

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA PARA O ABASTECIMENTO DO MUNICÍPIO DE JANAÚBA - MG E REGIÃO

Lucas de Azevedo Silva. Inst. Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Norte de Minas Gerais - IFNMG

las53@alunoifnmg.edu.br

Jáder Fernando Dias Breda. Universidade Federal dos Vales de Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM

jader.breda@ufvjm.edu.br

Fidel Edson de Souza. Universidade Federal dos Vales de Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM

fidel.souza@ufvjm.edu.br

Jordane Silva Rodrigues. Universidade Federal dos Vales de Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM

jordane.rodrigues@ufvjm.edu.br

Marcos Júnio Alves dos Santos. Universidade Federal dos Vales de Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM

marcos.junio@ufvjm.edu.br

Júlia Oliveira Fernandes. Universidade de São Paulo – USP

juolivf@usp.br

Cleiton Rocha Sodré. Universidade Federal dos Vales de Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM

cleiton.sudre@ufvjm.edu.br

RESUMO

Com o passar dos anos, o fator ambiental tem se tornado primordial, e com isso, aumentou-se o foco na implantação de fontes de geração de energia elétrica advindas de energias renováveis e limpas. No Brasil, a maior parte da matriz energética ainda é composta por fontes não renováveis de energia, mas isso tem mudado cada vez mais, principalmente, devido aos incentivos governamentais através de programas de crédito. De modo específico, em Minas Gerais, a matriz elétrica é fortemente ainda dependente de hidrelétricas, mas isso também vem sendo alterado, devido aos grandes potenciais energéticos advindos de outras fontes, como o vento e o sol, que são consideradas fontes renováveis de energia. A região de Janaúba, localizada no norte de Minas Gerais, como demonstrado em vários levantamentos, apresenta um grande potencial energético eólico e solar para geração de energia, entretanto ainda não há informações relevantes sobre a viabilidade econômica da implantação dessas duas fontes. Neste sentido, o presente trabalho buscou analisar esta problemática, trazendo informações relevantes através de simulações feitas no *software System Advisor Model (SAM)*, o qual apresenta diversos mecanismos de análise de viabilidade, incluindo o *Levelized Cost of Energy (LCOE)* ou custo nivelado de energia, que fornece dados como o custo de energia por kWh, trazendo a possibilidade de comparação econômica entre a implantação de ambas as fontes, com o objetivo de abastecer o município de Janaúba e região. A partir das simulações feitas no SAM, foi possível concluir que existe viabilidade econômica para implantação das duas fontes, e em comparação de um sistema com outro, verificou-se uma diferença de 1,66%, favorável ao sistema de geração de energia eólica em termos de LCOE, de modo a se mostrar mais viável, devido a possuir um maior fator de capacidade produtiva no intervalo considerado de 20 anos.

Palavras-chave: viabilidade econômica; System Advisor Model (SAM); Janaúba; LCOE; energia eólica; energia solar.

Data de recebimento: 26/09/2023

Data do aceite de publicação: 30/04/2024

Data da publicação: 30/04/2024

ECONOMIC VIABILITY ANALYSIS FOR THE IMPLEMENTATION OF PHOTOVOLTAIC AND WIND POWER GENERATION SYSTEMS FOR THE SUPPLY OF THE CITY OF JANAÚBA - MG AND REGION

ABSTRACT

Over the years, the environmental factor has become paramount, and as a result, there has been an increased focus on the implementation of sources of electrical power generation from renewable and clean sources of energy. In Brazil, the majority of the energy matrix is still composed of non-renewable sources of energy, but this is changing increasingly, mainly due to government incentives through credit programs. Specifically, in Minas Gerais, the electrical matrix is still heavily dependent on hydroelectric power, but this is also being changed due to the large energy potentials from other sources such as wind and sun, which are considered renewable sources of energy. The Janaúba region, located in the northern of Minas Gerais, as demonstrated in various surveys, presents a large wind and solar energy potential for power generation, however, there is still no relevant information on the economic viability of the implementation of these two sources. In this sense, this work aimed to analyze this problem, bringing relevant information through simulations made in the System Advisor Model (SAM) *software*, which presents various feasibility analysis mechanisms, including the Levelized Cost of Energy (LCOE), which provides data such as energy cost per kWh, bringing the possibility of economic comparison between the implementation of both sources, with the aim of supplying the city of Janaúba and region. From the simulations made in SAM, it was possible to conclude that there is economic viability for the implementation of both sources, and in comparison to one system to another, a difference of 1.66% was found, favoring the wind power generation system in terms of LCOE, showing to be more viable, due to having a higher productive capacity factor in the considered 20-year interval.

Keywords: economic feasibility; System Advisor Model (SAM) *software*; Janaúba; LCOE; wind energy; solar energy.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, grande parte da matriz energética é composta por fontes de energia não renováveis (51,7%) (Empresa de Pesquisa Energética [EPE], 2021). Já a matriz elétrica brasileira é composta principalmente por fontes alternativas, com destaque para a hidráulica, que em 2020 representou 65,2% da energia gerada no país (Portalsolar, 2020). No estado de Minas Gerais, a matriz elétrica é composta principalmente por fontes renováveis, sendo 81% da energia produzida proveniente da hidroeletricidade. O estado apresenta um amplo potencial hidrelétrico, com uma capacidade de 24.710 MW (Companhia Energética de Minas Gerais [CEMIG], 2010). A produção de energia em Minas Gerais é fortemente dependente da água, ademais o estado se apresenta com mais de 95% da matriz formada por fontes renováveis (Agência Nacional de Energia Elétrica [ANEEL] apud Pristino, 2020).

Ainda, vale comentar que o governo brasileiro vem nos últimos anos incentivando o uso das fontes alternativas de energia através de programas de incentivo. O Relatório Especial do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) sobre Energias Renováveis e Mitigação das Mudanças Climáticas (IPCC, 2011) aponta a necessidade de incentivos fiscais e financiamento público para o desenvolvimento de energia renovável. Em 2011, o Programa de

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA PARA O ABASTECIMENTO DO MUNICÍPIO DE JANAÚBA - MG E REGIÃO

Incentivo às Fontes Alternativas (Proinfa) implantou 119 empreendimentos de energia renovável, o que resultou em capacidade instalada de 2.649,87 MW (Schneider et al., 2017). Além disso, o Proinfa oferece desconto nas tarifas de uso para empreendimentos de fontes alternativas (WWF, 2012). O BNDES também oferece linha de crédito para projetos de energia renovável (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social [BNDES], 2022). Em 2015, foi lançado o Programa de Investimento em Energia Elétrica, que irá investir R\$116 bilhões em obras de geração de energia renovável (Schneider et al., 2017). Recentemente, foi criado o Programa de Energia Renovável Social, destinado a financiar a instalação de fontes renováveis para consumidores de baixa renda (Senado, 2022).

Neste sentido, vários trabalhos têm-se buscado realizar um levantamento de dados que auxiliem na ampliação do uso desse tipo de fonte. Em relação à região norte do estado de Minas Gerais, Fonseca (2022) enfatiza o potencial fotovoltaico da região de Janaúba, como um destaque em território nacional. Ainda, junto a isso, Silva (2023) aponta o potencial eólico da região de Janaúba, que também se destaca nacionalmente. Visto que existe um grande potencial entre as duas fontes na região considerada, surge o questionamento relacionado à viabilidade econômica das duas fontes na região.

Portanto, para que se possa buscar uma resposta para tal questionamento, uma das maneiras de calcular essa viabilidade é através do *Levelized Cost of Energy* (LCOE), que pode ser calculado por meio de fórmulas convencionais ou através da utilização de *softwares* específicos, como o que será utilizado ao longo deste trabalho, o *System Advisor Model* (SAM), que é um aplicativo gratuito e disponibilizado no *link* a seguir: <https://sam.nrel.gov/download.html>. Com isso, o presente trabalho foi desenvolvido com o intuito de verificar a viabilidade econômica de ambas as fontes de energia através da utilização do SAM, de modo que se possa realizar um comparativo entre as duas na região norte do estado de Minas Gerais, mais especificamente, para o município de Janaúba e região.

2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E ENERGIA EÓLICA

A energia solar fotovoltaica é uma tecnologia que converte a energia solar em eletricidade através do efeito da radiação em materiais semicondutores (Bagnall et al., 2017). Ela é uma fonte de energia renovável e não poluente, podendo ser utilizada em instalações de pequenos geradores ou grandes centrais fotovoltaicas (Neosolar Energia, 2022). A energia eólica é gerada por meio da força dos ventos (Portalsolar, 2020). A sua captação é feita por equipamentos chamados aerogeradores eólicos, que são responsáveis por converter a energia cinética dos ventos em energia elétrica. Por não emitir gases poluentes, a energia eólica é considerada uma fonte limpa e renovável, além de ser uma fonte inesgotável e bem distribuída, pois o vento se dispõe em todas as partes do mundo (Sousa, 2022).

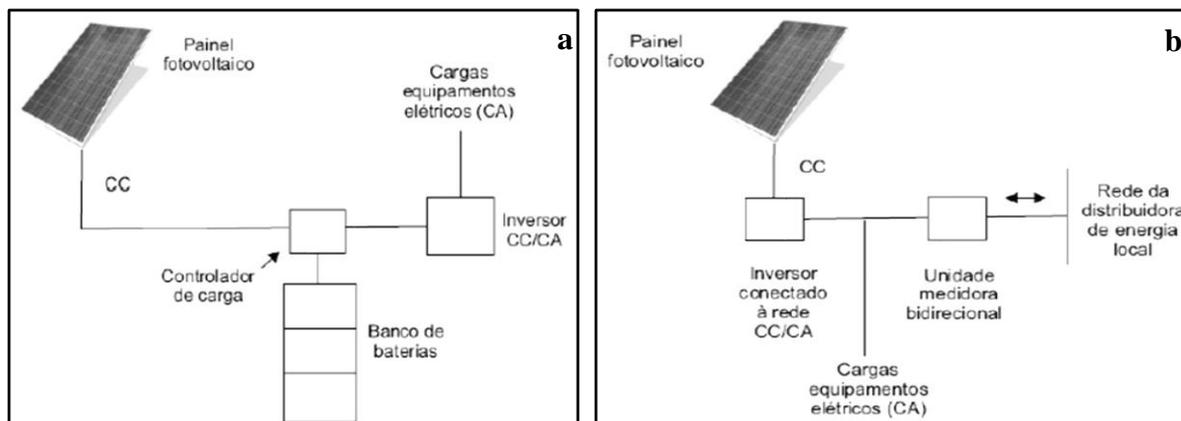
2.1 Energia Solar Fotovoltaica

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA PARA O ABASTECIMENTO DO MUNICÍPIO DE JANAÚBA - MG E REGIÃO

Sistemas de energia solar fotovoltaica incluem módulos, inversores, dispositivos de proteção e cabos, além disso, podem incluir também, baterias e controladores de carga para sistemas isolados (Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica [ABINEE], 2012). Existem dois principais sistemas: conectados à rede elétrica e sistemas isolados/autônomos (Fonseca, 2022, apud Hodge, 2017). Os sistemas isolados de energia solar fotovoltaica usam baterias para armazenar a eletricidade produzida para uso em períodos de baixa irradiação solar e alto consumo, liberando energia na forma de calor, principalmente no verão, quando a geração de eletricidade excede o consumo (ABINEE, 2012). Esses sistemas requerem capacidade extra e são mais caros que os sistemas conectados à rede elétrica para atender a mesma quantidade de consumo de kWh em uma residência (Albuquerque et al., 2017). A Figura 2-a apresenta o esquema desses sistemas.

