

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CAIO CÉSAR DOS SANTOS CAMARGO

**COMPLEMENTARIDADE ENTRE SISTEMAS HÍBRIDOS EÓLICO-SOLAR:
ESTUDO DE CASO DO PARQUE “FONTES” EM TACARATU-PE**

Itumbiara
2019



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Caio César dos Santos Camargo

Matrícula: 20122040070103

Título do Trabalho: COMPLEMENTARIDADE ENTRE SISTEMAS HÍDRIDOS EÓLICO-SOLAR: ESTUDO DE CASO DO PARQUE “FONTES” EM TACARATU-PE

Autorização - Marque uma das opções

- ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
- ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
- ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Itumbiara-GO, 08 / 04 / 2021.

Local Data

Caio César dos Santos Camargo

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

CAIO CÉSAR DOS SANTOS CAMARGO

**COMPLEMENTARIDADE ENTRE SISTEMAS HÍBRIDOS EÓLICO-SOLAR:
ESTUDO DE CASO DO PARQUE “FONTES” EM TACARATU-PE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca examinadora, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Itumbiara.

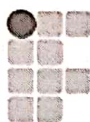
Prof. Dr. Sérgio Batista Silva, (IFG) – Orientador.
Prof. Dr. Olívio Carlos Nascimento Souto, (IFG) – Coorientador.
Prof. Dr. Marcos Antônio Arantes de Freitas, (IFG).

Itumbiara
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C173c	Camargo, Caio César dos Santos Complementariedade entre sistemas híbridos eólico-solar: estudo de caso do parque Fontes em Tacaratu-PE. / Caio César dos Santos Camargo. -- Itumbiara, 2021. 77 f. : il. color. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2021. Orientador: Prof. Dr. Sérgio Batista Silva. Coorientador: Olívio Carlos Nascimento Souto 1. Energia elétrica - Produção. 2. Geração de energia fotovoltaica. 3. Energia eólica. I. Título. II. Silva, Sérgio Batista. III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. CDD 621.47
-------	--

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey / Câmpus Itumbiara
Bibliotecário: Eduardo Pereira Resende CRB1/3266



INSTITUTO FEDERAL
GOIÁS
Câmpus Itumbiara

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA
DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS
COORDENAÇÃO DE CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TERMO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: COMPLEMENTARIDADE ENTRE SISTEMAS HÍBRIDOS: ESTUDO DE CASO DO PARQUE "FONTES" EM TACARATU-PE.

AUTOR: CAIO CÉSAR DOS SANTOS CAMARGO.

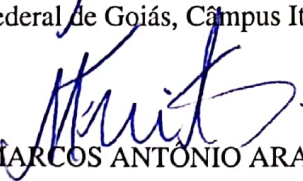
ORIENTADOR: Prof. Dr. SÉRGIO BATISTA DA SILVA.

Aprovado como parte das exigências para obtenção do diploma de Engenheiro Eletricista, do Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

Itumbiara, 17 de dezembro de 2019.


Prof. Dr. SÉRGIO BATISTA DA SILVA.

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.


Prof. Dr. MARCOS ANTÔNIO ARANTES DE FREITAS.

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.


Prof. Dr. OLÍVIO CARLOS NASCIMENTO SOUTO.

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

*Às memórias de minha vó Sueli Maria Marques dos Santos, por sempre me proteger e
iluminar meu caminho.*

*À minha vó Vanila da Silva Camargo, que amo profundamente e agradeço pelo amor dado a
mim.*

*Aos meus pais, Cássia Eliane Dos Santos Camargo e Aparício César Camargo, por todo
esforço para nos proporcionar um lar amável e confortável que cresci.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, por serem a base que me mantém em pé nos momentos mais difíceis. Todos os obstáculos que passei são conquistas que devo a eles, por todas as oportunidades que proporcionaram em minha vida.

Agradeço por ter conhecido Dyego Souza Ferreira, um amigo sensacional, de grande carisma e de muita afinidade comigo. Nossos caminhos podem ter se cruzado e separado, mas quando voltar a luz, sei que estará presente conosco novamente.

Ao meu avô José Geraldo dos Santos Filho, vô “Zezinho”, por todo amor e carinho proporcionado a mim. À sua paciência com minhas bagunças e sua sabedoria sobre o mundo.

Ao meu avô Magno Batista Camargo, vô “Camargo”, por me mostrar que neste mundo caótico ainda existem pessoas de bom coração, que possuem motivações puras para ajudar aos próximos.

Agradeço à minha irmã Amanda de Cássia dos Santos Camargo, que mesmo eu não sendo um irmão muito presente, sei que posso sempre contar com ela para qualquer dificuldade.

Tenho muito a agradecer a Hérica Carolinne Campos Cardoso, minha companheira, amiga, confidente e namorada, sempre me orientando em meus caminhos e sempre fazendo as dificuldades ser tornarem mais fáceis. Por não desistir de mim e sempre me mostrar o caminho certo quando me perco.

Agradeço aos meus amigos de Cachoeira Dourada – GO, Augusto Ângelo, Djalma Neto, Paulo Paulino e Rafael Tobias, por estarem mais de 10 anos sempre presentes em minha vida e a todas as risadas e momentos que passamos juntos!

Aos meus amigos de Araguari – MG, Daniel Abreu, Laura Vieira, Leticia Barbosa e Patrícia Souza, pelo apoio no 3º ano do Ensino Médio, os quais me ajudaram no meu desenvolvimento escolar e a escolher qual carreira seguir.

Agradeço ao Instituto Federal de Goiás e todos os professores e amigos Evaristo Nunes, Gabriel Moraes, Ítalo Mendonça, Leonidio Neto, Lucas Lemes, Luiz Carlos, Matheus Ferreira, Monique de Paula, Victor Lunarti, Welberth Henrique e Yan Bianchini que fiz durante esta jornada, os levarei comigo sempre.

Aos meus amigos de trabalho e a Enel Green Power Brasil, por me proporcionar a oportunidade de estar no time do Control Room, com profissionais experientes e com brilho e amor pelo trabalho que exercem.

“O primeiro pecado da humanidade foi a fé; a primeira virtude foi a dívida.”.

- Carl Sagan.

RESUMO

Após a crise do apagão, que emergiu no Brasil no início do século XXI, o modelo de matriz energética predominantemente hidrelétrica, que na época contava com um sistema de potência fracamente interligado, ficou desgastado. Ao mesmo tempo, o aumento da tecnologia e a melhoria da qualidade de vida, que naturalmente estão associados ao incremento no consumo de energia elétrica, deixaram claro que o país não poderia depender de uma única fonte de geração, a qual por sua vez é vulnerável ao ciclo das chuvas. No presente os questionamentos sobre uma matriz energética essencialmente hidrelétrica voltou à tona em um novo momento de crise, cujas consequências são percebidas nas altas tarifas praticadas. Esse contexto aliado à sustentabilidade impulsiona a busca por novas fontes de energia, que sejam renováveis e pouco poluentes. No sentido de debater propostas para a diversificação da matriz energética, com vistas a garantir a oferta de eletricidade com impactos ambientais reduzidos, está encaixado o objetivo central deste trabalho, que se trata de avaliar a complementaridade diária do complexo de geração Fontes, que faz o uso das fontes solar fotovoltaica e eólica, localizado na cidade de Tacaratu, estado de Pernambuco. O principal empecilho para a utilização da geração solar fotovoltaica ou eólica como fontes de energia firme são a sazonalidade dessas. Com o intuito de superar esse problema, uma estratégia a ser utilizada é a implementação de centrais de geração híbridas, onde uma fonte de energia mitiga os efeitos que a sazonalidade impõe à outra em uma relação de mutualidade. No caso do conjunto Fontes, a potência instalada é de 90,9 MW, 11 MW em módulos fotovoltaicos e 79,9 MW em aerogeradores. Portanto o presente trabalho, a partir de um caso real analisa, além da complementaridade diária, as vantagens obtidas por um sistema híbrido solar-eólico, no que diz respeito a garantir a oferta de energia elétrica ao longo das vinte e quatro horas diárias, a partir de dados de geração colhidos no período de um ano. Também são apresentadas outras vantagens que viabilizam a implantação de usinas semelhantes à que é abordada neste trabalho.

Palavras-chave: Matriz energética, sistemas híbridos, energia solar fotovoltaica, energia eólica, complementaridade.

ABSTRACT

After the blackout crisis, which culminated in Brazil in the early 21st century, the energy matrix model, predominantly hydroelectric, which had a weakly interconnected power system, got worn. At the same time the increase of technology and quality of life, which are naturally associated with an electricity consumption raise, made it clear that the country could not depend on a single source of power generation, who is vulnerable to the rain cycle. At present the questions about an essentially hydroelectric energy matrix have surfaced in a new moment of crisis, whose consequences are seen in the high taxes practiced. This context combined with sustainability stimulates the search for new energy sources that are renewable and cleaner. In order to discuss proposals for the diversification of the energy matrix in order to ensure the supply of electricity with reduced environmental impacts is positioned this work, where the main subject is to evaluate the daily complementarity of the generation complex Fontes, located in the city of Tacaratu, state of Pernambuco, that makes use of solar photovoltaic and wind sources. The main obstacle to the use of solar photovoltaic or wind generation as sources of solid energy is their seasonality. In order to overcome this problem, one strategy to be used is the implementation of hybrid generation plants, where one energy source mitigates the effects that seasonality imposes on the other, with a mutual relationship. In the case of the Fontes system, the installed capacity is 90.9 MW, 11 MW in photovoltaic modules and 79.9 MW in wind turbines. Therefore, the present paper, based on a real case analyze, in addition to daily complementarity, the advantages obtained by a solar-wind hybrid system, in terms of guaranteeing the supply of electricity over the 24 hours a day, with generation data from one entire year. Other advantages that makes feasible the implementation of plants similar to the one discussed in this paper are also presented.

Keywords: Energy matrix, hybrid systems, solar photovoltaic energy, wind energy, complementarity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Evolução do consumo de energia elétrica no Mundo de 1990 a 2017.	17
Figura 2 - Evolução do consumo de energia elétrica no Brasil de 1990 a 2017.	17
Figura 3 - Comparação entre as matrizes elétricas do Brasil e do mundo.....	19
Figura 4 - Adição anual de energias renováveis no mundo, por fonte, entre 2012 e 2018.	20
Figura 5 - Comparação entre o valor das tarifas de eletricidade e o custo dos sistemas FV....	26
Figura 6 - Comparação entre a instalação de um módulo na horizontal e com inclinação.	28
Figura 7 - Níveis de irradiação solar por região.	29
Figura 8 - Sistema fotovoltaico <i>off-grid</i>	30
Figura 9 - Sistema <i>on-grid</i>	32
Figura 10 - Célula como unidade fundamental de um sistema solar.....	33
Figura 11 - Módulos fotovoltaicos em série/paralelo.....	33
Figura 12 - Bandas de energia em condutores, semicondutores e isolantes.....	34
Figura 13 - Seção transversal de uma célula FV.	35
Figura 14 - Célula de silício monocristalino X silício policristalino.....	36
Figura 15 - Árvore solar de filmes finos.....	37
Figura 16 - Capacidade instalada de energia eólica e aumento anual no mundo.	38
Figura 17 - Distribuição geral dos ventos.....	39
Figura 18 - Potencial eólico no Brasil para a altura de 80 metros.....	40
Figura 19 - Potência dos geradores Siemens Gamesa.	42
Figura 20 - Partes de um aerogerador.....	43
Figura 21 - Distância para a instalação de novos aerogeradores.	44
Figura 22 – Sistema híbrido.	46
Figura 23 - Complementaridade solar e eólica diária.....	47
Figura 24 - Fotos via satélite do conjunto Fontes.....	48
Figura 25 - Vista esquemática de um sistema híbrido solar-eólico.....	49
Figura 26 - Potencial solar em Tacaratu.....	50
Figura 27 - Potencial eólico em Tacaratu.....	51
Figura 24 - Curvas de geração individual e média diária com amostragem de uma hora.....	54
Figura 25 - Gráfico referente à geração de Junho de 2018.....	66
Figura 26 - Gráfico referente à geração de Julho de 2018.....	67
Figura 27 - Gráfico referente à geração de Agosto de 2018.....	68

Figura 28 - Gráfico referente à geração de Setembro de 2018.....	69
Figura 29 - Gráfico referente à geração de Outubro de 2018.....	70
Figura 30 - Gráfico referente à geração de Novembro de 2018.	71
Figura 31 - Gráfico referente à geração de Dezembro de 2018.....	72
Figura 32 - Gráfico referente à geração de Janeiro de 2019.....	73
Figura 33 - Gráfico referente à geração de Fevereiro de 2019.....	74
Figura 34 - Gráfico referente à geração de Março de 2019.....	75
Figura 35 - Gráfico referente à geração de Abril de 2019.....	76
Figura 36 - Gráfico referente à geração de Maio de 2019.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados anuais médios de geração para cada hora do dia.....	53
Tabela 2 - Dados referentes a Junho de 2018.....	65
Tabela 3 - Dados referentes a Julho de 2018.....	66
Tabela 4 - Dados referentes a Agosto de 2018.....	67
Tabela 5 - Dados referentes a Setembro de 2018.	68
Tabela 6 - Dados referentes a Outubro de 2018.	69
Tabela 7 - Dados referentes a Novembro de 2019.	70
Tabela 8 - Dados referentes a Dezembro de 2018.....	71
Tabela 9 - Dados referentes a Janeiro de 2019.....	72
Tabela 10 - Dados referentes a Fevereiro de 2019.	73
Tabela 11 - Dados referentes a Março de 2019.....	74
Tabela 12 - Dados referentes a Abril de 2019.....	75
Tabela 13 - Dados referentes a Maio de 2019.....	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampère
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
FV	Fotovoltaica
GD	Geração Distribuída
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
PRODEM	Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios
PROINFA	Programa de Incentivo a Fontes Alternativas
REN	Resolução Normativa
SFVCR	Sistema Fotovoltaicos Conectados à Rede
SFVI	Sistemas Fotovoltaicos Isolados
V	Volt

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	10
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	13
SUMÁRIO.....	14
CAPÍTULO 1	16
INTRODUÇÃO.....	16
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	16
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	22
CAPÍTULO 2	23
FONTES RENOVÁVEIS SOLAR E EÓLICA	23
2.1 ENERGIA SOLAR.....	23
2.1.1 ASPECTOS GERAIS E PANORAMA BRASILEIRO	23
2.1.2 RADIAÇÃO E POSIÇÃO SOLARES	26
2.1.3 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	29
2.1.4 CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	32
2.2 ENERGIA EÓLICA	38
2.2.1 ASPECTOS GERAIS E PANORAMA BRASILEIRO	38
2.2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS EÓLICOS.....	41
2.2.3 AEROGERADORES	42
2.3 SISTEMAS HÍBRIDOS E COMPLEMENTARIDADE	45
2.3.1 SISTEMAS HÍBRIDOS	45
2.3.2 COMPLEMENTARIDADE.....	46
CAPÍTULO 3	48

PARQUE GERADOR HÍBRIDO FONTES	48
3.1 PARQUE FONTES	48
3.1.1 PARQUE FONTES SOLAR	49
3.1.2 PARQUE FONTE DOS VENTOS.....	50
CAPÍTULO 4	52
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
4.1 VALORES MÉDIOS ANUAIS DE GERAÇÃO NO CONJUNTO FONTES	52
4.2 ANÁLISE DE DADOS COLETADOS	56
CAPÍTULO 5	58
CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABAALHOS FUTUROS.....	58
REFERÊNCIAS	60
APÊNDICE A – DADOS COLETADOS DO CONJUNTO GERADOR FONTES.....	65

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Desde os primórdios da civilização o homem tenta controlar a natureza como uma forma de prover alguma necessidade específica. Assim, a energia, que apesar de se conservar na natureza, sempre foi convertida pelo homem em alguma forma específica de modo a suprir uma de suas necessidades particulares.

Historicamente, a humanidade sempre buscou complementar as suas fontes de energia ou substituí-las, na medida em que se tornavam escassas ou problemáticas. No século XIII florestas foram devastadas para a obtenção de madeira, com a ascensão da Primeira Revolução Industrial o carvão mineral passou a ser largamente explorado [1].

Mais tarde, com a invenção do motor elétrico e com o avanço da comunicação, a energia elétrica entrou para o cotidiano dos países mais desenvolvidos. Já no século XX, o petróleo consolidou o modelo industrial moderno [1].

Essa evolução trouxe consigo impactos ambientais negativos, como o aquecimento global. Acarretou também em mudanças sociais, em uma nova forma de interagir com o mundo, uma forma consumista que busca a ampliação de mercados consumidores.

No âmbito da energia elétrica, é possível perceber que desde o início de sua comercialização, a mesma se tornou um instrumento de progresso social e econômico. Em um mundo globalizado, marcado pelo dinamismo, a energia elétrica torna o cotidiano mais simples e confortável [2].

Diante do apresentado, percebe-se o quanto o consumo de energia, não só elétrica, está intimamente relacionado ao desenvolvimento socioeconômico, assim como afirma [3]:

O desenvolvimento tecnológico, o crescimento industrial e a melhora no padrão de vida em determinada sociedade são acompanhados pela evolução do consumo de energia através do aumento dos recursos energéticos. [...] na medida em que uma sociedade amplia seu conhecimento sobre fontes de energia, conquista um maior controle sobre a natureza e extrai dela recursos que possibilitam a melhora no padrão de vida. De uma forma geral, portanto, o grau dos recursos energéticos conquistados está relacionado com o desenvolvimento tecnológico de um país.

Na Figura 1, a seguir, é apresentada a evolução do consumo de energia elétrica no planeta de 1990 a 2017, onde é notório o aumento da demanda, que em 2017 chegou a 23696 TWh.

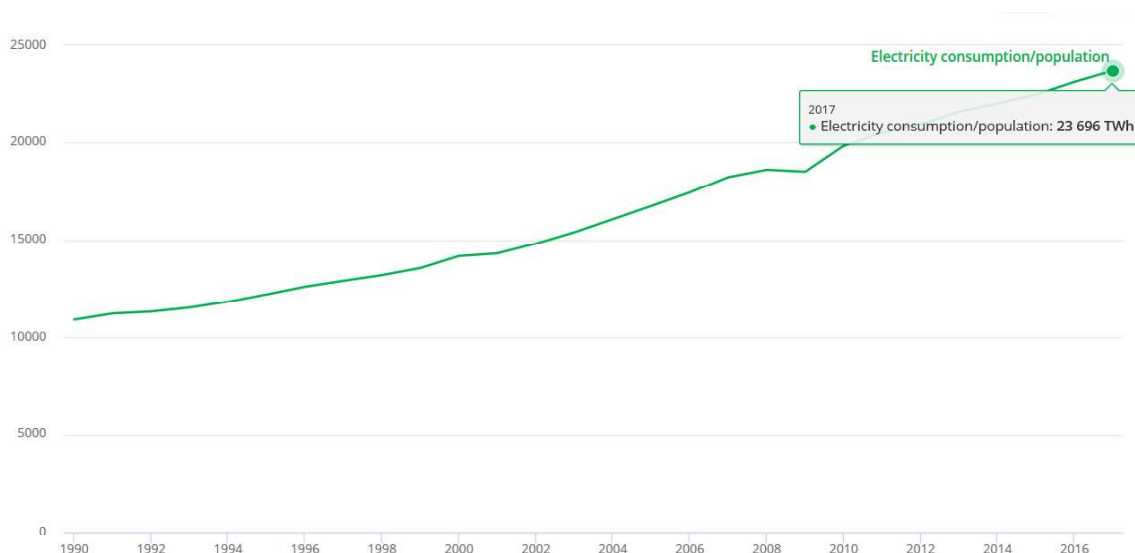


Figura 1 - Evolução do consumo de energia elétrica no Mundo de 1990 a 2017.

Fonte: [4].

No Brasil essa tendência de aliar o desenvolvimento econômico ao consumo de energia não é diferente, o crescimento econômico ocorrido nos últimos anos trouxe consigo um considerável aumento no consumo energético. O gráfico da Figura 2, abaixo, mostra a evolução do consumo de energia elétrica no Brasil de 1990 a 2017, que atingiu no último ano analisado a marca de 528 TWh.

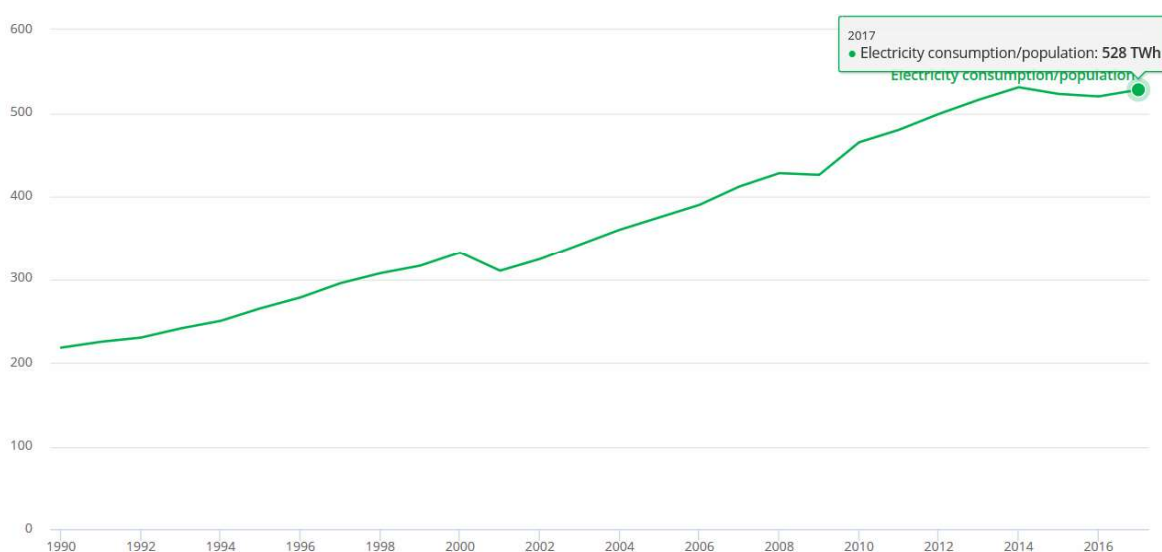


Figura 2 - Evolução do consumo de energia elétrica no Brasil de 1990 a 2017.

Fonte: [4].

Concomitantemente ao desenvolvimento da tecnologia e da economia, a população brasileira também segue uma tendência de crescimento, que por sua vez também aumenta a demanda por fontes energéticas. Estima-se que no ano de 2060 a população brasileira será superior a 228 milhões de habitantes [5].

Fatores como o desenvolvimento econômico e o aquecimento da economia acarretam em um aporte no consumo de energia elétrica, o que coloca a sociedade em cheque. De um lado existe a preocupação em atender a demanda crescente, do outro estão os impactos ambientais, que comprometem a estabilidade do planeta [2]. Nesse cenário surge o conceito de desenvolvimento sustentável, que se trata do “[...] desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações” [6].

No intuito de promover o desenvolvimento sustentável, nos últimos anos muito se evoluiu em eficiência energética. O avanço tecnológico permite o surgimento de equipamentos mais eficientes, assim como acontece com os veículos, os sistemas motrizes e de iluminação. No entanto, esse avanço em eficiência não tem sido suficiente para frear a alta do consumo de energia elétrica, assim como é possível perceber nas Figuras 1 e 2.

Diante do alto consumo energético, as fontes renováveis de energia se mostram peças fundamentais para o desenvolvimento sustentável. O mundo observou em recursos como o vento e o sol a possibilidade da utilização dos mesmos como fontes de energia para atender sua demanda energética. Fontes essas, que são ilimitadas e presentes no mundo desde seu princípio.

