



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

WALTER BARBOSA GUEDES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE DE VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO
DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS OU EÓLICOS
BASEADOS NA ANÁLISE DE BANCO DE DADOS DE
CONDIÇÕES CLIMÁTICAS**

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Novembro de 2019.

WALTER BARBOSA GUEDES

**ANÁLISE DE VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO
DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS OU EÓLICOS
BASEADOS NA ANÁLISE DE BANCO DE DADOS DE
CONDIÇÕES CLIMÁTICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistema Elétrico de Potência.

Leimar de Oliveira
Orientador

Campina Grande - Paraíba - Brasil
Novembro de 2019

WALTER BARBOSA GUEDES

**ANÁLISE DE VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO
DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS OU EÓLICOS
BASEADOS NA ANÁLISE DE BANCO DE DADOS DE
CONDIÇÕES CLIMÁTICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Leimar de Oliveira

Orientador

Outro Professor

Convidado

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Novembro de 2019.

Agradecimentos

A Deus pela oportunidade de estar neste mundo com fé e esperança, crendo que o melhor ainda está por vir.

Ao meu pai, o agricultor José Guedes Sobrinho, que não mediu esforços para tornar esta graduação possível, pois sabiamente sempre externou que conhecimento é o caminho para o sucesso. Agradeço à minha mãe, Josefa Barbosa Guedes, rainha da minha vida, a quem serei sempre grato por seu colo carinhoso e inesquecível.

A meus irmãos, com os quais compartilhei toda a minha infância, levando-os sempre no meu coração, esperando pelo nosso próximo encontro.

A minha namorada (princesa), Fernanda, com quem compartilhei e compartilho momentos inesquecíveis que me fazem acreditar que o amor é a melhor coisa que há no mundo.

Ao destino por me presentear na graduação com um irmão, Hericles, pessoa fantástica, íntegra, com a qual me identifico e desejo toda sorte do mundo.

A todos os meus colegas de graduação, especialmente a galera tampa do Armário, dentre eles: Anderson Wendel, Goldofredo feitosa, Ítalo Oliveira (Kaxa, o rei de Patos), João Jales, José Adeilmo, Kaio Nikelisson, Leonardo Pereira, Matheus Ferreira, Osmar Lucas, Paulo Roberto, Robson Donato, Ulisses Gomes, Vandilson Rodrigo, Victor Germano.

A todos os colegas do Laboratório de Alta Tensão, pelas amizades, parcerias e pelas trocas de conhecimento que engrandeceram nossas carreiras acadêmicas, especialmente a Adriano Oliveira, Augusto César, George Xavier, Higor Costa, Ítalo Oliveira, João Jales, Lenilson Andrade, Rodrigo Kalil, Vandilson Rodrigo e ao colega Cícero Rômulo Campos de Amorim Filho, pela revisão conjunta deste trabalho e implementação de novas abordagens sobre os temas tratados.

Ao professor Leimar de Oliveira por sua presteza e aconselhamentos na produção deste trabalho e na graduação. Agradeço também ao colega Igor Paiva pela presteza e ajuda na reta final do curso, serei eternamente grato.

Sumário

1	Introdução	12
1.1	Objetivos	14
1.2	Organização do Trabalho	14
2	Energia Eólica	15
2.1	Breve Histórico	15
2.2	Principais Características dos Ventos	17
2.3	O processo de conversão de energia eólica em elétrica	18
2.4	Características do Sistema Eólico	19
2.5	Classes das turbinas eólicas	20
2.6	Classificação das turbinas eólicas	21
2.7	Parâmetros que Influenciam o Sistema Eólico	23
2.7.1	O Limite de Lanchester-Betz-Joukowski	23
2.8	Atlas do Potencial Eólico Brasileiro	24
3	Energia Solar	27
3.1	Breve Histórico	28
3.2	Célula Fotovoltaica	29
3.2.1	Tipos de Células Fotovoltaicas	31
3.3	Componentes de um Sistema Fotovoltaico	32
3.3.1	Painel Fotovoltaico	32
3.3.2	Controlador de Carga	33
3.3.3	Inversor	33
3.3.4	Baterias	34
3.4	Parâmetros Elétricos de um Módulo Fotovoltaico	34

3.5	Atlas Brasileiro de Energia Solar	36
3.5.1	Mapas de Irradiação	36
4	Fundamentação Teórica	38
4.1	Análise de Viabilidade Econômica	38
4.1.1	<i>Payback</i>	39
4.1.2	Valor Presente Líquido (VPL)	39
4.1.3	Taxa Interna de Retorno (TIR)	39
4.2	Parques Eólico e Fotovoltaico Implantados	40
4.2.1	Complexo Eólico do Alto Sertão II	40
4.2.2	Parque Solar Nova Olinda	42
4.3	Metodologia	43
4.3.1	Banco de Dados do Estudo	43
4.3.2	Sistema de identificação de viabilidade	44
4.3.3	Interface Desenvolvida	45
5	Conclusão	48
	Referências Bibliográficas	50

Lista de Figuras

2.1	A turbina eólica de Brush.	16
2.2	Velocidade do vento em função da altura.	18
2.3	Partes constituintes de um aerogerador.	19
2.4	Rotor de Darrieus.	22
2.5	Rotor H.	22
2.6	Velocidade média do vento a 100 m de altura.	25
2.7	Velocidade média do vento a 120 m de altura.	26
3.1	Estrutura de uma célula fotovoltaica.	30
3.2	Estruturas moleculares dos semicondutores P e N.	30
3.3	Sistema de geração fotovoltaico de energia elétrica.	32
3.4	Placa fotovoltaica.	33
3.5	Circuito elétrico de um controlador de carga.	33
3.6	Curva I x V de um módulo fotovoltaico.	35
3.7	Total diário da irradiação global horizontal - Média anual.	37
4.1	Vista do complexo eólico Alto Sertão II.	40
4.2	Vista do parque solar Nova Olinda.	42
4.3	Página inicial da interface desenvolvida.	46
4.4	Página final da interface desenvolvida.	47

Lista de Tabelas

2.1	Distribuição da área de cada continente segundo a velocidade média do vento de 50 <i>m/s</i>	20
2.2	Classes das turbinas eólicas	21
4.1	Cidades e seus dados	44

Lista de Abreviaturas e Siglas

ANEEL	<i>Agencia Nacional de Energia Elétrica</i>
CCEE	<i>Câmara de Comercialização de Energia Elétrica</i>
CEPEL	<i>Centro de Pesquisas de Energia Elétrica</i>
CPTEC	<i>Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos</i>
CRESESB	<i>Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito</i>
IBGE	<i>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</i>
INPE	<i>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais</i>
ONS	<i>Operador Nacional do Sistema Elétrico</i>
<i>on-grid</i>	<i>Interligado à rede</i>
<i>off-grid</i>	<i>Isolado da rede</i>
SEP	<i>Sistema Elétrico de Potência</i>
PROINFA	<i>Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica</i>
SIN	<i>Sistema Interligado Nacional</i>
TIR	<i>Taxa Interna de Retorno</i>
VPL	<i>Valor Presente Líquido</i>

Lista de Símbolos

FF	<i>Fator de Forma</i>
GW	<i>gigawatts</i>
<i>h</i>	<i>hora</i>
kW	<i>quilowatts</i>
kWh/m ²	<i>quilowatts por metro quadrado</i>
MW	<i>megawatts</i>
m ²	<i>metro quadrado</i>
W _p	<i>Watt pico</i>

Resumo

O aumento da demanda por energia elétrica no Brasil e estagnação da produção das usinas hidrelétricas tornaram necessária a abertura de mercado para fontes renováveis de energia elétrica. Os investimentos em usinas eólicas e fotovoltaicas começaram a ganhar expressividade, alterando a configuração do mercado de energia nacional. Neste trabalho é proposto uma nova metodologia de análise de viabilidade de implementação de parques eólicos ou fotovoltaicos a partir de um banco de dados formado pelas condições climáticas da região. O banco de dados do sistema é composto por dados de sete cidades brasileiras que apresentam grande potencial de produção de energia elétrica por meio de usinas eólicas e/ou parques solar fotovoltaico. A interface desenvolvida tem como entrada de dados das cidades escolhidas juntamente com o capital que o investidor deseja aplicar, retornado ao usuário as condições. A base deste projeto foi desenvolvida por meio de investimentos realizados no Brasil, no qual se observou o capital investido, as condições climáticas das regiões e os retornos financeiros obtidos com cada projeto. Com esses dados, estipulou-se uma relação matemática entre os três fatores analisados, de forma que se tornou possível realizar projeções de possíveis investimentos que venham a se realizar no território brasileiro.

Palavras-Chaves: Energia elétrica, Usina Eólica, Sistema Fotovoltaico.

Abstract

The increased demand for electricity in Brazil and the stagnation of production from hydroelectric plants made it necessary to open the market to renewable sources of electricity. Investments in wind and photovoltaic plants began to gain in expressiveness, changing the configuration of the naval energy market. This work proposes a new methodology for the feasibility analysis of the implementation of wind or photovoltaic parks from a database formed by the climatic conditions of the region. The system's database is composed of data from seven Brazilian cities that have high potential for electricity production through wind farms and / or solar photovoltaic parks. The developed interface has as input data of the chosen cities along with the capital that the investor wishes to invest, returned to the user the conditions. The basis of this project was investments made in Brazil, in which the capital invested, the climatic conditions of the regions and the financial returns obtained with each project were observed. With these data, a mathematical relationship was established between the three factors analyzed, so that it was possible to make projections of possible investments that may be made in the Brazilian territory.

Keywords: Electricity, Wind Power Plant, Photovoltaic System.

Capítulo 1

Introdução

A eletricidade é a forma de energia que apresenta um maior grau de utilidade para a sociedade moderna, ela se constitui como um dos pilares fundamentais para a atual infraestrutura social. A melhoria no padrão de vida de uma sociedade está associada ao seu desenvolvimento econômico, este é acompanhado pelo aumento no consumo per capita de energia elétrica. Para que as necessidades da sociedade sejam plenamente satisfeitas, é necessário que se estabeleça um complexo sistema elétrico dotado de altas taxas de eficiência, capaz de aproveitar ao máximo das fontes energéticas disponíveis.

No Brasil, os primeiros Sistemas Elétricos de Potência (SEP) foram implantados no fim do século XIX e no início do século XX com o desenvolvimento dos sistemas trifásicos que utilizam a corrente alternada para a transmissão de energia. Conforme a sociedade industrial foi se desenvolvendo, tornou-se necessário o desenvolvimento de sistemas elétricos mais potentes, capazes de atender às demandas crescentes por energia elétrica. Acompanhado do desenvolvimento industrial e econômico do país, com uma maior interligação entre os territórios possibilitada pela expansão da rede elétrica nacional, o aumento populacional também exerceu papel fundamental no aumento do consumo e demanda por energia elétrica.

