



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR PAU DOS FERROS
CURSO DE BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

RODRIGO ALVES PAULINO

**SISTEMA FOTOVOLTAICO APLICADO A UM HOSPITAL DO SEMIÁRIDO
CEARENSE**

PAU DOS FERROS
2023
RODRIGO ALVES PAULINO

SISTEMA FOTOVOLTAICO APLICADO A UM HOSPITAL DO SEMIÁRIDO CEARENSE

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Jorge Luís de Oliveira Pinto Filho,
Prof. Dr.

PAU DOS FERROS

2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S237s Santos, Rodrigo Alves Paulino dos .
SISTEMA FOTOVOLTAICO APLICADO A UM HOSPITAL DO
SEMIÁRIDO CEARENSE / Rodrigo Alves Paulino dos
Santos. - 2023.
37 f. : il.

Orientador: Jorge Luís de Oliveira Pinto Filho.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2023.

1. Viabilidade Econômica. 2. Payback. 3.
Avaliação de Ciclo de Vida. 4. Energia solar. 5.
fotovoltaico. I. de Oliveira Pinto Filho, Jorge
Luís, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

SISTEMA FOTOVOLTAICO APLICADO A UM HOSPITAL DO SEMIÁRIDO CEARENSE

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Aprovada em: 14/10/2023.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **JORGE LUIS DE OLIVEIRA PINTO FILHO**
Data: 21/10/2023 10:15:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jorge Luís de Oliveira Pinto Filho (UFERSA)
Presidente

Documento assinado digitalmente
 **ALEX PINHEIRO FEITOSA**
Data: 21/10/2023 10:58:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alex Pinheiro Feitosa (UFERSA)
Membro Examinador

Documento assinado digitalmente
 **ADELSON MENEZES LIMA**
Data: 21/10/2023 11:46:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Adelson Menezes Lima (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder saúde e persistência para concluir o curso, mesmo com todas as adversidades. Agradeço também a minha mãe, minha família e alguns amigos que sempre estiveram dispostos a me ajudar.

“A energia renovável é energia que é derivada de uma fonte que é reabastecida continuamente, como o sol, o rio, o vento ou a energia térmica dos oceanos do mundo”

(MANYIKA *et al.*, 2013, p. 138)

RESUMO

As fontes alternativas de energia vêm ganhando espaço nos últimos anos, sendo alvo de estudo por diversos pesquisadores, em busca de aumentar a sua eficiência energética e também ambiental. A energia fotovoltaica, uma das fontes de energia alternativas mais populares, é um ótimo método de geração elétrica ambientalmente e economicamente viáveis sendo uma opção, por exemplo, para instalações da área da saúde, que geralmente requerem uma quantidade razoável de energia. Diante deste cenário, este trabalho objetivou dimensionar e realizar a análise de viabilidade econômica do investimento e estimar a contribuição de gases de efeito estufa de um sistema fotovoltaico projetado para suprir a demanda elétrica de uma UBASF situada no município de Jaguaribe, estado do Ceará, Brasil. A pesquisa foi classificada como uma análise descritiva associada a um estudo de caso, utilizou-se dos modelos de cálculos para a obtenção do payback, VPL, ciclo de vida, além da potência e quantidades de módulos. O investimento mostrou-se viável de todos os pontos de vista, exaltando a ajuda das características do tipo climático para obtenção deste resultado. O tempo seco, com poucas chuvas e nuvens propicia um ambiente favorável para produção de energia, assegurando um retorno financeiro positivo, com payback previsto para menos de 3 anos, e uma quantidade de emissões condizentes com a bibliografia comparada. Desse modo, o estudo mostrou-se viável para suprir a demanda energética da UBASF, como também teve sua viabilidade econômica e ambiental favorável.

Palavras-chave: Viabilidade Econômica; Payback; Avaliação de Ciclo de Vida; Energia solar.

ABSTRACT

Alternative energy sources have been gaining ground in recent years, being the subject of study by several researchers, seeking to increase their energy and environmental efficiency. Photovoltaic energy, one of the most popular alternative energy sources, is a great environmentally and economically viable method of generating electricity and is an option, for example, for healthcare facilities, which generally require a reasonable amount of energy. Given this scenario, this work aimed to carry out an economic feasibility analysis of the investment and estimate the contribution of greenhouse gases from a photovoltaic system designed to meet the electrical demand of a UBASF located in the municipality of Jaguaribe, state of Ceará, Brazil. The research was classified as a descriptive analysis associated with a case study, using calculation models to obtain payback, NPV, life cycle, in addition to power and quantities of modules. The investment proved to be viable from all points of view, highlighting the help of climate characteristics in obtaining this result. Dry weather, with little rain and clouds, provides a favorable environment for energy production, ensuring a positive financial return, with payback expected in less than 3 years, and a quantity of emissions consistent with the comparative literature. In this way, the study proved to be viable to meet the energy demand of the UBS, as well as having favorable economic and environmental viability.

Keywords: Economic Feasibility; Payback; Life Cycle Assessment; Solar energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Oferta primária de energia no mundo em 2020	14
Figura 2 – Matriz energética do Brasil	15
Figura 3 – Representação do efeito fotoelétrico	16
Figura 4 – Ilustração de um sistema fotovoltaico conectado à rede	17
Figura 5 – Resumo da Avaliação do Ciclo de Vida	21
Figura 6 – Simulação de sistema fotovoltaico na UBASF Maria Niedja Barreira Gomes	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados mensais de Irradiância e Horas de Sol Pleno em Jaguaribe-CE	24
Tabela 2 – Valores utilizados para dimensionamento e análise financeira do investimento	25
Tabela 3 – Componentes do sistema fotovoltaico	25
Tabela 4 – Simulação de geração elétrica para o primeiro ano de funcionamento do sistema fotovoltaico	27
Tabela 5 – Simulação do fluxo de caixa do investimento	28
Tabela 6 – Simulação de Fatores de Emissão para o sistema proposto	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	Problema de pesquisa	11
1.2	Justificativa e relevância da pesquisa	12
1.3	Objetivos	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1	Energias renováveis	14
2.2	Energia solar	16
2.3	Avaliação econômica da energia fotovoltaica	19
2.4	Avaliação do ciclo de vida	20
3	MÉTODO DE PESQUISA.....	23
3.1	Dimensionamento do sistema fotovoltaico.....	23
3.2	Análise de viabilidade econômica	24
3.3	Avaliação do ciclo de vida	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
4.1	Sistema fotovoltaico	26
4.2	Análise financeira	27
4.3	Avaliação do ciclo de vida	29
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	31
6	REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

Os recursos naturais têm sido utilizados em grande escala pelo homem, agravando seu esgotamento e potencializando as mudanças climáticas e o aquecimento global. As fontes de alternativas renováveis têm sido citadas como formas de reduzir os danos ao meio ambiente e os gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera. Assim, elas são ferramentas importantes para a promoção do desenvolvimento sustentável, diversificação da matriz energética do país e na minimização dos impactos ambientais negativos associados (OLIVEIRA E RAMOS, 2021; DUAIK *et al.*, 2020).

A grande demanda de energia elétrica nos centros urbanos e rurais provenientes do modo de vida e produção da sociedade afetam o uso dos recursos naturais e aumentam as emissões de GEE – durante a geração de energia. Para que se possa suprir as necessidades econômicas e sociais sem provocar danos ao meio ambiente é necessário que sejam adotados meios de fornecer energia de maneira sustentável e com menos impactos aos recursos. Em relação aos países da América Latina, o Brasil é considerado o terceiro país com maior participação de energias renováveis em sua matriz energética. A principal fonte de energia do país é de hidrelétricas, em que possui maior representação, além da biomassa, eólica, solar e gás natural (KORZENIEWICZ, 2021).

A energia solar fotovoltaica é uma das fontes de energia “limpa”, em que há transformação de forma direta da energia proveniente do Sol em energia elétrica através das células solares – células fotovoltaicas, produzindo eletricidade. Os benefícios do seu uso incluem a baixa emissão de poluentes na atmosfera assim como diminuição nos custos com energia, prolongada vida útil do material (cerca de 25 anos), taxa de retorno compensatória ao investido, flexibilidade de implementação – instalação em áreas remotas, baixa necessidade de manutenção e limpeza e inesgotável fonte de alimentação (SILVA E ARAÚJO, 2022; GAVIOLI *et al.*, 2021; SANTOS E JABBOUR, 2013).

O grande potencial solar do Brasil, ainda pouco representativo, apresenta tanto as características propícias de incidência e irradiação, quanto relacionadas à alta produção dos materiais das placas solares. O seu potencial mercadológico possui uma das maiores reservas mundiais de quartzo, indústrias de beneficiamento do silício estabelecidas, e indústrias de componentes eletrônicos, que de fato embasam e incentivam o uso de sistemas fotovoltaicos no País (RANGEL, 2017). Além disso, sua região Nordeste apresenta ótimos índices de irradiação solar, com destaque para os estados da Bahia, Piauí, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará (OLIVEIRA E RAMOS, 2021; SILVA E ARAÚJO, 2022; GAVIOLI *et al.*,

2021; SANTOS E JABBOUR, 2013).

