capturar e quantificar o efeito de alterações nesses atributos no cômputo de QEG.

Primeiramente, no entanto, foi necessário deixar definido que um sítio, para efeito desta tese, deveria, além dos atributos de localização, área e forma, incluir as oportunidades de uso de TERs por fontes de energia renovável, identificada como com ocorrência no sítio. A justificativa disto decorria da premissa de partida da proposta de que era possível capturar os efeitos relativos desses atributos e internalizá-los no cômputo da QEG, mediante a aplicação do método apresentado.

O método comprovou a capacidade de tratar de modo integrado essas influências e, dessa forma, apresentou o arranjo que maximiza a QEG de um sítio e o efeito causado por uma alteração nos atributos.

O método foi aplicado como estudo de caso em duas regiões brasileiras, apresentando uma quantificação da influência que os atributos localização, área e forma, exercem no cálculo da energia elétrica gerada por fonte renovável eólica e solar. Destacou-se que a alteração de um desses atributos acarreta em variação significativa no cálculo da quantidade de energia, o que demonstra a importância de considerar o efeito agregado desses atributos.

Em relação à variação da localização, ao se empregar a mesma área e forma para as localizações das duas cidades, Rio de Janeiro e Fortaleza, ocorreu uma variação de aproximadamente 334% (em MWh/ano) em função da diferença dos recursos eólicos disponíveis de cada região. A diferença de MWh/ano gerado entre Rio de Janeiro e Fortaleza a partir da tecnologia solar é de 161%, em função da quantidade de painéis fotovoltaicos instalados e do recurso solar disponível nos sítios, conforme Tabela 13.

Em relação à variação da área, a diferença de MWh/ano/m² entre utilizar uma área de 2.500 ou 4.900 m² em Fortaleza é de aproximadamente 279 % para a tecnologia eólica decorrente da possibilidade de utilizar modelos de tecnologia mais adequados a dimensão da área, e é de aproximadamente 210 % maior para a tecnologia solar. Uma grande parte devido a variação quase linear do número de painéis com as dimensões da área e outra parte, pelo fato de que determinada dimensão de área permitir melhor arranjo das placas, ou seja, menor perda de espaço inutilizado, conforme Tabela 14.

Em relação à variação da forma, a diferença de MWh/ano obtido pela utilização da tecnologia eólica, de sítio com forma retangular e outro de forma quadrada, por exemplo, para uma área de 100 m² no Rio de Janeiro, é de aproximadamente 250% devido ao uso de diferentes modelos de tecnologia e de 72% para a tecnologia solar devido ao uso de diferente número de painéis nos sítios, conforme Tabela 15.

Do ponto de vista da etapa de construção de arranjos, área e forma, o valor da área disponível do sítio para instalação da tecnologia pode constituir um fator limitador do emprego da tecnologia, quando os requisitos de área forem superiores à área do sítio. De forma similar, pode ocorrer que a forma do sítio não se preste a acomodação de

determinada tecnologia. Com respeito a tecnologia fotovoltaica, a localização do sítio influencia fortemente o ângulo de inclinação, o espaçamento entre fileiras e a quantidade de painéis no sítio, influencia a potência (kW) que pode ser instalada no sítio. O valor da área não define necessariamente o número de painéis fotovoltaicos. Para uma mesma área pode haver diferentes números de painéis em função do ângulo de inclinação. A forma (no caso estudado quadrada ou retangular) influencia, para um mesmo valor de área de sítio, diferentes valores de energia gerada. Com respeito a tecnologia eólica, a localização não influencia a potência instalada no sítio

De um modo geral, por exemplo, ao se comparar dois sítios, com igual localização e área, a geração de energia pode variar acentuadamente em função da forma, como também, para uma mesma localização, em função da forma dos sítios, pode ocorrer alteração significativa na competitividade entre duas fontes de energia.

A literatura carece de artigos científicos que tratam do uso integrado dos três atributos estudados, quando do cômputo da energia por fonte renovável, foi um fator limitante desta pesquisa. Daí a decisão de propor este método. Esta decisão, porém, impôs desafios neste tipo de pesquisa, na medida em que, entre os pesquisadores e especialistas, o resultado que pode ser esperado, no que tange à comparação de sítios diferentes, implica em diferentes possibilidades de produções de energia. Por outro lado, a magnitude dessa diferença é significativa e surpreendente.

Para concluir, o trabalho identificou atributos importantes que influenciam a produção de energia de pequena escala proveniente de fontes renováveis, localização, área e forma. Apresentou, também, o impacto que a alteração de um desses atributos acarreta na produção de energia e, ainda, destacou a importância dos procedimentos analíticos de busca pelo melhor arranjo da tecnologia no cômputo da produção de energia.

