

Energia Limpa: custo instalado e eficiência de operação de usina fotovoltaica de 1 MW

Clean Energy: installed cost and operating efficiency of a 1 MW photovoltaic plant

Energía Limpia: coste instalado y eficiencia operativa de una planta fotovoltaica de 1 MW

Recebido: 06/09/2022 | Revisado: 20/09/2022 | Aceitado: 22/09/2022 | Publicado: 29/09/2022

Bergson José de Nascimento

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0072-2049>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: bergson.nascimento@gmail.com

Romildo Morant de Holanda

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7945-3616>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: romildo.morant@ufrpe.br

Fernanda Wanderley Corrêa de Araújo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1316-1826>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: fernanda.wanderley@ufrpe.br

Raimundo Mainar de Medeiros

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7361-1281>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: mainarmedeiros@gmail.com

Karina Paula Barbosa de Andrade Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4387-945X>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: karinandranelima@gmail.com

José Henrique da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4321-5816>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: josehenrique_s@outlook.com

Felipe Bezerra de Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7576-5321>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: felipelimafbl@hotmail.com

Jackson José dos Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7118-4551>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: jacksonjosesantos@hotmail.com

Resumo

O uso da energia solar vem aumentando seu espaço na matriz energética. O Brasil possui grande potencial para aplicações com uso de energia fotovoltaica, porém esse potencial não é totalmente explorado. Devido a isso, o trabalho propõe um estudo de caso sobre a implantação de uma usina fotovoltaica na Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, uma das vertentes da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). Foram realizados a caracterização da área de implantação, levantamentos bibliográficos acerca do objeto de estudo, visitas a campo, para obtenção de registros fotográficos e mapeamento dos processos, e análise do projeto executivo da usina. Para o cálculo do potencial de energia solar para a região, foi utilizado o *software SunData* e o MS-Excel para o tratamento dos dados. Foi possível estimar um potencial de 747.877,19 kW de energia, o que expressa a viabilidade da usina quanto a fatores econômicos, técnicos e legais, fornecendo dados para subsidiar o planejamento da operação e manutenção do sistema elétrico da área em estudo, alinhada com a política de sustentabilidade proposta por essa unidade acadêmica.

Palavras-chave: Energia solar; Avaliação de ciclo de vida; Matriz energética.

Abstract

The use of solar energy has been increasing its space in the energy matrix. Brazil has great potential for applications using photovoltaic energy, but this potential is not fully explored. Due to this, the work proposes a case study on the implementation of a photovoltaic plant in the Academic Unit of Cabo de Santo Agostinho, one of the branches of the Federal Rural University of Pernambuco. The characterization of the implantation area, bibliographic surveys about the object of study were carried out, field visits to obtain photographic records and mapping of the processes, and

analysis of the plant's executive project were also performed. To calculate the solar energy potential for the region, SunData software and MS-Excel were used to process the data. It was possible to estimate a potential of 747,877.19 kW of energy, which expresses the feasibility of the plant in terms of economic, technical and legal factors, providing data to support the planning of the operation and maintenance of the electrical system in the area under study, aligned with the sustainability policy proposed by this academic unit.

Keywords: Solar energy; Life cycle assessment; Energy matrix.

Resumen

El uso de la energía solar ha ido aumentando su espacio en la matriz energética. Brasil tiene un gran potencial para aplicaciones que utilizan energía fotovoltaica, pero este potencial no está completamente explorado. Por eso, el trabajo propone un estudio de caso sobre la implementación de una planta fotovoltaica en la Unidad Académica de Cabo de Santo Agostinho, una de las sedes de la Universidad Federal Rural de Pernambuco. Se realizó la caracterización del área de implantación, levantamientos bibliográficos sobre el objeto de estudio, visitas de campo para obtención de registros fotográficos y mapeo de los procesos, y análisis del proyecto ejecutivo de planta. Para calcular el potencial de energía solar para la región, se utilizó el software SunData y MS-Excel para procesar los datos. Se logró estimar un potencial de 747.877,19 kW de energía, lo que expresa la factibilidad de la planta en términos económicos, técnicos y legales, brindando datos para sustentar la planificación de la operación y mantenimiento del sistema eléctrico en el área de estudio. , en línea con la política de sustentabilidad propuesta por esta unidad académica.

Palabras clave: Energía solar; Evaluación del ciclo de vida; Matriz energética.

1. Introdução

A energia solar pode ser compreendida como a energia transmitida pelo sol e transformada em energia térmica ou fotovoltaica; a energia térmica consiste no uso de coletores solares com finalidade de converter a irradiação solar diretamente em calor; a energia fotovoltaica é caracterizada pela diferença de potencial gerada em um semicondutor devido a luz visível (Fisac, et al., 2014). A energia solar, como fonte de luz ou de calor, é atualmente a alternativa energética mais promissora para geração de energia no mundo (Pinho, Galdino, 2014).

As fontes de energia utilizadas para a geração de energia elétrica são oriundas de hidroelétrica, nuclear, termoeletrica, eólica, fotovoltaica, dentre outras. No entanto, a oferta de energia através de fontes renováveis vem crescendo em várias partes do mundo. Já em 2009, foi possível perceber que 16% de toda energia consumida no planeta fosse de origem renovável, enquanto que 81% provêm ainda de combustíveis fósseis e 2,8% de origem nuclear (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2011).

Bist, et al., (2020) afirmam que energias renováveis podem sofrer com processos intermitentes da natureza, nestes casos, elas podem ser utilizadas como complemento a outra fonte energética, formando fontes híbridas com o objetivo de melhorar a eficiência do sistema.

O máximo teor de eficiência obtido em uma célula fotovoltaica é de 15%, em células compostas de silício monocristalino através de seu ciclo de vida, enquanto fontes fósseis chegam até 45% de eficiência, quando utilizado gás natural (Sahu, et al., 2016; Hussy, 2014).

Para 2030, prevê-se um aumento significativo da renda per capita em todas às regiões de forma global, podendo resultar num maior consumo de fontes energéticas, principalmente a elétrica, em consequência da melhoria da qualidade de vida, enquanto que a tendência quanto ao crescimento da população em algumas regiões de forma globalizada deverá permanecer até 2050. Estas tendências deverão influenciar os governantes quanto às políticas públicas necessárias e as estratégias de investimentos futuros na área de energia (Glenn, et al., 2011).

Devido à variabilidade de incidência solar de acordo com as estações e as características geográficas, o alto investimento em tal sistema e a taxa de produção de energia ser menor do que comparada às fontes fósseis, a energia elétrica solar não possui uma utilização elevada em um cenário mundial (Visa, et al., 2016).

