



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL



LARISSA PENA DE OLIVEIRA

**ESTUDO DE VIABILIDADE DA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM UMA RESIDÊNCIA**

OURO PRETO - MG
2019

Larissa Pena de Oliveira

**ESTUDO DE VIABILIDADE DA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM UMA RESIDÊNCIA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção de Grau em Engenharia Ambiental.

Professor orientador: Prof. M.Sc.
Diógenes Viegas Mendes Ferreira

Professor coorientador: Prof. M.Sc.
Henrique Nogueira Soares

**OURO PRETO – MG
2019**

O482e Oliveira, Larissa Pena.
Estudo de viabilidade da implantação de um sistema de energia solar
fotovoltaica em uma residência [manuscrito] / Larissa Pena Oliveira. - 2019.

65f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. MSc. Diógenes Viegas Mendes Ferreira.

Coorientador: Prof. Dr. Henrique Nogueira Soares.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Departamento de Engenharia Ambiental.

1. Fonte Energética. 2. Fonte Renovável. 3. Energia Solar. 4. Placa
Fotovoltaica. 5. Dimensionamento de Sistema Fotovoltaico. I. Ferreira,
Diógenes Viegas Mendes . II. Soares, Henrique Nogueira. III. Universidade
Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 504

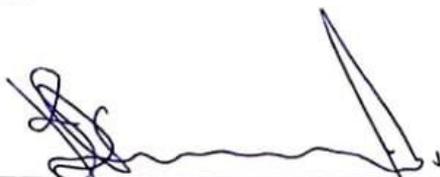
Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br

FOLHA DE APROVAÇÃO

Larissa Pena de Oliveira

Estudo de viabilidade da implantação de um sistema de energia solar
fotovoltaica em uma residência

Monografia apresentada e aprovada dia 02 de julho de 2019 como pré-requisito parcial para obtenção do título de graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto, submetida à aprovação da banca examinadora composta pelos seguintes membros:



Prof. M.Sc. Diógenes Viegas Mendes Ferreira – EM/UFOP
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Orientador



Profa. Dra. Livia Cristina Pinto Dias EM/UFOP
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP



Prof. Dr. Paulo Marcos Monteiro de Barros EM/UFOP
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, base de tudo o que sou hoje. Obrigada por toda forma de amor e confiança em mim depositados. Essa conquista é nossa!

A G R A D E C I M E N T O S

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por sempre me dar forças para seguir em frente.

Agradeço aos meus pais, por estarem sempre presentes e por nunca medirem esforços para tornar esse sonho realidade. Obrigada por sempre incentivarem os meus estudos.

Agradeço ao meu irmão, meu melhor amigo, por estar sempre presente me apoiando e impulsionando meus sonhos.

Aos professores do DEAMB, pela transmissão do conhecimento, paciência e dedicação.

À minha amada República Anonimato, que me acolheu com tanto amor e carinho e tornou mais fácil todo esse tempo em Ouro Preto.

À Escola de Minas pelo ensino gratuito e de qualidade.

Enfim, gratidão a todos que de certa forma contribuíram para o sucesso deste trabalho.

“Existe uma força motriz mais poderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica: a vontade”.

Albert Einstein”

RESUMO

A maioria dos países baseiam suas políticas energéticas na utilização de combustíveis fósseis como principal componente da matriz energética. No entanto, é crescente a preocupação destes em atender suas atividades econômicas aliando o desenvolvimento com a produção de energia limpa. É neste contexto que as fontes energéticas renováveis vêm ganhando cada vez mais espaço. O presente estudo abordou brevemente os principais tipos de fontes de energia existentes, renováveis e não renováveis, dando maior ênfase à energia solar. Foi realizado um estudo de caso com o intuito de analisar a viabilidade econômica da implantação de um sistema solar fotovoltaico on-Grid em uma residência localizada na cidade de Ouro Preto. Para o dimensionamento do sistema foi levado em conta o consumo energético mensal da residência e a irradiação solar no local. Ao final realizou-se uma análise de custo da implantação do sistema, que mostrou ser atrativa e viável a utilização desta fonte de energia.

Palavras-chave: Fontes Energéticas, Energia Renovável, Energia Solar, Placas Fotovoltaicas, Dimensionamento de Sistema Fotovoltaico, Análise de Viabilidade Técnica.

A B S T R A C T

Most countries base their energy policies on the use of fossil fuels as the main component of the energy matrix. However, their concern is increasing in their economic activities, combining development with the production of clean energy. It is in this context that renewable energy sources are gaining more and more space. The present study briefly touched upon the main types of existing, renewable and non-renewable energy sources, with particular emphasis on solar energy. A case study was carried out to analyze the economic viability of the implantation of an on-grid solar photovoltaic system in a residence located in the city of Ouro Preto. For the design of the system, the monthly energy consumption of the residence and solar irradiation at the site were taken into account. At the end, a cost analysis of the implementation of the system was carried out, which proved to be attractive and viable the use of this energy source.

Keywords: Energy Sources, Renewable Energy, Solar Energy, Photovoltaic Panels, Photovoltaic System Sizing, Technical Feasibility Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2: Empregos gerados no mundo por energias renováveis.....	5
Figura 3: Fluxograma das Etapas do Trabalho.....	7
Figura 4: Matriz energética brasileira em 1970.....	8
Figura 5: Oferta interna de energia no Brasil em 2017	9
Figura 6: Instalação da Usina de Gás Natural Euzébio Rocha.	12
Figura 7: Extração do Carvão Mineral.	13
Figura 9: Usina Nuclear Angra 1.....	15
Figura 8: Extração de Petróleo.	17
Figura 10: Parque Eólico de Osório.	19
Figura 11: Usina Hidrelétrica de Itaipu.	20
Figura 12: Fonte de Energia Geotérmica.....	21
Figura 13: - (A) Instalações no porto de Pecém. (B) esquema de funcionamento da usina de ondas.....	23
Figura 14: Resíduo da cana-de-açúcar.....	25
Figura 15: Placas de coletor solar.....	26
Figura 16: Sistema Off-Grid.....	28
Figura 17: Sistema On-Grid.	28
Figura 18: Sistema Híbrido.	29
Figura 19: Planta da Residência.	31
Figura 20: Conta CEMIG janeiro de 2019.	34
Figura 22: Placa Fotovoltaica Yingli YL270P - 29b (270 Wp).	38
Figura 23: Planta da residência com o painel fotovoltaico.....	39
Figura 24: Inversor Solar PHB 4600-SS	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fontes renováveis e não renováveis na matriz energética brasileira entre os anos de 2005 e 2010 e projeção para os anos de 2020 e 2030 (em%).....	3
Tabela 2: Os programas do Governo e seus objetivos principais.....	9
Tabela 4: Irradiação solar no plano inclinado próximo a Ouro Preto.	36
Tabela 5: Comparação entre Painéis Fotovoltaicos.....	37
Tabela 6: Especificações Técnicas do Pannel Yingli de 270Wp.	38
Tabela 7: Especificações Técnicas do Inversor.....	41
Tabela 8: Especificações Técnicas do Inversor após aplicar as regras e definições.	41
Tabela 9: Comparação entre os dois modelos de Inversores.....	42
Tabela 11: Relação do número de strings e o número de módulos.	44
Tabela 12: Dados do Sistema.	45
Tabela 13: Orçamento total da Instalação do Projeto.....	46

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIEA	Agência Internacional de Energia Atômica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
APP	Área de Preservação Permanente
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CO2	Dióxido de Carbono
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica
GEE	Gases de Efeito Estufa
HSP	Horas de Sol Pleno
ICC	Corrente de Curto Circuito
MME	Ministério de Minas e Energia
MPPT	Acompanhamento Máximo do Ponto de Potência
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PRODEEM	Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
NOX	Óxido de Nitrogênio
SO2	Dióxido de Enxofre
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
UHE	Usina Hidrelétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Formulação do Problema	1
1.2	Justificativa	2
1.3	Objetivos	5
1.3.1	Objetivo Geral	5
1.3.2	Objetivos Específicos	5
1.4	Metodologia	6
1.5	Estrutura do Trabalho.....	7
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	8
2.1	A Matriz Energética Brasileira.....	8
2.2	Fontes de Energia.....	10
2.3	Fontes de Energia Não Renováveis.....	11
2.3.1	Gás Natural.....	11
2.3.2	Carvão Mineral.....	13
2.3.3	Nuclear	14
2.3.4	Petrolífera.....	16
2.4	Fontes de Energia Renovável.....	17
2.4.1	Energia Eólica	18
2.4.2	Energia Hidráulica.....	19
2.4.3	Energia Geotérmica.....	20
2.4.4	Energia das ondas e das marés	22
2.4.5	Biomassa	24
2.4.6	Energia Solar.....	25
3	ESTUDO DE CASO DE UM SISTEMA ON-GRID (CONECTADO Á REDE).....	31
3.1	Critérios para a escolha do sistema fotovoltaico.....	31
3.2	Projeto de Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico	32
3.2.1	Potência do Gerador	33
3.2.2	Cálculo do Número de Painéis	35
3.2.3	Definição do inversor	39
3.2.4	Custo da Instalação.....	46
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
4.1	Conclusão.....	48
4.2	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	48
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

1 INTRODUÇÃO

O atual modelo energético de grande parte dos países se baseia principalmente na utilização dos combustíveis fósseis, que além de apresentar natureza finita, são responsáveis pela geração de elevada carga de poluição ao meio ambiente. A crise do petróleo na década de setenta impulsionou a preocupação em conciliar crescimento contínuo da população e crescente demanda de consumo. Este fato levou as nações a se reunirem com o intuito de discutir as implicações e soluções para o uso de fontes energéticas, principalmente as que dizem respeito à emissão de gases que provocam o aquecimento global e o efeito estufa.

Foi na Conferência de Estocolmo, em 1972 que os problemas ambientais globais começaram a fazer parte da agenda internacional, porém a questão do aquecimento global só começou a adquirir uma maior importância com a realização da Primeira Conferência Mundial sobre o Clima, em 1979, organizada pela Organização Meteorológica Mundial das Nações Unidas. Posteriormente foram firmados o Protocolo de Montreal em 1987 e o Protocolo de Kyoto em 1997, contribuindo para a construção de ações concretas auxiliando os países a transformar em lei as metas de reduções das emissões.

Dentro dos aspectos apresentados vemos a necessidade da utilização de novas fontes de energia renováveis e sustentáveis. Neste contexto é imprescindível que se produza energia aliando: crescimento econômico, meio ambiente e qualidade de vida da população.

1.1 Formulação do Problema

Nos primórdios das civilizações, o Sol se apresentava como principal fonte de energia, auxiliando o homem a procurar por alimentos e abrigos, iluminando-os e aquecendo-os. Posteriormente o homem descobriu como fazer fogo a partir do atrito de pedras e madeiras, onde as fagulhas incendiavam a palha seca (Farias & Sellitto, 2011).

No século XVIII tem-se o grande marco na evolução da utilização de energia com a invenção da máquina a vapor. Esse acontecimento deu início à Era da Revolução Industrial na Europa. O grande marco dessa Era se dá pelo início da utilização de combustíveis fósseis como fonte de energia, sendo o carvão o primeiro a ser utilizado.

Em seguida veio o petróleo com as suas variadas utilidades e subprodutos (Barquete & Silva, 2013).

Durante muito tempo o carvão mineral e o petróleo foram utilizados como principais fontes de energia. Como forma de minimizar os problemas socioambientais que esses recursos energéticos não renováveis causam ao meio ambiente, tem-se buscado fontes alternativas de energia que sejam mais eficientes e menos poluidoras.

As formas alternativas de geração de energia propõem a implementação e o desenvolvimento de novas tecnologias baseando-se na sustentabilidade aliada ao crescimento econômico. Assim surgem as diferentes fontes de energia renovável: eólica, biomassa, das marés e a solar. Essa última surge no contexto como forma de energia capaz de aproveitar o índice de radiação solar ao qual o país se encontra, suprimindo com inúmeras vantagens as fontes energéticas não renováveis.

Surge então um questionamento inevitável: dentre tantas formas diferentes de aproveitamento de energia, como a energia fotovoltaica pode proporcionar um desenvolvimento aliando a expansão da oferta, consumo consciente, preservação do meio ambiente e a melhoria da qualidade de vida?

1.2 Justificativa

O desenvolvimento de um país está diretamente relacionado com diferentes variáveis: saneamento básico, serviços de infraestrutura, telecomunicações, transportes e energia. Dentre essas variáveis a energia é o fator determinante para o desenvolvimento econômico e social proporcionando melhorias na qualidade de vida da população.

Pesquisas sobre novas fontes de energia, como no caso das renováveis (solar, geotérmica, biomassa, entre outras), se caracterizam como uma forma de desenvolvimento tecnológico interferindo principalmente nos aspectos ambientais, econômicos e sociais. Desta forma, será avaliado abaixo cada um desses aspectos.