A utilização da energia solar fotovoltaica nos mais diversos ambientes como em residências, universidades, hospitais, edifícios comerciais já é uma realidade e apresenta-se como uma forma de expandi-la e aumentar sua representatividade na matriz energética brasileira. A implantação de um sistema fotovoltaico permite melhorar a eficiência energética do estabelecimento, atendendo a demanda em situações adversas em condições meteorológicas e em momentos de pico. Além de diminuir significativamente o consumo de energia fóssil (SANTOS E JABBOUR, 2013).

Devido às suas demandas internas para a manutenção de seu correto funcionamento, as unidades hospitalares apresentam alto consumo de energia elétrica, com um significativo custo financeiro e sendo alvo de preocupação dos gestores. As unidades de saúde são ambientes complexos e com funcionamento constante, onde abarcam diversos setores, atividades e pessoal, com consultórios, laboratórios ambulatoriais, emergências, serviços de lavanderia e cozinha, ambientes de manutenção e maquinaria, além de contar com trabalhadores da saúde, pacientes, visitantes e setores administrativos (PÉREZ, 2015).

Nesses ambientes, a iluminação e a climatização são atributos essenciais e que demandam grande consumo de energia elétrica, por envolverem serviços e atividades como aquecimento, funcionamento de máquinas e esterilização de equipamentos. É necessário que estes ambientes sejam eficientes do ponto de vista energético para assegurar seu pleno funcionamento e garantir conforto e qualidade à população dependente dos seus serviços essenciais de forma ininterrupta. Para isso, deve-se buscar o desenvolvimento sustentável do ambiente para assegurar a saúde ambiental e sanitária (CAMPOS, 2013).

Diante do exposto, é notória a importância da garantia da eficiência energética desses ambientes essenciais, desde a atenção primária, nas unidades básicas de saúde (UBS). Assim, a implantação de sistemas fotovoltaicos se torna a chave para garantir o bom funcionamento dos ambientes. Nesse contexto, o presente trabalho propôs o dimensionamento de sistema fotovoltaico para suprir a demanda elétrica de uma UBS situada no município de Jaguaribe, estado do Ceará, Brasil, bem como sua avaliação econômica e ambiental.

1.1 Problema de pesquisa

O ambiente hospitalar demanda um consumo em energia elétrica elevado para a execução de suas atividades, tanto para a climatização quanto para as demais instalações da unidade. Além disso, este local necessita de energia de forma intermitente para assegurar seu

pleno e correto funcionamento. Com isso, ao pensar na racionalização dos recursos naturais disponíveis, é necessário que atitudes sejam tomadas em busca da preservação e conservação do meio ambiente.

Assim, o emprego de técnicas sustentáveis, como a implantação de sistemas fotovoltaicos, reduzir os impactos adversos originados pelas fontes convencionais de energia, além de gerar economia com os gastos em geração elétrica (MENDES, 2019).

Desta forma, a problemática desta pesquisa refere-se qual o dimensionamento viável de sistema fotovoltaico para suprir a demanda elétrica de uma UBS situada no município de Jaguaribe, estado do Ceará, Brasil.

1.2 Justificativa e relevância da pesquisa

A energia fotovoltaica é uma alternativa sustentável para assegurar a segurança energética e minimizar os efeitos adversos das mudanças climáticas, como alternativa ao uso insustentável de combustíveis fósseis (GONÇALVES, 2021). O presente trabalho justifica-se pela avaliação da viabilidade ambiental e econômica da implantação de um sistema fotovoltaico como forma de suprir sua demanda energética de uma UBS em um município do semiárido cearense.

Além disso, preconiza-se o potencial para a implantação de sistemas fotovoltaico em regiões semiáridas, como no município de Jaguaribe-CE, devido a fatores climáticos (temperaturas e umidade relativas do ar) e irradiância solar favorável durante praticamente o ano todo, destacando-se por ser um dos melhores locais de investimento de energia fotovoltaica (RANGEL, 2017; GONÇALVES, 2021).

Devido à semelhança entre as especificidades dos ambientes, o trabalho ainda se apresenta como um estudo de caso, que permitirá a aplicação dos resultados aqui apresentados em estabelecimentos congêneres (SEVERINO, 2017).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Diante das considerações expostas anteriormente, tem-se que o objetivo geral desta pesquisa é apreciar um sistema fotovoltaico dimensionado para suprir a demanda elétrica de uma UBS situada no município de Jaguaribe, estado do Ceará, Brasil.

1.3.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, podem ser mencionados os seguintes:

- a) dimensionar um sistema fotovoltaico para suprir a demanda de uma UBS;
- b) realizar a análise de viabilidade econômica do investimento;
- c) estimar a contribuição de gases de efeito estufa do projeto.

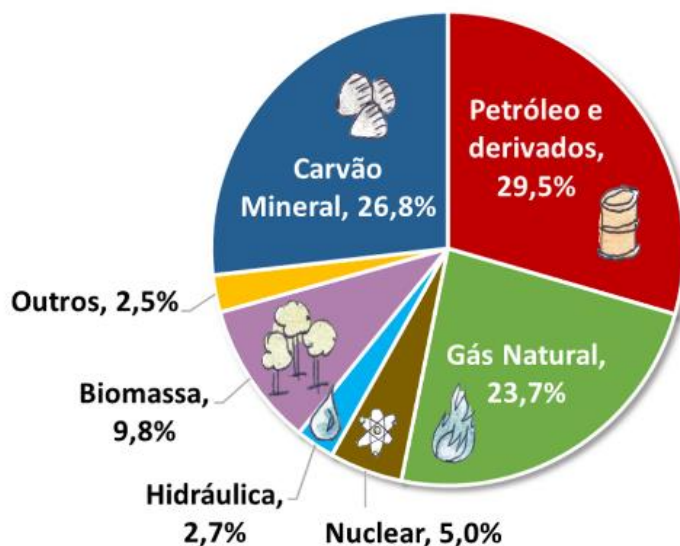
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Energias renováveis

As fontes de energia podem ser divididas em dois grupos: renováveis e não renováveis. As fontes de energia não renováveis são retiradas de combustíveis presentes na natureza, que existem em quantidades limitadas e que necessitam de milhares de anos para a sua formação. Exemplos são os combustíveis fósseis, as termelétricas e a energia nuclear (EXEMBERGER, 2016).

As fontes renováveis de energia são aquelas que derivam de processos naturais e são reabastecidas constantemente. Alguns dos exemplos são a: solar, eólica, biomassa, geotérmica e hidrelétrica, além dos biocombustíveis e muitos outros. Devido a esse modelo de renovação, sua produção é, geralmente, descentralizada, envolvendo instalações locais e em pequenas quantidades, podendo ser incorporadas por residências, pequenas empresas e até cooperativas (ABRÃO, 2022). Desse modo, a oferta de energia primária no mundo compõe-se de 15% de fontes renováveis e 85% não renováveis (IEA, 2020), como mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Oferta primária de energia no mundo em 2020



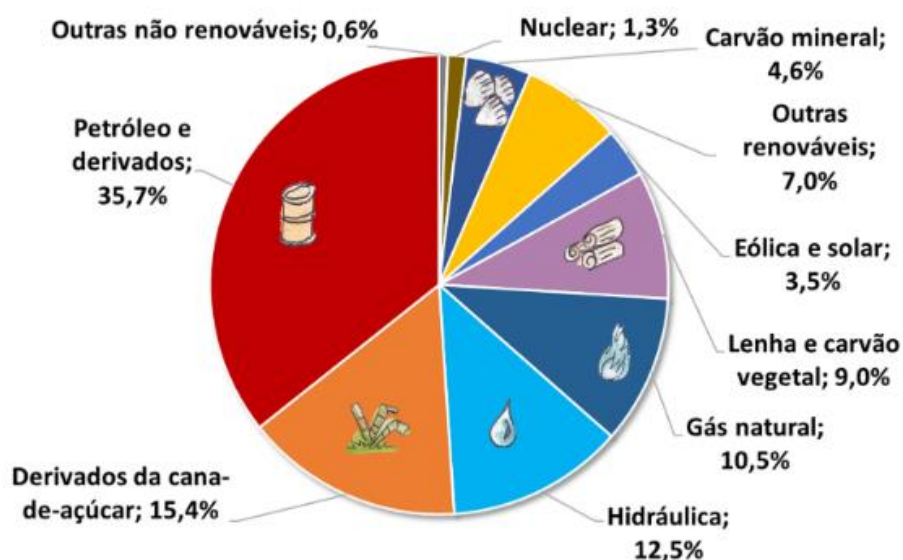
Fonte: IEA (2020).

Como demonstrado na Figura 1, fontes renováveis como solar, eólica e geotérmica, juntas correspondem a apenas 2,5% da matriz energética mundial, representadas como “Outros”. Somando à participação da energia hidráulica e da biomassa, as renováveis totalizam

aproximadamente 15%.

Comparando ao cenário nacional, a matriz energética do Brasil diferencia-se da mundial, pois utiliza-se mais fontes renováveis que no resto do mundo, de acordo com a Figura 2.