O Brasil é um dos países com alto potencial produtivo no setor da energia fotovoltaica devido às suas características geográficas e climáticas (Instituto Nacional de Pesquisas [INPE], 2017). A região nordeste é contemplada com o maior potencial produtivo, mas possui menos sistemas fotovoltaicos que as regiões sul e sudeste, isto demonstra a urgência de aplicação na região (INPE, 2017; Nascimento, 2017).

Com a crescente da energia solar, o Brasil possui atualmente 39 usinas solares com capacidade de 22.952 kW representando 0,0150% na matriz elétrica brasileira conectadas a rede elétrica, enquanto as não conectadas a rede estima-se o consumo entre 300 a 500 kWh/mês (ANEEL, 2017). Em relação a produção de energia, as regiões Norte e Nordeste do Brasil apresentam áreas com alta irradiação solar média e de pouca variabilidade, características positivas para a instalação de usinas fotovoltaicas (Carpio, 2021).

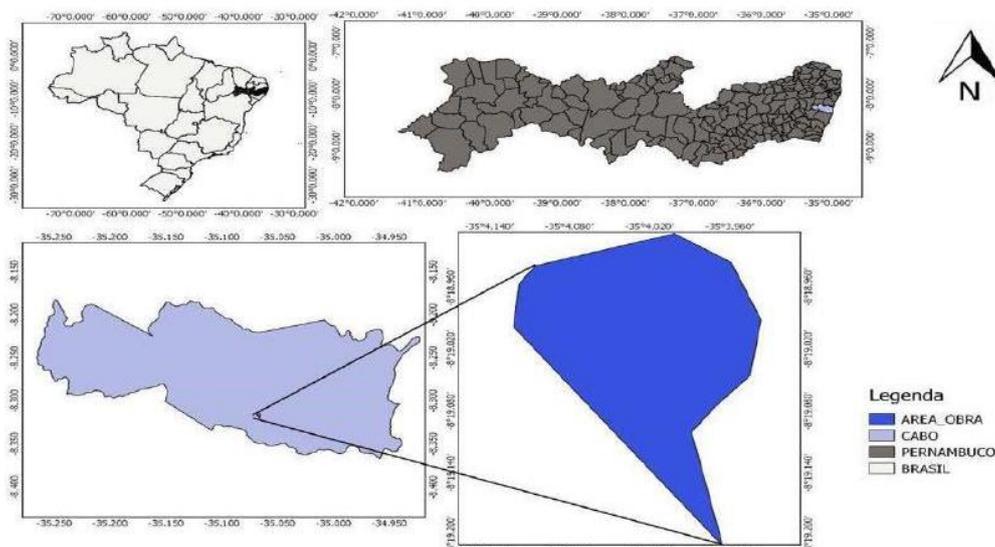
A Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA) tem o intuito de somar uma área de desenvolvimento educacional à antiga unidade da UFRPE. Essa obra foi baseada nos parâmetros de construção sustentáveis cujo a construção de uma usina fotovoltaica foi um dos pontos inseridos, a qual possui uma potência instalada na faixa de 1,0 MW, justificada pelo potencial produtivo que o mesmo agrega, além de funcionar como um projeto pioneiro para instalações de mesmo porte na região nordeste e no Brasil. Com isso, objetiva-se avaliar a implantação da usina fotovoltaica da UACSA, avaliando a viabilidade econômica, técnica e legal do empreendimento.

2. Metodologia

O campus da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA) foi construído no município do Cabo de Santo Agostinho, situado a 38,5 km da capital Recife (Figura 1), sob as coordenadas 8° 18' 57,35" S e 35° 04' 01,43" O. Será construída uma usina fotovoltaica de 1,0 MW com o objetivo de abastecer este novo campus. A UACSA é mais uma das unidades acadêmicas UFRPE.

A nova unidade possui 56 mil m² e é destinada a abrigar diversos cursos de engenharia e tecnologia, com estimativa de 6000 alunos, enquanto a sede antiga possui 200 mil m² e abriga também cursos de engenharias, com capacidade para 3000 alunos (Conselho Superior da Justiça do Trabalho, 2014; Portal Brasil, 2017).

Figura 1 - Mapa do Cabo e consequente da obra da nova UACSA.



Fonte: CITAR (2017).

A usina possuirá uma área ocupada por placas correspondente a 5883,15 m² dividida em duas configurações, uma delas composta por 136 arranjos fotovoltaicos, formados por 21 módulos em série e 8 arranjos compostos por 22 módulos em série. A área ocupada por cada arranjo é de 5541,65 m² e 341,5 m², respectivamente. Estes arranjos possuem uma média produtiva na faixa de 2627,02 kW.

A usina possui o intuito de suprir parte da demanda energética da Unidade Acadêmica. A UACSA possui uma demanda máxima na faixa de 6,0 mW, ou seja, a produção da usina corresponderia a 16% do consumo máximo da unidade, ou seja, 1,0 MW de potência instalada.

A UFRPE é classificada no grupo tarifário do Procel como Subgrupo A4, que é caracterizado por uma demanda energética superior a 300 kW (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica [Procel], 2011), em certos casos específicos há uma contratação relativa ao valor do kWh que será cobrado ao estabelecimento, o qual a UACSA está inserida.

Como elaborado por Pereira, et al., (2018), o presente trabalho trata-se de um estudo de caso, buscando descrever e analisar o caso particular referente à viabilidade da instalação de uma usina fotovoltaica em uma unidade acadêmica de universidade pública. Para isso, é utilizado o método quali-quantitativo, com a coleta de dados descritivos em visitas à unidade, juntamente com dados numéricos obtidos a partir de páginas de centros de pesquisa e *softwares*.

Foram realizados levantamentos de campo, para observação e análise *in loco* da área onde será implantado o empreendimento e seu entorno, para fazer a coleta dos dados e registros fotográficos. Coletou-se dados secundários do potencial de energia solar para a região por meio do Programa SunData, disponível na página do Centro de Referência de Energias Solares e Eólica Sérgio de S. Brito [Cresesb], e aplicados no *software* MS-Excel para a elaboração de gráficos.

Para a análise do projeto, foi utilizado o conjunto de especificações, a memória de cálculo e o projeto executivo da implantação da usina fotovoltaica, fornecido pela UFRPE. Foi elaborada uma lista de verificação para avaliar o atendimento aos padrões descritos nas leis e normas técnicas brasileiras, além do atendimento ao manual de engenharia fotovoltaica, desenvolvido pela Centro de Pesquisas de Energia Elétrica [Cepel] (2015) para verificação de segurança e boas práticas.