O crescimento da demanda por energia elétrica pelos brasileiros pode ser observado desde o início da segunda metade do século XX quando o país entrou em um processo de industrialização, este desenvolvimento não foi uniforme e as regiões apresentaram diferentes ritmos de crescimento, com destaque para as regiões Sul e Sudeste a priori e posteriormente a região Nordeste. O país teve sua população quadruplicada em

aproximadamente 70 anos, eram 51 milhões de pessoas em 1950 e 208 milhões em 2019 (IBGE, 2019). O desenvolvimento econômico e industrial juntamente com o crescimento expressivo da população brasileira, tornou necessária a implantação de um sistema integrado robusto e dotado de recursos que o tornasse capaz de fornecer energia a todo o país.

No Brasil, a água é a principal fonte utilizada na geração de energia elétrica, possuindo grandes represas capazes de fornecer a energia potencial necessária para as usinas hidrelétricas suprirem a demanda por energia elétrica no país (ONS, 2019). Entretanto, nas últimas três décadas, devido à limitação da capacidade de produção das hidrelétricas por causa das grandes estiagens, principalmente no Nordeste, acarretou na redução da produção de energia elétrica de fonte hídrica.

A medida necessária para suprir a demanda brasileira foi o investimento em fontes alternativas de energia, garantindo o contínuo fornecimento de energia elétrica para todas as regiões do país. Devido à utilização de fontes alternativas de energia elétrica, o perfil da matriz elétrica brasileira está se modificando continuamente em decorrência das grandes proporções que os sistemas eólicos e fotovoltaicos estão alcançando.

A energia elétrica advinda de usinas fotovoltaicas e eólicas situadas no território brasileiro é responsável por suprir mais de 8,3% dos consumidores, o que equivale a aproximadamente 20 milhões de pessoas, capacidade esta que está em processo de expansão, garantindo um cenário favorável a novos investimentos (nacionais e internacionais) na área (ONS, 2019).

Dentre os fatores que mais influenciam na viabilidade de implantação de sistemas eólicos e fotovoltaicos, as condições climáticas merecem destaque em decorrência da necessidade de se realizar estudos que possibilitem a avaliação da presença de vento e/ou irradiação solar adequados na localidade estudada de modo que seja possível garantir o retorno para o investimento realizado. Para tanto, foram desenvolvidos os Atlas do eólicos e solar do Brasil, que especificam a velocidade do vento e os índices de irradiação incidente em todas as regiões do país.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é produzir/implementar um sistema capaz de identificar a viabilidade de instalação de um parque eólico ou fotovoltaico, a partir utilização de um banco de dados relacionado às condições climáticas da localidade em estudo, evidenciando os potenciais retornos que cada um dos sistemas apresenta.

1.2 Organização do Trabalho

No Capítulo 1 é introduzido o tema do trabalho especificando os assuntos abordados em todos os capítulos. No Capítulo 2 são apresentados alguns conceitos a respeito da matriz elétrica nacional, enfatizando as estimativas de oferta de energia elétrica nos próximos anos, evidenciando a proporção atual que cada fonte geradora apresenta, como também as tendências para os próximos anos. No Capítulo 3 são introduzidas as características e os princípios de funcionamento de um sistema eólico, enfatizando os fatores potenciais que contribuem para uma maior produção de energia elétrica. No Capítulo 4 é realizada a análise de viabilidade econômica dos projetos, evidenciando os fatores que mais influenciam nas tomadas de decisão; são apresentados dois investimentos feitos no setor elétrico, evidenciando os fatores que mais influenciaram no processo; é elaborada uma metodologia de comparação entre um sistema eólico e fotovoltaico, na qual todas as estimativas financeiras são evidenciadas em função do banco de dados obtidos nos mapas eólico e solar brasileiros. No Capítulo 5 são feitas as considerações finais sobre o trabalho.

Capítulo 2

Energia Eólica

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos a respeito da conversão de energia eólica em energia elétrica, especificando os principais fatores inerentes a este processo. Também são apresentados dados referentes aos últimos históricos de produção a partir da energia eólica, evidenciando o potencial crescimento do setor que conta com um bom custo-benefício.

2.1 Breve Histórico

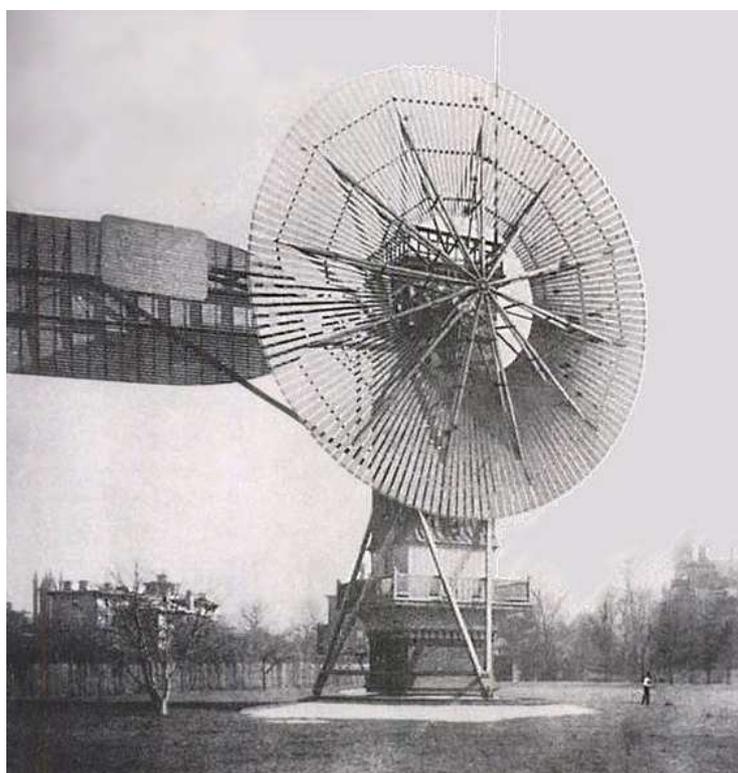
O vento, desde a antiguidade, foi responsável por realizar atividades na sociedade, seja pelo transporte de sementes na natureza na pré-história até o transporte das caravelas durante a expansão colonial do mercantilismo que acarretou na colonização de quase todas as regiões habitáveis do planeta Terra.

Com o passar dos anos, o potencial tecnológico aumentou, sendo assim, em algum momento o vento seria utilizado para produzir energia elétrica. As primeiras menções ao uso da energia do vento têm origem no oriente: Índia, Tibete, Afeganistão e Pérsia (atual Irã). Os restos de um moinho de vento foram descobertos no Egito, próximo a Alexandria, com uma suposta idade de 3000 anos. Não há, contudo, nenhuma prova convincente de que os egípcios, fenícios, gregos ou romanos conhecessem, na verdade, os moinhos de vento. Aponta-se a máquina pneumática e o órgão acionado pelo vento, por Heron de Alexandria, há cerca de 2000 anos, como as primeiras referências (PINTO, 2013).

O primeiro aerogerador foi desenvolvido por Charles Francis Brush, na cidade

de Cleveland, nos Estados Unidos, iniciando sua construção em 1887 e finalizando-a em 1888. A torre do aerogegador tinha 18 m de altura e possuía 144 pás, todas com 8,5 m de comprimento. O primeiro modelo construído apresentava uma pequena capacidade de conversão de energia elétrica, fornecendo no máximo 12 kW em corrente contínua, sendo utilizado para carregamento de baterias, as quais eram destinadas principalmente ao fornecimento de energia a 350 lâmpadas incandescentes (SPERA, 2009). O aerogerador citado está ilustrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – A turbina eólica de Brush.



Fonte: Spera, 2009.

Com o passar dos anos, os aerogeradores passaram a ter maior aplicabilidade nos sistemas elétricos dos países, sendo utilizados de forma isolada da rede, denominado *off-grid* ou interligado à rede, sendo caracterizado de *on-grid*. O sistema *off-grid* funciona de forma autônoma, sendo aplicado em regiões marítimas ou rurais afastadas onde não há viabilidade de interligação em sistemas elétricos devido ao empecilho de realizar a conexão utilizando de linhas de transmissão. O sistema *on-grid* é comumente utilizado em sistemas interligados juntamente com outras fontes geradoras de energia elétrica, como usinas fotovoltaica, hidrelétrica, nuclear, biomassa, termoelétrica, entre outras.

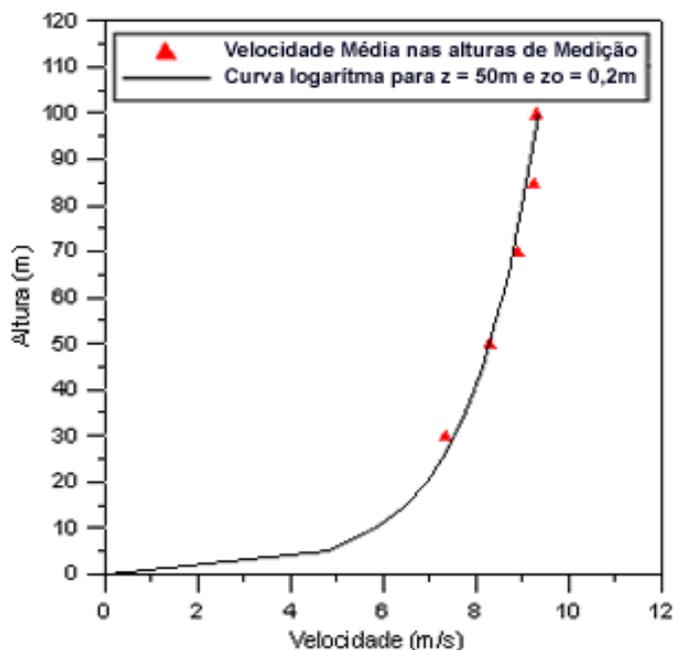
A primeira turbina eólica conectada a um sistema elétrico foi instalada na Dinamarca, em 1976. No Brasil, o sistema eólico começou a tomar grandes proporções a partir de 2002, ano em que o governo brasileiro criou o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), que tinha como objetivo aumentar as parcelas das contribuições das fontes alternativas de energia elétrica. A partir de então, parcerias entre setores público e privado, por meio de leilões e concessões públicas, possibilitaram a expansão da energia eólica no país (ANEEL, 2005).

Em 2003, a produção de energia elétrica no Brasil provinda de aerogeradores era muito pequena, não ultrapassando 22 MW (megawatts), alcançando, aproximadamente, 1 GW (gigawatts) em 2011. Atualmente a capacidade máxima de produção é de 15 GW, graças a 601 parques eólicos instalados com mais de 7 mil aerogeradores distribuídos em 12 estados, sendo que 86% da capacidade total está alocada no Nordeste (CEPEL-CRESESB, 2014).

2.2 Principais Características dos Ventos

Cada localidade no mundo apresenta características climáticas e temporais específicas, dessa forma, a viabilidade de implementação de um sistema eólico deve ser estudada particularmente para cada região no mundo. Para que seja possível a instalação de um parque eólico em um determinado lugar, é desejado que a região seja uma planície e que não haja muita oscilação na mudança no sentido dos ventos. A velocidade do vento varia de acordo com a altura em relação ao solo, como pode ser visto na Figura 2.2. Essa relação evidencia que conforme as torres do aerogeradores ficam mais altas, maior se torna a capacidade de conversão de energia elétrica.