Figura 2 – Matriz energética do Brasil



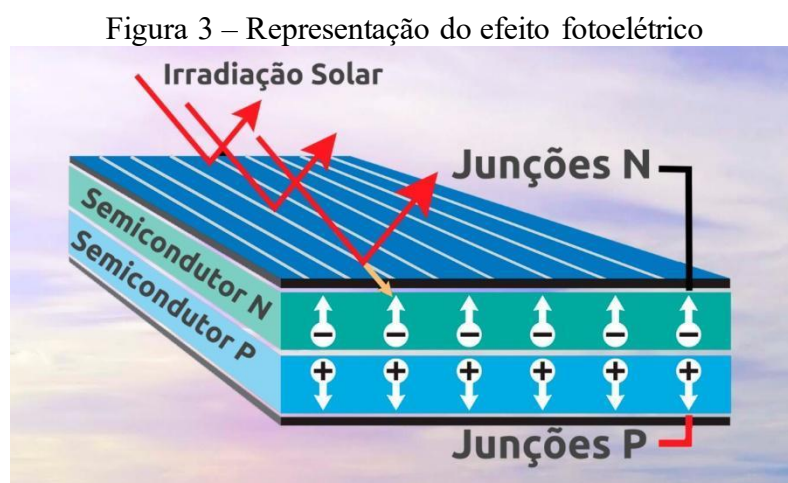
Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2022)

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022), somando lenha e carvão vegetal, hidráulica, derivados de cana, eólica e solar e outras fontes naturais, as energias renováveis, totalizam 47,4%, quase metade da matriz energética brasileira.

Nas últimas décadas, essas fontes vêm alcançando maior notoriedade, devido a problemas de segurança na oferta de energia, intrinsecamente associada aos problemas de esgotamento de reservas de petróleo, bem como à elevação do seu preço no mercado dos combustíveis. O seu desenvolvimento não está limitado apenas ao atendimento de demandas ou contribuições ambientais, mas também ao desenvolvimento de tecnologias para melhor aproveitamento dos recursos. Atualmente, a inserção de políticas energéticas governamentais é imprescindível, devido ao importante papel do sistema energético para um mundo sustentável (FARIAS, SILVA E CARVALHO, 2021).

2.2 Energia solar

A energia solar fotovoltaica é considerada uma alternativa sustentável para proteção do meio ambiente, mitigação dos efeitos das mudanças climáticas e alcance da segurança do suprimento energético, sendo altamente difundida, considerada uma importante fonte de energia renovável com expectativa de grandes contribuições para a sociedade a longo prazo. O seu funcionamento ocorre baseado no princípio do efeito fotovoltaico, onde as células fotovoltaicas convertem a luz solar em eletricidade (MAGRASSI *et al.*, 2019; GONÇALVES, 2021). Este efeito ocorre devido os materiais que compõem as células serem semicondutores, permitindo o fluxo dos elétrons que são liberados à medida que os fótons da luz solar são absorvidos pelos painéis fotovoltaicos. Essa diferença de potencial criada gera a corrente elétrica, conforme ilustrado na Figura 3 (HUSAIN *et al.*, 2018).



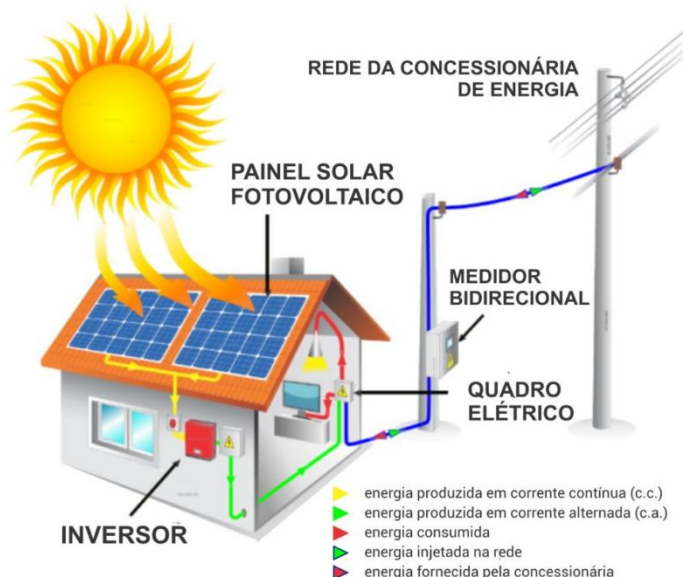
Fonte: Ribas (2020).

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados como: (i) sistemas fotovoltaicos isolados e (ii) sistemas conectados à rede elétrica. O primeiro tipo possibilita o suprimento de energia em casos isolados da rede elétrica, como zonas rurais, comunidades isoladas, iluminação pública, veículos elétricos, náuticos e sistemas aeroespaciais. Dentre os seus componentes estão incluídos: módulos fotovoltaicos, controlador de carga, banco de baterias e inversor (VILLALVA E GAZOLI, 2013).

Ainda de acordo com Villalva e Gazoli (2013), o segundo tipo de sistemas fotovoltaicos são conectados à rede elétrica, Figura 4, opera em paralelo com a própria rede, sendo dispensada a necessidade de armazenamento de energia. Seu objetivo é a geração elétrica para consumo interno, podendo reduzir ou eliminar a dependência da concessionária. Seus componentes são

basicamente iguais, com exceção da obrigatoriedade dos sistemas de armazenamento.

Figura 4 – Ilustração de um sistema fotovoltaico conectado à rede



Fonte: Infinit Solar (2022).

De acordo com a Agência Internacional de Energias Renováveis, do inglês *International Renewable Energy Agency* (IRENA, 2022), desde 2012 a capacidade fotovoltaica mundial cresceu cerca de 728%, passando de 101.745 MW para 843.086 MW em 2021. No Brasil essa evolução é ainda maior, aumentando em cerca de 186.400%, passando de 7 MW para 13.055 MW no mesmo período (IRENA, 2022). No Brasil, as fontes renováveis tornaram-se exímias competidoras com as fontes convencionais, derivadas de combustíveis fósseis, resultando em redução de custos e avanços tecnológicos (LANA *et al.*, 2016).

O grande potencial solar energético do País tem sido cada vez mais notado e aproveitado como alternativa energética e é considerado um dos melhores do mundo, devido aos níveis de irradiação solar (média de 5,0 kWh/m²) superiores aos de países onde projetos para aproveitamento de energia solar são muito mais avançados, como Alemanha, França e Itália. Além disso, a região Nordeste apresenta o maior potencial solar dentre as regiões do brasileiras, cujo valor médio de irradiação é de 5,49 kWh/m², com valores extremos entre 5,39 e 5,59 kWh/m². Nela, o Estado do Ceará se destaca com uma irradiação solar média de 5,7 kWh/m², em um intervalo entre 5,29 e 6,06 kWh/m² (LANA *et al.*, 2016; PEREIRA *et al.*, 2017).

O município de Jaguaribe possui níveis de irradiação solar superiores à média do Estado, com cerca de 5,9 (PEREIRA *et al.*, 2017). De acordo com Fonseca *et al.*, (2021), a incorporação de sistemas fotovoltaicos no semiárido é uma estratégia para garantir um futuro sustentável à

região, com aumento da renda, promoção de economia socialmente justa e menos vulnerável aos efeitos das secas. Apesar dos índices solares locais otimistas, e dos proveitos esperados, apenas 0,12% da matriz energética cearense é proveniente da energia fotovoltaica, sendo ela majoritariamente abastecida por termelétricas (52,32%) e eólica (47,53%) (IPECE, 2018).

A geração distribuída no Brasil, ou seja, geração elétrica em pequena escala em localidades mais próximas aos consumidores finais, em relação a geração da estação central, é regulamentada pela Resolução Normativa 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2012). Essa resolução regulamenta os critérios para aplicação da geração distribuída, por meio de micro e minigeração, a fim de introduzir mecanismos de fonte de energia renovável na matriz energética brasileira. A sua atuação no Brasil ocorre por meio do sistema de compensação, denominado *net metering*, que consiste na medição do fluxo energético da unidade consumidora, através de medidores bidirecionais (ANEEL, 2012; GONÇALVES, 2021).

Apesar das amplas vantagens (ambientais, sociais e econômicas) da energia solar demonstradas, alguns impactos ambientais podem ser gerados por empreendimentos que adotam os sistemas fotovoltaicos, relacionados à sua localização, características do sistema e físico-climáticas e ecossistêmicas do local. No meio físico cita-se modificações paisagísticas e movimentação de recursos humanos, maquinários, equipamentos e materiais, geração de resíduos, possíveis contaminação do solo e geração de poeira, a depender do porte do empreendimento. Quanto ao meio biótico, a construção de uma usina solar pode causar impactos consideráveis nos ecossistemas locais, por meio do afugentamento da fauna, flora, perda da cobertura vegetal, etc. Já no meio socioeconômico os impactos mais expressivos são a geração de emprego e renda, crescimento direto e indireto da economia local, e aumento da arrecadação tributária (LAGRIMANTE *et al.*, 2018).