Ao se comparar as matrizes elétricas do mundo e do Brasil, percebe-se algo interessante, a matriz brasileira possui fontes renováveis como o principal recurso para a geração de eletricidade. A Figura 3, a seguir, ilustra esse cenário relativo ao ano de 2016. Enquanto 82% da energia elétrica brasileira era produzida por fontes renováveis, no mundo como um todo, esse número caía para 24% [7].

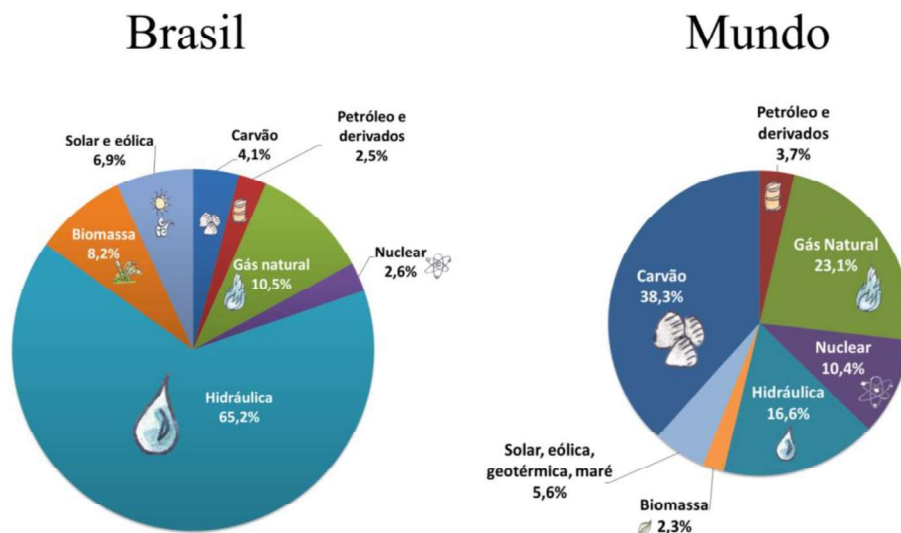


Figura 3 - Comparação entre as matrizes elétricas do Brasil e do mundo.
Fonte: Adaptado de [7].

Os números positivos da matriz elétrica brasileira se devem ao país possuir a fonte hídrica como a principal geradora. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 60,82% da potência instalada no Brasil corresponde a fontes hídricas, totalizando pouco mais de 107 GW instalados [8].

Apesar de ser considerada uma fonte renovável, existem alguns problemas associados à hidroeletricidade. Esse modelo de geração essencialmente hidráulica tem sofrido alguns desgastes. Em 2001, ocorreu a crise do apagão, onde o aumento da demanda associado ao baixo índice pluviométrico forçou as concessionárias a adotarem medidas drásticas, como o desligamento de bairros e cidades inteiras por períodos determinados, com o propósito de não extrapolar os limites de consumo impostos pelo governo.

Atualmente o Brasil passa novamente por uma situação crítica, acarretada pela dependência em recursos hídricos. Devido a sua sazonalidade, as usinas hidrelétricas diminuem sua geração nos períodos de estiagem, contudo o consumo não deixa de crescer, assim são acionadas as termelétricas para suprir a demanda exigida. Como a geração termelétrica é mais onerosa, os consumidores pagam pela dificuldade de geração através de um sistema de bandeiras tarifárias, que existe desde 2015. No sistema de bandeiras o consumidor paga mais caro pela energia elétrica na medida em que as condições de geração se tornam menos favoráveis. Segundo [9] cada modalidade apresenta as seguintes características:

Bandeira verde: condições favoráveis de geração de energia. A tarifa não sofre nenhum acréscimo;

Bandeira amarela: condições de geração menos favoráveis. A tarifa sofre acréscimo de R\$ 0,01343 para cada quilowatt-hora (kWh) consumidos;

Bandeira vermelha - Patamar 1: condições mais custosas de geração. A tarifa sofre acréscimo de R\$ 0,04169 para cada quilowatt-hora kWh consumido;

Bandeira vermelha - Patamar 2: condições ainda mais custosas de geração. A tarifa sofre acréscimo de R\$ 0,06243 para cada quilowatt-hora kWh consumido.

Com o exposto ficou evidente a fragilidade das usinas hidrelétricas para o fornecimento de energia firme e a situação tende a se agravar, pois no Brasil a grande maioria do potencial hídrico já é explorado. Atualmente as novas usinas implantadas possuem baixo ou nenhum grau de regularização, isso quer dizer que seus reservatórios são pequenos e insuficientes para suportar períodos de estiagem, esse tipo de usina é fortemente afetada pela sazonalidade [10].

Nesse contexto onde há a necessidade de aumentar a produção de energia elétrica, sem deixar de lado a importância de diversificar o corrente sistema centralizado em fontes hidrelétricas e, de alcançar o desenvolvimento sustentável, a incorporação de fontes alternativas surge como uma possibilidade para o planejamento dos recursos no país.

Apesar de as tradicionais fontes de energia ainda constituírem a base mundial e nacional de eletricidade, a participação das energias não renováveis será cada vez menor devido ao esgotamento dos combustíveis fósseis e ao aumento da demanda [2]. As energias renováveis tendem a se desenvolverem e se expandirem.

Através de pesquisas para maiores rendimentos e redução de custos, a geração por fontes solar fotovoltaica e eólica têm se destacado. Observa-se em todo o mundo um crescimento na inserção dessas fontes renováveis, destacando-as em relação às outras já existentes. A Figura 4 ilustra esse cenário.

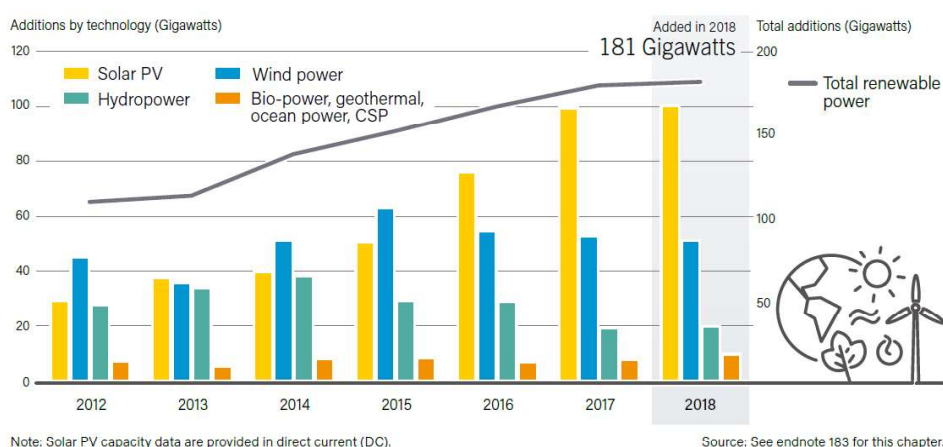


Figura 4 - Adição anual de energias renováveis no mundo, por fonte, entre 2012 e 2018.
Fonte: [11].

Enquanto a fonte solar fotovoltaica utiliza módulos semicondutores para converter a energia luminosa recebida do sol em energia elétrica, a fonte eólica transforma em

eletricidade o movimento do ar na atmosfera [2]. Para ambas as fontes, eólica ou solar, o Brasil apresenta um grande potencial.

O Brasil conta com uma presença de ventos duas vezes maior do que a média mundial, o que acarreta em um potencial estimado de 133 mil MW para a geração eólica [12]. Assim como ocorre com os ventos, o Brasil também é privilegiado em termos de radiação solar, diariamente incide sobre o país entre 4.444 Wh/m² a 5.483 Wh/m², para se ter uma ideia desse potencial, no local brasileiro menos ensolarado é possível gerar mais eletricidade do que no local mais ensolarado da Alemanha, um dos líderes em geração fotovoltaica (FV) [13].

Segundo [2] o cenário energético atual é preocupante e as fontes renováveis são necessárias, no entanto existe um questionamento acerca dessas fontes que se trata de as fontes solar fotovoltaica e eólica serem ou não capazes de complementar a matriz elétrica. Um grande problema relacionado a essas duas fontes se trata da sua sazonalidade, o que causa uma intermitência no fornecimento energético. No Brasil, até hoje se considerou a compensação do suprimento através da hidroeletricidade, o que não é factível quando se almeja diversificar a matriz elétrica nacional [14].

Diante do que fora exposto, este trabalho tem como objetivo desenvolver um estudo sobre a complementaridade diária das fontes solar fotovoltaica e eólica em um parque gerador localizado na cidade de Tacaratu, estado de Pernambuco. O parque se trata de um sistema híbrido que contempla uma estrutura com três usinas eólicas e duas solares.

Sabendo-se que essas duas fontes renováveis se destacam como alternativas de geração de energia, este estudo visa investigar, a partir de um caso real, a possibilidade de complementaridade diária entre as duas, de modo que uma fonte possa em determinados momentos do dia complementar a falta de outra. Essa característica de mesclar duas ou mais fontes para a complementação de geração recebe a denominação de sistema híbrido [15].

Inicialmente, neste trabalho será realizada uma pesquisa bibliográfica a fim de obter conhecimento sobre os temas abordados, posteriormente serão coletados dados de geração referentes ao período compreendido entre primeiro de junho de 2018 e primeiro de junho de 2019. Os dados coletados servirão para analisar a complementaridade diária entre as fontes do complexo gerador, a partir dos resultados também serão enumeradas algumas possibilidades obtidas com a instalação de usinas com as mesmas características, tal como a redução do impacto socioambiental suscitado pela construção de grandes empreendimentos de geração de energia elétrica.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado conforme descrito abaixo:

- Capítulo 1 – Introdução;
- Capítulo 2 – Fontes Renováveis Solar e Eólica;
- Capítulo 3 – Parque Gerador Híbrido Fontes;
- Capítulo 4 – Resultados e Discussões;
- Capítulo 5 – Considerações Finais e Sugestões para Trabalhos Futuros;
- Referências;
- Apêndice A – Dados Coletados do Conjunto Gerador Fontes.

O **capítulo 2** apresenta de forma detalhada os aspectos de construção e funcionamento dos sistemas fotovoltaicos e eólicos. Já que o parque gerador aqui estudado consiste de um sistema híbrido solar-eólico, é importante detalhar tal tema, a fim de permitir o estudo de caso. Também serão abordados os conceitos de sistemas híbridos e complementaridade, temas essenciais para que seja possível a análise proposta por este trabalho.

O **capítulo 3** trás uma descrição do conjunto Fontes, composto por subsistemas de geração de energia elétrica através de módulos fotovoltaicos e aerogeradores. Também serão apresentadas informações sobre a oferta de ventos e radiação solar no local onde o complexo de usinas está instalado.

O **capítulo 4** exibe uma análise dos dados coletados sobre a geração solar e eólica do complexo de usinas Fontes. As informações analisadas foram coletadas no período compreendido entre primeiro de junho de 2018 e primeiro de junho de 2019. A análise desses dados permite avaliar a complementaridade entre a geração de energia elétrica através das fontes solar e eólica com o fim de superar a sazonalidade de ambas. Além disso, serão apresentadas outras propostas para o uso dessas fontes concomitantemente a outras possíveis.

O **capítulo 5** apresenta as considerações finais sobre o trabalho e algumas sugestões de projetos futuros vislumbrados a partir da experiência adquirida neste trabalho.

CAPÍTULO 2

FONTES RENOVÁVEIS SOLAR E EÓLICA

2.1 ENERGIA SOLAR

Todos os dias a Terra recebe do sol energia limpa, gratuita e abundante, na forma de raios solares. A energia emitida pelo Sol é aproximadamente constante a bilhões de anos, e tem sua origem nos processos de fusão nuclear que acontecem no astro. Estima-se que a potência da ordem de $3,86 \times 10^{26}$ W [16].

O Sol está ativo nas condições em que o conhecemos há cerca de 4,5 bilhões de anos e estima-se que essas condições serão mantidas pelos próximos 6,5 bilhões de anos [17], por outro lado, os primeiros animais vertebrados surgiram no planeta há aproximadamente 520 milhões de anos. Essas informações nos dão uma ideia da longevidade desse astro. Se comparada à linha do tempo da humanidade, é aceitável afirmar que a energia oriunda do sol seja inesgotável.

A energia solar, direta ou indiretamente alimenta todos os processos térmicos, dinâmicos e químicos existentes no planeta, tal como o ciclo das chuvas, a fotossíntese, os ventos e correntes marinhas [16, 18]. Até mesmo o petróleo, indiretamente é oriundo do Sol, uma vez que a matéria orgânica acumulada que lhe deu origem, em determinado momento foi sustentada pela energia solar. Assim, como todas as formas de geração são provenientes da referida estrela, uma alternativa viável é aproveitar diretamente o máximo desse farto recurso energético [19].

2.1.1 ASPECTOS GERAIS E PANORAMA BRASILEIRO

Através da radiação eletromagnética, o Sol transmite energia para o planeta Terra, que de forma direta pode ser captada para ser convertida em alguma forma de energia utilizável pelo homem, elétrica ou térmica. Em termos gerais, a energia térmica aproveita o calor recebido, enquanto a energia elétrica é obtida através da conversão dos fótons em corrente elétrica. A definição de qual forma de energia será obtida após a conversão da radiação se dá pelos equipamentos utilizados nesse processo [19].

Para a conversão dos raios solares em energia térmica são utilizados sistemas com coletores solares e armazenadores térmicos, que aquecem e armazenam determinado fluido. Já

para a conversão em energia elétrica, são utilizados módulos FV, que funcionam como geradores de potência elétrica com base no efeito fotovoltaico. Independentemente da tecnologia empregada, a captação solar se caracteriza pela quase total ausência de emissão de poluentes e ruídos, ao mesmo tempo em que demanda pouca ou nenhuma manutenção durante seu funcionamento [20].

O efeito fotovoltaico é o fenômeno responsável pela conversão da luz em energia elétrica, o qual consiste no surgimento de uma diferença de potencial em um material semicondutor quando exposto à luz. Esse fenômeno se dá devido à característica dos semicondutores produzirem alterações em suas propriedades elétricas quando incididos por radiação eletromagnéticas [19, 21, 2].

A quantidade de energia elétrica produzida depende da irradiação do local onde o sistema FV está instalado. Nesse quesito o Brasil é considerado privilegiado por possuir ótimas taxas de irradiação solar. Para se ter uma ideia desse potencial, a região menos ensolarada do país ainda é 40% mais irradiada do que a região mais ensolarada da Alemanha, país de destaque na geração de energia solar. A irradiação solar diária no Brasil se encontra na faixa de 4,1 a 6,5 kWh/m²/dia, enquanto a melhor condição encontrada na Alemanha é de 3,4 kWh/m²/dia [22].

O uso da energia solar fotovoltaica está em constante crescimento no Brasil, esse aumento é motivado pelas pesquisas que promovem o desenvolvimento dessa tecnologia, pela redução dos custos de fabricação e de implantação, pelas políticas públicas para o aquecimento do setor e pelas altas tarifas de energia elétrica praticadas no Brasil [2].

O crescimento do aproveitamento da energia solar tornou comum um novo conceito, que se trata da geração distribuída (GD), que se caracteriza por diversas formas de geração, geralmente de potência reduzida próximas ao consumidor. O nome GD é justificado por esse modelo fugir do padrão de geração centralizada em grandes usinas e promover a distribuição geográfica da matriz elétrica [15]. Uma vantagem destacável da GD é a economia com grandes investimentos em sistemas de transmissão e distribuição, já que a geração está mais próxima do ponto de consumo.

Nos últimos anos o governo federal, sistematicamente, aprovou medidas para a promoção das fontes renováveis. Dentre os principais programas criados, destaca-se o Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEM) em 1994, com o intuito de promover a eletrificação rural, utilizando sistemas fotovoltaicos como fonte principal [19]. Em 2002 o Programa de Incentivo a Fontes Alternativas (PROINFA), foi

criado com o intuito de aumentar a participação das fontes renováveis na produção de energia elétrica [23].

No entanto só no ano de 2012 foi regulamentada a conexão de GD à rede de distribuição, através da Resolução Normativa (REN) da ANEEL nº 482. A publicação dessa REN foi um marco para a geração distribuída, a partir da publicação dessa REN, o consumidor brasileiro pode optar por gerar a própria energia e fornecer o excedente para as concessionárias que detém a distribuição na sua região e transformar essa potência injetada em créditos a serem consumidos nos próximos 36 meses [15, 24].

No ano de 2015 a REN 482/2012 recebeu uma atualização através da REN 687/2015 que estabeleceu que a microgeração é caracterizada por potência instalada menor ou igual a 75 kW e que a minigeração é uma central geradora com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para as demais fontes. A REN 687/2015 também reviu a duração dos créditos gerados pelos consumidores que de 36 meses passaram a ter a validade de 60 meses [25].

Ainda no ano de 2015 o governo federal criou incentivos para a redução de impostos sobre o sistema de compensação de energia, tal como o Convênio ICMS 16, de 22 de abril de 2015, que autoriza os estados brasileiros a conceder isenção do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) nas operações internas relativas à circulação de energia elétrica, sujeitas ao faturamento sob o Sistema de Compensação de Energia Elétrica [26].

Outra medida do governo federal foi a lei nº 13.169, de 6 de outubro de 2015, cujo artigo 8 estabelece que:

Ficam reduzidas a zero as alíquotas da Contribuição para o PIS/Pasep e da Contribuição para Financiamento da Seguridade Social - COFINS incidentes sobre a energia elétrica ativa fornecida pela distribuidora à unidade consumidora, na quantidade correspondente à soma da energia elétrica ativa injetada na rede de distribuição pela mesma unidade consumidora com os créditos de energia ativa originados na própria unidade consumidora no mesmo mês, em meses anteriores ou em outra unidade consumidora do mesmo titular, nos termos do Sistema de Compensação de Energia Elétrica para microgeração e minigeração distribuída, conforme regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL [27].

A Figura 5, a seguir, mostra um comparativo entre o custo de implantação de um sistema de geração distribuída FV e o custo das tarifas praticadas por diversas concessionárias de energia elétrica nacionais. É perceptível que a implantação de geração solar é considerada praticável na maioria dos estados. Considerando que a Figura 5 se refere ao cenário de 2015, atualmente as tarifas são mais caras, no entanto a popularização desse tipo de geração

barateou os custos de aquisição e instalação, o que torna a GD fotovoltaica ainda mais viável [28].

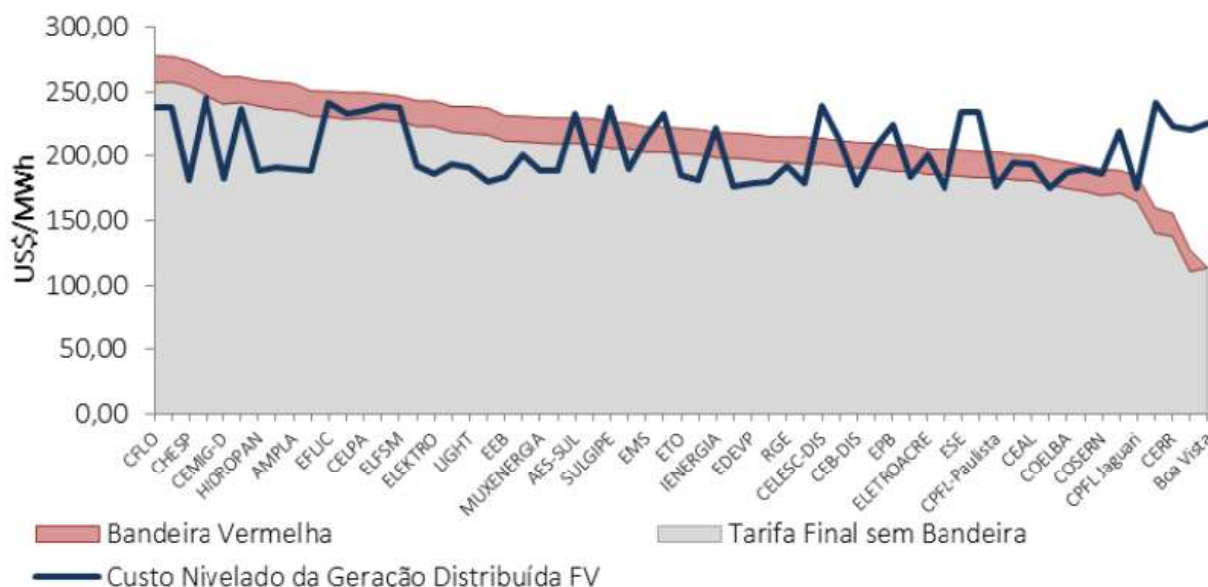


Figura 5 - Comparação entre o valor das tarifas de eletricidade e o custo dos sistemas FV.
Fonte: [28].

Apesar deste trabalho ter como foco um parque gerador de potência instalada considerável, é importante ressaltar o contexto de popularização da geração distribuída no Brasil, pois foi ele que permitiu pesquisas sobre o tema e que nos dias atuais exista viabilidade financeira e técnica para a implantação de empreendimentos como o conjunto “Fontes”.

2.1.2 RADIAÇÃO E POSIÇÃO SOLARES

Alguns fatores como a irradiação solar, a quantidade de horas de sol que possui o dia e a temperatura são capazes de afetar os painéis solares. Por isso é importante conhecer os princípios geográficos que influenciam a produção de energia solar.

A radiação solar é uma forma de transferência de energia do Sol por meio da propagação de ondas eletromagnéticas [29]. Ao atravessar a atmosfera, a radiação solar sofre a influência de diversos aspectos, por isso os raios solares que chegam à superfície são constituídos de vários componentes, que são [30]:

- Albedo: índice relativo à taxa da energia solar, recebida em uma determinada área, devida à refletância dos arredores e do solo onde está instalado um equipamento;
- Radiação direta: radiação solar incidente em uma superfície, sem ter sido espalhada pela atmosfera, podendo ser horizontal ou normal;

- Radiação difusa: potência radiante do céu, recebida em uma determinada área em uma superfície horizontal, excluída a radiação direta;
- Radiação global: potência radiante solar, recebida em uma determinada área em uma superfície horizontal, que é igual à soma da radiação direta mais a radiação difusa.

Para o dimensionamento de sistemas FV a radiação mais relevante não é a global, mas sim a radiação para o plano inclinado, pois ela leva em consideração a radiação refletida do solo o que é desnecessário para uma superfície horizontal.

A grandeza empregada para quantificar a radiação solar é a irradiância, e esta é entendida como a densidade instantânea da radiação solar incidente sobre uma dada superfície, normalmente expressa em W/m^2 , ou seja, potência em uma determinada área. É comum confundir as palavras irradiância e irradiação, no entanto seus conceitos divergem. A irradiação é a soma da energia solar que incide sobre uma superfície em determinado período de tempo, como, por exemplo, hora, dia, mês ou ano. Essa grandeza é normalmente expressa em Wh/m^2 , isto é, corresponde à energia em uma determinada área.

A melhor maneira de instalar um módulo fotovoltaico fixo, ou seja, sem sistema de rastreamento solar, é orientá-lo com sua face voltada para o norte geográfico para regiões no hemisfério sul, já para o hemisfério norte os módulos fotovoltaicos deverão ser orientados para o sul geográfico, essa orientação corresponde ao direcionamento do módulo para a linha do equador. Quanto à inclinação, para o máximo aproveitamento na produção de energia elétrica, os módulos devem estar orientados de tal forma que estejam inclinados com um ângulo igual à latitude do local onde estão instalados [29, 2].

Na Figura 6, que pode ser vista na sequência, é exemplificada a diferença de se instalar um módulo FV de acordo com sua inclinação. É perceptível a vantagem de se instalar um painel com a inclinação igual a latitude local em detrimento à instalação na horizontal, a Figura 6 mostra um ganho de $100 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$ para duas localidades no estado da Bahia e um ganho de $200 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$ para um ponto localizado no Paraná, em ambos os casos, o maior potencial de geração foi possível apenas por considerar a instalação de módulos com inclinação igual à latitude do local.

