

THAÍS CAROLINE GAZOLA

AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO *ON GRID* INSTALADO NA UNIOESTE, CAMPUS
DE CASCAVEL – PR

CASCAVEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO – 2020

THAÍS CAROLINE GAZOLA

AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO *ON GRID* INSTALADO NA UNIOESTE, CAMPUS
DE CASCAVEL – PR

Trabalho Apresentado à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para a obtenção do título de Mestre.

ORIENTADOR: Carlos Eduardo Camargo Nogueira.

COORIENTADOR: Jair Antonio Cruz Siqueira.

CASCAVEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO – 2020

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste

Gazola, Thaís Caroline

Avaliação técnico-econômica de um sistema fotovoltaico on grid instalado na unioeste, campus de Cascavel - PR / Thaís Caroline Gazola; orientador(a), Carlos Eduardo Camargo Nogueira; coorientador(a), Jair Antonio Cruz Siqueira, 2020.

81 f.

Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2020.

1. Sistema solar fotovoltaico. 2. Produção de energia. 3. Análise econômica. I. Nogueira, Carlos Eduardo Camargo. II. Siqueira, Jair Antonio Cruz. III. Título.

THAÍS CAROLINE GAZOLA

**Avaliação Técnico-econômica de um Sistema Fotovoltaico On Grid instalado na
Unioeste, Campus de Cascavel - PR**

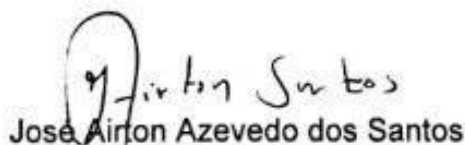
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestra em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Fontes Renováveis e Racionalização de Energia Na Agroindústria e Agricultura, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



Orientador(a) - Carlos Eduardo Camargo Nogueira
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus de Medianeira (UTFPR)

Cascavel, 27 de fevereiro de 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ser essencial em minha vida, que me iluminou durante esta caminhada e esteve sempre presente nas horas de maior dificuldade.

À minha família, por sempre acreditar em mim, com muito carinho e apoio, e por não medirem esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deu em alguns momentos a esperança para não desistir. Pai, sua presença no meu coração significou segurança e certeza de que nunca estivesse sozinha nessa caminhada e tenho certeza que está orgulhoso de mim aí no céu. A minha irmã que mesmo de longe sempre me ajudou no que foi necessário. Ao meu noivo, obrigada pelo carinho, paciência, incentivo e por sua capacidade de me trazer paz em meio à correria do mestrado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira, pela missão de me orientar ao longo destes últimos dois anos, dando suporte e revisando cada detalhe no desenvolvimento deste documento.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira, por ter compartilhado tantos conhecimentos, sanado tantas dúvidas, contribuindo para o meu trabalho.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura pelo apoio e infraestrutura para realização do trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo fomento de bolsa para a realização deste trabalho.

Por fim, e não menos importante, a todos os meus amigos do mestrado, pelas alegrias, tristezas e dificuldades compartilhadas ao longo desses dois anos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema Interligado Nacional – horizonte para 2017	5
Figura 2: Oferta interna de eletricidade no Brasil em 2018.....	6
Figura 3: Origem da energia produzida pelo Sol	9
Figura 4: Representação das componentes da radiação solar.....	10
Figura 5: Mapa brasileiro de radiação média solar anual.	11
Figura 6: Capacidade instalada de geração de energia elétrica do Brasil	14
Figura 7: Sistema fotovoltaico conectado à rede (SFVCR) ou <i>On Grid</i>	15
Figura 8: Sistema fotovoltaico isolado (SFVI) ou <i>Off Grid</i>	17
Figura 9: Célula de silício monocristalino	19
Figura 10: Célula de silício policristalino.....	20
Figura 11: Células de filmes finos.	21
Figura 12: Inversor	22
Figura 13: Bateria estacionária para SFVI.....	24
Figura 14: Controlador de carga.....	25
Figura 15: Projeto CASA - Unioeste	28
Figura 16: Sistema fotovoltaico instalado na Unioeste	29
Figura 17: Diagrama multifilar do sistema	29
Figura 18: Painel solar fotovoltaico Risen	30
Figura 19: Inversor Sólis.....	31
Figura 20: Medidor bidirecional Ares 7023	32
Figura 21: Dispositivo de proteção contra surtos – DPS	34
Figura 22: Disjuntor eletromagnético.....	35
Figura 23: <i>Datalogger</i> CR 1000.....	39
Figura 24: Piranômetro CMP3	40
Figura 25: Analisador de grandezas elétricas RE7000.....	41
Figura 26: Fatura de energia elétrica.....	42
Figura 27: Curva de carga diária do sistema fotovoltaico	43
Figura 28: Frequência de ocorrência da radiação (%) x Incidência de radiação solar diária (W/m^2)	45

Figura 29: Radiação solar (kW) x Horas do dia (h).....	46
Figura 30: Potência ativa CA (RE7000, kW) e Potência ativa CA (site, em kW) x Horas do dia.	47
Figura 31: Radiação solar (kWh/dia), Energia CC (kWh/dia) e Energia aparente (kVAh/dia) x Dias do mês de setembro	48
Figura 32: Radiação solar (kWh/dia), Energia CC (kWh/dia) e Energia aparente (kVAh/dia) x Dias do mês de outubro	48
Figura 33: Radiação solar (kWh/dia), Energia CC (kWh/dia) e Energia aparente (kVAh/dia) x Dias do mês de novembro	49
Figura 34: Energia consumida (kWh/mês) e Energia injetada (kWh/mês) x Meses do ano	49
Figura 35: Energia CC1 e Energia CC2 x Dias do mês de setembro	50
Figura 36: Energia CC1 e Energia CC2 x Dias do mês de outubro	50
Figura 37: Energia CC1 e Energia CC2 x Dias do mês de novembro	51
Figura 38: Energia CA (kWh/dia) do RE7000 e Energia CA (kWh/dia) do Site x Dias do mês de setembro	51
Figura 39: Energia CA (kWh/dia) RE7000 e Energia CA (kWh/dia) Site x Dias do mês de outubro	52
Figura 40: Energia CA (kWh/dia) RE7000 e Energia CA (kWh/dia) Site x Dias do mês de novembro	52
Figura 41: Energia gerada efetiva (kWh) e energia gerada simulada (kWh) x Meses do ano	56
Figura 42: Energia efetiva gerada pelo sistema (kWh) e consumo de energia total do projeto CASA (kWh) x Meses do ano	56
Figura 43: Eficiências médias diárias dos módulos fotovoltaicos x Dias do mês	57
Figura 44: Eficiências médias diárias do inversor x Dias do mês.	58
Figura 45: Eficiências médias diárias totais do sistema fotovoltaico x Dias do mês	58
Figura 46: Retorno do investimento.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificações Técnicas do Módulo Solar Risen	31
Tabela 2: Especificações Técnicas Inversor Sólis.....	32
Tabela 3: Especificações Técnicas Medidor Bidirecional ARES 7023	33
Tabela 4: Especificações Técnicas Dispositivo de Proteção Contra Surtos – DPS...	34
Tabela 5: Especificações Técnicas do Disjuntor Eletromagnético	35
Tabela 6: Valores Médios Recomendados de Declinação Solar.....	36
Tabela 7: Especificações Técnicas <i>Datalogger</i> CR 1000.....	39
Tabela 8: Especificações Técnicas Piranômetro CMP3	40
Tabela 9: Especificações Técnicas Analisador de Grandezas Elétricas RE7000.....	41
Tabela 10: Resumo do Sistema Fotovoltaico	53
Tabela 11: Resultados da Avaliação Econômica	60

GAZOLA, Thaís Caroline. Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE. Fevereiro – 2020. **Avaliação Técnico-econômica de um Sistema Fotovoltaico On Grid Instalado na Unioeste, Campus de Cascavel – PR.** Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo realizar a avaliação técnica e econômica de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede instalado na Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, campus de Cascavel – PR. O sistema foi construído com o objetivo de atender à demanda de energia elétrica do Centro de Análise de Sistemas Alternativos de Energia (Projeto CASA), e é composto por dez módulos fotovoltaicos de 330 Wp cada (duas *strings* com cinco módulos em série), e um inversor de tensão de 4 kWp. Para a avaliação técnica do sistema, foram realizadas coletas de dados de energia de quatro formas distintas: a primeira utilizando os dados que são fornecidos pelo medidor bidirecional instalado no sistema; a segunda por meio das faturas de energia elétrica fornecidas pela concessionária de energia local (COPEL); a terceira a partir do site Solar Man, no qual ficam armazenados os dados fornecidos pelo inversor; e a quarta utilizando os dados registrados pelo analisador de grandezas elétricas da EMBRASUL RE7000. Quanto à avaliação econômica, foi realizada uma análise de viabilidade do sistema, utilizando o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Payback Descontado (PBD) como critérios de decisão. Os resultados obtidos no trabalho apresentam que os valores de geração de energia elétrica coletados pelo site e RE7000 estão próximos, porém, com os valores do site ligeiramente maiores. A eficiência total do sistema foi de 13,32%. O retorno do investimento ocorre em 12 anos, a TIR é de 14,1% e o VPL é de R\$25.564,07, valores que tornam o investimento viável.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

PALAVRAS-CHAVE: Sistema solar fotovoltaico, produção de energia, análise econômica.

GAZOLA, Thaís Caroline. Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE. February – 2020. **Technical-economic Evaluation of an On Grid Photovoltaic System Installed at Unioeste, Campus of Cascavel – PR.** Adviser: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira.

ABSTRACT

This work aimed to carry out the technical and economic evaluation of a photovoltaic solar system connected to the grid installed at the State University of Western Paraná - UNIOESTE, campus of Cascavel - PR. The system was built with the objective of meeting the electricity demand of the Alternative Energy Systems Analysis Center (CASA Project), and consists of ten photovoltaic modules of 330 Wp each (two strings with five modules in series), and a 4 kWp voltage inverter. For the technical evaluation of the system, energy data collections were carried out in four different ways: the first one was using the data provided by the bidirectional meter installed in the system; the second one was using electricity bills provided by the local energy utility (COPEL); the third one was from the Solar Man website, where the data provided by the inverter is stored; and the fourth one was using data recorded by the electrical quantity analyzer (RE7000-EMBRASUL). As for the economic evaluation, a feasibility analysis of the system was carried out using the Net Present Value (NPV), the Internal Rate of Return (IRR) and the Discounted Payback (PBD) as decision criteria. The results obtained in the work show that the values of electricity generation collected by the website and by the RE7000 are close, with the values of the website slightly higher. The total efficiency of the system was 13.32%. The return on investment occurs in 12 years, the IRR was 14.1% and the NPV was R\$ 25,564.07. These values show that the investment is viable.

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001.

KEYWORDS: Photovoltaic solar system, energy production, economic analysis.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.1.1 Objetivo Geral	2
1.1.2 Objetivos Específicos	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 A ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL	4
2.1.1 Características da energia elétrica no Brasil	5
2.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	6
2.2.1 Resoluções Normativas 482/2012 e 687/2015	7
2.3 ENERGIA SOLAR	8
2.3.1 Características da energia solar	9
2.4 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	12
2.4.1 Energia solar fotovoltaica no Brasil	13
2.4.2 Sistemas Fotovoltaicos	14
2.4.2.1 Sistema fotovoltaico conectado à rede (SFVCR) ou <i>On Grid</i>	15
2.4.2.2 Sistema fotovoltaico isolado (SFVI) ou <i>Off Grid</i>	16
2.5 COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO	17
2.5.1 Painéis Fotovoltaicos	18
2.5.1.1 Células de Silício Monocristalino	18
2.5.1.2 Células de Silício Policristalino	19
2.5.1.3 Células de Filmes Finos	20
2.5.2 Inversores	21
2.5.3 Baterias	23
2.5.4 Controlador de Carga	24

2.6 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	25
2.6.1 Valor Presente Líquido (VPL)	26
2.6.2 Taxa Interna de Retorno (TIR)	27
2.6.3 PayBack Descontado.....	27
3. MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1 CARACTERIZAÇÕES DO LOCAL.....	28
3.2 EQUIPAMENTOS QUE COMPÕEM O SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	30
3.3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA MEDIÇÃO.....	35
3.4 METODOLOGIA	41
3.4.1 Avaliação dos Dados de Energia.....	41
3.4.2 Eficiência Energética do Sistema.....	43
3.4.3 Avaliação Econômica.....	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1 AVALIAÇÃO DOS DADOS DE ENERGIA.	46
4.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.	57
4.3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA.....	59
5. CONCLUSÕES.....	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a indústria global de energia elétrica tem enfrentado grandes mudanças. Do lado da oferta, embora os combustíveis fósseis ainda sejam as fontes mais relevantes, a transição para as energias renováveis tem cada vez mais chamado a atenção de pesquisadores, políticos, empresas e público em geral (CORIA; PENIZZOTTO; PRINGLES, 2019; COPIELLO; GRILLENZONI, 2017).

A preocupação com o meio ambiente e a sustentabilidade, combinada com novas tecnologias, mudanças de hábitos e técnicas que possibilitem um uso mais eficiente da energia, são necessidades atuais. O melhor uso da energia, assim como alternativas que diminuam seu consumo, tornam-se particularmente importantes. Neste contexto, e aliados aos novos sistemas de conversão de energias renováveis distribuídas, o livre acesso às redes de energia e a utilização local de energias renováveis para abastecer os consumidores vão sendo cada vez mais incentivados (SOUSA; FERNANDES; MARTINS, 2018).

O mundo tem visto um crescimento acentuado em geração de energia fotovoltaica (PV), que é atualmente bastante significativa em muitas regiões, e espera-se que continue seu crescimento exponencial a fim de desempenhar um papel importante para cumprir as metas de energia renovável impostas por autoridades locais, governos nacionais e acordos internacionais para atender às reduções de dióxido de carbono (CO₂) (OBEIDAT, 2018).

Em comparação com fontes convencionais de geração de energia, como as que utilizam combustíveis fósseis, a tecnologia fotovoltaica não traz os sérios problemas ambientais que essas fontes causam durante a geração, como a mudança climática, o aquecimento global, a poluição do ar, entre outros. Outra vantagem em relação aos combustíveis fósseis é que a energia solar não precisa ser extraída, refinada ou transportada para a geração. No entanto, durante o seu ciclo de vida, consome uma grande quantidade de energia e emite alguns gases de efeito estufa em algumas etapas (processo de fabricação de células solares, montagem de módulos fotovoltaicos e transporte de material, entre outros) (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017).

Painéis fotovoltaicos e energia térmica solar concentrada são as tecnologias mais bem estabelecidas usadas para converter energia solar em eletricidade. A utilização de células fotovoltaicas (PV) para converter luz em eletricidade é uma

forma limpa e sustentável de produção de energia. Hoje em dia, a tecnologia solar dominante usa silício cristalino (policristalino e monocristalino) como material semicondutor. Contudo, a tecnologia solar usando materiais avançados, como silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre índio e gálio $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ ou telureto de cádmio (CdTe), é cada vez mais atraente em razão da maior eficiência em diferentes condições climáticas e custos de produção mais baixos (MUSSARD; AMARAM, 2018).

A captura de energia solar por meio de painéis fotovoltaicos, a fim de produzir eletricidade, é considerada um dos mercados mais promissores no campo da energia renovável. Por conta de sua perspectiva de crescimento rápido e altos níveis de investimento envolvidos, o mercado fotovoltaico está sendo o mais disputado em todo o mundo, especialmente na Europa, China e nos Estados Unidos. No Brasil, os avanços começam a ser significativos, especialmente após a inserção da energia solar na matriz energética do país, o início dos leilões de energia solar - em um momento que o setor de energia enfrenta dificuldades devido à redução de energia hidrelétrica que, atualmente, é a principal matriz energética do Brasil - e o aumento nos preços da eletricidade (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017).

Neste contexto, pode-se afirmar que a energia solar fotovoltaica vem a ser uma das formas de energias renováveis que mais se destacarão nos próximos anos e, com isso, existe a necessidade de saber mais informações a respeito dela. Sendo assim, este trabalho apresenta um estudo sobre um sistema solar fotovoltaico instalado na Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste campus de Cascavel – PR.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar técnica e economicamente um sistema fotovoltaico instalado na Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste, campus da cidade de Cascavel – PR.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar os dados de energia gerada pelo sistema fotovoltaico;
- Avaliar a energia injetada na rede e consumida pela edificação;
- Avaliar a eficiência energética do sistema fotovoltaico;
- Avaliar os aspectos econômicos do sistema fotovoltaico.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A Energia Elétrica no Brasil

O sistema de geração e transmissão de energia elétrica do Brasil é constituído por um sistema conhecido como hidro-termo-eólico de grande porte, no qual há predominância de usinas hidrelétricas (Operador Nacional do Sistema - ONS, 2019).

A composição do setor elétrico de um país está profundamente associada com as características geográficas e com a disponibilidade dos recursos naturais do território. No caso do Brasil, as principais características são: centros de consumo afastados, rios e bacias com grande potencial de geração de energia elétrica e principais pontos de geração distantes dos centros de consumo. Essas particularidades explicam a necessidade e a existência do Sistema Interligado Nacional (SIN) (COSTA, 2018).

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é composto de quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte. A interconexão desses subsistemas, por meio da malha de transmissão, proporciona a transferência de energia entre eles, permitindo a exploração dos regimes hidrológicos das bacias. Essa integração de recursos de geração e transmissão permite um atendimento de confiabilidade e segurança ao mercado (ONS, 2019).

Existem também as localidades que não são atendidas pelo SIN, conhecidos como sistemas isolados, atualmente existem 237 locais. Dentre elas, a maior parte se encontra na região Norte do país, nos estados de Rondônia, Acre, Amazonas, Roraima, Amapá e Pará. A Ilha de Fernando de Noronha em Pernambuco, e algumas localidades de Mato Grosso. O consumo nessas localidades é baixo e representa menos de 1% da carga total do país. A demanda por energia nessas regiões é suprida, principalmente, por térmicas a óleo diesel (ONS, 2019). A figura 1 apresenta o mapa do SIN para o horizonte de 2017.

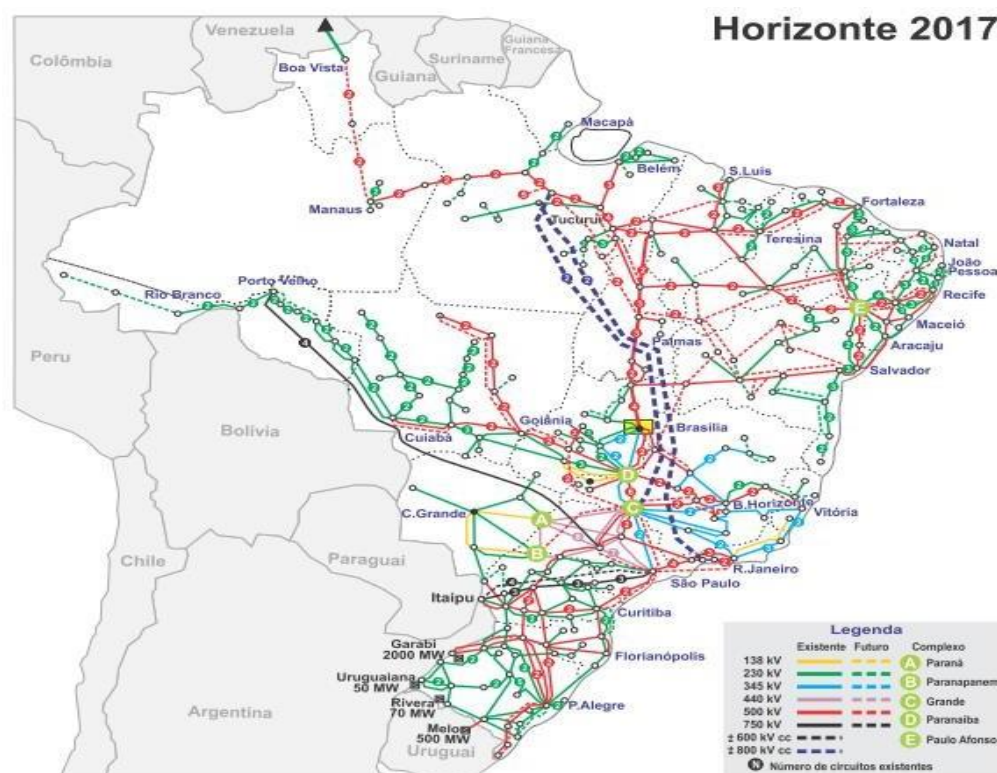


Figura 1 – Sistema Interligado Nacional – horizonte para 2017.