Para aplicação do mapeamento dos processos, foi elaborado um fluxograma de operação, com informações obtidas em visitas técnicas na obra. Para isso, foram identificadas as entradas e saídas do processo para implantação e operação da usina fotovoltaica.

Para calcular a produção mensal de ambos os arranjos, foi utilizado como base a irradiação média mensal do município em kWh/m².dia, que foi obtido na base de dados Cresesb. A quantidade de energia fornecida aos arranjos fotovoltaicos foi obtida a partir da seguinte equação:

$$\text{Produção} = \frac{\text{Irr.A.d}}{\text{H}}$$

Onde:

Produção: produção mensal do arranjo, em kW

Irr: Irradiação média mensal (kWh/m².dia)

A: Área do arranjo, em m²

d: Quantidade de dias no mês

H: Quantidade de horas ao qual o sol permanece visível no mês.

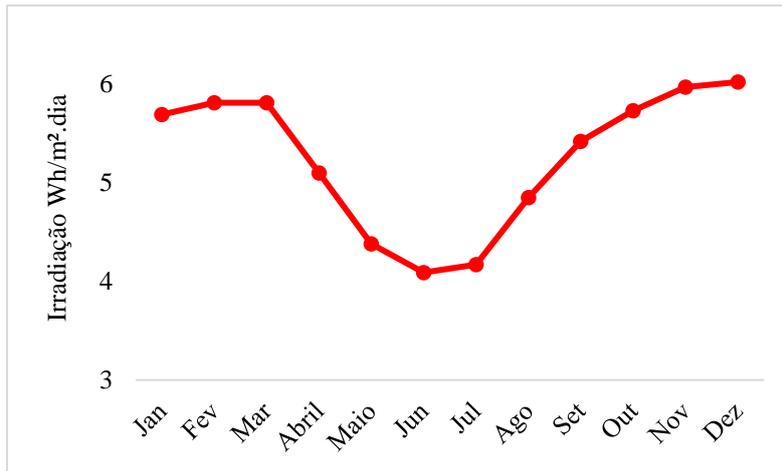
A partir dos resultados obtidos, foi possível calcular a viabilidade da usina fotovoltaica para a localidade onde se insere a UACSA.

3. Resultados e Discussão

Nos meses de janeiro a março a irradiação varia de 5,69 a 5,81 Wh/m².dia no município do Cabo de Santo Agostinho,

já de abril a julho a irradiação diminui, disponibilizando o menor registro, 4,09 Wh/m².dia no mês de junho. Já nos meses de setembro a outubro, a região apresenta uma maior disponibilidade, chegando ao maior potencial em novembro e dezembro com 5,97 e 6,02 Wh/m².dia (Figura 3). Essa variação se deve ao período chuvoso da região, quando há aumento de nuvens, o que intercepta os raios solares impedindo de chegar até a região. Tais resultados também foram encontrados no Atlas Eólico e Solar de Pernambuco (2019), onde esse apresenta que as maiores áreas de maior capacidade do Estado para a radiação solar têm um mínimo em junho e o máximo em novembro.

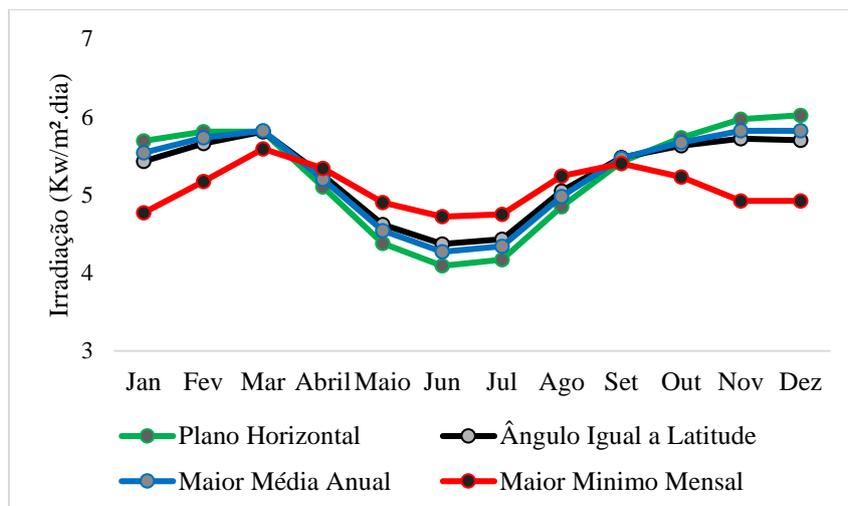
Figura 2 - Potencial de irradiação solar em Cabo de Santo Agostinho-PE.



Fonte: Adaptado da Cresesb (2018).

A irradiação solar ofertada na região varia de 4,09 a 6,02 kW/m².dia entre os meses de junho a dezembro (Figura 3), quando medida num plano horizontal ou perpendicular à direção da propagação dos raios solares sobre a terra. Segundo o Atlas Solar Brasileiro, a média estimada dos valores de irradiação solar global sobre todo o país no período de julho de 1995 a dezembro de 2005 é de 1500 a 2005 kWh/m² (Pereira, et al., 2006).

Figura 3- Potencial de irradiação no plano inclinado.



Fonte: Adaptado da Creseb (2020).

3.1 Quanto ao atendimento aos aspectos legais

De posse do projeto, foi possível perceber que o mesmo foi elaborado seguindo as recomendações técnicas de normas brasileiras, internacionais e da concessionária de energia acessada, bem como os aspectos legais (Quadro 1) de conexão de Minigeração à rede estipulados pela Agência Nacional de Energia Elétrica.

Quadro 1: Legislações referentes ao projeto da usina fotovoltaica.

Documento	Descrição
Resolução Normativa nº 414, de 09 de setembro de 2010	Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada.
Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012	Estabelece as condições gerais para o acesso de Minigeração e mini geração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.
Resolução Normativa nº 517, de 11 de dezembro de 2012	Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e o Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST.
Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015	Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST.
Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST - Módulo 3	Acesso ao Sistema de Distribuição.
Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 8	Qualidade de Energia Elétrica.
Nota Técnica nº 0129/2012-SRD/ANEEL	Retificação da Seção 3.7 do Módulo 3 dos Procedimentos de Distribu
*ABNT NBR 5410/2004	Instalações elétricas em baixa tensão.
ABNT NBR 5419/2015	Proteção contra descargas atmosféricas.
GED – 13	Fornecimento em Tensão Secundária de Distribuição.
GED – 15303	Conexão de Micro e Minigeração Distribuída sob Sistema de Comper de Energia Elétrica.

*Associação Brasileira de Normas Técnicas. Fonte: Autores.