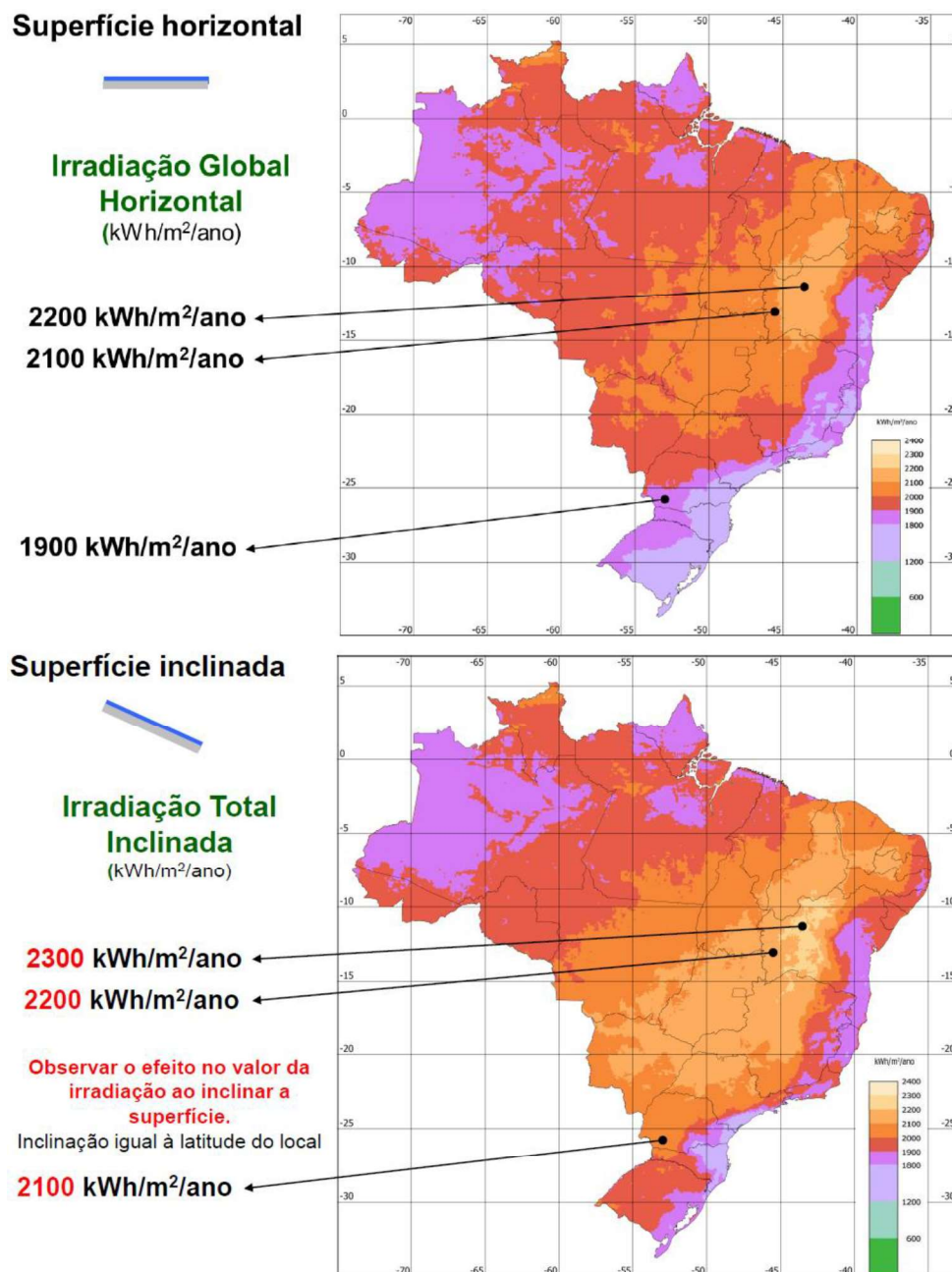


Figura 6 - Comparação entre a instalação de um módulo na horizontal e com inclinação.
Fonte: Adaptado de [29].

Como já foi mencionado, a quantidade de energia produzida por um sistema FV depende da irradiação do local onde está instalado e, nesse sentido o Brasil conta com ótimas taxas de irradiação. Além disso, conforme mostra a Figura 7, a região nordeste se destaca por ter as melhores médias de irradiação do país. É justamente na região Nordeste, interior do estado de Pernambuco que se encontra o parque de geração híbrida solar-eólica “Fontes”, que consiste no cerne do presente trabalho.



Figura 7 - Níveis de irradiação solar por região.
Fonte: [16].

2.1.3 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas de geração FV podem ser classificados em dois tipos, Sistema Fotovoltaico Isolado (SFVI) e Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFVCR), eles também são chamados, respectivamente, de sistemas *off-grid* e *on-grid* [19]. O sistema a ser

escolhido irá depender de fatores como o valor do investimento inicial, o custo de manutenção e a disponibilidade de recursos energéticos [2].

Os sistemas *off-grid* são isolados da rede elétrica, geralmente utilizados em áreas de difícil acesso, não atendidas por uma concessionária de energia elétrica. Como os módulos fotovoltaicos não convertem energia durante a noite os SFVI geralmente possuem baterias para armazenar a energia que será consumida durante esse período [20, 22]. O chaveamento da corrente elétrica para as cargas ou para as baterias é feito por um controlador de carga.

A inevitabilidade de contar com um sistema de armazenamento e um controlador de carga tornam os SFVI mais caros do que os SFVCR, no entanto, a popularização desse tipo de sistema pode vir a tornar sua implantação menos onerosa, assim como aconteceu nos últimos anos com os módulos fotovoltaicos, inversores e serviços de projeto e instalação [31].

A Figura 8 ilustra a dinâmica de uma unidade geradora *off-grid*, onde um controlador de carga direciona o fluxo de potência para um banco de baterias ou para um inversor, que por sua vez alimenta as cargas.

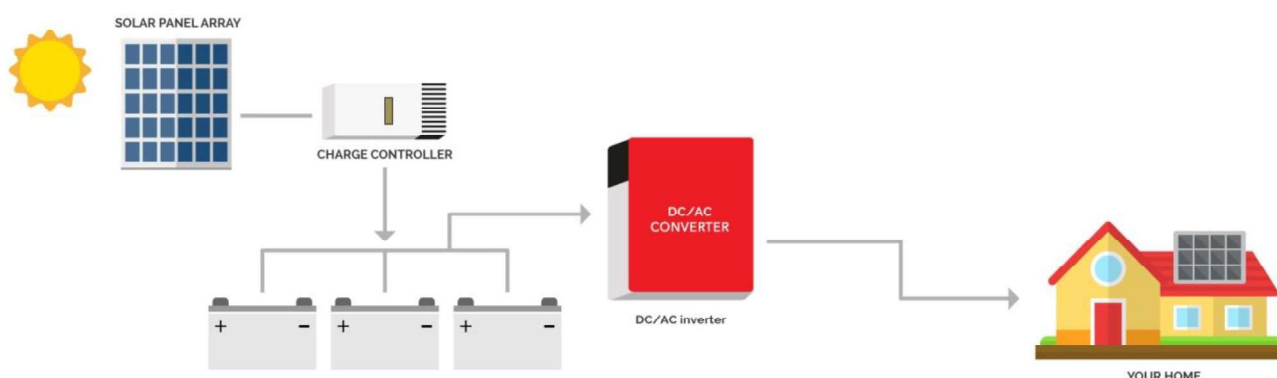


Figura 8 - Sistema fotovoltaico *off-grid*.
Fonte: [32].

Nos sistemas *on-grid* a geração é diretamente conectada à rede elétrica. Nessa modalidade a energia elétrica fornecida pelos painéis fotovoltaicos é utilizada para suprir a carga da instalação, quando a geração é insuficiente para suprir a demanda, a rede elétrica complementa o montante necessário, situação que ocorre, por exemplo, durante a noite. Nos momentos em que a geração é maior do que a demanda, o excedente é injetado na rede elétrica e o consumidor passa a possuir créditos com a concessionária local [15].

Para contabilizar o saldo do consumidor, os SFVCR contam com um medidor bidirecional, que é capaz de registrar tanto a energia que é injetada na rede, quanto o montante que é vendido ao usuário. Caso o saldo mensal seja positivo, ele pode ser utilizado para abater

a fatura nos 60 meses seguintes, além de poder ser utilizado no abatimento de demais faturas do mesmo consumidor que estejam na mesma área de concessão [25].

Outro dispositivo que possui um papel fundamental em um SFVCR é o inversor de frequência. Sua função básica é converter a energia gerada em corrente contínua para corrente alternada, com vistas a injetar os excedentes na rede elétrica sem causar contratempos.

O inversor também é responsável por garantir o sincronismo da geração com a frequência da rede elétrica e o não ilhamento do sistema. O não ilhamento significa uma condição onde quando ocorrer uma falta no sistema elétrico de potência da distribuidora o inversor deverá desconectar a geração.

Esses critérios de segurança são estabelecidos no PRODIST Módulo 3 Seção 3.7 item 4.3 Rev. 724/2016 [33], que salienta em suas notas (5) e (6):

(5) Não é necessário relé de sincronismo específico, mas um sistema eletroeletrônico que realize o sincronismo com a frequência da rede e que produza uma saída capaz de operar na lógica de atuação do elemento de interrupção, de maneira que somente ocorra a conexão com a rede após o sincronismo ter sido atingido.

(6) No caso de operação em ilha do acessante, a proteção de anti-ilhamento deve garantir a desconexão física entre a rede de distribuição e as instalações elétricas internas à unidade consumidora, incluindo a parcela de carga e de geração, sendo vedada a conexão ao sistema da distribuidora durante a interrupção do fornecimento.

As exigências tornam necessário o uso de um inversor *grid tie*, o qual garante o sincronismo da geração com a rede elétrica e a condição de não ilhamento na ocorrência de uma falta [19].

A Figura 9 elucida a operação de um sistema *on-grid*, são representados esquematicamente os dispositivos anteriormente citados, assim como os sentidos do fluxo de potência.

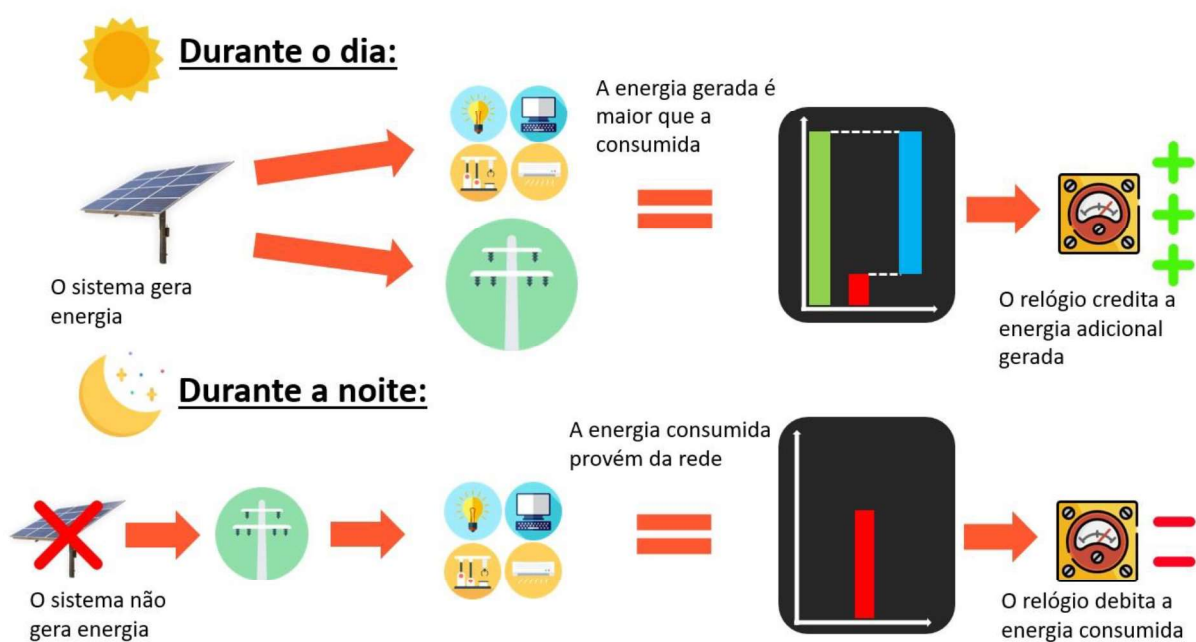


Figura 9 - Sistema *on-grid*.
Fonte: [34].

2.1.4 CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A célula fotovoltaica é a unidade fundamental de qualquer sistema FV, é nela que a energia da radiação solar é convertida em energia elétrica [15, 19]. Como unidade fundamental, a potência de uma célula é pequena, por isso, várias delas são associadas em série e/ou paralelo para que se obtenham níveis de tensão e corrente desejáveis à aplicação.

Abaixo, na Figura 10, é ilustrada a situação de uma célula como unidade fundamental de um sistema. A união de várias células forma um módulo (ou painel), popularmente chamado de “placa”, a união de módulos em série ou paralelo forma um arranjo (ou *string*), já o conjunto de *strings* que também podem ser ligadas em série ou paralelo formam o sistema FV completo.

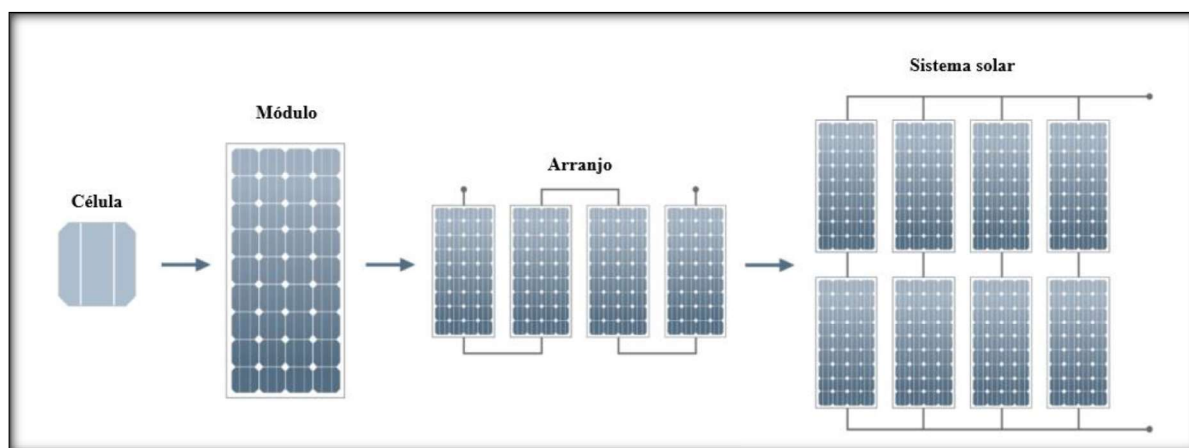


Figura 10 - Célula como unidade fundamental de um sistema solar.
Fonte: Adaptado de [35].

Uma vez que as conexões em um sistema solar podem ser feitas em série ou paralelo, é importante saber quais as consequências de cada uma dessas. A Figura 11 exemplifica uma situação de um sistema em série/paralelo, onde é possível visualizar que os módulos em paralelo tiveram suas correntes somadas, o que justifica a corrente de 30 A (Ampères) nos terminais do circuito. Por sua vez, cada módulo possui uma tensão de 12 V (Volts), logo as tensões em série se somam, o que deixa os terminais do circuito com um potencial de 24 V.

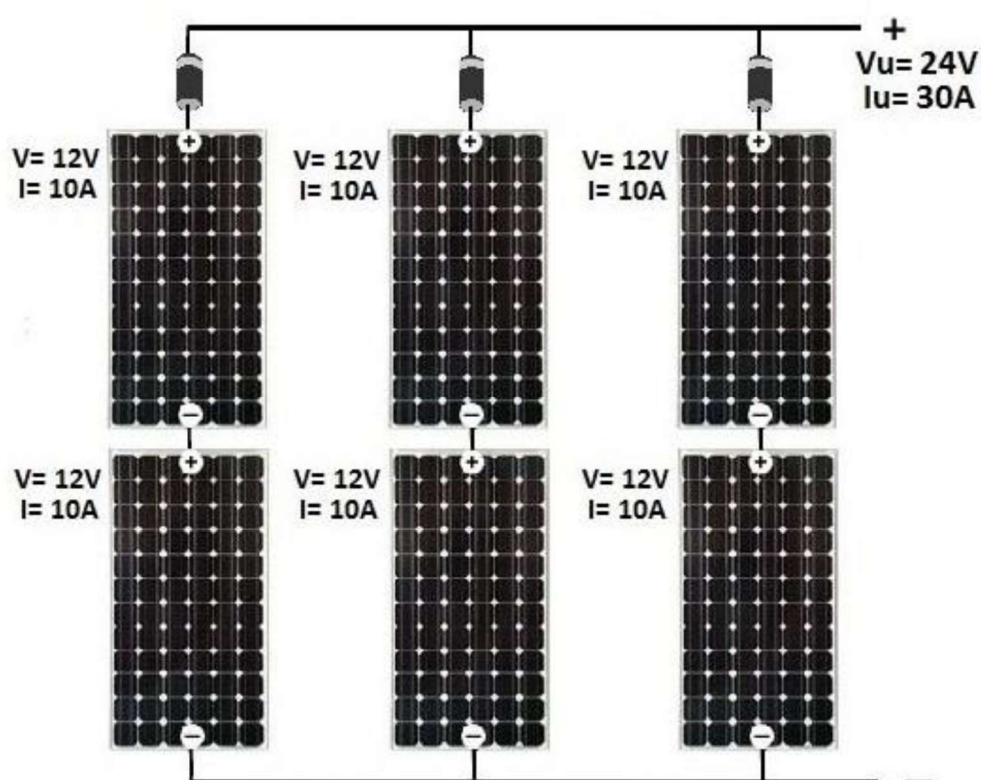


Figura 11 - Módulos fotovoltaicos em série/paralelo.
Fonte: [36].

Sintetizando as informações da Figura 11, módulos em série possuem a mesma corrente e suas tensões somam-se, já os painéis em paralelo têm a mesma tensão e as suas correntes se acrescentam [19].

As células FV são fabricadas com materiais semicondutores, para tanto, o material mais utilizado é o silício, devido à sua abundância. A diferença básica entre condutores, semicondutores e isolantes, essencialmente é a energia necessária para levar um elétron da banda de valência para a banda de condução, de modo que entre essas regiões do átomo existe uma área chamada *gap*, a qual é maior quanto pior condutor é um material [37].

A Figura 12 mostra a dinâmica entre as bandas de energia em materiais isolantes, condutores e semicondutores.

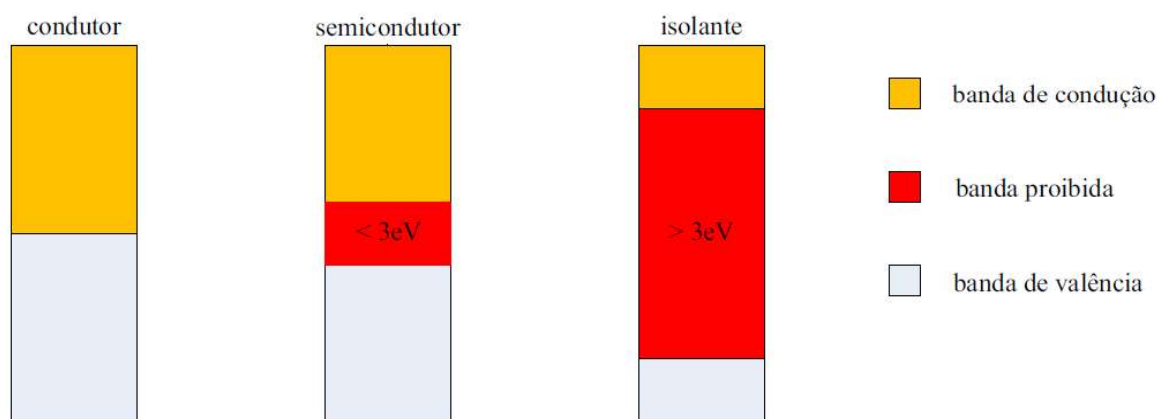


Figura 12 - Bandas de energia em condutores, semicondutores e isolantes.
Fonte: Adaptado de [37].

Com o propósito de melhorar as características do silício para a passagem de corrente elétrica, esse passa por um processo chamado de dopagem, nesse processo o material intrínseco (puro), que é tetravalente (quatro elétrons na camada de valência) é fundido com materiais trivalentes, como o Boro, ou com materiais penta-valentes, como o fósforo. Após passar pelo processo de dopagem, o cristal de silício puro se torna um material extrínseco (contém impurezas).

A adição de átomos penta-valentes, irá acrescer à estrutura do silício puro um elétron extra, que estará fracamente ligado ao núcleo do átomo penta-valente. Assim, na incidência de fótons da radiação solar, esse e os demais elétrons fracamente ligados aos seus núcleos irão se transformar em elétrons livres e darão origem a uma corrente elétrica [37, 38].

Da mesma forma, a adição de impurezas trivalentes, como o boro (B), na estrutura do silício irá deixar uma lacuna, o que equivale à ausência de um elétron. Assim, quando o

semicondutor receber energia suficiente, um elétron de um átomo vizinho irá se deslocar para a lacuna e assim sucessivamente, dando origem a uma corrente elétrica.

Quando os semicondutores extrínsecos possuem em sua estrutura um átomo trivalente, eles são chamados semicondutores extrínsecos tipo p. Por sua vez, quando os semicondutores extrínsecos possuem em sua estrutura átomos penta-valentes, eles são classificados como extrínsecos do tipo n [19, 37].

Uma célula FV é composta da união de uma fina camada de material do tipo n com outra do tipo p, esta com maior espessura. Ao serem unidos, os dois materiais formam uma região chamada de junção pn, onde há um campo elétrico devido aos elétrons do silício tipo n ocuparem os vazios da estrutura de silício tipo p que estão mais próximos da junção.

Quando é incidida luz sobre a célula fotovoltaica, os fótons fornecem energia para os elétrons do silício retirando-os da banda de valência para a banda de condução. Devido ao campo elétrico gerado pela junção pn, os elétrons são orientados e fluem da camada p para a camada n. Com a conexão de um condutor externo, que liga a camada positiva à camada negativa é gerada corrente elétrica enquanto houver luz solar. Quanto mais intensa a luminosidade, maior é o módulo da corrente, a recíproca também é verdadeira [15]. Na Figura 13, abaixo, é representada a dinâmica da junção pn durante a incidência de luz.

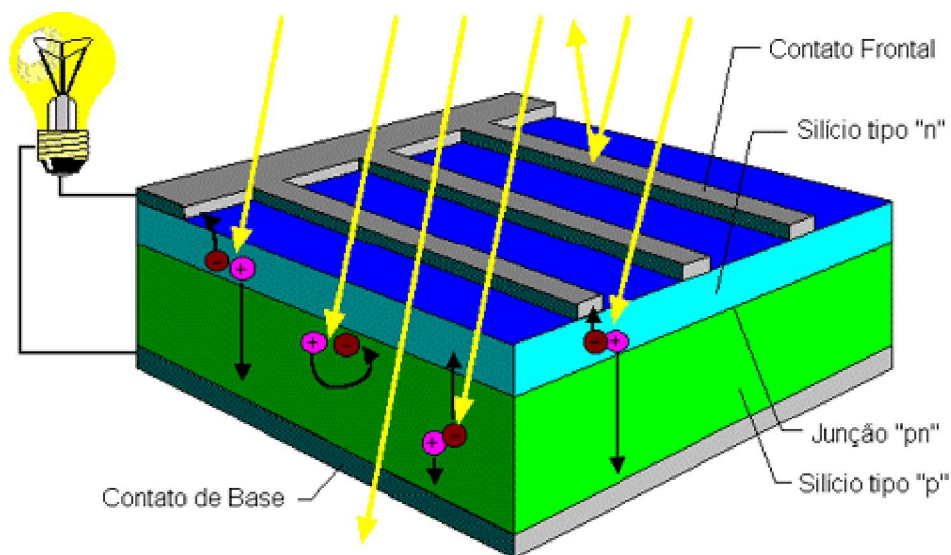


Figura 13 - Seção transversal de uma célula FV.
Fonte: [39].