O sistema conectado à rede de energia solar fotovoltaica é dimensionado para que a produção anual de energia seja igual ao consumo anual, permitindo um crédito energético com o excedente que é utilizado nos meses em que a produção é menor que o consumo (ABINEE, 2012). Esse sistema é composto por um inversor de frequência que permite a operação bidirecional e está ilustrado na Figura 2-b (Fonseca, 2022, apud Moreira, 2017). O custo deste sistema é menor do que o sistema isolado, visando a mesma quantidade de kWh consumida por uma residência (Albuquerque et al., 2017).

Figura 2 – a- Configuração do Sistema isolado; b- Configuração do Sistema conectado à rede

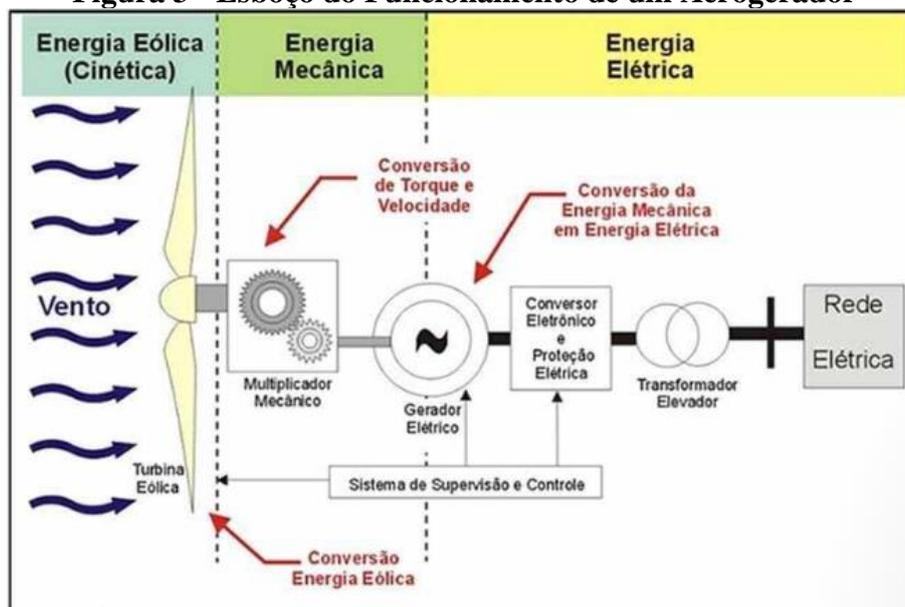


Fonte: Fonseca, 2022, apud Moreira, 2017.

2.2 Energia Eólica

Existem dois tipos de instalações de energia eólica: *onshore* e *offshore*. Segundo Portalsolar (2020), os parques eólicos *onshore* possuem custos gerais mais baratos, pois são instaladas em terra, enquanto as instalações *offshore* produzem mais energia, devido ao vento mais forte e constante no mar (onde são postas), com menos obstáculos. A Figura 3 mostra o esquema de funcionamento de um aerogerador, que converte energia mecânica em energia elétrica (Neoenergia, 2021).

Figura 3 - Esboço do Funcionamento de um Aerogerador



Fonte: Silva (2021), apud Picolo et al., 2014.

Como pode-se observar, as pás vão girar com a força do vento, fazendo girar o rotor que transmitirá a rotação multiplicada pela caixa multiplicadora ao gerador. Após isso, o gerador vai converter, em conjunto com um conversor de potência, a energia mecânica recebida em energia elétrica. Após a conversão a energia elétrica produzida é colocada na rede elétrica do parque eólico e depois na rede elétrica global (Reis, 2016).

2.3 Incentivos para utilização de fontes alternativas no Brasil

De acordo com a Eletrobras (2016), o Proinfa, implantou, até o final de 2011, um total de 119 empreendimentos que juntos, têm capacidade instalada de 2.649,87 MW, divididos em, 963,99 MW advindos de 41 usinas eólicas, 1.152,54 MW advindos de 59 pequenas centrais hidrelétricas (PHCs) e 533,34 MW provenientes de 19 térmicas a biomassa. Toda essa energia elétrica produzida anualmente é suficiente para abastecer cerca de 4,5 milhões de brasileiros (Schneider et al., 2017).

Criado pela Lei nº 10.438/2002, o Proinfa objetiva o aumento da participação de fontes alternativas renováveis na produção de energia elétrica, privilegiando empreendedores que não tenham vínculos em sociedade com concessionárias de geração, transmissão ou distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2021). Esse privilégio está relacionado com a impulsão dos investimentos em projetos de energia renovável, através da contratação de cotas dos geradores que fazem parte do programa (Esferaenergia, 2021). Atualmente a cota anual remanescente até o mês de setembro (2022), contratado pelo o programa é de 4.155.169,048 MWh (CCEE, 2022). Em 2015, o Programa de Investimento em Energia Elétrica (PIEE), foi lançado pelo governo federal, onde, de acordo com BEN (2015) e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) serão investidos R\$ 116 bilhões de reais em obras para geração de energia elétrica, através de fontes renováveis, sendo um investimento feito de R\$ 42 bilhões até 2018, e R\$ 74 bilhões após 2018 (Schneider et al., 2017).

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA PARA O ABASTECIMENTO DO MUNICÍPIO DE JANAÚBA - MG E REGIÃO

Outros incentivos foram advindos através do Proinfa, como o desconto de no mínimo 50% nas tarifas de uso dos sistemas de transmissão e distribuição para empreendimentos destinados a fontes alternativas de energia que forneçam potência máxima de 30 MW ao sistema interligado (WWF, 2012). Além deste, o BNDES dispõe uma linha de crédito destinado a empreendimentos de geração de energia por fontes renováveis, o valor pode chegar a 80% do investimento total, com juros a partir de 1,5% anuais, com prazos de até 24 anos (BNDES, 2022).

A lei 14.300/2022 criou o Programa de Energia Renovável Social (PERS), que é destinado a financiar a instalação de geração fotovoltaica, além de outras fontes renováveis para consumidores de baixa renda (Senado, 2022). Essa lei, permite às unidades consumidoras já existentes, juntamente com às que vão colocar em andamento a solicitação de acesso na distribuidora de energia em 2022, vão continuar por mais 25 anos a gozar dos benefícios já concedidos pela ANEEL, através do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) (Camara, 2022). O SCEE é um sistema no qual a energia elétrica ativa é injetada por unidades consumidoras, sendo essas com geração de micro ou pequena escala, produção esta que é distribuída na rede de concessionárias locais, emitida na forma de empréstimos livres, e então compensada com o consumo de energia elétrica ativa ou sendo contabilizada como crédito de energia de unidades que já participam e consomem do sistema (Energiahoje, 2022).

3 METODOLOGIA

Para poder realizar o comparativo de geração de energia para as duas fontes, foi utilizado o *Levelized Cost of Energy* (LCOE), que pode ser traduzido como custo nivelado de energia, em que se compara o custo relativo da energia produzida por diferentes fontes de geração (Lacchini, 2017).

O LCOE pode ser definido também como a divisão dos custos totais do projeto, o capital investido (CAPEX), ligado ao custo de construção da usina; os custos operacionais (OPEX), ligado ao custo de operação da usina ao longo de sua vida útil; e o residual que está ligado ao valor dos equipamentos ao final de sua vida útil. Assim, o CAPEX é geralmente medido em dólares (\$) ou moeda local, o OPEX é geralmente medido em dólares ou moeda local por período de tempo (\$/ano, mês, etc.) e o residual é geralmente medido em dólares ou moeda local, isso tudo é dividido pelo total de energia produzida ao longo da vida útil da usina (kWh ou MWh) (CANALSOLAR, 2020). Com isso, tem-se o LCOE (\$/MWh) do projeto dado pela Equação 1.

$$LCOE = \frac{CAPEX + OPEX - RESIDUAL}{KWh \text{ ou } MWh} \quad (1)$$

3.1 Escolha do Potencial e Local

Para comparar os custos de cada fonte de energia através do LCOE, fixou-se o potencial necessário para abastecer a cidade de Janaúba e arredores, na região norte do estado de Minas Gerais. A capacidade nominal de uma subestação é a quantidade máxima de energia elétrica que a subestação pode transmitir ou distribuir em condições normais (Logística, 2023). A CEMIG disponibiliza através do “Programa mais Energia”, um mapa com diversas subestações no estado de Minas Gerais, e neles fixado a capacidade nominal em MW de cada subestação. A subestação “Janaúba 1” situada no interior da cidade tem capacidade nominal de 25 MW

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA PARA O ABASTECIMENTO DO MUNICÍPIO DE JANAÚBA - MG E REGIÃO

(CEMIG, 2023). Para o presente trabalho, juntamente com a escolha de potencial e local de comparação, foi evidenciado o LCOE calculado de acordo com os parâmetros da plataforma *System Advisor Model* (SAM) que serão apresentadas nas próximas seções.

3.2 LCOE: Software SAM

O software SAM foi escolhido por já possuir um banco de dados com valores para grande parte das variáveis que são usadas para o cálculo do LCOE, e também por organizar de maneira mais eficaz as variáveis de cada método energético. Como descrito por NREL (2022), ele é um modelo de software gratuito desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), que ajuda os profissionais da área a tomar decisões no setor de energia renovável, como gerentes de projeto, engenheiros, analistas de política e pesquisadores. Ele pode modelar muitos tipos de sistemas de energia renovável, como sistemas fotovoltaicos, armazenamento de bateria, sistemas de concentração de energia solar, energia eólica entre outros.

O *software* possui dois modelos de entrada para poder simular: desempenho energético e o desempenho financeiro, que são elaborados para orientar os usuários de acordo com o projeto. Ele cria previsões de rendimento e cálculos de custo da energia para projetos elétricos conectados à rede, leva em conta os custos de operação, instalação e os parâmetros do sistema especificados pelo usuário como entrada para o modelo.

Após a escolha do método energético, é disponibilizado a escolha do método financeiro. O LCOE Calculator foi o escolhido para a realização da comparação entre as energias renováveis abordadas neste trabalho. Pode-se observar que, o LCOE é calculado pelo método da Razão de Custo Fixo, em inglês, *Fixed Charge Ratio* (FCR). O FCR é importante para entender como os custos fixos afetam o custo total da energia produzida, pois quanto maior o FCR, maior será a proporção dos custos fixos no custo total. Isso pode afetar a competitividade e rentabilidade do projeto de geração de energia. O FCR é a receita por montante de investimento necessário para cobrir o custo do investimento (NREL, 2022).