SUGESTÕES PARA PESQUISA FUTURA

Durante a pesquisa do tema e análise do problema, surgiram considerações relacionadas à possibilidade de adotar uma modelagem clássica por diferenciais, por meio da qual se poderia estudar essas alterações. Esse tratamento, contudo, implicaria a explicitação de relações para a diferença de potencial em função das diferenciais parciais para cada um dos atributos mencionados, uma tarefa extremamente complexa

para o nível de decisão desejado. Optou-se, conforme ficou exposto, por desenvolver método com rotinas heurísticas, mais de acordo com esse nível de decisão. Fica, no entanto, a sugestão para uma pesquisa futura que desenvolva um índice ou uma identidade, capaz de representar o potencial energético de uma FER de um determinado sítio explicitando-o funcionalmente pelos atributos citados, estabelecendo uma agregação dos efeitos dos atributos localização, área e forma daquele sítio. Essa identidade facilitaria o processo de decisão de uso de TER.

Outra sugestão envolve um método de caráter mais geral que que incluísse, além do sistema de captação, a acomodação de todos os demais equipamentos e facilidades do sistema de conversão, tais como unidades de armazenamento, via internas, espaços entre equipamentos, transporte etc., e que incluíssem estudos voltados a inclusão de procedimentos, visando a incorporação das premissas feitas no estudo de caso.

Por fim estudos que incluíssem uma comparação dos custos associados às alternativas consideradas poderiam ser incorporados ao método, refinando o critério de escolha. Esses estudos deveriam considerar custos relativos, isto é, custo por unidade de energia gerada. Nestas condições o método ganharia um viés econômico compatível com as decisões de investimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHÃO, C.; SCHAEFFER, R. “Decomposition analysis of the variations in residential electricity consumption in Brazil for the 1980–2007 period: Measuring the activity, intensity and structure effects”. *Energy Policy*, v. 37, n. 12, p. 5208–5220, dez. 2009.

ACKERMANN, T, 2009. “Wind Power in Power Systems Wind Engineering”. *Wind Engineering V. 40*, p. 447-449.

ACKERMANN, T.; SODER, L. “An overview of wind energy-status 2002”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 6, p. 67 – 128, 2002.

ADELAJA, S.; SHAW, J; BEYEA, W; CHARLES MCKEOWN, J D. “Renewable energy potential on brownfield sites: A case study of Michigan”. *Energy Policy*, v. 38, n. 11, p. 7021–7030, 2010.

ANEEL, Abril 2012. *Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012.*. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 23 set. 2014.

ANGELIS-DIMAKIS, A. BIBERACHER, M; DOMINGUEZ, J; FIORESE, G; GADOCHAD, S; GNANSOUNOUF, E; GUARISO, G; KARTALIDIS, A; PANICHELLI, L; PINEDO, I; ROBBA, M. “Methods and tools to evaluate the availability of renewable energy sources”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 2, p. 1182–1200, 2011.

ARNBERG, L.; DI SABATINO, M.; ØVRELID, E. J. “State-of-the-art growth of silicon for PV applications”. *Journal of Crystal Growth*, v. 360, p. 56–60, dez. 2012.

AYHAN, D.; SAĞLAM, A. “A technical review of building-mounted wind power systems and a sample simulation model” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, DOI: 10.1016/j.rser.2011.09.028, 2012.

BETZ, A. “Das Maximum der Theoretisch Möglichen Ausnützung des Windes durch Windmotoren”. *Zeitschrift für das gesamte Turbinewesen*, p. 307–209, 1920.

BURTON, T. JENKINS, N; SHARPE, D; BOSSANYI, E. “Wind Energy Handbook”. 2ª edição ed Wiley . ISBN: 978-0-470-69975-1.

CEPEL, 2000. Atlas Solarimétrico do Brasil. Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), e Centro de Pesquisas da Eletrobrás. Disponível em <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoesdownload/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf> Acesso em: 14 fevereiro 2015.

CEPEL, 2014. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 26 jan. 2015.

CHEN, H. H.; KANG, H. Y.; LEE, A. H. I. “Strategic selection of suitable projects for hybrid solar-wind power generation systems”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010.

CLEVELAND, C. J. “Encyclopedia of Energy (Encyclopedia of Energy Series): 1st. ed. [s.l.] Elsevier Science, 2004.

CRESESB, 2001. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf>. Acesso em: 12 fevereiro 2015.

CRESESB, 2008. Energia Solar Princípios e Aplicações. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br>>. Acesso em: 13 nov. 2014.

CUSTÓDIO, R. DOS S. ENERGIA EÓLICA para produção de energia elétrica. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Centrais Elétrica Brasileiras S.A., 2007. v. 1

DINCER, I.; ROSEN, M. A. “Thermodynamic aspects of renewables and sustainable development. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 9, n. 2, p. 169–189, abr. 2005.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. “Solar Engineering of Thermal Processes”. 14ª. ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2013.

EL CHAAR, L.; LAMONT, L. A.; EL ZEIN, N. “Review of photovoltaic technologies”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, p. 2165–2175, 2011.

EPE, 2014. Projeções da demanda de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional 2014-2018. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie Estudos de Energia/DEA 14 - Proje%C3%A7%C3%B5es da Demanda de Energia El%C3%A9trica - 2%C2%AA Revis%C3%A3o Quadrimestral 2014-2018.pdf](http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia%20DEA%2014%20-%20Proje%C3%A7%C3%B5es%20da%20Demanda%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%20-%20Revis%C3%A3o%20Quadrimestral%202014-2018.pdf)>. Acesso em: 10 outubro de 2014.

