



CAIO HENRIQUE ROCHA LARA

**ANÁLISE DO POTENCIAL DE IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO
EMPREGANDO ENERGIA EÓLICA E SOLAR**

**Lavras-MG
2021**

CAIO HENRIQUE ROCHA LARA

**ANÁLISE DO POTENCIAL DE IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO
EMPREGANDO ENERGIA EÓLICA E SOLAR**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Mecânica, para a obtenção do título de Bacharel.

Profa. Dra. Bruna Oliveira Passos e Silva Siqueira
Orientadora

Lavras-MG
2021

CAIO HENRIQUE ROCHA LARA

**ANÁLISE DO POTENCIAL DE IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO
EMPREGANDO ENERGIA EÓLICA E SOLAR**

**ANALYSIS OF THE IMPLEMENTATION POTENTIAL OF A GENERATION
SYSTEM USING WIND AND SOLAR ENERGY**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Mecânica, para a obtenção do título de Bacharel.

Aprovado em 22 de novembro de 2021

Prof^a. Dra. Bruna Oliveira Passos e Silva Siqueira
Universidade Federal de Lavras - UFLA

Prof. Dr. Márcio Montagnana Vicente Leme
Universidade Federal de Lavras – UFLA

Prof. Dr. Fábio Lúcio Santos
Universidade Federal de Lavras – UFLA

Prof. Dr. Dimas José Rúa Orozco
Universidade Federal de Lavras - UFLA

**Prof^a. Dra. Bruna Oliveira Passos e Silva Siqueira
Orientadora**

**Lavras-MG
2021**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter sido base de todas minhas conquistas e por chegar até aqui.

À toda minha família, em especial ao meu pai Mozair, minha mãe Maria Aparecida e minha irmã Taciana por todos os ensinamentos, incentivo e apoio desde o início de toda minha trajetória acadêmica, por servir como base de inspiração para a vida.

À minha namorada Ana Paula, por sempre me incentivar e apoiar nesta árdua caminhada, e por toda ajuda e paciência durante elaboração deste trabalho.

Aos meus amigos, inclusive aos do curso, que levarei para toda vida, por todos os momentos de convivência e aprendizado durante essa caminhada.

A todos os professores e demais colaboradores que cruzaram meu caminho em algum momento da minha graduação, que de alguma maneira puderam contribuir para minha vida profissional e pessoal durante minha formação.

Agradecimento especial à minha orientadora Prof^ª. Dra. Bruna Oliveira Passos e Silva Siqueira e ao meu coorientador Prof. Dr. Márcio Montagnana Vicente Leme, por todo ensinamento passado durante a graduação e pela contribuição para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

A geração de energia através de fontes renováveis, principalmente a eólica e a solar, tem sido temas de vários estudos para geração descentralizada dada a facilidade de implementação destes sistemas, disponibilidade de fonte de energia para seu funcionamento e à viabilidade econômica para abastecimento de instalações de pequeno porte como residências e sistemas industriais. Neste contexto, foi desenvolvido o presente trabalho que tem como objetivo o estudo da viabilidade técnica e econômica de implantação de um sistema de geração eólica ou solar para suprir a demanda de um pavilhão de aulas da Universidade Federal de Lavras. Para este caso foram levantados os potenciais eólico e solar demonstrando a comparação entre os custos envolvidos na instalação de uma usina eólica e de uma usina solar para definição de qual o melhor investimento para atendimento das demandas da universidade. Os resultados mostraram que a implantação de uma usina eólica de pequeno porte é inviável dadas as baixas velocidades de vento encontradas na cidade de Lavras e que a melhor opção é a instalação de uma usina solar que irá suprir a demanda energética necessária com um tempo de retorno satisfatório para o investimento realizado.

Palavras-chave: Energia eólica, Energia solar, Sustentabilidade, Energia Renovável, Sistema Híbrido, Viabilidade Técnica e Econômica.

ABSTRACT

The generation of energy through renewable sources, mainly wind and solar, has been the subject of several studies for decentralized generation given the ease of implementation of these systems, availability of an energy source for their operation and the economic feasibility of supplying power installations. small size such as homes and industrial systems. In this context, the present work was developed, which aims to study the technical and economic feasibility of deploying a wind or solar generation system to meet the demand for a classroom pavilion at the Federal University of Lavras. For this case, wind and solar potentials were surveyed, demonstrating the comparison between the costs involved in the installation of a wind power plant and a solar power plant in order to define the best investment to meet the university's demands. The results showed that the implementation of a small wind power plant is unfeasible given the low wind speeds found in the city of Lavras and that the best option is to install a solar power plant that will supply the necessary energy demand with a payback time satisfactory for the investment made.