- Aspectos Ambientais

Por apresentarem baixo custo de produção, as fontes energéticas não renováveis são dominantes na produção da energia de grande parte dos países. Contudo diante da possibilidade de esgotamento desses recursos e principalmente em virtude da pressão de órgãos ambientais faz-se necessário modificar a utilização dessas fontes não renováveis.

Observa-se na Tabela 1 a utilização das fontes renováveis e não renováveis no Brasil. Entre os anos de 2005 e 2010, há a redução da utilização das fontes renováveis. A partir de 2020 espera-se que a utilização dessa fonte apresente crescimento, que será mantido até 2030. No caso das fontes não renováveis há um aumento da utilização entre 2005 e 2010, sendo esse valor reduzido em 2020 e mantendo-se em queda até 2030.

Tabela 1: Fontes renováveis e não renováveis na matriz energética brasileira entre os anos de 2005 e 2010 e projeção para os anos de 2020 e 2030 (em%).

Tipo de Fonte	Ano			
	2005	2010	2020	2030
Renováveis	44,5	43	45,8	46,6
Não Renováveis	55,5	57	54,2	53,4

Adaptado de: Freitas & Dathein,(2013).

Apesar da grande diversidade das fontes renováveis, o Brasil caracteriza-se por utilizar em sua maioria a energia hidráulica. Contudo nos últimos anos é notório o investimento em projetos e pesquisas com o intuito de proporcionar uma maior diversificação da matriz energética brasileira.

A produção de energia oriunda de fontes não renováveis emite grande quantidade de Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera, causando grandes impactos ao meio ambiente. Como no Brasil há a predominância na utilização de energia por centrais hidrelétricas a emissão dos GEE são consideradas inexistentes.

De acordo com o Ministério de Minas e Energia do Brasil, no ano de 2030 haverá um consumo de energia elétrica de 950 a 1250 TWh/ano. O aproveitamento do potencial hidrelétrico não será suficiente para atender a demanda. Desta forma a utilização de outras fontes energéticas renováveis, como a energia solar fotovoltaica, se constitui como uma das crescentes formas a serem utilizadas para suprir a demanda energética, possuindo baixo impacto ambiental e emitindo nenhum dos GEE.

Vale ressaltar que o trabalho está analisando as unidades de operação (hidráulica e solar) já instaladas e na fase de operação. Se levar em conta todo o processo de construção da usina hidrelétrica e na fabricação e transporte do painel solar ambos emitem gases poluentes causadores do efeito estufa.

- Aspectos Econômicos

Além de impactos ambientais, o consumo de energia implica em variáveis de ordem econômica, como: estabelecimento de uma nova oferta de energia e tecnologias que viabilizam a nova energia. Além disso, a demanda por energia é correlacionada ao desenvolvimento humano e econômico.

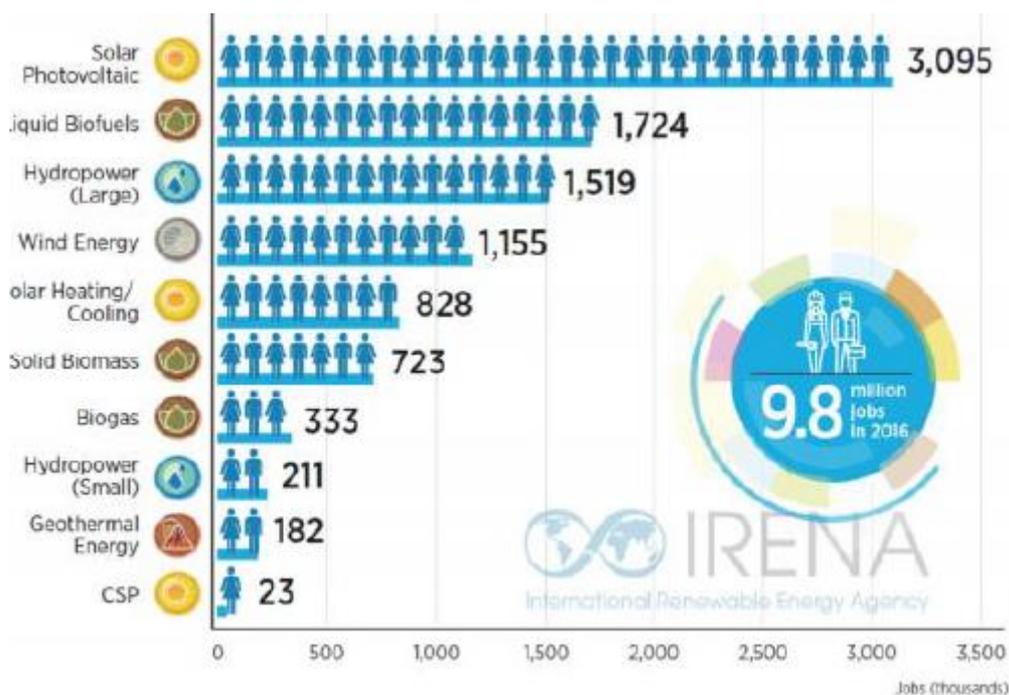
Do ponto de vista econômico o Brasil possui um aproveitamento da energia solar bastante vantajoso, até mesmo nas regiões menos favorecidas pela irradiação solar. Segundo Atlas Brasileiro de Energia Solar, o litoral norte do Estado de Santa Catarina, região onde a irradiação solar é menor, possui uma irradiação solar global de 4.250 Wh/m², valor que supera em quatro vezes ao apresentado pela Alemanha, que é o país que lidera mundialmente o setor de aproveitamento da energia solar (Bandeira, 2012).

- Aspectos Sociais

Os setores de produção de energia são responsáveis por gerar variados postos de trabalho, impactando o nível socioeconômico do país. Dessa forma são criadas diferentes empresas com o intuito de desenvolver atividades para viabilizar a produção de energias renováveis, como é o caso das usinas de biodiesel e etanol, dos parques eólicos, das centrais produtoras de energia solar entre outras.

Segundo Freitas & Dathein (2013) verifica-se que a energia renovável gera mais postos de trabalho do que os combustíveis fósseis. Sendo assim, além dos baixos índices de emissão de carbono, o número de empregos gerados também podem ser considerados como uma das vantagens. Ainda segundo os autores a biomassa chega a gerar 150 vezes mais empregos por unidade de energia que o petróleo, sendo que quando comparado com a energia fotovoltaica esse número será muito maior. Na Figura 1 está apresentado o número de empregos gerados no mundo pelas energias renováveis.

Figura 1: Empregos gerados no mundo por energias renováveis.



Fonte: IRENA (2017).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O Brasil é um país com características naturais de alta insolação e que apresenta grande potencial de aproveitamento da energia solar. Levando em consideração esses fatores, o presente trabalho tem como objetivo geral realizar um estudo de caso da viabilidade técnica e econômica da implantação de um sistema de energia solar fotovoltaica em uma residência localizada na cidade de Ouro Preto. A escolha do local se deu em virtude da cidade apresentar um grande mercado a ser desenvolvido, gerando trabalho e renda a toda cadeia produtiva.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Desenvolver um estudo de revisão bibliográfica sobre algumas fontes de energia renovável e não renovável bem como suas características e impactos ao meio ambiente;

- Descrever as principais características e identificar os impactos ambientais da geração de energia elétrica a partir da energia solar, por meio do sistema de placas fotovoltaicas;
- Realizar um estudo de caso sobre a implantação e dimensionamento de placas fotovoltaicas para um projeto residencial;
- Fazer uma análise do orçamento de custos da implantação do sistema fotovoltaico para o estudo de caso apresentado.

1.4 Metodologia

Para cumprir o objetivo proposto, utilizar-se-á como base de informações um estudo de revisão bibliográfica sobre fontes de energia renovável e não renovável, bem como suas características e eventuais impactos.

Terá maior ênfase o estudo e desenvolvimento da energia solar, uma vez que o trabalho se compromete a realizar um estudo de caso de implementação e dimensionamento de placas fotovoltaicas em uma residência situada na cidade de Ouro Preto.

Ao final do trabalho será apresentada a proposta do sistema fotovoltaico bem como sua viabilidade de implantação. Para o projeto arquitetônico de dimensionamento, será usado o programa SKetchUp Make 2016.

Em todo o estudo serão utilizados artigos científicos e base de dados disponíveis na literatura atual. Todas as etapas do estudo estão apresentadas na Figura 2.

Figura 2: Fluxograma das Etapas do Trabalho.



Fonte: O Autor (2019).

1.5 Estrutura do Trabalho

O trabalho será dividido em quatro capítulos, os quais seguem as normas da ABNT e os padrões para a realização de trabalhos científicos na área da Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

Como premissa, foi apresentada uma breve introdução ao tema, onde foi levantada a formulação do problema, os aspectos que levaram a escolha deste tema, bem como a escolha de uma determinada fonte energética. Ainda no primeiro capítulo foram apresentados os objetivos gerais e específicos, a metodologia utilizada e a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo foi realizada uma revisão conceitual sobre as fontes energéticas renováveis e não renováveis, dando maior ênfase à energia solar. No terceiro capítulo realizou-se um estudo de caso referente a um projeto de dimensionamento de placas fotovoltaicas em uma residência. Também foi feita a análise visando avaliar a viabilidade da implementação das placas fotovoltaicas.

Por fim, no quarto capítulo são conferidas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

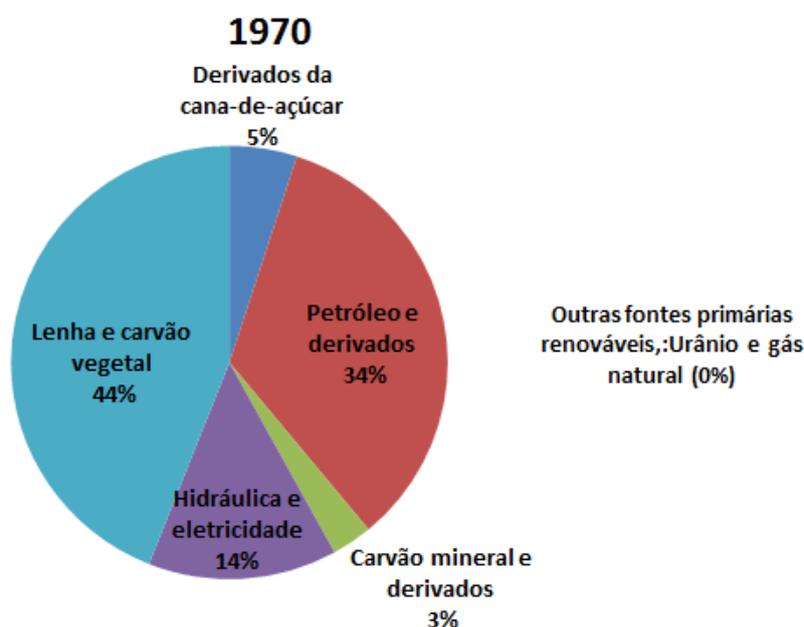
2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 A Matriz Energética Brasileira

Ao longo do século XX, o Brasil experimentou intenso desenvolvimento econômico que se refletiu numa crescente demanda de energia. Entre os fatores que determinaram tal crescimento alinham-se um expressivo processo de industrialização, com a instalação de novas plantas industriais e uma notável expansão demográfica, acompanhada de rápido aumento da taxa de urbanização.

Ao longo de todo esse processo de industrialização e desenvolvimento econômico houve uma tendência de diversificação da matriz energética brasileira. Como pode ser observado na Figura 3, em 1970 o petróleo e a lenha correspondiam a 78% do consumo de energia da matriz brasileira.

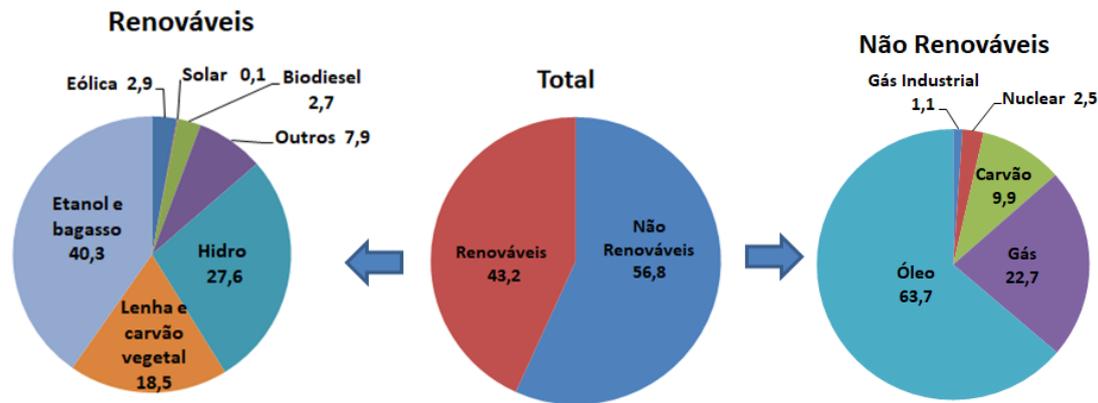
Figura 3: Matriz energética brasileira em 1970.