Em sua pesquisa, Purificação, Ramos e Kniess (2020) identificaram barreiras e incentivos na trajetória de disseminação da energia fotovoltaica. Dentre os principais incentivos estão o mercado de créditos de carbono e de certificação ambiental, redução dos preços dos equipamentos, regulamentação da legislação com metas de utilização de energia verde, políticas de subsídio governamentais e amenização dos efeitos do aquecimento global e mudanças climáticas no planeta. Já as maiores barreiras apresentadas foram o alto custo da geração fotovoltaica, baixo investimento em inovação tecnológica da fabricação de células solares, baixa visão dos três pilares da sustentabilidade, simultaneamente, por parte dos consumidores e dificuldade de acesso à linhas de créditos (PURIFICAÇÃO, RAMOS E KNISS, 2020).

A incorporação de energias renováveis a edifícios faz parte da prática dos Edifícios de

Zero Energia, do inglês *Zero Energy Buildings* (ZEB), que buscam sua autossuficiência energética e mitigação de emissões de CO₂. Neste cenário, os hospitais são exemplos de edifícios primordiais à manutenção da sociedade, que apresentam potencial poluidor e demandam uma boa quantidade de energia para realização de todos os seus processos e procedimentos durante o funcionamento. Grande parte dos hospitais construídos até os anos 2000 em todo o mundo foram projetados e desenvolvidos buscando unicamente seguir critérios de atendimento, conforto e segurança, desconsiderando o desempenho energético, logo, o estudo do alto consumo de energia hospitalar e as suas medidas de mitigação são um campo promissor a ser explorado (OLIVEIRA E RAMOS, 2021).

2.3 Avaliação econômica da energia fotovoltaica

O estudo de viabilidade econômica aplicado à energia fotovoltaica vem sendo alvo de diversos estudos em todo o Mundo. Em sua grande maioria, é buscada a resposta pela viabilidade, ou não, do investimento. Embora variem as situações, locais e particularidades dos sistemas fotovoltaicos estudados, os mesmos concluem que o custo de aquisição do sistema é o maior obstáculo para os interessados nesse modelo (SOUZA E PENHA, 2020). A incerteza do investimento é a questão central do processo decisório, pois define o grau de risco que o investidor assume, dado o retorno esperado da aplicação (CORREA, 2021).

De acordo com Gonçalves (2021), a avaliação de viabilidade econômica auxilia na tomada de decisão quanto à exequibilidade de um investimento. Dentre os métodos mais comuns de análise de demonstrações financeiras existentes, o valor presente líquido (VPL) se destaca, pois é baseado nas previsões de fluxos de caixa. O VPL é determinado pela diferença entre as saídas e as entradas do caixa, onde todo o fluxo é trazido ao valor da moeda no tempo presente, sob influência de uma taxa de desconto fixa.

Quando negativo, o retorno do VPL traduz a incapacidade de recuperação do custo da aquisição, ou seja, o retorno financeiro é inferior ao investimento. Já o VPL positivo configura a viabilidade do investimento, onde o retorno e ganhos esperados é maior que o investimento efetuado. O cálculo do VPL é definido conforme a Equação 1, em que o VF é o fluxo de caixa em um tempo futuro, t é o tempo em anos e r é a taxa de desconto (GONÇALVES, 2021).

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{VF}{(1+r)^t} - investimento \quad (1)$$

Já a técnica do *Payback* é utilizada para o cálculo do tempo de retorno de um investimento. Em outras palavras, é o tempo (t) em que o retorno financeiro do investimento o torna vantajoso do ponto de vista econômico. Dessa forma, ao relacionar o período de *Payback* com a vida útil dos equipamentos do projeto, é melhorada a percepção dos riscos e perdas quanto o capital investido, onde, quanto menor for o período, menor a exposição do investidor a riscos (ABEL *et al.*, 2019).

Existem dois tipos de indicadores de *Payback*: o simples e o descontado. A diferença entre ambos é o fato de o segundo caso considerar o valor do dinheiro no tempo, semelhante ao VPL (ABEL *et al.*, 2019). Ele é capaz de evidenciar a quantidade exata de tempo (t) necessária para recuperar o investimento inicial, sob influência da taxa de desconto aplicada pelo próprio investidor como parâmetro para remuneração de seu capital (CORREA, 2021).

Não há, portanto, um padrão estabelecido para considerar um *Payback* como vantajoso ou impróprio, pois sua análise também varia quanto a outros fatores, como o valor do investimento inicial e o tipo do negócio, podendo variar de alguns meses até anos. De forma análoga, quanto maior o valor de um investimento, muito provavelmente requererá um tempo maior para ser retornado (ABEL *et al.*, 2019).

Outra ferramenta importante utilizada para análise por profissionais com relação a viabilidade de um projeto é a Taxa Interna de Retorno (TIR). De acordo com Gitman (2010), taxa interna de retorno é uma técnica sofisticada de orçamento de capital, é a taxa de desconto que iguala o VPL de uma oportunidade de investimento a zero (isso porque o valor presente das entradas de caixa iguala-se ao investimento inicial). É a taxa de retorno anual composta que a empresa obterá, se aplicar recursos em um projeto e receber as entradas de caixa previstas.

2.4 Avaliação do ciclo de vida

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), normatizada na NBR ISO 14040, é uma das técnicas de gestão ambiental que permite uma compreensão e avaliação dos aspectos e impactos ambientais associados aos produtos manufaturados e consumidos através das entradas e saídas. Esta técnica permite estudar toda a vida de um produto, desde a aquisição da matéria-prima até a sua disposição final, incluindo etapas, processos e até meios alternativos de tratamento, como a reciclagem (ABNT, 2009).

Entre as fases de execução da ACV estão inclusos: (i) definição do objetivo e escopo, que consistem nas razões do estudo, público-alvo, funções do sistema, limitações, suposições

etc.; (ii) análise de inventário, através das coletas de dados e procedimentos de cálculo; (iii) avaliação dos impactos do ciclo de vida (AICV) associados, relacionando os dados do inventário com os impactos ambientais, modelagem dos dados de inventário, agregação dos resultados significativos e específicos; e (iv) interpretação da análise do inventário e da AICV com relação ao foco dos estudos (ABNT, 2009). O resumo dos procedimentos da ACV está ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Resumo da Avaliação do Ciclo de Vida



Os estudos, portanto, devem ter uma abordagem sistemática e transparente do produto, em que o nível de detalhamento irá variar com base no objetivo definido no escopo. Dentre as categorias gerais de impactos ambientais que são consideradas pela ACV, estão inclusos o uso de recursos naturais, a saúde humana e as consequências ecológicas. Dessa forma, se torna um importante auxílio no processo de identificação de melhorias em aspectos ambientais ao longo do ciclo de vida do produto estudado; nas tomadas de decisão estratégicas por parte das indústrias e organizações; no marketing ambiental dos produtos, como a rotulagem ecológica ou a declaração ambiental; e na definição e seleção de indicadores voltadas ao desempenho ambiental (ABNT, 2009).

Os dados requeridos para um estudo de ACV variam de acordo com o objetivo do estudo, podendo ser coletados tanto nos locais de produção, a serem moldados dentro das fronteiras do

sistema, quanto por meio da literatura (ABNT, 2004). As incertezas relacionadas à ACV são mencionadas do âmbito da AICV e análise de inventário, com foco nas questões de Interpretação, uma vez que não há generalização dos procedimentos adotados. Dentre os principais métodos de AICV estão: GWP, CML, Eco-indicator 99, Ecological Scarcity, EDIP, EPS 2000, Impact 2002+, LIME, LUCAS, MEEuP, ReCiPe, TRACI, USEtox e IMPACT World+. Estes métodos possuem individualidades e podem ser classificados em duas categorias, *midpoint* e *endpoint*, na qual a primeira usa indicadores localizados ao longo do mecanismo ambiental antes de chegar ao ponto final da categoria, e a segunda considera todo o mecanismo ambiental até o seu ponto final (MENDES, BUENO E OMETTO, 2015).

Nesta etapa do processo, os impactos decorrentes das cargas ambientais calculadas na análise de inventário são descritos em forma de resultados numéricos a respeito do inventário, e traduzidos em resultados ambientais relevantes (SAADE, SILVA E GOMES, 2014). Esses resultados podem ser categorizados em vários nichos, que vão de encontro ao objetivo e escopo do trabalho. Comumente, a variar pelo método utilizado, as categorias definidas são: acidificação terrestre, depleção da camada de ozônio, depleção de água, depleção de combustíveis fósseis, depleção de recursos minerais, ecotoxicidade em água doce, ecotoxicidade marinha, ecotoxicidade terrestre, eutrofização de água doce, eutrofização marinha, formação de material particulado, formação de oxidantes fotoquímicos, mudanças climáticas, ocupação de solo agrícola, ocupação de solo urbano, radiação ionizante, toxicidade humana, transformação de solo natural, danos à saúde humana, danos à diversidade dos ecossistemas e danos à disponibilidade de recursos (MENDES; BUENO; OMETTO, 2015).

Neste trabalho, o método escolhido para avaliação dos impactos foi o Potencial de Aquecimento Global (GWP - *Global Warming Potencial*), desenvolvido em 2013 pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, do inglês *Intergovernmental Panel on Climate Changes* (IPCC, 2013). Sendo que o principal motivo para a escolha deste método é porque o mesmo é largamente utilizado nos principais acordos internacionais para redução de emissão dos GEE, como o acordo de Paris e no Protocolo de Quioto. Levando em conta que ele pode ser aplicado em vários gases, deixando-o mais eficiente para a avaliação dos impactos causados.