3.2 Quanto as características técnicas

3.2.1 Arranjo Fotovoltaico

Um arranjo fotovoltaico é caracterizado por um conjunto de módulos conectados em série, de forma a atingir o nível de tensão contínua (VCC) ideal de operação na entrada do inversor. Os módulos foram dimensionados com características elétricas capazes de alcançar os requisitos mínimos de geração de energia (Tabela 1).

Tabela 1 - Características Elétricas do Módulo Fotovoltaico.

Condições Padrões de Teste (STC)		
Característica elétrica	Valor	Unidade
Máxima Potência (Pmax)	330,00	W
Tensão em Máxima Potência (Vmax)	37,80	V
Corrente em Máxima Potência (Imax)	8,73	A
Tensão em Circuito Aberto (Voc)	46,20	V
Corrente de Curto Circuito (Ioc)	9,33	A
Eficiência do Módulo (%)	17,00	%
Tensão em Circuito Aberto (Voc)	46,20	V
Operação Normal da Temperatura da Célula (NOCT)		
Máxima Potência (Pmax)	237,71	W
Tensão em Máxima Potência (Vmax)	34,50	V
Corrente em Máxima Potência (Imax)	6,89	A
Tensão em Circuito Aberto (Voc)	42,9	V
Corrente de Curto Circuito (Ioc)	7,80	A

Fonte: Memorial descritivo do Sistema de minigeração fotovoltaica da UFRPE.

O sistema deste projeto, é composto por 136 arranjos sendo formados por 21 módulos em série e 8 arranjos sendo formados por 22 módulos em série.

a) Arranjos com 21 módulos

Módulos conectados em série resultando na tensão de operação igual à 794 VCC e tensão em circuito aberto igual a 970 VCC. A corrente de saída de cada arranjo é igual à 8,73 A.

$$\text{Tensão de operação} = 21 \cdot V_{\text{max}} = 21 \cdot 37,8\text{V} = 794\text{V}$$

$$\text{Tensão em circuito aberto} = 21 \cdot V_{\text{oc}} = 21 \cdot 46,2\text{V} = 970\text{V}$$

b) Arranjos com 22 módulos

Módulos conectados em série resultando na tensão de operação igual à 832 VCC e tensão em circuito aberto igual a 1016 Vcc. A corrente de saída de cada arranjo é igual à 8,73 A.

$$\text{Tensão de operação} = 22 \cdot (V_{\text{max}}) = 22 \cdot 37,8\text{V} = 832\text{V}$$

$$\text{Tensão em circuito aberto} = 21 \cdot (V_{\text{oc}}) = 21 \cdot 46,2\text{V} = 1016\text{V}$$

3.2.2 Inversor interativo (GRID-TIE)

O inversor interativo é um equipamento eletrônico que converte a corrente contínua gerada pelos módulos fotovoltaicos em corrente alternada, compatível com a rede de distribuição da distribuidora de energia local. Neste projeto, serão utilizados 18 inversores do fabricante Hauwei modelo SUN2000 – 50kTL (Figura 4) cuja potência nominal de saída é de 50,0 kVA. As características elétricas, mecânicas e eficiências deste modelo são apresentadas no Anexo - Datasheet Inversor Hauwei SUN2000 – 50kTL. Grau de proteção IP65.

O modelo de Hauwei SUN 2000 – 50KTL possui quatro entradas de seguimento de máxima potência (MPPT). Estas entradas se ajustam constantemente às variações de irradiância e temperatura às quais o arranjo fotovoltaico estará submetido. Como em todo e qualquer inversor interativo, este modelo se adapta às condições de operação (tensão, frequência, impedância, etc.) da rede à qual estará conectado.

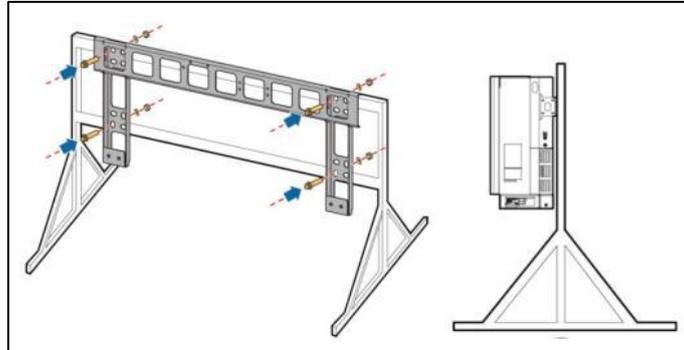
Tabela 2 - Características Elétricas do Inversor Hauwei 2000 - 50KTL.

Características elétricas	Valor	Unidade
Máxima Potência de Entrada	51.500	W
Máxima Tensão de Entrada	1.100	V
Máxima Corrente de Entrada (por MPPT)	22	A
Máxima corrente de Curto-Circuito (por MPPT)	30	A
Máxima Corrente reversa para o arranjo fotovoltaico	0	A
Mínimo Tensão Operação/Startup	200 / 250	V
Máxima Tensão de Operação	1.000	V
Range de Tensão do MPPT	200 – 1.000	V
Tensão de MPPT em máxima Potência	600 – 850	V
Número de Entradas	8	Unidades
Número de MPPT	4	Unidades
Potência Ativa Nominal	46.000	W
Máxima Potência Aparente	50.500	VA
Máxima Potência Ativa (cos θ = 1)	50.500	W
Tensão de Saída (3F + PE)	277/480	V
Corrente de Saída Nominal	55,3	A
Frequência de Operação	60	Hz
Máxima Corrente de Operação	60,8	A
Fator de Potência	+/- 0,8	
Máxima Distorção Harmônica	< 3	%

Fonte: Memorial descritivo do Sistema de minigeração fotovoltaica da UFRPE.

Os inversores serão fixados próximos aos módulos fotovoltaicos, entre os *rack*'s de módulos que formarão os arranjos de entrada (CC) de cada inversor com fixação em pedestais metálicos (Figura 4).

Figura 4 - Pedestal Metálico de Sustentação do Inversor.



Fonte: Memorial descritivo do Sistema de minigeração fotovoltaica da UFRPE.

3.2.3 Quadro de proteção CA

O projeto completo contemplou 3 quadros de Proteção e Gerenciamento de Energia CA, alocados no Platô 01, Platô 02 e Platô 03 respectivamente, fixados na porção traseira do cavalete do inversor mais próximo à rua de acesso do platô. A distribuição dos inversores nos quadros de energia CA visa balancear a potência de chegada na subestação elevatória. As potências instaladas nos quadros CA 01, CA 02 e CA 03 foram de 350 kW, 250 kW e 300 kW, respectivamente.