Adaptado de: Tolmasquim, Guerreiro, & Gorini (2007).

O avanço da industrialização e desenvolvimento do país desencadeou uma mudança dessa matriz. De acordo com a Resenha Energética Brasileira desenvolvida pelo Ministério de Minas e Energia (MME), no ano de 2017, a oferta interna de energia passou a corresponder 43,2% de energia renovável e 56,8% de energia não renovável. Os dados obtidos no estudo estão exemplificados na Figura 4.

Figura 4: Oferta interna de energia no Brasil em 2017



Adaptado de: Energia (2017).

É notório o crescimento da participação das energias renováveis na matriz energética brasileira, esse fato se dá pela criação do Plano de Suprimento aos Requisitos de Energia Elétrica. Com este Plano, o governo se dispôs a liberar recursos para aprimorar a produção de energia a partir de fontes renováveis, além de criar programas que tem em vista encorajar o desenvolvimento de novas fontes energéticas (Freitas & Dathein, 2013).

Observa-se na Tabela 2 os principais programas implementados pelo governo, o ano em que foram instituídos bem como o principal objetivo que possuem:

Tabela 2: Os programas do Governo e seus objetivos principais.

Ano de Criação	Programa	Objetivo Principal
2002	PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica	Aumentar a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos que utilizem fontes eólicas, da biomassa e das pequenas centrais hidrelétricas
2003	Programa Luz para Todos	Fornecer energia elétrica a população que ainda não possui abastecimento
2005	Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel	Auxiliar na implementação da produção e uso do biodiesel
2015	Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica	Ampliar e aprofundar ações de estímulo à geração de energia pelos próprios consumidores, com base nas fontes renováveis de energia (em especial a solar)
2017	RenovaBio - Política Nacional de Biocombustíveis	Promover a adequada expansão da produção e do uso de biocombustíveis na matriz energética nacional contribuindo para a redução de emissão de gases causadores do efeito estufa

Adaptado pela autora a partir de: Freitas & Dathein (2013).

Com base nos programas verifica-se como as energias renováveis têm sido encorajadas e estão evoluindo no Brasil.

2.2 Fontes de Energia

O Brasil é privilegiado em termos de território, ocupando as primeiras posições entre os países de maior extensão territorial, o que lhe permite ser potencialmente apropriado para prospecção de diferentes fontes de energia.

Da definição da física, energia é a capacidade de gerar trabalho. Com relação ao objeto em análise esta definição se torna um pouco mais abrangente, ela também é considerada um fator de produção e, como tal, um insumo importante para impulsionar o desenvolvimento econômico de um país (Kaehler, 2000).

Em um contexto mundial, as diferentes fontes energéticas distinguem-se ao longo do tempo. O desenvolvimento tecnológico e as mudanças estruturais da economia fazem com que as energias dominantes passem por um ciclo. No período pré-industrial, a biomassa, notadamente a lenha e o carvão vegetal, eram praticamente os únicos energéticos utilizados pela humanidade. Com a revolução industrial, o carvão mineral passou a exercer papel preponderante na economia. Mais tarde, no final do século XIX, os derivados de petróleo começaram a substituir o carvão mineral tornando-se a energia dominante do século (Costa & Prates, 2005).

Com o aumento da demanda energética e a pressão ambiental contrária à utilização de combustível fóssil, torna-se necessária a utilização de novas fontes de energia. Desta forma surge a necessidade de substituir o petróleo por outra fonte energética sustentável. No entanto essa substituição não é tão simples, uma vez que o petróleo é bastante flexível, apresenta conteúdo energético bastante elevado, é de fácil transporte e pode produzir combustíveis diversos para múltiplas aplicações. Em contrapartida as energias renováveis nem sempre oferecem essas facilidades, não sendo capazes de substituir por inteiro a utilização do petróleo (Costa & Prates, 2005).

De uma maneira geral são estabelecidos e definidos dois grupos de fontes de energia: as renováveis e as não renováveis. As primeiras “são aquelas que provêm de fontes capazes de se regenerar por meios naturais, sendo, portanto, consideradas

inesgotáveis”. Já as fontes de energia não renováveis “são recursos naturais que, quando utilizados, não podem mais ser repostos em prazo útil pela ação humana ou pela natureza” (Viana, Tavares, & Lima, 2015).

2.3 Fontes de Energia Não Renováveis

As fontes energéticas não renováveis são recursos naturais que, quando utilizados, não podem mais ser repostos em prazo útil pela ação humana ou pela natureza. O que vem ocorrendo desde a descoberta dessas fontes é uma extração desenfreada, levando as reservas à exaustão física ou econômica. Não se pode deixar que o nome não renovável leve a pensar que estas fontes de fato não se renovam na natureza, a questão é que “não podem ser repostas em escalas de tempo humanas” (Júnior & Filho, 2007).

São exemplos de fontes de energia não renovável os combustíveis fósseis: petróleo, carvão mineral e gás natural. Estes se originam através de transformações de restos de materiais orgânicos e/ou sedimentos, os quais demoram milhões de anos para acontecer.

2.3.1 Gás Natural

O gás natural, assim como os demais combustíveis fósseis é composto por uma mistura de hidrocarbonetos gasosos, decorrentes da decomposição da matéria orgânica fossilizada ao longo de milhões de anos. É encontrado em reservatórios subterrâneos, tanto em terra quanto em mar, podendo ou não estar associado ao petróleo. O gás é composto principalmente por metano, seguido por nitrogênio, dióxido de carbono, etano, propano, butano e pentano em menores quantidades (Gomes, 2006).

O gás natural quando relacionado ao meio ambiente apresenta características marcantes que o distinguem dos demais combustíveis existentes. Trata-se de um produto com menor teor de agentes poluentes. Em sua queima, emite uma quantidade menor de material particulado, pouquíssimo dióxido de enxofre (SO₂) e dióxido de carbono (CO₂), hidrocarbonetos e óxido de nitrogênio (NO_x), o que o torna isento da produção de fuligem e cinza (Gomes, 2006).

O gás natural pode ser classificado em duas categorias: associado e não associado. O gás associado é aquele que, no reservatório geológico, se encontra

dissolvido no petróleo ou sob a forma de uma capa de gás. Neste caso, normalmente privilegia-se a produção inicial do óleo, utilizando-se o gás para manter a pressão do reservatório. O gás não associado é aquele que está livre do óleo e da água no reservatório; sua concentração é predominante na camada rochosa, permitindo a produção basicamente de gás natural (ANP, 2019).

O gás natural produzido no Brasil é predominantemente de origem associada ao petróleo e se destina a diversos mercados de consumo, sendo os principais: geração de energia termelétrica e os segmentos industriais. Além disso, uma vez produzido, o gás natural se distribui entre diversos setores de consumo, com fins energéticos e não energéticos, sendo utilizado como matéria-prima na indústria veicular, comércio, fertilizantes, serviços, domicílios e petroquímicos (plásticos, tintas, fibras sintéticas e borracha) (ANP, 2019). Observa-se na Figura 5 as instalações da Usina de Gás Natural Euzébio Rocha, localizada no estado de São Paulo.

Figura 5: Instalação da Usina de Gás Natural Euzébio Rocha.



Fonte: Petrobrás (2019).

Em relação aos impactos ambientais desta fonte energética se destaca a necessidade de captação de água para o arrefecimento do vapor. Esta prática tem sido um dos empecilhos para se obter o licenciamento ambiental. Existem também impactos positivos, como a geração de emprego e de royalties para o município em que se encontram as usinas.

2.3.2 Carvão Mineral

Entre os combustíveis fósseis, o carvão mineral é o que gera maiores quantidades de GEE. Outro grande impacto ambiental ocorre na mineração, que afeta o solo, os recursos hídricos e o relevo da região (ANEEL, 2008). Observa-se na Figura 6 o processo de extração do carvão mineral na mina de Candiota, localizada no município de Candiota, Rio Grande do Sul.

Figura 6: Extração do Carvão Mineral.



Fonte: Mineração (2019).

O carvão mineral é formado por misturas de estruturas orgânicas sólidas, através da acumulação e carbonização ao longo de milhares de anos. É composto, basicamente, por carbono, oxigênio, hidrogênio, enxofre e cinzas (ANEEL, 2008).

O carvão mineral pode ser classificado de acordo com o seu teor de carbono, que é o fator determinante para a capacidade calorífica, sendo diferenciado, em ordem crescente de teor de carbono, em turfa, saprolito, linhito, sub betuminoso, betuminoso e antracito. O estágio mínimo para uso industrial é o linhito devido ao limite mínimo permitido de emissão de gases. As reservas brasileiras são compostas pelo carvão dos tipos linhito e sub betuminoso. As maiores jazidas situam-se nos estados do Rio Grande

do Sul e Santa Catarina e as menores localizam-se no Paraná e em São Paulo (Borba, 2001).

A principal utilização do minério é na geração de energia elétrica e na indústria siderúrgica. As reservas brasileiras ocupam o 10º lugar no ranking mundial e totalizam 7 bilhões de toneladas, correspondendo a cerca de 1% das reservas totais (ANEEL, 2008). Em termos de contribuição na matriz energética mundial, o carvão é responsável por 29,6% do consumo global de energia e, apesar dos impactos negativos no meio ambiente, o carvão é considerado a maior fonte de energia para uso local. E em nível mundial, seu consumo vem aumentando a cada ano. As principais razões para isso são a abundância das reservas, sua distribuição geográfica, além dos baixos custos e estabilidade nos preços, quando comparado a outros combustíveis (Padrão, 2011).

2.3.3 Nuclear

A energia nuclear é proveniente da fissão de átomos de minerais radioativos, como o urânio e o plutônio. Considerados finitos, esses minerais são encontrados nas rochas da crosta terrestre. Projeções da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) mostram que os depósitos de urânio devem cessar entre 2020 e 2030, resultando em uma eventual subida dos preços (ANEEL, 2008).

Duas usinas de energia nuclear foram construídas e encontram-se em operação no Brasil, são elas as usinas de Angra 1 e Angra 2. Uma terceira usina, Angra 3 está em fase de implantação. Essas usinas estão situadas no município de Angra dos Reis, no estado do Rio de Janeiro. Observa-se na Figura 7 a usina Nuclear de Angra 1.

Figura 7: Usina Nuclear Angra 1.



Fonte: Época (2017).

No processo de extração e processamento do minério de urânio os níveis de radioatividade são supervisionados e controlados, de forma a não ultrapassar os limites previstos pelos órgãos reguladores. No entanto, ainda não foram encontradas soluções eficazes no descarte dos rejeitos radioativos que, juntamente com o risco de incidentes nas usinas, consistem nos elementos mais arriscados do processo de geração da energia nuclear (ANEEL, 2008).

Essa fonte de energia é considerada a mais polêmica de todas as fontes energéticas. De um lado têm-se vantagens como: a não emissão de gases que contribuem para o efeito estufa, a utilização de pequenas áreas e a não dependência das condições climáticas. Por outro lado há fatores que pesam muito na escolha dessa fonte, como: risco de um acidente nuclear e a possibilidade de terroristas terem acesso a esses materiais radioativos, podendo utilizá-los na construção de armas nucleares (Viana, Tavares, & Lima, 2015).

2.3.4 Petrolífera

O petróleo constitui-se como um óleo inflamável, formado a partir da decomposição de matéria orgânica durante milhões de anos, como plantas e animais marinhos. A base de sua composição é o hidrocarboneto, substância composta por hidrogênio e carbono. É considerada a principal fonte de eletricidade em diversos países no mundo, sendo responsável por 31,5% da matriz energética mundial (Barquete & Silva, 2013).

No Brasil, as primeiras descobertas de petróleo foram encontradas no final do século XIX, no município de Bofete, São Paulo. No entanto sua extração não era economicamente viável. Então foi descoberta no ano de 1939, no município de Lobato, Recôncavo Baiano, a primeira jazida de petróleo economicamente viável.

O petróleo é considerado uma fonte de energia não renovável, causando potenciais impactos ao meio ambiente. Vazamentos de óleos em petroleiros e terminais de petróleo são um dos impactos mais conhecidos e relevantes. No ano de 2000, ocorreu um grave acidente na baía de Guanabara, Rio de Janeiro, onde foram despejados 1,3 milhões de litros de óleo cru. Esse vazamento trouxe impactos significativos em plantas e animais, pois o óleo recobre a pena e o pelo dos animais, sufoca os peixes e mata os plânctons, crustáceos e algas presentes na orla marítima (Viana, Tavares, & Lima, 2015).