EPE, 2014. SISTEMAS ISOLADOS. Rio de Janeiro: Disponível em: <http://www.epe.gov.br/geracao/Documents/EPEDERE121_2014r0_Instru%C3%A7%C3%B5es%20para%20Projetos%20Alternativos.pdf>. Acesso em: 06 abril. 2015.

EPIA, E. P. I. A, 2012. Global Market Outlook for Photovoltaics 2014-2018. Europe, n. May, p. 74.

ERIKSSON, S.; BERNHOFF, H.; LEIJON, M. “Evaluation of different turbine concepts for wind power”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008.

ESTUDOS, C. DE A. *Energias Renováveis - Riqueza Sustentável ao Alcance da Sociedade*. Camara dos Deputados, p. 274, 2012.

FADAEE, M.; RADZI, M. A. M. “Multi-objective optimization of a stand-alone hybrid renewable energy system by using evolutionary algorithms: A review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 5, p. 3364–3369, jun. 2012.

GHADIMI, A. A.; RAZAVI, F.; MOHAMMADIAN, B. “Determining optimum location and capacity for micro hydropower plants in Lorestan province in Iran”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 8, p. 4125–4131, 2011.

GOLDEMBERG, J. *Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento*. Editora: Edusp, ISBN: 9788531404528, 2003.

GRADY, S. A.; HUSSAINI, M. Y.; ABDULLAH, M. M. “Placement of wind turbines using genetic algorithms”. *Renewable Energy*, v. 30, n. 2, p. 259–270, 2005.

GRASSI, S.; CHOKANI, N.; ABHARI, R. S. “Large scale technical and economical assessment of wind energy potential with a GIS tool: Case study Iowa”. *Energy Policy*, v. 45, p. 73–85, jun. 2012.

GREEN, M. A. “Photovoltaics: technology overview. *Energy Policy*, v. 28, n. 14, p. 989–998, nov. 2000.

GROSSMANN, W. D.; GROSSMANN, I.; STEININGER, K. W. “Distributed solar electricity generation across large geographic areas, Part I: A method to optimize site selection, generation and storage”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 25, p. 831–843, set. 2013.

HEGEDUS, S. S.; MCCANDLESS, B. E. “CdTe contacts for CdTe/CdS solar cells: Effect of Cu thickness, surface preparation and recontacting on device performance and stability”. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 88, p. 75–95, 2005.

HERBERT, G. M. J. et al. “A review of technical issues on the development of wind farms”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 32, n. 0, p. 619–641, DOI: 10.1016/j.rser.2014.01.055, 2014.

HOFFMANN, W. “PV solar electricity industry: Market growth and perspective”. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 90, n. 18-19, p. 3285–3311, nov. 2006.

HOLDERMANN, C.; KISSEL, J.; BEIGEL, J. “Distributed photovoltaic generation in Brazil: An economic viability analysis of small-scale photovoltaic systems in the residential and commercial sectors”. *Energy Policy*, v. 67, p. 612–617, abr. 2014.

IBGE, 2010. Censo Demográfico 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 10 out. 2014.

IEA, 2013. Technology Roadmap Solar photovoltaic energy. Disponível em: <http://www.iaea.org/publications/freepublications/publication/Wind_2013_Roadmap.pdf> Acesso em: 08 abril 2015.

INTER ACADEMY COUNCIL. *Lighting the way Toward a sustainable energy future*. ISBN 978-90-6984-531-9, 2007.

INPE, 2000. Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA). Disponível em <<http://sonda.ccst.inpe.br/infos/variaveis.html>> Acesso em: 14 fevereiro 2015.

INPE, 2006. Atlas Brasileiro de Energia Solar. Projeto SWERA (Solar and Wind Energy Resources Assessment). Disponível em http://www.ccst.inpe.br/wp-content/themes/ccst-2.0/pdf/atlas_solar-reduced.pdf>. Acesso em: 12 fevereiro 2015, 2006.

INMET, 2009. Publicação das normais climatológicas. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/html/informacoes/publicacoes/index.html>>. Acesso em: 13 fevereiro 2015.

IPCC, 2012. Renewable energy sources and climate change mitigation: special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Choice Reviews Online*, v. 49, n. 11, p. 49–6309–49–6309, 1 jul. 2012.

JACKSON, T.; OLIVER, M. The viability of solar photovoltaics. v. 28, n. 2000, p. 983–988, 2000.

JANNUZZI, G M; SWISHER, J. *Planejamento Integrado de Recursos Energeticos*. Editora: Autores Associados, São Paulo, 1998.

JUÁREZ, A. A; ARAÚJO, A M; ROHATGI, J S O F; OYAMA, D Q. Development of the wind power in Brazil: Political, social and technical issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 39, p. 828–834, nov. 2014.

KALOGIROU, S. A. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. 1st ed. Burlington p. 758 ISBN: 978-0-12-374501-9, 2009.