Na Equação (2) (NREL, 2022), pode-se observar a equação seguida pelo *software* para calcular o custo nivelado de energia.

$$LCOE_{SAM} = \frac{(FCR * TCC + FOC)}{AEP} + VOC \quad (2)$$

Sendo que, TCC é o custo de capital (\$); FOC é o custo operacional fixo anual (\$); VOC é o custo operacional variável ou valor residual (\$/kWh); FCR é a razão de custo fixo (%); AEP é a produção anual de eletricidade (kWh).

Comparando a Equação 1 (fórmula geral) e a Equação 2 (fórmula do SAM), tem-se que a principal diferença é que a fórmula do LCOE do SAM leva em conta a taxa de juros de capital (FCR) e os custos operacionais fixos (FOC), além da energia anual produzida (AEP) e do valor residual (VOC) do sistema, fornecendo uma visão mais detalhada e precisa do custo total do sistema. Enquanto a fórmula geral do LCOE é mais simples e se concentra principalmente nos custos de capital e operacionais e no valor residual do sistema.

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA PARA O ABASTECIMENTO DO MUNICÍPIO DE JANAÚBA - MG E REGIÃO

Ao se escolher os dois métodos a simular, é criado um projeto SAM, em que o *software* preenche as variáveis automaticamente de acordo com padrões baseados no sistema de geração dos Estados Unidos, sendo necessário alterá-los manualmente para se obter uma informação mais precisa, dentre elas, a localização do projeto, os custos gerais, os tipos de equipamento, tudo isso para conseguir adaptar os dados em padrões brasileiros.

3.2.1 LCOE: SAM – Energia Solar Fotovoltaica

Entre os modelos disponíveis para a escolha do usuário no sistema fotovoltaico está o PVWatts. O modelo PVWatts é um dos vários modelos disponíveis para simular o desempenho de sistemas fotovoltaicos (PV). Este modelo foi projetado para fornecer uma estimativa rápida e precisa da produção de energia de um sistema PV com base em poucos dados de entrada importantes, como localização, tamanho do sistema e tipo de módulo.

Uma das principais razões para escolher o modelo PVWatts para a simulação PV é sua ampla aplicabilidade. O modelo pode ser usado tanto para sistemas PV de pequena e grande escala e é adequado para uma variedade de aplicações diferentes, como residenciais, comerciais e de grande porte. Ele também está disponível para diferentes tipos de módulos e tecnologias, permitindo que os usuários selecionem o mais adequado para o seu projeto específico. Outra razão para escolher PVWatts é que ele se baseia em um modelo de desempenho padrão, que é bem validado e amplamente aceito na indústria. Ele usa dados de ano meteorológico típico, que é um conjunto de dados horários para condições climáticas, como radiação solar, temperatura, vento e umidade, específicos para uma localização, permitindo que os usuários obtenham previsões de desempenho realistas e confiáveis facilmente.

Selecionando o método fotovoltaico como energético e o método LCOE *Calculator* (FCR *Method*), o *software* necessita de parâmetros de entrada que são agrupados em abas para facilitar o uso e realizar as simulações. A seguir são apresentados tópicos referentes a cada parâmetro de entrada.

I. *Location and Resource*

Nesta aba são alocados dados referentes à localização do sistema e informações climáticas da cidade. Para escolher a localidade o *software* lê dados climatológicos de algumas cidades já disponibilizados no sistema, seguindo os formatos *Typical Meteorological year 2* (.tm2), *Typical Meteorological year 3* (.tm3), *EnergyPlus* (.epw) e *Comma-Separated Values* (.csv).

O formato *EnergyPlus* contém informações de várias cidades brasileiras, disponibilizadas pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis dos EUA (NREL), o formato *Typical Meteorological year 2* e *Typical Meteorological year 3*, já estão inseridos e disponibilizados do banco de dados do sistema juntamente com o *download* do *software*, já o formato usado nesta etapa (.csv) foi feito o *download* e disponibilizado em <https://bit.ly/2BpIOka>. Neste *link*, o usuário é direcionado para uma página do *Google Drive*, onde é disponibilizado a pasta *solar_resource*, e nela diversas cidades com diferentes informações, incluindo Bom Jesus da Lapa – BA, cidade que foi utilizada para a alteração de dados.

Para ser possível a simulação na cidade de Janaúba (não disponível no *link*), foi preciso localizar um município disponível, que tivesse os dados de irradiação solar mais próximos da localização desejada. A cidade de Bom Jesus da Lapa – BA apresenta as irradiações solares de

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA PARA O ABASTECIMENTO DO MUNICÍPIO DE JANAÚBA - MG E REGIÃO

aproximadamente 3% maior do que a de Janaúba. Os outros dados a seguir também foram alterados, entretanto agora, com Janaúba apresentando estatísticas maiores como a temperatura de Bulbo Seco (maior em aproximadamente 4,21%), que mede a temperatura sem considerar a umidade do ar, temperatura no Ponto de Orvalho (6%), que mede a umidade relativa do ar, a velocidade do vento (55,60%) e as chances de precipitação (38,47%). Registros como a latitude e longitude, elevação também foram alterados. Foi possível realizar tais comparações devido às estatísticas disponibilizadas no *site* do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB, 2018) e (Weatherspark, 2022). Ainda, vale ressaltar que os dados foram analisados em médias anuais desde 1980 até 2016.

A seguir, na Tabela 2, são apresentados os valores alterados que foram utilizados para a cidade de Janaúba e suas características.

Tabela 1 - Dados Climatológicos de Janaúba expostos na interface do SAM

Dados da cidade	Cidade	Janaúba
	Estado	Minas Gerais
	Fuso Horário	GMT-3
	Latitude	-43,3°
	Longitude	-15,8°
	Elevação	516m
Estatísticas Climáticas Anuais	Irradiação Direta Normal	5,84 kWh/m ² /dia
	Irradiação Difusa Horizontal	1,79 kWh/m ² /dia
	Temperatura Bulbo Seco	25°C
	Velocidade do Vento	2,5 m/s

Fonte: Autoria própria, 2023

II. System Design

Nesta aba, são inseridos os dados referentes ao design do sistema, onde se aborda os seguintes grupos de variáveis (todas as informações acrescentadas foram advindas do manual de utilização do SAM) (*National Renewable Energy Laboratory [NREL], 2022*):

1) *System Parameters* (Parâmetros do sistema), onde são preenchidas as informações dos tópicos seguintes:

System nameplate capacity, kWdc (capacidade nominal do sistema, kWdc), onde DC é a classificação de potência de corrente contínua, que é gerada pelos componentes de células solares, a qual converte luz do sol em energia elétrica;

Module type (tipos de módulo), que são eles: *Standard, Premium e Thin film*, onde em cada módulo, é especificado a *Approximate Nominal Efficiency* (eficiência nominal aproximada); o *Module Cover* (material que cobre a placa solar ou o módulo, com a finalidade de proteger e melhorar a eficiência, nos casos disponibilizados é usado o vidro antirreflexo); *Temperature Coefficient of Power* (coeficiente de temperatura de potência), que descreve como a potência elétrica produzida por uma placa solar é afetada pela variação de temperatura da placa; e, por fim, *Fill Factor (for self-shading)* (fator de preenchimento para sombreamento interno), que descreve a porcentagem da área total de uma placa solar que está efetivamente

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA PARA O ABASTECIMENTO DO MUNICÍPIO DE JANAÚBA - MG E REGIÃO

produzindo energia elétrica, levando em consideração a sombra causada por outras partes da placa solar, quanto maior o fator de preenchimento, mais eficiente será a placa solar e maior será a produção de energia.

DC to AC ratio é a proporção entre corrente contínua (DC) e corrente alternada (AC), a razão da potência nominal AC do inversor em relação a potência nominal DC do painel solar. Aumentar esta proporção aumenta a produção anual do sistema, mas também eleva o custo do painel. O padrão é 1,10, o que significa que um sistema de 4 kW teria um painel com classificação DC de 4 kW nas condições de teste padrão (STC) e um inversor com classificação AC de 3,63 kW. A proporção padrão de 1,10 é adequada para a maioria dos sistemas, mas uma faixa típica varia de 1,10 a 1,25, enquanto alguns sistemas de grande porte apresentam proporções tão elevadas quanto 1,50. O valor ótimo depende da localização do sistema, orientação do painel e custo do módulo.

Rated inverter size é a potência nominal classificada do inversor, expressa em quilowatts (kW), ou a capacidade máxima de saída de energia elétrica do inversor em condições ideais de operação. Este valor é calculado automaticamente pelo *software* de acordo com as especificações colocadas.

Inverter efficiency (eficiência do inversor), a eficiência nominal classificada do inversor, expressa como porcentagem, é calculada como a potência AC classificada em quilowatts do inversor dividida pela sua potência DC classificada em quilowatts. O valor padrão disponibilizado pelo *software* é de 96%. O modelo PVWatts calcula a eficiência horária de operação do inversor baseado na sua eficiência nominal e em uma curva de eficiência.

Estimated total module area (m²) ou avaliação da superfície total dos módulos é utilizada para calcular a área de solo abaixo. Isso equivale à extensão completa da superfície dos módulos, independentemente do grau de inclinação. A eficiência nominal aproximada é dependente do tipo de módulo. Também é um valor calculado automaticamente pelo sistema, de acordo com a Equação (3) a seguir:

$$\text{Área Total de Módulo Estimada (m}^2\text{)} = \frac{\text{Capacidade Nominal do Sistema(kW)}}{\text{Eficiência Nominal Aproximada(\%)}} \quad (3)$$

A Tabela 3 mostram os dados utilizados nos parâmetros do sistema:

Tabela 2 - Parâmetros do Sistema

Capacidade nominal do Sistema	37500 kWdc
Tipo do Módulo	Standard (Padrão)
Proporção DC para AC	1.5 (66%)
Potência nominal do Inversor	25000 kWac
Eficiência do Inversor	96%
Área total estimada do solo para o sistema	197369 m ²

Fonte: Autoria própria, 2023.

Foram fixadas, primeiramente, o tipo do módulo como *Standard* (padrão) com os valores já informados de acordo com a Tabela 3, a eficiência do inversor em 96% padronizado pelo *software*, e por se tratar de um sistema de grande porte a proporção entre corrente contínua e corrente alternada foi fixada em 1.5, uma vez que, para o SAM sistemas a partir de 1 MW já

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA PARA O ABASTECIMENTO DO MUNICÍPIO DE JANAÚBA - MG E REGIÃO

são considerados de grande porte. Por último, para que a usina entregasse 25 MW de potência para o sistema, foi alterada a capacidade nominal para 37500 kW de potência elétrica em corrente contínua, sendo assim, a potência nominal do inversor fornece 25000 kW de potência elétrica em corrente alternada (utilizada pelo sistema elétrico convencional).

2) *Orientation and Tracking* (Orientação e Rastreamento), que é preenchido pelas seguintes variáveis:

Array type (tipo de array) descreve se os módulos fotovoltaicos no conjunto estão fixos ou se eles acompanham o movimento do sol no céu com um ou dois eixos de giro. A opção padrão é para um array (conjunto de módulos) fixo e sem rastreamento, entretanto, há outras opções para escolha a seguir:

- *Fixed open rack and roof mount:*

O array é fixo nos ângulos de inclinação e azimute definidos pelos valores de Inclinação e Azimute e não segue o movimento do sol. Para sistemas com módulos fixos, é possível escolher entre um rack aberto ou uma montagem no telhado.