Fonte: ONS, 2019.

2.1.1 Características da Energia Elétrica no Brasil

O Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hídrica que responde por 66,6% da oferta interna. As fontes renováveis representam 83,3% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável. A Figura 2 apresenta a estrutura da oferta interna de eletricidade no Brasil em 2018 (Balanço Energético Nacional - BEN, 2019).

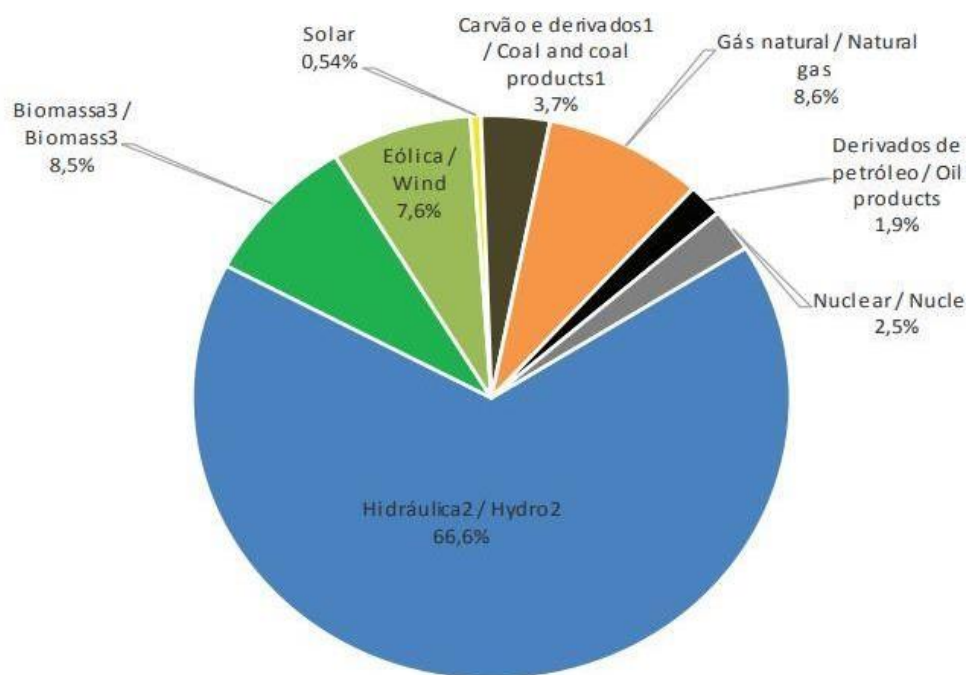


Figura 2 – Oferta interna de eletricidade no Brasil em 2018.

Fonte: BEN, 2019.

Essa predominância das energias renováveis na matriz elétrica nacional contribui para que o Brasil tenha uma das taxas mais baixas de emissão de gases de efeito estufa (GEE) por habitante se comparado com a maioria dos outros países (Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2019).

2.2 Geração Distribuída

Nas últimas décadas, com o processo de reestruturação do sistema de energia, fontes de energia centralizadas são empregadas com as descentralizadas. Este fenômeno resultou em um novo conceito quanto aos sistemas de energia elétrica, particularmente em sistemas de distribuição, conhecida como Geração Distribuída (GD). Por um lado, a utilização de GD é importante para geração segura e redução de perdas de energia. Por outro, o uso generalizado de tais tecnologias introduz novos desafios para os sistemas de energia, como sua localização ideal, dispositivos de proteção, regulação de tensão e problemas com a qualidade da energia (RAZAVI et al., 2019).

Segundo o Instituto Nacional de Eficiência Energética – INEE (2019), GD é uma expressão utilizada para caracterizar a geração de energia elétrica junto ou próximo dos consumidores independente da potência, tecnologia e fonte de energia.

Entre as vantagens da GD está o fato de que ela economiza investimentos em transmissão e distribuição, tem baixo impacto ambiental, reduz o carregamento das redes, minimiza as perdas no sistema e, conseqüentemente, aumenta a diversificação da matriz energética (Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2019).

Diferentes tipos de GD renováveis e não renováveis estão disponíveis, incluindo turbinas eólicas, solar térmica, solar fotovoltaica, energia hidráulica, geradores a diesel, células de combustível, geotérmica e microturbinas. Diferentes questões como o aumento da demanda de carga, necessidades de armazenamento de energia e preocupações com a mudança climática motivaram o aumento das instalações de GD, o que pode resultar na mitigação de emissão de gases de efeito estufa (RAZAVI et al., 2019).

Em 2018, após um crescimento incentivado por ações regulatórias, a micro e minigeração distribuída atingiu 828 GWh, com uma potência instalada de 670 MW, com destaque para a fonte solar fotovoltaica, com 526 GWh e 562 MW de geração e potência instalada respectivamente (BEN, 2019).

2.2.1 Resoluções Normativas 482/2012 e 687/2015

A Resolução Normativa (REN) 482/2012 da ANEEL, publicada em 17 de abril de 2012, foi um marco importante da legislação brasileira, que vem estabelecendo as condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica por meio do modelo de compensação de energia elétrica, também chamado de *net metering*, permitindo aos consumidores de energia elétrica gerar parte ou toda a energia que consomem utilizando fontes renováveis de energia (TIEPOLO, 2015).

Em 24 de novembro de 2015, foi publicada a REN 687/2015 da ANEEL que altera a REN 482/2012. Nela, a energia remanescente é cedida à distribuidora local e, posteriormente, compensada com o consumo de energia elétrica dessa mesma unidade consumidora, ou de outra unidade consumidora de mesma titularidade. O saldo positivo em um mês poderá ser utilizado para abater o consumo na fatura de

um mês subsequente, sendo que esses créditos de energia gerados passam a ser válidos por 60 meses, não mais 36 meses como anteriormente proposto pela REN 482/2012 (ANEEL, 2015).

A REN 687/2015 da ANEEL também estabelece, para qualquer fonte renovável de geração, que a microgeração é caracterizada com potência instalada abaixo de 75 kW, a potência instalada acima de 75 kW até 3 MW (para fonte hídrica) e 5 MW para as demais fontes (solar, eólica, biomassa e cogeração qualificada) é minigeração. Com relação aos procedimentos necessários para conectar essas GDs, a rede da distribuidora, a ANEEL, estabeleceu novas regras para que o processo se tornasse mais simples, com o prazo dado às concessionárias para implantar o acesso sendo reduzido de 82 para 34 dias e que as concessionárias devem disponibilizar o serviço de solicitação do acesso via Internet (ANEEL, 2015; TIEPOLO et al., 2017).

Essas mudanças realizadas na REN 482/2012 foram essenciais para incentivar ainda mais a instalação de sistemas de geração distribuída, ampliando as possibilidades de geração e facilitando processo de conexão desses sistemas à rede de energia das concessionárias (RIOS; RIOS, 2017).

2.3 Energia Solar

Uma das alternativas energéticas mais propícias para se encarar os desafios atuais é o aproveitamento da energia gerada pelo Sol, inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto como fonte de calor quanto de luz. O Sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia. Em outras palavras, as fontes de energia são derivadas da energia do Sol (CRESESB, 2006).

É a partir da energia do sol que se dá a evaporação, responsável pelo ciclo das águas, possibilitando o represamento de rios e, conseqüentemente, a geração hidroelétrica. A radiação solar também induz à circulação atmosférica em larga escala, causando os ventos, que podem ser aproveitados por meio da energia eólica. Todos os seres vivos necessitam da radiação solar para o seu desenvolvimento, de forma que a energia da biomassa (lenha, carvão vegetal, álcool, óleos vegetais, resíduos etc.) também depende dela. Os combustíveis fósseis, tais como petróleo, carvão e gás natural, foram gerados no interior da crosta terrestre a partir de resíduos de plantas e animais que, originalmente, necessitaram

da radiação solar para o seu desenvolvimento (GALDINO et al, 2019; CEPEL – CRESESB, 2014).

Assim, a energia solar é responsável de forma direta ou indireta pela maioria das fontes de energia como a hidráulica, a biomassa, a eólica, de combustíveis fósseis e a energia dos oceanos. Além disso, a radiação solar pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica para aquecimento de fluidos e ambientes e para geração de potência mecânica ou elétrica. Pode ainda ser convertida diretamente em energia elétrica por meio de efeitos sobre determinados materiais, entre os quais se destacam o termoelétrico e o fotovoltaico (ANEEL, 2002).

A energia solar que atinge a superfície terrestre se origina no núcleo solar, visto que, por meio de fusões nucleares, dois núcleos pesados de hidrogênio se fundem formando um núcleo de hélio, liberando grande quantidade de energia, a principal reação que acontece no núcleo solar envolve os isótopos de hidrogênio, deutério e trítio, como apresentado na figura 3. Mesmo com o sol liberando energia na ordem de 38×10^{25} J/s, o topo da atmosfera terrestre recebe em média 1.353 W/m^2 , valor definido como Constante Solar. Já na superfície terrestre, ao nível do mar, o valor médio de radiação solar é de apenas 1.000 W/m^2 (DEBASTIANI, 2013).

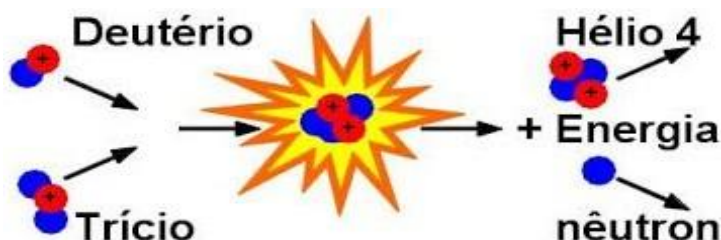


Figura 3 – Origem da energia produzida pelo Sol.

Fonte: DEBASTIANI, 2013.

2.3.1 Características da Energia Solar

A conversão direta da energia solar em energia elétrica ocorre pelos efeitos da radiação (calor e luz) sobre determinados materiais, particularmente os semicondutores. Entre esses, destacam-se os efeitos termoelétrico e fotovoltaico. O primeiro caracteriza-se pelo surgimento de uma diferença de potencial provocada

pela junção de dois metais em condições específicas. No segundo, os fótons contidos na luz solar são convertidos em energia elétrica, por meio do uso de células solares (ANEEL, 2002).

Acima da atmosfera a intensidade da radiação solar que chega à Terra é em torno de $1,3 \text{ kW/m}^2$, porém a quantidade de radiação que chega ao chão, no plano horizontal depende da localização geográfica, das condições atmosféricas, assim como do período do ano (PAZUCH, 2017).

Assim, a radiação solar que entra na atmosfera da Terra é constituída por duas componentes: a radiação direta, que deriva diretamente da direção do sol e chega à superfície sem sofrer desvio em sua trajetória, produzindo sombras nítidas, e a radiação difusa, que é proveniente de todas as direções e que atinge a superfície após sofrer espalhamento pela atmosfera terrestre. Em dias totalmente nublados, 100% da radiação que chega à superfície é difusa. Já em dias de céu claro, sem nuvens, a radiação difusa fica em torno de 20%, sendo os outros 80% radiação direta. Contudo, caso a superfície analisada esteja inclinada em relação à horizontal, haverá uma terceira componente refletida pelo ambiente (mediações, solo, vegetação etc.), sendo que o coeficiente de reflexão destas superfícies é denominado de albedo. A representação básica desses componentes é apresentada na figura 4 (CEPEL – CRESESB, 2014; TIEPOLO et al., 2017).

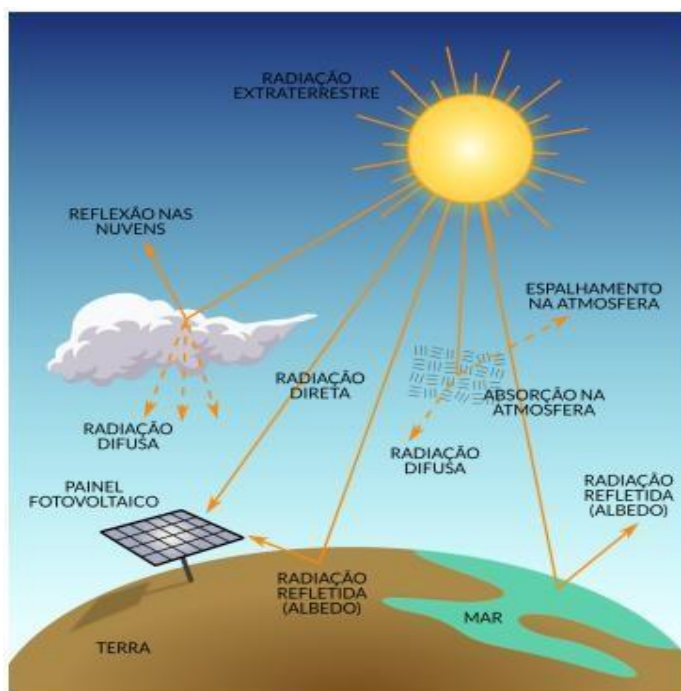


Figura 4 – Representação das componentes da radiação solar.
Fonte: TIEPOLO et al., 2017.

É denominada radiação global a soma resultante da radiação direta, difusa e devida ao albedo (quando a superfície é inclinada) (CEPEL – CRESESB, 2014).

A figura 5 mostra a média anual da radiação solar global diária, em MJ/m².dia, incidente sobre os estados brasileiros.

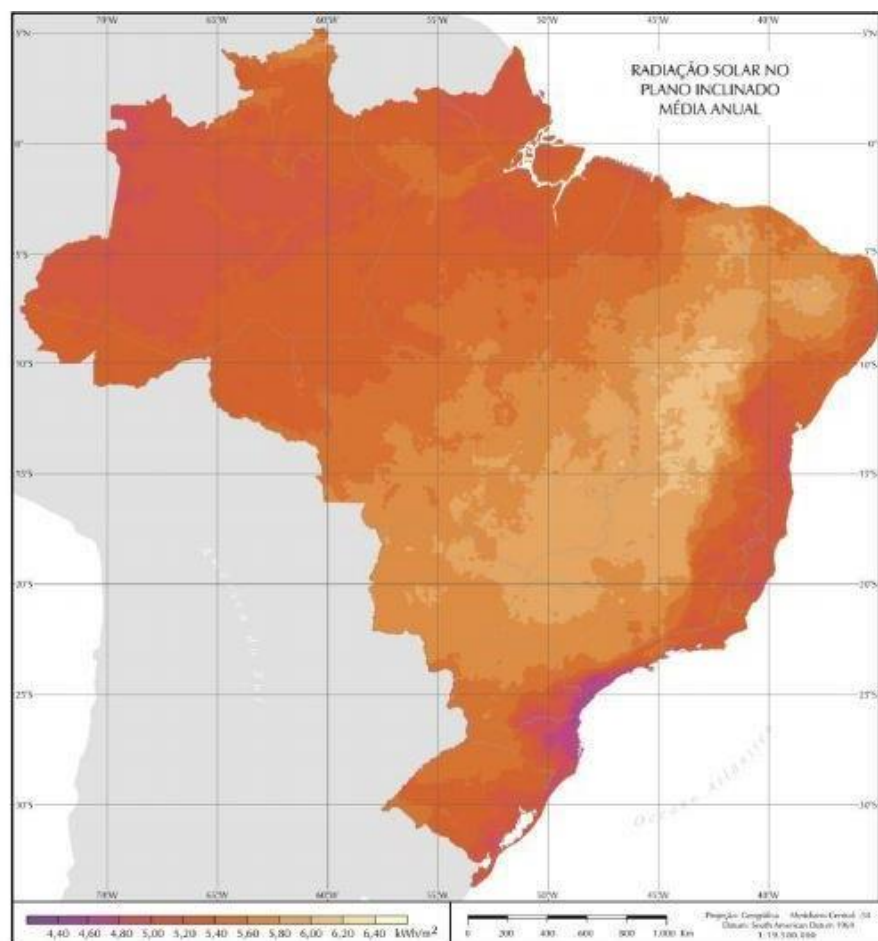


Figura 5 – Mapa brasileiro de radiação média solar anual.

Fonte: CEPEL – CRESESB, 2014.

A medição da radiação solar na superfície terrestre, tanto da global quanto de suas componentes direta e difusa, é de grande importância para o estudo das influências das condições climáticas e atmosféricas, como também para o desenvolvimento de projetos que buscam a captação e a conversão da energia solar. Com um histórico dessas medidas, pode-se viabilizar a instalação de sistemas fotovoltaicos em uma determinada região, garantindo o máximo aproveitamento do recurso ao longo do ano (CEPEL – CRESESB, 2014).

O potencial solar de um local pode ser feito de várias maneiras como, por exemplo, por meio de dados de um Atlas Solarimétrico, a partir de cálculos que interpolam dados de estações próximas ao local, ou pela medição da radiação solar no próprio local (DEBASTIANI, 2013).

A medição da radiação solar em um determinado local pode ser feita com a utilização de equipamentos específicos. Existem dois equipamentos geralmente utilizados, o piranômetro, que serve para medir a radiação solar global e o pireliômetro, que é utilizado para determinar a medida da radiação solar direta. Para o uso prático, na análise e no dimensionamento de instalações fotovoltaicas, pode-se recorrer a mapas de insolação e a ferramentas que fornecem imediatamente as informações desejadas sobre a radiação solar de uma determinada localidade (CEPEL – CRESESB, 2014; DEBASTIANI, 2013).

2.4 Energia Solar Fotovoltaica

Entre as fontes renováveis de energia, a energia solar fotovoltaica aparece como uma alternativa promissora, por não emitir gases poluentes no processo de geração e por ser uma fonte praticamente inesgotável e acessível em todos os pontos do mundo. Além disso, a cadeia produtiva de módulos fotovoltaicos também possui baixo impacto ambiental, pois, descartando-se corretamente os rejeitos químicos decorrentes de sua produção, os efeitos negativos são praticamente nulos. Quanto ao processo de fabricação dos geradores fotovoltaicos, as emissões de gases de efeito estufa resultantes são muito baixas e a energia empregada em sua produção é compensada em poucos anos de funcionamento (MOCELIN, 2014).

A geração de energia elétrica de um sistema solar fotovoltaico utiliza elementos semicondutores fotossensíveis (células fotovoltaicas) que são responsáveis pela conversão da radiação solar em uma diferença de potencial nos terminais de suas junções. Por meio de ligações elétricas nesses terminais, ocorre a circulação de elétrons em corrente contínua (DEBASTIANI, 2013).

Cada célula fotovoltaica produz uma diferença de potencial de 0,5 a 0,6 V, com potência entre 1,0 e 1,5 W. A partir de arranjos, com ligações série-paralelo, são confeccionados os painéis fotovoltaicos, cuja potência pode chegar em torno de 360 W, com tensão de 12, 24 ou 48 V. Com novas associações série-paralelo entre

painéis é possível dimensionar potências e tensões que satisfaçam as demandas específicas (DEBASTIANI, 2013).

A conversão da radiação solar em eletricidade ocorre devido ao efeito fotovoltaico, que foi observado pela primeira vez por Becquerel em 1839. Esse efeito ocorre em materiais conhecidos como semicondutores, que apresentam duas bandas de energia. Em uma delas, a presença de elétrons é permitida e, na outra, não há presença deles, ou seja, a banda está completamente “vazia” (banda de condução). O material semiconductor mais usado é o silício, segundo elemento mais abundante na Terra. Seus átomos são caracterizados por ter quatro elétrons que se conectam a seus vizinhos, criando uma rede cristalina (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017).

A função da luz solar no efeito fotovoltaico (conversão direta da luz em eletricidade) é fornecer uma quantidade de energia para que o elétron mais externo possa se mover da faixa de valência para a banda de condução no material, gerando eletricidade. Como no caso do silício, especificamente, é necessário 1,12 eV (elétron-volts) para os elétrons excederem o GAP. Além disso, o material semiconductor deve ser capaz de absorver uma grande parte do espectro solar (CEPEL - CRESESB, 2014; SAMPAIO & GONZÁLEZ, 2017).

2.4.1 Energia Solar Fotovoltaica no Brasil

Comparado aos países europeus, em que a energia fotovoltaica já está consolidada na produção de energia elétrica, o território brasileiro recebe elevados índices de radiação solar permitindo, assim, um alto potencial para o desenvolvimento dessa tecnologia, porém, ainda faltam incentivos para a sua produção no país, pois existem muitos obstáculos institucionais e tributários para o progresso dessa fonte de energia (CEPEL – CRESESB, 2014; SILVA, 2015).