As principais características que influenciam a geração dos módulos FV são as altas temperaturas e a luminosidade. Com o aumento da temperatura o rendimento das células abaixa, consequentemente, o mesmo acontece com sua potência máxima gerada. Quanto maior a luminosidade, maior a corrente gerada [20]. Essas características colocam o Brasil em

um dilema, uma vez que os índices nacionais de irradiância são consideravelmente altos, assim como a temperatura.

Devido às particularidades de cada aplicação, aliadas ao constante desenvolvimento tecnológico, existem várias tecnologias de fabricação de células fotovoltaicas, sendo as mais comuns:

- Silício monocristalino;
- Silício policristalino;
- Filmes finos.

As células de silício monocristalino são fabricadas a partir de cristais de silício puros, os quais são fundidos e transformados em lingotes, que por sua vez são fatiados em lâminas individuais, que serão tratadas e transformadas em células [15]. A eficiência deste tipo de tecnologia está entre 16,5% e 25%, e relaciona-se à pureza do material, o que por outro lado dificulta a redução do seu custo de produção.

O silício policristalino é o mais difundido, as células com essa tecnologia são as de maior aceitação comercial. Sua tecnologia de fabricação é mais barata, por ser exigido menos rigor na preparação das células, se comparada ao silício monocristalino, no entanto sua eficiência de conversão de energia é inferior, atingindo níveis na faixa de 16,2 % [2].

Na Figura 14, abaixo, é apresentado um exemplo de células de silício monocristalino e policristalino, observa-se a uniformidade da cor do monocristalino (acima) defronte ao policristalino (abaixo), onde é possível observar a formação múltipla de cristais.

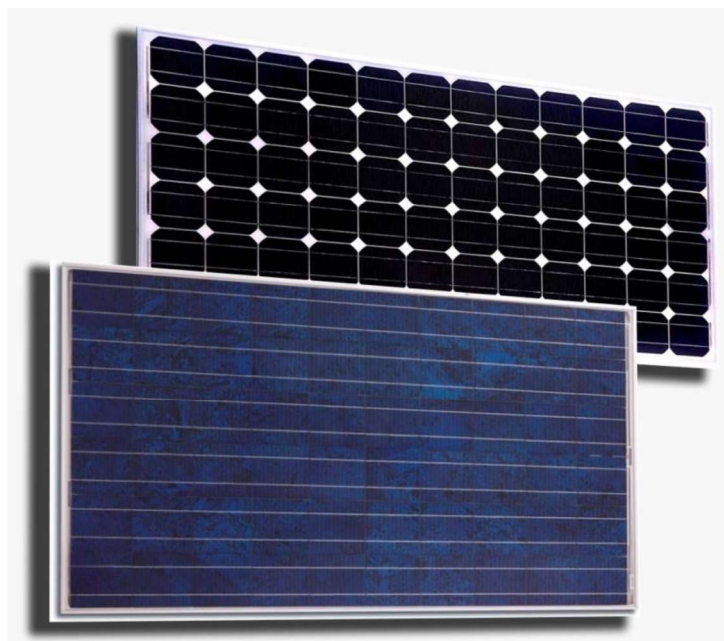


Figura 14 - Célula de silício monocristalino X silício policristalino.
Fonte: [40].

Os filmes finos podem ser produzidos com silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre e índio (CIS) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe). Possuem menor eficiência do que as tecnologias anteriormente citadas, problemas de vida útil, disponibilidade de materiais e toxicidade, no caso do cádmio [15]. No processo de fabricação dos filmes finos, camadas de baixa espessura de materiais semicondutores são depositadas, através de vaporização, por exemplo, em uma base que poderá ser rígida ou flexível. Essa tecnologia é empregada em áreas de baixos níveis de radiação direta, como janelas e fachadas de prédios, possui menor sensibilidade ao efeito da elevação da temperatura, em contrapartida sua eficiência é baixa, da ordem de 8%. Abaixo, na Figura 15, pode ser vista uma aplicação dos filmes finos, em uma árvore solar.



Figura 15 - Árvore solar de filmes finos.
Fonte: [41].

A vida útil de um painel solar é superior a 25 anos, geralmente esse tempo é igual à quantidade de anos da garantia cedida pelos fabricantes [42]. Durante seu funcionamento, os gastos com a manutenção de módulos se resume à limpeza para manter o rendimento do sistema e manutenções preditivas, como termografia, para garantir a integridade do sistema.

2.2 ENERGIA EÓLICA

Segundo [20], a energia eólica consiste em captar a movimentação dos ventos a partir de um aparato capaz de converter a energia cinética do ar, se movimentando na atmosfera, em energia mecânica. Para a conversão em energia mecânica, são utilizadas pás, dispostas a uma determinada altura, as quais têm seu movimento transmitido para um gerador, o qual converte a energia mecânica em energia elétrica.

A energia eólica é utilizada há milhares de anos, com a finalidade de bombeamento de água e moagem de grãos. No que diz respeito à geração de energia elétrica, a primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica foi instalada em 1976, na Dinamarca. Atualmente estima-se que existam mais de trinta mil turbinas eólicas em operação no mundo [18].

2.2.1 ASPECTOS GERAIS E PANORAMA BRASILEIRO

Para ser considerada tecnicamente aproveitável, a energia eólica precisa ter uma densidade de no mínimo 500 W/m², o que a uma altura de 50 m equivale a ventos com velocidade mínima de 7 m/s. Em apenas 13% da superfície terrestre essa condição existe, mesmo assim o potencial eólico mundial líquido chega a 53000 TWh [18].

Conforme pode ser visto na Figura 16, no ano de 2018 a capacidade de geração de energia através da fonte eólica instalada em todo o mundo atingiu a marca de 591 GW.

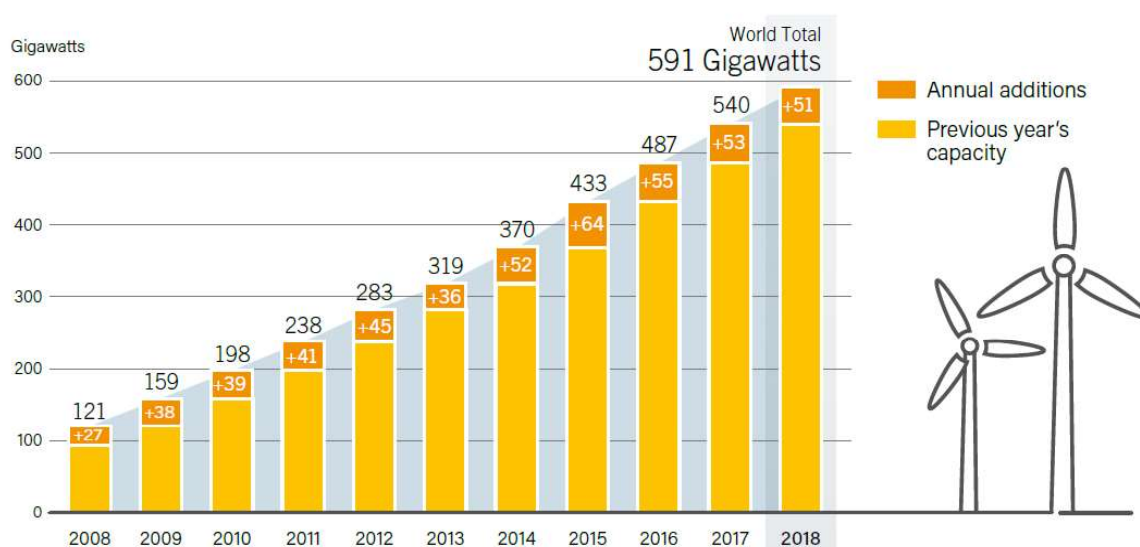


Figura 16 - Capacidade instalada de energia eólica e aumento anual no mundo.
Fonte: [11].

O potencial eólico mundial equivale a pouco mais do que o dobro do consumo de energia elétrica mundial no ano de 2017, conforme pode ser consultada a Figura 1. No Brasil o potencial eólico estimado é da ordem de 143 GW [18]. Estima-se que no Brasil, a potência instalada de energia eólica *onshore* irá atingir o patamar de 21 GW em 2035 [43].

É imprescindível levar em consideração a localização e a altura da torre para que sua capacidade de geração seja eficaz. Dessa forma, busca-se instalar os geradores eólicos onde os ventos tenham velocidades mais significativas e sejam mais consistentes [15].

O vento, combustível para o movimento das turbinas eólicas tem sua origem na associação entre a energia proveniente do Sol e o movimento de rotação da Terra. Assim como a energia solar, a energia eólica é tida como uma fonte renovável e inesgotável, já que depende de um mecanismo solar –planetário cuja duração está na escala de bilhões de anos [44].

Dentre os aspectos de circulação geral da atmosfera que influem sobre a distribuição geral dos ventos no Brasil se destacam os sistemas de alta pressão Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul e do Atlântico Norte e a faixa de baixas pressões da Depressão Equatorial [44].

A Figura 17, a seguir, ilustra a dinâmica dos ventos que intervém na disposição desse recurso em território brasileiro.

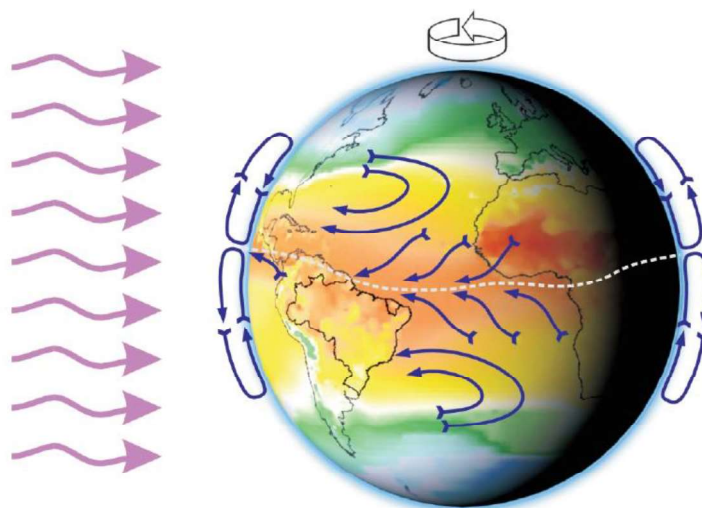


Figura 17 - Distribuição geral dos ventos.
Fonte: [44].

Na Figura 18 é mostrado o potencial eólico brasileiro para sistemas a uma altura de 80 metros. Esse exemplo foi escolhido propositalmente, devido aos aerogeradores do conjunto Fontes terem exatamente essa altura.

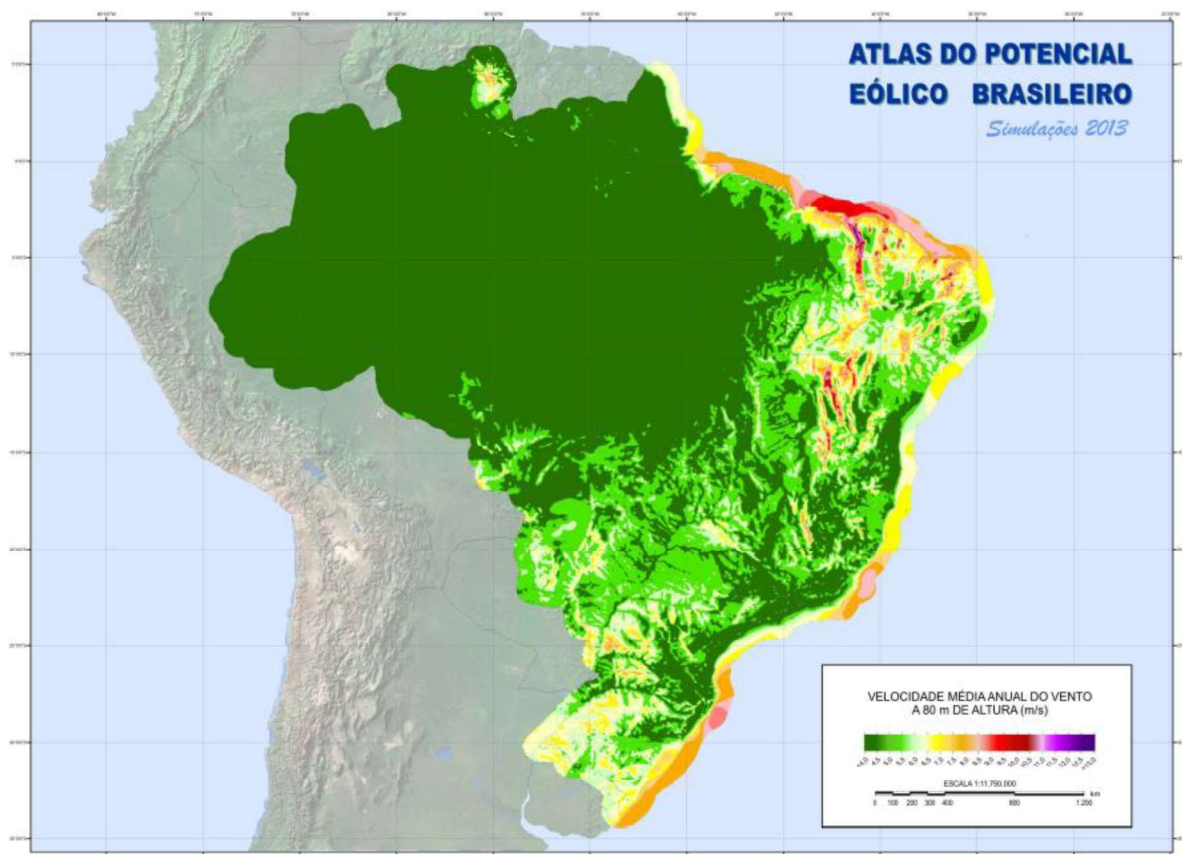


Figura 18 - Potencial eólico no Brasil para a altura de 80 metros.
Fonte: [45].

A quantidade de energia que o vento transfere para o aerogerador depende da densidade do ar, da velocidade do vento e da área de giro das lâminas do rotor [46].

Segundo [46], a energia cinética de um corpo depende da sua massa, por isso a energia cinética do vento depende da densidade do ar. Quanto maior é a densidade do ar, mais energia cinética ele poderá transferir para uma turbina, no entanto, a densidade do ar depende da pressão atmosférica e da temperatura do ar. Quanto maior a altitude, menor é a pressão atmosférica e menos denso é o ar. O mesmo acontece com a temperatura, que é inversamente proporcional à densidade.

No nível do mar, a altitude é nula e a pressão atmosférica é igual a 1 atm (101,325 kPa), a temperatura do ar é de aproximadamente 15°C e a sua densidade é igual a 1,225 kg/m³. Assim, uma porção de ar cilíndrica, com um metro de comprimento que passa por um rotor de 108 metros tem uma massa de 5,6 ton., conforme pode ser visto na equação (1).

$$m = \rho \times A \times e = 1,225 \times \pi \times \left(\frac{108^2}{4}\right) \times 1 \approx 5,6 \text{ ton} \quad (1)$$

Onde:

m = massa;
 ρ = densidade do ar;
 A = área coberta pelo coletor do rotor;
 e = comprimento da massa de ar considerada.

Apesar de ser considerada renovável e inesgotável, a energia eólica causa impactos socioambientais negativos, onde se destacam os sonoros e visuais. O impacto sonoro devido ao ruído causado pelo movimento do rotor varia de acordo com o equipamento. O impacto visual depende dos equipamentos e das dimensões do sistema, por se tratar de um equipamento robusto, é notório o grande impacto visual de um aerogerador. Outro impacto negativo dessa tecnologia é a possibilidade de interferências eletromagnéticas, que podem causar perturbações nos sistemas de comunicação e transmissão de dados. Por fim, torres instaladas nas rotas de aves podem causar acidente com estas [18].

Apesar dos impactos negativos mencionados, um fator preponderante para a não popularização dessa tecnologia é o elevado preço de tais sistemas, principalmente devido à infraestrutura necessária. Mesmo com o empecilho financeiro, a Figura 16 comprova um cenário de crescimento.

2.2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS EÓLICOS

Da mesma forma que os sistemas fotovoltaicos, os parques de geração eólica podem ser classificados como *on-grid*, quando são conectados à rede elétrica, e *off-grid*, quando os sistemas são isolados.

Outra distinção comum se trata em classificar os sistemas em *onshore* e *offshore*.

Na energia eólica *onshore*, modelo mais utilizado em todo o mundo, os aerogeradores são instalados em terra, no continente. Seus requisitos são a disponibilidade de grandes áreas com potenciais de vento consideráveis, além de sistemas de para-raios, devido a altura das torres, e uma fundação condizente com as condições do terreno e dimensões do conjunto torre/gerador [2].

A energia eólica *offshore* se refere aos sistemas instalados fora do continente, nos mares e oceanos, por exemplo. No Brasil ainda não há parques eólicos *offshore*. Essa modalidade é mais eficiente do que os geradores *onshore*, entretanto seu custo de instalação e manutenção é maior, principalmente devido às demandas estruturais e aos cabos para transmissão do potencial produzido [2].

A tendência é que o número de aerogeradores *offshore* aumente, principalmente por sua superioridade para a conversão de energia. Além disso, também existem vantagens de cunho socioambiental, uma vez que os parques são instalados fora do continente, problemas como ruídos e poluição visual são mitigados [47].

2.2.3 AEROGERADORES

No início da utilização da energia eólica diversos modelos de turbinas surgiram, com eixo horizontal, vertical, com variada quantidade de pás e diferentes modelos de geradores. Atualmente consolidaram-se os sistemas com eixo vertical, três pás, estrutura rígida alinhamento dinâmico e gerador de indução [18].

Quanto à capacidade de geração, no início da década de 90, as turbinas possuíam potências entre 100 kW e 300 kW [18]. Atualmente, a potência instalada das turbinas eólicas supera a faixa dos 10 MW, assim como pode ser visto na Figura 19, que apresenta a potência de vários modelos produzidos pela fabricante Siemens Gamesa.

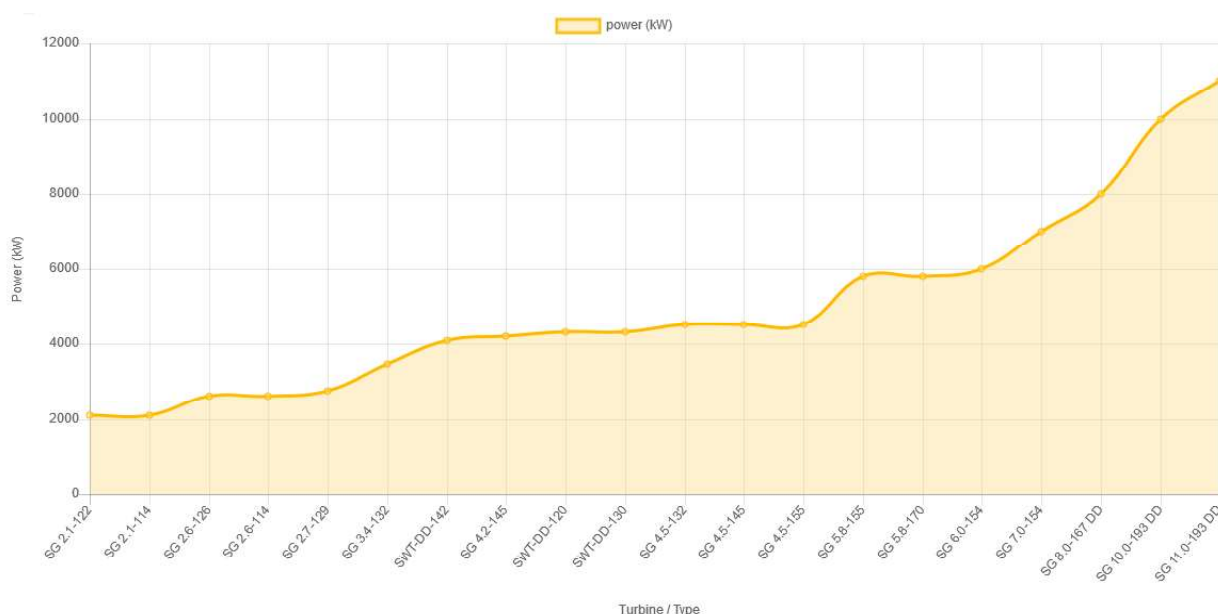


Figura 19 - Potência dos geradores Siemens Gamesa.
Fonte: [48].

Nos últimos anos, pesquisas têm buscado inovações tecnológicas que permitam a geração com acionamento direto, sem multiplicador de velocidade, a partir do uso de geradores síncronos e de relutância variável associados ao uso de técnicas de controle que permitem o funcionamento das turbinas em velocidade variável. Na Figura 20, podem ser vistas as principais partes de um aerogerador convencional.

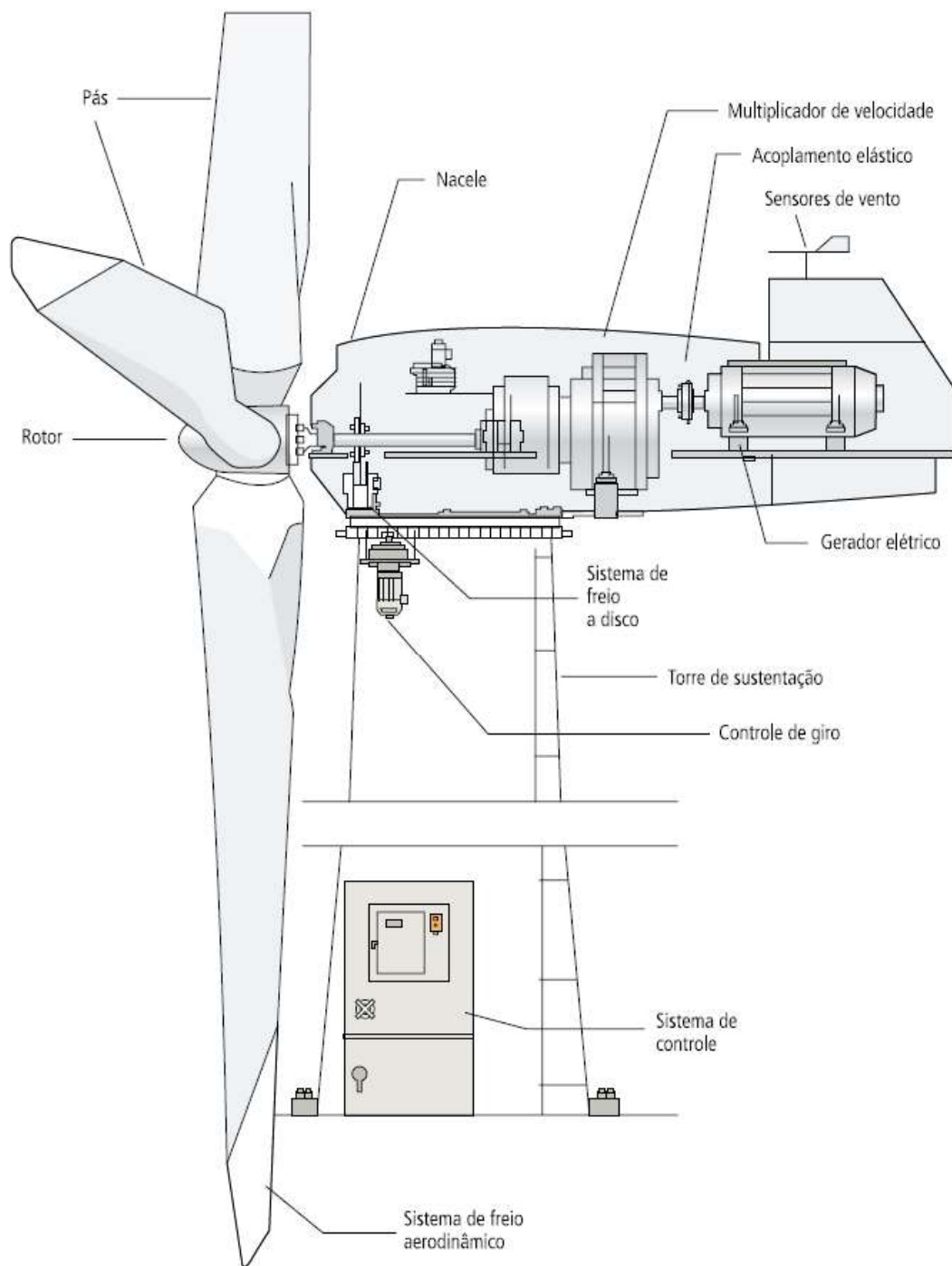


Figura 20 - Partes de um aerogerador.