O ideal para a instalação de um parque eólico é que os obstáculos sejam inexistentes, para que não haja dispersão, nem diminuição na velocidade do vento, pois dessa maneira os custos de produção da energia não tendem a diminuir, devido à potência instalada variar com o cubo da velocidade do vento. Um fator importante existente devido ao posicionamento dos aerogeradores é o efeito rasteira, pois o vento que passa por um aerogerador tem um potencial energético muito menor do que antes de serem transpassados pelas turbinas, para isso, faz-se necessário o posicionamento estratégico

Figura 2.2 – Velocidade do vento em função da altura.

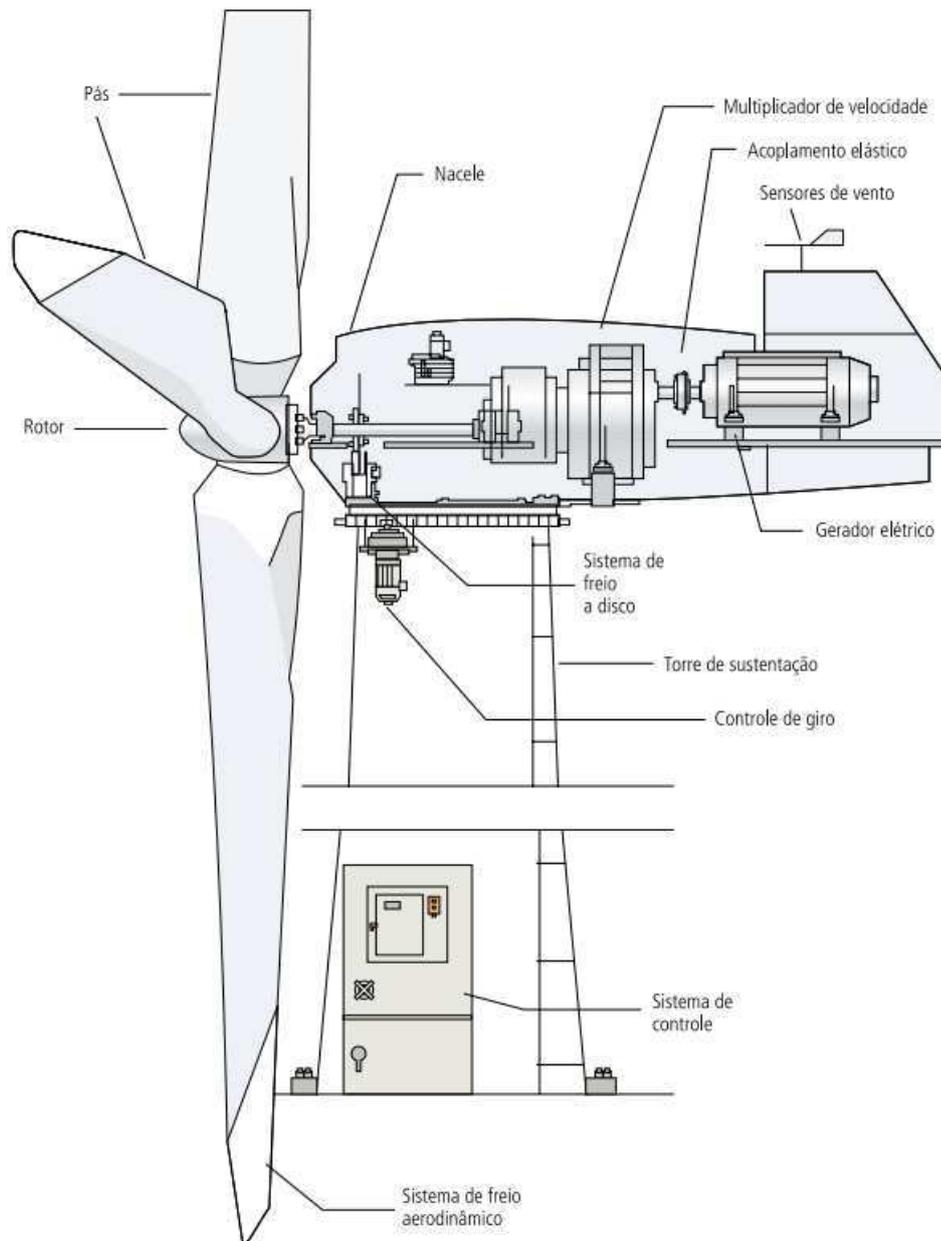
Fonte: ANEEL, 2007.

das torres, de forma que não sejam influenciadas por esse fenômeno.

2.3 O processo de conversão de energia eólica em elétrica

Denomina-se energia eólica a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento). Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, para a geração de eletricidade (ANEEL, 2005). As partes constituintes de um aerogerador estão ilustradas na Figura 2.3.

A torre é a estrutura feita de aço ou de concreto, responsável pela sustentação do rotor e da nacela; as pás são responsáveis por proporcionar o movimento circular do rotor; o rotor é responsável pela fixação das pás e pela transmissão do movimento de rotação ao eixo de movimento; a nacela é o compartimento que fica no topo do aerogerador, abrigando em seu interior o gerador, o transformador, caixa de multiplicação, entre outros; a caixa de multiplicação é responsável por aumentar a rotação proveniente do rotor; o gerador converte a energia mecânica em energia elétrica; o sensor de direção mede a direção instantânea do vento incidente, acionando o controle de giro quando

Figura 2.3 – Partes constituintes de um aerogerador.

Fonte: ANEEL, 2005.

necessário para fazer com que a nacelle gire e posicione as pás na direção preferencial dos ventos.

2.4 Características do Sistema Eólico

Para que a energia eólica seja considerada tecnicamente aproveitável, é necessário que a densidade do vento seja maior ou igual a 500 W/m^2 , a uma altura de 50 m , o

que requer uma velocidade mínima do vento de 7 m/s a 8 m/s (GRUBB M. J.; MEYER, 1993). Para um aerogerador funcionar é preciso que a velocidade do vento seja superior a velocidade de partida, caracterizada por uma velocidade do vento que varia entre 3 m/s e 4 m/s , e inferior a velocidade de corte, que consiste em uma velocidade do vento entre 25 m/s e 26 m/s .

Segundo a Organização Mundial de Meteorologia, em apenas 13% da superfície terrestre o vento apresenta velocidade média igual ou superior a 7 m/s , a uma altura de 50 m . Essa proporção varia muito entre regiões e continentes, chegando a 22% na Europa Ocidental (ANEEL, 2005), como pode ser observado na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Distribuição da área de cada continente segundo a velocidade média do vento de 50 m/s

Região/Continente	$6,4\text{ m/s}$ a 7 m/s	7 m/s a $7,5\text{ m/s}$	$7,5\text{ m/s}$ a $11,9\text{ m/s}$
África	12 %	11 %	1 %
América do Norte	12 %	8 %	15 %
América Latina	8 %	5 %	5 %
Europa Ocidental	8,6 %	10 %	22 %
Ásia	6 %	2 %	5 %
Total do Globo	10 %	7 %	6 %

2.5 Classes das turbinas eólicas

Existem quatro classes de turbinas eólicas que levam em conta como condição de classificação a velocidade extrema (de rajada) do vento que pode ocorrer dentro de um período de 50 anos, a média anual do vento e o percentual de turbulência que o local apresenta.

As classes padronizadas pela *International Electrotechnical Commission* (IEC), em sua norma 61400-1, são comumente usadas e refletem a dependência do projeto em locais com ventos de desempenho forte ou fraco. A norma considera os valores normais para densidade do ar como sendo de $1,225\text{ kg/m}^3$. Sistemas eólicos em classes superiores (velocidade do vento menor) têm rotores maiores a uma mesma potência nominal e frequentemente também uma maior altura da torre (PINTO, 2013). As classes de turbina eólica são apresentadas na tabela 2.2.

Em que: V_m é a velocidade média anual do vento; V_{ref} é a máxima velocidade do

Classe da turbina eólica	I	II	III	IV
$V_{ref}(m/s)$	50	42,5	37,5	30
$V_m(m/s)$	10	8,5	7,5	6
$V_{raj50} = 1,4V_{ref}$	70	59,5	52,5	42
$V_{raj1} = 1,05V_{raj50}$	52,5	44,6	39,4	31,50
$AI_{15}\%$	18	18	18	18
a	2	2	2	2
$BI_{15}\%$	16	16	16	16
a	3	3	3	3

Tabela 2.2 – Classes das turbinas eólicas

vento que se espera como um valor médio em um período de 10 min, chamada de velocidade de referência do vento; V_{raj50} é a máxima velocidade extrema (rajada) em um período de 50 anos. V_{raj1} se refere ao período de 1 ano; $AI_{15m/s}(\%)$ é a intensidade de turbulência para ventos a 15 m/s. As categorias A (para valores maiores) e B (para valores menores) caracterizam o projeto para diferentes condições de turbulência, que independem da velocidade do vento das classes citadas; a é o desvio padrão da velocidade longitudinal do vento (turbulência) (PINTO, 2013).

2.6 Classificação das turbinas eólicas

As turbinas eólicas são classificadas de acordo com o eixo ao redor do qual as pás das turbinas giram. Há turbinas que giram no eixo vertical e outras que giram no eixo horizontal. As turbinas que giram no eixo vertical são a minoria e apresentam a desvantagem de ficarem próximas ao solo, onde o vento é mais turbulento e apresenta uma velocidade menor (PINTO, 2013).

O Rotor de Darrieus, ilustrado na Figura 2.4, desenvolvido por George Jean Marie Darrieus em 1925, foi a única máquina do tipo eixo vertical que teve sucesso comercial (PINTO, 2013).

O Rotor H, ilustrado na Figura 2.5 é outro tipo de rotor de eixo vertical baseada no rotor de Darrieus, diferenciando-se pelo fato de suas pás serem retas. Esse modelo foi implementado e testado na Europa, mas não obteve êxito.

O modelo de turbina que prevalece mundialmente é a de eixo horizontal, ilustrado na figura 2.3, devido ao fato de apresentar várias vantagens em relação ao outro modelo:

Figura 2.4 – Rotor de Darrieus.

Fonte: (SANDIA, 2006).

Figura 2.5 – Rotor H.

Fonte: Stahlkocher, 2007.

apresenta mecanismo de direção; a área da pá é menor, se comparada às turbinas de eixo vertical; o gerador fica localizado no alto da torre, onde os ventos são mais uniformes e mais velozes (PINTO, 2013).

2.7 Parâmetros que Influenciam o Sistema Eólico

O vento é o principal influenciador em um sistema eólico, pois a capacidade de conversão de energia eólica em elétrica é diretamente proporcional ao cubo da velocidade do vento, como se pode observar na equação 2.1.

$$P = \frac{1}{2} \rho A C v^3 \eta \quad (2.1)$$

Em que: P é a potência média do vento em Watts (W); ρ é a densidade do ar em kg/m^3 ; A é a área de varredura do rotor (em m^2); C é o coeficiente aerodinâmico de potência do rotor, v é a velocidade média do vento (m/s) e η é o rendimento do aerogerador.