Embora cause grandes impactos negativos, a extração do petróleo pode impulsionar o desenvolvimento econômico e social de uma região, gerando novos empregos, investimentos do governo, royalties e valorização imobiliária.

A extração do petróleo pode se dar tanto em continente quanto no mar, sendo que a extração no mar é bem mais complexa, demandando maiores investimentos e mão de obra. As jazidas de extração de petróleo no Brasil são encontradas em sua maioria no mar (Viana, Tavares, & Lima, 2015). Observa-se na Figura 8 a extração do petróleo na Bacia de Campos, litoral do estado do Rio de Janeiro.

Figura 8: Extração de Petróleo.



Fonte: G1 (2015).

2.4 Fontes de Energia Renovável

As fontes renováveis de energia são alternativas às fontes tradicionais. São classificadas como opções ambientalmente corretas. Essas fontes de energia podem ser utilizadas, por exemplo, como insumos na geração de eletricidade. No atual cenário econômico é imprescindível que elas estejam inseridas nas políticas energéticas dos países uma vez que exercem papel importante para a sustentabilidade do sistema energético.

O desenvolvimento das fontes energéticas renováveis no Brasil está relacionado à programas de políticas de investimento em eletrificação rural nas comunidades isoladas, que pelas distâncias geográficas inviabilizam a chegada das redes elétricas. São exemplos de programas: o Programa de Desenvolvimento Energético de estados e Municípios (Prodeem), o Programa Luz para Todos, o Proinfa (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica) e a realização de leilões de energia (Viana, Tavares, & Lima, 2015).

São consideradas fontes de energia renovável: a biomassa, a hidráulica, a eólica e a solar (pode ser utilizada para painéis fotovoltaicos e para o aquecimento de água).

Também são energias renováveis a energia geotérmica e a oceânica (proveniente das marés). No entanto elas ainda não demonstram viabilidade econômica no território brasileiro. São características dessas fontes apresentar mais vantagens do que desvantagens ambientais (Viana, Tavares, & Lima, 2015)

2.4.1 Energia Eólica

A energia eólica, ou energia contida nos ventos, é decorrente do deslocamento das massas de ar com velocidades variadas, provocados por efeitos climáticos (oriundos do aquecimento da terra por radiação solar incidente, rotação e translação da terra) ou pelos efeitos de superfície (obstáculos do terreno, rugosidade, gradiente térmico entre outros). A utilização dessa energia cinética do vento teve início no século XX, sendo utilizada principalmente em moinhos para moer grãos e no transporte de mercadorias em barcos à vela (Nascimento & Alves, 2016).

A energia cinética proveniente das massas de ar (vento) é decorrente da locomoção das mesmas em virtude da disparidade das camadas de temperatura presentes na atmosfera e de irregularidades na superfície terrestre. A utilização desse tipo de fonte teve início no século XIX, sendo utilizada principalmente em moinhos para moer grãos e no transporte de mercadorias em barcos à vela (Nascimento & Alves, 2016).

Por se tratar de um tipo de energia limpa e abundante, a energia eólica têm se tornado promessa como fonte renovável e alternativa. As melhores regiões para o aproveitamento dos ventos são as regiões litorâneas e as montanhosas. Já as regiões de planície não são favoráveis pela baixa ocorrência dos ventos (Barquete & Silva, 2013).

As regiões que apresentam maior potencial eólico no Brasil são as regiões Nordeste (interior da Bahia, litoral do Ceará e Rio Grande do Norte) e no Sul (Rio Grande do Sul). O primeiro grande parque eólico brasileiro foi instalado em 2006 na cidade de Osório, Rio Grande do Sul. Observa-se na Figura 9, o Parque Eólico de Osório. Das fontes de energia existentes a eólica é a que mais cresce no país, porém esse crescimento vem ocorrendo a passos tímidos devido à falta de investimento do governo (Barquete & Silva, 2013).

Figura 9: Parque Eólico de Osório.



Fonte: Preview Banco de Imagens (2018).

Embora existam muitas vantagens deste tipo de fonte de energia. Também podem ser observados alguns impactos negativos, como o impacto visual causado na paisagem local, a poluição sonora oriunda do movimento das hélices e a interferência na rota de migração de alguns pássaros (Viana, Tavares, & Lima, 2015).

2.4.2 Energia Hidráulica

A água está presente em grande parte da superfície terrestre, recobrando um total de 2/3 de toda a superfície do planeta. Sendo assim pode ser considerada o recurso natural mais abundante da Terra. Com toda essa abundância de água, essa fonte se torna uma das principais formas de geração de energia de alguns países, chegando a representar 20% da eletricidade mundial (Barquete & Silva, 2013).

A geração de energia elétrica numa hidroelétrica provém do aproveitamento hidráulico de um rio, que pode acontecer em uma usina hidrelétrica (UHE) com capacidade instalada superior a 30MW, ou em uma pequena central hidroelétrica (PCH), quando a capacidade fica abaixo desse valor. O Brasil está entre os maiores potenciais hidráulicos do mundo, sendo que o maior potencial hidroelétrico ocorre na bacia do Rio Paraná, fazendo divisa entre Brasil e Paraguai. Nessa bacia se situa a segunda maior produtora mundial de energia elétrica, a UHE de Itaipu Binacional

(VIANA, TAVARES e LIMA, 2015). Observa-se na Figura 10 a Usina Hidrelétrica de Itaipu.

Figura 10: Usina Hidrelétrica de Itaipu.



Fonte: ITAIPU (2001).

O mecanismo de geração de energia elétrica em uma hidroelétrica é proveniente da queda de fluxo de água de uma altura mais elevada para outra menos elevada. Na usina têm-se as turbinas, que consistem num conjunto de pás em um eixo central. O fluxo da água passa por essas turbinas fazendo-as movimentarem produzindo assim a eletricidade (Barquete & Silva, 2013).

Embora seja considerada uma fonte de energia renovável, a energia hidroelétrica não pode ser considerada inteiramente limpa. Impactos provocados na implantação do canteiro de obras e pela linha de transmissão, a inundação de uma extensa área, que pode afetar a vida das populações tradicionais que vivem no entorno e a inundação de áreas de preservação permanente (APP) são algumas das consequências negativas desse tipo de fonte de energia (Viana, Tavares, & Lima, 2015).

2.4.3 Energia Geotérmica

A energia geotérmica é uma fonte alternativa de energia proveniente da capacidade natural da Terra de reter calor em seu interior onde se encontram água e rochas a temperaturas muito elevadas. O calor oriundo do interior da Terra, como pode

se observar na Figura 11 é usado como mecanismo de produção de energia, pois produz vapor, que será utilizado para alimentar os geradores da turbina e assim produzir eletricidade (Nascimento & Alves, 2016).

Figura 11: Fonte de Energia Geotérmica.



Fonte: Piensa en Geotermia (2017).

Os recursos geotermiais são classificados em três grupos:

- I. Baixa entalpia ou sistemas por domínio de água quente – a água subterrânea quente, variando de 50 a 150°C é utilizada como fonte de calor.
- II. Alta entalpia ou sistema de domínio de vapor – o vapor é extraído líquido, com temperatura variando de 150 a 300°C, e utilizado para mover turbinas de geração de eletricidade.
- III. Sistemas de rochas secas e quentes – a água é circulada para níveis mais profundos em fraturas que já existem ou que foram criadas artificialmente, onde é aquecida. A água quente e o vapor, variando a uma temperatura de 50 a 300°C, são encaminhados à superfície para serem utilizados como fontes de energia geotermiais (Arboit, 2013).

Ainda de acordo com (Arboit, 2013) a temperatura ideal da energia geotérmica se encontra entre 35°C e 148°C, sendo que para a produção de eletricidade sua temperatura deve estar em torno de 300°C ou mais. O curioso dessa fonte de energia é que embora seja considerada uma forma de energia renovável o seu fluxo de calor no interior da Terra é pequeno se comparado com a taxa de consumo requisitada, podendo causar o esgotamento do campo geotérmico (Simoni, 2006).

De todas as fontes de energia citadas ao longo do trabalho, a energia geotérmica é possivelmente a energia alternativa que apresenta maiores riscos e impactos negativos. São exemplos de impactos negativos desta fonte: a contaminação dos recursos hídricos próximos à usina, o desmoronamento causado pelo desequilíbrio no interior da terra e a realocação das rochas. No entanto, mesmo com todos os impactos negativos, essa alternativa é ambientalmente melhor que os combustíveis fósseis. Dentre as vantagens destaca-se a reduzida alteração e utilização dos solos, o baixo custo de operação e a geração de empregos, proporcionando desenvolvimento para o local.

O Brasil, por não estar situado em uma região de intensa atividade vulcânica, não apresenta viabilidade na extração do vapor para ser utilizado em centrais geotérmicas.

2.4.4 Energia das ondas e das marés

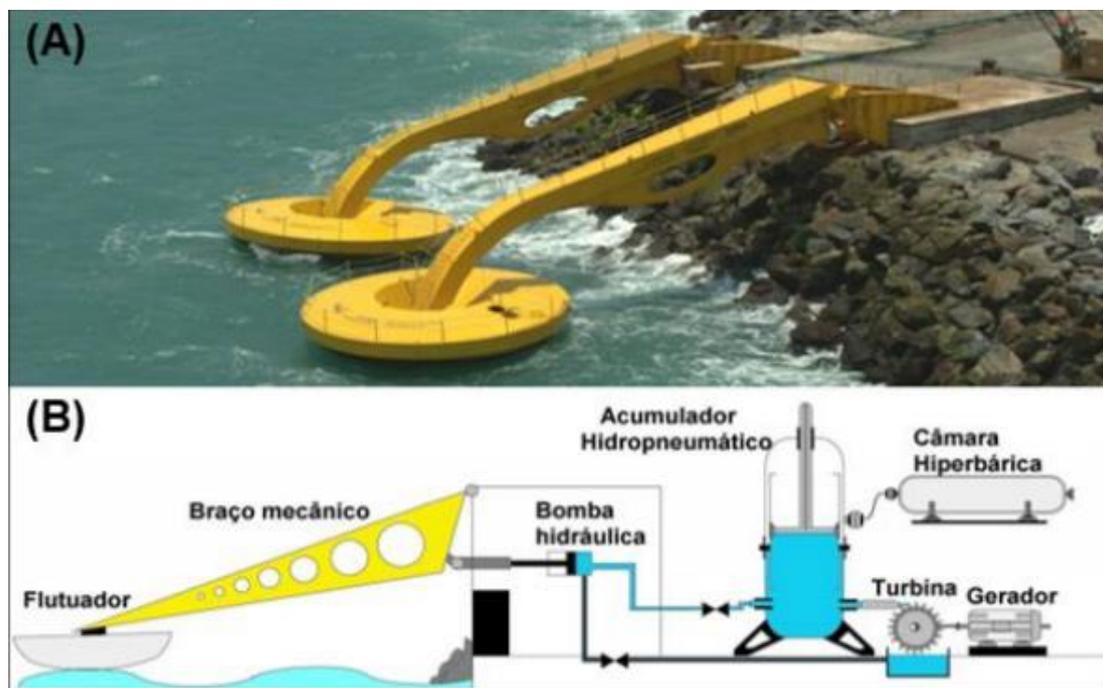
Trata-se da energia obtida pelo movimento das massas de água das marés. Esse movimento das águas é resultante da combinação das forças produzidas pela atração do Sol e da Lua e pelo movimento de rotação da Terra, fazendo com que haja movimento vertical (de subida e descida) e horizontal das águas (Barquete & Silva, 2013).

Os estudos a cerca desse tipo de energia ainda são muito recentes, porém houve um avanço significativo na inserção desta forma de energia em alguns países da Europa, como é o caso de Portugal, que apresenta locais com condições naturais favoráveis para o aproveitamento da energia das ondas (Viana, Tavares, & Lima, 2015).

Com o objetivo de expandir a matriz energética nacional, foi desenvolvida a primeira usina de ondas no Brasil, situada no Porto de Pecém, estado do Ceará. As características dessa região, como o predomínio de ondas baixas (entre 1 e 2 metros de altura) e sua frequência constante, foram os motivos que impulsionaram a escolha dessa região (Viana, Tavares, & Lima, 2015). A usina de ondas do Pecém, demonstrada na

Figura 12, foi financiada pela Tractebel Energia S.A., por intermédio do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), e apoiada pelo governo do Ceará. .

Figura 12: - (A) Instalações no porto de Pecém. (B) esquema de funcionamento da usina de ondas.



Fonte: Planeta COPPE Notícia (2006).