3.2.3.1 Quadro de Proteção e Seccionamento de Energia CA – 01

O Quadro de Proteção e Gerenciamento de Energia CA – 01 está localizado no Platô 01 fixado no suporte de sustentação do inversor 07, e realizará a proteção e manobra dos inversores de 01 a 07 com disjuntores termomagnéticos de 60 A para cada inversor (Quadro 2a). Grau de proteção IP54. A potência instalada no quadro é igual à 350 kW.

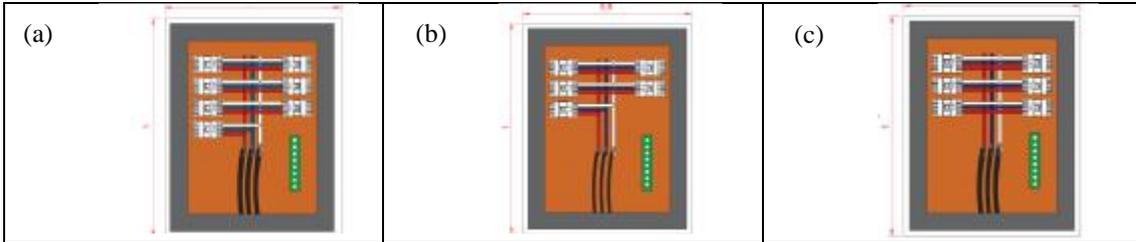
3.2.3.2 Quadro de Proteção e Seccionamento de Energia CA – 02

O Quadro de Proteção e Gerenciamento de Energia CA – 02 está localizado no Platô 02 fixado no suporte de sustentação do inversor 12, e realiza a proteção e manobra dos inversores de 08 a 12 com disjuntores termomagnéticos de 60A para cada inversor (Quadro 2b). Grau de proteção IP54. A potência instalada no quadro é igual à 250 kW.

3.2.3.3 Quadro de Proteção e Seccionamento de Energia CA – 03

O Quadro de Proteção e Gerenciamento de Energia CA – 03 está localizado no Platô 03 fixado no suporte de sustentação do inversor 16, e realizará a proteção e manobra dos inversores de 13 a 18 com disjuntores termomagnéticos de 60A para cada inversor (Quadro 2c). Grau de proteção IP54. A potência instalada no quadro é igual à 300 kW.

Quadro 2 - (a) Layout de Montagem do Quadro de Gerenciamento e Proteção de Energia CA – 01; (b) Layout de Montagem do Quadro de Gerenciamento e Proteção de Energia CA – 02; (c) Layout de Montagem do Quadro de Gerenciamento e Proteção de Energia CA – 03.



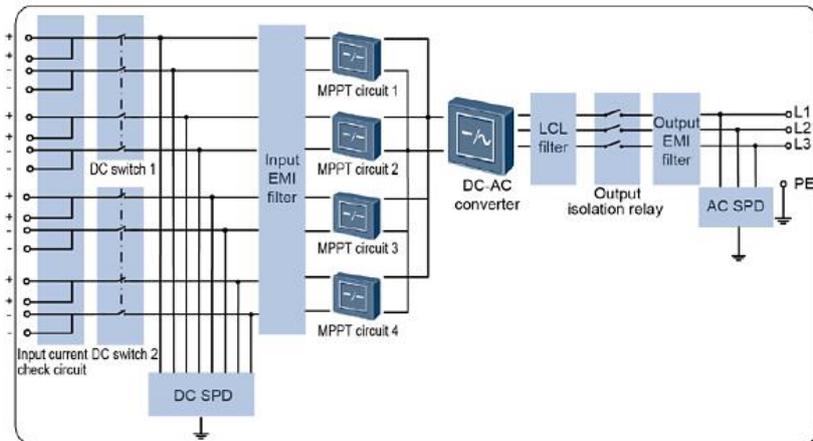
Fonte: Memorial descritivo do Sistema de minigeração fotovoltaica da UFRPE.

3.2.3.4 Proteções

O sistema fotovoltaico terá proteções contra surtos de corrente e surtos de tensão no circuito CC e circuito CA. As Proteções estão presentes dentro dos inversores fotovoltaicos, no Quadro CA de cada platô e no Quadro CA presente dentro da Subestação. Cada inversor fotovoltaico Huawei 2000 – 50KTL possui duas chaves de seccionamento para manobra e gerenciamento dos arranjos fotovoltaicos, responsáveis pelo seccionamento de dois MPPTs.

Dentro de cada inversor, encontra-se um dispositivo de proteção contra surtos de tensão (DPS Tipo-II), impedindo que haja sobretensão aos bornes do circuito interno do inverso (Figura 5). A entrada CC do inversor fotovoltaico possui suportabilidade para até 1.100 V.

Figura 5- Diagrama de Bloco do Circuito do Inversor.



Fonte: Memorial descritivo do Sistema de minigeração fotovoltaica da UFRPE, 2020.

O circuito CA de saída do inversor é composto por um Relé de Isolação cuja função é evitar o retorno de energia à rede em momento de falta (anti-ilhamento) e um dispositivo de proteção contra surto de tensão (DPS – Tipo II) advindos da rede elétrica local. Outros dispositivos de proteção também estão presentes no circuito do inversor (Quadro 3).

Quadro 3- Dispositivos de Proteção do Inversor Fotovoltaico.

Item	SUN2000-50KTL SUN2000-50KTL-C1
Proteção Anti-ilhamento	Suportado
Chave de entrada CC	Suportado
Proteção de sobre corrente de saída	Suportado
Proteção de conexão reversa de entrada	Suportado
Detecção de falha de ligação PV	Suportado
Proteção contra sobretensão CC	Tipo II
Proteção contra sobretensão CA	Tipo II
Detecção de resistência de isolamento	Suportado
Unidade de Monitoramento de Corrente esidual (RCMU)	Suportado

Fonte: Memorial descritivo do Sistema de minigeração fotovoltaica da UFRPE, 2020.

No circuito CA estão presentes os quadros de proteção e gerenciamento do sistema fotovoltaico que contém disjuntores para proteção e seccionamento em caso de sobrecorrente. Os disjuntores foram calculados a fim de proteger os circuitos a ele conectados e foram dimensionados conforme capacidade de condução de cada um.

Para escoar a energia gerada, o sistema fotovoltaico será conectado à rede elétrica da unidade consumidora, sendo o ponto de conexão a Subestação Primária. Esta alternativa viabiliza tecnicamente e tem a menor perda do sistema de fotovoltaico no empreendimento. A potência do sistema obedece ao estabelecido na norma da concessionária acessada e na resolução nº 687 da ANEEL, que estabelecem que a potência máxima da minigeração não seja maior do que a potência disponibilizada à unidade consumidora (ANEEL, 2015a).