- KRIBUS, A; KAFTORI, D; MITTELMAN, G; HIRSHFELD, A; FLITSANOV, Y; DAYAN, A. “A miniature concentrating photovoltaic and thermal system”. *Energy Conversion and Management*, v. 47, n. 20, p. 3582–3590, dez. 2006.
- KUCUKSARI, S KHALEGHI, A M; HAMIDI, M; ZHANG, Y; SZIDAROVSKY, F; BAYRAKSAN, G; SON, Y J. “An Integrated GIS, optimization and simulation framework for optimal PV size and location in campus area environments”. *Applied Energy*, v. 113, p. 1601–1613, jan. 2014.
- KUSIAK, A.; SONG, Z. “Design of wind farm layout for maximum wind energy capture”. *Renewable Energy*, v. 35, n. 3, p. 685–694, 2010.
- LABSOLAR, 1998. Atlas de Irradiação Solar no Brasil. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e pelo Laboratório de Energia Solar/ UFSC. Disponível em http://www.lepten.ufsc.br/pesquisa/solar/atlas_de_irradiacao.pdf >. Acesso em: 14 fevereiro 2015.
- LANZAFAME, R.; MESSINA, M. “Horizontal axis wind turbine working at maximum power coefficient continuously”. *Renewable Energy*, v. 35, p. 301–306, 2010.
- LEE, A. H. I.; CHEN, H. H.; KANG, H. Y. “Multi-criteria decision making on strategic selection of wind farms”. *Renewable Energy*, v. 34, n. 1, p. 120–126, 2009.
- LODI, C, 2011. Perspectivas para a Geração de Energia Elétrica no Brasil Utilizando a Tecnologia Solar Térmica Concentrada. Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- LONGO, W. P. e. Política e Gestão em Ciência e Tecnologia: Conceitos Básicos sobre Ciência, Tecnologia e Inovação. Rio de Janeiro, p. 16, 2007.
- LUND, P. D. “Upfront resource requirements for large-scale exploitation schemes of new renewable technologies”. *Renewable Energy*, v. 32, n. 3, p. 442–458, mar. 2007.
- MACHADO, A. C. Pensando a energia: Aluisio Campos Machado. Editora: Eletrobrás, 1998.
- MASA-BOTE, D.; CAAMAÑO-MARTÍN, E. “Methodology for estimating building integrated photovoltaics electricity production under shadowing conditions and case study”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 31, p. 492–500, mar. 2014.
- MCTI, 2013. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. Disponível em: <http://gvces.com.br/arquivos/177/Estimativas_Clima.pdf>. Acesso em: 13 out. 2014.

MCWILLIAM, M. K. K.; VAN KOOTEN, G. C. C.; CRAWFORD, C. “A method for optimizing the location of wind farms”. *Renewable Energy*, v. 48, p. 287–299, dez. 2012.

MECIBAH, M. S; BOUKELIA, T E; TAHTAH, R; GAIRAA, K. “Introducing the best model for estimation the monthly mean daily global solar radiation on a horizontal surface (Case study: Algeria)”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 36, p. 194–202, ago. 2014.

NAKATA, T.; SILVA, D.; RODIONOV, M. “Application of energy system models for designing a low-carbon society”. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 37, n. 4, p. 462–502, ago. 2011.

OECD; IEA, 2013. *Technology Roadmap Wind energy* INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Paris: [s.n.]. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Wind_2013_Roadmap.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2015.

PARIDA, B.; INIYAN, S.; GOIC, R. “A review of solar photovoltaic technologies”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 3, p. 1625–1636, abr. 2011.

PEREIRA, M. G; CAMACHO, C F; FREITAS, M A V; SILVA, N F da. “The renewable energy market in Brazil: Current status and potential”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 6, p. 3786–3802, ago. 2012.

PETTI, A. C. G, 2004. *Modelagem de uma Planta de Geração Heliotérmica de Eletricidade, Localizada no Semi-árido Nordeste Brasileiro*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PINTO, M. de O. *Fundamentos de energia eólica*. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2013.

POWALLA, M.; DIMMLER, B. “Development of large-area CIGS modules”. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 75, p. 27–34, 2003.

RAZYKOV, T. M. FERKIDES, C.S; MOREL, D; STEFANAKOS, E; ULLAL, H.S; UPADHYAYA, H.M. “Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects”. *Solar Energy*, v. 85, n. 8, p. 1580–1608, ago. 2011.

SAN CRISTÓBAL, J. R. “A goal programming model for the optimal mix and location of renewable energy plants in the north of Spain”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 7, p. 4461–4464, set. 2012.

SANTOS, A. H. M. Conservação de energia: eficiência energética de instalações e equipamentos. P. 467 Editora: EFEI, Brasil, ISBN: 9788590211518, 2006.

SECRETARIA DE ENERGIA DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2012. Atlas do Potencial Eólico São Paulo. Governo do Estado de São Paulo. Secretaria de Energia. Disponível em <http://www.energia.sp.gov.br/portal.php/atlas-eolico>. Acesso em: 14 fevereiro 2015.

SEN, Z. Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques. London: Springer London, 2008.

GONZÁLEZ, J. S.; PAYÁN, M. B.; SANTOS, J. M. R.; GONZÁLEZ-LONGATT, F. “A review and recent developments in the optimal wind-turbine micro-siting problem”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 30, p. 133–144, 2014.

SLACK, N.; JOHNSTON, R.; CHAMBERS, S. Administração da Produção. Editora: Atlas, p. 754, São Paulo, Brasil, 2002.