O processo de obtenção de energia por este tipo de fonte se dá em virtude do aproveitamento da energia contida na oscilação do tamanho das ondas das marés. A energia potencial necessita ser revertida em eletricidade, para isso constrói-se um dispositivo composto de dois grandes braços mecânicos flutuadores, fixados em estruturas horizontais. Através da ação das ondas, essas estruturas se movimentam operando como braços de alavanca, que possuem em uma extremidade boias circulares que se deslocam de acordo com o movimento alternado e repetitivo das ondas, acionando na sua outra extremidade uma bomba hidráulica. A bomba aspira e comprime o fluido enquanto os flutuadores se movimentam, para abastecer e manter elevada a pressão da câmara hiperbárica. A câmara hiperbárica, inicialmente pressurizada com água e nitrogênio, aciona uma turbina ao liberar um jato de água cuja pressão equivale a uma queda d'água de 400 m de altura, análoga a de grandes hidrelétricas. A rotação obtida no eixo da turbina é transmitida ao gerador para conversão de energia mecânica em energia elétrica (Planeta COPPE Notícias, 2006).

2.4.5 Biomassa

Caracteriza-se como biomassa todo insumo renovável proveniente de substâncias orgânicas não fósseis, principalmente de origem animal ou vegetal, como a lenha, bagaço de cana-de-açúcar, resíduos de florestas, excrementos de animais e outras matérias orgânicas. É utilizada na produção de calor, gerando eletricidade e também na fabricação de vários biocombustíveis, como o biodiesel e o biogás. Esse último utilizado muitas vezes em atividades industriais e agropecuárias, produzindo calor e gerando energia elétrica (ANEEL, 2008).

Para aproveitar os resíduos que em excesso, causam contaminação do solo e das águas, a biomassa é considerada uma excelente fonte de energia. É uma das fontes que mais tem crescido no Brasil. Um dos fatores cruciais para tal crescimento se dá principalmente em virtude do aumento da produção de cana-de-açúcar, impulsionado pelo crescente consumo de etanol (Moreira & Cardoso, 2010).

São vários os tipos de tecnologia empregados na produção de energia elétrica a partir da biomassa, tendo como princípio a conversão da matéria orgânica em um produto que será utilizado em uma máquina motriz, a qual será responsável por gerar energia mecânica movendo o gerador de energia elétrica. Todas as tecnologias existentes a partir da biomassa são aplicadas em processos de cogeração, permitindo produzir em sincronia energia e calor (Nascimento & Alves, 2016). Observa-se na Figura 13 um tipo de biomassa, que é o resíduo de cana-de-açúcar.

Figura 13: Resíduo da cana-de-açúcar.



Fonte: CETESB (2017).

2.4.6 Energia Solar

Além de ser considerada uma fonte de energia inesgotável, o Sol também permite obter uma energia limpa e gratuita, sendo assim considerada uma das fontes energéticas mais promissoras da atualidade.

A utilização da energia solar implica em várias qualidades socioambientais por não necessitar de realocar a população e também pela menor emissão de gases poluentes para a atmosfera. Além disso, a energia solar pode ser utilizada no aquecimento de água residencial, diminuindo o uso do chuveiro elétrico que correspondem a um dos maiores gastos de energia residencial.

No Brasil a utilização de energia solar está aumentando. No entanto, sua produção é caracterizada por apresentar oscilação durante a produção: durante o dia há elevada geração e durante a noite a produção é baixa. Outra desvantagem é o elevado custo que está relacionada fundamentalmente aos custos de instalação, compreendendo a compra de equipamentos e a mão de obra. Em contrapartida, como a energia é proveniente do Sol, não há custos com o combustível.

São diferentes as formas de captação da radiação solar para a obtenção de energia solar, sendo as tecnologias mais utilizadas: a fotovoltaica, a termossolar e a solar termoelétrica. Quando a radiação solar é transformada diretamente em energia elétrica denomina-se energia fotovoltaica. Na energia termossolar o coletor transforma radiação solar em calor, podendo ser por meio de um fluido, sendo esse fluido em seguida armazenado em um reservatório para posterior utilização. Já na energia solar termoelétrica, espelhos concentradores são aquecidos por meio da radiação solar, esse receptor aquece um fluido, sendo o calor absorvido transformado em energia mecânica mediante turbina a vapor e só então é convertido em energia elétrica (Viana, Tavares, & Lima, 2015).

Será abordado de forma mais detalhada a utilização da energia solar fotovoltaica uma vez que o presente trabalho se propõe a realizar um estudo de caso de implantação de painéis fotovoltaicos em uma residência. Observa-se na Figura 14 coletores de energia solar fotovoltaica.

Figura 14: Placas de coletor solar.



Fonte: Geração Smart Grid (2017).

2.4.6.1 Energia Solar Fotovoltaica

O fenômeno de conversão direta de luz solar em eletricidade foi relatado por Edmond Becquerel, em 1839, quando foi observado que pela interação da radiação solar

com um material semicondutor ocorre a liberação e movimentação de elétrons por este material, causando uma diferença de potência (CRESESB, 2019).

A energia fotovoltaica é produzida quando a energia solar incide sobre uma superfície capaz de realizar a conversão direta da luz em eletricidade. A este fenômeno denominamos de efeito fotovoltaico. Para garantir o funcionamento desse efeito é necessária a instalação de células fotovoltaicas, que se caracterizam por apresentar um dispositivo com material semicondutor.

Na produção das células fotovoltaicas um dos materiais mais utilizados é o silício, que corresponde ao segundo elemento químico mais abundante da superfície terrestre. No entanto, somente o silício de alta pureza é considerado como um bom material semicondutor, sendo que no processo de purificação do silício é demonstrado um alto grau energético contribuindo para o elevado custo da produção das células (CRESESB, 2019).

As células fotovoltaicas são dispostas em série e interligadas umas às outras através de contatos metálicos. Para garantir o isolamento elétrico entre as células e a proteção contra agentes atmosféricos as células são cobertas por um material transparente. Todo esse sistema forma um módulo fotovoltaico, que conectado a outros módulos forma o sistema fotovoltaico.

Essa fonte de energia caracteriza-se por ser uma fonte renovável de energia estática e silenciosa, proporcionando a possibilidade de instalação de sistemas fotovoltaicos próximos ao local de consumo, sendo na maioria das vezes instalado sobre a área já ocupada, como por exemplo, em uma residência. Tal característica evita impactos ambientais que geralmente acompanham a instalação e operação de determinadas fontes de energia, como é o caso das usinas hidrelétricas: extensas áreas são alagadas impactando o ecossistema da região (Simoni, 2006).

Tipos de Conexão

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em três grupos: o sistema isolado, o sistema interligado e o sistema híbrido. No caso do sistema isolado não há conexão entre o sistema e a rede pública de distribuição de energia (off-Grid), para tanto utiliza-se baterias para armazenar a energia produzida pelo sistema, como na Figura 15:

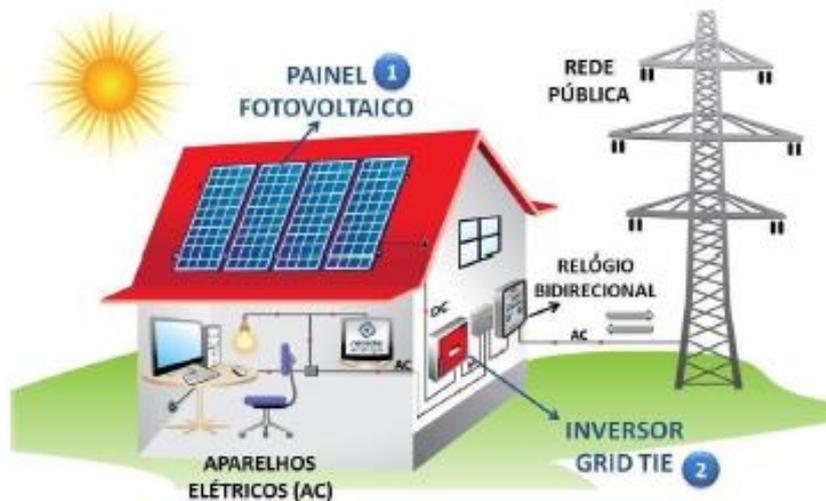
Figura 15: Sistema Off-Grid.



Fonte: Suttgart (2019).

Já o sistema interligado é aquele que está efetivamente conectado ao sistema público de distribuição de energia (on-Grid). Os sistemas on-Grid, Figura 16, não armazenam energia: a energia que é gerada durante o dia é entregue à rede e, durante a noite ou em períodos nublados é extraída a energia necessária para alimentar as cargas.

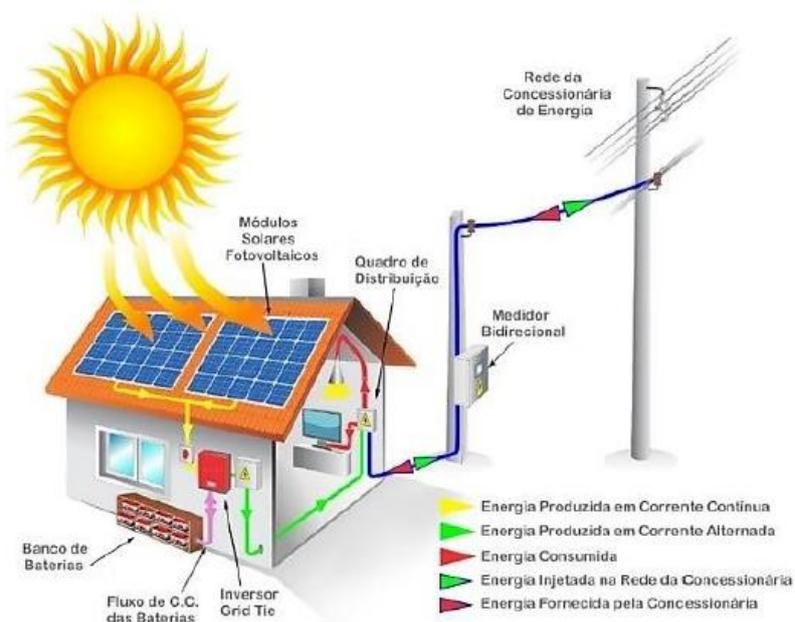
Figura 16: Sistema On-Grid.



Fonte: Suttgart (2019).

Os sistemas híbridos, Figura 17, são sistemas conectados à rede elétrica, mas que também integram um sistema de armazenamento de energia inteligente através de baterias. Se caracterizam por apresentar sistema de confiabilidade e pela autonomia para cargas prioritárias, que continuam funcionando até que o estoque se extingue ou até a conexão à rede elétrica ser estabelecida.

Figura 17: Sistema Híbrido.



Fonte: Sontag (2019).

Sistemas conectados à rede

Toda a potência excedente produzida pelo gerador fotovoltaico é entregue diretamente à rede elétrica, desta forma os sistemas on-Grid não dependem de um banco de bateria pois estão conectados diretamente na rede da concessionária.

Existem duas situações possíveis para este tipo de sistema:

1. Geração de energia menor que o consumo: O valor produzido é abatido, então se paga apenas o valor consumido mais as taxas fixas.
2. A geração de energia foi maior do que o consumo: Gera-se um crédito de valor igual à diferença entre produção e consumo. Este crédito tem até 36 meses para ser utilizado.

Inversores On-Grid

A tensão produzida pelos módulos fotovoltaicos durante o processo de conversão de energia solar em elétrica é do tipo contínua. Para a conversão dessa corrente contínua em corrente alternada são utilizados inversores.

Os inversores podem alimentar as cargas de maneiras distintas, por isso existem os inversores solares On-Grid e Off-Grid. O inversor solar Off-Grid alimenta as cargas de maneira direta, retira energia das baterias, gera um sinal elétrico e fornece assim

potência aos aparelhos elétricos. O inversor solar On-Grid, no entanto, é idealizado para interagir e sincronizar seu sinal com o sinal da corrente alternada da rede de forma automática. Por estar diretamente ligado à rede, este tipo de inversor é capaz de detectar qualquer anomalia, como elevação ou queda de tensão ou frequência.

Os principais inversores utilizados são os do tipo Grid Tie. Esses inversores são equipados com a função MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), capaz de obter a máxima potência possível dos painéis solares comandados por ele, bem como a função de sincronismo, responsável por realizar a função de sincronismo da usina com a rede elétrica da concessionária.

Outra função importante é a de anti-ilhamento, o qual garante que os inversores se desliguem quando não há detecção de tensão na rede elétrica.

Disjuntor

O disjuntor é um dispositivo de manobra capaz de conduzir, estabelecer e interromper correntes normais e anormais especificadas pelo sistema em determinado ponto operacional. O disjuntor é capaz de:

- Interromper de forma rápida a corrente de curto circuito (ICC);
- Suportar a tensão de circuito em que está instalado com os contatos abertos;
- Suportar os efeitos do arco-elétrico, bem como os efeitos eletromagnéticos, mecânicos do primeiro meio-ciclo da corrente de curto e os efeitos térmicos da corrente estabelecida.