A qualidade da energia é um fator primordial a qualquer instalação elétrica, para que não ocorram danos a equipamentos elétricos, acarretando prejuízos. Neste sentido, a energia gerada pelo sistema fotovoltaico irá atender aos parâmetros de qualidade exigidos na norma da concessionária local e no módulo 8 do PRODIST. Sempre que algum parâmetro do sistema fotovoltaico ou da rede estiver fora dos limites considerados normais de operação, o inversor interativo desconectará o sistema no tempo limite determinado pela norma, porém, continuará monitorando os parâmetros para que possa reconectar o sistema assim que possível, respeitando o tempo de reconexão estabelecido.

3.2.3.5 Faixa de operação da tensão

Para garantir a qualidade da energia gerada e que será injetada na rede da concessionária, o sistema foi projetado de modo a operar apenas dentro dos limites de tensão adequados (Tabela 3). Caso a tensão no ponto de conexão comum esteja fora desses limites, o inversor interativo desconectará o sistema fotovoltaico da rede.

Tabela 3 - Condições de Tensão Pontos de Conexão com Tensão Nominal (V_n) = 220/127 V.

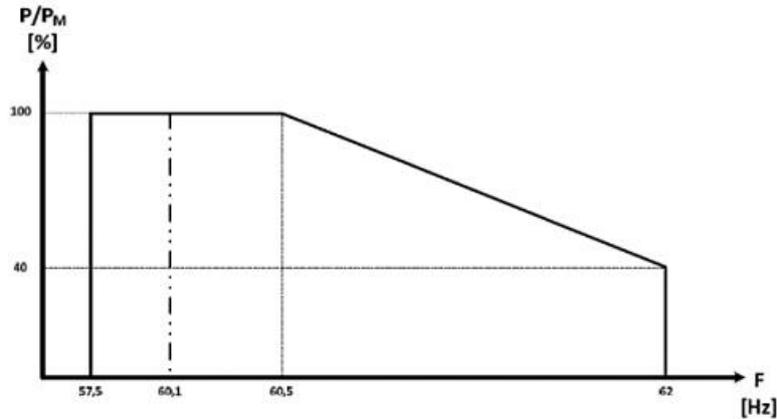
Tensão de Atendimento (TA)	Varição da tensão de Leitura (TL)
Adequada	$201 \leq TL \leq 231$ / $116 \leq 133$
Precária	$189 \leq TL < 201$ ou $231 < TL \leq 233$ $189 \leq TL < 201$ ou $231 < TL \leq 233$
Crítica	$TL < 189$ ou $TL > 233$ / $TL < 109$ ou $TL > 140$

Fonte: Memorial descritivo do Sistema de minigeração fotovoltaica da UFRPE, 2020.

3.2.3.6 Faixa de operação da frequência

O sistema de Minigeração irá operar dentro dos limites de frequência estabelecidos no item 4.18.1.6 da NOR.DISTRIBU-ENGE-0002– Conexão de Minigeradores ao Sistema de Distribuição (Figura 6).

Figura 6 - Curva de Operação do Sistema Fotovoltaico em Função da Frequência.



Fonte: Memorial descritivo do Sistema de minigeração fotovoltaica da UFRPE, 2020.

Onde:

P = Potência gerada;

Pm = Potência máxima;

F = Frequência.

Quando a frequência da rede ficar abaixo de 57,5 Hz ou acima de 62 Hz, o inversor interativo desconectará o sistema de minigeração fotovoltaico cessando a injeção de energia ativa à rede da CPFL em no máximo 200 milissegundos. Somente quando a frequência voltar à faixa de 59,9 Hz a 60,5 Hz, o sistema retornará a injetar energia. Estando a frequência da rede entre 60,5 e 62 Hz, a injeção de energia na rede será reduzida.

3.3 Fases do projeto de Usina Solar

Foram descritas as fases do projeto de usina solar para que todas as estruturas necessárias para o funcionamento da usina: painéis fotovoltaicos, inversores, transformadores, edifícios, subestação elétrica e a Linha de Transmissão sejam instaladas.

3.3.1 Fase de Planejamento

As principais atividades realizadas na fase de planejamento para implantação do empreendimento foram a caracterização das alternativas para o empreendimento, o reconhecimento ambiental inicial, a identificação preliminar dos impactos, a determinação do escopo e o plano de trabalho.

Para caracterização das alternativas, iniciou-se estudos referentes ao meio físico, biótico e econômico, considerando toda legislação ambiental vigente no âmbito federal, estadual e municipal, por meio de equipe multidisciplinar.

Inicialmente foram pesquisados empreendimentos semelhantes, além de reuniões para que houvesse uma compreensão detalhada das atividades e processos, em cada etapa do ciclo de vida da usina até sua possível desativação, assim como estudo de viabilidade econômica (para o empreendedor e os meios positivos para a região onde será instalada), levantando assim toda documentação inicial necessária (plantas, memoriais, etc).

Para o reconhecimento ambiental foram investigados estudos de planos e programas governamentais incidentes sobre a área do empreendimento, mapas fotográficos oficiais, imagens de satélite, levantamento preliminar de dados socioambientais, levantamento preliminar de estudos sobre a região, visita de campo para reconhecimento da área do projeto e do entorno, breve pesquisa bibliográfica, conversas com moradores locais, conversas com prefeitos e funcionários municipais onde foi possível uma identificação preliminar dos possíveis impactos ambientais.

3.3.2 Fase de Instalação e operação

A obra da UACSA possui estrutura suficiente para acomodar engenheiros, técnicos e demais mãos de obra que trabalharão simultaneamente na obra, podendo fornecer os serviços de suporte básicos para o canteiro. Contudo não haverá necessidade de construção de alojamento no local da construção. Serão necessárias algumas adequações de infraestrutura básica e a efetiva implementação de ações no local para atender à demanda do empreendimento proposto.

As instalações do local serão concebidas e construídas de forma que estejam em conformidade com as leis e normas regulamentares locais aplicáveis. As instalações necessárias incluem escritórios de obra, armazém de materiais coberto e almojarifado aberto, estacionamento e pátio de máquinas, refeitório, sanitários e lavatórios, vestiários com armários individuais e bancos, área de armazenamento de resíduos, área de armazenamento de materiais perigosos e não perigosos e geradores.