Fonte: [18].

Um aerogerador capta parte da energia cinética do vento que passa através da área varrida pelas pás e a transforma em energia elétrica [46]. A velocidade do vento é primordial para determinar a potência extraída do vento e pode ser calculada a partir da equação (2), abaixo:

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

Onde:

ρ = densidade do ar em $\frac{kg}{m^3}$;

A = área coberta pelas pás do rotor;

v = velocidade do vento;

C = coeficiente aerodinâmico de potência do rotor;

η = eficiência do conjunto gerador/transmissão.

Após passar por um aerogerador, a velocidade do vento a jusante do rotor é reduzida, geralmente a velocidade se recupera ao misturar com o ar do escoamento livre. Ao mesmo tempo as pás criam uma esteira helicoidal de vórtices, que gradualmente se dissipa.

Com vistas a proporcionar a instalação de turbinas próximas umas das outras, é necessário reservar um espaçamento para minimizar as perdas de desempenho causadas pela interferência da turbina anterior. De modo geral são consideradas distâncias seguras para a instalação de novas turbinas um espaçamento de 10 vezes o diâmetro D das pás da turbina existente, caso a nova seja instalada a jusante, e de 5 vezes o diâmetro D das pás da turbina existente, caso a nova seja instalada ao lado. A Figura 21 ilustra uma situação ideal para a instalação de novos aerogeradores [44].

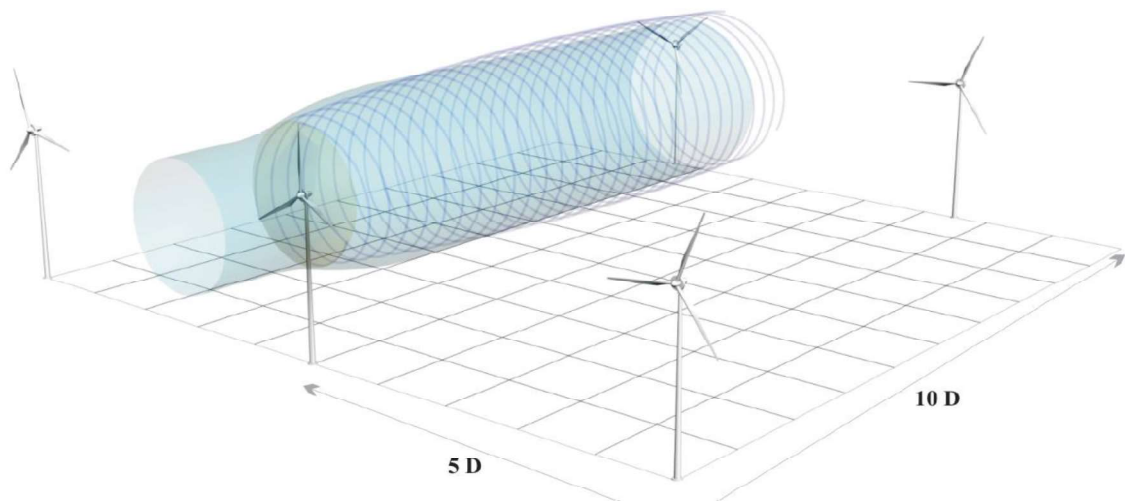


Figura 21 - Distância para a instalação de novos aerogeradores.

Fonte: [44].

2.3 SISTEMAS HÍBRIDOS E COMPLEMENTARIDADE

2.3.1 SISTEMAS HÍBRIDOS

Os sistemas híbridos de energia elétrica são definidos como sendo aqueles que utilizam mais de uma fonte de geração de energia que, dependendo da disponibilidade dos recursos, devem gerar e distribuir energia elétrica, de forma otimizada e com custos mínimos, a uma determinada carga ou a uma rede elétrica, isolada ou conectada a outras redes. Visto a eficiência do sistema híbrido, empresas do mercado brasileiro de energia estão investindo, aos poucos, recursos em projetos de sistemas híbridos solar-eólico [42].

Um problema comum às fontes solar e eólica é sua intermitência, a qual existe devido a ambas dependerem de fatores climáticos, como a incidência solar e a dinâmica dos ventos. Para aumentar a confiabilidade de um sistema, uma estratégia é combinar mais de uma forma de geração, de modo que essas se complementem. Portanto, um sistema híbrido é planejado para que uma fonte possa suprir a falta temporária de outra, ele tem a capacidade de operar com um risco de interrupção menor [49].

Os sistemas híbridos não são compostos apenas de fontes renováveis, inclusive os mais tradicionais fazem o uso de geradores diesel. Atualmente uma modalidade muito comum são os sistemas solares híbridos, que combinam as características de sistemas *on-grid* com as características de sistemas *off-grid*. Nessa modalidade, o consumidor conta com o armazenamento de energia elétrica em baterias e, no caso de uma falta da rede de distribuição, elas sustentam a demanda [50].

O primeiro sistema híbrido do Brasil foi implantado em 1986, em Fernando de Noronha, utilizando-se das fontes eólica e diesel, sua potência era de 75 kW na época da implantação. O sistema passou por modernizações e atualmente possui uma capacidade nominal de 2,1 MW [49].

Os sistemas híbridos podem ser caracterizados quanto ao uso das fontes de energia em baseados em recursos renováveis ou não renováveis. Quanto à sua conexão com a rede elétrica eles podem ser classificados em isolados, quando são independentes do sistema elétrico de potência, ou interligados, quando são conectados à rede elétrica [15].

Quanto à configuração, os sistemas híbridos podem ser classificados em série, paralelos ou chaveados. Nos sistemas série as fontes renováveis e não renováveis são utilizadas para carregar um banco de baterias e um controlador de carga realiza o gerenciamento da carga das baterias e o chaveamento do grupo gerador [49]. No modo paralelo, as fontes geradoras são conectadas de forma paralela aos barramentos através de um

controlador e um inversor [15]. Na configuração chaveada, a mais empregada onde há a presença de grupos geradores ao sistema, a carga pode ser suprida por quaisquer fontes do sistema, mas não ao mesmo tempo por todas, assim é necessário um sistema e controle para o monitoramento da demanda e a geração, para chavear o suprimento entre as fontes [49].

A Figura 22, abaixo, exemplifica um sistema híbrido em paralelo, onde um controlador monitora um sistema composto por geração solar, baterias, gerador diesel e rede elétrica.

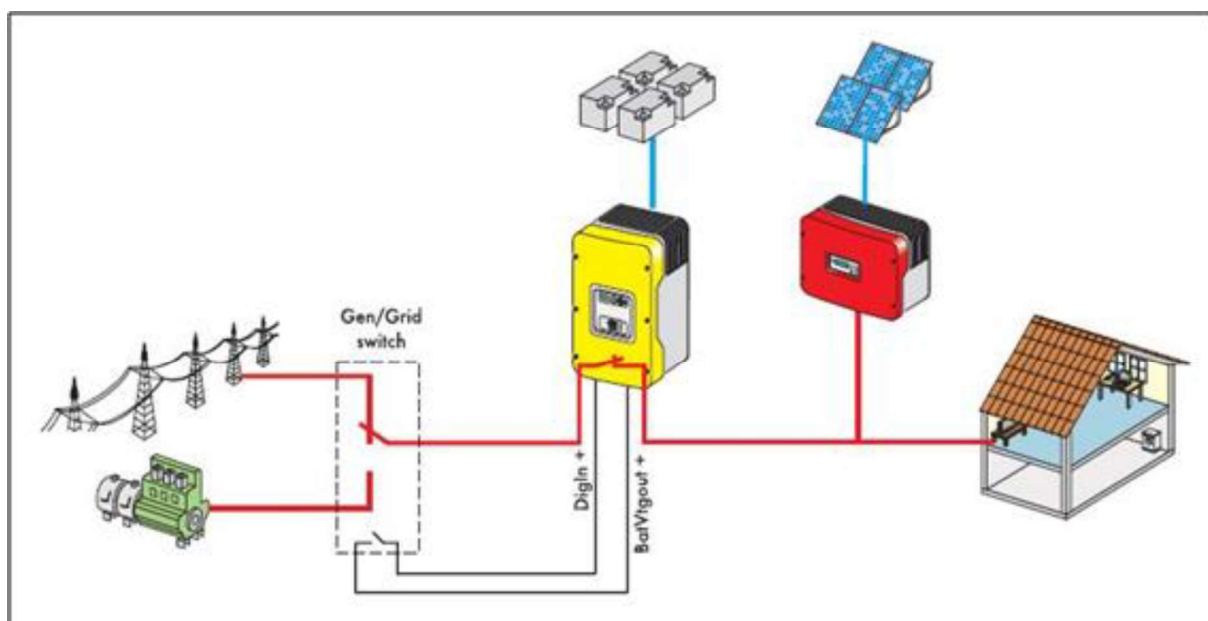


Figura 22 – Sistema híbrido.

Fonte: [51].

Um sistema híbrido de geração do tipo eólico-solar, como o caso do conjunto Fontes, é baseado nos aproveitamentos dos recursos naturais de vento e Sol, em que a combinação dessas fontes procura explorar satisfatoriamente a complementaridade entre ambas no tempo [49]. Uma das principais desvantagens de sistemas de geração de eletricidade individuais com as fontes de energia solar e eólica, a intermitência do recurso, pode ser parcial ou totalmente superada quando da utilização conjunta de tais fontes em sistemas híbridos. A complementaridade entre as fontes, muitas vezes verificada em alguns locais durante diferentes períodos de tempo, garante maior confiabilidade ao sistema [42].

2.3.2 COMPLEMENTARIDADE

Como mencionado no tópico anterior, o objetivo de se utilizar um sistema híbrido eólico-solar é superar a sazonalidade dos recursos e garantir uma oferta de energia elétrica

confiável. Caso esse objetivo seja atingido, é possível afirmar que as duas fontes são complementares.

A complementaridade energética é entendida como a capacidade de duas ou mais fontes serem complementares uma a outra num período determinado de tempo ou no espaço [2, 10].

A complementaridade espacial ocorre quando duas ou mais fontes de energia possuem disponibilidades complementares ao longo de uma região. A complementaridade temporal está associada à existência de períodos complementares de disponibilidade de energia entre duas fontes ao longo do tempo em uma mesma região [10].

Ao longo de um dia a irradiância solar para um local é razoavelmente previsível, iniciando no período da manhã, com valores irrisórios, atingindo o máximo próximo ao meio-dia, já até o pôr-do-sol os valores decrescem à zero. Por sua vez o comportamento dos ventos é menos previsível, no entanto a possibilidade de obtenção de ventos com velocidades mais elevadas nos períodos onde a radiação solar é menor ou inexistente confere confiabilidade ao sistema no fornecimento de energia elétrica [49].

No caso do conjunto de geração híbrida Fontes, será analisada a complementaridade diária entre as fontes solar e eólica, a partir do montante de energia elétrica produzida por cada fonte. Para que a complementaridade diária exista, faz-se necessária uma situação em que a disponibilidade solar tenha seu pico no momento do dia onde os ventos são mais brandos e vice versa. A Figura 23 representa essa situação considerada ideal.

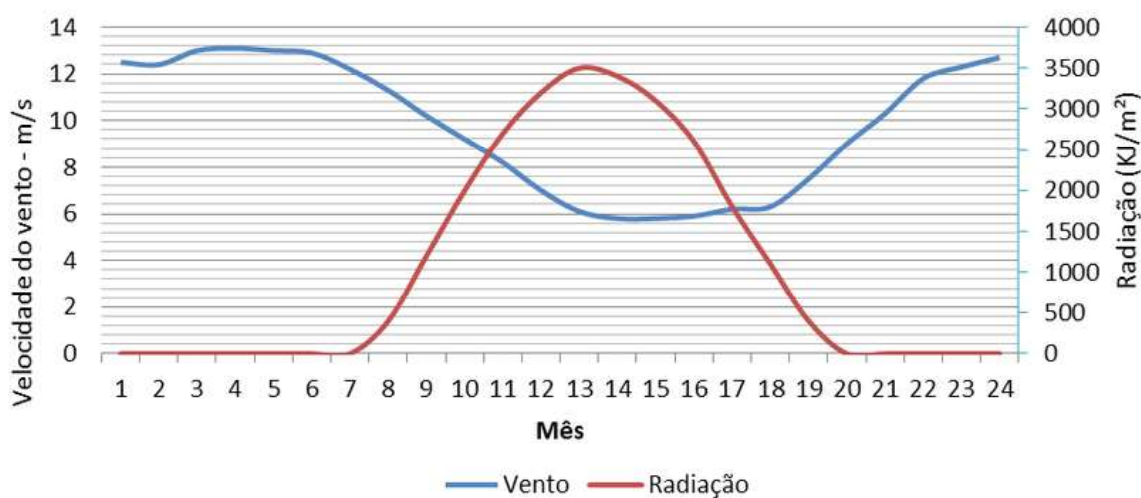


Figura 23 - Complementaridade solar e eólica diária.
Fonte: [52].

CAPÍTULO 3

PARQUE GERADOR HÍBRIDO FONTES

3.1 PARQUE FONTES

No ano de 2015 foi inaugurado o parque híbrido Fontes, no interior do Pernambuco, mais especificamente no município de Tacaratu, que consiste em um complexo que une geração solar e eólica. Primeiramente foram instalados os aerogeradores, para em seguida ser construída a usina solar. O conjunto entrou em funcionamento no mês de Setembro de 2015. O empreendimento pertence à empresa Enel Green Power e estima-se que o total investido no complexo foi de aproximadamente R\$ 660 milhões [53].

O conjunto Fontes é composto por duas usinas fotovoltaicas e três usinas eólicas. Os parques FV são Fontes Solar I e Fontes Solar II. As usinas eólicas são Pau Ferro, Pedra do Gerônimo e Tacaicó. Juntas, todas as usinas do complexo podem atender até 250 mil residências [53].

Ao todo o conjunto possui uma potência instalada de 90,9 MW, sendo 11 MW de geração solar e 79,9 MW de aproveitamento dos ventos.

A Figura 24, abaixo, mostra uma foto de satélite do conjunto Fontes, a qual foi obtida no site *Google Maps*, esse site permitiu também encontrar as coordenadas do local, que são 9°04'05.0" Sul e 38°08'31,5" Oeste [54].

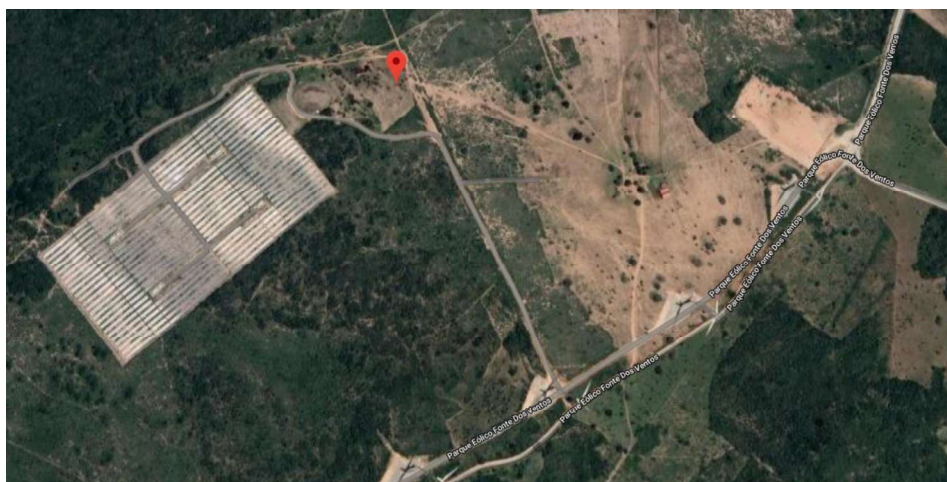


Figura 24 - Fotos via satélite do conjunto Fontes.
Fonte: [54].

No sistema, que é composto por diferentes unidades geradoras, cada usina do conjunto injeta sua potência em uma barra de 34,5 kV. Nessa barra há um transformador elevador, que aumenta o nível de tensão para 230 kV e conecta o complexo ao sistema de transmissão de energia elétrica. A junção das diferentes formas de geração em um mesmo barramento exige um controle de carga, conforme ilustra a Figura 25, abaixo.

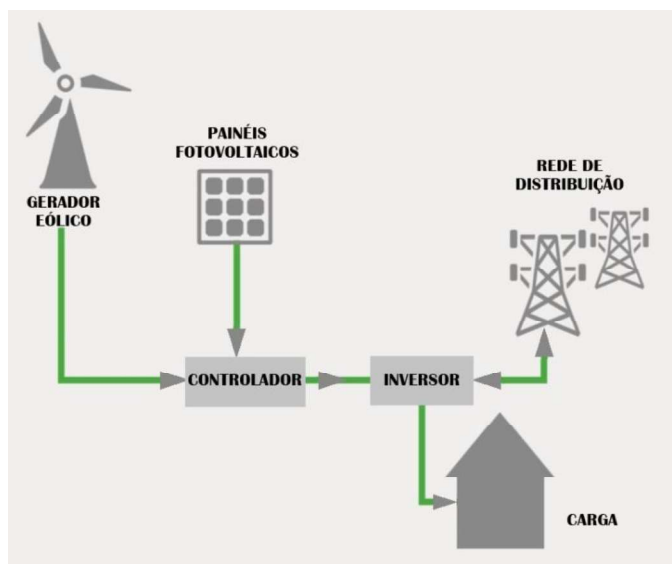


Figura 25 - Vista esquemática de um sistema híbrido solar-eólico.
Fonte: [15].

Como a potência gerada pelas usinas é intermitente, a injeção de potência ativa na rede elétrica não é controlada, no entanto a inserção de energia reativa é controlada para manter os níveis de tensão dentro da faixa de 5% acima ou abaixo do nível de tensão da barra.

A operação do complexo Fontes e de outros complexos distribuídos pelo país é realizada a distância na cidade de Cachoeira Dourada, interior de Goiás, onde a empresa Enel Green Power possui uma usina hidrelétrica.

3.1.1 PARQUE FONTES SOLAR

O parque solar Fontes Solar é constituído por duas usinas, Fontes Solar I e Fontes Solar II. Juntas, essas usinas ocupam uma área igual a 15339 m². Para a sua montagem foram utilizadas 312 estruturas de instalação no solo, sendo 156 estruturas para cada usina.

Ao todo, a potência total instalada nas usinas Fontes Solar I e Fontes Solar II, que são iguais, é de 11,0143 MWp, potência obtida por 35530 módulos fotovoltaicos de 0,31 kWp cada um.

Já que nem todas as informações possíveis foram fornecidas pela Enel Green Power, que considera certos dados como estratégicos para o negócio, as coordenadas geográficas do local onde estão instaladas as usinas foram utilizadas para a obtenção da incidência solar e de ventos no local.

Localidades próximas

Latitude: 9,068056° S
Longitude: 38,142083° O

#	Estação	Município	UF	País	Irradiação solar diária média [kWh/m².dia]																	
					Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta	
☑	Tacaratu	Tacaratu	PE	BRASIL	9,101° S	38,149° O		3,7	6,38	6,12	6,06	5,40	4,62	4,14	4,32	5,09	6,07	6,29	6,70	6,47	5,64	2,57
☑	Tacaratu	Tacaratu	PE	BRASIL	9,001° S	38,149° O		7,5	6,42	6,17	6,13	5,47	4,63	4,15	4,38	5,09	6,05	6,27	6,64	6,50	5,66	2,45
☑	Tacaratu	Tacaratu	PE	BRASIL	9,101° S	38,049° O		10,9	6,30	6,06	5,98	5,33	4,45	3,95	4,12	4,80	5,80	6,15	6,58	6,42	5,49	2,63

Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Tacaratu
Município: Tacaratu , PE - BRASIL
Latitude: 9,101° S
Longitude: 38,149° O
Distância do ponto de ref. (9,068056° S; 38,142083° O) : 3,7 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m².dia]																		
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta					
☑	Plano Horizontal	0° N	6,38	6,12	6,06	5,40	4,62	4,14	4,32	5,09	6,07	6,29	6,70	6,47	5,64	2,57					
☑	Ângulo igual a latitude	9° N	6,04	5,94	6,06	5,59	4,93	4,46	4,64	5,34	6,16	6,16	6,37	6,07	5,65	1,91					
☑	Maior média anual	5° N	6,20	6,03	6,07	5,52	4,80	4,33	4,51	5,24	6,14	6,23	6,53	6,26	5,66	2,22					
☑	Maior mínimo mensal	29° N	4,95	5,18	5,68	5,66	5,28	4,89	5,03	5,54	5,96	5,49	5,28	4,89	5,32	1,07					

3.1.2 PARQUE FONTE DOS VENTOS

As três usinas eólicas apesar das diferenças de potência instalada contam com aerogeradores do mesmo modelo, que se trata do SWT-2,35-108, fabricados pela Siemens Gamesa. Esse modelo de turbina eólica opera com um gerador assíncrono, instalado em uma

torre de 80 metros de altura. Acoplado ao rotor estão 3 pás cujo diâmetro de rotação possui 108 m, cobrindo uma área de 9144 m².

A Figura 27, abaixo contém as informações referentes ao potencial para a geração eólica do local onde está instalado o complexo Fontes.

Atlas do Potencial Eólico Brasileiro		Dados de vento a 50 m de Altura				
Grandeza	Unidade	Dez-Fev	Mar-Mai	Jun-Ago	Set-Nov	Anual
velocidade média do vento	m/s	5,68	4,98	5,48	5,82	5,49
fator c		6,41	5,62	6,12	6,55	6,19
fator k		2,17	2,23	3,17	2,66	2,47
densidade de potência	W/m2	198	131	137	182	162

Figura 27 - Potencial eólico em Tacaratu.

Fonte: [55].

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 VALORES MÉDIOS ANUAIS DE GERAÇÃO NO CONJUNTO FONTES

Os dados de geração coletados do conjunto Fontes são referentes ao período de um ano, que se inicia em 01/06/2018 e vai até 31/05/2019. As medições referentes à energia elétrica oriunda das fontes fotovoltaica e eólica são realizadas separadamente por instrumentos da Enel Green Power, em intervalos de uma hora, portanto, foram realizadas ao todo 17518 medições no período analisado.

Para lidar com o alto volume de dados, foi necessária uma estratégia, que consistiu em organizar todas as medições diárias no período de um mês e calcular a média mensal da geração em MWh para cada hora do dia. Todo o tratamento dos dados e desenvolvimento de gráficos foi realizado no *software* Excel, do *Microsoft Office*.

Para garantir a factibilidade das informações, foram eliminados das médias os dias com geração anormal por motivos de paradas para manutenção e demais acontecimentos esporádicos. Um exemplo dessa situação ocorreu no mês de março, quando as medições do dia 22 ao dia 26 estavam zeradas por motivos de manutenção programada, assim, para evitar um desvio padrão alto, que pudesse criar valores médios tendenciosos as medições desses dias foram eliminadas.

Os dados referentes a um ano inteiro possibilitam que a análise contemple todas as estações do ano e as características singulares de cada um desses períodos. Caso o período de medição fosse menor, os resultados poderiam invalidar as informações, uma vez que o clima é o principal agente de alterações na geração pelas fontes solar e eólica.