Ele considera o potencial direto de aquecimento global advindo das emissões gasosas oriundos do ciclo de vida do produto avaliado. São agrupadas todas as emissões em um denominador comum, intitulado CO₂ equivalente (CO₂-eq). Dessa forma, as emissões de CO₂ servem de referência para expressar o potencial de aquecimento global do produto em um horizonte temporal de 100 anos (GWP 100a), expresso quantitativamente em kg CO₂-eq (CARVALHO, MEDEIROS NETO E CARVALHO, 2016).

3 MÉTODO DE PESQUISA

3.1 Dimensionamento do sistema fotovoltaico

O primeiro passo foi o dimensionamento do sistema fotovoltaico, baseado nos passos de Gonçalves *et al.* (2022). Para tanto, utilizou-se o modelo monocristalino Belenergy de 460W. O módulo fotovoltaico foi escolhido com base na sua potência e seu tamanho, pois, ficará viável para o local onde serão implantados. O cálculo da Capacidade de Geração (P), em kW, é obtido pelo produto da eficiência (η) e área (A) do módulo e a irradiância horizontal local diária média do local (I_m) (Equação 2).

$$P = \eta * A * I_m \quad (2)$$

A estimativa da potência mínima do sistema foi calculada pela razão entre a demanda de energia pelo produto da I_m , a taxa de desempenho (ρ), onde considerou-se 81%, conforme definido por Elibol *et al.*, (2017) por um período de 30 dias, em kWp (Equação 3). A Pot_{min} também é utilizada para definição do inversor a ser utilizado.

$$Pot_{min} = \frac{demanda}{I_m * \rho * 30} \quad (3)$$

Já o número de módulos necessários é dado pela divisão da Pot_{min} pela Potência do próprio módulo disponibilizada pelo fabricante (Equação 4).

$$N^{\circ} \text{ de módulos} = \frac{Pot_{min}}{Pot_{módulos}} \quad (4)$$

Mensalmente, a quantificação da energia produzida pelo sistema (E) é dada pelo produto de P , calculado pela Eq. 2, pelo tempo de insolação (h), (ρ) e o número de módulos (Equação 5).

$$E = P * h * \rho * N^{\circ} \text{ de módulos} \quad (5)$$

Todos os cálculos descritos até o momento foram efetuados mensalmente, através do

software Microsoft Excel. Ao final, o valor anual de E foi ajustado (E_{aj}) a uma taxa de degradação (φ) de 1%, considerando a vida útil do equipamento (n) (Equação 6).

$$E_{aj} = \sum_a^j E * (1 - \varphi)^n \quad (6)$$

A Tabela 1 contém os dados climáticos utilizados para o dimensionamento.

Tabela 1 – Dados mensais de Irradiância e Horas de Sol Pleno em Jaguaribe-CE												
JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Média
Irradiância (kW/m²)												
0,76	0,79	0,86	0,83	0,76	0,67	0,67	0,66	0,66	0,66	0,66	0,68	0,76
Horas de Sol Pleno												
238,9	207,9	215,7	201,5	214,6	227,6	248,7	284,9	294,6	311,7	299,4	279,6	8,3

Fonte: Adaptado pelo autor de Pereira *et al.* (2017); INMET (2022)

3.2 Análise de viabilidade econômica

No tocante ao estudo de viabilidade econômica, foi calculado o VPL do investimento. Neste procedimento, todo o fluxo de caixa estimado para a vida útil do sistema é trazido ao tempo presente, permitindo a realização de um balanço das entradas e saídas. O VPL positivo indica a viabilidade do investimento, e pode ser calculado como expresso na Equação 01, considerando o fluxo de caixa em um tempo futuro, por um período de 25 anos, conforme vida útil do equipamento, e uma taxa de desconto estimada, nesse caso, em 8%, semelhante à Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021).

Foi necessária a cotação de dois valores distintos para projeção do retorno financeiro: (i) série histórica tarifária cobrada pelo fornecimento elétrico, considerado os tributos (PIS, COFINS e ICMS) e um incremento de 1,05% a.a. de reajuste, e (ii) investimento para aquisição do sistema fotovoltaico completo, incluindo painéis solares, inversores, cabos, sistemas de fixação e proteção, etc, realizado através de pesquisa de mercado. Por fim, é acrescido um fator de 0,5% ao valor do investimento, referente à Operação e Manutenção (O & M).

O *Payback time* será obtido automaticamente pelo cálculo do fluxo de caixa. Ele se caracteriza pela quantidade mínima de anos (t) até que o retorno acumulado da geração elétrica supere o valor inicial investido. Todos os dados utilizados na simulação estão descritos resumidamente na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores utilizados para dimensionamento e análise financeira do investimento

Variável	Valor
Demanda kWh (mensal)	1589,89
Área do Painei (m ²)	2,16
Eficiência do painei (%)	21,3%
Potência Máxima do painei (Wp)	460 W
Investimento (R\$)	47.000,00
Taxa de desconto	8%
Vida útil do painei (anos)	25
O & M (% investimento/ano)	0,5%
Incremento na tarifa (reajuste)	1,05% a.a.
Taxa de desempenho	81%
Taxa de degradação	1% a.a.

Fonte: Autor (2023)

Os dados relacionados a demanda mensal de energia da UBS Maria Niêdja Barreira Gomes, foram obtidos através da média de todas as contas referentes ao ano de 2021. Já, as taxas de desempenho e de degradação, foram logrados com base em informações obtidas pela empresa responsável pela cotação do projeto fotovoltaico.

3.3 Avaliação do ciclo de vida

O escopo desta ACV inclui um sistema fotovoltaico completo, cujos componentes estão descritos na Tabela 3. A fronteira determinada para o estudo é delimitada entre a extração da matéria prima, o processo de manufatura dos componentes, e o descarte final em aterro sanitário. A estimativa será realizada com base no trabalho de Gonçalves *et al.*, (2020), onde seu inventário servirá de suporte e espelho para o sistema fotovoltaico aqui dimensionado. Para execução, utilizou-se o *software* SimaPro versão 9.0.0.49 (PRÉ SUSTAINABILITY, 2022), alimentado pela base de dados Ecoinvent versão 3.5 (ECOINVENT, 2018).

Tabela 3 – Componentes do sistema fotovoltaico

Material	Qtde.
Módulos fotovoltaicos	25
Inversor de corrente monofásico 10 kW	1
Perfil de fixação de alumínio (31,9 mm x 53,8 mm x 2,36 m)	26
Suportes para telha colonial (2 peças)	20
Junções para perfil (1 peça)	12

Grampos intermediários (2 peças)	18
Grampos finais 30 mm (4 peças)	7
Garras de aterramento (2 peças)	7
Conectores MC4 macho e fêmea c/ 2 pares	4
Cabo solar 6mm 1800V DC preto (m)	63
Cabo solar 6mm 1800V DC vermelho (m)	63

Fonte: Autor (2023).

Todos os componentes mencionados na tabela 3 foram obtidos pela empresa que foi cotado os valores para o projeto Fotovoltaico.

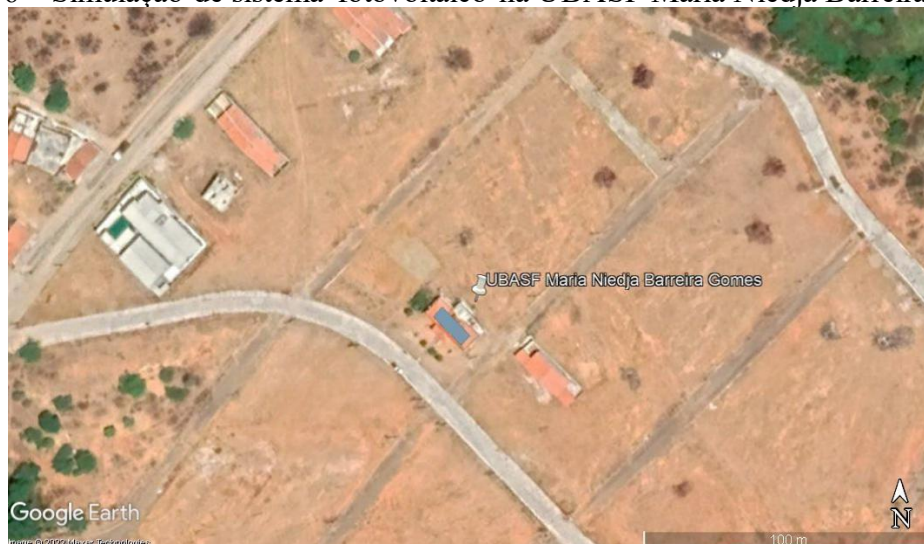
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Sistema fotovoltaico

Com base na metodologia detalhada anteriormente, estimou-se a $Pot_{min} = 11,07$ kWp, sendo necessários 25 painéis do modelo apresentado, e uma área de aproximadamente 60 m² para desenvolvimento do projeto. Para atender a necessidade do estabelecimento, é necessário 1 inversor de corrente monofásico de 10 kW.