Nas instalações contarão sistemas de detecção de incêndio, extintores, mangueiras de incêndio e hidrantes. De acordo com os regulamentos legais e especificações normativas, extintores de características e eficiência adequadas devem ser instalados, com a sinalização pertinente. No término da obra serão retiradas todas as instalações provisórias do canteiro de obras, tais como equipamentos e as instalações industriais usados na construção, edificações temporárias e sucatas.

Durante a operação da usina, serão realizados periodicamente a aparagem da vegetação e limpeza dos módulos.

3.3.4 Fase de desativação

Devido aos princípios construtivos das UFV, no final da vida útil o material utilizado pode ser 100% removido (extração mecânica das estacas e cabeamentos) e o terreno poderá ser utilizado sem restrições para qualquer outra finalidade. Na fase de desmontagem os materiais da planta poderão ser reaproveitados as estacas e os cabos utilizados no solo, o aço e/ou alumínio, os cabos de cobre e alumínio e os transformadores, os quais passarão por reciclagem.

Nos mercados maduros de energia fotovoltaica (em países como Alemanha, Itália, Espanha), já se estabeleceu uma indústria comercial de reciclagem de módulos fotovoltaicos. Os mesmos são triturados e os materiais (vidro, silício, alumínio, cobre, entre outros) são reaproveitados em grandes partes.

3.4 Viabilidade da implantação da usina fotovoltaica da UACSA

A produção mensal dos arranjos foi estimada com base na irradiação média mensal do município em kWh/m².dia, multiplicada pela quantidade de dias do mês e a área de cada arranjo, em m², e dividida quantidade de horas que o sol permanece visível no mês.

Segundo o Atlas Solarímetro do Brasil (2000), a região que está inserida no Cabo de Santo Agostinho possui 7 horas de sol por dia e uma radiação média de 5,25 kWh/m².dia. Como a usina foi projetada para receber dois arranjos, somamos as áreas totais de cada arranjo, totalizando uma área de incidência solar de 5.883,15 m² (Tabela 4).

Tabela 1 - Potência disponível de energia solar para os arranjos.

Mês	Irradiação kWh/m ² .dia	Dias do mês	Área do arranjo (m ²)	Horas/dia	Pm (kW)
Jan	5,69	31	5883,15	7	148246,98
Fev	5,81	28	5883,15	7	136724,41
Mar	5,81	31	5883,15	7	151373,45
Abr	5,10	30	5883,15	7	128588,85
Mai	4,38	31	5883,15	7	114116,30
Jun	4,09	30	5883,15	7	103123,22
Jul	4,17	31	5883,15	7	108644,97
Ago	4,85	31	5883,15	7	126361,66
Set	5,42	30	5883,15	7	136657,17
Out	5,73	31	5883,15	7	149289,13
Nov	5,97	30	5883,15	7	150524,60
Dez	6,02	31	5883,15	7	156844,78
Total de energia solar disponível em 1 ano					1610495,50

Fonte: Autores (2020).

Dessa forma, o potencial total de energia solar fornecida aos módulos fotovoltaicos é de 1.610.495,70 kW ao ano, o que daria uma média de 4,41 mW por dia. Ou seja, energia suficiente para alimentar uma usina fotovoltaica de 1,0 mW, o que configura potência solar suficiente para alimentar os 3032 módulos desta usina fotovoltaica.

A energia de consumos de um equipamento elétrico é o produto da potência do equipamento pelo e tempo em que o equipamento estiver em funcionamento. No caso da usina fotovoltaica, a energia gerada é o produto do somatório das potências de cada módulo fotovoltaico, multiplicado pela quantidade de tempo em que estes módulos estarão expostos a luz solar durante o dia. Então:

$$\text{ENERGIA Geração} = (\text{POTÊNCIA TOTAL Painéis}) \times (\text{TEMPO Exposição})$$

Teoricamente esta equação estaria completa, porém como o sistema de geração de energia fotovoltaica não é livre de perdas, precisamos incluir um fator de rendimento (η). Portanto, a equação ficará desta forma:

$$\text{ENERGIA Geração} = (\text{POTÊNCIA TOTAL Painéis}) \times (\text{TEMPO Exposição}) \times \eta$$

Este fator de rendimento está associado as perdas elétricas nos módulos fotovoltaicos, inversores e cabos elétricos de ligação além de ser considerada a temperatura ambiente e a ventilação do local. O valor de η igual a 0,80 é um valor razoável, dadas as características técnicas do equipamento e o local de instalação (Tabela 5).

Tabela 5 - Dados para cálculo de geração de energia.

Descrição	Valor	Unidade
Potência de cada Módulo	330,00	W
Nº de módulos	3032,00	Unidades
Potência total dos Módulos	1000560,00	W
Rendimento	0,80	-
Nº de dias	30,00	dias
Nº de horas de exposição	7,00	h

Fonte: Autores (2020).

Aplicando os dados para o cálculo de geração de energia na equação, obtém-se o resultado a uma quantidade de energia média mensal gerada de 168,09 MW ao mês ou 2.017,08 MW ao ano (Tabela 6).

Tabela 6 - Valores do consumo de energia elétrica da UACSA.

Meses - ano	Valores
Jul-19	R\$ 22.201,54
Ago-19	R\$ 15.901,53
Set-19	R\$ 27.277,49
Out-19	R\$ 34.996,97
Nov-19	R\$ 33.287,29
Dez-19	R\$ 31.289,62
Jan-20	R\$ 15.385,13
Fev-20	R\$ 21.118,86
Mar-20	R\$ 24.930,06
Média de consumo	R\$ 25.154,28

Fonte: Autores (2020).

A Universidade Federal de rural de Pernambuco (UFRPE) é caracterizada no grupo tarifário do Procel como Subgrupo A4, cuja tarifa é de 0,45998 R\$/kWh. Multiplicando o valor desta tarifa pela quantidade de energia produzida pela usina fotovoltaica, teremos um valor de R\$ 77.319,91 por mês. Este valor, sem considerar os impostos, é mais de três vezes o valor do consumo da sede provisória da UACSA. Portanto, este empreendimento possibilitará uma economia no valor da conta de energia elétrica paga pela UACSA. Projetando este valor para um período de um ano, teríamos uma economia no valor do consumo de energia elétrica de R\$ 927.838,98.

Atualmente a implantação da usina fotovoltaica da UACSA está orçada em R\$ 4.778.105,00, o que significa que até o final de sua vida útil, esta usina terá compensado todo investimento financeiro que foi feito para sua implantação.

4. Conclusão

A área onde a usina solar será implementada apresenta um grande potencial de energia solar, capaz de abastecer a demanda de projeto para o campus da UACSA. O projeto, no que tange os aspectos ambientais, identificando se as especificações, atendem as exigências legais de uma usina fotovoltaica de 1,0 mW.