Enquanto o conjunto Fonte dos Ventos possui uma potência instalada de 79,9 MW, o conjunto Fontes Solar tem uma potência instalada de 11 MW (7,25 vezes menor). Devido a grande diferença entre esses valores, os gráficos relativos à geração possuem duas escalas no eixo y, sendo a da esquerda referente à geração eólica e a da direita tocante à geração solar. Com essa estratégia a análise gráfica da complementaridade dos do sistema híbrido foi simplificada.

A Tabela 1 contém a média anual para cada hora do dia no que se refere a cada tipo de geração, além disso, foi incluída a média entre os dois valores, que posteriormente foi

utilizada para gerar uma curva capaz de fornecer uma ideia visual da complementaridade do sistema híbrido.

Na Tabela 1, também é possível observar em sua última linha o quanto, em média, cada forma de geração de energia produziu por dia, ao longo do período analisado.

Tabela 1 - Dados anuais médios de geração para cada hora do dia.

Fonte: Autoria própria.

Média Anual Horária de Geração Por Fonte			
Horário	Solar (MWh)	Eólica (MWh)	Média (MWh)
00:00	0,00	54,47	27,24
01:00	0,00	51,12	25,56
02:00	0,00	48,00	24,00
03:00	0,00	45,34	22,67
04:00	0,00	43,13	21,56
05:00	0,00	41,95	20,98
06:00	0,06	40,66	20,36
07:00	0,65	39,40	20,03
08:00	2,16	38,15	20,16
09:00	4,04	39,31	21,67
10:00	5,61	39,89	22,75
11:00	6,50	38,51	22,50
12:00	6,81	36,18	21,50
13:00	6,69	34,14	20,42
14:00	6,17	33,06	19,62
15:00	5,20	33,11	19,15
16:00	3,77	34,75	19,26
17:00	1,87	38,71	20,29
18:00	0,22	45,50	22,86
19:00	0,00	53,63	26,81
20:00	0,00	60,22	30,11
21:00	0,00	63,12	31,56
22:00	0,00	61,54	30,77
23:00	0,00	57,77	28,89
Total Diário Médio (MWh/dia)	49,76	1071,67	560,72

Com o objetivo de ilustrar os dados da Tabela 1, a Figura 28 representa as curvas diárias com valores médios diários de um ano e amostragem de uma hora para os dois tipos de geração, enquanto a Figura 29 apresenta uma curva que reflete a média anual entre as duas fontes renováveis para suas produções diárias por hora.

Todas as médias mensais de geração de energia elétrica por fonte para cada hora do dia do período analisado podem ser vistas separadamente no Apêndice A através de tabelas e gráficos.

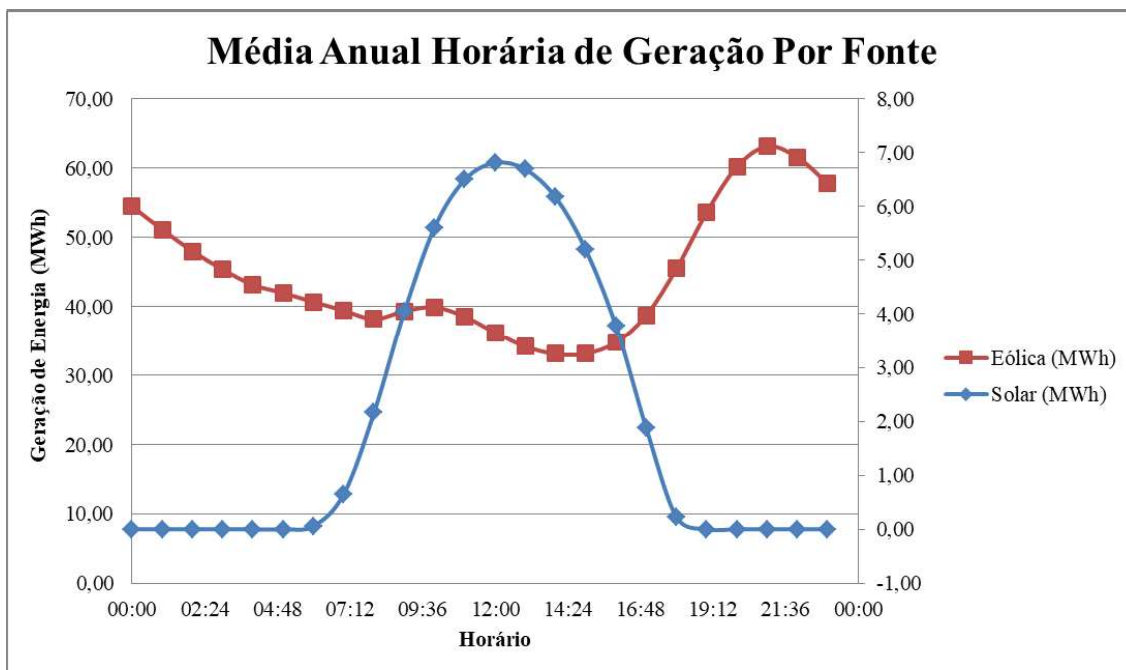


Figura 28 - Curvas de geração individual com amostragem de uma hora.
Fonte: Autoria própria.

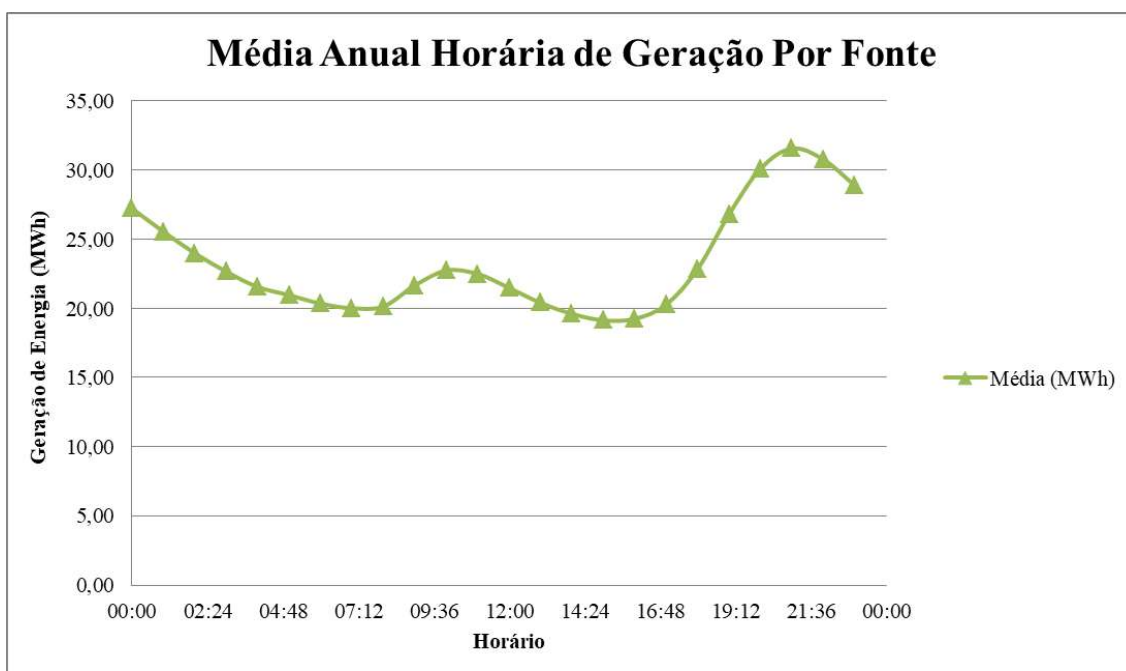


Figura 29 - Média de produção diária anual entre as duas fontes.
Fonte: Autoria própria.

Com o objetivo de suavizar a diferença entre a potência instalada das fontes eólica e fotovoltaica, foi criada a Tabela 2, com os valores da geração solar corrigidos para números 7,25 vezes maiores do que os medidos, cujo objetivo é colocar o potencial de geração das duas fontes renováveis no mesmo patamar. Assim, será apresentado na Figura 30, um gráfico contendo a média entre a geração solar corrigida e a produção por fonte eólica, onde é possível perceber a complementaridade caso as fontes se equiparassem em potência instalada.

Tabela 2 - Dados anuais médios para cada hora do dia com fonte solar corrigida.

Fonte: Autoria própria.

Média Anual Horária de Geração Por Fonte			
Horário	Solar (MWh)	Eólica (MWh)	Média (MWh)
00:00	0,00	54,47	27,24
01:00	0,00	51,12	25,56
02:00	0,00	48,00	24,00
03:00	0,00	45,34	22,67
04:00	0,00	43,13	21,56
05:00	0,00	41,95	20,98
06:00	0,42	40,66	20,54
07:00	4,73	39,40	22,07
08:00	15,66	38,15	26,91
09:00	29,29	39,31	34,30
10:00	40,68	39,89	40,28
11:00	47,12	38,51	42,81
12:00	49,39	36,18	42,79
13:00	48,52	34,14	41,33
14:00	44,76	33,06	38,91
15:00	37,68	33,11	35,40
16:00	27,36	34,75	31,05
17:00	13,56	38,71	26,14
18:00	1,62	45,50	23,56
19:00	0,00	53,63	26,81
20:00	0,00	60,22	30,11
21:00	0,00	63,12	31,56
22:00	0,00	61,54	30,77
23:00	0,00	57,77	28,89
Total Diário Médio (MWh/dia)	360,79	1071,67	716,23

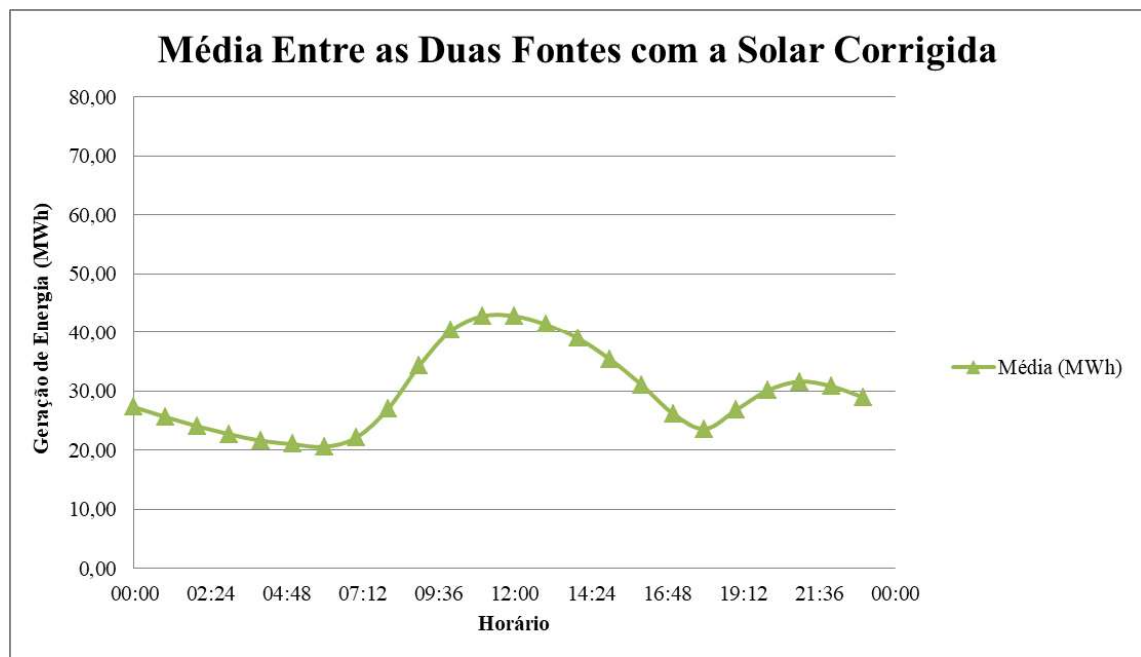


Figura 30 - Curva de geração média entre as fontes, com a solar corrigida.

Fonte: Autoria própria.

4.2 ANÁLISE DE DADOS COLETADOS

A partir da análise dos resultados obtidos é possível tirar algumas conclusões. No período analisado o montante de energia elétrica produzida pela fonte eólica foi de aproximadamente 388 GWh, enquanto o montante produzido oriundo do Sol foi de aproximadamente 18 GWh, totalizando 406 GWh. Conforme a época do ano, o montante gerado por cada fonte renovável variou.

A energia eólica obteve os melhores resultados nos meses de Julho e Agosto, época cuja característica são os ventos mais fortes e constantes. No restante do ano as médias se mantiveram constantes, com exceção aos meses de Fevereiro e Abril, onde ocorreram os piores resultados do período analisado.

A energia solar obteve os melhores resultados nos meses de Setembro e Outubro, época de seca que está mais próxima do verão, o que simboliza uma época com poucas chuvas e boa incidência de raios solares. Em contrapartida os piores resultados vieram nos meses de Junho e Julho, final do período de chuvas no interior pernambucano.

No que diz respeito à complementaridade entre as duas fontes, a análise gráfica permite afirmar que para o local onde está instalado o conjunto Fontes apresenta complementaridade diária entre a energia solar e a energia eólica, uma vez que os resultados manifestaram a existência de períodos complementares de disponibilidade de energia entre duas fontes ao longo de um dia na região de Tacaratu – PE.

Nos períodos do dia onde a geração eólica apresentava os seus melhores resultados, a geração solar estava em baixa, o que corresponde intervalo de tempo noturno. Em contrapartida, nos momentos onde a geração solar atingiu seus picos, as fontes eólicas estavam em baixa, esse intervalo do dia correspondeu ao meio do dia.

Esse resultado demonstra uma segurança no fornecimento de energia elétrica, por fontes renováveis solar e eólica, quando as duas são reunidas em um sistema híbrido, superando parcialmente os efeitos da intermitência dos dois recursos energéticos. Neste caso, os parques Fonte Solar e Fonte dos Ventos possuem uma diferença considerável quanto as potências instaladas, entretanto, se essas fossem parelhas, a tendência mostrada nos gráficos de geração seria mantida. No entanto, apesar da diferença entre as potências instaladas, em nenhum momento a geração foi nula, um reflexo da complementaridade.

É importante ressaltar que a complementaridade que ocorreu no caso de Tacaratu pode não se repetir em outras localidades, devido as condições climáticas específicas de cada região. Para Tacaratu, as estimativas são boas para as duas fontes renováveis, como

mostraram a Figura 26 e a Figura 27, não por acaso a empresa Enel Green Power escolheu essa localidade para a construção do conjunto Fontes.

A consolidação deste modelo de geração híbrido, operando com duas fontes em conjunto, direciona o gerenciamento nacional da energia para sistemas descentralizados. O que proporciona a estabilidade sazonal no fornecimento de energia, superando os pontos de atenção do paradigma brasileiro de geração predominantemente hídrica em grandes usinas.

Sistemas híbridos, como o conjunto Fontes, permitem a reserva energética dos da água armazenada nas barragens das usinas hidrelétricas que poderiam operar em períodos melhor distribuídos, planejados de acordo com as previsões do tempo para chuvas, ventos e irradiação solar.

Outro ponto positivo dos sistemas híbridos semelhantes ao que fora aqui apresentado diz respeito à área necessária para a implantação dos sistemas, frente ao modelo hidrelétrico centralizado. A construção de grandes usinas hidrelétricas exige o alagamento de grandes áreas, o que é causa um impacto socioambiental considerável, seja pelo deslocamento de pessoas e desapropriação de terras, ou pela alteração severa e repentina das condições locais para a fauna e a flora.

No caso do conjunto híbrido de Tacaratu, o sistema foi implantado no interior do Nordeste, em uma região de solos pobres e pouco utilizados para o plantio. O detalhe é que regiões com essas características são comuns na região Nordeste, a qual apresenta ótimos índices de incidência solar e de ventos.

Portanto, sistemas semelhantes são ótimas oportunidades para garantir a segurança no fornecimento de energia elétrica, superando a intermitência das fontes solar e eólica, ao mesmo tempo em que se posterga a construção de grandes usinas hidrelétricas, assim como evita o alagamento de áreas produtivas e ricas em biodiversidade.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho possuía como objetivos, analisar a complementaridade diária entre as fontes eólica e solar no conjunto híbrido Fontes, além de verificar vantagens que possibilitem a instalação de sistemas semelhantes ao analisado.

Foi possível perceber que no conjunto Fontes existe complementaridade entre as gerações solar e eólica. Além de ser possível perceber que os pontos altos de uma fonte correspondem aos baixos níveis de geração da outra. Também foi possível perceber graficamente que as curvas referentes à média entre as duas formas de geração, ao longo do dia apresentavam variações suaves, o que aumenta a segurança em afirmar que as duas fontes são complementares.

A complementaridade sazonal entre os regimes solar e de ventos encontra no Nordeste uma oportunidade para o planejamento do suprimento de energia elétrica nos âmbitos regional e nacional. Essa região apresenta vastos potenciais de geração eólica e solar, que podem fortes aliados do desenvolvimento sustentável e da diversificação da matriz energética nacional.

Sobre a energia eólica foi percebida uma dificuldade para seu desenvolvimento, quanto ao fator econômico, que além de dificultar a disseminação da energia eólica, apesar do crescimento recente, também dificulta as pesquisas, que poderiam diminuir os custos dessa modalidade de geração. Diferentemente dos sistemas fotovoltaicos, que atualmente estão acessíveis a qualquer cidadão comum, os parques eólicos possuem ainda certo tom de exclusividade.

Nesse sentido, este trabalho contribui para o estudo de grandes usinas híbridas a partir de fontes renováveis, o que ainda não é comumente encontrado na bibliografia do setor elétrico, já que esse tipo de empreendimento ainda é pouco disseminado no Brasil.

Apesar de ter atendido as expectativas iniciais, este trabalho abre precedentes para a realização de outros estudos, tais como:

- Comparar os resultados aqui obtidos com outros sistemas híbridos, localizados em locais diversos;
- Verificar a possibilidade de complementaridade entre fontes renováveis diversas para outras localidades com condições geográficas e climáticas diferentes das encontradas em Tacaratu;

- Analisar a complementaridade de sistemas híbridos com a participação de outras fontes geradoras, além da solar e da eólica.

Como este trabalho foi desenvolvido com o auxílio de uma empresa do setor de geração de energia elétrica, a experiência foi enriquecedora, pois permitiu o contato com profissionais do setor elétrico e com dados reais. Essa situação permitiu aproximar o conhecimento teórico adquirido na formação em Engenharia Elétrica da análise crítica de uma situação real.

Associar um trabalho de conclusão de curso de uma empresa privada ocasionou algumas dificuldades, como a indisponibilidade de informações. Como determinados dados são vistos como estratégicos para a Enel Green Power, os mesmos não puderam ser divulgados. Caso a oferta de informações fosse ilimitada, seria factível realizar uma análise mais completa sobre o sistema híbrido estudado, tanto do ponto de vista técnico, quanto financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] CARVALHO, J. **O consumo de energia, da antiguidade aos dias de hoje.** Ilumina, Rio de Janeiro, 31 out. 2017. Disponível em: <<https://www.ilumina.org.br/o-consumo-de-energia-da-antiguidade-aos-dias-de-hoje-artigo/>> Acesso: 10 nov. 2019.
- [2] RICARDO, G.; MACHADO, I. C. L.; ZEM, V. R. H. **Estudo da complementariedade entre as fontes eólica e solar fotovoltaica na matriz elétrica do estado do Paraná.** 2015. 138 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- [3] SIMABUKULO, L. et al. **Energia, Industrialização e Modernidade – História Social.** São Paulo, 2017. Disponível em: <<http://www.museudaenergia.org.br/media/63129/03.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2019.
- [4] *INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. Statistics: Global energy data at your fingertips.* Disponível em: <<https://www.iea.org/statistics/?country=WORLD&year=2016&category=Key%20indicators&indicator=TPESbySource&mode=chart&categoryBrowse=false&dataTable=BALANCES&showDataTable=true>> Acesso: 10 nov. 2019.
- [5] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação.** Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html>> Acesso: 10 nov. 2019.
- [6] WWF-Brasil. **O que é desenvolvimento sustentável?** Disponível em: <https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/questoes_ambientais/desenvolvimento_sustentavel/> Acesso: 10 nov. 2019.
- [7] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Matriz Energética e Elétrica.** Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>> Acesso: 10 nov. 2019.
- [8] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA Elétrica - ANEEL. **BIG – Banco de Informações de Geração.** Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>> Acesso: 10 nov. 2019.
- [9] SGT ANEEL. **Bandeiras Tarifárias.** ANEEL, Brasília, 12 nov. 2019. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/bandeiras-tarifarias>> Acesso: 14 nov. 2019.
- [10] NETO, E. E. E. **Estudo da complementaridade entre as disponibilidades de energia hídrica e eólica na região nordeste do Brasil.** 2012. 92 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

- [11] REN21. **Renewables 2019 Global Status Report**. 1.ed. Paris: REN21, 2019.
- [12] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: ANEEL, 2018.
- [13] AMÉRICA DO SOL. **Potencial solar no Brasil**. Disponível em: <<http://americadosol.org/potencial-solar-no-brasil/>> Acesso: 10 nov. 2019.
- [14] ERBER, P. **Os desafios de fontes renováveis intermitentes**. Ambiente Energia, Rio de Janeiro, 30 jul. 2015. Disponível em: <<https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2015/07/o-desafio-de-fontes-renovaveis-intermitentes/26776>> Acesso: 10 nov. 2019.
- [15] ROCKENBACH, G. C. D.; SILVA, L. L.; MELLO, T. A. **Proposta de geração híbrida eólico/solar on-grid no setor de avicultura na região de Dourados-MS**. 2018. 92 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.
- [16] PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. Ed. São José dos Campos: INPE, 2017.
- [17] MACIEL, Walter J. O futuro sol. **Ciência hoje das crianças**, ano 8, nº 46, São Paulo, 1995. Disponível em: <<http://www.astro.iag.usp.br/~maciel/teaching/artigos/futuro/futuro.html>> Acesso: 07 dez. 2019.
- [18] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2. ed. Brasília: ANEEL, 2005.
- [19] SILVA, Luiz Carlos Lourenço da. **PROJETO DE UM CARACTERIZADOR AUTOMÁTICO DE CURVAS PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS ASSISTIDO POR SUPERVISÓRIO**. 2019. 137 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Curso de Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Itumbiara, 2019.
- [20] LIMA, Matheus Santos de *et al.* Sistema híbrido eólico e solar *off grid*. **Revista Inovação, Tecnologia e Sustentabilidade na Engenharia Elétrica**. Bebedouro, p. 180-202, 2018.
- [21] SILVA, S. B. **Fundamentos da energia solar fotovoltaica**. 2018. 28 slides.
- [22] WEG. **Gestão eficiente da energia elétrica**, 2017.

[23] PROGRAMA de incentivo às fontes alternativas, **Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL**, Brasília, 27 de nov de 2011. Disponível: <<https://www.aneel.gov.br/proinfra>> Acesso: 07 dez. 2019.

[24] ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>> Acesso: 15 nov. 2019.

[25] ANEEL. **Perguntas e respostas sobre a aplicação da Resolução normativa nº 482/2012: Atualizado em 25/05/2017**, 2017.

[26] CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA FAZENDÁRIA (CONFAZ). **Convênio ICMS nº 16, de 22 de abril de 2015**. Disponível em: <https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/2015/CV016_15> Acesso: 07 dez. 2019.

[27] BRASIL. **Lei nº 13.169, 06 de outubro de 2015**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2015/Lei/L13169.htm> Acesso: 07 dez. 2019.

[28] SILVA, S. B. **Panorama da energia solar fotovoltaica – cont.** 2018. 17 slides.

[29] SILVA, S. B. **Panorama da energia solar fotovoltaica**. 2018. 28 slides.

[30] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10899: Energia solar fotovoltaica — Terminologia**. Rio de Janeiro. 2013.