Keywords: wind energy, solar energy, sustainability, renewable energy, hybrid system, technical and economic feasibility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da energia eólica no Brasil

Figura 2 - Evolução da energia eólica no Brasil

Figura 3 - Distribuição de Weibull para região de Lavras

Figura 4 - Aerogerador FX-400 Maglev

Figura 5 - Curva de potência do aerogerador FX-400

Figura 6 - Resultado obtido através do simulador PVWatts

Figura 7 - Representação da ligação do sistema solar

Figura 8 - Local para instalação da usina solar

Figura 9 - Área do estacionamento para projeto

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Capacidade de geração eólica no Brasil em 2018
- Tabela 2 - Porcentagem de geração elétrica de fontes renováveis entre 2010 e 2015
- Tabela 3 - Potência instalada por classe no Brasil
- Tabela 4 - Capacidade de geração eólica no Brasil em 2018
- Tabela 5 - Porcentagem de geração elétrica de fontes renováveis entre 2010 e 2015
- Tabela 6 - Potência instalada por classe no Brasil
- Tabela 7 - Descrição dos aparelhos do pavilhão de aulas 9
- Tabela 8 - Período de funcionamento dos aparelhos durante o dia
- Tabela 9 - Energia consumida por cada aparelho do pavilhão de aulas 9
- Tabela 10 - Classificação das regiões quanto a força de vento
- Tabela 11 - Velocidade do vento média mensal
- Tabela 12 - Velocidade de vento média anual
- Tabela 13 - Desvio padrão
- Tabela 14 - Parâmetros anuais da Distribuição de Weibull
- Tabela 15 - Parâmetros calculados da distribuição de Weibull
- Tabela 16 - Densidade de potência e energia eólica para 10 metros

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	12
1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Contexto.....	12
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 Objetivo Geral.....	13
1.2.2 Objetivos específicos.....	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 Avanço da Energia Eólica no Brasil.....	14
2.2 Avanço da Energia Solar no Brasil	16
2.3 Análise da Viabilidade Econômica.....	18
SEGUNDA PARTE	19
ARTIGO - ANÁLISE DO POTENCIAL DE IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO EMPREGANDO ENERGIA EÓLICA E SOLAR	19
1 INTRODUÇÃO	21
2 REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.2 Avanço da Energia Solar no Brasil	25
2.3 Análise da Viabilidade Econômica.....	27
3 METODOLOGIA	28
3.1 Demanda Energética	28
2.2 Parâmetros para Cálculo do Potencial Eólico	29
2.3 Parâmetros para Cálculo da geração solar	32
2.4 Projeto Preliminar do Sistema de Geração.....	32
2.5 Parâmetros para Cálculo da Viabilidade Econômica	33
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
3.1 Levantamento do potencial eólico	33
3.2 Cálculo para geração solar	39
3.4 Definição do Projeto de Implantação do Sistema de Geração.....	40
3.5 Viabilidade Econômica do Sistema Solar	42
4 CONCLUSÃO	42
5 REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

A demanda global energética oriunda de combustíveis fósseis tem acarretado no aumento de poluentes atmosféricos com o rápido crescimento populacional e com os países em desenvolvimento com o aumento da industrialização, e além disso, estes fatores levam a preocupações com a pobreza, saúde e poluição. O incentivo a geração elétrica moderna estimula a geração de emprego e desenvolvimento social, além de reduzir as emissões de poluentes e problemas de saúde, devido a menor utilização combustíveis poluentes como carvão, lenha, esterco e dentre outros. A energia solar é uma fonte renovável que responde bem a diminuição da pobreza energética e da poluição, atendendo regiões em desenvolvimento e áreas rurais sem acesso a rede elétrica. (SHAHSAVARI; AKBARI, 2018).

Segundo Roche e Blanchard (2017), segundo estudo realizado no Quênia, mostra a importação da utilização da energia solar, visto que esta permite que a população consiga gerar renda em locais onde até então não havia acesso a rede elétrica em locais isolados, como áreas rurais, garantindo que a população possa se desenvolver economicamente, além de garantir a sustentabilidade e o fornecimento de energia para áreas antes isoladas.

Outra fonte de geração elétrica oriunda de fontes renováveis que favorece a geração de regiões isoladas, e ao mesmo tempo favorece o desenvolvimento da região e da sociedade é a energia eólica. Este tipo de geração vem crescendo rapidamente no Brasil, se tornando a segunda principal fonte de geração, ficando atrás somente da geração através das hidrelétricas, podendo atingir até 22 GW no ano de 2022, tendo grande destaque a região Nordeste, responsável por 85% de todo potencial de velocidade de vento para geração elétrica de todo país (LUCENA, AZEVEDO LUCENA, 2019).

Tendo em vista a importância da sustentabilidade no âmbito da sociedade atual, a Universidade Federal de Lavras se intitula como uma Eco Universidade, a qual visa um plano ambiental que aborda conceitos de sustentabilidade e ações que envolvem praticamente todas as questões ambientais, implantação de Programa de Gerenciamento de Resíduos Químicos, tratamento de resíduos sólidos, saneamento básico, estação de tratamento de esgoto, construções ecologicamente corretas, proteção de nascentes e matas ciliares, prevenção e controle de incêndios, prevenção de endemias e, finalmente, gestão de energia (UFLA, 2009).

A instituição de ensino destaca-se, pelo sétimo ano consecutivo, no UI GreenMetric World University Ranking, sendo ela a 38ª em âmbito mundial e 2ª na América Latina e no Brasil. Uma das categorias de avaliação é “Energia e mudança climática”, responsável por 21%

da pontuação e considera-se o uso de energia renovável. Isto posto, a energia eólica torna-se uma opção para incrementar na pontuação da Universidade, pretendendo-se, por conseguinte, a avaliação da mesma na UFLA (PORTAL UFLA,2018).