As etapas para o funcionamento da usina são comuns a vários empreendimentos, tais como planejamento, implantação, operação e desativação. Existe a viabilidade técnica e econômica da implantação desta usina fotovoltaica, com base no potencial de energia que a usina pode oferecer. Potencial este, estimado em 1001,00 kW de energia, o que mostra que o novo Campus terá gastos reduzidos com a conta de da energia convencional. Do ponto de vista social, também pode ser avaliada como viável, uma vez que durante a instalação será gerado empregos e após o funcionamento alunos, funcionários e a comunidade poderão fazer uso dessa energia.

Agradecimentos

Ao grupo de pesquisa Centro de Inovação Tecnológica Aplicada aos Recursos Naturais – CITAR.

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

Referências

- Atlas Solarímetro do Brasil (2000). *Solarímetro do Brasil*. Recife: Editora Universitária da UFPE.
- Atlas Solar e Eólico de Pernambuco (2019). *Atlas de energia elétrica do Brasil*. Agência Nacional de Energia Elétrica. (3ª. Ed.) – Brasília: ANEEL. <http://www.atlaseolicosolar.pe.gov.br>.
- Agência Nacional de Energia Elétrica [ANEEL] (2010). *Resolução Normativa Nº 414, de 9 de setembro de 2010*. Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília.
- Agência Nacional de Energia Elétrica [ANEEL] (2012a). *Resolução Normativa Nº 482, de 17 de abril de 2012*. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 19 de abr de 2012. <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas [ABNT] (2004). *NBR 5410:Instalações elétricas de baixa tensão*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas [ABNT] (2015). *NBR 5419: Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- Agência Nacional de Energia Elétrica [ANEEL] (2012b). *Resolução Normativa Nº 517, de 11 de dezembro de 2012*. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e o Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF. <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012517.pdf>.
- Agência Nacional de Energia Elétrica [ANEEL] (2012c). *Nota Técnica Nº 0129 de agosto de 2012*. Retificação da Seção 3.7 do Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição. http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Nota_Tecnica_0129_SRD.pdf.
- Agência Nacional de Energia Elétrica [ANEEL] (2015a). *Resolução Normativa Nº 687 de 2015*. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF. <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>.
- Agência Nacional de Energia Elétrica [ANEEL] (2015b). *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional [PRODIST]*. Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica. p. 88. http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8-Reviz%C3%A3o_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9.
- Agência Nacional de Energia Elétrica [ANEEL] (2017). *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional [PRODIST]*. Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição. p. 74, 2017. <http://www.aneel.gov.br/modulo-3>.
- Bist, N., Sircar, A., & Yadav, K. (2020). Holistic review of hybrid renewable energy in circular economy for valorization and management. *Environmental Technology & Innovation*, 20, 1-12.
- Carpio, L. G. T (2021). Mitigating the risk of photovoltaic power generation: A complementarity model of solar irradiation in diverse regions applied to Brazil. *Utilities Policy*, 71, 1-11.
- Constituição da República Federativa do Brasil de 1988* (1998). Brasília. http://www.planalto.gov.br/CCIVIL_03/Constituicao/Constitui%C3%A7ao.htm
- Conselho Superior da Justiça do Trabalho (2014). *Guia de Contratações Sustentáveis da Justiça do Trabalho/Brasil*. (2ª. ed.,) revisada, atualizada e ampliada – Brasília.
- Centro de Pesquisas de Energia Elétrica [CEPEL], Centro de Referência para Energia Solar e Eólica [Cresesb] (2015). *Manual de engenharia para sistemas Fotovoltaicos*. Brasil. p. 530.
- Centro De Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio e Salvo Brito [CRESESB] (2018). *Taxa de irradiação mensal no município do Cabo de Santo Agostinho*. <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>.
- Glenn, J. C., Gordon, T. J., & Florescu, E. (2011). “Futures studies around the World”, In: *2011 State of the future, Washington, EUA, The millennium project, Global futures studies & research*, cap. 7.
- Fisac, M., Villasevil, F. X., & López, A. M. (2014). High-efficiency photovoltaic technology including thermoelectric generation. *Journal of Power Sources*, 252, 264–269.
- Hussy, C. International Comparison of Fossil Power Efficiency and CO2 Intensity. *Ecofys*, p. 1–84, 2014.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais [INPE] (2017). *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. (2ª.ed.). 88p.
- Lei Nº 10.848, de 15 de março de 2004*(2004). Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as Leis nºs 5.655, de 20 de maio de 1971, 8.631, de 4 de março de 1993, 9.074, de 7 de julho de 1995, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.648, de 27 de maio de 1998, 9.991, de 24 de julho de 2000, 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras providências. Brasília, 2004. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/110.848.htm.
- Nascimento, R. L. (2017). *Energia Solar no Brasil: Situação e Perspectivas*. Estudo Técnico, Consultoria Legislativa. p. 46.
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. Brasil, (ed. 1ª.)
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Abreu, S. L., & Ruther, R. Atlas Brasileiro de Energia Solar. São José dos Campos: INPE, 2006.

Pinho, J. T., & Galdino, M. A. (2014). *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Cepel / Cresesb. <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>.

Portal Brasil (2017). *Obra em novo campus da Federal Rural de Pernambuco será entregue em 2018*. <http://www.brasil.gov.br/esporte/2017/08/brasil-termina-a-universiade-de-taipei-em-28-lugar>.

Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica [PROCEL] (2011). *Manual de tarifação de energia elétrica*. http://www.eletrica.ufpr.br/sebastiao/wa_files/te344%20aula%2009%20-%20manual%20de%20tarif%20en%20el%20-%20procel_epp%20-%20agosto-2011.pdf.

Renewable Energy Policy Network for the 21st Century - REN21 (2011). <<https://www.ren21.net/>>.

Resolução N° 216, de 3 de out de 2013 (2013). Aprova criação da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA) Campus Abolicionista Joaquim Nabuco desta Universidade e dá outras providências. <<http://UACSA.ufrpe.br/sites/UACSA.ufrpe.br/files/Resolu%C3%A7%C3%A3o%20216.2013%20%20CRIA%C3%87%C3%83O%20DA%20UNID.%20ACAD.%20DO%20CABO%20E%20CURSOS%20OFERECIDOS%20%20UACSA.pdf>>.

Sahu, A., Yadav, N., & Sudhakar, K. (2016). Floating photovoltaic power plant: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 815–824.

Visa, I., Burduhos, B., Neagoe, M., Moldovan, M., & Duta, A. (2016). Comparative analysis of the infield response of five types of photovoltaic modules. *Renewable Energy*, 95, 178–190.