A equação 2.1 evidencia que aerogeradores com torres mais altas possuem potências nominais muito maiores do que os instalados a alturas menores, tendenciando a construção de torres cada vez maiores.

A quantidade de pás de uma turbina varia de acordo com a aplicação. Para gerar eletricidade, o adequado é que o aerogerador opere de forma suave, por isso que é utilizada uma quantidade reduzida de pás, pois evita que turbulências alterem consideravelmente a velocidade de rotação, que é o que ocorre em cataventos utilizados para o bombeamento de água.

Em uma turbina eólica há perdas mecânicas, elétricas e magnéticas. As perdas mecânicas são associadas ao atrito entre os componentes e entre as engrenagens do multiplicador de velocidade. As perdas elétricas se devem ao efeito Joule e ao efeito corona. As perdas magnéticas se devem à histerese, às correntes parasitas e à saturação magnética do gerador.

2.7.1 O Limite de Lanchester-Betz-Joukowski

As pás das turbinas dos aerogeradores são contruídas com uma aerodinâmica que possibilitem o movimento circular das mesmas com o menor arrasto possível. A teoria desenvolvida separadamente por Frederick W. Lanchester, Nikolai Zhukovsky Yegorovich e Albert Betz resulta na relação entre a eficiência das pás de um aerogerador e a velocidade de chegada e de saída do vento. O estudo afirma que a eficiência das

pás é máxima quando o $V_0/V_{in} = \lambda = 1/3$, ou seja, quando a velocidade do vento de saída for $1/3$ da velocidade do vento de chegada (COSTA, 2016).

2.8 Atlas do Potencial Eólico Brasileiro

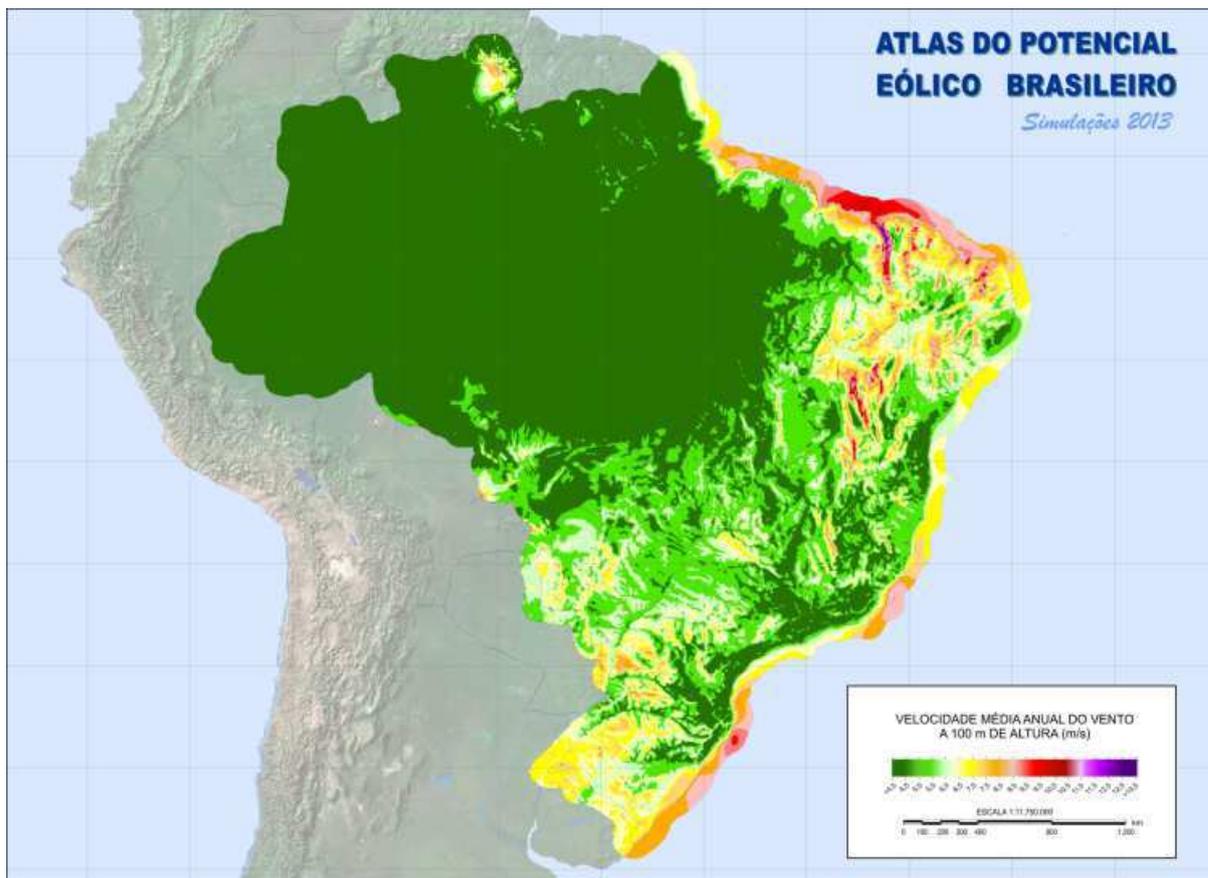
O Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) concebeu em 2001 o primeiro Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, sendo um importante marco para o setor eólico nacional (CEPEL, 2001). Com o passar dos anos, a tecnologia se desenvolveu ainda mais, proporcionando a construção de aerogeradores maiores, necessitando de uma atualização dos dados obtidos em 2001. Com esse objetivo, o então Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação promoveu a atualização do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro de 2001.

O centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) em parceria com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) foram responsáveis pela alocação da infraestrutura e de profissionais do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). O trabalho realizado conjuntamente pelo CEPEL e pelo INPE possibilitou a estimativa do potencial eólico do território brasileiro. As alturas escolhidas para estimar a velocidade e direção do vento foram 30 m , 50 m , 80 m , 100 m , 120 m , 150 m e 200 m . Esses valores foram escolhidos baseados em resultados da consolidação de várias adaptações do modelo *Regional Atmospheric Modeling System* para as condições climáticas brasileiras (CEPEL, 2013).

A simulação resultou em mapas correspondentes às alturas especificadas, mas para este projeto os mapas utilizados são da velocidade do vento a 100 m e a 120 m de altura, ilustrados nas Figuras 2.6 e 2.7.

Pode ser observado na Figura 2.6 que uma pequena parcela da região do Brasil possui ventos com velocidade maior ou igual a 8 m/s , e que o litoral brasileiro, principalmente o nordestino, é a região do país que apresenta o maior potencial de produção de energia elétrica advinda de energia eólica. Evidencia-se que a região amazônica não é favorável à instalação de usinas eólicas devido à sua baixa velocidade do vento.

Pode se observado na Figura 2.7 que o Nordeste é a região brasileira mais propícia à instalação de aerogeradores a uma altura de 120 m de altura. O interior nordestino

Figura 2.6 – Velocidade média do vento a 100 m de altura.

Fonte: CEPEL, 2013.

destaca-se pelas suas localidades com elevadas velocidades do vento a uma altura de 120 m em relação ao solo que chegam até aproximadamente 12 m/s. As regiões Norte e Centro-Oeste não são favoráveis a instalações de parques eólicos devido aos seus ventos quases estáticos.

Figura 2.7 – Velocidade média do vento a 120 m de altura.



Fonte: CEPEL, 2013.

Capítulo 3

Energia Solar

É a partir do sol que se dá a evaporação, origem dos ciclo das águas, que possibilita o represamento e a conseqüente geração de eletricidade (hidreletricidade). A irradiação solar também induz a circulação atmosférica em larga escala, causando os ventos. Assim, a energia eólica também é uma forma indireta de manifestação da energia solar, já que os ventos se formam a partir da conversão da irradiação solar em energia cinética, em função de um balanço diferenciado nas diferentes latitudes entre a irradiação solar incidente e a irradiação terrestre emitida. Petróleo, carvão e gás natural foram gerados a partir de resíduos de plantas e animais que originariamente obtiveram do recurso solar a energia necessária ao seu desenvolvimento. É também por meio do sol que a matéria vegetal, como a cana-de-acúcar, realiza a fotossíntese e se desenvolve para, posteriormente, ser transformada em combustível nas usinas (PINHO J. T.; GALDINO, 2014).

O Sol fornece anualmente, para a atmosfera terrestre, $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia. Trata-se de um valor considerável, correspondendo a 10000 vezes o consumo mundial de energia neste período. Este fato vem indicar que, além de ser responsável pela manutenção da vida na Terra, a irradiação solar constitui-se numa inesgotável fonte energética, havendo um enorme potencial de utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia (térmica, elétrica, etc.) (BRITO, 2006).

A média anual de irradiação global apresenta uma boa uniformidade no Brasil, com médias relativamente altas em todo o território. Os valores de irradiação solar global incidente em qualquer região do território brasileiro ($1500-2500 \text{ Wh/m}^2$) são superiores

aos da maioria dos países europeus, como Alemanha (900-1250 Wh/m^2), França (900-1650 Wh/m^2) e Espanha (1200-1850 Wh/m^2), locais onde projetos de aproveitamentos solares são amplamente disseminados (PEREIRA E. B; MARTINS, 2017).

3.1 Breve Histórico

A energia solar fotovoltaica é caracterizada como a energia obtida utilizando o efeito fotoelétrico para converter a irradiação eletromagnética solar em energia elétrica, fazendo-se necessária a utilização de materiais semicondutores para a realização do processo.

O efeito fotovoltaico é o fenômeno físico que permite a conversão direta da luz em eletricidade. Esse fenômeno ocorre quando a luz, ou a irradiação eletromagnética do sol, incide sobre uma célula composta de materiais semicondutores com propriedades específicas (GAZOLI, 2012).

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839 por Edmond Becquerel que verificou que placas metálicas, de platina ou prata, mergulhadas num eletrólito, produziam uma pequena diferença de potencial quando expostas à luz (BRITO M. C.; VALLÊRA, 2006).

O efeito fotovoltaico dá-se em materiais da natureza denominados semicondutores que se caracterizam pela presença de bandas de energia onde é permitida a presença de elétrons (banda de valência) e de outra onde totalmente “vazia” (banda de condução) (BRITO, 2006).

As camadas semicondutoras da célula fotovoltaica podem ser fabricadas com vários materiais diferentes, sendo o mais comum o silício. Cerca de 95% de todas as células fotovoltaicas fabricadas no mundo são de silício, pois é um material muito abundante e barato (GAZOLI, 2012). Seus átomos se caracterizam por possuírem quatro elétrons que se ligam aos vizinhos, formando uma rede cristalina. Ao adicionarem átomos com cinco elétrons de ligação, como o fósforo, por exemplo, haverá um elétron em excesso que não poderá ser emparelhado e que ficará "sobrando", fracamente ligado a seu átomo de origem. Isto faz com que, com pouca energia térmica, este elétron se livre, indo para a banda de condução. Diz-se assim, que o fósforo é um dopante doador de

elétrons e denomina-se dopante n ou impureza n (BRITO, 2006).