Tendo em vista esse cenário e a importância de geração elétrica oriundo de fontes renováveis, o presente trabalho de conclusão de curso buscou compreender o potencial eólico e solar para região de Lavras para abastecimento de um pavilhão de aulas na Universidade Federal de Lavras.

Para este estudo, foi feito o levantamento da velocidade de vento da região através de uma torre anemométrica no local, para cálculo do potencial eólico, enquanto para o cálculo da geração solar foi feito um estudo utilizando um simulador solar. Por fim, será escolhido o melhor modelo de geração, no qual foi feito uma análise da viabilidade econômica desse sistema.

De posse dos dados, foi elaborado um artigo onde foi apresentado toda metodologia utilizada, os resultados e discussão sobre os cálculos que foram realizados, e por fim manifestado o ponto de vista do autor sobre os resultados que foram obtidos, e sugestões para trabalhos futuros.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Análise do potencial para implantação de um sistema de geração eólico e solar para um pavilhão de aulas na Universidade Federal de Lavras

1.2.2 Objetivos específicos

- Levantamento da demanda energética do pavilhão de aulas;
- Levantamento do potencial eólico da região;
- Aplicação da ferramenta estatística de Weibull;
- Escolha e justificativa do aerogerador;
- Levantamento do potencial solar da região;
- Projeto preliminar de instalação do sistema de geração;
- Análise da viabilidade econômica do sistema de geração.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Avanço da Energia Eólica no Brasil

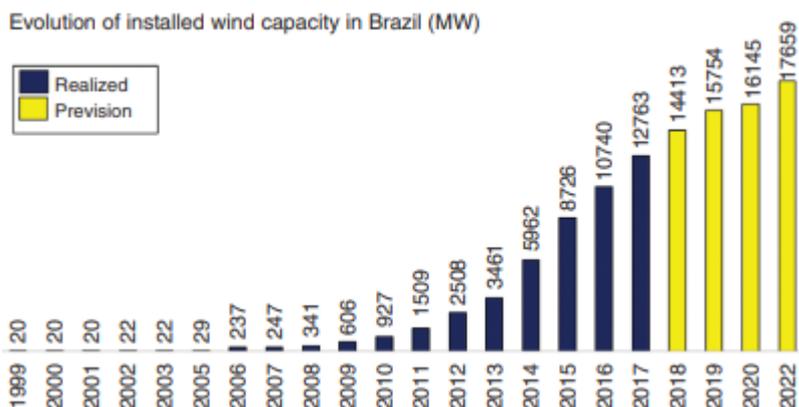
Com o aumento das emissões de poluentes na atmosfera, o Brasil se comprometeu a reduzir a utilização de geração elétrica oriundo de fontes poluidoras, para incentivar a implantação de sistemas de geração a base de fontes renováveis, como energia eólica, biomassa e a solar fotovoltaica (LUCENA; AZEVEDO LUCENA, 2019).

Por volta de 200 a.C, os persas utilizavam os moinhos de vento para bombear água para irrigação das plantações e para moer grãos (WIZELIUS, 2015), e com o passar dos anos, com o avanço das tecnologias voltadas para máquinas eólicas, foi possível gerar cada vez mais energia até o surgimento das primeiras usinas eólicas, e hoje é encontrado em todo mundo aerogeradores cada vez mais modernos, chegando a uma capacidade nominal unitária de até 7 MW, podendo abastecer até 10 mil residências para consumo padrão no Brasil (LUCENA; AZEVEDO LUCENA, 2019).

Este tipo de geração tem sido muito utilizado em locais isolados, como áreas rurais, e por ocupar um pequeno espaço físico, não compromete o espaço local, permitindo que os proprietários das terras possam continuar com suas criações de animais e plantações sem qualquer problema. Apesar de ocupar um pequeno espaço, este tipo de geração produz menos eletricidade que as termelétricas de combustíveis fósseis, quando não é realizado um estudo adequado do potencial eólico que pode ser extraído da região. Um exemplo para este caso seria um investimento para uma turbina de 2 MW, caso essa não seja capaz de produzir sua capacidade nominal devido a ventos irregulares, e gerasse algo em torno de 0,8 MW, seria necessárias mais 1200 turbinas desse mesmo modelo, para produzir o mesmo que uma fonte movida a carvão de 1000MW (LUCENA; AZEVEDO LUCENA, 2019), e para descobrir se a região possui um potencial eólico considerável para geração, muitas vezes é utilizado a ferramenta estatística de Weibull para descobrir a frequência de ocorrência de determinadas velocidades de vento para resultados mais precisos (ISLAM; SAIDUR; RAHIM, 2011).

No Brasil a energia eólica tem aumentado com o passar dos anos, a Figura 1 mostra a evolução de 1999 até 2017 e a previsão de geração até o ano de 2022. Grande parte desta geração se dá pela região Nordeste, região de muito potencial eólico devido as altas velocidades de vento da região, favorecendo assim a implantação de diversas usinas eólicas, favorecendo assim as regiões isoladas como as áreas rurais. A Tabela 1 representa o quanto cada região do país representa na geração eólica total (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2018).

Figura 1: Evolução da energia eólica no Brasil



Fonte: (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2018).