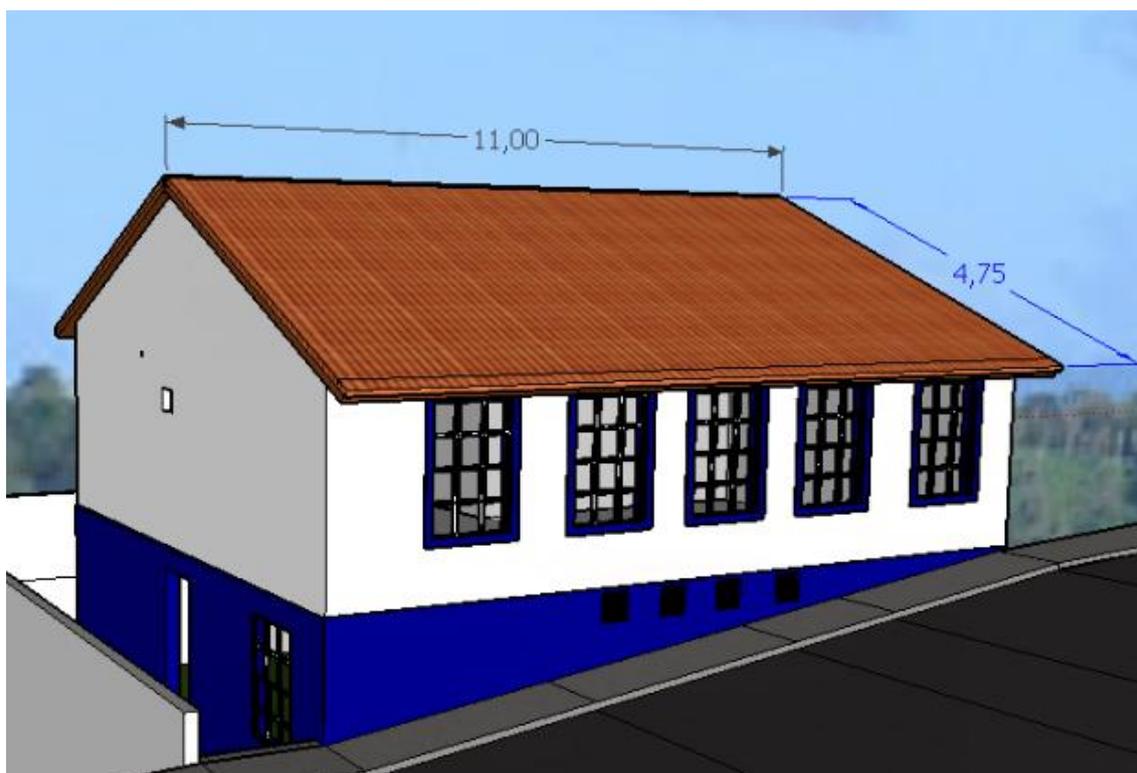
Fusíveis

Os fusíveis protegem os cabos contra sobrecargas e são concebidos para funcionar em corrente contínua. São utilizados nos sistemas fotovoltaicos para proteger as *strings*, que é um equipamento de proteção que isola o sistema fotovoltaico, impedindo acidentes elétricos como curtos-circuitos e surtos elétricos.

3 ESTUDO DE CASO DE UM SISTEMA ON-GRID (CONECTADO Á REDE)

Atualmente, os sistemas solares fotovoltaicos têm sido utilizados em sua maioria de forma integrada à rede elétrica pública. O presente trabalho realizou um estudo de caso de viabilidade econômica da implantação de um sistema solar fotovoltaico On-Grid em uma unidade residencial localizada na cidade de Ouro Preto, no estado de Minas Gerais. Na Figura 18 observamos a planta em 3D do telhado da residência.

Figura 18: Planta da Residência.



Fonte: O Autor (2019).

3.1 Critérios para a escolha do sistema fotovoltaico

Um projetista de sistema fotovoltaico deve ser criterioso ao analisar e calcular um sistema que garanta um desempenho satisfatório do ponto de vista técnico e econômico. É necessário levar em conta a radiação solar, a posição do sistema na Terra, o ângulo da superfície em relação ao Sol e a temperatura média no local. É importante salientar que a orientação dos módulos solares é sempre importante no projeto fotovoltaico, visando encontrar o posicionamento mais adequado e a maior eficiência das células solares. Para instalações localizadas no hemisfério Sul, as faces dos módulos devem ser orientadas para o Norte, enquanto sistemas instalados no hemisfério Norte

devem ser orientados para o Sul. Isto se deve à posição do Sol, formato da Terra e da forma como os raios solares incidem sobre o globo terrestre.

Para o estudo de caso do presente trabalho o critério de orientação dos módulos será desconsiderada, vamos partir do pressuposto de que o teto da residência, onde supostamente será instalado o painel, está voltado para o lado norte.

O projeto de dimensionamento de um sistema fotovoltaico segue algumas etapas que devem ser verificados e seguidos, garantindo a qualidade do sistema, adequação tecnológica e de investimento. Os pontos gerais são:

- Levantamento do consumo médio anual de energia elétrica da unidade residencial;
- Quantidade de energia que se deseja gerar com o sistema fotovoltaico em relação ao consumo médio, parcial ou total;
- Dados solarimétricos disponíveis para o local onde será instalado;
- Espaço físico;
- Eficiência da célula e material usado na célula;
- Localização e orientação dos módulos;
- Dimensionamento do sistema (especificação do módulo, quantidade de módulos, forma de arranjo dos módulos, especificação do inversor e outros componentes);
- Limite de investimento que o consumidor deseja realizar no sistema fotovoltaico.

3.2 Projeto de Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico

Para o projeto e dimensionamento do sistema fotovoltaico foi levado em consideração todas as características apresentadas anteriormente e consideradas as necessidades do cliente. O sistema interligado à rede (On-Grid) foi o sistema fotovoltaico escolhido para a instalação, pois atende ao consumo médio mensal de energia da residência, atua como fonte de energia complementar e permite uma possível renda da energia excedente que não foi utilizada.

O primeiro passo para o dimensionamento é conhecer a demanda energética consumida pela residência ou empreendimento do cliente, que é feito com base na fatura de energia elétrica.

3.2.1 Potência do Gerador

O gerador fotovoltaico é responsável por transformar a luz em eletricidade. Observa-se na Figura 19 a fatura de energia elétrica mensal da residência que será utilizada como base para o estudo. A princípio, é realizada uma análise da demanda energética mensal média consumida pela residência. Assim são obtidos os primeiros dados necessários para o dimensionamento. A partir do histórico do consumo (Figura 19) verifica-se que a média mensal da conta no período de dezembro de 2018 a janeiro de 2019 foi de 508,83 kWh/m.

Figura 19: Conta CEMIG janeiro de 2019.



Cemig Distribuição S.A. CNPJ 06.981.180/0001-16 / Insc. Estadual 062.322136.0087
Av. Barbacena, 1.200 - 17º andar - Ala A1 - CEP 30190-131 - Belo Horizonte - MG

Acesse o Cemig Atende
www.cemigatende.com.br

Fale com a Cemig 116 | Cemig Torpedo 29810
Tarifa Social de Energia Elétrica - TSEE foi criada pela Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002

Referente a	Vencimento	Valor a pagar (R\$)
JAN/2019	17/02/2019	266,60

2ª VIA - CONTA DE ENERGIA ELÉTRICA

Classe Residencial Bifásico	Subclasse Residencial	Modalidade Tarifária Convencional B1	Datas de Leitura Anterior: 06/12 Atual: 07/01 Próxima: 06/02	Data de Emissão 08/01/2019
--	---------------------------------	--	--	--------------------------------------

Informações Técnicas					
Tipo de Medição Energia kWh	Medição AEP891012762	Leitura Anterior 61.279	Leitura Atual 61.532	Constante de Multiplicação 1	Consumo kWh 253

Informações Gerais

Tarifa vigente conforme Res Aneel nº 2.396, de 22/05/2018. O pagamento desta conta não quita débitos anteriores. Para estes, estão sujeitas penalidades legais vigentes (multas) e/ou atualização financeira (juros) baseadas no vencimento das mesmas. É dever do consumidor manter os dados cadastrais sempre atualizados e informar alterações da atividade exercida no local. Faça sua adesão para recebimento da conta de energia por e-mail acessando www.cemig.com.br Leitura realizada conforme calendário de faturamento

DEZ/2018 Band. Verde - JAN/2019 Band. Verde

Valores Faturados

Descrição	Quantidade	Tarifa/Preço (R\$)	Valor (R\$)
Energia Elétrica kWh	253	0,93609826	236,81
Encargos/Cobranças			
Contrib Ilum Publica Municipal			17,75
Multa 2% conta de 11/2018 sobre R\$ 539,16			10,78
Juros mora 1%am: 7 dia(s) sobre R\$539,16			1,26
Tarifas Aplicadas (sem impostos)			
Energia Elétrica kWh		0,58684000	

Histórico de Consumo			
MÊS/ANO	CONSUMO kWh	MÉDIA kWh/Dia	Dias
JAN/19	253	7,90	32
DEZ/18	470	16,20	29
NOV/18	552	16,72	33
OUT/18	524	17,46	30
SET/18	580	19,33	30
AGO/18	547	17,09	32
JUL/18	526	18,13	29
JUN/18	534	17,80	30
MAI/18	502	15,68	32
ABR/18	364	12,13	30
MAR/18	793	27,34	29
FEV/18	214	6,90	31
JAN/18	500	16,12	31

Reservado ao Fisco		
SEM VALOR FISCAL		
Base de cálculo (R\$)	Alíquota (%)	Valor (R\$)
ICMS	-	-
PASEP	-	-
COFINS	-	-

Ouvidoria CEMIG: 0800 728 3838 - Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL - Telefone: 167 - Ligação gratuita de telefones fixos e móveis

	Instalação 3000737404	Vencimento 17/02/2019	Total a pagar R\$266,60
--	---------------------------------	---------------------------------	-----------------------------------

8364000002-9 66600138000-3 92145574733-4 08024028451-5 Janeiro/2019



Fonte: Cedido pelo proprietário da residência estudo.

Pelos cálculos foi encontrada uma média de consumo de 508,83 KWh/mês. Em seguida deve-se subtrair esse valor calculado pela parcela que se refere à “taxa de disponibilidade”. A Resolução 456/2000 da ANEEL estabeleceu valores mínimos para a taxa de disponibilidade. Para as unidades monofásicas a cobrança será o equivalente a 30 kWh, mesmo que não haja consumo. Para as unidades bifásicas a cobrança mínima será equivalente a 50 kWh, e para as unidades trifásicas o valor corresponderá a 100 kWh. A residência utilizada no estudo possui unidade bifásica, desta forma a potência do gerador é calculada por:

$$E_{Gerador} = M_{Consumo} - T_{Disponível} \quad (4)$$

Onde:

- $E_{Gerador}$ = Potência do Gerador (kWh)
- $M_{Consumo}$ = Média do consumo mensal (kWh)
- $T_{Disponível}$ = Taxa de Disponibilidade (kWh)

Como a categoria residencial é bifásica, a potência do gerador será de:

$$E_{Gerador} = 508,83 \text{ Kwh} - 50\text{Kwh} \quad (5)$$

Logo:

$$E_{Gerador} = 458,83 \text{ kWh} \quad (6)$$

3.2.2 Cálculo do Número de Painéis

Depois de calculado o valor da potência do gerador, calcula-se o número de painéis necessários para suprir a demanda energética mensal. Para isto, alguns fatores serão considerados:

- Potência do Gerador ($E_{Gerador}$): Energia que será gerada por mês, calculada no mês anterior.
- Tempo de incidência da radiação solar sobre os painéis (HSP_{max}): média anual do tempo de insolação direta sobre os painéis, no plano de inclinação igual à latitude local, expressa em horas/dia.
- Taxa de desempenho (TD): É um índice bastante útil pois representa a real capacidade de fornecimento de energia elétrica através da conversão

da energia solar. Este índice contabiliza as perdas de eficiência considerando as perdas do sistema, como: o aumento da temperatura do módulo, variação da irradiação, sujidade, perda nas conexões, eficiência do inversor, entre outras. Usualmente para a TD utiliza-se o valor de 75%.

- Potência do Pannel Fotovoltaico (P_{max}): Potência dos painéis fotovoltaicos expressa em Wp.
- Quantidade de painéis ($Q_{painéis}$) = número total de painéis necessários para gerar a quantidade de energia por mês.
- Número de dias por mês: será considerado o valor de 30 dias.
- Será aplicado um fator de conversão de W/kw. O fator é de 0,001.