O número de sistemas fotovoltaicos conectados à rede tem ganho importância no Brasil em razão da sua competitividade no futuro, bem como sua utilização deverá aumentar nos próximos anos, principalmente com o aumento da eficiência e queda dos custos para a implantação desses sistemas (MOCELIN, 2014).

Por intermédio de boletins mensais de monitoramento do sistema elétrico brasileiro, o Ministério de Minas e Energia (MME) apresenta dados referentes à

capacidade instalada de geração de energia solar. Assim, comparando novembro/2018 com novembro/2019, ocorreu um acréscimo tanto da GD quanto dos sistemas isolados. No caso da GD, esse crescimento foi de 253,6%, como podemos ver na Figura 6 apresentada a seguir:

Fonte	Nov/2018	Nov/2019			Evolução da Capacidade Instalada Nov-2019 / Nov-2018
	Capacidade Instalada (MW)	Nº Usinas	Capacidade Instalada (MW) ¹	% Capacidade Instalada	
Hidráulica	103.623	1.463	107.192	63,2%	3,4%
UHE	97.674	217	101.055	59,6%	3,5%
PCH + CGH ²	5.893	1.146	6.040	3,6%	2,5%
CGH GD	56	100	97	0,1%	74,2%
Térmica	42.306	3.230	43.120	25,4%	1,9%
Gás Natural	12.890	166	13.435	7,9%	4,2%
Biomassa	14.744	568	14.906	8,8%	1,1%
Petróleo	9.244	2.268	9.073	5,4%	-1,9%
Carvão	3.252	23	3.597	2,1%	10,6%
Nuclear	1.990	2	1.990	1,2%	0,0%
Outros ³	150	4	69	0,0%	-54,4%
Térmica GD	35	199	51	0,0%	44,7%
Eólica	13.744	684	15.285	9,0%	11,2%
Eólica (não GD)	13.734	624	15.274	9,0%	11,2%
Eólica GD	10	60	10.361	0,0%	0,5%
Solar	2.078	146.120	3.938	2,3%	89,5%
Solar (não GD)	1.614	3.759	2.295	1,4%	42,2%
Solar GD	465	142.361	1.643	1,0%	253,6%
Capacidade Total sem GD	161.185	8.777	167.733	98,9%	3,9%
Geração Distribuída - GD	566	142.720	1.801	1,1%	218,3%
Capacidade Total - Brasil	161.751	151.497	169.534	100,0%	4,8%

Figura 6 – Capacidade instalada de geração de energia elétrica do Brasil.

Fonte: MME, 2019.

2.4.2 Sistemas Fotovoltaicos

A produção de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos pode ser obtida de duas formas principais, conforme a norma NBR 11704:2008 Sistemas Fotovoltaicos – Classificação: sistema fotovoltaico conectado à rede de energia elétrica (SFVCR) ou sistema *On grid* e sistema fotovoltaico isolado da rede de energia elétrica (SFVI) ou sistema *Off grid* (ABNT, 2008).

2.4.2.1 Sistema fotovoltaico conectado à rede (SFVCR) ou *On grid*

Caracterizados porque estão integrados à rede pública de energia elétrica, os sistemas conectados à rede não possuem elementos para armazenar a energia elétrica, visto que, durante os momentos nos quais não existe geração de energia elétrica vinda dos painéis, o sistema utiliza a rede da concessionária como fonte de energia (TONIN, 2017).

O SFVCR é constituído pelos painéis fotovoltaicos, pelo inversor que disponibiliza energia elétrica em corrente alternada para a instalação e também injeta o excedente de energia gerado na rede, assim como pelo medidor de energia elétrica bidirecional, o qual contabiliza a energia injetada na rede da concessionária e a energia consumida pelo estabelecimento (URBANETZ JUNIOR, 2010).

O SFVCR é regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, bem como os impostos envolvidos e o modo de funcionamento do sistema de compensação energética. Desta forma, o sistema de compensação converte a energia excedente produzida pelo sistema fotovoltaico em créditos (quilowatts-hora, kWh) que serão abatidos do consumo total na fatura de energia elétrica. Para tanto, utiliza-se um medidor bidirecional, o qual é responsável por registrar a quantidade de energia gerada/injetada na rede, em kWh, e a energia consumida da concessionária, em kWh. E, com isso, a produção de energia excedente transforma-se em créditos para uso posterior do cliente. A Figura 7 exemplifica o SFVCR (TONIN, 2017).

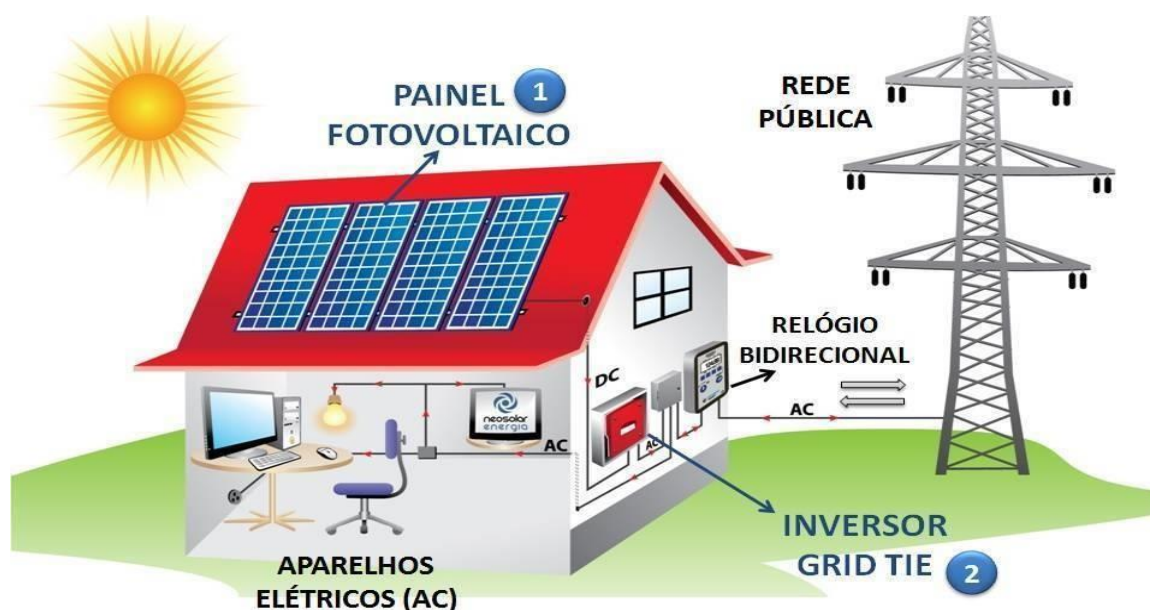


Figura 7 – Sistema fotovoltaico conectado à rede (SFVCR) ou *On Grid*.

Fonte: NEOSOLAR, 2019.

Os sistemas conectados à rede podem ser divididos de duas formas: sistemas de geração centralizada ou sistemas de geração distribuída. No primeiro caso, a oferta de energia é caracterizada por usinas de grande porte distantes dos centros de carga. Na geração distribuída, a oferta se dá por meio de plantas menores e próximas aos centros de consumo (NAKABAYASHI, 2014).

No caso da geração centralizada, existe a vantagem de economia em grande escala, que pode aumentar a competitividade deste tipo de sistema. Em contrapartida, há a necessidade de linhas de transmissão longas para o transporte de energia, além da aquisição do terreno para a construção da usina. Já a geração distribuída não tem a mesma vantagem de escala de custos. Por outro lado, tem a vantagem da geração estar perto do consumo, diminuindo perdas técnicas nos sistemas e, além disso, este tipo de geração pode ser instalado nos próprios telhados de edificações, dispensando custos associados à aquisição ou arrendamento de terrenos (NAKABAYASHI, 2014).

As principais vantagens do SFVCR são: elevada produtividade, visto que toda a energia cedida pelos módulos fotovoltaicos é utilizada, a existência de um sistema de anti-ilhamento, sistema esse que quando não há energia elétrica na rede desliga automaticamente evitando danos aos equipamentos e a ausência de um conjunto de baterias, que pode ser considerado uma das desvantagens do SFVI por conta de sua baixa vida útil e o elevado custo de manutenção (TONIN, 2017; URBANETZ JUNIOR, 2010).

2.4.2.2 Sistema fotovoltaico isolado (SFVI) ou *Off Grid*

Os sistemas fotovoltaicos isolados não possuem conexão com a rede pública de energia elétrica. Sendo assim, geralmente são instalados em locais nos quais a rede de transmissão é inacessível ou é deficiente, ou ainda, por questões de viabilidade técnica e/ou financeira. Então, se faz necessário um elemento armazenador de energia para garantir a autonomia do sistema (TONIN, 2017; PAZUCH, 2017).

Comunidades isoladas da rede elétrica, alimentação de baterias de veículos elétricos, postes de iluminação, bombas d'água, geladeiras para armazenar vacinas, entre outros, são exemplos de aplicações de SFVI (TONIN, 2017).

Os SFVI são compostos basicamente por quatro equipamentos: o painel fotovoltaico que transforma a radiação solar em corrente contínua, o controlador de carga, equipamento eletrônico utilizado para controlar e monitorar a carga e/ou descarga do banco de baterias, evitando sobrecargas e descargas profundas aumentando, assim, a vida útil do banco de baterias, o inversor, equipamento que converte a corrente contínua do painel ou do banco de baterias, em corrente alternada, e a bateria que tem a função de armazenar a energia elétrica para ser utilizada em momentos em que o sol não esteja presente e não haja outra fonte de energia (TONIN, 2017; URBANETZ JUNIOR, 2010).

A Figura 8 apresentada a seguir representa o SFVI.



Figura 8 – Sistema fotovoltaico isolado (SFVI) ou *Off Grid*.

Fonte: NEOSOLAR, 2019.

2.5 Componentes de um Sistema Fotovoltaico

Os sistemas fotovoltaicos *On grid* e *Off grid* possuem equipamentos que podem ser específicos para cada aplicação como, por exemplo, o controlador de carga e as baterias no sistema *Off grid*, porém, independentemente da configuração do sistema, os módulos fotovoltaicos e os inversores são utilizações comuns em ambos os sistemas (PAZUCH, 2017).

A seguir, estão apresentados cada um desses equipamentos.

2.5.1 Painéis Fotovoltaicos

Os painéis fotovoltaicos são formados por um conjunto de células fotovoltaicas e podem ser interconectados de forma a permitir arranjos modulares que, em conjunto, aumentam a capacidade de geração de energia elétrica. Cerca de 80% das células fotovoltaicas são fabricadas a partir do silício cristalino e 20% utilizam filmes finos (SILVA, 2015).

Dentre os diferentes materiais utilizados na fabricação das células fotovoltaicas, destacam-se o silício monocristalino (m-Si), o silício policristalino (p-Si) e os filmes finos, como o silício amorfo (a-Si), o silício microcristalino (μ c-Si), o telureto de cádmio (CdTe), o índio gálio e selênio (CIGS). Existem também outras tecnologias mais modernas como, por exemplo, as células fotovoltaicas orgânicas, porém sua utilização comercial ainda é bastante restrita (TONIN, 2017; CEPEL – CRESESB, 2014).

A inclinação ideal dos painéis fotovoltaicos pode ser determinada em função da latitude do local do projeto, sendo que a configuração do sistema fotovoltaico (*On Grid* ou *Off Grid*) interfere no método de cálculo da inclinação. Para sistemas *On Grid*, as inclinações menores que a latitude proporcionam maior absorção da radiação solar nos períodos próximos ao solstício de verão, o que eleva a geração de energia. Para esses casos, a inclinação ideal é dada pela equação 1 (BLUESOL, 2019).

$$\beta = 3,7 + 0,69 \times \phi \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que:

β = inclinação do painel em relação ao plano horizontal, graus;

ϕ = Latitude do local, graus.

2.5.1.1 Células de Silício Monocristalino

As células de silício monocristalino são chamadas dessa forma por possuírem uma estrutura homogênea em toda sua extensão. Para a fabricação de uma célula fotovoltaica desse tipo, é necessário que o silício tenha 99,9999% de grau de pureza. A obtenção desse tipo de silício é mais cara, porém se tem uma maior eficiência na conversão em energia (MME, 2012).

A figura 9 representa uma célula monocristalina.



Figura 9 – Célula de silício monocristalino.

Fonte: MME, 2012.

A fabricação dessas células é feita a partir da serragem de lingotes de silício monocristalino. Esses lingotes são obtidos a partir do silício purificado extraído do quartzo, que é abundante na crosta terrestre. O lingote de silício monocristalino é formado por uma única estrutura cristalina, possuindo aspecto brilhante e uniforme. O lingote é serrado e fatiado para produzir os *wafers* de silício, esses *wafers* são sujeitos a processos de dopagem, durante os quais são formadas as camadas P e N que originam as propriedades fotovoltaicas. O *wafer* dopado recebe os eletrodos e o tratamento antirreflexivo, dando origem à célula fotovoltaica (TONIN, 2017).

2.5.1.2 Células de Silício Policristalino

As células de silício policristalino são mais baratas que as de silício monocristalino, pois exigem um processo menos rigoroso na preparação das células, bem como possuem eficiências comerciais entre 13 e 15%, inferiores às das células monocristalinas. Entretanto, seu custo de fabricação é menor e isso compensa a redução de eficiência, sendo esse tipo de célula o mais utilizado atualmente (DEBASTIANI, 2013).

A figura 10 representa uma célula policristalina.

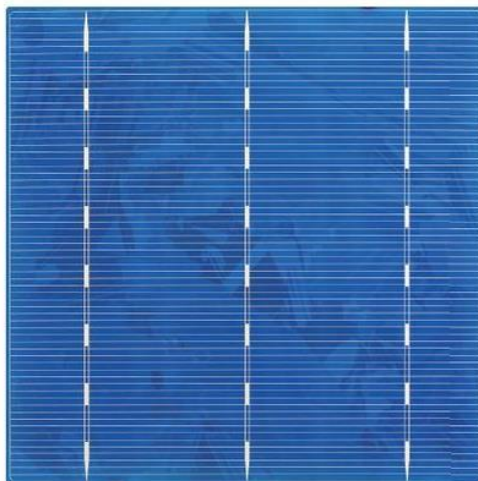


Figura 10 – Célula de silício policristalino.

Fonte: MME, 2012.

O processo de fabricação das células policristalinas são menos complexas que as de silício monocristalino, pois esse utiliza temperaturas mais baixas que as empregadas na fabricação do monocristalino. Assim, o lingote de silício policristalino é formado por muitos cristais, os quais possuem tamanhos e orientações espaciais diferentes. No contorno desses cristais, concentram-se os defeitos que tornam o material menos eficiente, em termos de conversão, contudo, possuem um menor custo de produção, visto que a perfeição cristalina é menor e o processo mais simples (TONIN, 2017).

2.5.1.3 Células de Filmes Finos

Produzidas por meio de um processo de depósito de camadas extremamente finas de material semicondutor, as células de filmes finos são revestidas de proteção mecânica como, por exemplo, vidro ou plástico. Os materiais semicondutores comercialmente utilizados na fabricação dos filmes são silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe) ou disseleneto de cobre índio gálio (CIGS) (MME, 2012).

As células de filmes finos são produzidas pela pulverização de finas camadas de silício sobre uma base feita de material rígido ou flexível de baixo custo (plástico, vidro ou metal). O custo dos filmes finos é menor, porque em sua fabricação não há serragem de lingotes e, então, tem-se menos desperdício de material e menor consumo de energia, mas a eficiência na conversão de energia também é menor.

Além disso, a eficiência diminui acentuadamente já nos primeiros meses após a instalação, embora não seja tão afetada por temperaturas elevadas como no caso das células monocristalinas e policristalinas. Os dispositivos de filmes finos podem ser produzidos em qualquer dimensão, visto que a única restrição é a área da base para a fabricação do módulo. Os módulos fotovoltaicos de filmes finos, como os apresentados na Figura 11, são constituídos de uma única célula (MME, 2012; TONIN, 2017).



Figura 11 – Células de filmes finos.

Fonte: MME, 2012.

Apesar do baixo custo de fabricação, os dispositivos de filmes finos necessitam de uma maior área instalada para produzir a mesma energia que produzem as tecnologias cristalinas tornando-se, assim, mais elevados os custos de instalação. Uma vantagem que possui esse tipo de célula é seu baixo coeficiente de redução de potência com o aumento da temperatura, o que favorece a instalação em locais nos quais as temperaturas são altas (TONIN, 2017).

2.5.2 Inversores

O inversor é o equipamento responsável pela conversão da energia de corrente contínua (CC) dos módulos fotovoltaicos em energia de corrente alternada (CA) a ser disponibilizada para as cargas. Dependendo do sistema fotovoltaico, o inversor pode ser dividido em duas categorias: os específicos para sistemas isolados e os específicos para sistemas conectado à rede elétrica (URBANETZ JUNIOR, 2010; PAZUCH, 2017).

Os inversores para SFVI recebem a energia em corrente contínua, normalmente de um banco de baterias que recebeu e acumulou a energia elétrica

proveniente dos módulos fotovoltaicos. Este tipo de inversor produz em sua saída uma onda senoidal de forma independente, sem depender de uma referência externa de tensão. Já os inversores para SFVCR, recebem a energia em corrente contínua diretamente dos módulos fotovoltaicos. A energia em corrente alternada na saída é colocada em paralelo com a rede elétrica convencional. Sendo assim, as duas ondas de tensão devem estar em fase e ter características elétricas bastante similares, de modo a possibilitar o paralelismo de geradores. A senoide produzida pelo inversor utiliza a onda da rede elétrica como referência, quando há essa referência, tem-se geração fotovoltaica. No caso de um desligamento da rede elétrica convencional, o inversor do SFVCR é desligado automaticamente, evitando o efeito do ilhamento (URBANETZ JUNIOR, 2010).

Geralmente, os inversores para conexão à rede com potências individuais de até 5 kWp têm saída monofásica. A partir dessa potência, são mais utilizados inversores com saída trifásica (CEPEL – CRESESB, 2014; PAZUCH, 2017; TONIN, 2017).

Os inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos são divididos em dois grupos: os comutados pela rede e os autocomutados. Os inversores comutados pela rede são normalmente empregados para altas potências e os autocomutados são empregados em potências menores (CEPEL – CRESESB, 2014; URBANETZ, 2010).

A figura 12 exemplifica um modelo de inversor utilizado em sistemas fotovoltaicos conectados à rede.



Figura 12 – Inversor.

Fonte: FRONIUS, 2019.

2.5.3 Baterias

Em SFVI, o uso de dispositivos de armazenamento de energia é necessário para suprir a demanda em períodos nos quais não há geração de energia elétrica ou quando é insuficiente (à noite, em dias nublados e/ chuvosos). Sendo assim, parte da energia gerada durante o dia é armazenada para ser utilizada em outros momentos e satisfazer a demanda (CEPEL – CRESESB, 2014).

Pode-se também utilizar baterias em SFVCR para operação ilhada ou quando não há energia elétrica, sistemas assim são muito comuns na Europa e nos EUA. No Brasil, ainda não existe uma legislação que focalize esse tipo de operação. Com isso, as concessionárias de energia não aceitam, exigindo proteção para desligamento em caso de ilhamento (CEPEL – CRESESB, 2014).

A bateria eletroquímica ainda é o dispositivo mais utilizado em SFVI, por ser uma forma conveniente e eficiente de armazenamento de energia. Uma bateria é um conjunto de células eletroquímicas, conectados em série e/ou em paralelo, capaz de armazenar energia elétrica na forma de energia química por meio da oxidação e redução (redox) que ocorre em seu interior. Quando uma bateria carregada é conectada a uma carga ocorre o processo reverso (CEPEL – CRESESB, 2014; PAZUCH, 2017).

As baterias podem ser classificadas em dois tipos básicos de células, primárias e secundárias. As células primárias compõem as baterias que podem ser utilizadas apenas uma vez (não recarregáveis), quando se descarregam completamente sua vida útil acaba e elas devem ser descartadas, são utilizadas geralmente em relógios de pulso, calculadoras entre outros dispositivos. Já as células secundárias compõem as baterias recarregáveis, que podem ser reutilizadas várias vezes e que são utilizadas nos sistemas fotovoltaicos (CEPEL – CRESESB, 2014).