Tabela 1: Capacidade de geração eólica no Brasil em 2018

State of Brazil	Region of Brazil	Installed capacity (MW)	Number of wind farms
Rio Grande do Norte (RN)	Northeast	3949.3	146
Bahia (BA)	Northeast	3525.0	133
Ceará (CE)	Northeast	2049.9	80
Rio Grande do Sul (RS)	South	1831.9	80
Piauí (PI)	Northeast	1521.1	55
Pernambuco (PE)	Northeast	781.3	34
Santa Catarina (SC)	South	238.5	14
Maranhão (MA)	Northeast	220.8	8
Paraíba (PB)	Northeast	156.9	15
Sergipe (SE)	Northeast	34.5	1
Rio de Janeiro (RJ)	Southeast	28.1	1
Paraná (PR)	South	2.5	1
Total		14 339.8	568

Fonte: (LUCENA, AZEVEDO LUCENA, 2019).

Para geração eólica é possível utilizar dois modelos de turbinas, sendo classificados quanto ao tipo de rotor, podendo ser do tipo de horizontal ou vertical. Os modelos de aerogeradores de eixo vertical costumam ser mais caros e possuem um desempenho inferior quando comparado aos de eixo horizontal para altas velocidades de vento, sendo indicados para regiões de ventos de velocidades mais baixas e mais turbulentos (JOHARI; JALIL; SHARIFF, 2018). Já os aerogeradores de eixo horizontal são mais eficientes para ventos de velocidades mais elevadas, da ordem de 10 a 15 km/h, devido ao seu design, que permite maior aproveitamento da potência disponível no vento (KHANDAKAR; KASHEM, 2020), compensando seu elevado custo de aquisição e manutenção quando se pensa em termos de energia produzida. Além da classificação quanto à disposição dos eixos das turbinas, elas ainda podem ser classificadas em sistemas *onshore* e *offshore*. Para os sistemas *onshore*, que são os mais utilizados, as turbinas são instaladas em terra, no continente, e o principal requisito é a

disponibilidade de grandes áreas para instalação das torres eólicas, visto que os aerogeradores precisam ficar a uma distância de pelo menos 10 vezes o tamanho do rotor do mesmo para instalação a jusante e de 5 vezes para instalação lateral, além de sistemas de para-raios devido à altura das torres, e uma fundação robusta de acordo com o terreno e dimensões do aerogerador (RICARDO; MACHADO; ZEM, 2015). Já a energia eólica do tipo *offshore* se refere a aerogeradores instalados fora do continente, em alto mar e nos oceanos por exemplo, porém no Brasil há poucos parques eólicos desse tipo. Essa modalidade é mais eficiente que a *onshore*, porém o custo de instalação e manutenção são maiores, devido as estruturas para as turbinas e os cabos para transmissão do potencial produzido até o continente (WESSIER, 2007).

Embora a geração eólica a partir de turbinas de eixo horizontal em grandes parques eólicos seja a prática mais comum em termos de geração elétrica, tem se notado nos últimos anos um aumento na utilização de turbinas eólicas de pequeno porte, principalmente o modelo de eixo vertical, atender a demanda de empresas e até mesmo residências, visando a sustentabilidade e o menor gasto com energia elétrica. Empresas ou instituições que tem um gasto elevado com energia elétrica tem cada vez mais adotado pequenos parques eólicos para o autoabastecimento, fazendo com que o dinheiro economizado possa ser investido em si mesma. Além disso, em muitos casos a energia é aplicada em pequena escala, sendo instalados parques eólicos para suprir a necessidade de pequenos bairros, condomínios e até mesmo fazendas, sendo uma alternativa promissora. Este tipo de projeto é conhecido como solução descentralizada, onde os sistemas de geração de energia são do tipo de biomassa, solar, hidroelétrico e o eólico (OLIVEIRA, 2002).

2.2 Avanço da Energia Solar no Brasil

Muitos países escolheram a energia solar como o meio de geração a ser investido nos próximos anos para suprir a demanda, pelo fato de ser uma fonte não poluidora e oriundo de uma fonte totalmente inesgotável, onde é convertido a radiação solar em eletricidade através de módulos solares fotovoltaicos (SHAHSAVARI; AKBARI, 2018). O aumento da eficiência desse tipo de sistema e a redução do custo de instalação nos últimos anos tem tornado esse tipo de geração cada vez mais usual em residências, indústrias, comércios e até mesmo em áreas rurais para suprir a sua própria demanda energética (SINGH, 2013). A Tabela 2 mostra o quanto a energia solar, assim como a energia eólica tem aumentado sua participação na geração elétrica entre 2010 e 2015, tendo destaque para energia solar que teve rápido aumento em todo mundo (SHAHSAVARI; AKBARI, 2018).

Tabela 2: Porcentagem de geração elétrica de fontes renováveis entre 2010 e 2015

Year	Hydropower %	PV%	CSP%	Wind%	Geothermal%	Biomass %	All Renewables%	Renewable Capacity (GW)
2010	18.4	0.8	0.0	3.9	0.2	1.3	24.6	1253
2011	18.0	1.3	0.0	4.5	0.2	1.4	25.4	1356
2012	17.8	1.8	0.0	5.1	0.2	1.5	26.5	1470
2013	17.6	2.4	0.1	5.5	0.2	1.5	27.3	1579
2014	17.5	2.9	0.1	6.1	0.2	1.5	28.5	1712
2015	17.0	3.6	0.1	6.9	0.2	1.7	29.5	1848

Fonte: (SHAHSAVARI; AKBARI, 2018).