[31] FONTES, Ruy. **Energia Solar Barata: Verdade ou Mentira? As Informações Que Você Precisa Saber + Um Simulador Para Sua Casa ou Empresa**. Blue Sol Energia Solar, 14 de março de 2019. Disponível em: < <https://blog.bluesol.com.br/energia-solar-barata/>> Acesso: 07 dez. 2019.

[32] ENERAY. **Diagrama operacional para um Sistema Isolado (Off-Grid)**. Disponível em: <<https://www.enerray.com/br/tecnologia/sistemas-isolados-off-grid/>> Acesso: 07 dez. 2019.

[33] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. **Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição, Rev. nº 724/2016**. Disponível em: < http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/PRODIST-M%C3%B3dulo3_Revis%C3%A3o7/ebfa9546-09c2-4fe5-a5a2-ac8430cbca99 > Acesso: 10 dez. 2019.

[34] ENERAY. **Diagrama operacional para um Sistema On-Grid**. Disponível em: <<http://vocesolar.com.br/o-que-e-energia-solar/>> Acesso: 07 dez. 2019.

- [illegible]

- [48] WIND-TURBINE-MODELS.COM. **Concat & information.** Disponível em: <<https://en.wind-turbine-models.com/manufacturers/542-siemens-gamesa>> Acesso: 08 dez. 2019.
- [49] PINHO, João Tavares *et al.* **Sistemas híbridos.** Brasília: Ministério de Minas e Energias, 2008.
- [50] SOLIENS. **Entenda o que é sistema solar híbrido.** Disponível em: <<https://www.soliens.com.br/blog/energia-fotovoltaica/entenda-o-que-e-sistema-solar-hibrido/>> Acesso: 08 dez. 2019.
- [51] SUNAPLY. **OFF-GRID (SISTEMAS AUTÔNOMOS).** Disponível em: <<http://www.sunaply.pt/offgrid.php>> Acesso: 08 dez. 2019.
- [52] RESEARCHGATE. **Análise da geração eólica na matriz brasileira de energia elétrica.** Disponível em: < https://www.researchgate.net/figure/Figura-8-Complementaridade-solar-e-eolica-diariamente-melhor-hipotese11_fig1_267212574> Acesso: 08 dez. 2019.
- [53] G1 CARUARU. **Primeiro parque híbrido de energia renovável é inaugurado no país.** Caruaru, 25 de setembro de 2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/pe/caruaru-regiao/noticia/2015/09/primeiro-parque-hibrido-de-energia-renovavel-do-pais-e-inaugurado-em-pe.html>> Acesso: 09 dez. 2019.
- [54] GOOGLE MAPS. **Tacaratu (PE).** Tacaratu, 2019. Disponível em: <<https://goo.gl/maps/jZMmc5vAmpDbH5m88>> Acesso: 09 dez. 2019.
- [55] CRESESB. **Potencial Energético.** Disponível em: < <https://cresesb.cepel.br> > Acesso: 29 nov. 2019.

APÊNDICE A – DADOS COLETADOS DO CONJUNTO GERADOR FONTES

Nesta seção são apresentadas as médias mensais de geração de energia elétrica por hora, onde cada tabela entre a Tabela 3 e a Tabela 14 representa os dados coletados para cada mês do período de amostragem, que vai de 01/06/2018 a 31/05/2019.

Para complementar as informações das tabelas, foram utilizados gráficos, de modo que da Figura 31 à Figura 42 são reproduzidas as informações mensais de cada tabela, o que facilita a visualização da complementaridade para cada mês do período analisado. Através dos gráficos é perceptível que há complementaridade durante todos os meses do ano, no Parque Fontes, uma vez que os períodos de maior geração da fonte solar correspondem aos períodos de menor geração eólica e vice versa.

Tabela 3 - Dados referentes a Junho de 2018.

Fonte: Autoria própria.

Geração Horária Por Fonte em Junho de 2018			
Horário	Solar (MWh)	Eólica (MWh)	Média (MWh)
00:00	0,00	57,15	28,58
01:00	0,00	55,76	27,88
02:00	0,00	53,03	26,52
03:00	0,00	50,04	25,02
04:00	0,00	49,53	24,77
05:00	0,00	46,78	23,39
06:00	0,00	45,86	22,93
07:00	0,38	46,86	23,62
08:00	1,68	46,81	24,24
09:00	3,39	48,59	25,99
10:00	4,85	51,09	27,97
11:00	5,88	51,36	28,62
12:00	6,33	52,00	29,17
13:00	6,16	49,95	28,05
14:00	5,61	48,26	26,94
15:00	4,71	47,84	26,27
16:00	3,49	50,37	26,93
17:00	1,55	54,07	27,81
18:00	0,07	58,40	29,23
19:00	0,00	61,67	30,84
20:00	0,00	63,03	31,51
21:00	0,00	63,86	31,93
22:00	0,00	62,18	31,09
23:00	0,00	58,15	29,08
Total Mensal (MWh/dia)	44,10	1272,64	658,37

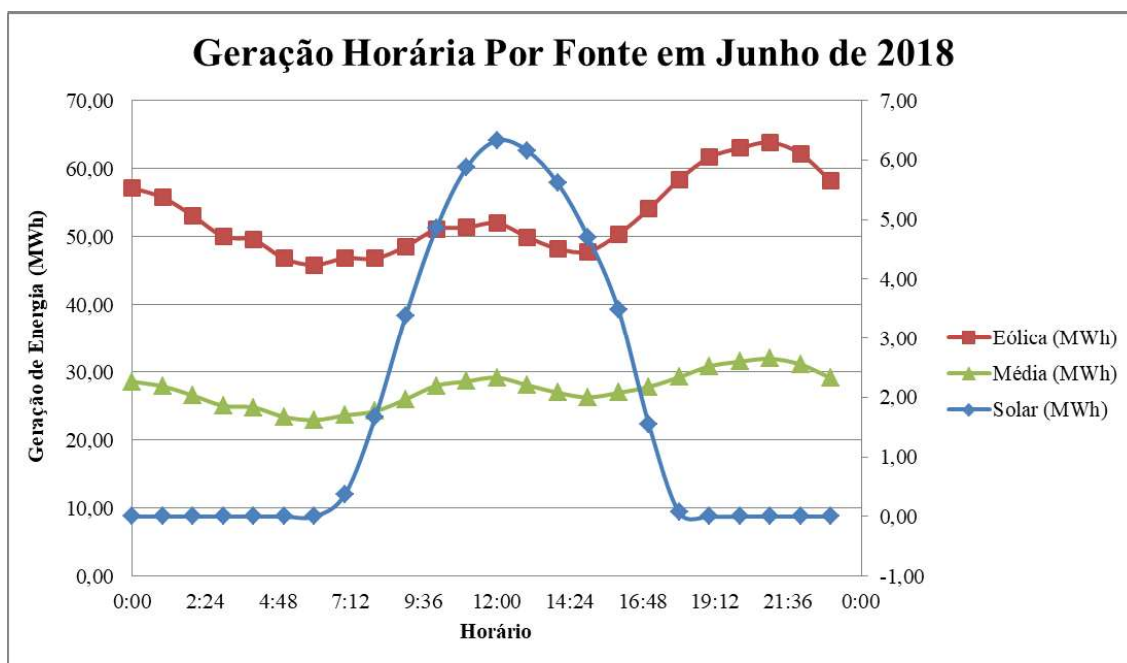


Figura 31 - Gráfico referente à geração de Junho de 2018.
Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 - Dados referentes a Julho de 2018
Fonte: Autoria própria.

Geração Horária Por Fonte em Julho de 2018			
Horário	Solar (MWh)	Eólica (MWh)	Média (MWh)
00:00	0,00	65,68	32,84
01:00	0,00	65,32	32,66
02:00	0,00	63,11	31,55
03:00	0,00	61,13	30,56
04:00	0,00	59,90	29,95
05:00	0,00	60,75	30,38
06:00	0,00	59,15	29,58
07:00	0,29	59,36	29,83
08:00	1,46	58,12	29,79
09:00	3,11	58,54	30,82
10:00	4,70	62,36	33,53
11:00	5,91	61,55	33,73
12:00	6,43	59,75	33,09
13:00	6,56	56,38	31,47
14:00	6,13	51,93	29,03
15:00	5,26	50,89	28,08
16:00	3,63	52,16	27,89
17:00	1,70	56,73	29,22
18:00	0,11	60,92	30,51
19:00	0,00	64,09	32,05
20:00	0,00	66,38	33,19
21:00	0,00	67,43	33,72
22:00	0,00	67,99	34,00
23:00	0,00	66,87	33,44
Total Mensal (MWh/dia)	45,29	1456,50	750,89

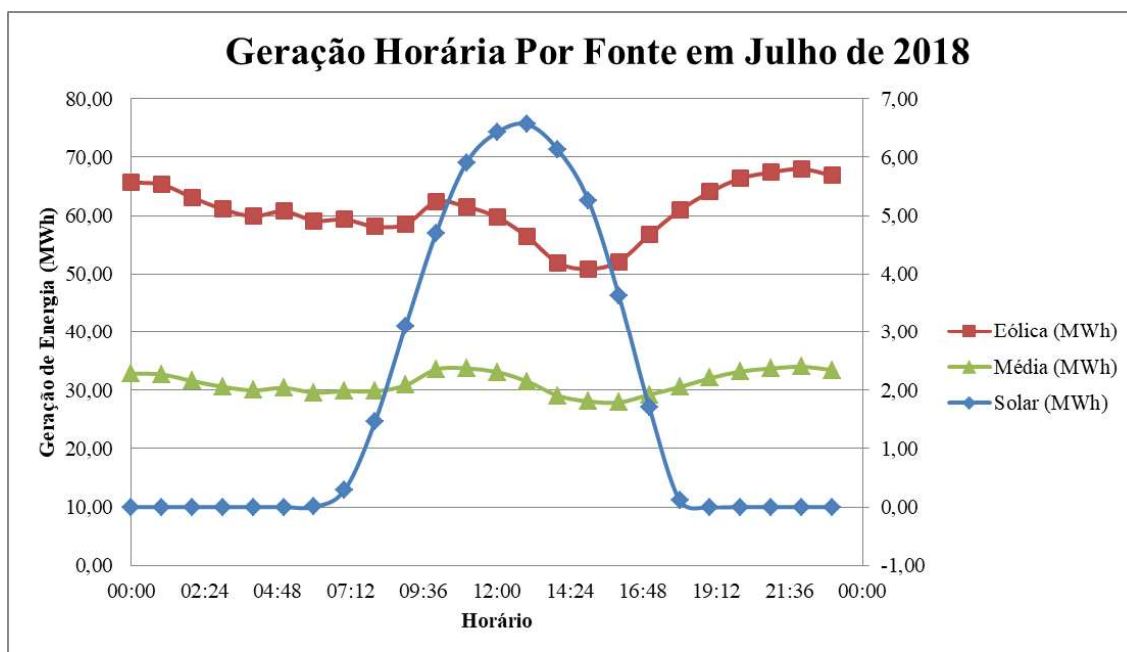


Figura 32 - Gráfico referente à geração de Julho de 2018.
Fonte: Autoria própria.

Tabela 5 - Dados referentes a Agosto de 2018.
Fonte: Autoria própria.

Geração Horária Por Fonte em Agosto de 2018			
Horário	Solar (MWh)	Eólica (MWh)	Média (MWh)
00:00	0,00	64,47	32,24
01:00	0,00	62,37	31,18
02:00	0,00	59,75	29,88
03:00	0,00	59,06	29,53
04:00	0,00	58,70	29,35
05:00	0,00	59,44	29,72
06:00	0,01	58,47	29,24
07:00	0,47	57,30	28,88
08:00	1,87	54,48	28,18
09:00	4,01	57,03	30,52
10:00	6,02	57,70	31,86
11:00	6,84	54,72	30,78
12:00	7,36	50,06	28,71
13:00	7,10	47,30	27,20
14:00	6,68	46,59	26,63
15:00	5,81	47,65	26,73
16:00	4,30	48,11	26,20
17:00	2,16	50,84	26,50
18:00	0,19	56,39	28,29
19:00	0,00	62,12	31,06
20:00	0,00	66,11	33,06
21:00	0,00	69,79	34,90
22:00	0,00	70,21	35,11
23:00	0,00	66,81	33,40
Total Mensal (MWh/dia)	52,82	1385,49	719,15

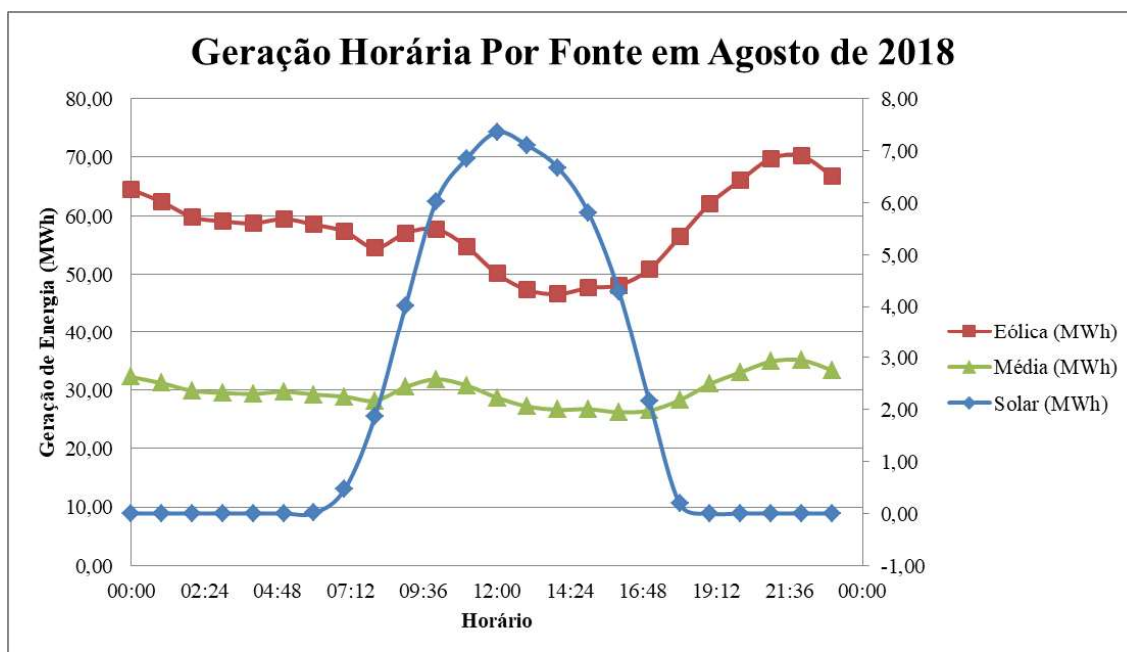


Tabela 6 - Dados referentes a Setembro de 2018.

Fonte: Autoria própria.

Geração Horária Por Fonte em Setembro de 2018			
Horário	Solar (MWh)	Eólica (MWh)	Média (MWh)
00:00	0,00	66,10	33,05
01:00	0,00	62,69	31,34
02:00	0,00	61,16	30,58
03:00	0,00	60,00	30,00
04:00	0,00	58,80	29,40
05:00	0,00	59,58	29,79
06:00	0,05	59,35	29,70
07:00	0,72	56,42	28,57
08:00	2,51	54,93	28,72
09:00	4,47	55,18	29,83
10:00	6,22	55,53	30,88
11:00	7,34	52,96	30,15
12:00	7,15	46,11	26,63
13:00	7,44	43,12	25,28
14:00	6,85	40,85	23,85
15:00	5,85	41,14	23,50
16:00	4,21	42,74	23,48
17:00	2,06	46,88	24,47
18:00	0,14	54,53	27,34
19:00	0,00	63,36	31,68
20:00	0,00	70,52	35,26
21:00	0,00	71,69	35,85
22:00	0,00	69,99	34,99
23:00	0,00	67,59	33,80
Total Mensal (MWh/dia)	55,02	1361,24	708,13

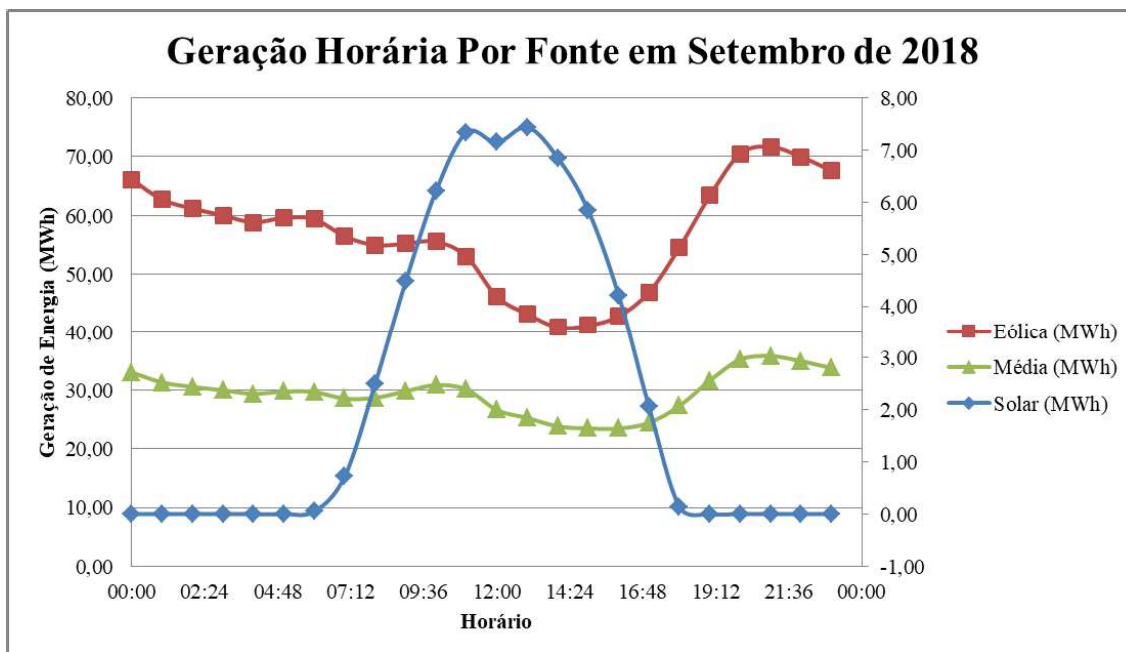


Figura 34 - Gráfico referente à geração de Setembro de 2018.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 - Dados referentes a Outubro de 2018.

Fonte: Autoria própria.

Geração Horária Por Fonte em Outubro de 2018			
Horário	Solar (MWh)	Eólica (MWh)	Média (MWh)
00:00	0,00	54,18	27,09
01:00	0,00	47,68	23,84
02:00	0,00	44,47	22,23
03:00	0,00	41,82	20,91
04:00	0,00	39,60	19,80
05:00	0,00	39,05	19,52
06:00	0,14	39,07	19,60
07:00	1,05	34,97	18,01
08:00	3,00	34,54	18,77
09:00	5,11	35,63	20,37
10:00	6,64	34,54	20,59
11:00	7,25	32,35	19,80
12:00	7,33	29,44	18,38
13:00	7,41	27,26	17,34
14:00	6,81	25,48	16,14
15:00	5,36	24,96	15,16
16:00	3,84	25,34	14,59
17:00	1,74	29,17	15,45
18:00	0,10	37,10	18,60
19:00	0,00	47,24	23,62
20:00	0,00	57,45	28,73
21:00	0,00	64,65	32,33
22:00	0,00	63,01	31,51
23:00	0,00	60,24	30,12
Total Mensal (MWh/dia)	55,79	969,24	512,51

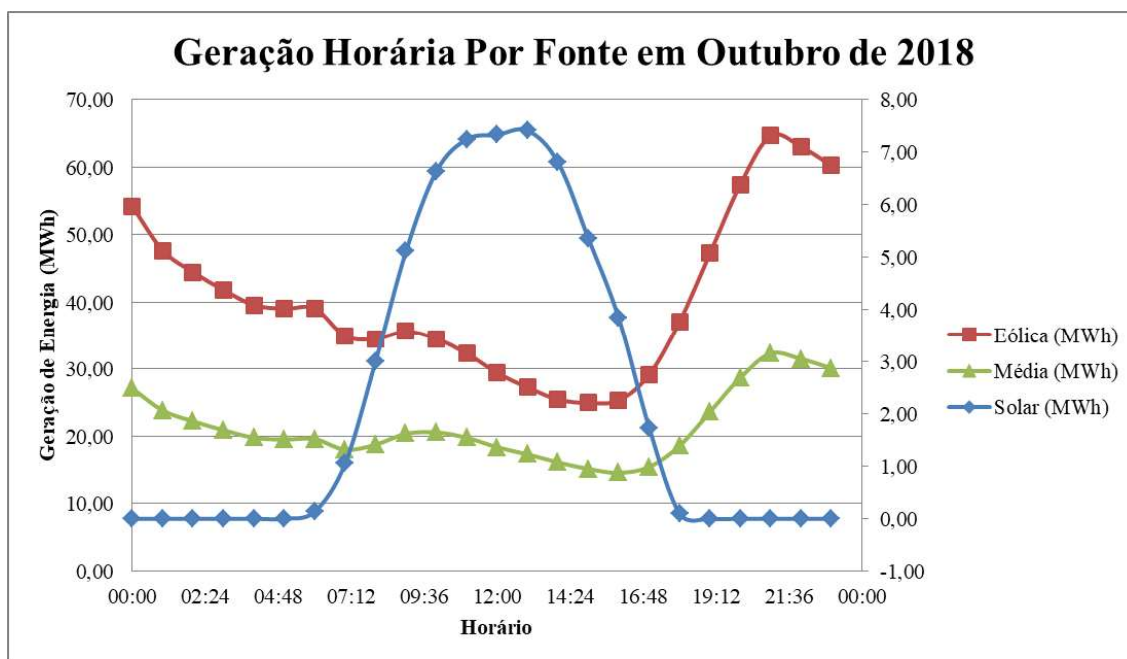


Figura 35 - Gráfico referente à geração de Outubro de 2018.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 - Dados referentes a Novembro de 2019.

Fonte: Autoria própria.