A primeira célula solar foi produzida conjuntamente pelo engenheiro Daryl Chapin, pelo químico Calvin Fuller e pelo físico Gerald Pearson, sendo apresentada oficialmente por eles em 1954 na reunião anual da *National Academy of Sciences*, em Washington, Estados Unidos (BRITO M. C.; VALLÊRA, 2006).

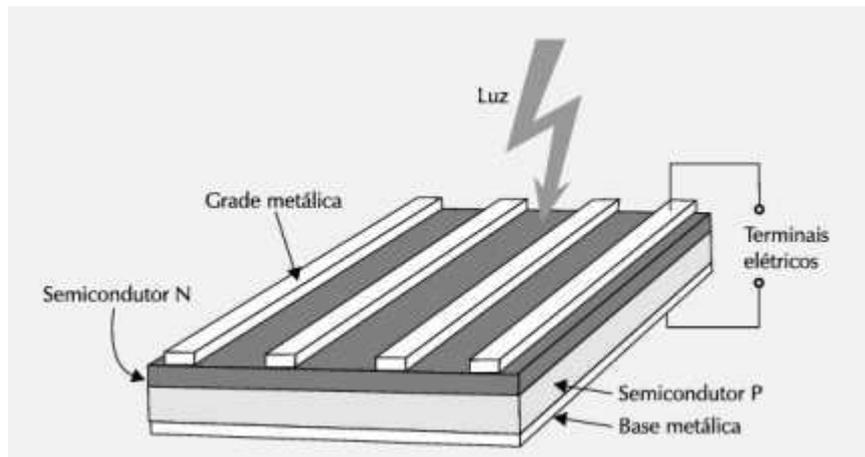
A utilização de sistemas solares fotovoltaicos na geração de energia elétrica começou a ser implementada primeiramente na alimentação das baterias de satélites. Após a crise mundial energética, que ocorreu entre 1973 e 1974, foi que fontes alternativas de energia foram ganharam espaço no cenário mundial, de maneira que, o potencial da energia solar fotovoltaica começou a ser observado.

3.2 Célula Fotovoltaica

A estrutura de um célula fotovoltaica, ilustrada na Figura 3.1, é constituída por duas camadas de materiais semicondutores (um do tipo P e o outro do tipo N) por uma grade de coletores metálicos superior e uma base metálica inferior. A grade e a base metálica inferior são os terminais elétricos que fazem a coleta da corrente elétrica produzida pela ação da luz. A base inferior é uma película de alumínio ou de prata. A parte superior da célula, que recebe a luz, precisa ser translúcida, sendo os contatos elétricos contruídos de forma de uma fina grade metálica impressa na célula (GAZOLI, 2012).

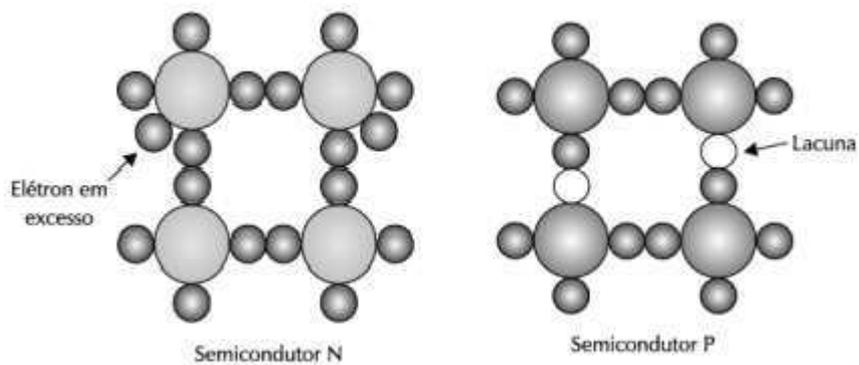
O material do tipo P apresenta falta de elétrons e o material tipo n possui um excedente de elétrons. Há diferença de concentração de elétrons nas duas camadas da célula, os elétrons fluem da camada tipo N para a camada tipo P, dessa forma, surge um campo elétrico dentro da zona de depleção no interior da célula.

As estruturas moleculares dos materiais P e N estão ilustrados na Figura 3.2. O material N possui elétrons em excesso, causado pela presença de um elétron adicional em torno de alguns átomos da estrutura. Devido ao excesso de elétrons, o material é negativo, pois o elétron é uma partícula de carga negativa. Quando duas camadas de materiais P e N são colocadas em contato, formando o que se chama de junção semicondutora, os elétrons da camada N migram para a camada P e ocupam os espaços

Figura 3.1 – Estrutura de uma célula fotovoltaica.

Fonte: (GAZOLI, 2012).

vazios das lacunas (GAZOLI, 2012).

Figura 3.2 – Estruturas moleculares dos semicondutores P e N.

Fonte: (GAZOLI, 2012).

A migração dos elétrons de uma coluna para outra origina um campo elétrico e uma barreira de potencial entre as duas camadas. Os elétrons e lacunas permanecem estáticos nessa barreira até o momento em que a luz incide sobre o material, pois a célula fotovoltaica é tão fina que a luz penetra o material e descarrega sua energia sobre os elétrons, fazendo com que eles tenham energia suficiente para vencer a barreira de potencial e se movimentar da camada N para a camada P. Dessa forma, surge uma diferença de potencial de aproximadamente 0,6 V entre os dois lados da célula. Havendo um circuito fechado, os elétrons circulam e formam uma corrente elétrica.

Uma célula fotovoltaica sozinha produz pouca energia e apresenta uma diferença de

potencial muito baixa, mas várias células podem ser agrupadas em série e em paralelo para formar os módulos fotovoltaicos e fornecer uma grande quantidade de energia elétrica (GAZOLI, 2012).

3.2.1 Tipos de Células Fotovoltaicas

As células fotovoltaicas são formadas, em sua maioria, por silício, podendo ser constituídas de cristais monocristalinos, policristalinos ou de silício amorfo.

Silício Monocristalino

A célula de silício monocristalino é historicamente a mais usada e comercializada como conversor direto de energia solar em eletricidade e a tecnologia para sua fabricação é um processo básico muito bem constituído. A fabricação da célula de silício começa com a extração do cristal de dióxido de silício. Este material é desoxidado em grandes fornos, purificado e solidificado. Este processo atinge um grau de pureza em 98 e 99% o que é razoavelmente eficiente sob o ponto de vista energético e custo. Este silício para funcionar como células fotovoltaicas necessita de outros dispositivos semicondutores e de um grau de pureza maior devendo chegar na faixa de 99,9999%. Dentre as células fotovoltaicas que utilizam o silício como material base, as monocristalinas são, em geral, as que apresentam as maiores eficiências. As fotocélulas comerciais obtidas com o processo descrito atingem uma eficiência de até 15% podendo chegar a 18% em células feitas em laboratórios (BRITO M. C.; VALLÊRA, 2006).

Silício Policristalino

As células de silício policristalino apresentam eficiências comerciais entre 13% e 15%, ligeiramente inferiores às das células monocristalinas, entretanto, seu custo de fabricação é menor do que o das células monocristalinas e isso compensa a redução de eficiência (GAZOLI, 2012).

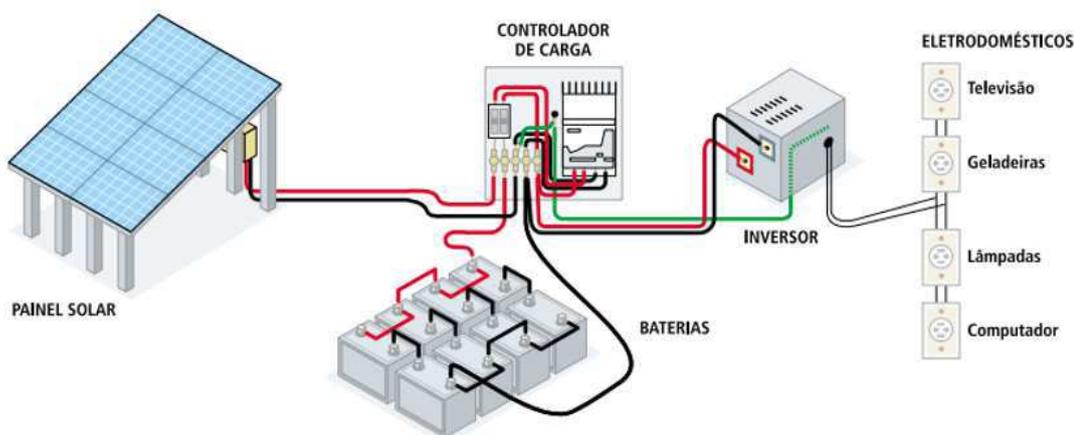
Silício Amorfo

A célula de silício amorfo foi a primeira tecnologia de filme fino desenvolvida, apresentando uma eficiência baixa (entre 5% e 8%). Sua aplicabilidade em módulos fotovoltaicos tornou-se inviável com o desenvolvimento de semicondutores constituídos do próprio silício, mas com maiores eficiências.

3.3 Componentes de um Sistema Fotovoltaico

Um sistema de geração fotovoltaico de energia elétrica, ilustrado na Figura 3.3 é constituído por: painel solar; controlador de carga; inversor; baterias.

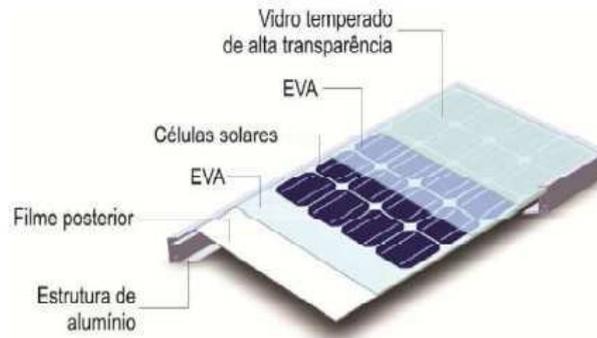
Figura 3.3 – Sistema de geração fotovoltaico de energia elétrica.



Fonte: Ministério de Minas e Energia, 2003

3.3.1 Painel Fotovoltaico

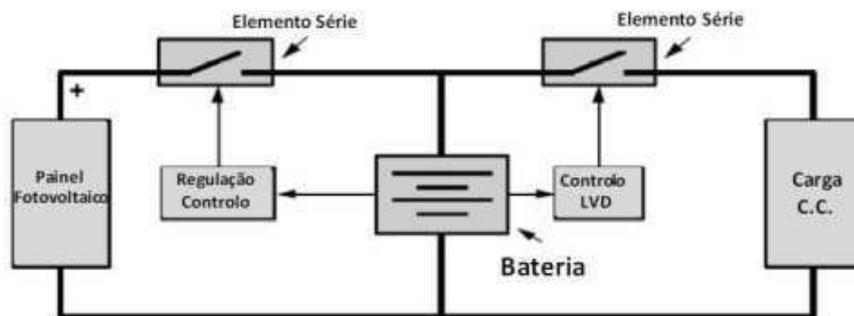
Um painel fotovoltaico é composto por células fotovoltaicas conectadas em série e em paralelo, possibilitando o surgimento de tensão nos terminais dos módulos. A estrutura física de uma placa fotovoltaica é ilustrada na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Placa fotovoltaica.