- *Fixed open rack:*

Um rack fixo aberto é apropriado para sistemas montados no chão. Escolher um rack aberto permite que o ar circule livremente ao redor do painel, ajudando a resfriar os módulos e diminuir as temperaturas de funcionamento das células (a eficiência do painel aumenta conforme a temperatura da célula baixa para uma determinada incidência de radiação solar). Essa opção também pressupõe que os módulos são dispostos em fileiras e utiliza a relação de cobertura do solo (GCR) para estimar perdas de radiação devido ao auto sombreamento causado quando as fileiras próximas causam sombras no painel.

- *Fixed roof mount:*

A instalação fixa no telhado é comum em residências, onde os módulos são presos à superfície do telhado com suportes que oferecem pouca circulação de ar entre a parte de baixo do módulo e a superfície do telhado (geralmente entre 5 e 15 cm). Escolher instalar no telhado significa que não há sombras entre os módulos.

- *1-axis tracking and 1-axis backtracking:*

O painel é fixo na inclinação em relação ao horizontal determinado pelo valor de Inclinação e gira ao redor do eixo inclinado do Leste pela manhã até o Oeste à noite para acompanhar o movimento diário do sol no céu. O azimute determina a direção do painel em relação a uma linha perpendicular ao equador.

Para o rastreamento em um eixo, o modelo PVWatts utiliza o GCR para prever o auto sombreamento.

O retrocesso em um eixo considera a ausência de auto sombreamento, pois os painéis são girados para evitá-lo. O algoritmo de retrocesso consiste em inclinar o array em direção ao horizonte nas horas matutinas e vespertinas para minimizar o impacto do auto sombreamento. A rotação máxima do rastreamento em um eixo é limitada a ± 45 graus em relação ao plano horizontal.

- *2-axis tracking:*

O painel gira do leste pela manhã até o oeste à noite para seguir o movimento diário do sol no céu e norte-sul para seguir o movimento sazonal do sol ao longo do ano. Para o

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA PARA O ABASTECIMENTO DO MUNICÍPIO DE JANAÚBA - MG E REGIÃO

acompanhamento em dois eixos, o SAM desconsidera os valores de Inclinação e Azimute. O modelo PVWatts não modela o auto sombreamento para o rastreamento em dois eixos. É possível ajustar as perdas para contabilizar essas perdas.

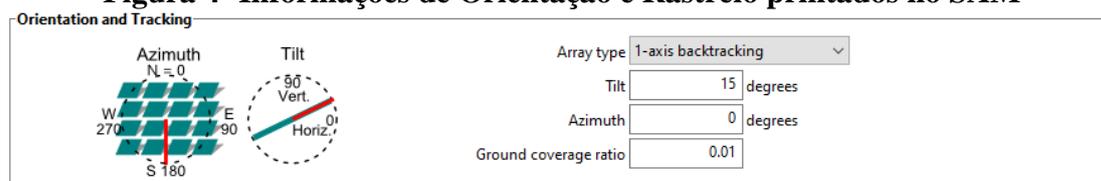
A seguir, as variáveis fora do *array type*.

Tilt (inclinação), o ângulo de inclinação do painel em graus em relação ao horizontal, onde zero graus é horizontal e 90 graus é vertical e apontando para o equador (tanto no hemisfério sul quanto no norte). Como regra geral, os projetistas de sistemas frequentemente usam a latitude do local (indicada na página Local e Recurso) como o ângulo de inclinação otimizado do painel. O ângulo de inclinação real pode variar de acordo com as necessidades do projeto.

Azimuth (Azimute) define a orientação leste - oeste do painel em graus. Um valor de azimute de zero é voltado para o norte, 90 graus = leste, 180 graus = sul e 270 graus = oeste, independentemente de o painel estar no hemisfério norte ou sul. Para sistemas localizados ao norte do equador, um valor típico de azimute é 180 graus. Para sistemas ao sul do equador, um valor típico é 0 graus. O ângulo de azimute não se aplica aos painéis com rastreamento de dois eixos (em V).

Ground coverage ratio (GCR) (Relação de cobertura do solo) define a proporção da área do módulo fotovoltaico em relação à área total do solo. O PVWatts utiliza o GCR para prever perdas devido à sombra auto causada por suportes abertos e montagem com um eixo. A estimativa não se aplica às montagens no telhado e com rastreamento em dois eixos. Para arrays configurados em fileiras, o GCR é calculado como o comprimento de uma fileira dividido pela distância entre o fundo de uma fileira e o fundo da fileira adjacente. Arrays com uma relação de cobertura do solo baixa (próximo de 0) possuem fileiras espaçadas mais distante do que arrays com uma relação de cobertura do solo alta (próximo de 1). A relação de cobertura do solo deve ser maior que 0,01 e menor que 0,99. A Figura 4 mostra os valores utilizados neste grupo de variáveis.

Figura 4- Informações de Orientação e Rastreo printados no SAM



Fonte: SAM, 2022.

Foi selecionado na aba de orientação e rastreamento o tipo de array com retrocesso de um eixo (*1-axis backtracking*) devido a sua eficiência ao eliminar o auto sombreamento, acompanhando o movimento diário do sol e ao fato de atuais investimentos na região da cidade de Janaúba utilizarem módulos com este tipo de rastreamento. Por exemplo, a empresa norte americana Nextracker foi selecionada para o fornecimento de 830 MW de tecnologia de rastreamento solar desse tipo (Fotovolt, 2021). O valor de *tilt* (inclinação) foi alterado de acordo com a latitude do sistema e o *azimuth* (azimute) para 0°, devido ser uma localização abaixo da linha do equador. Segundo o manual do *software* o valor do GCR para o *array* com retrocesso de 1 eixo seria de 0, ademais, o valor mínimo na interface é 0,01.

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA PARA O ABASTECIMENTO DO MUNICÍPIO DE JANAÚBA - MG E REGIÃO

3) *System Losses* (perdas do sistema), em que se pode optar por colocar uma perda total do sistema, ou inserir cada variável em vários tópicos, tendo o mesmo resultado. Por isso, foi optado por definir uma perda total de 11,7%, que se trata de um valor padrão medido pelo *software* excluindo o sombreamento e idade.

III. *Grid Limits*

O *grid limit* se refere à capacidade do sistema elétrico local de suportar a adição de mais geração de energia. Entretanto, é uma função que não encaixa na proposta do trabalho, por isso, não será utilizada.

IV. *Financial Parameters*

Nesta aba, são preenchidos os dados referentes aos parâmetros financeiros, que são divididos em 3 grupos, são eles: *capital and operating costs* (Capital e custos operacionais), *financial assumptions* (Pressupostos financeiros) e *reference values* (valores de referência).

1) *Capital and operating costs*, em que são informados valores operacionais juntamente com o capital inicial a ser investido, onde, no *software* para o modelo fotovoltaico PVWatts, há a opção de inserir valores dos custos em dólar ou em dólar/kW, sendo a última a mais viável para esta comparação, principalmente para ser possível uma padronização entre os três tipos de usina. As seguintes variáveis são consideradas neste grupo:

- *System capacity* (capacidade do sistema), esta variável é fixa, sendo definida na aba de *system design*.
- *Capital cost* (custos de capital), é definido aqui, o custo total de investimento do projeto, ou os custos de capital instalados.
- *Fixed operating cost (annual)* (custos operacionais fixos), são os custos anuais de operação e manutenção que não variam com a quantia de energia elétrica gerada.
- *Variable operating cost* (custo variável de operação), medido em dólar/kWh, são os custos anuais de operação e manutenção em dólares por quilowatt-hora que variam com a quantidade de energia elétrica gerada pelo sistema.

A Tabela 4 mostram os dados impressos no *software* referentes aos custos de operação e capital.

Tabela 3 - Custos de operação e capital

Custos de Operação e Capital para uma Capacidade total do Sistema Fotovoltaico de 37.500 kW	
Custo de capital	1.040,00 \$/kW
Custo operação anual fixo	13,00 \$/kW

Fonte: Autoria própria, 2023.

Custo variável de operação foi mantido em 0, pois nesta comparação, considera-se que o valor energético usado para abastecer a cidade permanece único e sem variações. Ressalta-se que, foram utilizados valores padrões dos parâmetros financeiros do *software*, pois estes são baseados em dados históricos e pesquisas do setor, incluindo estatísticas governamentais e de

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE
GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA PARA O ABASTECIMENTO DO
MUNICÍPIO DE JANAÚBA - MG E REGIÃO**

fontes comerciais. Eles são projetados para fornecer uma estimativa aproximada do desempenho financeiro do sistema.

2) *Financial assumptions*, em que são inseridos valores referentes à estrutura financeira do projeto para o cálculo do FCR. Assim como em *Capital and operating costs*, o *software* te dá a opção de inserção do valor de FCR diretamente, ou optar pela inserção detalhada. A seguir, todas as variáveis consideradas:

Fixed charge rate (FCR) é a taxa de cobrança fixa do projeto, o SAM calcula automaticamente de acordo com as outras variáveis do grupo. A Equação 4 a seguir, mostra como é calculado o FCR.

$$FCR = CRF * PFF * CFF \quad (4)$$

Em que, CRF é o fator de recuperação de capital; PFF é o fator de financiamento do projeto; CFF é o fator de financiamento da construção.

Analysis period, é o número de anos em que o projeto irá gerar eletricidade e ganhar receita.

Inflation rate, é a taxa de inflação anual ao longo do período de análise.

Internal rate of return (nominal), é a taxa nominal anual de retorno do projeto sobre o requisito de capital próprio.

Project term debt, é o tamanho da dívida como uma porcentagem do custo de capital.

Nominal debt interest rate, é a taxa nominal anual de juros da dívida. O SAM assume que o período de dívida é o mesmo que o período de análise.

Effective tax rate, é a taxa total de imposto de renda. Para um projeto que paga imposto de renda federal e estadual, onde o imposto de renda estadual é deduzido do imposto federal

Depreciation schedule, é a tabela de depreciação anual. A base de depreciação é igual ao custo total do projeto.

Annual cost during construction, é o custo anual de construção como porcentagem do custo de capital do projeto.

Nominal construction interest rate, é a taxa de juros anual sobre o financiamento da construção.

A Tabela 5 mostram os valores utilizados na estrutura financeira do projeto.

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA PARA O ABASTECIMENTO DO MUNICÍPIO DE JANAÚBA - MG E REGIÃO

Tabela 4 - Estrutura Financeira

Estrutura Financeira	
Período de Análise	20 anos
Taxa de Inflação	2.5 %/ano
Taxa nominal anual de retorno	13 %/ano
Dívida a longo prazo do projeto	60 % do custo de capital
Taxa Nominal de Juros da Dívida	4 %/ano
Taxa total de imposto de renda	28 %/ano
Depreciação anual	89 % do custo de capital
Custo anual durante a construção	100% do custo de capital
Taxa nominal de juros de construção	3.5 %/ano

Fonte: Autoria própria, 2023.

Com essas informações preenchidas, o grupo *reference values* é preenchido automaticamente, de acordo com a Figura 5.