SOITO, J. L. DA S.; FREITAS, M. A. V. “Amazon and the expansion of hydropower in Brazil: Vulnerability, impacts and possibilities for adaptation to global climate change”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, n. 6, p. 3165–3177, ago. 2011.

SunData, CRESESB. Disponível em <http://www.cresesb.cepel.br/sundata/index.php>. Acesso em: 10 fevereiro 2015.

TOLMASQUIM, M. T. Fontes Renováveis de Energia no Brasil. Editora: Interciência, CENERGIA, ISBN: 85-7193-095-3, 2003.

TYAGI, V. V. RAHIM, N. A. A.; RAHIM, N. A.; SELVARAJ, J. A. “Let al. Progress in solar PV technology: Research and achievement”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 20, p. 443–461, abr. 2013.

VAN DE WALLE, J. A. Matemática no ensino fundamental. 6ª edição Editora: Artmed, Porto Alegre, ISBN: 978-85-363-1971-1, 2009.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações - Sistemas Isolados e Conectados à Rede. 1ª. edição. São Paulo: Editora Érica Ltda, ISBN: 978-85-365-0416-2, 2012.

YUNNA, W.; GENG, S. “Multi-criteria decision making on selection of solar-wind hybrid power station location: A case of China”. Energy Conversion and Management, v. 81, p. 527–533, 2014.

ANEXO A

ANEXO A

ALGUMAS DEFINIÇÕES IMPORTANTES PARA O TRABALHO

POTÊNCIA

Associado ao conceito de energia está o de potência, que corresponde ao fluxo de energia no tempo, os processos humanos e econômicos dependem de um fluxo energético, onde o tempo é fundamental para sua realização. Segundo Santos (2006):

A taxa na qual um material é oxidado pode levar a uma grande diferença, desde representar a possibilidade de sua utilização como combustível ou apenas a formação lenta de um resíduo, como é o caso respectivamente da queima de madeira e da formação da ferrugem. Ambos são processos energéticos, mas de sentido totalmente diverso devido às distintas taxas ou velocidades nas quais ocorrem. Em geral, estamos preocupados em atender uma dada demanda energética, medida em kWh, kJ ou kcal, mas sob uma imposição de tempo, ou seja, com dado requerimento de potência, avaliada em kW.

No dia a dia, por exemplo, a taxa com que se utiliza a energia é tão importante quanto a sua disponibilidade para atingir o que se deseja no tempo esperado.

FATOR DE CAPACIDADE

Outro conceito que é utilizado neste trabalho é o de fator de capacidade (FC), o qual é a razão entre a quantidade de energia efetivamente produzida (E) e o máximo que uma planta de geração de energia poderia produzir operando a plena potência P durante o mesmo período de tempo (t). O fator de capacidade é adimensional, variando entre 0 e 1:

$$FC = \frac{E}{P \cdot t} \quad (10)$$

Onde:

FC = fator de capacidade [%]

E = energia gerada no período de tempo (t), [MWh];

P = potência instalada, assegurada, ou garantida [MW];

t = intervalo de tempo considerado [h].

Apesar da aparente simplicidade de definição, o entendimento do fator de capacidade comporta duas interpretações distintas, a saber:

- O percentual de tempo, no qual a planta operou a plena carga; e
- A quantidade de energia média gerada percentualmente em relação ao potencial máximo de geração, no intervalo de tempo considerado.

FATOR DE CAPACIDADE ANUAL

O fator de capacidade anual é normalmente utilizado para cálculos econômicos, onde as projeções são feitas para período de tempo anual ou plurianual e é definido da seguinte maneira:

$$FCA = \frac{E_{\text{anual}}}{(P \cdot 8760)} \quad (11)$$

Onde:

FCA = fator de capacidade anual [%];

E_{anual} = energia gerada no período de 1 ano [MWh];

P = potência instalada, assegurada, ou garantida [MW], e;

Intervalo de tempo um ano = 8760 [h].

O fator de capacidade de fontes renováveis varia em função da disponibilidade do recurso energético na natureza, da ação humana e da tecnologia (IPCC, 2012; TOLMASQUIM, 2003), por exemplo:

- A insuficiência de recurso implica que a planta opere abaixo de sua capacidade. Na fórmula de cálculo da energia eólica, o recurso vento está elevado à terceira potência, isto é, variações no valor do recurso são determinantes;
- Manutenções (preventivas e corretivas) ou paradas eventuais, por questões de segurança devido aos problemas na transmissão da energia, atuam como um redutor do percentual de tempo de operação a plena carga da planta; e
- A eficiência de conversão da planta é um parâmetro intrínseco da tecnologia utilizada.

Ainda, o desempenho de uma fazenda eólica varia principalmente pela condição do vento e em menor escala pela tecnologia empregada nos aerogeradores e pela operação da planta. De uma maneira geral os fatores de capacidade médios de uma fazenda variam de menos de 20% a mais de 50% (IPCC, 2012).

DENSIDADE

Cabe uma reflexão a fim de evitar dúvidas e esclarecer o uso do conceito de densidade de energia. Com o aumento da participação das fontes alternativas, principalmente as renováveis, nas matrizes energéticas dos países, por vezes aparece em textos científicos a relação W/m^2 , sendo chamado de densidade de energia.