Fonte: CRESESB, 2014

3.3.2 Controlador de Carga

Os controladores de carga são dispositivos responsáveis por regular a carga e descarga das baterias dos sistemas fotovoltaicos, além de protegê-las de possíveis sobrecargas e descargas profundas. O circuito elétrico simplificado de um controlador de carga é ilustrado na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Circuito elétrico de um controlador de carga.

Fonte: Viana, 2010

3.3.3 Inversor

O inversor é o dispositivo responsável por converter energia elétrica em corrente contínua (CC) provinda das placas solares em energia elétrica em corrente alternada (CA) com amplitudes e frequências determinadas.

3.3.4 Baterias

Uma bateria é um conjunto de células conectadas em série que são capazes de armazenar energia elétrica na forma de energia química. A utilização de baterias também facilita a utilização de sistemas fotovoltaicos desconectados do SEP para atender consumidores específicos alocados em locais isolados, sendo as baterias eletroquímicas as mais utilizadas nessas situações.

Em sistemas fotovoltaicos isolados da rede elétrica (*off-grid*), o uso de dispositivos de armazenamento de energia se faz necessário para atender a demanda em períodos nos quais a geração é nula ou insuficiente (à noite ou em dias chuvosos ou nublados, com baixos níveis de irradiância solar). Assim, parte da energia solar convertida em energia elétrica pelos módulos fotovoltaicos durante o dia é armazenada para ser usada em outros momentos para atender à demanda (CEPEL-CRESESB, 2015).

3.4 Parâmetros Elétricos de um Módulo Fotovoltaico

Um módulo fotovoltaico possui alguns parâmetros que o caracterizam, sendo a potência de pico (W_p) a comumente utilizada. A partir da curva $I \times V$, ilustrada na Figura 3.6, é possível determinar os parâmetros que classificam as células fotovoltaicas.

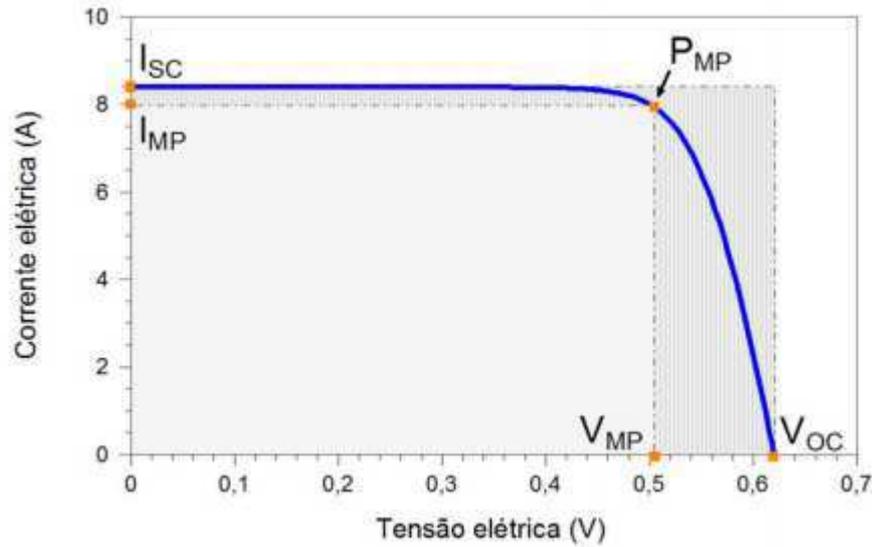
Em que:

Tensão de circuito aberto (V_{oc}): tensão existente entre os terminais de uma célula quando não há corrente elétrica circulando, sendo a máxima tensão que a célula é capaz de produzir. V_{oc} depende das corrente de saturação (I_0) e da corrente elétrica fotogerada (I_l), como pode ser observado na equação 3.1

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_l}{I_0} + 1\right) \quad (3.1)$$

Corrente de curto-circuito (I_{sc}): Máxima corrente que uma célula pode fornecer, medida quando a tensão entre os terminais da célula é igual a zero.

P_{MP} , também conhecido na literatura como W_p é a potência máxima ou de pico de um módulo fotovoltaico. Esse ponto é encontrado com I_{MP} e V_{MP} que são, respectivamente, a corrente de potência máxima e a tensão de potência máxima.

Figura 3.6 – Curva I x V de um módulo fotovoltaico.

Fonte: CRESESB, 2014

Outro termo importante e que deve ser levado em consideração na avaliação de um módulo fotovoltaico é o Fator de Forma (FF), que é a razão entre a máxima potência fornecida pela célula e o produto da corrente de curto-circuito com a tensão de circuito aberto, como pode ser observado na equação 3.2

$$FF = \frac{V_{MP}I_{MP}}{V_{OC}I_{SC}} \quad (3.2)$$

Quando o Fator de Forma tende a 1, implica que a curva $I \times V$ tende a se aproximar de um quadrado perfeito e que o sistema apresenta menos perdas resistivas, aumentando a eficiência do sistema.

A Eficiência (η), relação entre a potência solar incidente e a potência de saída, é outro fator que busca sempre ser melhorado por meio do desenvolvimento de novos materiais com melhores propriedades químicas. A eficiência do processo de conversão de energia solar em energia elétrica é descrito pela equação 3.3.

$$\eta = \frac{I_{sc}V_{oc}FF}{AG}100\% = \frac{P_{MP}}{AG}100\% \quad (3.3)$$

Onde A é a área da célula em m^2 e G é a irradiância solar incidente em W/m^2 .

3.5 Atlas Brasileiro de Energia Solar

A primeira edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar, desenvolvida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, foi divulgada em 2006 e contava com uma base de dados de 10 anos de análise dos satélites da série GOES. A segunda edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar foi lançada pelo INPE em 2017, contando com a cooperação de pesquisadores de algumas instituições do Brasil.

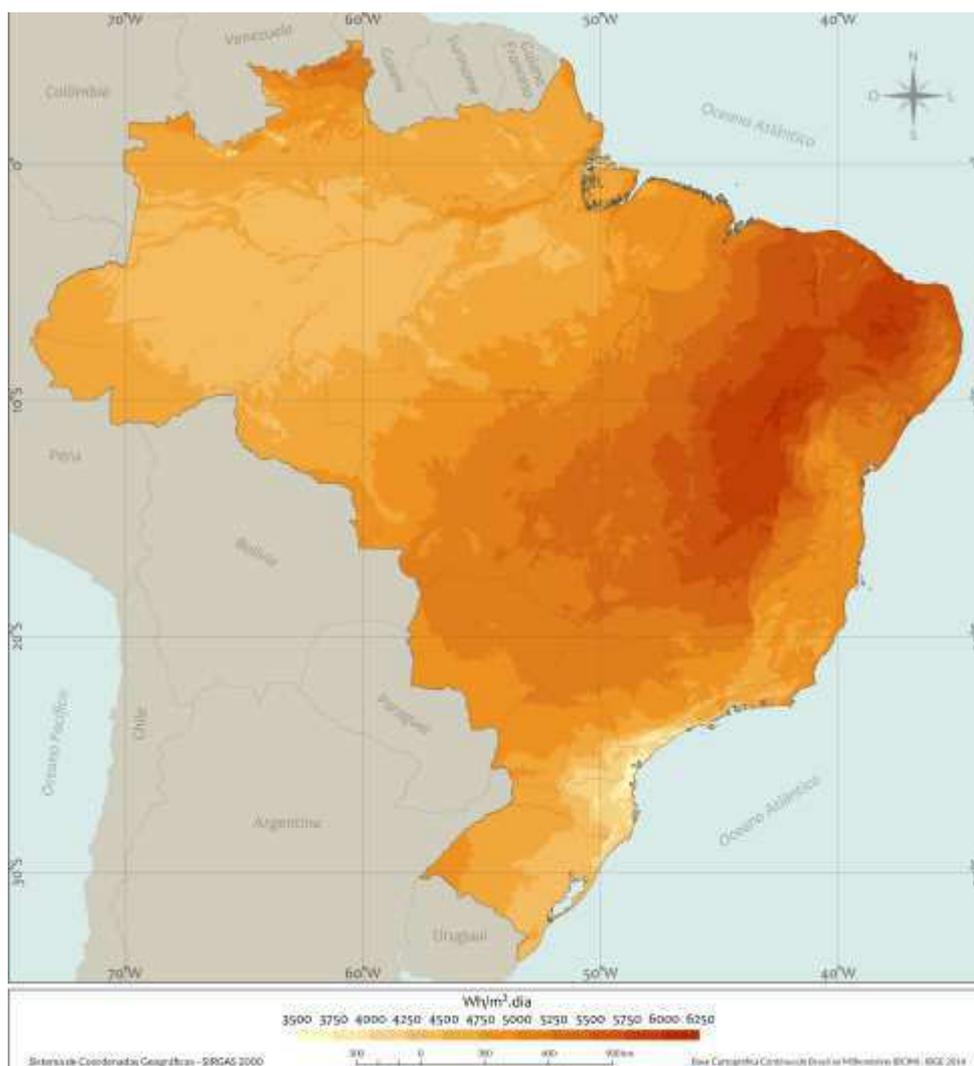
O Atlas Brasileiro de Energia Solar fornece as medidas de irradiância (W/m^2) ou irradiação (Wh/m^2 ou J/m^2) em todo o território nacional. Esses dados são influenciados pelos seguintes fatores: altitude; longitude; índice de pluviosidade local; média anual da temperatura.

3.5.1 Mapas de Irradiação

O estudo desenvolvido pelo INPE fornece alguns gráficos que abordam vários fatores das condições climáticas das regiões do país. O mapa eólico nacional de irradiação anual, ilustrado na Figura 3.7, fornece a média anual do índice de irradiação em todas as regiões do país.

As regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste, como pode ser observado na figura 3.7, apresentam os maiores índices de irradiação incidente no Brasil, por isso, essas regiões são mais propícias à instalação de parques fotovoltaicos. A região Nordeste é a região mais favorável à instalação de sistemas fotovoltaicos, pois possui os maiores índices de irradiação anual do país, chegando a aproximadamente $6000 W/m^2$.

Figura 3.7 – Total diário da irradiação global horizontal - Média anual.



Fonte: INPE, 2017.

Capítulo 4

Fundamentação Teórica

4.1 Análise de Viabilidade Econômica

Uma das principais fases de um projeto é a análise de viabilidade econômica, na qual todas as condições de preço de mercado e de retorno financeiro são estudados com a finalidade de detalhar as condições do projeto. Devido ao fato de não se necessitar de um combustível oneroso, o preço da energia depende apenas do custo dos equipamentos, da mão de obra de instalação das estações geradoras e da interligação com o Sistema Elétrico de Potência.