Figura 5 - Valores de Referência do projeto fotovoltaico

Reference Values	
Capital recovery factor (CRF)	0.076
Project financing factor (PFF)	1.065
Construction financing factor (CFF)	1.012
LCOE = (FCR · CC + FOC) / Annual Energy + VOC	
Capital cost (CC)	39,000,000.00 \$
Fixed operating cost (FOC)	487,500.00 \$
Variable operating cost (VOC)	0.00 \$/kWh
WACC (for reference only)	0.043

Fonte: SAM, 2022.

Esses valores de referência são utilizados para encontrar o valor de LCOE do sistema fotovoltaico.

3.2.2 LCOE: SAM – Energia Eólica

Ao selecionar o método energético eólico (*Wind*) e o método financeiro LCOE Calculator (*FCR Method*), o *software* cria o projeto, tornando selecionáveis as seguintes abas.

I. *Wind Resource*

Nesta aba, são inseridos os dados relacionados à localização da usina, aonde são considerados os valores de elevação e velocidade do vento do local inserido. São divididos em duas partes a *wind resource file* (arquivo de recurso eólico), e *wind speed weibull distribution* (distribuição da velocidade do vento).

Semelhante ao *Location and Resource* do modelo fotovoltaico, o *wind resource file* é selecionado de acordo com a base de dados do sistema, uma localização para o projeto. Desta vez, não foi possível a alteração de dados dentro do arquivo, uma vez que, os dados estão salvos no formato de imagem de escaneamento (.srw). Entretanto, o local escolhido possui 518 metros

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA PARA O ABASTECIMENTO DO MUNICÍPIO DE JANAÚBA - MG E REGIÃO

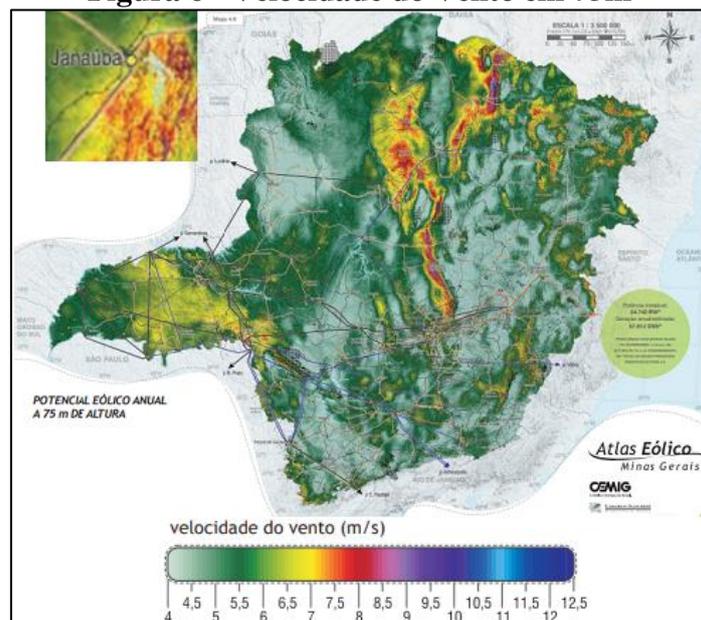
de altitude (2 metros a mais que Janaúba). Se trata do estado de Minnesota nos Estados Unidos, mais especificamente as *flat lands*, que são regiões planas e relativamente baixas, assemelhando-se com Janaúba (Lusardi, 2020).

Já na outra interface, o *wind speed weibull distribution*, é possível a edição de valores relacionados à altura em que a velocidade é analisada, e a distribuição da velocidade do vento em m/s.

Para poder alterar os valores da altura e da velocidade do vento, foram analisados o Atlas Eólico de Minas Gerais (CEMIG, 2010) e o artigo denominado “Levantamento do Potencial Energético de Geração de Energia Eólica na Região Norte de Minas Gerais” (Silva, 2023).

Analisando a Figura 6, é perceptível observar que a velocidade do vento em 75 m de altura em Janaúba varia entre 7 m/s e 8 m/s, sendo colocado o valor de 7,5 m/s, por se tratar da média entre as duas velocidades. Por outro lado, foi escolhido a altura de 75 m, devido ao fato de ser a elevação com maior potencial eólico (Silva, 2023). Portanto, o *wind speed weibull distribution*, foi preenchido de acordo com a Tabela 6.

Figura 6 - Velocidade do Vento em 75m



Fonte: Silva (2023) apud CEMIG, 2010.

Tabela 5 - Distribuição de Velocidade do Vento a uma Altura Determinada

Distribuição de Velocidade do Vento a uma Altura Determinada	
Velocidade média anual do vento	7.5 m/s
Referência de Altura	75 m

Fonte: Autoria própria, 2023.

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA PARA O ABASTECIMENTO DO MUNICÍPIO DE JANAÚBA - MG E REGIÃO

II. Wind Turbine

Nesta aba, são especificadas as características da turbina eólica. Vale ressaltar que, para um projeto com múltiplas turbinas como este, o SAM assume que a fazenda eólica consiste em turbinas idênticas (NREL, 2022). O SAM oferece duas opções para especificar os parâmetros da turbina: *Select a turbine from the library* (selecionar uma turbina da biblioteca), onde o software preenche automaticamente as curvas de potência (*turbine power curve*), saída nominal (*Rated output*) e diâmetro do rotor (*rotor diameter*), mas permite alterações na altura do cubo (*hub height*) e coeficiente de corte (*shear coefficient*); ou definir as características estruturais da turbina escolhida pelo usuário (*Define turbine design characteristics*).

No presente trabalho foi selecionado a turbina na biblioteca do *software*, sendo escolhida a turbina de modelo “AAER A2000-80” (Figura 7) fabricada pela AAER Inc, recentemente adquirida pela *Pioneer Wind Energy Systems, Inc*; possui diâmetro de 80 metros, 3 hélices com 40 metros de comprimento cada, totalizando 2000 kW de potência nominal, é recomendável para uma altura de cubo entre 65m e 100m, tendo uma média de altura de 82,5m, sendo ela, entre as demais disponibilizadas, a que mais se aproxima da altura de maior potencial eólico em Janaúba (Bauer e Matysik, 2020).

O coeficiente de corte é uma medida da variação da velocidade do vento com a altura acima do solo no local de instalação da turbina. O valor padrão de 0,14 (1/7) é uma suposição comum para o valor em estudos de recursos eólicos em terra (*onshore*), e 0,11 pode ser adequado sobre água para fazendas eólicas *offshore*. Portanto foi usado o valor padrão de 0,14, o qual o *software* sugere. A Figura 7 mostra os dados utilizados para a turbina eólica.

Figura 7 - Dados relacionados a Turbina eólica

Parameter	Value
Rated output	2,001.00 kW
Rotor diameter	80.00 m
Hub height	82.5 m
Shear coefficient	0.14

Name	KW Rating
Vestas V80-2.0	2000
Vestas V90-2.0	2000
AAER Systems AAER A-2000-71 ...	2001
AAER Systems AAER A-2000-80 ...	2001
AAER Systems AAER A-2000-84 ...	2001
Enercon E66 20.7MW	2005
Senvion MM100 2MW	2020
Enercon E92 E2 92m 2000kW	2050

Fonte: SAM, 2022.

III. Wind Farm

A página da Fazenda Eólica (*wind farm*) oferece a possibilidade de definir a quantidade de turbinas no projeto e apresenta uma imagem básica da configuração da fazenda eólica para calcular as perdas devido ao efeito de interferência quando as turbinas *upwind* afetam o fluxo de vento para as turbinas *downwind*. A variação entre os modelos de turbinas *downwind e upwind* está na maneira como o vento atinge a área da pá do rotor. Nas turbinas *downwind*, o vento bate na parte traseira da turbina, enquanto nas turbinas *upwind*, o vento atinge a parte frontal da turbina. (Cruz et al., 2001).

O SAM pode modelar uma única turbina eólica ou um parque eólico com duas ou mais turbinas. Sendo dispostos para selecionar o modo em que deseja fazer o dimensionamento do sistema (*system sizing*), sendo este o primeiro dos três tópicos nesta página.

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA PARA O ABASTECIMENTO DO MUNICÍPIO DE JANAÚBA - MG E REGIÃO

1) *System sizing*, como já dito anteriormente, neste tópico é definido como será feito o dimensionamento, usando uma turbina apenas (*use a single turbine*), especificando a quantidade de potência do sistema (*specify desired farm size*), ou especificando o número de turbinas do sistema (*specify number of turbines*).

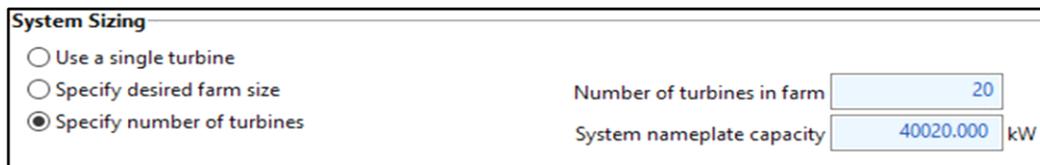
Foi escolhido o dimensionamento de modo em que fosse possível especificar o número de turbinas do sistema, pelo fato de se tornar editável a organização das turbinas eólicas (*turbine layout*) num mapa gerado pelo *software*. Sendo escolhida esta opção, a variável dos números de turbina na usina (*number of turbines in farm*) e a capacidade nominal do sistema (*system nameplate capacity*) se tornam automáticas, só podendo ser alteradas no terceiro tópico.

É válido ressaltar que o *software* não traz uma variável de rendimento do conversor de energia mecânica para energia elétrica, portanto esse cálculo foi feito manualmente seguindo a Equação (5). O rendimento adotado foi de 66%, mesmo valor usado na simulação fotovoltaica, uma vez que, o rendimento dos conversores varia de 50% a 80% de rendimento, sendo 66% o valor médio. Para atender a demanda de 25000 kW com 66% de rendimento, verificou-se um valor equivalente a 40020 kW, assim como mostra a equação a seguir:

$$40020kW * 66\% = 26413kW \quad (5)$$

O valor de 40020 kW foi usado para a capacidade nominal do sistema considerando o rendimento, para equilibrar as comparações. A Figura 8 mostra a interface do primeiro tópico.

Figura 8 - Dimensionamento do Sistema



System Sizing	
<input type="radio"/> Use a single turbine	
<input type="radio"/> Specify desired farm size	
<input checked="" type="radio"/> Specify number of turbines	
Number of turbines in farm	20
System nameplate capacity	40020.000 kW

Fonte: SAM, 2022.

2) *Wake Effects* (efeitos de sombreamento); as perdas causadas pelos efeitos de sombreamento levam em conta a redução da produção das turbinas posicionadas na sombra de outras turbinas na fazenda eólica. As outras perdas adicionais são adicionadas na aba de perdas (*Losses*).

Em *wake model* (modelo de sombreamento), são dispostos quatro modelos diferentes de efeito de sombreamento para estimar o efeito das turbinas *upwind* nas turbinas *downwind*, sendo escolhido o modelo padrão do software.