Geração Horária Por Fonte em Novembro de 2018			
Horário	Solar (MWh)	Eólica (MWh)	Média (MWh)
00:00	0,00	64,02	32,01
01:00	0,00	58,88	29,44
02:00	0,00	57,47	28,74
03:00	0,00	54,74	27,37
04:00	0,00	52,88	26,44
05:00	0,00	49,57	24,78
06:00	0,20	44,30	22,25
07:00	1,12	39,54	20,33
08:00	2,80	37,82	20,31
09:00	4,74	38,28	21,51
10:00	6,23	37,20	21,71
11:00	7,06	35,26	21,16
12:00	7,34	33,65	20,50
13:00	7,12	32,76	19,94
14:00	6,46	31,73	19,09
15:00	5,20	30,51	17,85
16:00	3,56	32,53	18,05
17:00	1,47	38,04	19,76
18:00	0,12	50,31	25,21
19:00	0,00	62,51	31,25
20:00	0,00	70,60	35,30
21:00	0,00	71,56	35,78
22:00	0,00	69,39	34,69
23:00	0,00	66,42	33,21
Total Mensal (MWh/dia)	53,42	1159,97	606,70

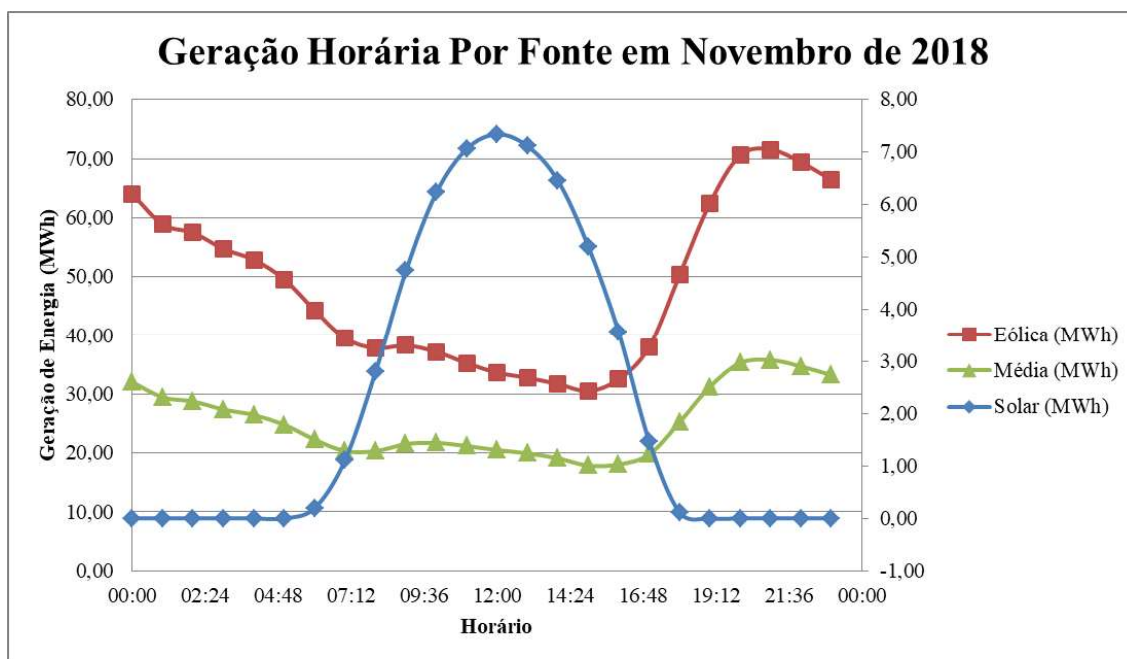


Figura 36 - Gráfico referente à geração de Novembro de 2018.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 9 - Dados referentes a Dezembro de 2018.

Fonte: Autoria própria.

Geração Horária Por Fonte em Dezembro de 2018			
Horário	Solar (MWh)	Eólica (MWh)	Média (MWh)
00:00	0,00	44,93	22,46
01:00	0,00	41,81	20,91
02:00	0,00	37,97	18,99
03:00	0,00	34,19	17,10
04:00	0,00	32,97	16,48
05:00	0,00	32,71	16,36
06:00	0,13	29,82	14,97
07:00	0,88	28,92	14,90
08:00	2,41	27,09	14,75
09:00	4,08	26,23	15,15
10:00	5,22	26,03	15,62
11:00	6,24	26,19	16,21
12:00	6,48	26,23	16,36
13:00	6,35	25,11	15,73
14:00	5,94	27,63	16,78
15:00	4,84	29,43	17,13
16:00	3,40	31,03	17,21
17:00	1,69	33,06	17,38
18:00	0,29	33,93	17,11
19:00	0,00	40,00	20,00
20:00	0,00	49,17	24,59
21:00	0,00	57,10	28,55
22:00	0,00	53,44	26,72
23:00	0,00	49,24	24,62
Total Mensal (MWh/dia)	47,96	844,23	446,10

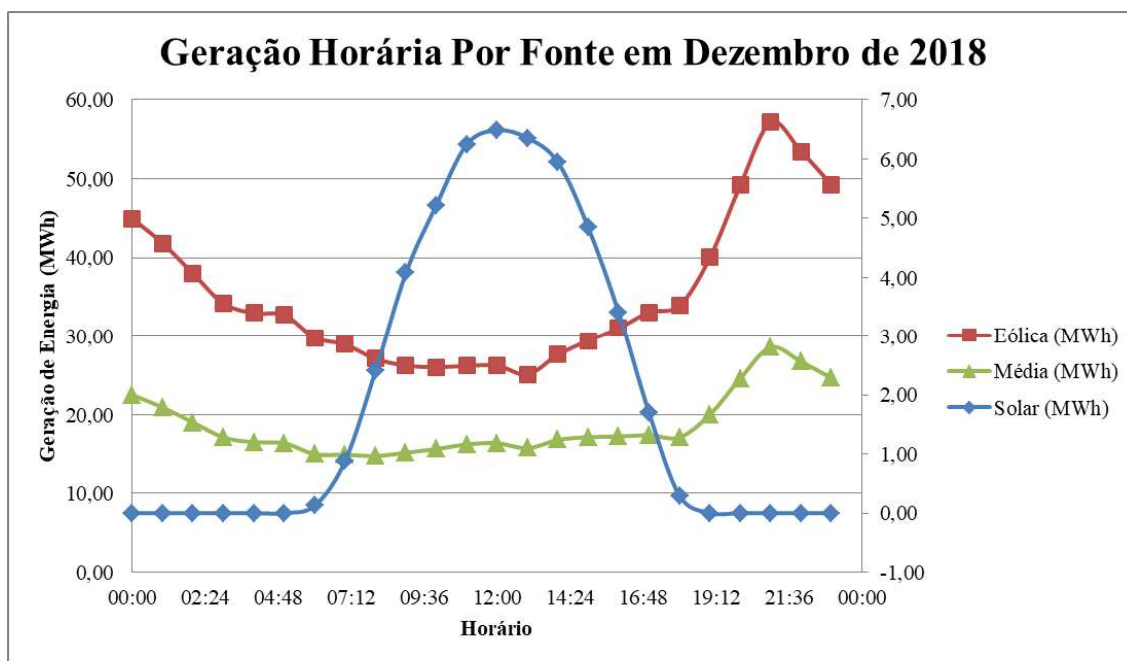


Figura 37 - Gráfico referente à geração de Dezembro de 2018.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 10 - Dados referentes a Janeiro de 2019

Fonte: Autoria própria

Geração Horária Por Fonte em Janeiro de 2019			
Horário	Solar (MWh)	Eólica (MWh)	Média (MWh)
00:00	0,00	63,83	31,91
01:00	0,00	59,95	29,97
02:00	0,00	57,16	28,58
03:00	0,00	54,05	27,03
04:00	0,00	49,09	24,54
05:00	0,00	44,41	22,21
06:00	0,07	42,96	21,52
07:00	0,72	40,62	20,67
08:00	1,99	39,58	20,78
09:00	3,64	39,89	21,76
10:00	5,34	40,17	22,76
11:00	6,13	38,72	22,43
12:00	6,72	37,02	21,87
13:00	6,74	35,50	21,12
14:00	6,09	36,05	21,07
15:00	5,43	36,52	20,98
16:00	4,05	38,30	21,17
17:00	2,33	43,90	23,11
18:00	0,54	53,57	27,05
19:00	0,00	62,90	31,45
20:00	0,00	69,60	34,80
21:00	0,00	70,57	35,29
22:00	0,00	69,31	34,66
23:00	0,00	66,60	33,30
Total Mensal (MWh/dia)	49,80	1190,28	620,04

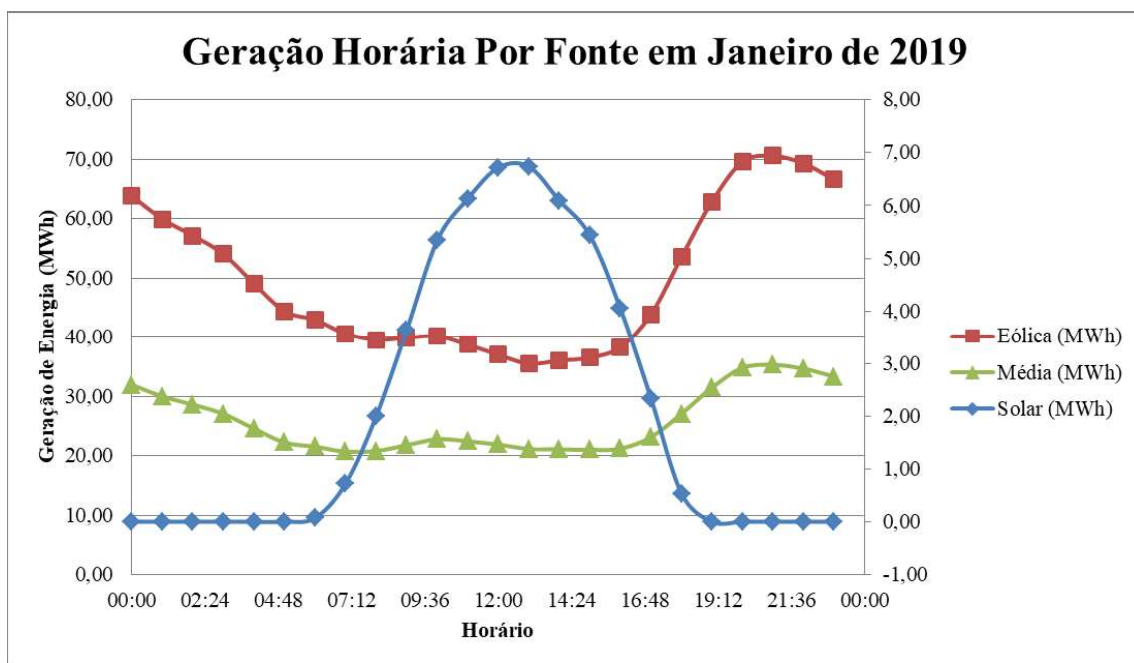


Figura 38 - Gráfico referente à geração de Janeiro de 2019.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 11 - Dados referentes a Fevereiro de 2019.

Fonte: Autoria própria.

Geração Horária Por Fonte em Fevereiro de 2019			
Horário	Solar (MWh)	Eólica (MWh)	Média (MWh)
00:00	0,00	37,65	18,83
01:00	0,00	33,96	16,98
02:00	0,00	30,58	15,29
03:00	0,00	28,73	14,36
04:00	0,00	26,76	13,38
05:00	0,00	25,20	12,60
06:00	0,03	24,27	12,15
07:00	0,54	23,06	11,80
08:00	2,05	21,69	11,87
09:00	3,83	22,62	13,23
10:00	5,57	21,69	13,63
11:00	6,35	20,87	13,61
12:00	6,88	21,73	14,31
13:00	6,57	21,41	13,99
14:00	5,96	20,93	13,45
15:00	4,78	20,60	12,69
16:00	3,55	23,50	13,52
17:00	2,17	24,70	13,43
18:00	0,56	31,70	16,13
19:00	0,00	42,85	21,42
20:00	0,00	54,54	27,27
21:00	0,00	55,70	27,85
22:00	0,00	51,71	25,86
23:00	0,00	42,21	21,10
Total Mensal (MWh/dia)	48,84	728,66	388,75

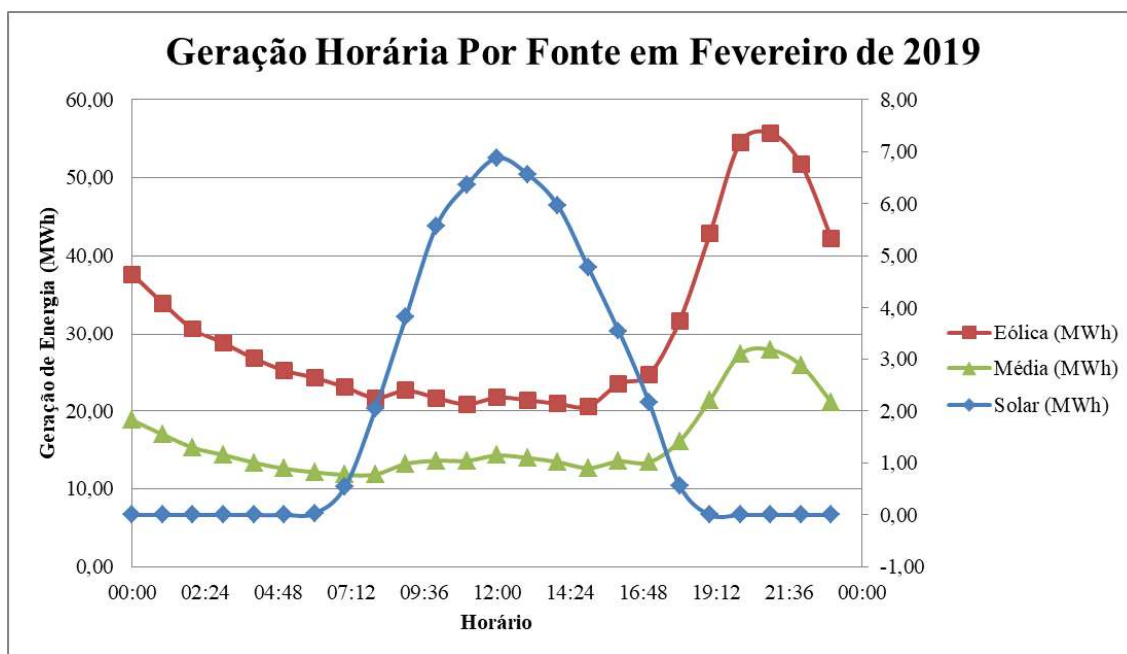


Figura 39 - Gráfico referente à geração de Fevereiro de 2019.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 12 - Dados referentes a Março de 2019.

Fonte: Autoria própria.

Geração Horária Por Fonte em Março de 2019			
Horário	Solar (MWh)	Eólica (MWh)	Média (MWh)
00:00	0,00	45,94	22,97
01:00	0,00	42,40	21,20
02:00	0,00	35,81	17,91
03:00	0,00	30,66	15,33
04:00	0,00	27,56	13,78
05:00	0,00	25,50	12,75
06:00	0,02	26,69	13,36
07:00	0,52	28,21	14,37
08:00	1,89	28,83	15,36
09:00	3,83	31,19	17,51
10:00	5,49	31,69	18,59
11:00	6,48	30,46	18,47
12:00	6,82	27,39	17,11
13:00	6,44	25,38	15,91
14:00	6,00	24,54	15,27
15:00	5,25	25,73	15,49
16:00	4,09	26,30	15,20
17:00	2,33	33,06	17,69
18:00	0,36	39,91	20,14
19:00	0,00	48,92	24,46
20:00	0,00	51,99	25,99
21:00	0,00	53,99	27,00
22:00	0,00	53,41	26,70
23:00	0,00	51,34	25,67
Total Mensal (MWh/dia)	49,53	846,90	448,21

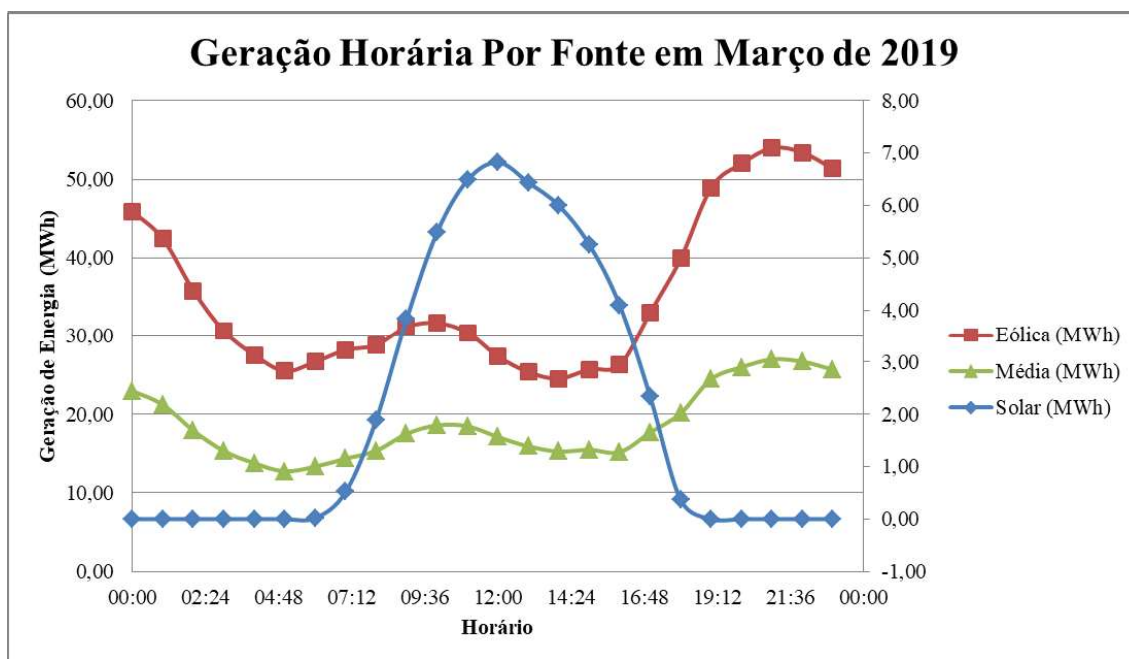


Figura 40 - Gráfico referente à geração de Março de 2019.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 13 - Dados referentes a Abril de 2019.

Fonte: Autoria própria.

Geração Horária Por Fonte em Abril de 2019			
Horário	Solar (MWh)	Eólica (MWh)	Média (MWh)
00:00	0,00	42,18	21,09
01:00	0,00	37,32	18,66
02:00	0,00	32,87	16,43
03:00	0,00	29,18	14,59
04:00	0,00	24,01	12,01
05:00	0,00	23,73	11,87
06:00	0,02	23,06	11,54
07:00	0,56	23,98	12,27
08:00	2,21	23,07	12,64
09:00	4,26	25,38	14,82
10:00	5,62	26,33	15,97
11:00	6,28	23,63	14,95
12:00	6,38	20,37	13,38
13:00	6,23	17,43	11,83
14:00	5,88	16,72	11,30
15:00	5,06	17,29	11,17
16:00	3,99	19,71	11,85
17:00	1,84	23,70	12,77
18:00	0,14	33,11	16,62
19:00	0,00	44,21	22,10
20:00	0,00	50,87	25,43
21:00	0,00	53,73	26,86
22:00	0,00	51,25	25,63
23:00	0,00	44,87	22,44
Total Mensal (MWh/dia)	48,46	727,98	388,22

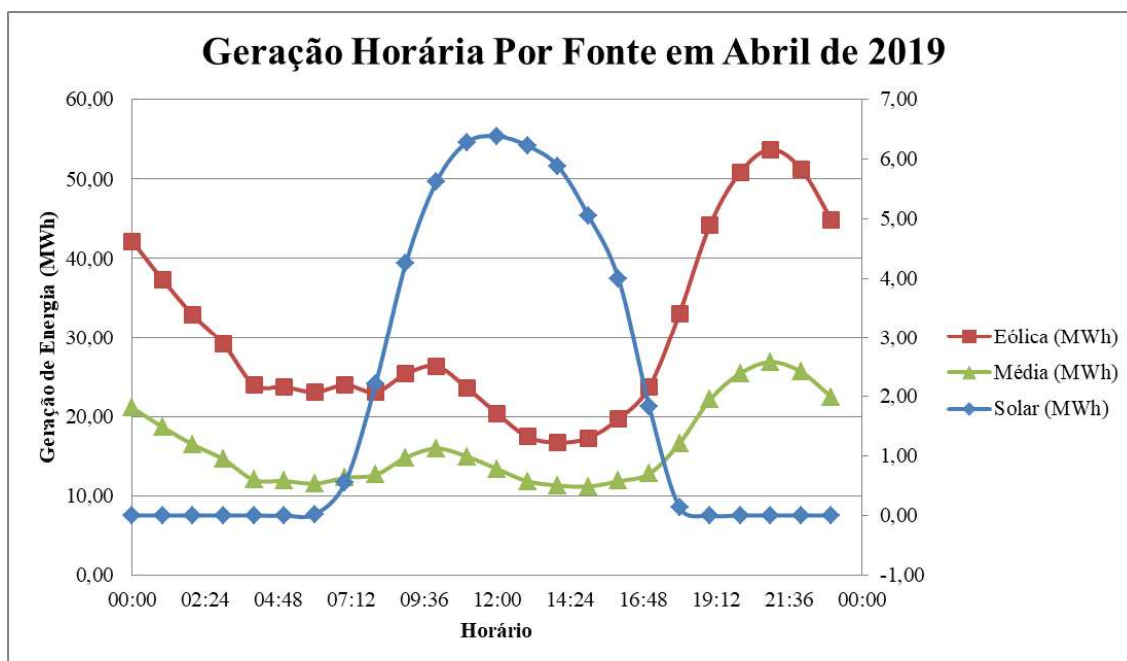


Figura 41 - Gráfico referente à geração de Abril de 2019.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 14 - Dados referentes a Maio de 2019.

Fonte: Autoria própria.

Geração Horária Por Fonte em Maio de 2019			
Horário	Solar (MWh)	Eólica (MWh)	Média (MWh)
00:00	0,00	47,53	23,76
01:00	0,00	45,29	22,64
02:00	0,00	42,57	21,28
03:00	0,00	40,52	20,26
04:00	0,00	37,75	18,87
05:00	0,00	36,68	18,34
06:00	0,02	34,93	17,48
07:00	0,57	33,61	17,09
08:00	2,05	30,86	16,45
09:00	4,01	33,11	18,56
10:00	5,43	34,33	19,88
11:00	6,22	34,03	20,13
12:00	6,54	30,46	18,50
13:00	6,20	28,09	17,14
14:00	5,66	26,04	15,85
15:00	4,82	24,77	14,80
16:00	3,16	26,87	15,02
17:00	1,39	30,40	15,90
18:00	0,06	36,13	18,10
19:00	0,00	43,65	21,82
20:00	0,00	52,34	26,17
21:00	0,00	57,38	28,69
22:00	0,00	56,63	28,31
23:00	0,00	52,93	26,46
Total Mensal (MWh/dia)	46,14	916,90	481,52

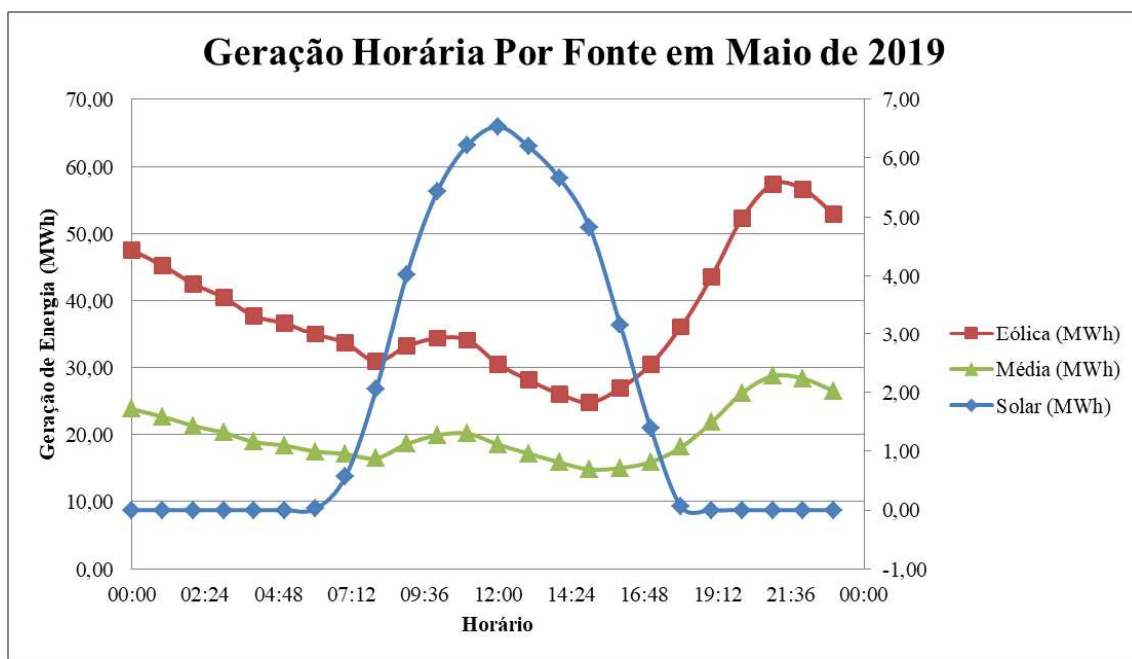


Figura 42 - Gráfico referente à geração de Maio de 2019.

Fonte: Autoria própria.