Dos vários tipos de baterias existentes, as de Chumbo-ácido ainda são as mais utilizadas, baterias com tecnologias mais modernas como Níquel-Cádmio, Níquel-hidreto metálico, íon de Lítio, entre outras que, embora apresentem vantagens (maior eficiência, maior vida útil, maior profundidade de descarga), ainda não são economicamente viáveis para a utilização na maioria dos sistemas fotovoltaicos (CEPEL – CRESESB, 2014; PAZUCH, 2017).

A figura 13 exemplifica um modelo de bateria utilizado em sistemas fotovoltaicos isolados.



Figura 13 – Bateria estacionária para SFVI.

Fonte: NEOSLAR, 2019.

2.5.4 Controlador de Carga

Controladores de carga são incluídos na maioria dos SFVI com o objetivo de proteger a bateria (ou banco de baterias) contracargas e descargas excessivas aumentando, assim, a sua vida útil. São componentes críticos dos SFVI e, caso ocorram falhas, a bateria pode ter danos irreversíveis. Sendo assim, devem ser dimensionados conforme os diversos tipos de baterias (CEPEL – CRESESB, 2014).

O controlador de carga é considerado indispensável e sua utilização permite uma otimização do dimensionamento do banco de baterias e do seu carregamento (CEPEL – CRESESB, 2014).

Os controladores devem desconectar o gerador fotovoltaico quando a bateria atingir carga plena e interromper o fornecimento de energia logo que o estado de carga da bateria atingir um nível mínimo de segurança. Alguns controladores também monitoram o desempenho do SFVI e acionam alarmes assim que ocorre algum problema. Para melhorar o desempenho, o controlador pode ainda ter um sensor de temperatura, com o intuito de compensar o efeito da variação da temperatura nas baterias (CEPEL – CRESESB, 2014).

A figura 13 exemplifica um modelo controlador de carga utilizado em sistemas fotovoltaicos isolados.



Figura 14 – Controlador de carga.

Fonte: NEOSOLAR, 2019.

2.6 Análises de Viabilidade Econômica

A principal barreira para à disseminação da tecnologia solar fotovoltaica ainda é o alto custo na aquisição de seus equipamentos. Entretanto, há evidências de que os preços dos painéis fotovoltaicos estão caindo e que podem cair ainda mais. A Empresa de Pesquisa Energética - EPE estima que os custos de instalação dos sistemas fotovoltaicos para os seguimentos residencial, comercial e planta centralizada deverão cair, respectivamente, 48,7%, 46,3% e 54,8% entre 2010 e 2020 (SILVA, 2015).

A análise econômica para a implantação de um sistema fotovoltaico pode ser desenvolvida a partir da utilização dos conceitos de Análise de Investimentos. Tal análise consiste em fazer estimativas de todo o gasto envolvido com o investimento inicial, operação, manutenção e receitas geradas durante um determinado período de tempo para, assim, montar o fluxo de caixa e determinar os indicadores econômicos conseguidos com este sistema, buscando identificar quais são os benefícios esperados pelo investimento para colocá-los em comparação com os investimentos e custos associados ao mesmo, a fim de verificar a viabilidade de sua implantação (CALZA, 2014; ZAGO, WEISE & HORNBURG, 2009).

A Análise de Investimentos pode ser considerada como o conjunto de técnicas que permitem a comparação entre os resultados de tomada de decisões referentes às alternativas diferentes de forma científica (ZAGO, WEISE & HORNBURG, 2009).

Utiliza basicamente três métodos para a determinação da viabilidade econômica, sendo elas:

- Valor Presente Líquido (VPL);
- Taxa Interna de Retorno (TIR);
- *Payback* Descontado.

2.6.1 Valor Presente Líquido (VPL)

É um método de análise de investimentos a partir do qual se compara, na data de início do projeto, todas as receitas e despesas esperadas ou projetadas no fluxo de caixa utilizando a taxa mínima de atratividade imposta pelo investidor (AVILA, 2013).

O VPL determina qual será a alternativa mais favorável quanto à utilização ou não do sistema, sendo viável quando positivo. Esta análise trabalha com os valores de todo o projeto descapitalizados para o tempo atual utilizando-se da equação 2 (CALZA, 2014).

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} - FC_0 = \frac{FC_1}{(1+i)^1} + \frac{FC_2}{(1+i)^2} + \frac{FC_3}{(1+i)^3} + \dots + \frac{FC_n}{(1+i)^n} - FC_0 \quad \text{Eq. (2)}$$

Em que:

FC_j = Valores dos fluxos de caixa da ordem j (R\$);

FC_0 = Fluxo inicial (R\$);

i = Taxa mínima de atratividade (decimal).

O método do Valor Presente Líquido apresenta algumas vantagens: pode ser aplicado a fluxos de caixa que contenham mais de uma variação de sinal, tanto de entrada quanto de saída, leva em consideração o valor do dinheiro no tempo e depende unicamente dos fluxos de caixa previstos pelo projeto, do custo de oportunidade do capital. No entanto, esse método apresenta desvantagens, tais como, a determinação da taxa mínima de atratividade, ou seja, a flexibilidade de escolha da taxa de juros e a impossibilidade de reaplicar os benefícios em projetos já existentes (ZAGO, WEISE & HORNBURG, 2009).

2.6.2 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A Taxa Interna de Retorno é definida como a taxa de juros anual que anula o Fluxo de Caixa, isto é, a taxa que faz com que a soma das receitas e despesas, convertidas a valor presente, seja igual a zero. Ela possibilita uma análise alternativa de investimento por meio de sua rentabilidade (CALZA, 2014; AVILA, 2013).

A TIR de um projeto pode ser calculada conforme a equação 3.

$$TIR \Rightarrow VPL = 0 \quad \text{Eq. (3)}$$

A TIR deve ser comparada com a taxa mínima de atratividade (TMA) para verificar a rentabilidade do investimento. O projeto será considerado viável, caso a TIR seja maior do que a taxa mínima de atratividade estabelecida pelo investidor (AVILA, 2013).

O método da Taxa Interna de Retorno apresenta vantagens, entre elas a facilidade de visualização percentual após obtido o resultado, assim como leva em consideração o valor temporal do dinheiro. Entretanto, apresenta desvantagens no que diz respeito à dificuldade do cálculo, uma vez que esse é feito pelo método de tentativa e erro, a consistência do resultado é variável e o método supõe que os saldos serão reaplicados à mesma taxa do investimento (ZAGO, WEISE & HORNBURG, 2009).

2.6.3 Payback Descontado

O *Payback* descontado representa o tempo de retorno do capital investido no projeto, levando em conta a taxa de juros. O projeto será considerado viável se o prazo de retorno do investimento ocorrer dentro do período previsto, normalmente a vida útil dos equipamentos (CALZA, 2014; AVILA, 2013).

O *payback* descontado, ou tempo de retorno do capital investido, pode ser calculado conforme a equação 4:

$$Payback = \text{mínimo } \{j\}, \text{ tal que } \sum_{j=1}^N \frac{B_j}{(1+i)^j} \geq -FC_0 \quad \text{Eq. (4)}$$

Em que:

B_j = Corresponde aos benefícios esperados (R\$).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterizações do Local

O trabalho foi desenvolvido na Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, campus de Cascavel – PR, com localização geográfica definida pelas coordenadas: latitude $24^{\circ} 59'$ sul, longitude $58^{\circ} 23'$ oeste, e altitude média de 785 metros.

O sistema fotovoltaico implantado no local foi dimensionado para atender a demanda do Centro de Análise de Sistemas Alternativos de Energia - Projeto CASA. No local, existe um laboratório e duas residências, uma inovadora e outra convencional, como mostra a figura 15.



Figura 15 – Projeto CASA - Unioeste.

Fonte: GOOGLE MAPS STREET VIEW, 2011.

O sistema fotovoltaico possui potência total de 3,3 kWp, e é composto por dez módulos fotovoltaicos policristalinos voltados à direção do norte verdadeiro, com um ângulo de inclinação de 21° , calculado de acordo com a equação 1.

O sistema é composto também por um inversor de 4 kWp, conectado a duas *strings* de módulos fotovoltaicos - com cinco módulos cada uma - permitindo que se realize uma avaliação separada da energia gerada em cada *string*. A figura 16 apresenta o sistema instalado.



Figura 16 – Sistema fotovoltaico instalado na Unioeste.

Fonte: Próprio Autor.

Na figura 17, está apresentado o diagrama multifilar do sistema fotovoltaico.

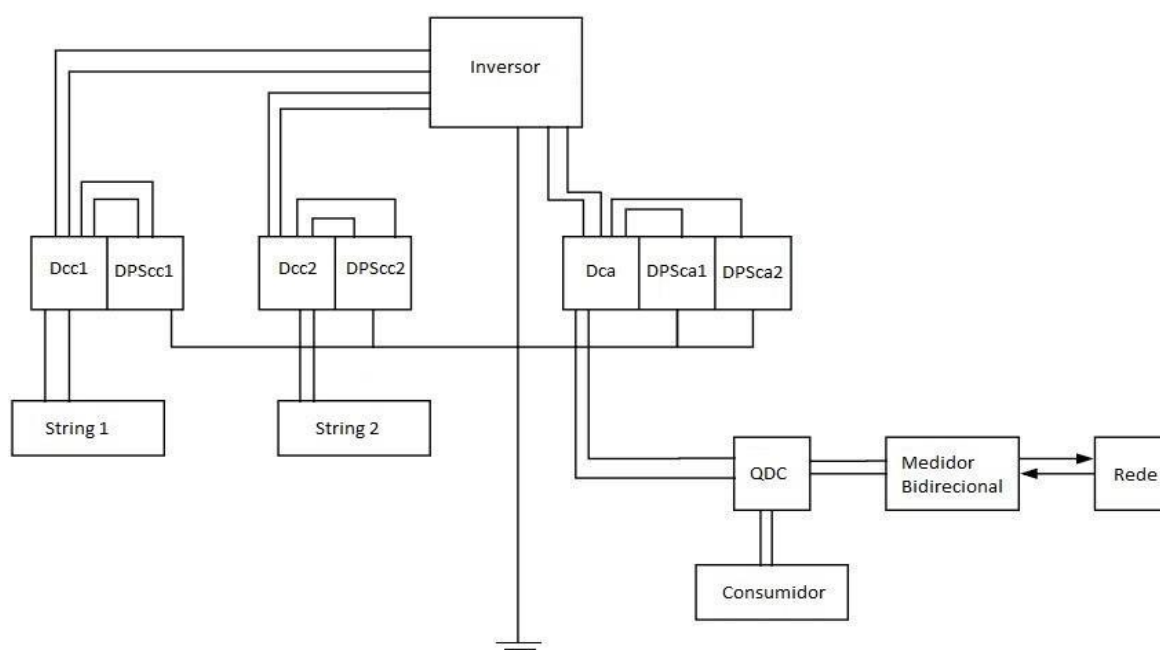


Figura 17 – Diagrama multifilar do sistema.

Fonte: Próprio Autor.

3.2 Equipamentos que Compõem o Sistema Fotovoltaico

O sistema fotovoltaico instalado possui dez módulos fotovoltaicos policristalinos, com dimensões de 1956 x 922 x 40 mm e 24 kg, da marca Risen Solar Technology, com uma potência de 330 Wp cada.

Este módulo fotovoltaico foi certificado pelo INMETRO, apresentando eficiência de 17,1% e nota “A”. As células são protegidas por uma resistente camada de vidro temperado e moldura em alumínio, como na figura 18 (RISEN SOLAR TECHNOLOGY, 2019).



Figura 18 – Módulo solar fotovoltaico Risen.

Fonte: RISEN SOLAR TECHNOLOGY, 2019.

As especificações do painel estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 – Especificações Técnicas do Módulo Solar Risen

Especificações Técnicas	
Modelo	RSM72-6-330P
Potência Máxima (P _{máx})	330 Wp
Número de Células	72
Tensão de Máxima Potência (V _m)	38,1 V
Corrente de Máxima Potência (I _m)	8,70 A
Tensão de Circuito Aberto (V _{oc})	46,30 V
Corrente de Curto Circuito (I _{sc})	9,25 A
Tensão Máxima do Sistema	1000 V DC
Peso	24 kg
Dimensões	1956 x 922 x 40 mm
Eficiência	17,10%
Classe	A

Fonte: RISEN SOLAR TECHNOLOGY, 2019.

O Inversor utilizado para a conversão da energia gerada em corrente contínua para corrente alternada é da marca Solis, distribuído pela empresa Renovigi Energia Solar, modelo Solis – 1P4k – 4G, com potência de 4 kWp, como apresentado na figura 19.



Figura 19 – Inversor Sólis.

Fonte: RENOVIGI, 2019.

Na tabela 2, estão as especificações técnicas do inversor instalado no sistema.

Tabela 2 – Especificações Técnicas Inversor Sólis

Especificações Técnicas	
Modelo	Solis 1P4K - 4G
Tensão Máxima de Corrente Contínua	600 Vcc
Faixa de Tensão MPPT	100 - 500 Vcc
Corrente Máxima CC (MPPT)	2 x 11 A
Tensão Nominal CA	220 Vca
Frequência	50/60 Hz
Potência Nominal CA	4000 W
Potência Máxima CA	4400 W
Potência Aparente Máxima CA	4400 VA
Corrente Máxima CA	21 A

Fonte: RENOVI, 2019.

Para os registros de consumo e geração de energia, utilizou-se um medidor bidirecional da marca Eletra Energy Solutions, modelo ARES 7023, como mostra a figura 20.



Figura 20 – Medidor bidirecional Ares 7023.

Fonte: ELETRA ENERGY SOLUTIONS, 2019.

Esse medidor foi fornecido pela COPEL (Companhia Paranaense de Energia) e é responsável por gerar os créditos fornecidos pela geração fotovoltaica. Ele é

projetado para operar em redes trifásicas ou bifásicas, registrar o consumo de energia ativa e reativa, bem como exibir as grandezas por meio de um mostrador do tipo LCD. As especificações técnicas do equipamento estão apresentadas na tabela 3 (ELETRA ENERGY SOLUTIONS, 2019).

Tabela 3 – Especificações Técnicas Medidor Bidirecional ARES 7023

Especificações Técnicas	
Exatidão	INMETRO: Classe B (1%)
Tensão Nominal	120 V/240 V
Tensão de Operação	84 V a 288 V
Corrente Nominal	15 A
Corrente Máxima	120 A
Corrente de Partida	60 mA
Frequência	60 Hz

Fonte: ELETRA ENERGY SOLUTIONS, 2019.

Para a proteção do sistema fotovoltaico são utilizados o Dispositivo de Proteção contra Surtos – DPS e o Disjuntor.

Dispositivos de proteção contra surtos (DPS), como o apresentado na figura 21, são equipamentos desenvolvidos com o objetivo de detectar sobretensões elétricas, operacionais e transitórias na rede elétrica e desviar as correntes de surto. Quando um surto acontece na rede, a tensão fica extremamente alta, fazendo com que a resistência do DPS tenda a zero e, conseqüentemente, escoando toda a corrente elétrica pelo sistema de aterramento. Quando o DPS é acionado, ele fecha um curto-circuito entre fase e terra, porém, como este período de tempo é extremamente reduzido, o curto causado não ocasiona danos à instalação (MUNDO DA ELÉTRICA, 2019). O DPS é instalado na entrada do inversor (DPS CC) e na saída do inversor (DPS CA), é o primeiro dispositivo a desempenhar um papel protetor do sistema, seu tempo de resposta fica entre 25 e 50 nanossegundos. As especificações técnicas do equipamento estão apresentadas na tabela 4.



Figura 21 – Dispositivo de proteção contra surtos – DPS.

Fonte: SUNTREE, 2020.

Tabela 4 – Especificações Técnicas Dispositivo de Proteção Contra Surtos – DPS

Especificações Técnicas			
Tensão Nominal do SV	1000 V	1200V	1500 V
Máxima Corrente de Descarga	40 kA	30 kA	30 kA
Faixa de Temperatura Operacional	-40 a +80 °C		
Tempo de Resposta	< 25 ns		

Fonte: SUNTREE, 2020.

Os disjuntores são dispositivos eletromagnéticos de segurança que desarmam a rede elétrica de determinado circuito em caso de sobrecarga e curto-circuito. Além de manter a integridade da isolação, garantindo a vida útil dos condutores, o disjuntor proporciona um funcionamento adequado da instalação e dos equipamentos a ela conectados. Por isso, são instalados no quadro de distribuição em número compatível com os circuitos e dimensionados conforme a potência de cada equipamento (TRAMONTINA, 2020). As especificações técnicas do equipamento estão apresentadas na tabela 5.



Figura 22 – Disjuntor eletromagnético.

Fonte: TRAMONTINA, 2020.

Tabela 5 – Especificações Técnicas do Disjuntor Eletromagnético

Especificações Técnicas	
Corrente Nominal	32 A
Comprimento	80 mm
Largura	36 mm
Altura	72 mm
Diâmetro	1 cm
Peso	0,18 kg

Fonte: TRAMONTINA, 2020.

3.3 Equipamentos Utilizados para Medição

Para a realização do trabalho proposto, foram necessários os dados de radiação solar incidente nos módulos fotovoltaicos. Esses dados foram obtidos por meio de um piranômetro instalado na horizontal em relação aos painéis fotovoltaicos. Os dados obtidos por ele foram corrigidos segundo as equações 5 a

13, apresentadas a seguir. Esse piranômetro está conectado a um *datalogger* possibilitando a coleta dos dados.

Como o piranômetro está instalado na horizontal, ou seja, está coletando dados de radiação solar global em um ângulo de 0°, faz-se necessária a correção dessa angulação para 21°, valor de inclinação dos módulos fotovoltaicos. Para isso, utilizou-se uma série de equações obtidas por meio de Duffie e Beckman (2013), destacadas a seguir.

É necessário calcular a correção da radiação solar global diária (média mensal) para um determinado ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos, visto que foi considerada para estudo a cidade de Cascavel – PR, ao meio dia, com céu isotrópico, em meados do mês e com os módulos direcionados exatamente para o norte geográfico. Para isto, é necessário obter inicialmente o valor para a declinação solar por meio da equação 5:

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left(360 \frac{284+n}{365} \right) \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde:

δ = Declinação solar (graus);

n = Dias do ano.

Conforme a tabela 6, é possível verificar os valores médios recomendados de declinação solar para dias do ano em meados de mês.

Tabela 6 – Valores médios recomendados de declinação solar

Mês	Dia por mês	Para meados do mês		
		i	n	Δ
Janeiro	I	17	17	-20,9
Fevereiro	31 + i	16	47	-13
Março	59 + i	16	75	-2,4
Abril	90 + i	15	105	9,4
Maio	120 + i	15	135	18,8
Junho	151 + i	11	162	23,1
Julho	181 + i	17	198	21,2
Agosto	212 + i	16	228	13,5
Setembro	243 + i	15	258	2,2
Outubro	273 + i	15	288	-9,6
Novembro	304 + i	14	318	-18,9
Dezembro	334 + i	10	344	-23

Fonte: (DUFFIE, J.; BECKMAN, W., 2013).

Utilizando-se a equação 6, é possível determinar o valor do ângulo ω'_s :

$$\omega'_s = \min \left[\cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \right. \\ \left. \cos^{-1}(-\tan \phi + \beta) \tan \delta \right] \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde:

ω'_s = Ângulo Horário do Pôr do Sol para uma determinada inclinação da superfície.

ϕ = Latitude local (-24,9555°);

Assim, é possível, então, determinar o ângulo horário do pôr do sol ω_s , quando $\theta_z = 90^\circ$ por meio da equação 7:

$$\cos \omega_s = -\frac{\sin \phi \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta} = -\tan \phi \tan \delta \quad \text{Eq. (7)}$$

Onde:

ω_s = Ângulo horário do pôr do sol (graus);

Sendo assim, encontra-se o valor de $\overline{R}_b$ por meio da equação 8:

$$\overline{R}_b = \frac{\cos(\phi+\beta) \cos \delta \sin \omega'_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega'_s \sin(\phi+\beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega_s \sin \phi \sin \delta} \quad \text{Eq. (8)}$$

Onde:

$\overline{R}_b$ = Razão entre a radiação extraterrestre incidente no plano inclinado e horizontal;

β = Inclinação da Superfície (21° graus).