A vida útil dos painéis é de 25 anos, com garantia de 12 anos para defeitos, já a garantia do inversor é de 10 anos, segundo o fabricante. Todos os outros elementos do sistema, bem como seus quantitativos, tais como cabeamento e estruturas de suporte e fixação estão descritos na Tabela 3. A Figura 6 representa uma simulação da área do sistema dimensionado comparado às instalações da UBASF Maria Niedja Barreira Gomes.

Figura 6 – Simulação de sistema fotovoltaico na UBASF Maria Niedja Barreira Gomes



Fonte: Adaptado de Google Earth (2023).

Velloso, Martins e Pereira (2019) exaltam o potencial semiárido para geração fotovoltaica. Eles atribuem essa aptidão às singularidades da região, frutos das longas estações secas e maiores incidências de energia solar. Os autores ainda afirmam que devido a isto, o Nordeste brasileiro possui os melhores índices para o mercado fotovoltaico no Brasil.

Regiões semiáridas que, apesar das altas temperaturas que não são ideais para o uso da energia fotovoltaica, são um excelente espaço para desenvolvimento desta tecnologia, uma vez que a ampla disponibilidade dos recursos solares compensa as perdas devido às temperaturas. Afinal, são diversos os parâmetros que afetam o desempenho dos sistemas, como a temperatura, umidade, radiação, choques mecânicos, sujidade, ventos, cobertura de nuvens e quantidade de chuvas (MUSSARD; AMARA, 2018).

Valente e de Assunção (2023), realizaram um estudo sobre um sistema de backup de energia a partir da geração fotovoltaica para uma UBS no município de Cametá/PA, apontam que o dimensionamento de um sistema fotovoltaico *off-grid* é necessário para o estabelecimento de saúde uma vez que esta encontra-se numa região em que a energia elétrica fornecida é instável. Foram dimensionados 4 módulos solares, a partir do método de insolação, para uma área de 60 m² e consumo diário de 6.802 W.

Outros estudos em empreendimentos na área da saúde buscaram dimensionar projetos, é o caso de Borges *et al.* (2023), no estudo que buscou verificar as viabilidades técnicas e financeiras da implantação de um sistema gerador de energia fotovoltaica ligada à rede de energia elétrica de um hospital no interior de Santa Catarina, utilizaram o sistema *on grid*, e escolhido a placa fotovoltaica do fabricante Vertex para dimensionamento do sistema, com 188 painéis solares e uma área de 508,25 m².

4.2 Análise financeira

A partir de cotações com empresas consolidadas no ramo, estimou-se necessário um investimento médio de R\$ 47.000,00 para instalação do sistema. A Tabela 4 ilustra as simulações de produção de energia, em kWh, para o primeiro ano.

Tabela 4 – Simulação de geração elétrica para o primeiro ano de funcionamento do sistema fotovoltaico

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1700,26	1538,06	1735,49	1555,97	1523,79	1420,13	1548,05	1750,22	1799,69	1908,78	1840,78	1768,99

Fonte: Autor (2023)

Com base no resultado apresentado na tabela 4, realizou-se a simulação do retorno financeiro através do fluxo de caixa. O resultado revela um VPL positivo, de R\$ 96.855,98, o que atesta a viabilidade financeira do investimento. Além disso, o *payback* demonstra que ao término do terceiro ano de funcionamento do sistema, todo o valor investido já terá sido recuperado (Tabela 5).

Tabela 5 – Simulação do fluxo de caixa do investimento

Ano	Energia anual produzida (kWh)	Economia de Energia	O&M	Fluxo de Caixa	<i>Payback</i>	VPL
0	-	-	-	-R\$ 47.000,00	-R\$ 47.000,00	R\$ 96.855,98
1	19889,31	R\$ 13.666,74	R\$ 235,00	R\$ 13.431,74	-R\$ 34.563,20	-
2	19690,42	R\$ 13.672,14	R\$ 235,00	R\$ 13.437,14	-R\$ 23.043,03	-
3	19493,51	R\$ 13.677,54	R\$ 235,00	R\$ 13.442,54	-R\$ 12.371,91	-
4	19298,58	R\$ 13.682,94	R\$ 235,00	R\$ 13.447,94	-R\$ 2.487,27	-
5	19105,59	R\$ 13.688,35	R\$ 235,00	R\$ 13.453,35	R\$ 6.668,85	-
6	18914,53	R\$ 13.693,75	R\$ 235,00	R\$ 13.458,75	R\$ 15.150,15	-
7	18725,39	R\$ 13.699,16	R\$ 235,00	R\$ 13.464,16	R\$ 23.006,36	-
8	18538,13	R\$ 13.704,57	R\$ 235,00	R\$ 13.469,57	R\$ 30.283,55	-
9	18352,75	R\$ 13.709,99	R\$ 235,00	R\$ 13.474,99	R\$ 37.024,40	-
10	18169,23	R\$ 13.715,40	R\$ 235,00	R\$ 13.480,40	R\$ 43.268,43	-
11	17987,53	R\$ 13.720,82	R\$ 235,00	R\$ 13.485,82	R\$ 49.052,27	-
12	17807,66	R\$ 13.726,24	R\$ 235,00	R\$ 13.491,24	R\$ 54.409,82	-
13	17629,58	R\$ 13.731,66	R\$ 235,00	R\$ 13.496,66	R\$ 59.372,52	-
14	17453,29	R\$ 13.737,08	R\$ 235,00	R\$ 13.502,08	R\$ 63.969,45	-
15	17278,75	R\$ 13.742,51	R\$ 235,00	R\$ 13.507,51	R\$ 68.227,58	-
16	17105,97	R\$ 13.747,94	R\$ 235,00	R\$ 13.512,94	R\$ 72.171,88	-
17	16934,91	R\$ 13.753,37	R\$ 235,00	R\$ 13.518,37	R\$ 75.825,48	-
18	16765,56	R\$ 13.758,80	R\$ 235,00	R\$ 13.523,80	R\$ 79.209,79	-
19	16597,90	R\$ 13.764,24	R\$ 235,00	R\$ 13.529,24	R\$ 82.344,68	-
20	16431,92	R\$ 13.769,67	R\$ 235,00	R\$ 13.534,67	R\$ 85.248,52	-
21	16267,60	R\$ 13.775,11	R\$ 235,00	R\$ 13.540,11	R\$ 87.938,34	-
22	16104,93	R\$ 13.780,55	R\$ 235,00	R\$ 13.545,55	R\$ 90.429,92	-
23	15943,88	R\$ 13.786,00	R\$ 235,00	R\$ 13.551,00	R\$ 92.737,86	-
24	15784,44	R\$ 13.791,44	R\$ 235,00	R\$ 13.556,44	R\$ 94.875,70	-
25	15626,59	R\$ 13.796,89	R\$ 235,00	R\$ 13.561,89	R\$ 96.855,98	-

Fonte: Autor (2023)

O resultado positivo, R\$ 96.855,98 é semelhante ao trabalho de Gonçalves *et al*, (2022),

que obteve VPLs positivos em todos os tipos climáticos brasileiros. Apesar dessa generalização, o clima semiárido obteve os melhores rendimentos, com menor necessidade de investimento e melhores retornos financeiros. Os autores preconizam a relação direta das particularidades climáticas com os efeitos positivos nas simulações de fluxo de caixa e produção de energia (GONÇALVES *et al.*, 2022).

Diversos outros trabalhos na literatura acadêmica nacional e internacional corroboram com os resultados encontrados nesta pesquisa. Vale *et al.* (2017), Ferreira *et al.* (2019), Imam, Al-Turki e R (2019) e Karimi *et al.* (2019) avaliaram técnica e economicamente o comportamento de usinas fotovoltaicas em condições semelhantes às utilizadas nesta pesquisa, e todas obtiveram VPLs positivos. Apesar desta constatação, observou-se o efeito das pequenas mudanças das características climáticas, dos locais de estudos dos trabalhos citados anteriormente, no retorno do fluxo de caixa.

Os *paybacks* relatados, ainda por estes autores, variaram entre 3,1 e 21,1 anos, colocando o valor aqui encontrado, aproximadamente 5 anos, entre os melhores apresentados. Essas variações podem estar associadas às horas de sol pleno, variações entre os índices de irradiação solar, e temperatura, dentre outras possíveis causas.

Comparando com Silva (2020), que em seu estudo sobre a viabilidade econômica do projeto de implantação de energia solar em uma UBS no município de Cascavel/PR, menciona a utilização do sistema Grid-Tie com 48 módulos, constatou a VPL após 10 anos de 53.161,31 e TIR de 29,29% e *payback* de 4,1.

Outros estudos relacionados a unidades de saúde estão em Moraes (2022), em seu trabalho referente a viabilidade técnica e econômica em um sistema fotovoltaico em um hospital veterinário de dourados/MS, para uma área de 176 m², 69 módulos de 514 W obteve um *payback* de 4,65 anos, VPL de 102.948,18 e TIR de 19%.

4.3 Avaliação do ciclo de vida

Através do inventário de Gonçalves *et al.* (2020), foi possível estimar os valores dos fatores de emissão para esse sistema proposto. Os dados obtidos estão expressos na Tabela 6.