Em *turbulence coeficiente* (coeficiente de turbulência); a variação na velocidade do vento causada pelo terreno ou efeitos locais é conhecida como intensidade da turbulência. O modelo de efeito de sombreamento no SAM usa este valor. Terrenos lisos (baixa vegetação) como planícies têm coeficientes de turbulência baixos, sendo 0.1 um valor típico, enquanto florestas e áreas com mistura de ar têm coeficientes de turbulência mais altos, sendo 0.5 um valor típico. Para Janaúba, foi considerado o valor de 0.1, devido às características locais.

3) *Turbine Layout* (*Layout* de turbina); as opções de *Layout* de Turbina permitem especificar os parâmetros de um projeto com duas ou mais turbinas. Pode-se especificar o

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA PARA O ABASTECIMENTO DO MUNICÍPIO DE JANAÚBA - MG E REGIÃO

layout de turbina usando as entradas de espaçamento de turbina e fileira ou importando um arquivo de texto de localizações de turbinas.

Como o método escolhido foi a especificação manual do projeto, foi marcada a opção de definição da fazenda eólica usando um gerador de *layout*/mapa (*define wind farm using layout generator*). Com isso, torna-se alterável as seguintes variáveis:

- *Turbines per row* (turbinas por fileira), foi definido para a forma Quadrado / Retângulo / Paralelogramo, sendo essa a melhor disposição para evitar sombreamento, onde se define o número de turbinas em cada fileira. Foi definido a usina eólica em disposição de acordo com esta forma, com 2 turbinas por fileira.
- *Number of rows* (número de fileiras), definido em 10 fileiras.
- *Turbine spacing* (espaçamento entre as turbinas), seguindo a recomendação dos projetistas, o ideal para os parques eólicos é um espaçamento de 2 a 3 diâmetros do rotor na linha perpendicular à direção do vento e 4 a 5 diâmetros nas filas paralelas a ela (Carvalho et al. (2020) apud Geoconsult, 2001). Assim, foi definido em 3 diâmetros de rotor.
- *Row spacing* (espaçamento entre as fileiras), foi definido em 5 diâmetros de rotor.
- *Offset for rows* (deslocamento para filas), foi desconsiderado.
- *Offset type* (Tipo de deslocamento), foi desconsiderado.
- *Row orientation* (orientação de fila); o ângulo a oeste do norte de uma linha perpendicular às filas de turbinas. Um valor de zero ou 180 graus significa que as filas são paralelas ao equador. Foi definido em -45° W, devido à direção do vento na cidade de Janaúba ser predominantemente Leste (W para E), de forma a diminuir percas relacionadas ao sombreamento, aumentando a eficiência do sistema.

A Tabela 7 mostra os dados utilizados no *Layout* da usina.

Tabela 6 - Dados para formação do mapa

Dados para formação do Mapa da usina	
Número total de turbinas	20
Capacidade nominal do sistema	40020kW
Energia AC produzida	26413kW
Formato das usinas	Retangular
Turbinas por fileira	2
Número de fileiras	10
Espaçamento entre as turbinas	240m
Espaçamento entre as fileiras	400m
Área total do mapa	864000 m^2
Orientação de fila	-45°

Fonte: Autoria própria, 2023.

IV. Losses

A aba de Perdas permite que seja levado em conta as perdas de desempenho do sistema que não estão incluídas na curva de potência da turbina eólica da página “Turbina Eólica” e outras suposições. Cada perda é expressa como uma porcentagem da produção total anual do sistema antes das perdas. As variáveis de perdas são projetadas para funcionar com as entradas na página Incertezas quando você habilita o modelo de incerteza. O SAM deixa desativado a

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA PARA O ABASTECIMENTO DO MUNICÍPIO DE JANAÚBA - MG E REGIÃO

aba de Incertezas por padrão, além disso, no modelo fotovoltaico não foi disponibilizado, com isso ao não utilizar no modelo eólico, se garante uma comparação mais eficiente. Todos os tópicos de perda foram permanecidos os valores padrão do *software* em 16,63%.

V. Uncertainties

As incertezas não foram consideradas, devidos aos mesmos motivos descritos em IV.

V. Grid Limits

Assim como na fotovoltaica essa é uma função que não encaixa na proposta do trabalho, por isso, não será utilizada pelo mesmo motivo já mencionado anteriormente.

VI. Financial Parameters

Tem a mesma interface do modelo fotovoltaico, a diferença são os valores padrões para cada tipo de usina. No tópico de capital e custos operacionais (*capital and operating costs*), foram alocados pelo *software* os seguintes valores padrão, seguindo a Tabela 8.

Tabela 8 - Capital e Custo operacional do sistema eólico

Custos de Operação e Capital para uma Capacidade total do Sistema Eólico de 40.020 Kw	
Custo de capital	1303,00 \$/Kw
Custo operação anual fixo	42,00 \$/kW

Fonte: Autoria própria, 2023.

Para o tópico da estrutura financeira (*financial assumptions*), foram considerados os mesmos valores padrão da Tabela 5. Ao preencher estes dois tópicos, os valores de referência (*reference values*) foram automaticamente atualizados pelos valores mostrados na Figura 9.

Figura 9 - Valores de Referência para o Sistema Eólico

Reference Values	
Capital recovery factor (CRF)	0.076
Project financing factor (PFF)	1.065
Construction financing factor (CFF)	1.012
$LCOE = (FCR \cdot CC + FOC) / \text{Annual Energy} + VOC$	
Capital cost (CC)	52,146,060.00 \$
Fixed operating cost (FOC)	1,680,840.00 \$
Variable operating cost (VOC)	0.00 \$/kWh
WACC (for reference only)	0.043

Fonte: SAM, 2022.

Estes valores de referência são utilizados para o cálculo do LCOE do sistema eólico.

4 Análise e Discussão dos Dados

Ao simular cada fonte, de acordo com os dados financeiros e estruturais de cada sistema de geração de energia utilizando o *software*, foram obtidos os seguintes resultados mostrados nas próximas seções.

4.1 Resultados Obtidos a partir da Simulação do Sistema Fotovoltaico

Foram gerados dois agrupamentos de informações diferentes, sendo eles a Tabela 9 contendo especificações juntamente com o LCOE calculado e um gráfico de cores, onde se mostra a energia produzida por hora/dia, representado pela Figura 10.

Tabela 9 - Resultados Simplificados da Simulação Fotovoltaica I

Métricas Analisadas	Resultados
Energia anual AC no Ano 1	78.746.104kWh
Fator de capacidade DC no Ano 1	24.0%
Rendimento energético no Ano 1	2.100 kWh/kW
Custo Nivelado de Energia (LCOE)	4.66 ¢/kWh

Fonte: Autoria própria, 2023.

Na Tabela 10, é evidenciado os resultados obtidos de acordo às métricas analisadas.

A energia anual AC (corrente alternada) é a quantidade de energia elétrica produzida por uma instalação fotovoltaica durante um ano. Quando é simulado um modelo fotovoltaico no SAM, a energia anual AC no ano 1 é a previsão da quantidade de energia que será produzida pela instalação no primeiro ano de operação. A interpretação desse tópico é importante para avaliar a viabilidade econômica de um projeto fotovoltaico. Se a energia anual AC no ano 1 é alta, isso indica que a instalação está funcionando com eficiência e produzirá uma quantidade significativa de energia elétrica nos próximos anos. Além disso, a energia anual AC no ano 1 pode ser usada para prever a produção de energia ao longo da vida útil da instalação e para avaliar a rentabilidade do projeto. Para identificar se a energia anual AC é alta, basta comparar com a capacidade nominal do sistema, se for aproximadamente igual ou superior, interpreta-se a usina como eficiente e totalmente capaz de atender a demanda, ressaltando que o SAM considera condições ideais.

Na simulação fotovoltaica o valor de energia anual AC no primeiro ano é ligeiramente maior do que do que a capacidade nominal da instalação 37500 kWh, sendo superior a 100%, mostrando-se eficiente e capaz de atender a demanda local proposta e outros locais.

O fator de capacidade é a relação entre a produção elétrica do sistema no primeiro ano de operação e a produção elétrica se ele tivesse operado em sua capacidade nominal durante todas as horas do ano, é o indicador que define o quanto uma usina gera em relação ao máximo que ela poderia gerar. A média do fator de capacidade de usinas solares segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é de 21,55% (JOI apud ONS, 2020). O fator de capacidade simulado é acima da média com 24%.

O rendimento energético no primeiro ano é o resultado da divisão da energia anual AC pela capacidade nominal do sistema.

O Custo nivelado de energia (LCOE) de 4,66 ¢/kWh (centavos de dólar/Kilowatt hora) é uma medida do custo médio de produzir 1 kWh de energia elétrica ao longo da vida útil da instalação fotovoltaica. Ele leva em conta todos os custos associados à instalação, incluindo investimento inicial, custos operacionais, manutenção e desvalorização do equipamento, entre outros, e os divide pela quantidade total de energia produzida ao longo da vida útil da

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA PARA O ABASTECIMENTO DO MUNICÍPIO DE JANAÚBA - MG E REGIÃO

instalação. Para avaliar a viabilidade econômica da instalação através do LCOE, basta compara-lo com os custos da energia elétrica convencional.

Atualmente em bandeira verde (bandeira em que o custo por kWh consumido é menor), o custo chega a R\$0,65/kWh, sem impostos, valor imposto pela CEMIG, concessionária de energia local.

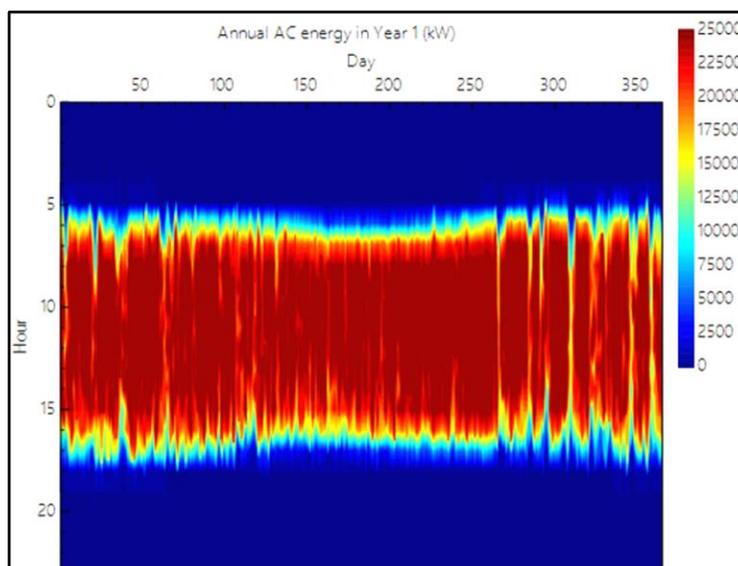
Segundo o *site br.Investing.com*, a cotação BRL/USD (R\$/) atual (09/02/2023) é de R\$5,21 o dólar (Investing, 2023). Sendo assim, transformando 4,66 ¢ em reais, temos:

$$4,66¢ * 5,21 = 24,47 \text{ Centavos de reais}$$

Portanto, verifica-se o LCOE fotovoltaico em reais no valor de R\$0,2447/kWh, o qual é muito menor do que o valor convencional, sendo então viável a implantação. É importante analisar também a variação do dólar, para o sistema fotovoltaico simulado igualar ao convencional em termos de viabilidade, a cotação BRL/USD tinha que estar em aproximadamente R\$ 14,00 o dólar, um crescimento de mais de 268%.