O valor do investimento impacta diretamente no cálculo da viabilidade econômica do projeto, assim como as condições climáticas do local. Outros parâmetros influenciam diretamente no custo de produção de energia elétrica, como o vento na energia eólica e a irradiação solar em parques solares. A potência de um aerogerador varia com o cubo da velocidade do vento, por isso, a tendência é que os futuros aerogeradores tenham torres maiores para que suas pás sejam varridas por ventos com velocidades maiores. Da mesma forma, como novos semicondutores estão sendo estudados e desenvolvidos, a propensão é que a eficiência dos módulos solares aumentem.

Alguns métodos matemáticos apresentados pela engenharia econômica ajudam a analisar a viabilidade da implementação de um projeto, porque indicam de forma concisa as condições de mercado do projeto, evidenciando os potenciais retornos, valorizações e desvalorizações em relação ao mercado financeiro. Dentre eles, os mais utilizados são: o *Payback*, o Valor Presente líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR).

4.1.1 *Payback*

Denomina-se *Payback* ou tempo de repagamento do investimento, a quantidade de períodos de tempo que se leva para recuperar o investimento, ou seja, o tempo que o investimento leva para zerar seu fluxo acumulado (GONÇALVES, 2009). Embora seja um método popular, o *Payback* é considerado uma técnica pouco sofisticada de análise de orçamento de capital, por não considerar explicitamente o valor do dinheiro no tempo, no entanto, esta informação é ainda bastante utilizada como referencial.

O *Payback* estipulado em um grande projeto de energia eólica ou solar fotovoltaica é da ordem de anos, variando de acordo a eficiência dos equipamentos e com as condições ambientais. O *Payback* pode ser calculado pela equação 4.1.

$$Payback = \frac{Investimento\ Inicial}{Soma\ dos\ fluxos\ de\ caixa\ com\ o\ ganho\ do\ investimento} \quad (4.1)$$

O custo de 1 MW gerado por um sistema eólico é de aproximadamente...

4.1.2 Valor Presente Líquido (VPL)

O VPL é um método que tem como finalidade calcular em termos de valor presente, o impacto dos eventos futuros associados a uma alternativa de investimento. Ou seja, ele mede o valor presente dos fluxos de caixa gerados pelo projeto ao longo da sua vida útil (SAMANEZ, 2010). O VPL é calculado a partir da equação 4.2.

$$VPL = -I + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+k)^t} \quad (4.2)$$

Em que I é o investimento inicial do projeto; FC_t representa o fluxo de caixa do t -ésimo período; k é o custo do capital. O método do VPL evidencia que um investimento só é viável se o VPL for maior que zero.

4.1.3 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A TIR é uma taxa de retorno do investimento (SAMANEZ, 2007), sendo uma taxa hipotética que anula o VPL. O método da TIR não tem como objetivo definir ou

classificar se um investimento é viável ou não, mas objetiva encontrar uma taxa mínima de atratividade, i^* , que satisfaz a equação 4.3.

$$VPL = -I + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+k)^t} = 0 \quad (4.3)$$

Caso $i^* > k$, significa que o investimento é viável. Se $i^* < k$, implica que o investimento deve ser rejeitado. E, caso $i^* = k$, a decisão de investir ou não fica por conta dos gestores.

4.2 Parques Eólico e Fotovoltaico Implantados

Neste capítulo, investimentos realizados no setor elétrico são analisados para posteriormente serem usados como base para a metodologia proposta neste trabalho.

4.2.1 Complexo Eólico do Alto Sertão II

O complexo eólico do Alto Sertão II, ilustrado na Figura 4.1, é formado por um conjunto de parques de produção de energia eólica localizados nas cidades de Caetité, Guanambi, Igaporã e Pindaí, no estado da Bahia.

Figura 4.1 – Vista do complexo eólico Alto Sertão II.



Fonte: Agência envolverde jornalismo, 2013.

O complexo Alto Sertão II contém 15 parques eólicos distribuídos nos quatro muni-

cípios, abrangendo uma região de 150 km de extensão, contando com 230 aerogeradores que possuem ao total uma capacidade instalada de 386,1 MW. O investimento para instalação, orçado em R\$ 1,4 bilhão, foi realizado pela empresa Renova Energia.

Custo de Produção de Energia Eólica

No Brasil, o MWh gerado varia de acordo com a demanda e com a quantidade de água que os reservatórios possuem, pois em períodos de alta pluviosidade o preço diminui, assim como sobem em períodos de estiagem. O preço da energia eólica varia, mas fica na média de aproximadamente R\$ 200,00/MWh.

No estudo realizado foi adotado que os aerogeradores têm um período de 15 anos de garantia dado pelos fabricantes. O máximo teórico que os geradores atuais apresentam não passam de 59%, devido à incapacidade de utilizar todo o vento de varre a área da pás. O que intensifica ainda mais o baixo rendimento das turbinas são as estruturas e os componentes físicos que não apresentam alta durabilidade e a variação do vento que impossibilita uma conversão de energia máxima e constante. A capacidade máxima dos aerogeradores de converter energia eólica em energia elétrica varia entre 10% e 30%. Neste estudo foi adotado um rendimento de 30% nos cálculos utilizados. A equação 4.4 apresenta energia gerada diária máxima produzida pelo Complexo Eólico Alto Sertão.

$$E_G = P_T \eta \cdot h_f = P_E \cdot h_f = 386,1 \text{ MW} \cdot 20 \text{ h} = 7.722,0 \text{ MWh} \quad (4.4)$$

Em que: E_G é a energia gerada; P_E é a potência elétrica instalada, que é igual a potência total do aerogerador (P_T) vezes pelo seu rendimento; h_f são as horas de funcionamento e η é o rendimento do aerogerador.

Em 15 anos, a Energia Acumulada no Ano (E_{AA}) é calculada na equação 4.5.

$$E_{AA} = 7.722,0 \text{ MWh/dia} \cdot 365 \text{ dias} \cdot 15 \text{ anos} = 42,28 \text{ TWh} \quad (4.5)$$

Dessa forma, em 15 anos o empreendimento rende R\$ 8,58 bilhões, com um payback estimado de 3 anos, e com um Fluxo de Caixa anual de R\$ 571,73 milhões.

Falar dos impostos

4.2.2 Parque Solar Nova Olinda

...estruturar nas cidades

A usina fotovoltaica foi instalada na cidade de Ribeira do Piauí, no estado do Piauí, e está ilustrada na Figura 4.2 uma das maiores usinas da América Latina, contando com cerca de 930 mil placas distribuídas em uma área de aproximadamente 690 hectares. O investimento realizado pela empresa italiana Enel S.p.A foi de aproximadamente R\$ 1 bilhão.

Figura 4.2 – Vista do parque solar Nova Olinda.



Fonte: G1, 2017.

Esse valor deve-se não apenas ao uso de equipamentos mais caros, mas também à complexidade de engenharia desses projetos.

A partir de agora, espera-se alcançar 10% em 2030

Custo da Energia Fotovoltaica

No Brasil, o preço da energia elétrica proveniente de usinas fotovoltaicas varia de acordo com cada leilão, mas fica em torno de R\$ 294,00/MWh, baseado nos leilões que ocorreram em outubro de 2019.

A estimativa da vida útil de um sistema fotovoltaico tem que levar em conta algumas considerações, pois apenas os módulos fotovoltaicos têm garantia de 25 anos, enquanto que os controladores e inversores possuem vidas úteis estimadas em 10 anos.

Dessa forma, o custo de um sistema fotovoltaico que dura 25 anos tem que levar em consideração o triplo de controladores e inversores reservas para a realização de uma estimativa confiável.

A eficiência do sistema fotovoltaico é um fator que deve ser considerado no cálculo da energia, pois afeta a conversão diretamente. Sujeira nas placas, sombreamento, variação na temperatura, resistências dos cabeamento e conversão de energia influenciam negativamente a eficiência do processo, ao passo que o rendimento aceitável dessas perdas é de no máximo 50%. A energia gerada por dia de um parque solar é obtida por meio da equação 4.6.

$$E_G = P_T \cdot h_i \cdot \eta = 292 \text{ MW} \cdot h \cdot 0,5 = 1.022,0 \text{ MWh} \quad (4.6)$$

Em que: E_G é a energia gerada; P_E é a potência elétrica instalada; h_i são as horas de insolação/dia e η é o rendimento do sistema.

Em 25 anos, a Energia Acumulada no Ano (E_{AA}) é calculada na equação 4.7.

$$E_{AA} = 1.022,0 \text{ MWh/dia} \cdot 365 \text{ dias} \cdot 25 \text{ anos} = 9,325 \text{ TWh} \quad (4.7)$$

Dessa forma, em 15 anos o empreendimento rende R\$ 2,741 bilhões, com um pay-back estimado de 9 anos e meio, e com um fluxo de caixa anual de aproximadamente R\$ 110,00 milhões.

4.3 Metodologia

4.3.1 Banco de Dados do Estudo

Devido à abrangência do território brasileiro, fazer um mapeamento de todas as cidades brasileiras se tornaria muito complexo, portanto, o banco de dados do sistema é formado pelos parâmetros de algumas cidades. Ao total, 7 cidades foram escolhidas devido ao seu alto potencial de geração de energia elétrica, expostos na tabela 4.1. Dentre as cidades escolhidas, Caetité contém um parque eólico implantado, e Ribeira do Piauí contém um parque solar fotovoltaico instalado, ambas serviram como referência para o equacionamento da metodologia proposta.

Tabela 4.1 – Cidades e seus dados

Cidades	Velocidade do vento a 100 m de altura (m/s)	Velocidade do vento a 120 m de altura (m/s)	Irradiação (W/m ²)
Caetité	10	11	5750
Carnaúba dos Dantas	9,5	11	5750
Santa Luzia	9	11	6000
Santana dos Matos	11	11	5750
São Miguel do Tapuio	10	11	5750
Ribeira do Piauí	5	6,5	5750
Tianguá	12	12	5500

4.3.2 Sistema de identificação de viabilidade

O investimento realizado na usina eólica instalada em Caetité foi de 1,4 bilhões de reais, possuindo uma capacidade instalada de 386,1 MW. Com essa potência instalada, e com o preço de mercado atual da energia eólica, é possível obter um fluxo de caixa anual de 571,73 milhões de reais. A partir da premissa que o valor do investimento tem relação direta com a potência nominal do projeto, e que a partir desses dados se obtêm o fluxo de caixa anual do projeto, é possível encontrar uma relação do projeto com a velocidade do vento do local, e posteriormente, encontrar o fator multiplicativo que torna a análise do projeto válida para qualquer localidade.