Tabela 6 – Simulação de Fatores de Emissão para o sistema proposto

Pegada de carbono total	Pegada de carbono anual	FE
(kgCO ₂ -eq)	(kgCO ₂ -eq/ano)	(kgCO ₂ -eq)/kWh
22.624,12	904,96	0,05

Fonte: Autoria Própria (2023).

O valor final de FE, 0,05 (kgCO₂-eq/kWh), embora um pouco maior do que o encontrado pelos autores de referência (0,0257 kgCO₂-eq/kWh), estão bem próximos. Essa diferença se dá, principalmente, pelas pequenas alterações nos equipamentos. Ressalta-se a semelhança entre características climáticas entre as duas pesquisas, uma vez que estão inseridas no clima semiárido (Jaguaribe-CE e Pau dos Ferros-RN).

Ambos os trabalhos estão dentro da margem, quando comparado a outros trabalhos, como em Müller *et al.* (2021), que variou sua pegada entre 0,013 e 0,026 kgCO₂-eq/kWh e Pamponet *et al.* (2021), que obteve um intervalo entre 0,013 e 0,085 kgCO₂-eq/kWh. Um exemplo de como as especificações dos equipamentos utilizados e as variações climáticas interferem no FE final do projeto é o trabalho de Yaghoubirad *et al.* (2022), que encontraram um entremeio entre 8,85 e 17,24 kgCO₂-eq/kWh, em 5 tipos climáticos dos EUA.

Ainda semelhante a Gonçalves *et al.* (2020), verificou-se que as células fotovoltaicas foram os maiores contribuintes para a totalização da pegada de carbono. Esta relação entona o impacto ambiental oriundo da extração da matéria prima, processamento e utilização dos produtos finais, diretamente relacionados à expansão e popularização da energia solar.

Também se enfatiza a exploração e processamento do alumínio e do vidro solar. A contribuição considerável para a pegada de carbono total do sistema revela o dano ambiental da utilização desses materiais. Além disso, houve o ganho ambiental decorrente da utilização de 85% do alumínio reciclado, que induziu uma bonificação ambiental pelo impacto evitado, interferindo para melhor no resultado final (GONÇALVES *et al.*, 2020).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base no trabalho desenvolvido, foi possível compreender um pouco da temática técnico/econômica/ambiental que envolve o mundo fotovoltaico. É baseado nesses três pilares que se sustentam os princípios sustentáveis dessa fonte renovável de energia. Além disso, atestou-se a eficiência e destaque da região semiárida para o mercado de energia solar.

O sistema fotovoltaico projetado para a UBASF Maria Niedja Barreira Gomes, localizada no município de Jaguaribe-CE, teve um resultado satisfatório, capaz de suprir a demanda média de 1589,85 kWh mensais, além disso, estimou-se a produção elétrica e consequente fluxo de caixa associado. Constatou-se que há viabilidade econômica de investimento, com VPL estimado de R\$ 96.855,98 e um período de retorno, *payback*, entre 4 e 5 anos, conforme descrito na literatura.

Ambientalmente falando, a pegada de carbono do mesmo sistema o mostra coerente com a expectativa de emissões para um projeto do tipo. Observou-se que o clima semiárido se mostra um excelente local para geração fotovoltaica, o que intensifica os benefícios ambientais de baixa emissão. Também se elenca o papel das células fotovoltaicas, do alumínio e do vidro solar, além do bônus ambiental oriundo da utilização de alumínio reciclado.

Para trabalhos futuros, almeja-se a incorporação de todos os equipamentos no escopo da ACV, como o inversor e sistemas de cabeamento e aterramento. Também é essencial que o inventário seja detalhado ao máximo, para garantir a maior veracidade dos resultados.

6. REFERÊNCIAS

ABEL, D. de C.; TAVARES, T. F. C.; ARAÚJO, R. L.; SANTOS, C. A. F. dos. Análise da viabilidade econômico-financeira da implantação de energia solar fotovoltaica no Hotel Praiano (Tapes/RS). In: Encontro Internacional Sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente, 21., 2019, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: XXI ENGEMA, 2019. p. 1-12.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 30 p

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14042**: Gestão ambiental Avaliação do ciclo de vida - Avaliação do impacto do ciclo de vida. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 31 p

ABRÃO, R. A. F. A geopolítica das energias renováveis: o Brasil em meio a um cenário global em transformação. **Monções**: Revista de Relações Internacionais da UFGD, [s.l.], v. 11, n. 22, p. 118-150, 15 dez. 2022.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 482/2012**. 2012. 13p

ASSENHEIMER, O. **Instalação de sistema fotovoltaico em prédios hospitalares**: estudo de caso. 2015. 50 f. Monografia (Especialização) - Curso de Energias Renováveis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

BORGES, J. L.; NIERO, T. B.; MARTINS, G. V.; TEZA, J. Análise técnica e financeira para implantação de um sistema fotovoltaico no hospital São Sebastião no município Turvo/SC. **Unicrea**, Florianópolis, v. 1, n. 2, p. 17-51, mar. 2023

CAMPOS, C. C. de. **Eficiência energética em edifícios hospitalares obtida por meio de estratégias positivas**: estudo da redução do consumo com climatização artificial para arrefecimento do ar em salas de cirurgia. 2013. 369 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

CARVALHO, B. C. T. de; MEDEIROS NETO, J. L. de; CARVALHO, M. Estudo aplicado de acv em otimização de sistemas de refrigeração por absorção de duplo efeito com aporte de energia solar. In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 7., 2016, Campina Grande. **Anais [...]**. Campina Grande: ConGeA, 2016. p. 1-7.

CLIMATEMPO. **Jaguaribe - BR**. 2022. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/climatologia/5835/jaguaribe-ce>. Acesso em: 28 out. 2022.

CNES - CADASTRO NACIONAL DE ESTABELECIMENTOS DE SAÚDE. **CNESNet**. 2022. Disponível em: http://cnes2.datasus.gov.br/cabecalho_reduzido.asp?VCod_Unidade=2306902374064. Acesso em: 01 jun. 2022.

CORREA, R. L. **Energia solar**: uma análise de viabilidade econômico-financeira da sua instalação. 2021. 22 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Contábeis, Universidade de Caxias do Sul, Nova Prata, 2021.

DAMIANI, M. F. Sobre pesquisas do tipo intervenção. *In*: Encontro Nacional de Didática e Práticas de Ensino, 16. 2012, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: Junqueira&marin Editores, 2012. p. 1 - 9.

ECOINVENT. **Database**. Versão 3.5. Cidade: Zurique 2018. Disponível em: <http://www.ecoinvent.ch>. Acesso em: 01 nov. 2022.

ELIBOL, E., ÖZMEN, Ö.T., TUTKUN, N., KÖYSAL, O. Outdoor performance analysis of different PV panel types. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 67, p. 651-661, jan. 2017.

ENERGEASY SOLAR. **Placa Solar ou Paine Solar?** 2020. Disponível em: <https://energeasysolar.com.br/placa-solar-ou-painel-solar/>. Acesso em: 05 jun. 2022.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. MME – Ministério de Minas e Energia. **NOTA TÉCNICA DEA 009/2021**. Modelo de Mercado da Micro e Minigeração Distribuída (4MD): Metodologia – Versão PDE 2031. Rio de Janeiro: EPE, 2021. 26 p. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico-593/NT_Metodologia_4MD_PDE_2031.pdf. Acesso em: 03 jun 2022.

EPA, Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz Energética e Elétrica**. 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 20 set. 2023.

EXENBERGER, Markus. **Guia de referência para cobertura jornalística de energias renováveis**. 2018. Disponível em: <http://energif.mec.gov.br/images/materiais/materiais9.pdf>. Acesso em: 20 set. 2023.

FARIAS, M. G. F. da Silva; SILVA, I. H. M. da; CARVALHO, R. G. de. Energias renováveis: o parque eólico de São Cristóvão, município de Areia Branca (RN) – Brasil. **Revista de Geografia e Ordenamento do Território**, [s.l.], v. 2, n. 22, p. 111-139, 30 dez. 2021.

FERREIRA, M. A.; MARUCA JUNIOR, M.; MOREIRA, M. T.; AZEVEDO, G. R.; RIBEIRO, M. G. B. **Viabilidade Técnica e Financeira para Implantação de Sistema Fotovoltaico no campus UNA - Pouso Alegre**. 2022. 19 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Ânima Educação, Pouso Alegre-RS, 2022.

FONSECA, L. F. S.; SILVA JÚNIOR, J. M.; FARIAS NETO, J. R.; ABRAHÃO, R.; CARVALHO, M. Vulnerabilidade das regiões semiáridas às mudanças climáticas: impactos na produção de energia fotovoltaica. **Research, Society and Development**, [s.l.], v. 10, n. 3, p. e4010312931, 4 mar. 2021.

GAVIOLI, A. M.; FREDERICO, M.; PEREIRA, V. H.; ALBAREDA, A. Viabilidade financeira para implantação de painéis fotovoltaicos em um hospital público do município de Curitiba. **Brazilian Journal of Development**, [s.l.], v. 7, n. 1, p. 9644-9660, 2021.

GITMAN, L. J. et al. **Princípios de administração financeira**. 2010.