No gráfico de cores, representado pela Figura 10, observa-se a disposição horas x dias do ano, que ilustra a variação de produção de energia através variação de cores escuras (azul escuro) e cores quentes (vermelho escuro), sendo especificado ao lado a energia produzida (kWh) por cor na legenda.

Figura 10 – Energia Fotovoltaica AC produzida por hora



Fonte: SAM, 2022.

Foi possível observar, através desse gráfico, o intervalo de horas em que a usina solar tem seu pico de produção, entre 9 e 15 horas. Esse intervalo se repete ao longo de todo o ano.

4.2 Resultados Obtidos a partir da Simulação do Sistema Eólico

Também foram gerados dois agrupamentos de informações diferentes, sendo eles a Tabela 10 contendo especificações juntamente com o LCOE calculado e um gráfico de cores, onde se mostra a energia produzida por hora/dia, representado pela Figura 12.

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA PARA O ABASTECIMENTO DO MUNICÍPIO DE JANAÚBA - MG E REGIÃO

Vale ressaltar que esses valores de energia anual AC estão sendo considerados em rendimento 100%, pois no *software*, para o sistema eólico, não tem a variável de rendimento. Por isso a tabela a seguir, mostra os resultados considerando o rendimento de 66%.

Tabela 10 - Resultados Simplificados da Simulação Eólica I

Métricas Analisadas	Resultados
Energia anual AC no Ano 1	84.751.656 kWh
Capacidade total nominal	40020 kW
Fator de capacidade no Ano 1	36.6%
Custo Nivelado de Energia (LCOE)	4.62 ¢/kWh

Fonte: Autoria própria, 2023.

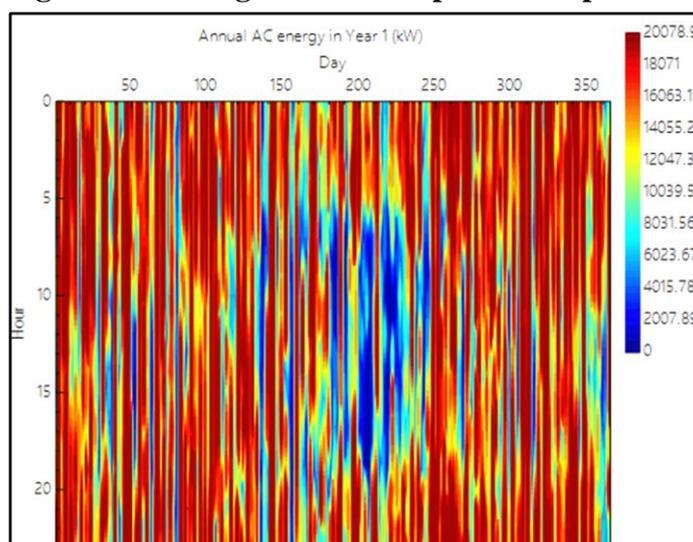
Como explicado anteriormente a energia anual AC no Ano 1 é o quanto de energia foi gerada no período de um ano, medido em kWh. Observa-se a produção de 84.751.656 kWh naquele ano, valor muito superior à sua capacidade total que é de 40020 kW, mostrando-se eficiente e capaz de atender a demanda local proposta e outros locais. Vale ressaltar, mais uma vez, que o SAM considera condições totalmente ideais. Ainda, o sistema apresenta um fator de capacidade no ano 1, de 36,6%, sendo maior do que a média estabelecida pelo boletim da ONS.

O custo nivelado de energia, se mostrou viável com 4.62 ¢/kWh, que fazendo o cálculo a seguir, tem-se que:

$$4,62\text{¢} * 5,21 = 24,07 \text{ Centavos de reais}$$

Portanto, verifica-se o LCOE eólico em reais no valor de R\$0,2407/kWh, o qual é muito menor do que o valor convencional, sendo também sua viável a implantação.

Figura 11 - Energia Eólica AC produzida por hora



Fonte: SAM, 2022

No gráfico de cores, é possível analisar que, a produção eólica é maior de noite e de madrugada, no intervalo entre as 19 horas e 5 horas, observa-se também que o período de meio

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA PARA O ABASTECIMENTO DO MUNICÍPIO DE JANAÚBA - MG E REGIÃO

do ano, período mais quente na região analisada, entre as 7 horas e 18 horas, tem-se uma menor produção de energia elétrica.

4.3 Comparação de Resultados Obtidos entre o Sistema Fotovoltaico e Eólico

A Tabela 11, simplifica a visualização das variáveis entre os sistemas.

Tabela 11 - Tabela de Comparação

Resultados obtidos através das simulações nos dois sistemas para atendimento da capacidade nominal da subestação "Janaúba 1"		
Variáveis	Usina Fotovoltaica	Usina Eólica
Energia anual AC no Ano 1	78.746.104 kWh	84.751.656 kWh
Potência Nominal total	37.500 kW	40.020 kW
Fator de Capacidade	24%	36,60%
Rendimento energético no Ano 1	2.100 kWh/kW	2.118 kWh/kW
Custo de Capital (CC) (R\$5,21/\$)	R\$ 203.190.000,00	R\$ 271.680.973,00
Custo Fixo de Operação (FOC) (R\$5,21/\$)	R\$ 2.539.875,00	R\$ 8.757.176,40
Área total da Usina	197.368,42 m ²	864.000 m ²
Custo Nivelado de Energia (LCOE) em R\$/kWh (ao longo de 20 anos)	R\$ 0,2447/kWh	R\$0,2407/kWh

Fonte: Autoria própria, 2023.

Com a análise da Tabela 11, é perceptível um certo nivelamento entre os dois sistemas, o que demonstra grande viabilidade econômica comparado ao sistema convencional de energia da região.

Entretanto, há diferenças relevantes tanto positivamente quanto negativamente ao comparar as duas fontes de geração. Observa-se uma maior produção de energia elétrica advinda da usina eólica, com a comparação do rendimento energético (kWh/kW) maior em 18kW, além de uma diferença de 12,60% com relação ao fator de capacidade, isso significa que a usina eólica teria mais capacidade para gerar energia em relação a sua capacidade nominal.

Em contra partida, a usina fotovoltaica, apresenta menor custo de capital, que chega a uma diferença de aproximadamente 68,5 milhões de reais. O custo de capital é uma medida do custo de investimento necessário para iniciar e manter o projeto ao longo do tempo. O custo de capital inclui despesas como aquisição de equipamentos, construção, terra e outros ativos fixos, bem como despesas financeiras, tais como juros sobre empréstimos. Ainda na usina fotovoltaica, o custo operacional fixo, demonstra uma diferença de aproximadamente 6,25 milhões de reais. O custo operacional fixo, é um termo usado no contexto de negócios e finanças e se refere aos custos fixos associados ao funcionamento de uma empresa ou projeto. Os custos fixos são aqueles que não mudam com a variação da produção ou do volume de vendas. Eles incluem despesas como aluguel, salários de funcionários, seguros, taxas regulatórias, entre outros. É perceptível também, a diferença de áreas totais de uma usina para outra, com a usina solar ocupando um espaço consideravelmente menor do que a usina eólica.

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA PARA O ABASTECIMENTO DO MUNICÍPIO DE JANAÚBA - MG E REGIÃO

Observando estes dados financeiros, é possível analisar a interferência da diferença nos custos de capital e de operação no tempo de retorno sobre o investimento (ROI) de cada um dos sistemas. Este é calculado dividindo a soma dos custos de capital e operação pela energia anual AC no ano 1 multiplicado pelo valor de LCOE (Wasolar, 2016). Sendo assim, foi calculado um ROI de 10 anos e 8 meses para o sistema fotovoltaico e 13 anos e 9 meses para o sistema eólico.

Com essas informações, foi feita a análise de que em termos de uma maior eficiência na produção de energia entre as duas fontes, a usina eólica se torna mais viável a longo prazo para a região. Todavia, em termos financeiros mais baratos inicialmente, a usina fotovoltaica se torna mais viável.

Portanto, a decisão de qual usina é mais viável economicamente ao longo de 20 anos, que é o período de análise, é necessário observar o custo nivelado de energia (LCOE). A diferença entre os dois sistemas estudados é mínima, isso se justifica devido ao fato de os dois sistemas comparados possuírem aproximadamente uma demanda igual de produção e ambos sistemas possuírem grandes potenciais na região, se diferenciando em alguns aspectos, como foi evidenciado nos parágrafos anteriores.

O mais interessante a se analisar, foi que o sistema eólico, mesmo tendo custos consideravelmente mais altos, conseguiu se equilibrar com o sistema fotovoltaico devido ao maior fator de capacidade apresentado pelo sistema eólico, produzindo mais energia elétrica de acordo com sua capacidade total, justificando o equilíbrio entre os resultados dos valores de LCOE, sendo necessário analisar a terceira casa decimal dos centavos, uma vez que, a diferença entre a usina eólica e a usina solar é de apenas R\$ 0,0040/kWh a favor do sistema eólico, sendo equivalente a 1,66% menor. Consequentemente, a usina eólica é mais economicamente viável.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, a contextualização sobre o sistema fotovoltaico e o sistema eólico e seus potenciais na região de Janaúba foi realizada, permitindo uma melhor compreensão sobre as tecnologias e a possibilidade de implantação em tal região, assim como afirmam os artigos de Fonseca (2022), que disserta sobre o potencial solar na região, e Silva (2023), que discorre sobre o potencial solar no município.

O conceito de LCOE foi claramente definido e associado à viabilidade econômica nos sistemas fotovoltaicos e eólicos, fornecendo uma ferramenta importante para avaliar a rentabilidade das fontes de energia renováveis. Apesar de que no presente trabalho, foi dissertado apenas os sistemas fotovoltaico e eólico, o LCOE também serve para o cálculo de viabilidade econômica para as demais fontes renováveis.

Ao longo do trabalho, foi apresentado e detalhado todo o passo a passo de como realizar uma análise não só econômica, mas também, de produtividade energética, sendo possível fazer comparações analíticas em diferentes aspectos e configurações dentro de um mesmo sistema, servindo como base para outros trabalhos relacionados ao presente tema. O processo para o cálculo do LCOE através do *software* SAM, também foi apresentado, e as configurações dos sistemas fotovoltaico e eólico no SAM foram realizadas e detalhadas, permitindo a geração de resultados através de simulação.

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA PARA O ABASTECIMENTO DO MUNICÍPIO DE JANAÚBA - MG E REGIÃO

Os resultados obtidos através da simulação foram analisados e comparados para cada uma das fontes, permitindo uma avaliação objetiva sobre a viabilidade econômica dos sistemas fotovoltaico e eólico na região de Janaúba. Com isso, foi possível afirmar em termos financeiros, produção de energia, e em termos de custo por kWh produzido (viabilidade), qual fonte seria melhor para a implantação.