Após isso, é necessário calcular o valor da radiação extraterrestre diária integrada em uma superfície horizontal H_0 . Esses dados são obtidos por meio de medições de radiação solar realizadas por um piranômetro instalado no local, segundo a equação 9:

$$H_0 = \frac{24 \times 3600 G_{SC}}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \times \left(\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta \right) \quad \text{Eq. (9)}$$

Onde:

H_0 = Radiação extraterrestre diária integrada em uma superfície horizontal;

G_{SC} = Constante solar (1367 W/m²).

O índice de clareza médio mensal $\overline{K}_T$ é a razão entre a média diária de radiação mensal em uma superfície horizontal e a média mensal de radiação extraterrestre diária, como apresentado na equação 10:

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \quad \text{Eq. (10)}$$

Onde:

$\bar{K}_T$ = Índice de clareza médio mensal;

$\bar{H}$ = Radiação solar global incidente no plano horizontal, em média mensal;

$\bar{H}_0$ = Radiação extraterrestre diária, em média mensal.

Existem algumas correlações médias mensais da fração difusa a partir das correlações diárias difusas. As equações para essas correlações são as seguintes:

Para $\omega_s \leq 81,4^\circ$ e $0,3 \leq \bar{K}_T \leq 0,8$. Equação 11:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,391 - 3,560\bar{K}_T + 4,189\bar{K}_T^2 - 2,137\bar{K}_T^3 \quad \text{Eq. (11)}$$

Onde:

$\bar{H}_d$ = Radiação solar difusa incidente no plano inclinado, em média diária mensal;

$\bar{H}$ = Radiação solar global incidente no plano horizontal em média mensal;

E para $\omega_s > 81,4^\circ$ e $0,3 \leq \bar{K}_T \leq 0,8$. Equação 12:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,311 - 3,022\bar{K}_T + 3,427\bar{K}_T^2 - 1,821\bar{K}_T^3 \quad \text{Eq. (12)}$$

Finalmente, a radiação solar média mensal em uma superfície inclinada não sombreada pode ser expressa pela Equação 13:

$$\bar{R} = \frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} = \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right) \bar{R}_b + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + \rho_g \left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \quad \text{Eq. (13)}$$

Onde:

$\bar{R}$ = Radiação solar média mensal em uma superfície inclinada;

$\bar{H}_T$ = Radiação solar global incidente no plano inclinado, em média mensal;

ρ_g = Refletância da vizinhança nas proximidades do coletor solar (para grama, $\rho_g=0,2$) .

O *datalogger* utilizado foi o modelo CR 1000 da Campbell Scientific, que possui oito entradas analógicas, como apresentado na Figura 23. O datalogger armazena os dados de radiação solar, obtidos pelo piranômetro a cada 10 segundos, assim como faz a média dos valores coletados a cada minuto

posteriormente a cada hora do dia. As especificações técnicas do produto estão apresentadas na tabela 7 a seguir:



Figura 23 – Datalogger CR 1000.

Fonte: CAMPBELL SCIENTIFIC, 2019.

Tabela 7 – Especificações Técnicas Datalogger CR 1000

Especificações Técnicas	
Faixa de Temperatura Operacional	-25 a +50 °C Padrão -55 a +85 °C Estendida
Entradas Analógicas	8 Diferenciais (configurados individualmente)
Limite de Entrada	$\pm 5 V_{cc}$
Dimensões	23,8 x 10,1 x 5,4 cm
Peso	1 kg

Fonte: CAMPBELL SCIENTIFIC, 2019.

O piranômetro é de fabricação da Kipp & Zonen, modelo CMP3, com uma sensibilidade de 15,30 microvolts/watt.metro², como evidenciado na figura 24. As especificações técnicas do produto estão salientadas na tabela 8 a seguir:



Figura 24 – Piranômetro CMP3.

Fonte: CAMPBELL SCIENTIFIC, 2019.

Tabela 8 – Especificações Técnicas Piranômetro CMP3

Especificações Técnicas	
Faixa Espectral	300 a 2800 nm
Irradiância Máxima	2000 W/m ²
Sensibilidade	5 a 20 μ V/W/m ²
Faixa de Temperatura Operacional	-40 a +80 °C
Diâmetro da Cúpula	3,2 cm
Largura	7,9 cm
Altura	6,7 cm
Peso	600 g

Fonte: CAMPBELL SCIENTIFIC, 2019.

Para obtenção dos dados de energia elétrica produzida pelo sistema fotovoltaico, foi utilizado um analisador de grandezas elétricas da marca EMBRASUL, modelo RE7000, destacado na figura 25. Esse equipamento foi instalado na saída do inversor, armazena dados de tensão, corrente, energia ativa e reativa, fator de potência e eventuais distúrbios elétricos que possam ocorrer na rede. As especificações técnicas do equipamento estão evidenciadas na tabela 9 a seguir:



Figura 25 – Analisador de grandezas elétricas RE7000.

Fonte: EMBRASUL, 2019.

Tabela 9 – Especificações Técnicas Analisador de Grandezas Elétricas RE7000

Especificações Técnicas	
Faixa de Tensão CA	70 a 300 Vca (fase/neutro)
Faixa de Tensão CC	100 a 300 Vcc
Consumo	5 VA
Frequência	45 a 70 Hz
Circuitos de Medição	
Monofásico	2 fios
Bifásico	2 fios e 3 fios
Trifásico	3 fios, 4 fios e 5 fios

Fonte: EMBRASUL, 2019.

3.4 Metodologia

3.4.1 Avaliação dos Dados de Energia

Os dados de energia gerados, consumidos e injetados na rede pelo sistema foram obtidos de quatro maneiras:

a) Utilizando os dados fornecidos pelo medidor bidirecional, quando são quantificados os valores referentes à energia consumida na residência e à energia injetada na rede da concessionária;

b) Utilizando os dados apresentados nas faturas de energia elétrica fornecidas pela COPEL. A figura 26 exemplifica uma fatura de energia mostrando os valores consumidos e injetados na rede por meio do sistema referente ao mês de abril de 2019;



COPEL
Copel Distribuição S.A.
José Izidoro Biazetto, 158 bl.C - Mossunguê - Curitiba PR - CEP 81200-240
CNPJ: 04.368.898/0001-06 - IE 90.233.073-99 - IM 423.992-4



www.copel.com
0800 51 00 116

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
R UNIVERSITARIA, 2069 - UNIOESTE CASCAVEL
UNIVERSITARIO - CASCAVEL - PR - CEP: 85819-110

81776 01 036 579800
CNPJ 78.680.337/0002-65

Mês de referência
Abril/2019

Vencimento
25/05/2019

Unidade Consumidora
42063973

VALOR A PAGAR
R\$ 211,94

Responsabilidade da Manutenção de Ilumina Pública: Município 156 FAT-01-20197561104375-76

Informações Técnicas

Poder/Ppe-Educacao Superior - Graduacao			Constante de Multiplicação	Total Faturado	Consumo Médio Diário	Data de Apresentação	Próxima Leitura Prevista
Leitura Anterior	Leitura Atual	Medido					
14/03/2019 2487	12/04/2019 3029	29 dias 542 kWh	1	318 kWh	18,68 kWh	26/04/2019	14/05/2019

N° Medidor: RG 0380151920 - TRIFASICO

Histórico de Consumo e Pagamento

Mês	kWh	Dt.Pgto.	Valor
03/2019	686	25/04/2019	406,54
02/2019	796	25/03/2019	460,52
01/2019	733	25/02/2019	347,24
12/2018	599	25/01/2019	303,81
11/2018	434	21/12/2018	291,07
10/2018	353	25/11/2018	247,31
09/2018	276	25/10/2018	191,71
08/2018	328	25/09/2018	223,90
07/2018	234	25/08/2018	157,97

Valores Faturados

NOTA FISCAL/CONTA DE ENERGIA ELÉTRICA N° 072.029.609 - SÉRIE B

Validade em 04/04/2019

Produto Descrição	Un.	Consumo	Valor Unitário	Valor Total	Base Cálculo	Aliq. ICMS
ENERGIA ELETRICA CONSUMO	kWh	318	0,542767	172,60	0,00	0,00%
ENERGIA TRIBUT DIFERENCIADA	kWh	224	0,507455	113,67	0,00	0,00%
				39,34		
CONT ILUMIN PUBLICA MUNICIPIO				-113,67		
COMP CONS MICRO/MINI GERACAO	kWh	224				

Figura 26 – Fatura de energia elétrica.

Fonte: COPEL, 2019.

c) Utilizando os dados do site Solar Man, no qual são armazenados os valores de energia ativa e reativa, corrente e tensão elétrica fornecidos pelo inversor do sistema fotovoltaico. A figura 27 exemplifica uma curva de carga diária da geração de energia fornecida pelo sistema fotovoltaico, obtida do site Solar Man.

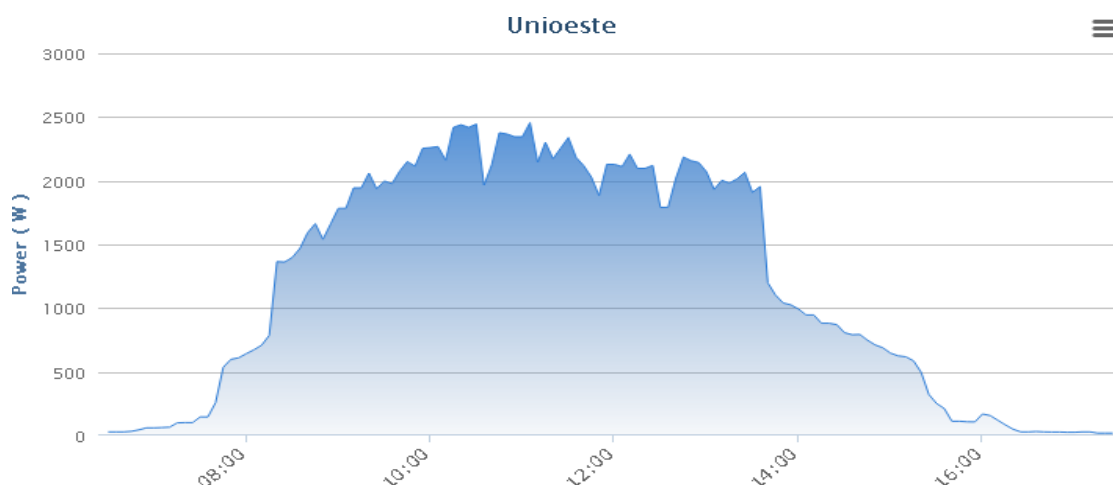


Figura 27 – Curva de carga diária do sistema fotovoltaico.

Fonte: SOLARMAN, 2019.

d) Utilizando os dados de energia armazenados no Analisador de Grandezas Elétricas, da EMBRASUL, que coleta os dados da energia gerada na saída do inversor.

3.4.2 Eficiência Energética do Sistema Fotovoltaico

Foram determinadas as eficiências energéticas dos módulos fotovoltaicos, do inversor e do sistema fotovoltaico completo, tal como salientado a seguir:

A eficiência dos módulos fotovoltaicos foi calculada a partir da razão entre a energia diária gerada pelo sistema fotovoltaico (kWh dia^{-1}) e a radiação solar diária incidente nos painéis (kWh dia^{-1}), segundo destacado na equação 14.

$$E_{f\text{módulos}} = \frac{E_{ger}}{E_{rad}} \times 100\% \quad \text{Eq. (14)}$$

Em que:

E_f = Eficiência dos módulos fotovoltaicos, %;

E_{ger} = Energia diária gerada pelo sistema fotovoltaico, kWh dia^{-1} ;

E_{rad} = Radiação solar diária incidente nos painéis, kWh dia^{-1} .

A eficiência do inversor do sistema foi calculada pela razão entre a potência aparente diária gerada pelo sistema fotovoltaico (kVAh dia^{-1}), e a energia diária

gerada pelo sistema fotovoltaico (kWh dia⁻¹), como pode ser conferido na equação 15.

$$E_f = \frac{S_{ca}}{E_{ger}} \times 100\% \quad \text{Eq. (15)}$$

Em que:

E_f = Eficiência do inversor fotovoltaico, %;

S_{ca} = Potência aparente diária gerada pelo sistema fotovoltaico, kVAh dia⁻¹;

E_{ger} = Energia diária gerada pelo sistema fotovoltaico, kWh dia⁻¹.

A eficiência total do sistema foi calculada a partir da razão entre a potência aparente gerada pelo sistema fotovoltaico (kVAh dia⁻¹) e a radiação solar diária incidente nos painéis (kWh dia⁻¹), como mostrado na equação 16.

$$E_f = \frac{S_{ca}}{E_{rad}} \times 100\% \quad \text{Eq. (16)}$$

Em que:

E_f = Eficiência do sistema fotovoltaico, %;

S_{ca} = Potência aparente diária gerada pelo sistema fotovoltaico, kVAh dia⁻¹;

E_{rad} = Radiação solar diária incidente nos painéis, kWh dia⁻¹.

3.4.3 Avaliação Econômica

A avaliação econômica foi realizada a partir dos custos de aquisição e manutenção do sistema fotovoltaico - considerando a vida útil de cada um dos equipamentos - e dos custos evitados da energia consumida da concessionária, obtidos a partir das faturas de energia elétrica. Para este trabalho, foi levada em conta uma vida útil de 10 anos para o inversor, disjuntor e DPS, e de 25 anos para os painéis fotovoltaicos e demais componentes elétricos da instalação. Foi considerada também uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 6% aa (valor considerado adequado para avaliar sistemas de geração de energia). Para quantificar a viabilidade econômica do sistema, foram utilizados os índices Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e *Payback* Descontado (PBD), de acordo com as equações 2, 3 e 4 exibidas anteriormente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados referentes à radiação solar (obtidos por meio de um piranômetro conectado ao datalogger), e referentes às grandezas elétricas de tensão, corrente e potência (obtidos por meio do RE7000), foram coletados para os meses de setembro, outubro e novembro de 2019. Os demais dados referentes à geração, injeção e consumo de energia elétrica foram obtidos a partir das faturas de energia da COPEL, do medidor bidirecional e do site da Solar Man, para todos os meses do ano de 2019.

Primeiro, foram exibidos os resultados referentes aos dados de coleta de radiação solar. Na figura 28, estão destacados os valores de frequência de ocorrência de radiação solar referentes aos meses em estudo e na figura 29 uma curva de radiação solar mostrando o comportamento em um dia de sol com poucas nuvens.

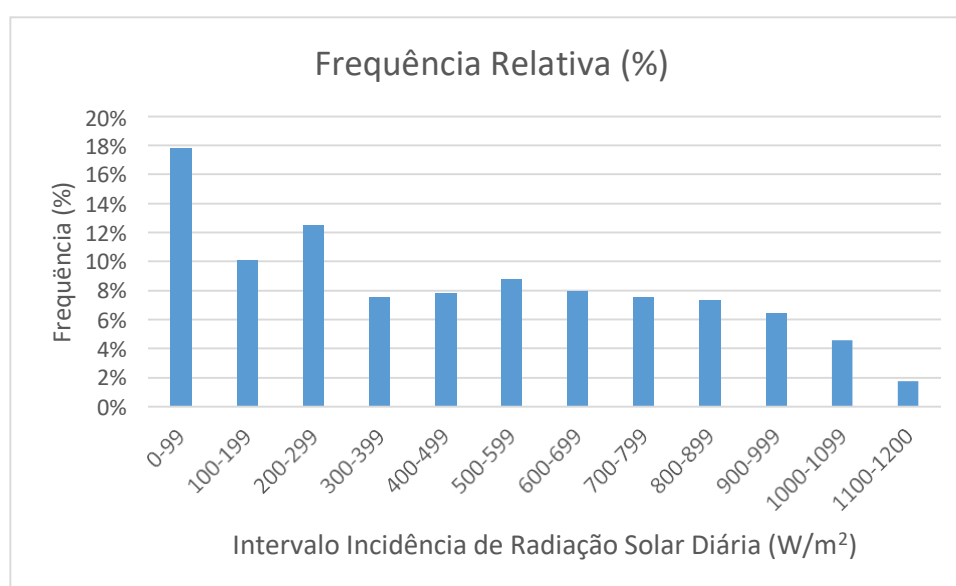


Figura 28 – Frequência de ocorrência da radiação (%) x Incidência de radiação Solar diária (W/m²).

Os valores mais frequentes de radiação solar ocorrem entre 0 e 99 W/m², e entre 200 e 299 W/m², enquanto as menores incidências estão entre 1100 e 1200 W/m².

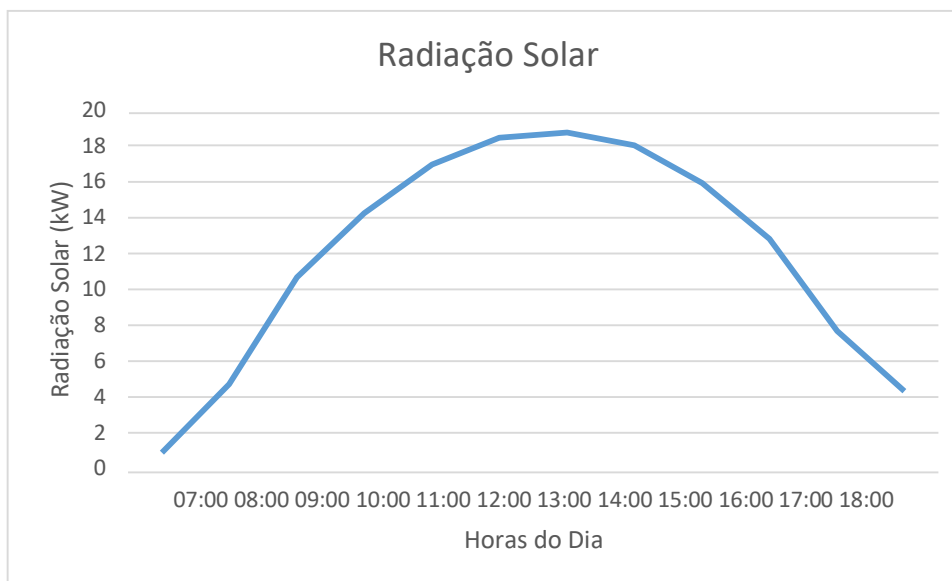


Figura 29 – Radiação solar (kW) x Horas do dia (h).

Na figura 29, estão em evidência os dados obtidos no dia 25/11/2019. A data foi escolhida por representar um dia de sol com poucas nuvens. Os dados já estão corrigidos em relação à inclinação de 21° dos módulos fotovoltaicos, pois é possível observar que o comportamento da radiação solar segue uma curva uniforme, assim como os mais elevados valores de radiação solar ocorrem próximos ao horário do meio dia, ao passo que os menores no início da manhã e no final da tarde.

4.1 Avaliação dos Dados de Energia

Para apresentar os dados de energia gerada, consumida e injetada, foram montados alguns gráficos e tabelas a fim de melhor exemplificar os valores encontrados.

Quanto aos dados de energia gerada, utilizou-se duas formas para obtê-los: a primeira utilizando o site Solar Man, que armazena os dados enviados pelo inversor, e a segunda utilizando o analisador de grandezas RE7000, equipamento que foi instalado na saída do inversor. As figuras 30 a 40 exibem as comparações de valores obtidos em cada um dos equipamentos.

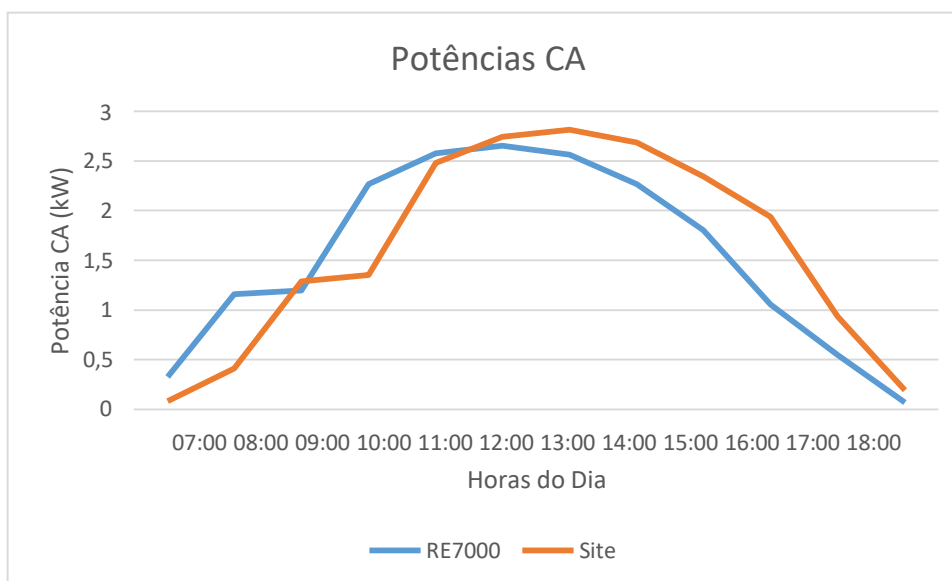


Figura 30 – Potência ativa CA (RE7000, em kW) e Potência ativa CA (site, em kW) x Horas do dia.