A potência estimada (P_E) de uma instalação em um local diferente de Caetité é obtido multiplicando a potência que seria obtida em Caetité multiplicada pela relação entre o cubo das velocidades do vento entre as duas regiões, como pode ser observado na expressão 4.8. A partir da potência estimada, calcula-se o fluxo de caixa do projeto e verifica-se as condições de viabilidade do projeto.

$$P_E = P_C \frac{v_l^3}{v_C^3} \quad (4.8)$$

Em que: P_C seria a potência obtida no investimento caso ele fosse realizado em Caetité; v_l é a velocidade do vento do local escolhido para implantação do projeto; v_C é a velocidade do vento de Caetité, que foi a cidade de referência do projeto.

O parque solar Nova Olinda teve um investimento de 1 bilhão, resultando em uma potência instalada de 292 MW e um fluxo de caixa anual de 110 milhões. A potência estimada de um investimento em uma usina eólica é obtida pela expressão 4.9. Com

o auxílio das equações 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 foi possível estimar os dados de investimentos realizados nas cidades escolhidas.

$$P_E = P_S \frac{i_l}{i_s} \quad (4.9)$$

Em que: P_S seria a potência obtida no investimento caso ele fosse realizado em Ribeira do Piauí; i_l é índice de irradiação do local escolhido para realização do investimento; i_s é o índice de irradiação incidente do local em que o parque solar Nova Olinda está instalado.

O sistema consiste em um arquivo executável, desenvolvida no *software* Matlab versão 2018, que faz os cálculos internamente e resulta na saída dos dados obtidos em uma interface. A partir de uma análise de viabilidade econômica, é exposto na interface desenvolvida as condições de projeto para a cidade escolhida.

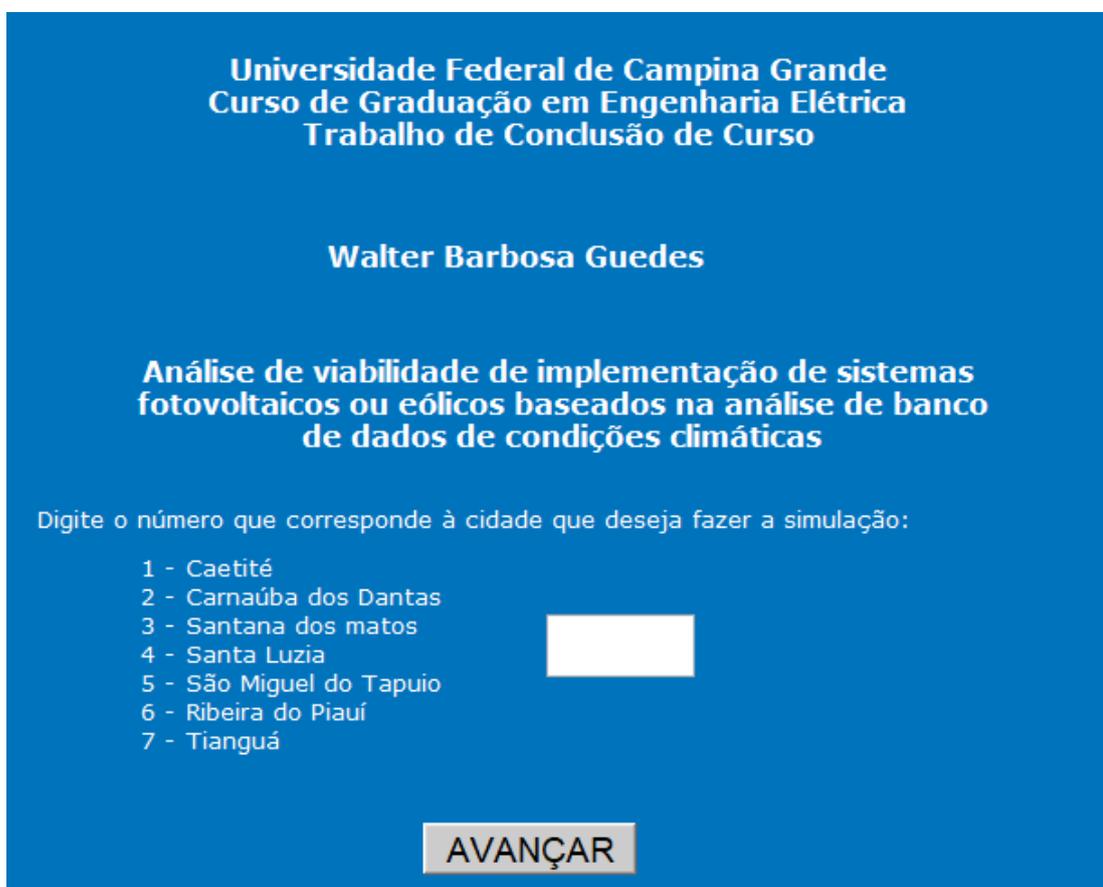
4.3.3 Interface Desenvolvida

O método comparativo proposto contém entradas e saídas de dados. As entradas são o capital investido, a cidade escolhida para implementar o sistema e os preços dos *KWh* referentes à produção eólica e fotovoltaica. As saídas são as potências instaladas de cada sistema, a velocidade do vento na cidade, a irradiação incidente no local, o *payback* de cada sistema e o fluxo de caixa anual de cada projeto.

O sistema proposto levou em consideração a velocidade do vento a 100 m de altura, visto que as torres dos aerogeradores estão a essa altura em relação ao solo, mas é evidenciado neste projeto que a velocidade do vento é maior quando a altura em relação ao solo também aumenta, dessa forma, é perceptível que o desenvolvimento de aerogeradores mais altos proporcionará maior potência instalada.

A interface desenvolvida é constituída de uma tela inicial, ilustrada Figura 4.3, na qual o usuário define qual cidade ele deseja realizar o estudo, e uma segunda tela que apresenta os dados classificados como de saída do projeto, como pode ser observado na Figura 4.4.

Figura 4.3 – Página inicial da interface desenvolvida.



Universidade Federal de Campina Grande
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica
Trabalho de Conclusão de Curso

Walter Barbosa Guedes

Análise de viabilidade de implementação de sistemas fotovoltaicos ou eólicos baseados na análise de banco de dados de condições climáticas

Digite o número que corresponde à cidade que deseja fazer a simulação:

- 1 - Caetité
- 2 - Carnaúba dos Dantas
- 3 - Santana dos matos
- 4 - Santa Luzia
- 5 - São Miguel do Tapuio
- 6 - Ribeira do Piauí
- 7 - Tianguá

AVANÇAR

Fonte: Próprio autor.

Figura 4.4 – Página final da interface desenvolvida.

Investimento Realizado (R\$)

MWh eólico (R\$)

MWh fotovoltaico (R\$)

CALCULAR

Eólico		Fotovoltaico	
Potência Instalada (MW)	<input type="text"/>	Potência Instalada (MW)	<input type="text"/>
Velocidade do vento (m/s)	<input type="text"/>	Irradiação incidente (W/m ²)	<input type="text"/>
Payback (anos)	<input type="text"/>	Payback (anos)	<input type="text"/>
Fluxo de caixa anual (R\$)	<input type="text"/>	Fluxo de caixa anual (R\$)	<input type="text"/>

VOLTAR **SAIR**

Fonte: Próprio autor.

Capítulo 5

Conclusão

Foram desenvolvidas expressões analíticas para a quantificação do potencial retorno que cada sistema é capaz de fornecer e utilizando tais expressões, foi possível identificar o payback de cada projeto.

Os resultados mostram que em locais onde a velocidade média anual do vento passa de 10 m/s , como por exemplo no litoral catarinense, no interior baiano, no litoral maranhense e no interior potiguar, a tendência é a instalação de parques eólicos, assim como locais onde a irradiação incidente média anual seja próxima de 6000 W/m^2 favorecem a instalação de parques fotovoltaicos. Observou-se que a maioria das cidades não apresentam oportunas condições para instalação dos dois tipos de parques produtores de energia elétrica estudados neste trabalho, mas há localidades que são propícias tanto à instalação de usinas eólicas quanto à solares, devendo ser observados os resultados do programa desenvolvido para o esclarecimento do empreendimento mais vantajoso.

Para o aumento da confiabilidade do projeto, seria necessário construir um banco de dados de um grande número de cidades com mais projetos já implantados, o que poderia ser dificultoso devido à grande quantidade de municípios brasileiros, mas tendo em vista que os custos de instalação estão diretamente proporcionais à potência instalada, a metodologia proposta se torna viável.

Utilizando o software Matlab, e tendo como as equações 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9, obteve-se as saídas desejadas que são exibidas de forma simples e concisa na interface do programa, na qual observa-se o fluxo de caixa de cada possível projeto. A interface desenvolvida é intuitiva e eficiente, explicitando de forma precisa os dados de

viabilidade econômica do projeto especificado na cidade escolhida. Trabalhos futuros poderão aumentar o banco de dados do sistema e avaliar outros métodos de viabilidade econômica.

Referências Bibliográficas

- ANEEL. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. Brasília: CEDOC, 2005. v. 2.
- BRITO M. C.; VALLÊRA, A. *Meio século de história fotovoltaico*. Lisboa, 2006.
- BRITO, S. de S. *Tutorial de Energia Solar-princípios e Aplicações*. 2006. Last accessed 30 October 2019. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php>>.
- CEPEL. *Atlas do potencial eólico brasileiro*. Rio de Janeiro, 2001.
- CEPEL. *Atlas do potencial eólico brasileiro*. Rio de Janeiro, 2013.
- CEPEL-CRESESB. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. 2014.
- CEPEL-CRESESB. *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. 2015. Last accessed 28 October 2019. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>>.
- COSTA, A. J. P. *Avaliação Numérica do Perfil Gottigen 428 em Turbinas Eólicas*. 2016.
- GAZOLI, M. G. V. J. R. *Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações*. São Paulo: Érica, 2012. v. 1.
- GONÇALVES. *Engenharia econômicas e finanças*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. v. 1.
- GRUBB M. J.; MEYER, N. I. *Wind Energy: Resources, Dystems and Regional Strategies*. 1993.
- IBGE. *Projeções e Estimativas da População do Brasil e das Unidades da Federação*. 2019. Last accessed 28 October 2019. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao//index.html>>.
- ONS. *O Sistema Interligado Nacional*. 2019. Last accessed 29 October 2019. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>.
- PEREIRA E. B; MARTINS, F. A. S. L. d. R. R. *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. São José dos Campos: E-BOOK, 2017. v. 2.
- PINHO J. T.; GALDINO, M. A. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. 2014.
- PINTO, M. de O. *Fundamentos de Energia Eólica*. Rio de Janeiro: LTC, 2013. v. 1.
- SAMANEZ. *Gestão de Investimento e Geração de Valor*. São Paulo: Person, 2007. v. 1.
- SAMANEZ. *Matemática Financeira*. São Paulo: Person, 2010. v. 5.

SANDIA. *Vertical Axis Wind Turbine: The History of the DOE Program*. 2006. Last accessed 29 October 2019. Disponível em: <http://www.sandia.gov/Renewable_Energy/wind_energy/topical.htm>.

SPERA, D. A. *Wind Turbine Technology*. New York: Asme Press, 2009. v. 2.