Esse rápido crescimento da energia renovável se dá principalmente pela competitividade dos tipos de gerações, com o avanço da tecnologia esses sistemas de geração têm reduzido cada vez mais o custo de instalação e até mesmo de O&M, e também pelos incentivos do governo, tornando financiamentos para esse tipo de investimento cada vez mais atrativo para a população (KANNAN; VAKEESAN, 2016)

O Brasil é um país localizado na região intertropical, possui uma série de fatores que beneficiam a geração solar, como altos níveis de irradiação solar, grandes reservas de quartzo de qualidade para produção de silício de alta pureza para fabricar células e módulos solares, trazendo grandes benefícios para o país, como o desenvolvimento de regiões remotas onde o custo da energia convencional é muito alto em relação ao retorno financeiro, além de fazer com que o país deixe de depender somente da geração hidrelétrica (DHERE et al., 2005). A Tabela 3 representa a potência instalada por classe no Brasil no ano de 2021.

Tabela 3: Potência instalada por classe no Brasil

Class	Installed Power (kW)	Number of generating units	Mean (Installed Power/Number of generating units)
Commercial	1,838,381.76	64,334	28.57 kW
Residential	1,792,042.20	283,132	6.33 kW
Rural	645,015.19	27,121	23.78 kW
Industrial	431,339.38	9,436	45.71 kW
Public power	57,089.29	1,455	39.24 kW
Public service	3,317.69	111	29.89 kW
Public illumination	823.89	26	31.69 kW
Total	4,768,015.40	385,615	12.36 kW

Fonte: (ANEEL, 2021).

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em dois tipos, sendo eles o Sistema Fotovoltaico Isolado e o Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede, também conhecidos como sistemas off-grid e on-grid, respectivamente (SILVA, 2019). Os sistemas on-grid estão conectados diretamente à rede elétrica, onde a energia elétrica fornecida pelos painéis fotovoltaicos é utilizada para suprir a demanda do local de instalação, e quando essa geração é insuficiente, a rede elétrica complementa com a carga necessária, o que ocorre no caso no período noturno, onde os painéis não estão gerando nenhuma energia. Este tipo de sistema é o mais utilizado em residências e empresas, não sendo necessário o uso de baterias, mas sim de

inversores solares ou micro inversores para converter a corrente contínua em corrente alternada, utilizada pela maioria dos equipamentos. Para este tipo de sistema, o excedente da energia elétrica gerada é exportado para a rede de distribuição elétrica, sendo convertido em créditos. (CLEAN ENERGY REVIEWS, 2021).

Já os sistemas off-grid são completamente isolados da rede elétrica, sendo muito utilizados em locais que geralmente não são atendidos pelas concessionárias de energia elétrica, devido ao difícil acesso. Como os painéis fotovoltaicos não produzem energia no período noturno e em momentos de chuva, é necessário que a energia gerada durante o dia seja armazenada em baterias com controlador de carga, para que possa ser usada em momentos de não geração pelos painéis (LIMA, 2018). Estes sistemas requerem um banco de baterias para que a energia seja armazenada, e isso torna um sistema muito mais caro, quando comparado ao sistema on-grid, portanto deve ser usado somente em extrema necessidade, como em áreas remotas de não haver acesso a rede de distribuição. Além disso, para estes sistemas off-grid, é necessário que haja um sistema de geração complementar, que é acionado quando o sistema detecta baixa carga nas baterias ou quando está em um período nublado ou noturno, para que a residência ou empresa não fique sem energia elétrica (CLEAN ENERGY REVIEWS, 2021).

2.3 Análise da Viabilidade Econômica

A análise da viabilidade econômica é de suma importância na hora de fazer o estudo de implantação do projeto, pois com os valores calculados é possível entender se este projeto é ou não viável para instalação com as condições que foram impostas.

Segundo Hawawini (2019), indicadores como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), Payback e o Custo Nivelado de Energia (LCOE) são de suma importância para este tipo de análise envolvendo geração elétrica. Dentro da vida útil do sistema de geração, o VPL representa o quanto de retorno o projeto trará, o TIR representa a porcentagem de retorno que é obtido com relação ao valor investido no projeto, o Payback é em quanto tempo será recuperado o valor investido, dado em anos, enquanto que o LCOE é o preço no qual deveria ser vendido a eletricidade para que o VPL seja igual a zero, ou seja, que o valor total que foi investido seja recuperado, não havendo perdas e nem ganhos. Estudos de Thevenard e Pelland (2013), Rodrigues, Chen e Morgado-Dias (2017), Tao e Finenko (2016) e Bendato, Cassettari et al (2017) mostraram em seus estudos também o quanto é importante este tipo de análise na geração elétrica.