Na figura 30, são mostrados os valores de potência ativa para cada um dos equipamentos em relação às horas do dia. Foi escolhido o dia 25/11/2019, um dia de sol com poucas nuvens, mesmo do gráfico anterior, para demonstrar a diferença encontrada. Como se pode observar, os dois gráficos apresentam curvas semelhantes, porém, de modo geral, o site salienta valores ligeiramente mais elevados que os do analisador. Nesse dia específico, o valor máximo de potência destacado pelo site foi de 2,82 kW e pelo analisador de energia 2,66 kW.

As figuras 31, 32 e 33 apresentam os valores de radiação solar diários para o ângulo de inclinação dos módulos (21°), a energia gerada em corrente contínua pelos módulos fotovoltaicos (dados fornecidos apenas pelo site Solar Man) e a energia aparente gerada fornecida pelo RE7000, em relação aos dias de cada mês em estudo (setembro, outubro e novembro).

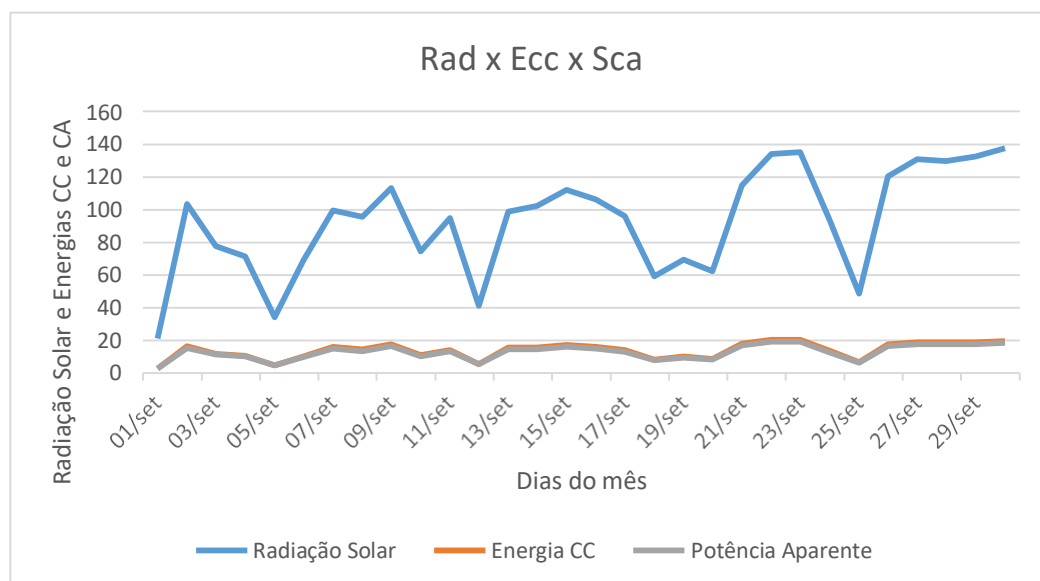


Figura 31 – Radiação solar (kWh/dia), Energia CC (kWh/dia) e Energia aparente (kVAh/dia) x Dias do mês de setembro.

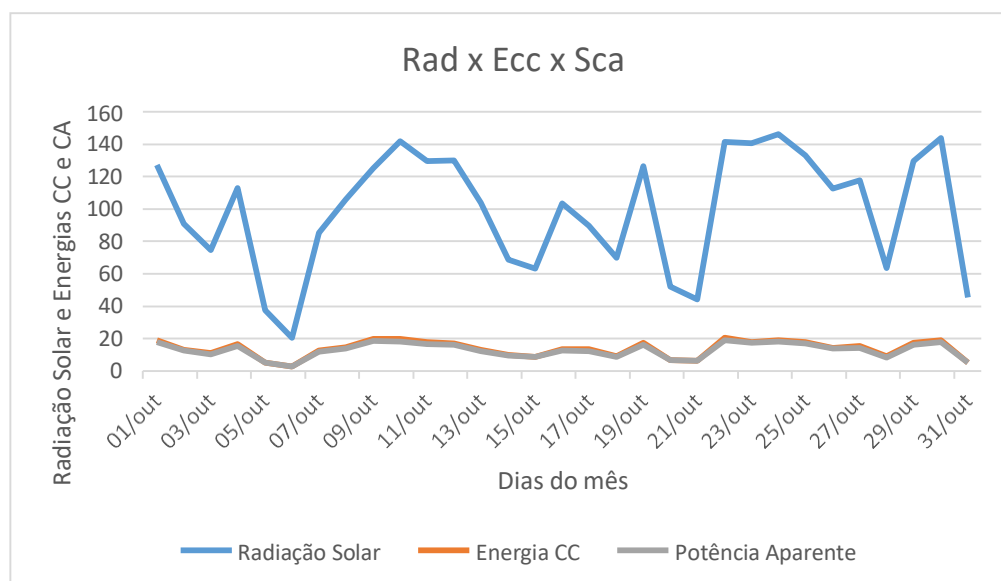


Figura 32 – Radiação solar (kWh/dia), Energia CC (kWh/dia) e Energia aparente (kVAh/dia) x Dias do mês de outubro.

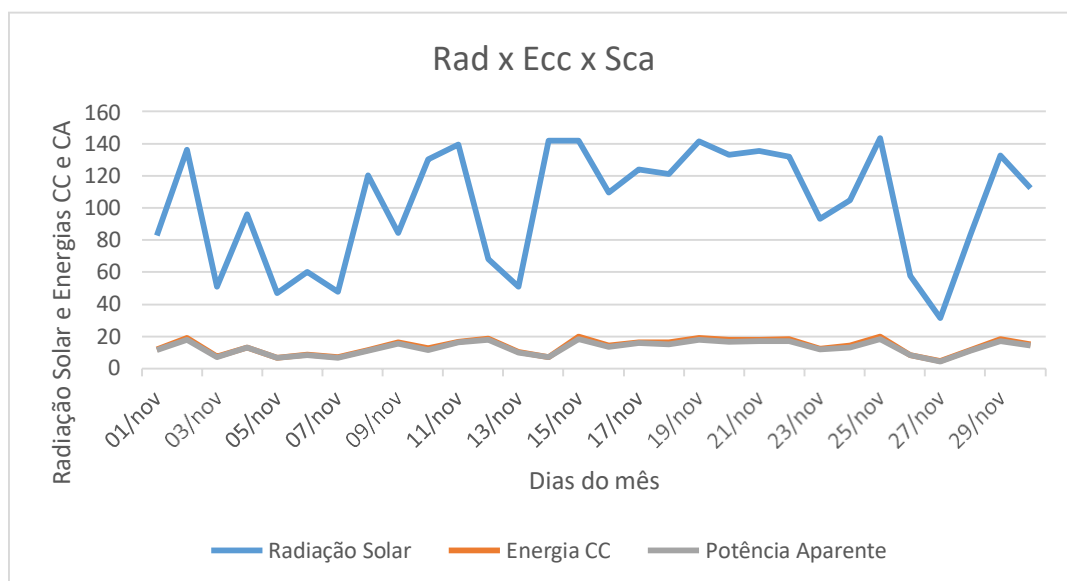


Figura 33 – Radiação solar (kWh/dia), Energia CC (kWh/dia) e Energia aparente (kVAh/dia) x Dias do mês de novembro.

Nas figuras 31, 32 e 33, é possível perceber que a energia gerada segue uma curva semelhante à radiação solar, assim como os dados de energia em corrente contínua e alternada são muito próximos, indicando que o inversor utilizado possui boa eficiência de conversão.

Observando-se as faturas de energia elétrica fornecidas pela concessionária (COPEL), foi possível representar a quantidade de energia consumida e injetada na rede pelo sistema fotovoltaico no ano de 2019. A figura 34 apresenta esses valores.

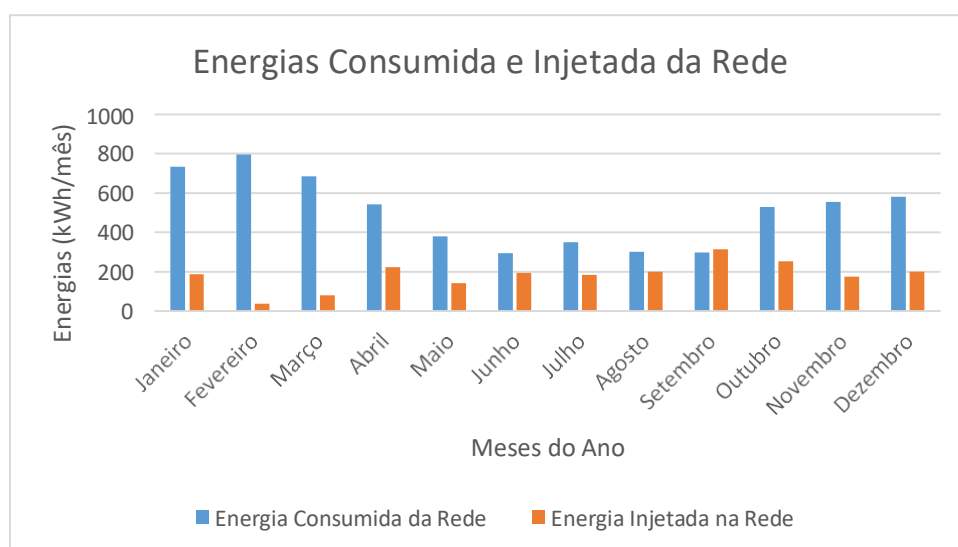


Figura 34 – Energia consumida (kWh/mês) e Energia injetada (kWh/mês) x Meses do ano.

Pode-se verificar que, na maioria dos meses, a energia consumida da rede foi maior que a energia injetada, exceto pelo mês de setembro, quando ocorreu uma geração ligeiramente maior que o consumo. É importante destacar que, a partir do mês de julho, houve a troca do inversor, que pode ter afetado o desempenho do sistema.

Como o inversor tem a possibilidade de analisar cada *string* separadamente, as figuras 35, 36 e 37 apresentam as curvas de energia em corrente contínua de cada uma delas em relação aos dias de cada mês de estudo (setembro, outubro e novembro).

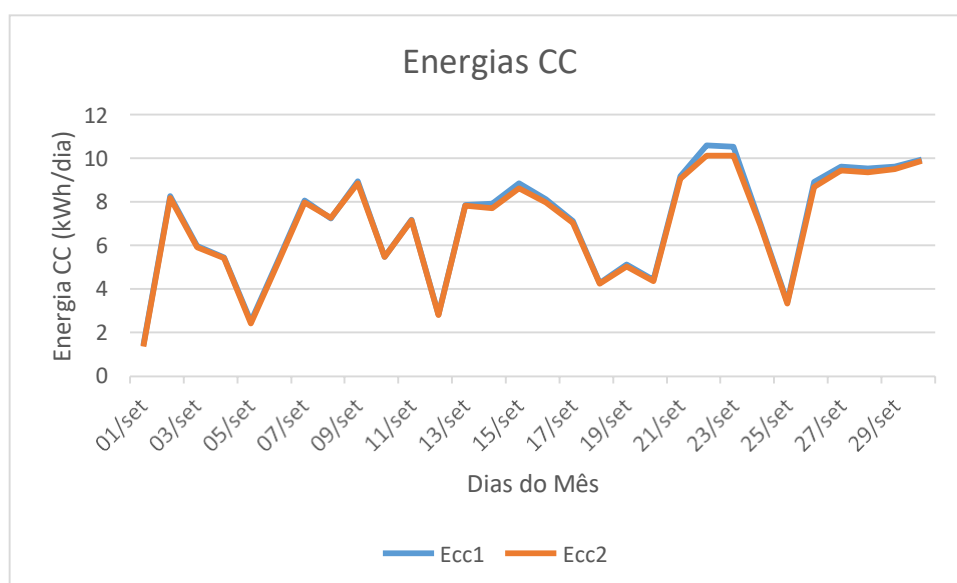


Figura 35 – Energia CC1 e Energia CC2 x Dias do mês de setembro.

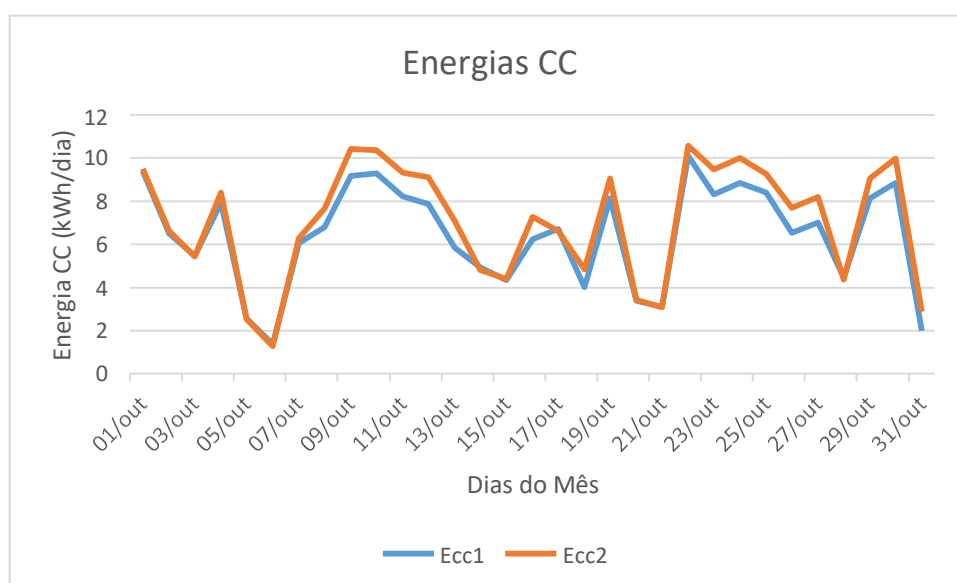


Figura 36 – Energia CC1 e Energia CC2 x Dias do mês de outubro.

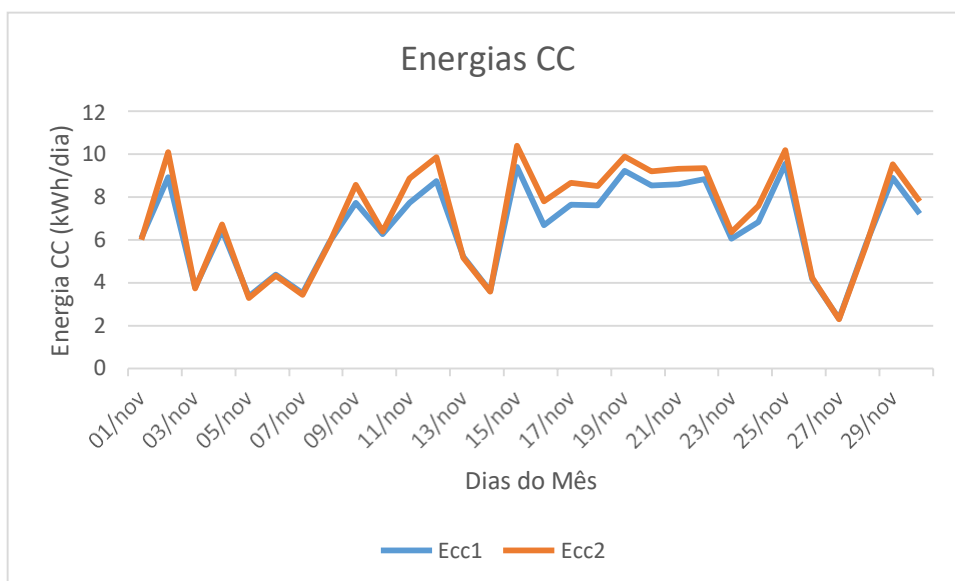


Figura 37 – Energia CC1 e Energia CC2 x Dias do mês de novembro.

É possível perceber nas figuras 35, 36 e 37 que a energia gerada por ambas as *strings* é muito semelhante e pequenas variações dos valores de energia exibidos podem ocorrer em razão das características construtivas intrínsecas dos módulos.

Nas figuras 38, 39 e 40 estão as comparações entre o analisador de energia RE7000 e o site Solar Man, referentes aos valores da energia gerada em corrente alternada de cada um deles, em relação aos dias de cada mês em estudo (setembro, outubro e novembro).

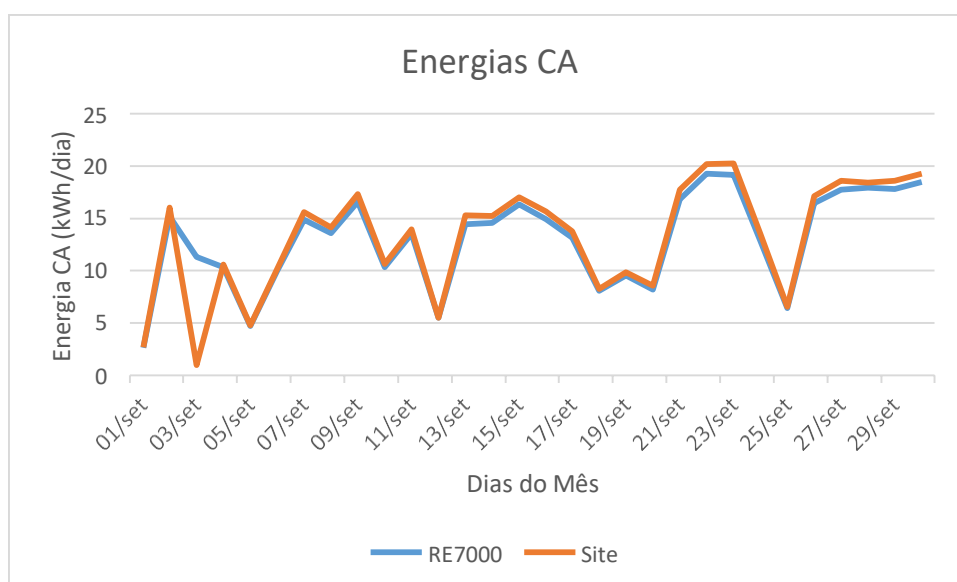


Figura 38 – Energia CA (kWh/dia) do RE7000 e Energia CA (kWh/dia) do Site x Dias do mês de setembro.

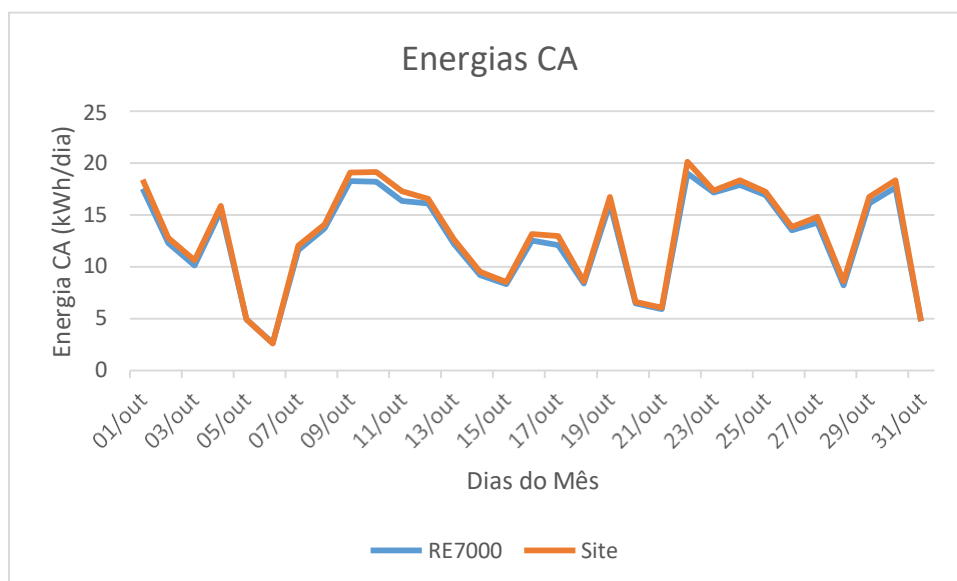


Figura 39 – Energia CA (kWh/dia) RE7000 e Energia CA (kWh/dia) Site x Dias do mês de outubro.