Densidade de uma grandeza é definida como a razão entre o que se deseja medir ou comparar (energia, potência, massa) em relação à outra grandeza (área, volume, massa), ideia de concentração em um determinado espaço, permite quantificar ou qualificar uma grandeza em relação à outra.

DENSIDADE DE ENERGIA

A densidade de energia é a quantidade de energia por unidade de área, massa ou volume. A densidade:

- Explica a preferência de uso de alguns energéticos em relação a outros, os derivados de petróleo refinados em média possuem 42 MJ/kg, enquanto o carvão betuminoso de boa qualidade 22-25 MJ/kg e a madeira seca no máximo a 17 MJ/kg (SMIL, 2010)
- Esclarece o porquê o custo do transporte de gás natural, não comprimido, não liquefeito dificilmente superaria ao transporte do petróleo bruto, onde densidade do gás natural é em torno de 35 MJ/m³, enquanto a do petróleo bruto 35 GJ/m³ (SMIL, 2010);
- Aceitável o entendimento de que as fontes de energia mais concentradas, com densidade de energia maior, são mais atraentes (SMIL, 2010);
- Se a intenção for levar um volume mínimo de alimento em uma caminhada, levar uma barra de granola 17 J/g ao invés de cenouras 1,7 J/g. (SMIL, 2010)

DENSIDADE DE POTÊNCIA

A densidade de potência é a potência ou fluxo de energia por unidade de massa ou por unidade de volume.

Smil (2010) adota o conceito densidade de potência como sendo a medida de fluxo de energia, W/m^2 , para geração de energia elétrica, como a área horizontal da superfície da terra ou da água, em vez de unidade de superfície de trabalho de um conversor. Afirma que desta forma de tratar o parâmetro pode usar para avaliar e comparar os diversos fluxos de energia desde recursos naturais, as taxas de exploração das fontes de energia e as formas de conversão de energia, sejam eles fósseis ou renováveis. A heterogeneidade na qualidade do recurso natural, a transformação de recurso em combustível, o fornecimento do combustível, o arranjo e a operação da usina são fatores que influenciam diretamente no cálculo, assim afirma. (SMIL, 2010).

O entendimento do significado de densidade de potência é menos intuitivo e tem sido usado ao longo do tempo para expressar diferentes fins. (SMIL, 2010) Na engenharia o conceito de densidade de potência é usado como medida de desempenho de dispositivos e as suas várias especialidades a definiram de maneira particular.

- Telecomunicação, nas antenas, quociente da potência transmitida e da área da superfície de uma esfera a uma determinada distância (W/m^2);
- Densidade volumétrica de conversores de energia, baterias, cuja massa e volume os fabricantes costumam tentar minimizar, como à taxa de liberação de energia por unidade de volume ou de massa da bateria, W/dm^3 ou W/kg ;
- Nuclear a densidade de potência é a taxa de liberação de energia por unidade de volume de um núcleo do reator.

O IPCC (2012) utiliza o conceito de densidade de potência como sendo a capacidade de fornecimento de energia (instantaneamente) de fonte solar, eólica, biomassa, hidrelétrica ou do oceano por unidade de área (W/m^2).

EFEITO FOTOVOLTAICO

O efeito fotovoltaico ocorre em materiais semicondutores como o silício que possui átomos com quatro elétrons que ligados aos átomos vizinhos formam uma rede cristalina. Para que ocorra o efeito fotovoltaico é necessário que o silício puro seja dopado com átomos de boro em uma metade e átomos de fósforo na outra metade a fim de formar uma junção conhecida como junção *p-n*. O átomo de fósforo possui cinco elétrons de ligação e quando adicionado ao silício fica com um elétron em excesso

fracamente ligado ao átomo de origem que com pouca energia térmica se desloca para a banda de condução. O fósforo é um dopante doador de elétrons chamado de dopante n ou impureza n . O átomo de boro possui três elétrons de ligação e quando adicionado ao silício haverá a falta de um elétron para fazer a ligação com o átomo de silício. Desta forma haverá um buraco ou uma lacuna e com pouca energia térmica um elétron situado na vizinhança pode ocupar esse espaço fazendo que esse buraco se desloque. Sendo assim, o boro é um dopante p ou um aceitador de elétrons (CRESESB, 2013).

Na junção ocorre a captura dos elétrons que estão em excesso no lado n pelos buracos existentes no lado p . Logo o acúmulo de elétrons no lado p o torna carregado negativamente e a redução de elétrons no lado n o torna negativamente carregado. O movimento dos elétrons e das lacunas entre as camadas forma um campo elétrico e cria uma barreira de potencial entre as camadas. Esta barreira dificulta a passagem dos elétrons que ficam confinados atrás da barreira quando a célula não está iluminada. Quando exposta a luz solar os elétrons da camada n recebem energia e quando acumulam energia suficiente para vencer a barreira de potencial movimentam-se da camada n para a p . Existindo um circuito fechado entre os eletrodos metálicos das camadas n e p os elétrons circulam formando uma corrente elétrica. A diferença de potencial criada pelo deslocamento dessas cargas é conhecida como efeito fotovoltaico (CRESESB, 2013).