**ARTIGO - ANÁLISE DO POTENCIAL DE IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE
GERAÇÃO EMPREGANDO ENERGIA EÓLICA E SOLAR**

RESUMO

A geração de energia através de fontes renováveis, principalmente a eólica e a solar, tem sido temas de vários estudos para geração descentralizada dada a facilidade de implementação destes sistemas, disponibilidade de fonte de energia para seu funcionamento e à viabilidade econômica para abastecimento de instalações de pequeno porte como residências e sistemas industriais. Neste contexto, foi desenvolvido o presente trabalho que tem como objetivo o estudo da viabilidade técnica e econômica de implantação de um sistema de geração eólica ou solar para suprir a demanda de um pavilhão de aulas da Universidade Federal de Lavras. Para este caso foram levantados os potenciais eólicos e solar demonstrando a comparação entre os custos envolvidos na instalação de uma usina eólica e de uma usina solar para definição de qual o melhor investimento para atendimento das demandas da universidade. Os resultados mostraram que a implantação de uma usina eólica de pequeno porte é inviável dadas as baixas velocidades de vento encontradas na cidade de Lavras e que a melhor opção é a instalação de uma usina solar que irá suprir a demanda energética necessária com um tempo de retorno satisfatório para o investimento realizado.

Palavras-chave: energia eólica, energia solar, sustentabilidade, energia renovável, sistema híbrido, viabilidade técnica e econômica.

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2015), o Brasil é um dos países que mais consome energia elétrica oriunda de fontes renováveis, tendo grande destaque para as hidrelétricas, devido a abundância de rios. Porém, nos últimos anos, o país passou por condições hidrológicas desfavoráveis, reduzindo assim o nível dos reservatórios, levando a uma diminuição na produção hidrelétrica, sendo necessário substituir pelas fontes térmicas que utilizam combustíveis de origem fóssil, fontes estas, mais poluentes e caras, que contribuem negativamente com o meio ambiente e ainda acarretam aumentos na conta de energia para população. Por estes motivos, destaca-se a importância da diversificação da matriz energética, com intuito de tornar a produção de energia no país mais econômica e sustentável. Neste contexto, o que tem sido observado é uma tendência mundial de priorização de tecnologias para geração de energia a partir de fontes de energia renováveis (ZÚÑIGA, 2015).

O Brasil apresenta uma ampla variedade de fontes de energia limpa e renovável que podem contribuir para sua matriz energética (PEREIRA JR. At. Al. 2015). Entre estas, a energia solar e eólica, tem se destacado com um crescimento significativo nos últimos anos. Segundo a Agência Internacional de Energia (2021), o Brasil está em nono lugar no ranking de países que mais instalaram placas fotovoltaicas no mundo em 2020, com uma capacidade instalada de 3.152,9 megawatts (MW), dos quais 2.535,3 MW se destinaram para sistemas de geração distribuída e 617,6 MW para sistemas de geração centralizada (<https://iea-pvps.org/>). Já a energia eólica, teve um aumento de 14,89% de capacidade instalada no Brasil comparando os valores entre dezembro de 2019 e dezembro de 2020, valor este que corresponde a uma capacidade de 17,75 GW de potência instalada, de acordo com o Boletim Anual de Geração da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEOLICA, 2020), e segundo IBGE, em 2014 o consumo energético do país foi de 475,1 TWh, e ainda assim estava previsto para crescer aproximadamente 3,9% por ano até 2018 (EPE, 2021).

Lucena e Azevedo Lucena (2019) mostram em seu estudo que a energia eólica no Brasil vem crescendo rapidamente, com grandes chances de se tornar a segunda principal fonte de geração de energia, atingindo uma capacidade instalada de mais 20GW até 2022, sendo a região Nordeste a região mais propensa para instalação de parques eólicos, devido ao fato de o local possuir mais de 85% da capacidade de vento de todo território brasileiro.

No Brasil, a primeira turbina instalada foi em 1992 em Fernando de Noronha com potência nominal de 75kW, fornecendo de 10 a 20% da demanda local da ilha. Ao longo dos anos houve outros projetos realizados no país, porém não teve muito progresso como forma de

consolidar como uma energia alternativa. Em 2001, segundo o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro estimou que o potencial eólico do país era de 143GW com base em uma velocidade média ou superior de 7 m/s com a turbina sendo instalada em uma altura de 50 metros, sendo um marco importante para que houvesse um crescimento significativo, assim como o avanço da tecnologia dos aerogeradores, podendo instalar turbinas maiores e entregando maior potência. A produção eólica mundial em 2017 era de 539,6GW, onde o Brasil respondeu por 12,7GW, ficando em oitavo na lista mundial (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2017).

Em 2018 o cenário brasileiro começou a mudar, havendo 568 parques eólicos espalhados por 12 territórios, totalizando 7.000 turbinas, abastecendo aproximadamente 26 milhões de lares, tendo grande destaque para região Nordeste do país, e espera-se que até 2023 seja instalado 213 novos parques eólicos, e expandir a produção eólica em 125% até 2026, resultando em um terço da produção elétrica oriunda da potência eólica, além de gerar até 200.000 novos empregos diretamente e indiretamente (ABEEÓLICA, 2018).