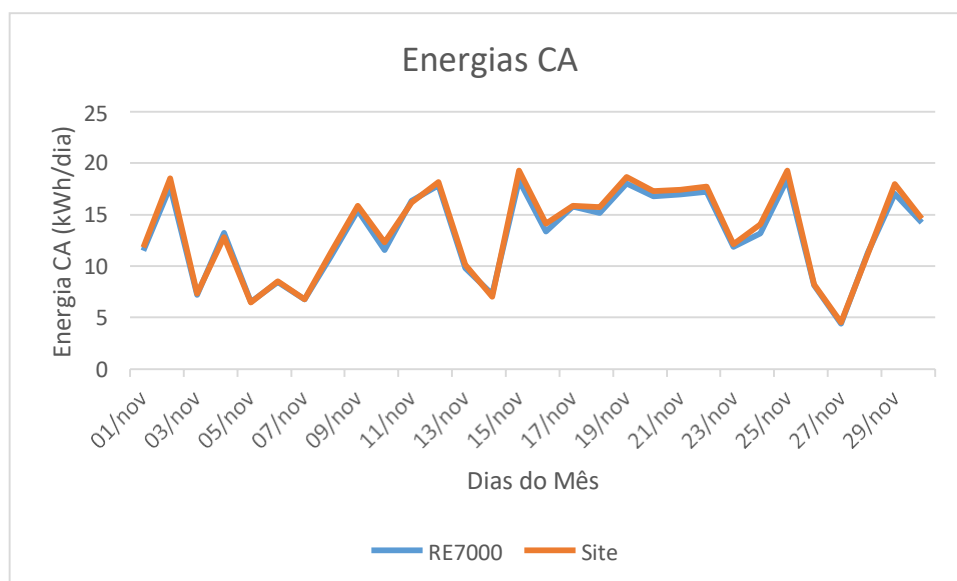


Figura 40 – Energia CA (kWh/dia) RE7000 e Energia CA (kWh/dia) Site x Dias do mês de novembro.

De modo geral, as duas curvas apresentam o mesmo comportamento, porém, novamente, o site Solar Man apresenta valores ligeiramente maiores que os valores apresentados pelo analisador de energia RE7000.

Utilizando-se os dados de energia gerada pelo sistema fotovoltaico, injetada e consumida pela rede, obtidos a partir da fatura de energia elétrica da COPEL, do medidor bidirecional e do site Solar Man, elaborou-se uma tabela resumo acerca do sistema fotovoltaico (Tabela 10):

Tabela 10 – Resumo do Sistema Fotovoltaico

Mês	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Janeiro	354,9	898,9	733,0	189,0	0,0	544,0	347,24	544,44	197,20
Fevereiro	128,3	885,3	796,0	39,0	0,0	757,0	460,52	530,95	70,43
Março	189,0	793,0	686,0	82,0	0,0	604,0	406,54	509,41	102,87
Abril	343,0	661,0	542,0	224,0	0,0	318,0	211,94	398,11	186,17
Maio	322,1	560,1	380,0	142,0	0,0	238,0	183,24	359,58	176,34
Junho	277,3	378,3	295,0	194,0	0,0	101,0	83,47	235,49	152,02
Julho	286,7	454,7	352,0	184,0	0,0	168,0	126,81	285,69	158,88
Agosto	378,2	478,2	301,0	201,0	0,0	100,0	88,62	306,92	218,30
Setembro	408,4	393,4	300,0	315,0	0,0	100,0	87,32	261,07	173,75
Outubro	454,4	730,4	530,0	254,0	115,0	161,0	132,75	463,10	330,35
Novembro	378,0	758,0	556,0	176,0	0,0	380,0	258,74	476,98	218,25
Dezembro	427,6	809,6	583,0	201,0	0,0	382,0	260,52	508,11	247,59
TOTAL	3.947,9	7.800,9	6.054,0	2.201,0	115,0	3.853,0	2.647,70	4.879,85	2.232,14

Sendo:

A) Energia total gerada pelo sistema fotovoltaico (kWh).

Estes dados foram obtidos utilizando-se do site Solar Man, considerando a energia que foi gerada durante os dias que compreendiam a fatura. Por exemplo: A fatura do mês de novembro de 2019 compreende os dias 15/10/2019 a 13/11/2019.

B) Energia total consumida nas residências (kWh).

Foi obtida por meio da equação 17:

$$E_{con\ res} = E_{tot\ FV} - E_{inj\ rede} + E_{tot\ con\ rede} \quad \text{Eq. (17)}$$

Onde:

$E_{con\ res}$ = Energia total consumida nas residências (kWh);

$E_{tot\ FV}$ = Energia total gerada pelo sistema fotovoltaico (kWh);

$E_{inj\ rede}$ = Energia total injetada na rede (kWh);

$E_{tot\ con\ rede}$ = Energia total consumida da rede (kWh).

C) Energia total consumida da rede (kWh).

Obtido diretamente da fatura de energia.

D) Energia total injetada na rede (kWh).

Obtido diretamente da fatura de energia

E) Saldo de energia armazenada em meses anteriores (kWh).

Foi obtida por meio da equação 18:

$$Saldo_{armaz} = E_{inj\ rede} - (E_{tot\ con\ rede} - Saldo_{armaz\ mês\ anterior} - E_{faturada}) \quad Eq. (18)$$

Onde:

$Saldo_{armaz}$ = Saldo de energia armazenada (kWh);

$Saldo_{armaz\ mês\ anterior}$ = Saldo de energia armazenada no mês anterior (kWh);

$E_{faturada}$ = Energia faturada (kWh).

F) Energia faturada (kWh).

Foi obtida por meio da equação 19:

$$E_{faturada} = E_{tot\ con\ rede} - E_{inj\ rede} - Saldo_{armaz} \quad Eq. (19)$$

Obs: Se a energia faturada for menor ou igual a 100 kWh/mês, considera-se o valor mínimo de 100 kWh/mês (taxa de disponibilidade cobrada pela concessionária de energia, para padrões de entrada trifásicos).

G) Total da fatura COM o sistema fotovoltaico (R\$).

Foi obtida por meio da equação 20:

$$Fatura_{COM\ FV} = (E_{faturada} \times Tarifa_{com\ imp.}) + Ilum. Pública \quad Eq. (20)$$

Onde:

$Fatura_{COM\ FV}$ = Total da fatura COM o sistema fotovoltaico (R\$);

$Tarifa_{com\ imp.}$ = Tarifa de energia elétrica com impostos (R\$/kWh);

$Ilum. Pública$ = Taxa de iluminação públicas somada a outras taxas adicionais cobradas eventualmente.

Obs: Tarifa com impostos corresponde à $Tarifa Publicada / (1 - PIS + COFINS + ICMS)$;

Valores adicionais referentes às bandeiras tarifárias (R\$/kWh):

- Amarela (de janeiro a junho de 2019): 0,01000;

- Amarela (de julho a novembro de 2019): 0,01500;
- Amarela (dezembro de 2019): 0,01343;
- Vermelha P1 (de janeiro a junho de 2019): 0,03000;
- Vermelha P1 (de julho a outubro de 2019): 0,04000;
- Vermelha P1 (de novembro a dezembro de 2019): 0,04169.

H) Total da fatura SEM o sistema fotovoltaico (R\$).

Foi obtida por meio da equação 21:

$$Fatura_{SEM\ FV} = (E_{con\ res} \times Tarifa_{com\ imp.}) + Ilum. Pública \quad Eq. (21)$$

Onde:

$Fatura_{SEM\ FV}$ = Total da fatura SEM o sistema fotovoltaico (R\$);

I) Total economizado (R\$).

Diferença entre os valores das faturas SEM e COM o sistema fotovoltaico, conforme equação 22:

$$Total_{Econ} = Fatura_{SEM\ FV} - Fatura_{COM\ FV} \quad Eq. (22)$$

Onde:

$Total_{Econ}$ = Total economizado (R\$).

Como observado na tabela 10, a maioria dos meses apresentou uma geração de energia aquém do consumo. O único mês em que a energia gerada excedeu o consumo foi no mês de setembro com 115 kWh, energia que foi utilizada posteriormente no mês de outubro.

Tornou-se possível também verificar que a energia faturada no ano de 2019 foi de 3.853 kWh, o que representou com o sistema fotovoltaico um custo com energia elétrica de R\$ 2.647,70. Essa mesma energia faturada, caso não se tivesse o sistema fotovoltaico, representaria um custo de R\$ 4.879,85, o que reflete uma economia de R\$ 2.232,14 ao longo do ano.

A figura 41 apresenta uma comparação da energia efetiva gerada no sistema instalado, com a energia gerada simulada pela empresa fornecedora do sistema fotovoltaico.

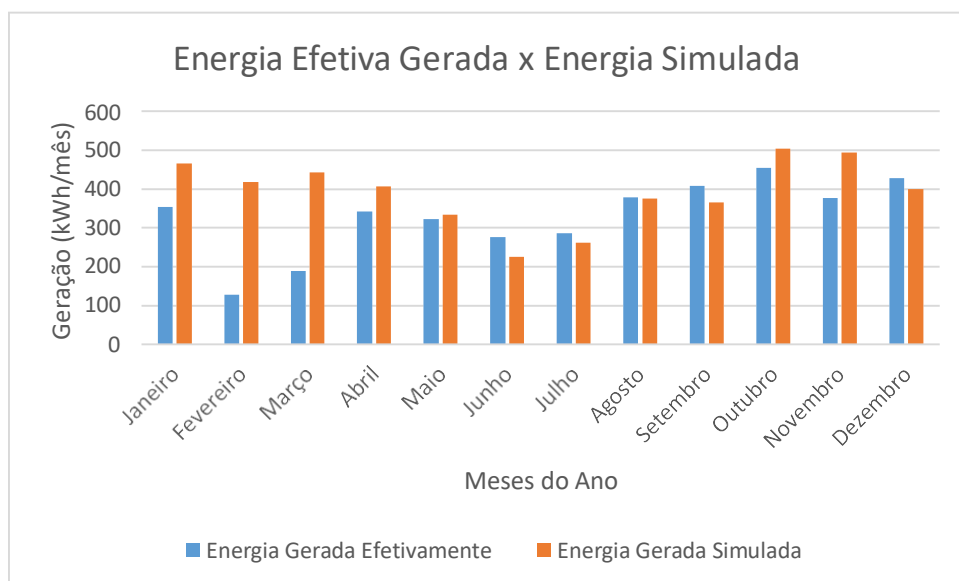


Figura 41 – Energia gerada efetiva (kWh) e energia gerada simulada (kWh) x meses do ano.

Observando-se a figura 41, é possível verificar que, em alguns meses do ano, os valores da energia gerada efetiva e simulada apresentaram diferenças bastante significativas. Ao longo do ano, a geração efetiva totalizou 3.947,9 kWh, enquanto a geração simulada totalizou 4.701 kWh, sendo a primeira 16,02% menor que a segunda.

Na figura 42, foram comparados os valores de energia efetiva gerada, com os valores do consumo total do projeto CASA.

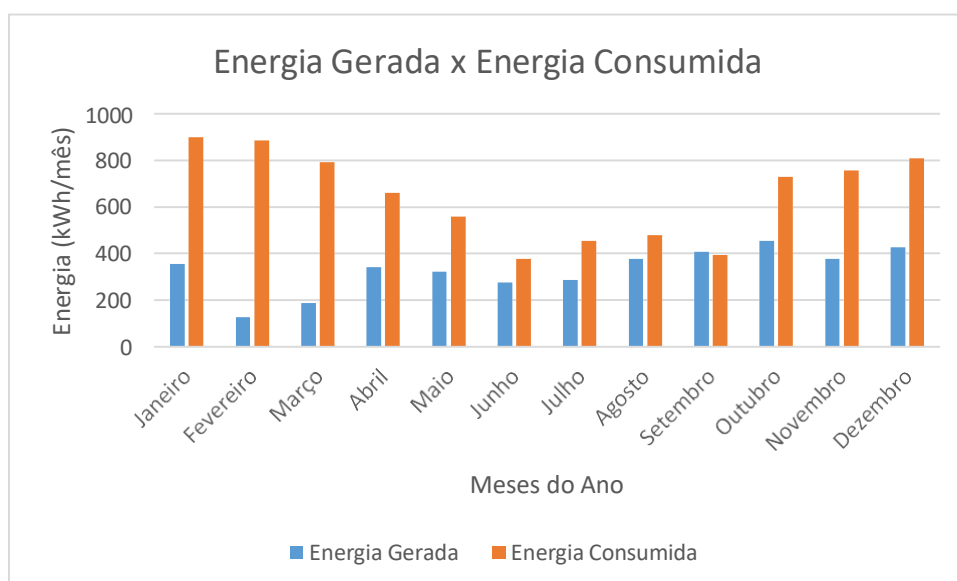


Figura 42 – Energia efetiva gerada pelo sistema (kWh) e consumo de energia total do projeto CASA (kWh) x meses do ano

Como é possível observar na figura 42, em praticamente todos os meses do ano, a energia gerada pelo sistema ficou aquém da energia consumida pelas residências do projeto CASA, com exceção do mês de setembro, quando a geração foi superior ao consumo, gerando um excedente que foi utilizado no mês subsequente. Ao longo do ano, a geração efetiva totalizou 3.947,9 kWh, enquanto a energia consumida totalizou 7.800,9 kWh, sendo a primeira 49,4% menor que a segunda.

4.2 Eficiência Energética do Sistema Fotovoltaico

Foram determinadas as eficiências energéticas dos módulos fotovoltaicos, do inversor e do sistema completo, a partir dos dados de radiação solar e energia gerada obtidos para os meses de setembro, outubro e novembro de 2019. As eficiências foram calculadas pelas equações 14, 15 e 16, e estão apresentadas nas figuras 43, 44 e 45.

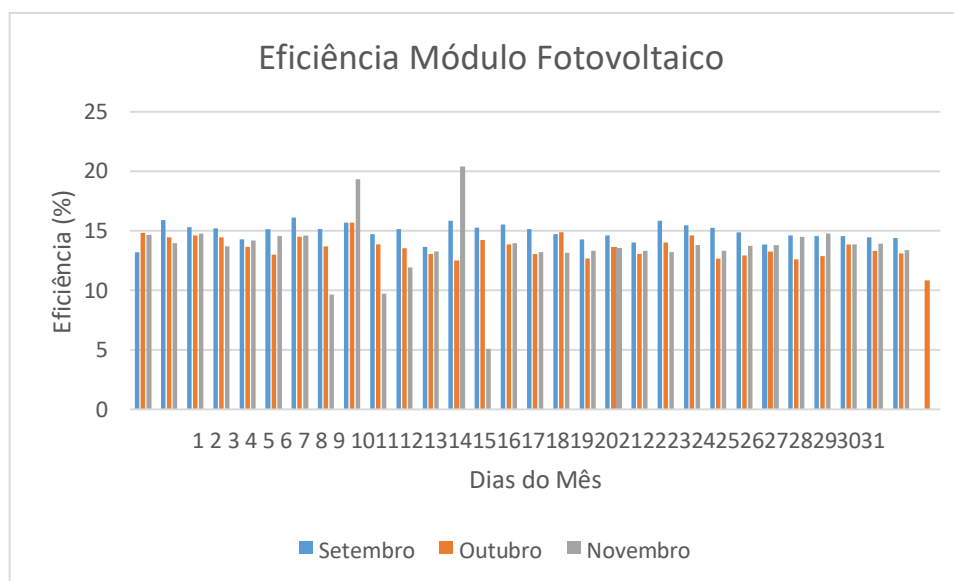


Figura 43 – Eficiências médias diárias dos módulos fotovoltaicos x Dias do mês.

A eficiência média diária dos módulos fotovoltaicos para o mês de setembro foi de 14,9%, para o mês de outubro foi de 13,58% e para o mês de novembro foi de 13,62%.

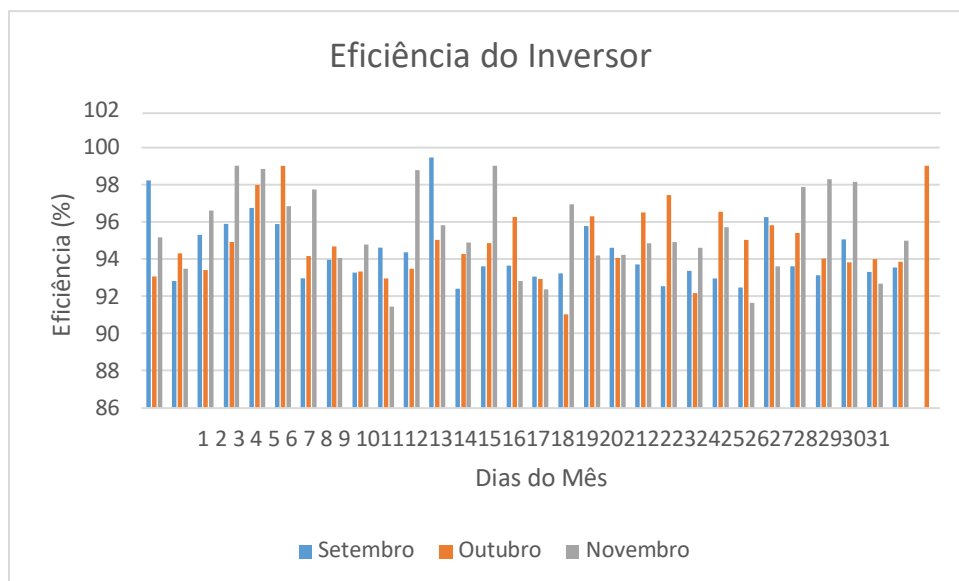


Figura 44 – Eficiências médias diárias do inversor x Dias do mês.

A eficiência média diária do inversor para o mês de setembro foi de 94,32%, para outubro foi de 94,81% e para novembro foi de 95,47%.

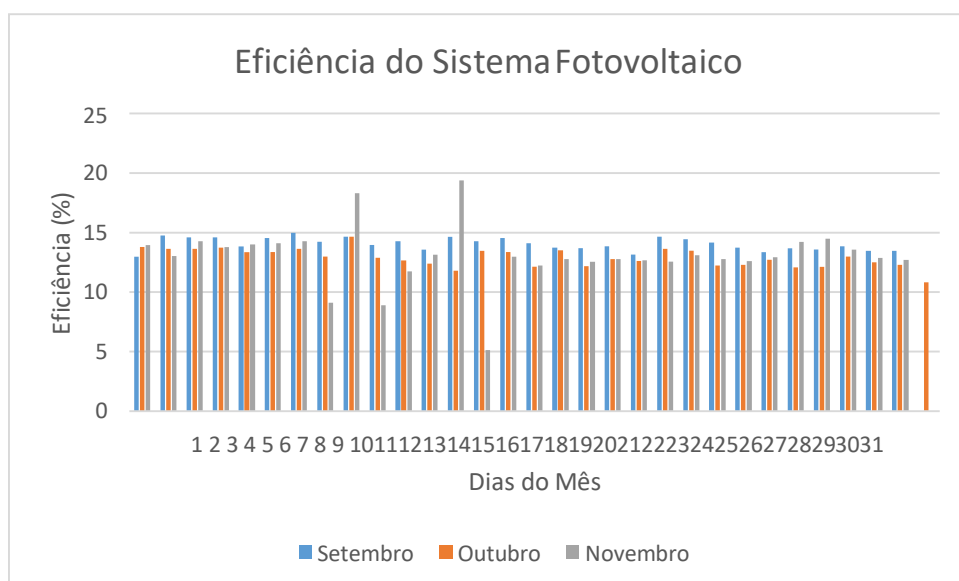


Figura 45 – Eficiências médias diárias totais do sistema fotovoltaico x Dias do mês.

A eficiência média diária total do sistema fotovoltaico para o mês de setembro foi de 14,04%, de outubro 12,9% e de novembro foi 13,02%.

Os valores de eficiência média diária dos módulos fotovoltaicos, para os três meses em estudo, foram 14,03%, do inversor foi de 94,87%, e do sistema completo foi de 13,32%. Segundo Cepel-Cresesb (2014), os módulos fotovoltaicos

policristalinos com selo Inmetro A devem apresentar eficiência maior do que 13,5%, e os inversores devem apresentar eficiência variando na faixa de 50 a 95%, dependendo das condições de funcionamento. Sendo assim, os valores das eficiências encontradas neste trabalho estão compatíveis com os apresentados na literatura.