GONÇALVES, G. L.; ABRAHÃO, R.; ROTELLA JUNIOR, P.; ROCHA, L. C. Souza. Economic Feasibility of Conventional and Building-Integrated Photovoltaics Implementation in Brazil. **Energies**, [s.l.], v. 15, n. 18, p. 6707, 14 set. 2022.

GONÇALVES, G. L.; SILVA, L. P. da; SANTOS, P. R. de A.; CARVALHO, M.; ABRAHÃO, R. Comparação ambiental entre sistema fotovoltaico convencional e semitransparente. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, [s.l.], v. 1, n. 53, p. 103, 3 fev. 2021

GRAY, D. E. **Pesquisa no mundo real**. 2. ed. Porto Alegre: Penso, 2012.

HUSAIN, A. A. F. *et al.* A review of transparent solar photovoltaic technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.] v. 94, n. January 2017, p. 779–791, 2018.

IMAM, A. A.; AL-TURKI, Y. A.; R., S. Techno-Economic Feasibility Assessment of Grid-Connected PV Systems for Residential Buildings in Saudi Arabia—A Case Study. **Sustainability**, [s.l.], v. 12, n. 1, p. 262, 28 dez. 2019.

INFINIT SOLAR. **A energia fotovoltaica**. Disponível em: <http://infinit solar.com.br/energia-fotovoltaica/>. Acesso em: 05 jun. 2022.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **BDMEP** – Dados Históricos. 2022. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/#>. Acesso em: 25 out. 2022.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Report Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. New York, USA: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.

IPECE - INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. Governo do Estado do Ceará. **Panorama da produção de energia elétrica no Estado do Ceará: um enfoque para a matriz eólica**. Fortaleza, 2018. 33 p.

IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Renewable Capacity Statistics 2022**. Abu Dhabi: IRENA, 2022. 64 p.

KARIMI, M. S.; FAZELPOUR, F.; ROSEN, M. A.; SHAMS, M. Techno-economic feasibility of building attached photovoltaic systems for the various climatic conditions of Iran. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, [s.l.], v. 38, n. 6, p. 1-13, 15 abr. 2019.

KORZENIEWICZ, M. B. D. V. **Análise da matriz energética brasileira e a participação das energias renováveis a partir das políticas ambientais energéticas**. 2021. 55 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Economia do Desenvolvimento, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

LAGRIMANTE, D. M.; AMARANTE, M. dos S.; CRUZ, V. S.; LANDIM, L. P. Estudo da aplicação de energia fotovoltaica. **Revista Pesquisa e Ação**, [s.l.], v. 4, n. 1, p. 162-170, 04 jun. 2018.

LANA, L. T. C.; ALMEIDA, E.; DIAS, F. C. L. S.; ROSA, A. C.; SANTO, O. C. do E.;

SACRAMENTO, T. C. B; BRAZ, K. T. M.. Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica. **Engenharias On-Line**, [s.l.], v. 1, n. 2, p. 21-33, 17 mar. 2016.

MACIEL, S. L. **Gestão de energia em unidades hospitalares**: estudo de caso do hospital das clínicas da Universidade Federal de Goiás - parte 2. 2018. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018.

MAGRASSI, F. *et al.* Hybrid solar power system versus photovoltaic plant: A comparative analysis through a life cycle approach. **Renewable Energy**, v. 130, p. 290– 304, 2019.

MENDES, L. C. F. **Viabilidade de implantação de sistema fotovoltaico e de aproveitamento de água pluvial para estabelecimento assistencial de saúde a partir de critérios AQUA**. 2019. 47 f. Monografia (Especialização) - Sistemas Tecnológicos e Sustentabilidade Aplicados ao Ambiente Construído, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, [s.l.], v. 26, n. 1, p. 160-175, 24 nov. 2015.

MORAIS, G. E. de. **Viabilidade Técnica e Econômica de um sistema fotovoltaico em um hospital veterinário de Dourados**. 2022. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharelado em Engenharia de Energias, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2022.

MORI, G. K.; CAMARGO, L. de S.; CARMELITO, B. E.; LIMA, E. J. de; ROA, Y. H. H.; RODOVALHO, D. S. Análise energética e os impactos de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 8., 2020, Fortaleza. **Anais [...]** . Fortaleza: Associação Brasileira de Energia Solar, 2020. p. 1-8.

MÜLLER, A.; FRIEDRICH, L.; REICHEL, C.; HERCEG, S.; MITTAG, M.; NEUHAUS, D. H. A comparative life cycle assessment of silicon PV modules: impact of module design, manufacturing location and inventory. **Solar Energy Materials And Solar Cells**, [s.l.], v. 230, p. 111277, set. 2021.

MUSSARD, M.; AMARA, M. Performance of solar photovoltaic modules under arid climatic conditions: a review. **Solar Energy**, [s.l.], v. 174, p. 409-421, nov. 2018.

OLIVEIRA, J. É. S. de; RAMOS, H. R. Análise da eficiência energética promovida pela implementação de placas solares em hospitais no contexto nacional e internacional. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 9, n. 69, p. 144-158, 2021.

OLIVEIRA, J. É. S. de; RAMOS, H. R. **Sistemas de Energia Fotovoltaica Implantados em Prédios Públicos localizados no Município de São Paulo**. 2021. Disponível em: <https://www.eventoanap.org.br/data/inscricoes/10068/form3917282086.pdf>. Acesso em: 05 maio 2022.

PAMPONET, M. C.; MARANDUBA, H. L.; ALMEIDA NETO, J. A.; RODRIGUES, L. B. Energy balance and carbon footprint of very large-scale photovoltaic power plant. **International Journal of Energy Research**, [s.l.], v. 46, n. 5, p. 6901-6918, 15 dez. 2021.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas Brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 88 p.

PÉREZ, A. C. **Eficiência energética da envoltória de edifícios hospitalares**. 2015. 226 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2015.

PRÉ SUSTAINABILITY. **SimaPro software**. Versão 9.0.0.49. Cidade: Amersfoort, 2019. Disponível em: <https://simapro.com/>. Acesso em: 01 nov. 2022.

PURIFICAÇÃO, R. A. do N.; RAMOS, H. R.; KNISS, C. T. Barreiras e facilitadores para o uso da energia fotovoltaica: uma revisão sistemática da literatura. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [s.l.], v. 16, n. 2, p. 72-83, 29 mar. 2020.

RANGEL, P. C. P. **Levantamento da viabilidade econômica-técnica-ambiental da geração de energia fotovoltaica em canais de integração do Ceará**. 2017. 79 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

RIBAS, L. **Efeito fotovoltaico: como a energia é gerada**. 2020. Disponível em: ensolare.com.br/blog/efeito-fotovoltaico-como-a-energia-e-gerada. Acesso em: 05 jun. 2020.

SAADE, M. R. M.; SILVA, M. G.; GOMES, V. A. Avaliação do Ciclo de Vida – ACV, e a etapa de avaliação de impactos ambientais: considerações sobre o uso de diferentes métodos e seus reflexos nos resultados finais. **Natureza On Line**, [s.l.], v. 12, n. 3, p. 109-116, jul. 2014.

SANTOS, J. B. dos; JABBOUR, C. J. C. Adoção da energia solar fotovoltaica em hospitais: revisando a literatura e algumas experiências internacionais. **Saúde e Sociedade**, [s.l.], v. 22, n. 3, p. 972-977, set. 2013.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico**. Cortez editora, 2017.

SILVA, H. M. F. da; ARAÚJO, F. J. C. Energia solar fotovoltaica no Brasil: uma revisão bibliográfica. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, [s.l.], v. 8, n. 3, p. 859-869, 31 mar. 2022.

SILVA, J. R. P. da. Instalação de um sistema fotovoltaico em unidade de saúde pública: análise de viabilidade econômica. **A Competitividade e Sustentabilidade**, v. 7, n. 1, p. 175-189, fev. 2020.

SOUZA, G. R.; PENHA, R. S. da. Viabilidade Econômica de um Projeto de Investimento de Energia Fotovoltaica. **Revista de Auditoria Governança e Contabilidade**, [s.l.], v. 8, n. 35, p. 113-128, 2020.

VALE, A. M.; FELIX, D. G.; FORTES, M. Z.; BORBA, B. S. M. C.; DIAS, B. H.; SANTELLI, B. S. Analysis of the economic viability of a photovoltaic generation project applied to the Brazilian housing program “Minha Casa Minha Vida”. **Energy Policy**, [s.l.], v. 108, p. 292-298, set. 2017.

VELLOSO, M. F. A.; MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. Case study for hybrid power generation combining hydro- and photovoltaic energy resources in the Brazilian semiarid region. **Clean Technologies and Environmental Policy**, [s.l.], v. 21, n. 5, p. 941-952, 16 mar. 2019.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações: Sistemas Isolados e Conectados à Rede**. São Paulo SP: Editora Erica Ltda, 2013. 224 p.

YAGHOUBIRAD, M.; AZIZI, N.; AHMADI, A.; ZAREI, Z.; MOOSAVIAN, S. F. Performance assessment of a solar PV module for different climate classifications based on energy, exergy, economic and environmental parameters. **Energy Reports**, [s.l.], v. 8, p. 68-84, out. 2022.