Considerando os fatores acima pode-se realizar o cálculo da geração mensal pela seguinte equação:

$$E_{Gerador} = P_{max} \times Q_{painéis} \times HSP_{max} \times TD \times 30 \times 0,001 \quad (7)$$

O valor de HSP_{max} , é obtido por meio de dados fornecidos pelo site da CRESESB, que é o centro de referência em energia solar no Brasil. Para a obtenção dos dados foi necessário obter informações das coordenadas geográficas (latitude e longitude) de onde se encontra o projeto. Neste caso as informações do projeto se referem a uma residência localizada na cidade de Ouro Preto, que está aproximadamente na latitude -20.3856° e longitude -43.5035° .

Por meio das coordenadas encontramos os valores de HSP_{obtido} . A Tabela 3 apresenta valores da irradiação solar no plano inclinado próximo à Ouro Preto. Para o nosso estudo de caso o melhor ângulo para se instalar um painel fotovoltaico é quando ele é igual à latitude. O ângulo igual à latitude é de $20^\circ N$, então pela Tabela 3 obtemos um valor de HSP_{obtido} de $5,04 \text{ kWh/m}^2$ (CRESESB, 2019).

Tabela 3: Irradiação solar no plano inclinado próximo a Ouro Preto.

Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média anual [kWh/m ² dia]
Plano Horizontal	0° N	4,82
Ângulo Igual a Latitude	20° N	5,04
Plano Vertical	20° N	5,04
Ângulo igual a Longitude	15° N	5,03

Adaptado de: CRESESB (2019).

(CRESESB, 2019) conceitua o número de Horas de Sol Pleno (HSP), como uma grandeza que reflete o número de horas em que a irradiância solar deve permanecer constante e igual a 1 kWh/m² (1000 w/m²), de forma que a energia resultante seja equivalente à energia disponibilizada pelo Sol no local em questão, acumulado ao longo de um dia.

Desta forma o valor de HSP_{max} é obtido através da fórmula:

$$HSP_{max} = \frac{HSP_{obtido}}{1 \text{ kWh/m}^2} \quad (8)$$

Substituindo temos:

$$HSP_{max} = \frac{5,04 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}}}{1 \text{ kWh/m}^2} = 5,04 \text{ h/dia} \quad (9)$$

Após encontrar o valor de HSP_{max} , falta calcular apenas uma variável para se definir o número de painéis a serem utilizados no sistema. Para a escolha do painel será feito uma comparação, mostrada na Tabela 4, entre dois diferentes painéis:

Tabela 4: Comparação entre Painéis Fotovoltaicos.

Painel	Máxima Potência (Wp)	Custo (R\$)	Custo/Wp
Yingli Solar de 270 Wp	270 Watts	589	2,18
Yingli Solar de 280 Wp	280 Watts	624	2,22

Fonte: O Autor (2019).

O painel com melhor custo benefício é o que apresenta o valor de Custo/Wp menor. Desta forma, o Painel Yingli Solar de 270 Wp exemplificado na Figura 20 é o que melhor nos atende.

Figura 20: Placa Fotovoltaica Yingli YL270P - 29b (270 Wp).



Fonte: NeoSolar (2019).

Tabela 5: Especificações Técnicas do Painel Yingli de 270Wp.

Módulo Fotovoltaico Yingli	
Modelo	Yingli YL270P
Máxima Potência (P _{máx})	270 Watts
Tensão ótima de Operação (V _m)	30,7 Volts
Corrente de Máxima Potência (I _m)	8,80 Amps
Voltagem de Circuito Aberto (V _{oc})	37,9 Volts
Corrente de Curto-Circuito (I _{sc})	9,27
Voltagem Máxima do Sistema	1000 Volts
Eficiência do Painel	16,6%
Dimensões do Painel	(1640 x 990 x 35) mm
Peso do módulo	18,5 kg
Número de Células e Tipo	60, Silício Policristalino

Adaptado de: NeoSolar (2019).

A partir das informações aplicamos a equação:

$$Q_{painéis} = \frac{E_{gerador}}{P_{max} \times HSP_{max} \times TD \times 30 \times 0,001} \quad (10)$$

$$Q_{painéis} = \frac{458,83}{270 \times 5,04 \times 0,75 \times 30 \times 0,001} \quad (11)$$

$$Q_{painéis} = 14,98 \text{ painéis} \quad (12)$$

O resultado encontrado pela equação apresenta número decimal. Neste caso temos a seguinte regra:

- Decimal $\geq 0,5$: arredonda o número inteiro obtido para cima;
- Decimal $< 0,5$: arredonda o número inteiro obtido para baixo.

Como o cálculo apresentou decimal acima de 0,5, o valor foi arredondado para um total de 15 painéis. No entanto com o objetivo de facilitar o dimensionamento optamos pela escolha de 16 painéis. A Figura 21 apresenta a planta da casa com os painéis fotovoltaicos. Na construção da planta foram consideradas as dimensões do telhado e das placas.

Figura 21: Planta da residência com o painel fotovoltaico.



Fonte: O Autor (2019).

3.2.3 Definição do inversor

Para a definição do inversor a ser utilizado é necessário calcular a potência de pico do sistema a ser instalado (P_{sist}) que é expressa em kWp. O cálculo é exemplificado a seguir:

$$P_{sist} = Q_{painéis} \times pfv \times 0,001 \quad (13)$$

$$P_{sist} = 16 \times 270 \times 0,001 \quad (14)$$

$$P_{sist} = 4,32kWp \quad (15)$$

Com o valor da potência do sistema, o próximo passo é encontrar um inversor que atenda à demanda, possuindo uma potência próxima de 4,32 kWp.

A escolha do inversor a ser utilizado deve atender às seguintes regras simultaneamente:

- **Regra 1:** A potência do grupo gerador deve sempre ser igual ou 20% superior à potência máxima nominal do inversor. Com valores de potência de corrente contínua superiores em 20% da potência nominal do inversor, este atinge com facilidade eficiências de 98% (segundo dados experimentais). Para valores menores que 20% de potência de corrente contínua a eficiência do inversor situa-se entre 80% a 90% (Almeida, 2012), logo a potência máxima de um inversor conectado à rede é sempre próxima à 20% superior a potência nominal.

Pela equação:

$$X \times 1,2 \geq 4,32kWp \quad (16)$$

$$X \geq 3,6KWp \quad (17)$$

- **Regra 2:** Critérios de tensão máxima e mínima:
 1. A tensão máxima de entrada do inversor considerada deve ser 10% menor do que a informada no *data sheet* do fabricante, a tensão de operação máxima é equivalente a tensão de circuito aberto do gerador fotovoltaico conectado a ele (Almeida, 2012). Ou seja:

$$V_{max\ op} = V_{max\ inv} \times 0,9 \quad (18)$$

2. A tensão mínima de entrada do inversor considerada deve ser 20% maior do que a informada no *data sheet* do fabricante. Ou seja:

$$V_{min} = V_{min\ inv} \times 1,2 \quad (19)$$

- **Regra 3:** Critério de corrente:

O somatório de correntes máximas oriundas dos arranjos de painéis deve ser sempre menor que a corrente máxima de entrada no inversor. Matematicamente temos que:

$$\sum_1^n I\ strings_n < I\ inversor_{máx} \quad (20)$$

Baseado nas regras e definições acima, será definido um inversor que atenda às três regras simultaneamente. Foram escolhidos dois inversores para serem analisados, as características dos mesmos encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6: Especificações Técnicas do Inversor.

Inversor	Potência Máxima (W)	Tensão Mínima MPPT (V)	Tensão Máxima MPPT (V)	Corrente Máxima (A)
Fronius Primo 3000-SS	3200 W	125 V	450 V	18 A
Fronius Primo 4600-SS	5400 W	125 V	550 V	20 A

Fonte: O Autor (2019).

Aplicando as regras e definições citadas, foi gerada a Tabela 7:

Tabela 7: Especificações Técnicas do Inversor após aplicar as regras e definições.

Inversor	Potência Máxima (W)	Tensão Mínima MPPT (V)	Tensão Máxima MPPT (V)	Corrente Máxima (A)
Fronius Primo 3000-SS	3840 W	150 V	405 V	18 A
Fronius Primo 4600-SS	6480 W	150 V	495	20 A

Fonte: O Autor (2019).

Analisando os dados do fabricante e os dados do projetista, verifica-se que ambos inversores atendem às três regras. Sendo assim, a escolha do inversor se dará em

virtude do inversor que apresentar melhor custo benefício, ou seja, o que apresentar o valor de Custo/Wp menor. A Tabela 8 mostra a comparação dos dois modelos:

Tabela 8: Comparação entre os dois modelos de Inversores.

Modelo do Inversor	Custo (R\$)	Potência Máxima (W)	Custo/Potência
Fronius Primo 3000-SS	6994,00	3840	1,82
Fronius Primo 4600-SS	7999,00	6480	1,23

Fonte: O Autor (2019).

O inversor escolhido é um inversor ideal para sistemas residenciais, oferece flexibilidade para a instalação e manutenção e possui um design inovador com um visor interativo que apresenta em tempo real informações da produção do sistema. As características do inversor estão na Figura 22.

Figura 22: Inversor Solar PHB 4600-SS



Fonte: PHB Solar (2019).

O inversor escolhido possui duas entradas MPPT independentes, sendo assim para encontrar a corrente máxima por MPPT divide-se o valor máximo da corrente pelo número de entrada:

$$I_{mmpt} = \frac{20}{2} \quad (21)$$

$$I_{mmpt} = 10 A \quad (22)$$

Desta forma a corrente máxima por entrada MPPT é de 10 A.

Agora falta calcular o número de módulos mínimo e máximo de composição da string.

- Número mínimo de string em série:

$$Q_{min\ série} = \frac{V_{min\ op}}{V_p\ painel} \quad (23)$$

Onde:

- $Q_{min\ série}$ = número mínimo de módulos em série
- $V_{min\ op}$ = tensão mínima MPPT em Voltz
- $V_p\ painel$ = tensão de operação em Voltz

$$Q_{min\ série} = \frac{125}{30,7} \quad (24)$$

$$Q_{min\ série} = 4,07 \quad (25)$$

Arredondando o valor encontra-se o total de 4 painéis.

- Número máximo de módulos em série:

$$Q_{máx\ série} = \frac{V_{máx\ op}}{V_p\ painel} \quad (26)$$

Onde:

- $Q_{máx\ série}$ = número máximo de módulos em série
- $V_{máx\ op}$ = tensão máxima MPPT em Voltz
- $V_p\ painel$ = tensão de operação em Voltz

$$Q_{máx\ série} = \frac{550}{30,7} \quad (27)$$

$$Q_{\text{máx série}} = 17,9 \quad (28)$$

Arredondando o valor encontra-se um total de 18 painéis.

Ou seja, para atender à tensão mínima de operação do inversor escolhido deve-se trabalhar com uma string de, no mínimo, 4 painéis e no máximo 18 painéis.

Como calculado anteriormente o número de painéis necessários para atender à demanda energética são de 16 painéis. Mesmo sendo possível dimensionar uma string com 18 painéis, o mais adequado para o projeto será recorrer à ligações em diversas portas de entrada MPPT. Para isto, é necessário verificar qual é a corrente máxima de entrada nas portas do inversor e balancear as cargas de forma a não sobrecarregar nenhuma delas. Dispondo os dados na Tabela 9, tem-se as seguintes possibilidades:

Tabela 9: Relação do número de strings e o número de módulos.

Número de módulos por string	Número de strings
4	4
5	3,2
6	2,7
7	2,3
8	2
9	1,8
10	1,6
11	1,5
12	1,3
13	1,2
14	1,1
15	1,1
16	1

Fonte: O Autor (2019).

É interessante neste caso optar por um número de strings de forma a balancear as cargas do sistema nas duas portas MPPT disponíveis. A quantidade de placas em paralelo é o que determina a corrente. Desta forma, conforme calculado anteriormente, a entrada MPPT apresenta 10 A de corrente máxima que pode ser suportado na entrada. Por este motivo não é colocado mais do que 2 placas em paralelo, pois em paralelo a corrente se soma e, com isso, a corrente máxima pode ser ultrapassada na entrada do inversor.