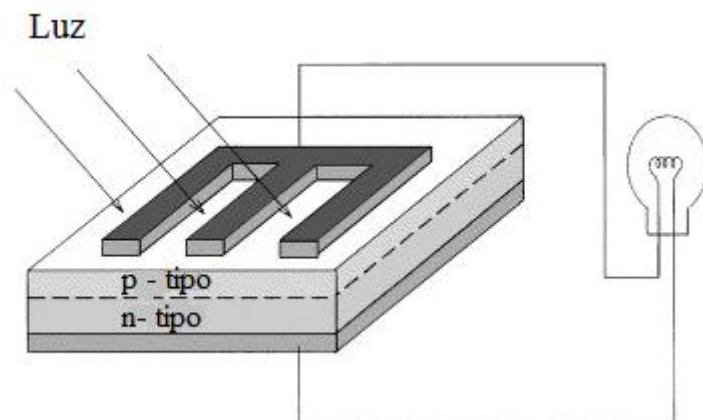


Figura 21 - Fluxo de corrente elétrica convertido de luz solar por uma lâmpada ligada entre os contatos da célula.

Fonte: (GREEN, 2000) adaptado pelo autor

APÊNDICE A

APÊNDICE A

DETERMINAÇÃO DOS ARRANJOS EÓLICOS POR SÍTIO

Para o cálculo do número de aerogeradores, de eixo horizontal para as áreas do estudo de caso na forma quadrada ou retangular foi elaborada planilha eletrônica, mostrada abaixo, considerando as premissas indicadas no item 4.2:

- Passos do cálculo:

$L1$ = lado maior do sítio[m];

$L2$ = lado menor do sítio[m];

d = diâmetro das pás do aerogerador[m];

$d \leq L1$ e $d \leq L2 \rightarrow$ Diâmetro das pás do aerogerador menor ou igual que o lado maior e o lado menor do sítio, há a possibilidade de utilizar aerogerador no sítio;

$(L1 - d) / 5.d$ = quantidade de aerogeradores lado a lado;

$(L2 - d) / 10.d$ = número de fileiras de aerogeradores a jusante;

Nr = número de aerogeradores;

PLANILHA - CÁLCULO DO NÚMERO DE AEROGERADORES EM UMA ÁREA QUADRADA OU RETANGULAR

$L1=$	175	$L1 =$ lado maior
$L2=$	28	$L2=$ lado menor
$d=$	8	$d=$ diâmetro das pás do aerogerador
$A=$	4900	$A =$ Área (m^2)

$d \leq L1$	$d \leq L2$	$(L1-d)/5d$	$(L2-d)/10d$	Nr. Aerogeradores
1	1	4	0	4

O arranjo resultante nas condições propostas de área retangular, de 28 m de lado menor, 175 m de lado maior e aerogerador de diâmetro das pás de 8 m, é formado por 4 aerogeradores dispostos em uma fileira lado a lado perpendicular à direção do vento.

APÊNDICE B

APÊNDICE B

DETERMINAÇÃO DOS ARRANJOS FOTOVOLTAICOS POR SÍTIO

A determinação do espaçamento entre fileiras de painéis e da projeção destes sobre o plano horizontal para as localidades Rio de Janeiro e Fortaleza é realizada a partir da equação 2, item 2.2.4, considerando as premissas indicadas no item 4.2:

Para o Rio de Janeiro:

$$\alpha = 22,9^\circ$$

$$L = \text{altura do painel} = 1,5 \text{ m}$$

$$x = L \cos 22,9^\circ = 1,38 \text{ m};$$

$$z = L \sin 22,9^\circ = 0,59 \text{ m};$$

$$y = 3,5 z = 2,06 \text{ m};$$

$$D = 3,44 \text{ m}.$$

O espaçamento entre bases de painéis de fileiras consecutivas é de 3,44 m e de 1,38 m a dimensão da projeção do painel sobre o plano horizontal.

Para Fortaleza:

Villava e Gazoli (2012) recomendam que quando o valor da latitude for inferior a 10° , utilizar o ângulo de inclinação dos painéis fotovoltaicos $\alpha = 10^\circ$, evitar o acúmulo de poeira. A latitude de Fortaleza é $3,8^\circ$.

$$L = \text{altura do painel} = 1,5 \text{ m}$$

$$x = L \cos 10,0^\circ = 1,47 \text{ m};$$

$$z = L \sin 10,0^\circ = 0,26 \text{ m};$$

$$y = 3,5 z = 0,91 \text{ m};$$

$$D = 2,38 \text{ m}.$$

O espaçamento entre bases de painéis de fileiras consecutivas é de 2,38m e de 1,47 m a dimensão da projeção do painel sobre o plano horizontal.