4.3 Avaliação Econômica

Para realizar a viabilidade econômica do sistema, foram utilizados os índices Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e *Payback* Descontado (PBD).

Algumas premissas foram adotadas para viabilizar a realização dos cálculos:

- Vida útil do inversor, disjuntor e DPS: 10 anos;
- Vida útil dos módulos fotovoltaicos e demais dispositivos elétricos: 25 anos;
- Taxa Mínima de Atratividade (TMA): 6% ao ano;
- Variação anual da tarifa de energia elétrica nos últimos 8 anos: 6,5% ao ano;
- Depreciação energética do sistema fotovoltaico: 0,8% ao ano;
- Custo total de instalação do sistema fotovoltaico: R\$ 20.980,00;
- Custo do inversor: R\$ 5.000,00.

A tabela 11 evidencia os valores referentes à avaliação econômica realizada para o sistema fotovoltaico.

Tabela 11 – Resultados da Avaliação Econômica

Período (anos)	Custo do Sistema (R\$)	Receita (Custos Evitados) (R\$)	Saldo (R\$)	Saldo VP (R\$)	Saldo VP Acumulado (R\$)
0	20.980,00	0,00	-20.980,00	-20.980,00	-20.980,00
1	0,00	2.232,14	2.232,14	2.105,79	-18.874,21
2	0,00	2.359,37	2.359,37	2.099,83	-16.774,37
3	0,00	2.493,86	2.493,86	2.093,89	-14.680,49
4	0,00	2.636,01	2.636,01	2.087,96	-12.592,52
5	0,00	2.786,26	2.786,26	2.082,05	-10.510,47
6	0,00	2.945,08	2.945,08	2.076,16	-8.434,31
7	0,00	3.112,94	3.112,94	2.070,29	-6.364,02
8	0,00	3.290,38	3.290,38	2.064,43	-4.299,59
9	0,00	3.477,93	3.477,93	2.058,58	-2.241,01
10	5.000,00	3.676,18	-1.323,82	-739,22	-2.980,23
11	0,00	3.885,72	3.885,72	2.046,95	-933,28
12	0,00	4.107,20	4.107,20	2.041,15	1.107,88
13	0,00	4.341,31	4.341,31	2.035,38	3.143,25
14	0,00	4.588,77	4.588,77	2.029,62	5.172,87
15	0,00	4.850,33	4.850,33	2.023,87	7.196,74
16	0,00	5.126,80	5.126,80	2.018,15	9.214,89
17	0,00	5.419,03	5.419,03	2.012,43	11.227,32
18	0,00	5.727,91	5.727,91	2.006,74	13.234,06
19	0,00	6.054,40	6.054,40	2.001,06	15.235,12
20	5.000,00	6.399,50	1.399,50	436,37	15.671,49
21	0,00	6.764,27	6.764,27	1.989,75	17.661,24
22	0,00	7.149,84	7.149,84	1.984,12	19.645,35
23	0,00	7.557,38	7.557,38	1.978,50	21.623,86
24	0,00	7.988,15	7.988,15	1.972,90	23.596,76
25	0,00	8.443,47	8.443,47	1.967,32	25.564,07

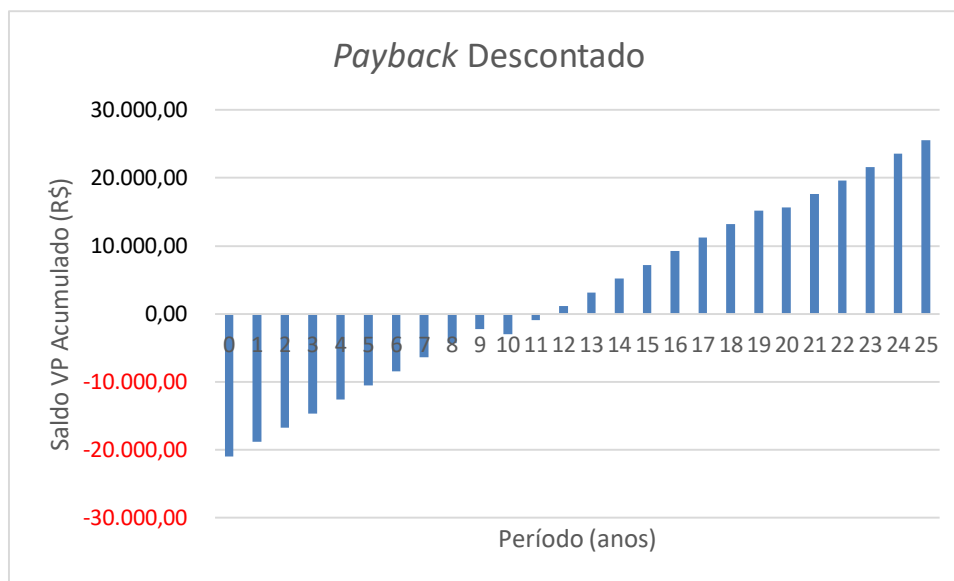


Figura 46 – Retorno do investimento.

Com base na avaliação econômica realizada, verificou-se que o tempo de retorno do capital investido (*payback* descontado) é de 12 anos, a TIR é de 14,1% aa, e o VPL é de R\$25.564,07. Todos os índices indicam que o investimento é economicamente viável (*payback* menor que a vida útil total do sistema, TIR maior que a TMA adotada e VPL positivo). No entanto, de modo geral, os índices de viabilidade encontrados são inferiores aos índices apresentados pelos fornecedores dos equipamentos.

5. CONCLUSÕES

Em relação aos valores de energia gerada pelo sistema fotovoltaico, foi possível identificar uma semelhança entre os valores coletados no site Solar Man e no analisador de energia RE7000. Contudo, o site apresenta valores ligeiramente maiores.

O custo com a energia elétrica após a instalação do sistema fotovoltaico, no ano de 2019, foi de R\$ 2.647,70. Caso o sistema fotovoltaico não estivesse instalado, esse custo seria de R\$ 4.879,85, refletindo uma economia de R\$ 2.232,14 ao longo do ano.

Os dados de energia efetivamente gerados pelo sistema fotovoltaico são 16,02% menores que os valores simulados pela empresa fornecedora do sistema, apresentados na proposta de venda.

A energia efetivamente gerada pelo sistema ficou aquém da energia consumida pelas residências do projeto CASA, em praticamente todos os meses do ano, exceto no mês de setembro, quando houve um excedente de 115 kWh.

Os valores de eficiência média para os três meses de estudo foram de 14,03% para os módulos fotovoltaicos, de 94,87% para o inversor e de 13,32% para o sistema completo.

Para a avaliação econômica, o *payback* descontado foi de 12 anos, a TIR foi de 14,1% aa, e o VPL foi de R\$ 25.564,07, resultados que confirmam a viabilidade econômica do sistema, porém com uma margem de segurança muito restrita.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11704:2008 Sistemas Fotovoltaicos – Classificação**. 2008. Disponível em:

<https://energypedia.info/images/temp/d/d2/20140508124638!phpU5v7IA.pdf>. Acesso em: 30 de maio de 2019.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 1 edição. 2002. Disponível em:

http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/livro_atlas.pdf. Acesso em: 24 de abril de 2019.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **REN 687 – Resolução Normativa 687**. 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso

em: 08 de abril 2019.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Geração Distribuída**. 2019.

Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>. Acesso em: 17 de abril de 2019.

AVILA, A. V. **Matemática Financeira e Engenharia Econômica**. 2013. 228 p.

Programa de Educação Tutorial da Engenharia Civil – UFSC. Florianópolis.

Disponível em: <http://pet.ecv.ufsc.br/arquivos/apoio-didatico/Eng%C2%AA%20Economica~AULAS~2013.pdf>. Acesso em: 15 de maio de 2019.

BEN - Balanço Energético Nacional. **Relatório Final – Ano Base 2018**. 2019.

Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>. Acesso em: 10 de novembro de 2019.

BLUESOL, ENERGIA SOLAR. **Livro Digital de Introdução aos Sistemas Solares**.

2019. Disponível em: <http://programaintegradoronline.com.br/wp-content/uploads/2016/03/Livro-Digital-de-Introdu%C3%A7%C3%A3o-aos-Sistemas-Solares-novo.pdf>. Acesso em: 27 de junho de 2019.

CALZA, L. F. **Análise Técnico-Econômica da Implantação de um Sistema de Aquecimento Solar para Suprir a Demanda de Água Quente dos Vestiários de**

um Frigorífico Localizado na Região Oeste do Paraná. 2014. 67 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste, Cascavel - PR. Fevereiro de 2014. Disponível em: http://portalpos.unioeste.br/media/File/energia_agricultura/Dissertacao_Lana_F_Calz a.pdf. Acesso em: 15 de maio de 2019.

CAMPBELL SCIENTIFIC. **Datalogger CR 1000.** 2019. Disponível em: <https://www.campbellsci.com.br/cr1000>. Acesso em: 13 de junho de 2019.

CAMPBELL SCIENTIFIC. **Piranômetro CMP3.** 2019. Disponível em: <https://www.campbellsci.com.br/cmp3-l>. Acesso em: 13 de junho de 2019.

CEPEL - CRESESB. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** 2014. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 24 de abril 2019.

COPEL. **Fatura de Energia Elétrica.** Abril de 2019.

COPIELLO, S.; GRILLENZONI, C. Solar Photovoltaic Energy and Its Spatial Dependence. **Energy Procedia.** Vol 141. 86-90. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.017>

CORIA, G.; PENIZZOTTO, F.; PRINGLES, R. Economic Analysis of Photovoltaic Projects: The Argentinian Renewable Generation Policy for Residential Sectors. **Renewable Energy.** Vol 133. 1167-1177. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.017>

COSTA, L. N. **O Comportamento do Mercado a Termo de Energia Elétrica no Brasil.** 2018. 51 p. Dissertação (Mestrado em Administração de Empresas) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC Rio, Rio de Janeiro – RJ. Abril de 2018. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/35002/35002.PDF>. Acesso em: 16 de abril de 2019.

CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Energia Solar Princípios e Aplicações.** 2006. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf. Acesso em: 24 de abril 2019.

DEBASTIANI, G. **Avaliação da Eficiência Energética de um Sistema Híbrido Eólico – Fotovoltaico para Cascavel – PR**. 2013. 64 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste, Cascavel - PR. Dezembro de 2013. Disponível em: [http://portalpos.unioeste.br/media/File/energia_agricultura/pdf/Dissertacao_Gilson_Debastiani\(1\).pdf](http://portalpos.unioeste.br/media/File/energia_agricultura/pdf/Dissertacao_Gilson_Debastiani(1).pdf). Acesso em: 03 de julho de 2018.

DUFFIE, J. A. BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4ª Edição. Laboratório de Energia Solar da Universidade de Wisconsin-Madison. Nova Jersey. 2013.

ELETRA ENERGY SOLUTIONS. **ARES 7023**. 2019. Disponível em: <http://www.eletraenergy.com.br/portifolio/19-medidores/medidores-comerciais-e-industriais/linha-ares/31-ares-7023>. Acesso em: 13 de junho de 2019.

EMBRASUL. **Analizador de Energia 7080**. 2019. Disponível em: http://www.embrasul.com.br/painel/pdf/Cat%C3%A1logo_RE7080_v06r00_pt_2019_LR.pdf. Acesso em: 27 de junho de 2019.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz Energética e Elétrica**. 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/abcdnenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 08 de abril de 2019.

FRONIUS. **Inversor Fronius Primo**. Disponível em: <https://www.fronius.com/pt-br/brasil/energia-solar/produtos/todos-os-produtos/inversor/fronius-primo/fronius-primo-3-0-1>. Acesso em: 05 de junho de 2019.

GALDINO, M. A. E. *et al.* O Contexto das Energias Renováveis no Brasil. **Revista da Direng**. 17-25. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/direng.pdf>. Acesso em: 24 de abril de 2019.

GOOGLE MAPS STREET VIEW. **Projeto CASA Unioeste**. 2011. Disponível em: https://www.google.com/maps/uv?hl=pt-BR&pb=!1s0x94f3d5b0d4455853:0x4481caebbf8c2424!2m2!1m1!1e1!1e2!1m1!1e3!2m2!1m1!1e5!2m2!1m1!1e4!2m2!1m1!1e6!3m1!7e115!4s/maps/place/Projeto%2BCASA%2BUnioeste/@-24.9895072,-53.4496995,3a,75y,319.48h,90t/data%3D*213m4*211e1*213m2*211seG3FAMVGp

UkyZ6hUe7hHoA*212e0*214m2*213m1*211s0x94f3d5b0d4455853:0x4481caebbf8c2424?sa%3DX!5sProjeto+CASA+Unioeste+-+Pesquisa+Google&imagekey=!1e2!2seG3FAMVGpUkyZ6hUe7hHoA&sa=X&ved=2ahUKEwIU2LHyt-fiAhXJFLkGHW0TD84Qpx8wCnoECAoQBg. Acesso em: 05 de junho de 2019.

INEE - Instituto Nacional de Eficiência Energética. **O que é Geração Distribuída.** 2019. Disponível em: http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp. Acesso em: 17 abril de 2019.

MINHA CASA SOLAR. **Painel Solar 330 W Risen Solar – RSM72-6-330P.** 2019. Disponível em: <https://www.minhacasasolar.com.br/produto/painel-solar-330w-risen-solar-rsm72-6-330p-79313>. Acesso em: 13 de junho de 2019.

MOCELIN, A. R. **Qualificação Profissional e Capacitação Laboratorial em Sistemas Fotovoltaicos.** 2014. 300 p. Tese (Doutorado em Energia) - Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo – USP. São Paulo – SP. 2014. Disponível em: http://www.iee.usp.br/lfs/sites/default/files/Tese_Andre_Mocelin.pdf. Acesso em: 29 de maio de 2019.

MUNDO DA ELÉTRICA. **Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS), como Funciona.** 2019. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/dispositivo-de-protecao-contrasurtos-dps-como-funciona/>. Acesso em: 27 de junho de 2019.

MUSSARD, M.; AMARA M. Performance of Solar Photovoltaic modules Under Arid Climatic Conditions: A Review. **Solar Energy.** Vol 174. 409-421. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.08.071>

MME – Ministério de Minas e Energia. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro novembro/2019.** Secretaria de Energia Elétrica. Departamento de Monitoramento do Sistema Elétrico. 2019. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/239673/909085/11.+Boletim+de+Monitoramento+do+Sistema+El%C3%A9trico+-+Nov+-+2019.pdf/929680b7-5e67-57f3-ef7b-47273c6aed55?version=1.1>. Acesso em: 20 de janeiro de 2020.

MME – Ministério de Minas e Energia. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira.** Nota Técnica EPE. Rio de Janeiro – RJ. 2012. Disponível em:

http://www.cogen.com.br/content/upload/1/documentos/Solar/Solar_COGEN/NT_EnergiaSolar_2012.pdf. Acesso em: 05 de junho de 2019.

NAKABAYASHI, R. K. **Microgeração Fotovoltaica no Brasil: Condições Atuais e Perspectivas Futuras**. 2014. 107 p. Dissertação (Mestrado em Energia do Instituto de Energia e Meio Ambiente) - Universidade de São Paulo – USP. São Paulo – SP. 2014. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde-26012015-141237/en.php>. Acesso em: 30 de maio de 2019.

NEOSOLAR. **Bateria Estacionária Heliar Freedom DF4100 (240 Ah/220 Ah)**. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/bateria-estacionaria-freedom-df4001-240ah-220ah.html>. Acesso em: 05 de junho de 2019.

NEOSOLAR. **Controlador de Carga Epsolar Landstar LS2024E 20A 12/24V**. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/controlador-de-carga-epsolar-landstar-ls2024e-20a-12-24v.html>. Acesso em: 05 de junho de 2019.

NEOSOLAR. **Sistemas de Energia Solar e seus Componentes**. 2019. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>. Acesso em: 27 de junho de 2019.

OBEIDAT, F. A Comprehensive review of future photovoltaic systems. **Solar Energy**. Vol 163. 545-551. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.050>

ONS - Operador Nacional do Sistema. **O Sistema Interligado Nacional**. 2019. Disponível em: <http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>. Acesso em: 16 de abril de 2019.

PAZUCH, F. A. **Desenvolvimento de uma Ferramenta Computacional para o Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos Isolados e Interligados à Rede**. 2017. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste, Cascavel – PR. Fevereiro de 2017. Disponível em: http://portalpos.unioeste.br/media/File/bruna.silva21/Dissertacao_Felix_Pazuch.pdf. Acesso em: 03 de julho de 2018.

RAZAVI, S. *et al.* Impact of Distributed Generation on Protection and Voltage Regulation of Distribution Systems: A Review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Vol. 105. 157-167. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.050>

RENOVIGI. **Inversor Monofásico Reno - 4K Plus**. 2019. Disponível em: <https://renovigi.com.br/produto/reno-4k-plus>. Acesso em: 13 de junho de 2019.

RIOS, I.; RIOS E. Microgeração Fotovoltaica Conectada à Rede Elétrica: O que Mudou com a Resolução Normativa N° 687 da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Revista Brasileira de Energia Solar**. Vol. 8. 119-122. 2017. Disponível em: <https://rbens.emnuvens.com.br/rbens/article/view/190>. Acesso em: 08 de abril de 2019.

SAMPAIO, P. G. V.; GONZÁLEZ, M. O. A. Photovoltaic Solar Energy: Conceptual Framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Vol 74. 590-601. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.081>

SILVA, R. M. **Energia Solar no Brasil: dos Incentivos aos Desafios**. Núcleo de Pesquisas e Consultoria Legislativa – Senado Federal. Brasília. 2015. Disponível em: <http://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/507212/TD166-RutellyMSilva.pdf?sequence=1>. Acesso em: 27 de maio de 2019.

SOLARMAN. **Monitoramento do Sistema Fotovoltaico**. Disponível em: <https://www.solarmanpv.com/portal/LoginPage.aspx>. Acesso em: 10 de julho de 2019.

SOUSA, J. L.; FERNANDES, R. C.; MARTINS, A. G. **A Resposta da Demanda no Setor Residencial: Estudo de Caso do Sul do Brasil**. Cidel 2018. Setembro de 2018. Buenos Aires, Argentina. 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.26/24369>. Acesso em: 02 de abril de 2019.

SUNTREE. **Protetor de Surto FV**. 2020. Disponível em: <https://renlight.com.br/wp-content/uploads/2019/07/DPS-SUNTREE.pdf>. Acesso em: 25 de janeiro de 2020.

TIEPOLO, G. M. *et al.* **Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. 1ª edição. 107p. Curitiba. 2017. Disponível em:

http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas_Solar_do_Estado_do_Parana.pdf. Acesso em: 23 de maio de 2019.

TIEPOLO, G. M. **Estudo do Potencial de Geração de Energia Elétrica Através de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede no Estado do Paraná**. 2015. 227 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS)) - Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Curitiba - PR. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/275828862_ESTUDO_DO_POTENCIAL_D_E_GERACAO_DE_ENERGIA_ELETRICA_ATRAVES_DE_SISTEMAS_FOTOVOLT_AICOS_CONECTADOS_A_REDE_NO_ESTADO_DO_PARANA. Acesso em: 16 de abril de 2019.

TONIN, F. S. **Caracterização de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica na Cidade de Curitiba**. 2017. 131 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Curitiba – PR. 2017. Disponível em: http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/2876/1/CT_PPGSE_M_Tonin%2C%20Fabianna%20Stumpf_2017.pdf. Acesso em: 30 de maio de 2019.

TRAMONTINA. **Disjuntores**. 2020. Disponível em: <https://www.tramontina.com.br/p/58012008-527-disjuntor-tr3ka-2p-32a-curva-c>. Acesso em: 20 de janeiro de 2020.

URBANETZ JUNIOR, J. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes de Distribuição Urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade**. 2010. 189 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis – SC, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/94284>. Acesso em: 05 de junho de 2019.

ZAGO, C. A.; WEISE, A. D.; HORNBERG, R.A. **A Importância do Estudo de Viabilidade Econômica de Projetos nas Organizações Contemporâneas**. Congresso Virtual Brasileiro de Administração - VI CONVIBRA. 2009. Disponível em: http://www.convibra.com.br/2009/artigos/142_0.pdf. Acesso em: 15 de maio de 2019.