Trabalhar com duas strings de 8 módulos é a melhor opção. Cada string é conectada em uma porta MPPT, obedecendo assim a todos os critérios necessários para o acesso ao inversor. Até o momento temos, então, 2 strings de 8 módulos, portanto:

$$V_{string} = \sum_{n=1}^8 V_n \quad (29)$$

Onde:

- V_n = Tensão de Operação em V.
- N = Numero de módulos.

$$V_{string} = 30,7 \times 8 \quad (30)$$

$$V_{string} = 245,6V \quad (31)$$

Esta tensão está dentro da faixa de segurança estabelecida na planilha do projetista. O último passo agora é verificar se o sistema atende à 3ª regra, que determina o critério de corrente. Utilizando-se a ligação em série, soma-se a tensão e a corrente permanece constante. Então temos que:

$$I_{sistema} = I_{sc\ string} \quad (32)$$

$$I_{sistema} = 10 A \quad (33)$$

Ao comparar a corrente total de curto circuito gerada pela string com a potência máxima de entrada de cada porta MPPT no inversor, verifica-se que a 3ª regra é satisfeita. Portanto temos que as 3 condições básicas foram satisfeitas simultaneamente para o dimensionamento e portanto, o sistema está corretamente dimensionado. Os dados na Tabela 10 resumem a configuração do sistema:

Tabela 10: Dados do Sistema.

Descrição	Valor
-----------	-------

Número total de módulos	16
Número de entradas MPPT	2
Número de strings	2
Número de strings por porta MPPT	1
Número de módulos por string	8
Tensão máxima da string	245,6 V
Corrente curto circuito da string	10 A
Corrente máxima total do sistema	20 A
Potência máxima da string	2,16 kWp
Potência total sistema	4,32 kWp

Fonte: O Autor (2019).

3.2.4 Custo da Instalação

O custo final da instalação do sistema fotovoltaico levou em conta os dados do dimensionamento, como: o número de placas necessárias, o consumo mensal de energia da residência em questão, o tipo de inversor e a potência total do sistema. Os equipamentos a serem utilizados e suas respectivas quantidades se encontram exemplificados na Tabela 11:

Tabela 11: Orçamento total da Instalação do Projeto.

Equipamento	Quantidade	Valor (R\$)
Módulo Fotovoltaico Yingli - 270 Wp	16	589,00
Inversor Fronius Primo 4600-SS	1	7999,00
Estrutura de Fixação	1	1183,50
Kit de Material Elétrico para Instalação	1	837,00
Projeto + mão de obra		7500,00
manutenção dentro dos próximos 25 anos		6000,00

Total = R\$ 24.108,00

Fonte: Solaris Energia (2019).

O consumo energético mensal da residência é de 508,83 kWh/mês. Considerando esse gasto constante, em 25 anos o consumo aproximado será de:

$$M_{consumo} = 508,83 \times 12 \times 25 \quad (34)$$

$$M_{consumo} = 152.649,00 \text{ kWh} \quad (35)$$

O preço da energia é o custo total da instalação dividido pela energia gerada, desta forma:

$$M_{consumo} = \frac{24.108,00}{152.649,00} = 0,157/\text{kWh} \quad (36)$$

Analisando os gastos de energia elétrica no estado de Minas Gerais, que apresenta um valor aproximado de R\$0,85/kWh, podemos concluir que a energia solar é mais barata que a energia elétrica residencial das distribuidoras. Em aproximadamente 5 anos é possível cobrar os gastos com o sistema fotovoltaico.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1 Conclusão

Ao longo do trabalho foram abordadas questões energéticas que se destacam por serem altamente importantes para a sociedade, influenciando o bem-estar da população, o meio ambiente e a economia. Assim, após a discussão da eficiência energética de cada fonte de energia é possível compreender os diversos impactos desta fonte bem como as condições em que seu aproveitamento pode ocorrer.

O estudo de revisão bibliográfica permitiu compreender o caráter finito de alguns recursos naturais, como é o caso do petróleo, gás natural e carvão e os eventuais impactos provocados durante a exploração dos mesmos. Fica evidente a necessidade de substituir essas fontes de energia pelas fontes renováveis.

A energia solar foi a fonte de energia utilizada como estudo de caso. Foram analisados conceitos físicos envolvidos em um sistema fotovoltaico, os métodos de dimensionamento e posteriormente apresentados os resultados.

Concluiu-se ao final dos resultados que a energia fotovoltaica apresenta potencial benéfico para a sociedade. Embora os custos de instalação sejam elevados, a relação custo/benefício dessa fonte é baixa e um dos mais indicados para suprir a demanda energética de uma residência.

4.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como possíveis trabalhos futuros recomenda-se:

- Estudo de caso semelhante ao apresentado, porém sugerindo o aumento desse sistema solar em concomitância com o sistema de aquecimento de água e bordando também as normas de segurança para realizar a instalação dos painéis, uma vez que é de fundamental importância que as informações de segurança estejam presentes neste tipo de atividade;
- Realizar um estudo de caso da implantação de um sistema solar em uma unidade da Universidade Federal de Ouro Preto, como por exemplo no Restaurante Universitário.
- Realizar um estudo de caso com a substituição das placas fotovoltaicas pelas telhas fotovoltaicas. A telha fotovoltaica foi criada com o intuito de

não interferir na estética e na arquitetura de casas antigas. Como Ouro Preto é uma cidade histórica e alguns locais devem atender às regras de preservação de instalação de painéis solares as telhas surgem como uma excelente opção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Planeta COPPE Notícias. (19 de Dezembro de 2006). Acesso em 11 de Junho de 2019, disponível em Geração de Energia Elétrica pelas Ondas do Mar: <http://www.coppe.ufrj.br/pt-br/geracao-de-energia-eletrica-pelas-ondas-do-mar-0>
- BANDEIRA, F. D. P. M. O aproveitamento da energia solar - situação e perspectivas. Biblioteca Digital da Câmara dos Deputados. Brasília, p. 15. 2012.
- ANEEL. (2008). Acesso em 01 de agosto de 2018, disponível em ANEEL: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>
- Agência Brasil. (06 de maio de 2014). Acesso em 24 de janeiro de 2019, disponível em Agência Brasil: <https://pedesenvolvimento.com/2014/05/06/escassez-de-chuva-fez-consumo-de-gas-natural-bater-recorde-de-23-anos/>
- G1. (13 de maio de 2015). (G1) Acesso em 24 de 01 de 2019, disponível em G1: <http://g1.globo.com/rj/norte-fluminense/noticia/2015/05/producao-de-petroleo-bate-novo-recorde-em-campos-rj-e-santos-sp.html>
- CETESB. (07 de abril de 2017). Acesso em 25 de janeiro de 2019, disponível em CETESB: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/2017/04/07/energia-proveniente-da-biomassa-pode-abastecer-quase-13-do-consumo-no-brasil/>
- Época. (17 de dezembro de 2017). Acesso em 24 de janeiro de 2019, disponível em Época: <https://epocanegocios.globo.com/Empresa/noticia/2017/12/epoca-negocios-angra-1-e-2-nao-tem-como-pagar-combustivel.html>
- Geração Smart Grid. (05 de setembro de 2017). Acesso em 29 de janeiro de 2019, disponível em Geração Smart Grid: <http://geracaosmartgrid.com.br/usina-de-energia-fotovoltaica-da-america-latina-e-instalada-no-piaui/>
- Piensa en Geotermia. (10 de setembro de 2017). Acesso em 24 de janeiro de 2019, disponível em Piensa en Geotermia: <http://www.piensageotermia.com/cega-difunde-en-mural-de-metro-la-energia-geotermica-en-chile/>
- Portal Biossistemas. (01 de maio de 2018). Acesso em 24 de janeiro de 2019, disponível em Portal Biossistemas: <http://www.usp.br/portalbiossistemas/?p=7953>
- Preview Banco de Imagens. (15 de janeiro de 2018). Acesso em 24 de janeiro de 2019, disponível em Preview Banco de Imagens: <https://www.agenciapreview.com/fotos-do-parque-eolico-de-osorio/>
- ANP. (2019). Acesso em 4 de agosto de 2018, disponível em ANP: <http://www.anp.gov.br/gas-natural>
- Coordenadas GPS. (2019). Acesso em 08 de março de 2019, disponível em Coordenadas GPS: <https://www.coordenadas-gps.com/>
- CRESESB. (18 de 02 de 2019). Fonte: Centro de Referência para Energia Eólica e Solar Sérgio Brito: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>
- DB.City. (2019). Acesso em 18 de 02 de 2019, disponível em DB.City: <https://pt.db-city.com/Brasil--Minas-Gerais--Ouro-Preto>
- EPE. (2019). Acesso em 16 de junho de 2019, disponível em Empresa de Pesquisa Energética : <http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>

- NeoSolar. (2019). Acesso em 26 de fevereiro de 2019, disponível em NeoSolar: <https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-yingli-yl270p-29b-270wp.html>
- O Autor. (2019). Autor.
- PHB Solar. (2019). Acesso em 26 de fevereiro de 2019, disponível em PHB Solar: http://www.phb.com.br/produtos/solar/inversores/4600W_br.aspx
- Solaris Energia. (20 de 05 de 2019). Acesso em 20 de 05 de 2019, disponível em Solaris Energia: <http://www.solarisenergia.eng.br/>
- Suntag. (2019). Acesso em 14 de março de 2019, disponível em Suntag Energy do Brasil: <http://suntag.com.br/portfolio/energia-solar-fotovoltaica/>
- Almeida, M. P. (2012). Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. São Paulo.
- Arboit, N. K., Decezaro, S. T., Amaral, G. M., T. L., Mayer, V. M., & Kemerich, P. D. (2013). Potencialidade de utilização da energia geotérmica no brasil. Revista USP, p. 155 - 168.
- Barquete, A. C., & Silva, N. P. (2013). O avanço e as melhorias com o uso de energias renováveis. São Carlos.
- Borba, R. F. (2001). Balanço Mineral Brasileiro.
- Braga, R. P. (2008). Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos e Aplicações. Rio de Janeiro.
- Cemig. (2019). *Cemig*. Fonte: Cemig: <http://www.cemig.com.br/>
- Costa, R. C., & Prates, C. P. (2005). O papel das Fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e barreiras à sua penetração no mercado. Rio de Janeiro.
- Energia, M. d. (2017). Resenha Energética Brasileira. Resenha Energética Brasileira.
- Farias, L. M., & Sellitto, M. A. (2011). Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras. Fundação Liberato.
- Freitas, G. S., & Dathein, R. (2013). As energias renováveis no brasil: uma avaliação acerca das implicações para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental.
- Geração de Energia Elétrica pelas Ondas do Mar. (s.d.). Acesso em 11 de 06 de 2019, disponível em Planeta COPPE Notícias: <http://www.coppe.ufrj.br/pt-br/geracao-de-energia-eletrica-pelas-ondas-do-mar-0>
- Goldenberg, J., & Moreira, J. R. (2005). Política Energética no Brasil. In: Estudos Avançados 19(55) (pp. 215-228).
- Gomes, A. C. (2006). Estudo da utilização do gás natural como fonte geradora de energia no Brasil. Florianópolis.
- IRENA. (2017). Renewable energy and jobs. Annual Review 2017 .
- Jannuzzi, G. d., & Swisher, J. N. (1997). Planejamento Integrado de Recursos Energéticos: meio ambiente, conservação de energia e fontes renováveis. Campinas.

- Júnior, Ã. S., & Filho, G. L. (2007). *Série Energias Renováveis: Energias Renováveis*. Itajubá.
- Kaehler, J. W. (2000). *Comentários Relativos à Proposta de Modificação do Manual para elaboração do programa anual de combate ao desperdício de energia elétrica das concessionárias*. Aneel.
- Magalhães, M. V. (2009). *Estudo de utilização da energia eólica como fonte geradora de energia no Brasil*. Florianópolis.
- Marques, L. A., Fernandes, I. C., & Costa, J. A. (s.d.). *Energia solar fotovoltaica em unidades residenciais: estudo de caso*. IFRN EDU, p. 11.
- Moreira, C. E., & Cardoso, A. M. (2010). *Fontes alternativas de energia renovável que possibilitam a prevenção do meio ambiente*. *Revista de Divulgação do Projeto Universidade Petrobras/IF*, 1, 397-402.
- Nascimento, r. S., & Alves, G. M. (2016). *Fontes Alternativas e Renováveis de energia no Brasil: Métodos e Benefícios Ambientais*.
- Padrão, D. d. (2011). *Biodessulfurização de Carvão Mineral*.
- Simoni, C. A. (2006). *O uso de energia renovável sustentável na matriz energética brasileira: obstáculos para o planejamento e ampliação de políticas sustentáveis*. Curitiba.
- Tolmasquim, M. T., Guerreiro, A., & Gorini, R. (Novebro de 2007). *Matriz Energética Brasileira: uma prospectiva*. *Matriz Energética Brasileira: uma prospectiva*.
- Vallêra, A. M., & Brito, M. C. (s.d.). *Meio Século de História Fotovoltaica*. *Gazeta de Física*.
- Viana, M. B., Tavares, W. M., & Lima, P. C. (2015). *Sustentabilidade e as principais fontes de energia*. Brasília.

Certifico que Larissa Pena de Oliveira, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado "Estudo de viabilidade da implantação de um sistema de energia solar fotovoltaica em uma residência", efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.



Diógenes Viegas Mendes Ferreira

Orientador