Outra forma de geração de energia de forma limpa e sustentável que vem crescendo no mundo é a energia solar, uma importante fonte de energia gratuita e inesgotável. A quantidade média de energia solar que incide na atmosfera terrestre é de aproximadamente de 342 W/m², dos quais cerca de 70%, ou seja, 239 W/m² podem ser aproveitados para gerar energia (KABIR et al., 2018). O Brasil é um país localizado na região intertropical, possui uma série de fatores que beneficiam a geração solar, como altos níveis de irradiação solar, grandes reservas de quartzo de qualidade para produção de silício de alta pureza para fabricar células e módulos solares, trazendo grandes benefícios para o país, como o desenvolvimento de regiões remotas onde o custo da energia convencional é muito alto em relação ao retorno financeiro, além de fazer com que o país deixe de depender somente da geração hidrelétrica (DHERE et al. , 2005).

As características favoráveis do território brasileiro para produção de energia a partir das fontes eólica e solar tem impulsionado o desenvolvimento de pesquisas para aproveitamento energético destas fontes, principalmente a partir de mini ou micro usinas de geração elétrica. No setor de energia solar, a micro ou minigeração é vista como uma forma de aumentar a contribuição de fontes renováveis com a matriz energética brasileira (RIGO et atl. 2019). Já no setor de energia eólica, o desenvolvimento de novas tecnologias para microgeração em regiões de baixa velocidade de vento tem ajudado no aproveitamento desta fonte de energia promovendo a sustentabilidade na geração de energia (REZAEIHA; MONTAZERI; BLOCKEN, 2018)

Neste contexto, o presente tem por objetivo a realização de uma análise de viabilidade técnica e econômica da implantação de um sistema de geração de energia empregando as fontes

eólica e solar para suprir a demanda de um pavilhão de aulas da Universidade Federal de Lavras. Inicialmente será feito o levantamento da demanda energética do pavilhão de aulas e, obtida esta demanda, serão levantados o modelo e quantidade de turbinas eólicas de eixo vertical e o número de placas fotovoltaicas para cada proporção definida. Espera-se com essa análise obter a melhor configuração do ponto de vista econômico e o projeto preliminar dos sistemas de geração de energia analisados para o local em estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Com o aumento das emissões de poluentes na atmosfera, o Brasil se comprometeu a reduzir a utilização de geração elétrica oriundo de fontes poluidoras, para incentivar a implantação de sistemas de geração a base de fontes renováveis, como energia eólica, biomassa e a solar fotovoltaica (LUCENA; AZEVEDO LUCENA, 2019).

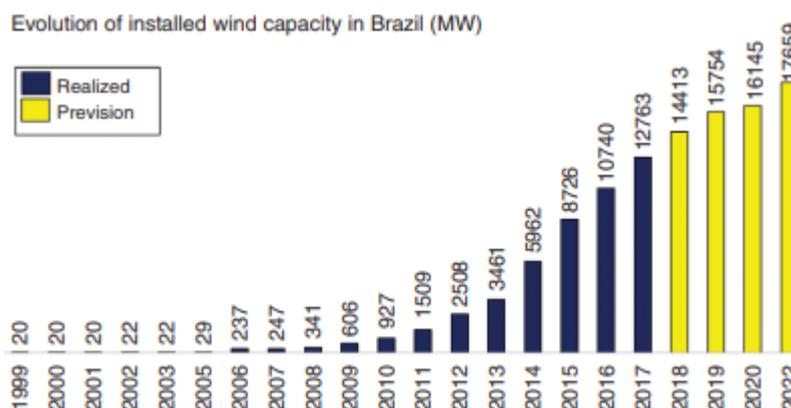
Por volta de 200 a.C, os persas utilizavam os moinhos de vento para bombear água para irrigação das plantações e para moer grãos (WIZELIUS, 2015), e com o passar dos anos, com o avanço das tecnologias voltadas para máquinas eólicas, foi possível gerar cada vez mais energia até o surgimento das primeiras usinas eólicas, e hoje é encontrado em todo mundo aerogeradores cada vez mais modernos, chegando a uma capacidade nominal unitária de até 7 MW, podendo abastecer até 10 mil residências para consumo padrão no Brasil (LUCENA; AZEVEDO LUCENA, 2019).

Este tipo de geração tem sido muito utilizado em locais isolados, como áreas rurais, e por ocupar um pequeno espaço físico, não compromete o espaço local, permitindo que os proprietários das terras possam continuar com suas criações de animais e plantações sem qualquer problema. Apesar de ocupar um pequeno espaço, este tipo de geração produz menos eletricidade que as termelétricas de combustíveis fósseis, quando não é realizado um estudo adequado do potencial eólico que pode ser extraído da região. Um exemplo para este caso seria um investimento para uma turbina de 2 MW, caso essa não seja capaz de produzir sua capacidade nominal devido a ventos irregulares, e gerasse algo em torno de 0,8 MW, seria necessárias mais 1200 turbinas desse mesmo modelo, para produzir o mesmo que uma fonte movida a carvão de 1000MW (LUCENA; AZEVEDO LUCENA, 2019), e para descobrir se a região possui um potencial eólico considerável para geração, muitas vezes é utilizado a ferramenta estatística de Weibull para descobrir a frequência de ocorrência de determinadas velocidades de vento para resultados mais precisos (ISLAM; SAIDUR; RAHIM, 2011).

No Brasil a energia eólica tem aumentado com o passar dos anos, a Figura 2 mostra a evolução de 1999 até 2017 e a previsão de geração até o ano de 2022. Grande parte desta geração

se dá pela região Nordeste, região de muito potencial eólico devido as altas velocidades de vento da região, favorecendo assim a implantação de diversas usinas eólicas, favorecendo assim as regiões isoladas como as áreas rurais. A Tabela 4 representa o quanto cada região do país representa na geração eólica total (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2018).