Em conclusão, este trabalho cumpriu todos os objetivos propostos, fornecendo informações valiosas sobre a viabilidade econômica da implantação de um sistema fotovoltaico e eólico na região de Janaúba, indicando que, ao considerar os critérios utilizados, o sistema eólico se mostrou mais viável economicamente em termos de LCOE, com uma diferença de 1,66% da fotovoltaica, o que não impede o investimento no sistema de geração solar, uma vez que, apresenta um menor custo de capital e operacional, porém com produtividade menor, se comparada ao sistema eólico, assim como em outras fontes que apresentam grande potencial na região, como a biomassa, citado em Fonseca (2022). Até por esse motivo, sugere-se que para trabalhos futuros uma investigação semelhante a essa seja realizada, mas voltada para outras fontes de energia, como por exemplo, a biomassa.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira. 2012. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/profotov.pdf>>; Acesso em: 15 de set. 2022.

Albuquerque, T. C., Maldonado, M. U. & Vaz, C. R. (2017). Um levantamento da produção intelectual sobre energia solar fotovoltaica. Revista brasileira de energias renováveis, Santa Catarina, v.6, n.5, p. 921, 2017. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/51334/pdf>>; Acesso em: 15 de set. 2022.

Agência Nacional de Energia Elétrica. Guia Prático da Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/aplicacoes/tarifas-e-custos/guia-pratico-da-tarifa-de-uso-do-sistema-de-transmissao>>; Acesso em: 17 de set. 2022.

Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. BNDES Finem - Geração de energia. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndes-finem-energia>>; Acesso em: 15 de set. 2022.

Câmara. Lei institui marco legal da micro e minigeração de energia. 2022. Disponível em <<https://www.camara.leg.br/noticias/843782-LEI-INSTITUI-MARCO-LEGAL-DA-MICRO-E-MINIGERACAO-DE-ENERGIA>>; Acesso em: 15 de set. 2022.

Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Boletim do PROINFA - 204 - 01/2023. 2023. Disponível em <<https://www.cee.org.br/dados-e-analises/dados-proinfa>>; Acesso em: 1 de fev. 2023.

Companhia Energética de Minas Gerais. Atlas Eólico Minas Gerais. 2010. Disponível em <<https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2021/03/atlas-eolico-mg.pdf>>; Acesso em: 14 de set. 2022.

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE
GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA PARA O ABASTECIMENTO DO
MUNICÍPIO DE JANAÚBA - MG E REGIÃO**

Companhia Energética de Minas Gerais. Programa Mais Energia. Disponível em: <<https://geo.cemig.com.br/programa-mais-energia/>>; Acesso em: 3 de fev. 2023.

Companhia Energética de Minas Gerais. Valores de tarifas e serviços. Disponível em: <<https://www.cemig.com.br/atendimento/valores-de-tarifas-e-servicos/>>; Acesso em: 6 de fev. 2023.

CRESESB. Tutorial sobre Geração Heliotérmica do Cresesb. 2012. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>; Acesso em: 28 de jan. 2023.

Cruz, C. A. B., Guimarães, D. C., Carnairo Neto, J. A., Paixão, A. E. A., Russo, S. L. & Santos, J. A. B. (2015). Estudo prospectivo das tecnologias em energia eólica: uma abordagem sobre turbinas eólicas. VII SIMPROD, São Cristóvão/SE, p.94. 2015. Disponível em: <<https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/7749/2/TecnologiasEnergiaEolica.pdf>>; Acesso em: 14 de set. 2022.

Eletrobras. Programa de Incentivo as Fontes Alternativas de Energia Elétrica. 2016. Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/elb/ProinfA/data/Pages/LUMISABB61D26PTBRIE.htm>> Acesso em: 18 de set. 2022.

Energia hoje. SCEE – Sistema de Compensação de Energia Elétrica. 2022. Disponível em: <<https://energiahoje.editorabrasilenergia.com.br/glossario/scee-sistema-de-compensacao-de-energia-eletrica/>>; Acesso em: 12 de set. 2022.

Empresa de Pesquisa Energética. Matriz Energética e Elétrica. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>; Acesso em: 12 de set. 2022.

Esfera energia. Conheça O PROINFA, Programa De Incentivo Às Fontes Alternativas De Energia Elétrica. 2021. Disponível em <<https://blog.esferaenergia.com.br/mercado-livre-de-energia/proinfa>>; Acesso em: 15 de set. 2022.

Fonseca, L. D. (2022). Comparativo dos Potenciais de Energia Solar Fotovoltaica e de Biomassa no Norte de Minas Gerais. Sociedade Brasileira de Planejamento Energético, p.(2-12). Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/366683345_COMPARATIVO_DOS_POTENCIAIS_DE_ENERGIA_SOLAR_FOTOVOLTAICA_E_DE_BIOMASSA_NO_NORTE_DE_MINAS_GERAIS>. Acesso em: 13 set. 2022.

Fotovolta. Nextracker vai fornecer rastreadores para complexo Janaúba. 2021. Disponível em: <<https://www.arandanet.com.br/revista/fotovolta/noticia/1752-Nextracker-vai-fornecer-rastreadores-para-complexo-Janauba.html>>; Acesso em: 1 de fev. 2023.

Prístino. Matriz Energética em Minas Gerais e Aproveitamento Hidrelétrico. 2020. Disponível em: <<https://institutoprístino.org.br/aproveitamento-hidreletrico/>>; Acesso em: 12 de set. 2022.

Investing. USD/BRL Conversor de Moedas. 2023. Disponível em: <<https://br.investing.com/currencies/usd-brl-converter>>; Acesso em: 9 de fev. 2023.

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE
GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA PARA O ABASTECIMENTO DO
MUNICÍPIO DE JANAÚBA - MG E REGIÃO**

Labren. Médias do Total Diário da Irradiação Difusa para o Estado de MINAS GERAIS. Disponível em: < http://labren.ccst.inpe.br/atlas2_tables/MG_dif.html>; Acesso em: 1 de fev. 2023.

Lacchini, C. Análise econômica de sistemas fotovoltaicos residenciais no contexto brasileiro, com foco nos indicadores financeiros e nas tarifas locais de energia elétrica (2017). Orientador: Prof. Ph.D. Ricardo Ruther. P. 64. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis. Disponível em: < https://labeec.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/teses/Tese_Corrado_Lacchini.pdf>; Acesso em: 1 de fev. 2023.

Neoenergia. Você Sabe Como Funciona Um Aerogerador. Disponível em: <[https://www.neoenergia.com/pt-br/te-interessa/meio-ambiente/Paginas/como-funciona-um-aerogerador.aspx#:~:text=No%20funcionamento%20de%20um%20aerogerador,mec%C3%A2nica%20recebida%20em%20energia%20el%C3%A9trica.](https://www.neoenergia.com/pt-br/te-interessa/meio-ambiente/Paginas/como-funciona-um-aerogerador.aspx#:~:text=No%20funcionamento%20de%20um%20aerogerador,mec%C3%A2nica%20recebida%20em%20energia%20el%C3%A9trica.;)>; Acesso em: 14 de set. 2022.

Neosolar. Energia solar fotovoltaica: TUDO SOBRE. Disponível em: < <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/energia-solar-fotovoltaica>>; Acesso em: 13 de set. 2022.

National Renewable Energy Laboratory. A Manual for the Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies. 1995. Disponível em: < <https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/5173.pdf>>; Acesso em: 28 de jan. 2023.

National Renewable Energy Laboratory. LCOE in SAM using FCR and Single Owner Financial Models. 2020. Disponível em: < https://sam.nrel.gov/images/web_page_files/sam-lcoe-fcr-vs-cash-flow.pdf>; Acesso em: 16 de jan. 2023. Acesso em: 28 de jan. 2023.

National Renewable Energy Laboratory. System Advisor Model (SAM). 2020. Disponível em: < https://sam.nrel.gov/images/web_page_files/sam-help-2020-2-29-r2_weather_file_formats.pdf>; Acesso em: 28 de jan. 2023.

National Renewable Energy Laboratory. Solar Advisor Model User Guide for Version 2.0. Disponível em: < <https://www.nrel.gov/docs/fy08osti/43704.pdf> >; Acesso em: 28 de jan. 2023.

Portal solar. Quem Criou a Energia Solar? História da Energia Solar. Disponível em: < <https://www.portalsolar.com.br/historia-e-origem-da-energia-solar>>; Acesso em: 14 de set. 2022.

Portal solar. Energia eólica: o que é, como funciona, vantagens e desvantagens. 2021. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-x-energia-eolica-precos.html>>; Acesso em: 14 de set. 2022.

Portal solar. Matriz elétrica brasileira e matriz energética brasileira. Disponível em <<https://www.portalsolar.com.br/matriz-energetica-e-eletrica-brasileira>>; Acesso em: 12 de set. 2022.

Reis, P. Como Funciona Um Aerogerador. 2016. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/funcionamento-de-um-aerogerador/>>; Acesso em: 15 de set. 2022.

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE
GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E EÓLICA PARA O ABASTECIMENTO DO
MUNICÍPIO DE JANAÚBA - MG E REGIÃO**

Schneider, L., Oliveski, M. A. M., Cardoso, V. V., Baggio, D. K. & Allebrandt, S. L. Energias alternativas no brasil - usos e incentivos alternatives energies in brasil - uses and incentives. 2017, p. (7, 9). Disponível em: <<https://www.publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/salaoconhecimento/article/view/7792/6529>>; Acesso em: 17 de set. 2022.

Silva, V. A. G. Levantamento do Potencial de Geração de Energia Eólica na Região Norte do Estado de Minas Gerais (2023). Revista de Engenharia e Tecnologia, p. (2-10). Disponível em: <<https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/21245/209209217364>>. Acesso em: 1 fev. 2023.

Sousa, R. Fontes Alternativas de Energia. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/geografia/fontes-alternativas-energia.htm>>; Acesso em: 12 de set. 2022.

Universidade Federal de Santa Catarina. System advisor model. Dimensionamento de sistema fotovoltaico. 2020. Disponível em: <<https://energiasolarfotovoltaica.paginas.ufsc.br/files/2020/10/Tutorial-SAM-pdf-Final.pdf>>; Acesso em: 3 de fev. 2023.

Wasolar. Wasolar: energia solar (2016). Tempo de retorno do investimento em energia solar. Disponível em: <<https://www.wasolar.com.br/tempo-de-retorno-do-investimento-em-energia-solar>>; Acesso em: 28 de dez. 2023.

Weather spark. Clima e condições meteorológicas médias em Janaúba no ano todo. 2016. Disponível em: <<https://pt.weatherspark.com/y/30621/Clima-característico-em-Janaúba-Brasil-durante-o-ano#:~:text=Em%20Janaúba%2C%20a%20estação%20com,superior%20a%2037%20°C>>; Acesso em: 1 de fev. 2023.

WWF. Relatório Anual 2012. 2013. Disponível em: <https://wwfbrnew.awsassets.panda.org/downloads/relatorio_anual_2012_final_web.pdf>; Acesso em: 15 de set. 2022.

WWF. Sumário Para Tomadores de Decisão. Além das grandes hidrelétricas. Políticas para fontes renováveis de energia elétrica no Brasil. 2012. Disponível em: <https://d3nehc6yl9qzo4.cloudfront.net/downloads/alem_de_grandes_hidreletricas_sumario_para_tomadores_de_decisao.pdf>; Acesso em: 13 de set. 2022.