Com o cálculo do espaçamento mínimo requerido entre bases de painéis de fileiras consecutivas, é possível projetar arranjos por sítio. Abaixo é apresentado o cálculo do número de fileiras e de painéis para a área retangular de 4 x 16 m localizada em Fortaleza:

- Passos do cálculo:

L = lado menor do sítio [m];

$F = L/D$ = divisão do lado menor pela distância entre bases de fileiras = número de fileiras parciais de painéis;

$D1 = L - D.F$ = lado menor menos o produto da distância entre bases pelo número de fileiras = dimensão restante do lado menor [m];

$D1 > x \rightarrow$ Se o restante do lado menor for maior que a dimensão da projeção do painel sobre o plano horizontal, adicionar uma fileira de painéis;

$L1$ = Lado maior do sítio [m];

LA = largura do painel [m];

$L1/LA$ = número de painéis por fileira do sítio;

$(L1/LA).N_{fileiras}$ = número de painéis por fileira multiplicado pelo número de fileiras = número total de painéis no sítio.

PLANILHA - CÁLCULO DO NÚMERO DE FILEIRAS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

$L = 4$	L = lado menor
$D = 2,38$	D = distancia entre bases de painéis de fileiras vizinhas
$x = 1,47$	x = dimensão da projeção do painel sobre o plano horizontal
	F = número de fileiras parciais
	$D1$ = dimensão restante lado menor

$F = L/D$	$D1 = L - D.F$	Se $D1 > x ; 1; 0$	N total de fileiras
1	1,62	1	2

CÁLCULO DO NÚMERO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

$L1 = 16$	$L1$ = Lado maior
$LA = 1$	LA = largura do módulo
Nº de módulos p/fileira	N total de painéis
$L1/LA$	$(L1/LA) N$ fileiras
16	32

O arranjo resultante nas condições propostas no estudo de caso, de área retangular, de 4 m de lado menor e 16 m de lado maior, localizada em Fortaleza e painel com dimensões de 1,5 x 1,0 m é formado por 32 painéis dispostos em duas linhas de 16 painéis voltados para o Norte geográfico.

APÉNDICE C

APÊNDICE C

CÁLCULO DA QUANTIDADE DE ENERGIA

O cálculo da quantidade de energia é realizado com suporte de cálculos do software livre RETScreen®, conforme os seguintes passos:

- Acessar o software RETScreen®, escolher o tipo de projeto “Produção de eletricidade”;
- Entrada de informação sobre o projeto, referente à localização do sítio, nome da cidade (Rio de Janeiro ou Fortaleza) onde se localiza o sítio ou a latitude e longitude, é obtido os dados da biblioteca do software, dados climáticos e geográficos para localidades estudadas;
- Informar a tecnologia, eólica (turbina eólica de eixo horizontal) ou fotovoltaica (painel fotovoltaico);
- Informar o tipo de grid, escolher Rede Central;
- Acessar a planilha Modelo Energético;
- Selecionar o tipo de análise (Método 2)¹⁷; onde é necessário:
 - Determinar o fator de utilização¹⁸;
 - No caso da tecnologia eólica, as perdas do painel¹⁹, as perdas no aerofólio²⁰ e as perdas diversas²¹ considerar zero% e a “disponibilidade²²” estimar em 98%;

¹⁷ "Método 1" para uma análise simplificada, cálculo com base na potência de turbina eólica e no fator de capacidade. "Método 2" para uma análise mais detalhada, cálculo com base em dados climáticos anuais e dados da turbina eólica. "Método 3", uma análise ainda mais detalhada é realizada com base em dados climáticos mensais e dados da turbina eólica.

¹⁸ Fator de utilização: O modelo calcula o fator de utilização ou capacidade (ver anexo “A”) para o arranjo do sítio, que representa a relação entre a potência média produzida pela usina ao longo de um ano à sua capacidade de potência nominal.

¹⁹ Perdas no painel: Perdas causadas pela interação dos aerogeradores uns com os outros (%) em um sítio. Depende do espaçamento entre aerogeradores, orientação, características do sítio e sua orografia.

²⁰ Perdas no aerofólio: Perdas causadas por acumulação de gelo nas laminais (%).

²¹ Perdas diversas: Perdas nos aerogeradores devido a vento forte e rajadas (%).

- No caso da tecnologia fotovoltaica - As perdas diversas nos painéis²³ estimar em 15%, eficiência do inversor²⁴ estimar em 90% e as perdas diversas no inversor²⁵ considerar zero %.
- De posse dos dados advindos do arranjo identificado na fase 2, modelo e quantidade de equipamentos da tecnologia, lançar na planilha “modelo energético” (modelo 2) do software RETScreen®.
- O software calcula a “eletricidade exportada para a rede” que é o objetivo neste trabalho. Ainda fornece o fator de utilização da tecnologia no sítio.

²² Disponibilidade: É optada pela disponibilidade média das turbinas de 98%, perda de tempo de inatividade decorrência de manutenção programada e falhas de aerogerador. Valores típicos variam de 93 a 98%.

²³ Perdas diversas nos painéis: Perdas causadas pela presença de sujeira nos painéis (%) em um sítio. Valores típicos de até 15%, casos especiais podendo passar de 20%.

²⁴ Eficiência do inversor: Perdas causadas na transformação CC para CA. Valor sugerido 90%, faixa típica de 80 a 95%.

²⁵ Perdas diversas inversor: Perdas ocorridas em conversores CC-CC ou em magnetização de transformadores. Na maioria dos casos, o valor de perda é zero (%).