Figura 2: Evolução da energia eólica no Brasil



Fonte: (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2018).

Tabela 4: Capacidade de geração eólica no Brasil em 2018

State of Brazil	Region of Brazil	Installed capacity (MW)	Number of wind farms
Rio Grande do Norte (RN)	Northeast	3949.3	146
Bahia (BA)	Northeast	3525.0	133
Ceará (CE)	Northeast	2049.9	80
Rio Grande do Sul (RS)	South	1831.9	80
Piauí (PI)	Northeast	1521.1	55
Pernambuco (PE)	Northeast	781.3	34
Santa Catarina (SC)	South	238.5	14
Maranhão (MA)	Northeast	220.8	8
Paraíba (PB)	Northeast	156.9	15
Sergipe (SE)	Northeast	34.5	1
Rio de Janeiro (RJ)	Southeast	28.1	1
Paraná (PR)	South	2.5	1
Total		14 339.8	568

Fonte: (LUCENA, AZEVEDO LUCENA, 2019).

Para geração eólica é possível utilizar dois modelos de turbinas, sendo classificados quanto ao tipo de rotor, podendo ser do tipo de horizontal ou vertical. Os modelos de aerogeradores de eixo vertical costumam ser mais caros e possuem um desempenho inferior quando comparado aos de eixo horizontal para altas velocidades de vento, sendo indicados para regiões de ventos de velocidades mais baixas e mais turbulentos (JOHARI; JALIL; SHARIFF, 2018). Já os aerogeradores de eixo horizontal são mais eficientes para ventos de velocidades mais elevadas, da ordem de 10 a 15 km/h, devido ao seu design, que permite maior aproveitamento da potência disponível no vento (KHANDAKAR; KASHEM, 2020), compensando seu elevado

custo de aquisição e manutenção quando se pensa em termos de energia produzida. Além da classificação quanto à disposição dos eixos das turbinas, elas ainda podem ser classificadas em sistemas *onshore* e *offshore*. Para os sistemas *onshore*, que são os mais utilizados, as turbinas são instaladas em terra, no continente, e o principal requisito é a disponibilidade de grandes áreas para instalação das torres eólicas, visto que os aerogeradores precisam ficar a uma distância de pelo menos 10 vezes o tamanho do rotor do mesmo para instalação a jusante e de 5 vezes para instalação lateral, além de sistemas de para-raios devido à altura das torres, e uma fundação robusta de acordo com o terreno e dimensões do aerogerador (RICARDO; MACHADO; ZEM, 2015). Já a energia eólica do tipo *offshore* se refere a aerogeradores instalados fora do continente, em alto mar e nos oceanos por exemplo, porém no Brasil há poucos parques eólicos desse tipo. Essa modalidade é mais eficiente que a *onshore*, porém o custo de instalação e manutenção são maiores, devido as estruturas para as turbinas e os cabos para transmissão do potencial produzido até o continente (WESSIER, 2007).

Embora a geração eólica a partir de turbinas de eixo horizontal em grandes parques eólicos seja a prática mais comum em termos de geração elétrica, tem se notado nos últimos anos um aumento na utilização de turbinas eólicas de pequeno porte, principalmente o modelo de eixo vertical, atender a demanda de empresas e até mesmo residências, visando a sustentabilidade e o menor gasto com energia elétrica. Empresas ou instituições que tem um gasto elevado com energia elétrica tem cada vez mais adotado pequenos parques eólicos para o autoabastecimento, fazendo com que o dinheiro economizado possa ser investido em si mesma. Além disso, em muitos casos a energia é aplicada em pequena escala, sendo instalados parques eólicos para suprir a necessidade de pequenos bairros, condomínios e até mesmo fazendas, sendo uma alternativa promissora. Este tipo de projeto é conhecido como solução descentralizada, onde os sistemas de geração de energia são do tipo de biomassa, solar, hidroelétrico e o eólico (OLIVEIRA, 2002).

2.2 Avanço da Energia Solar no Brasil

Muitos países escolheram a energia solar como o meio de geração a ser investido nos próximos anos para suprir a demanda, pelo fato de ser uma fonte não poluidora e oriundo de uma fonte totalmente inesgotável, onde é convertido a radiação solar em eletricidade através de módulos solares fotovoltaicos (SHAHAVARI; AKBARI, 2018). O aumento da eficiência desse tipo de sistema e a redução do custo de instalação nos últimos anos tem tornado esse tipo de geração cada vez mais usual em residências, indústrias, comércios e até mesmo em áreas rurais para suprir a sua própria demanda energética (SINGH, 2013). A Tabela 5 mostra o quanto a energia solar, assim como a energia eólica tem aumentado sua participação na geração elétrica

entre 2010 e 2015, tendo destaque para energia solar que teve rápido aumento em todo mundo (SHAHSVARI; AKBARI, 2018).

Tabela 5: Porcentagem de geração elétrica de fontes renováveis entre 2010 e 2015

Year	Hydropower %	PV%	CSP%	Wind%	Geothermal%	Biomass %	All Renewables%	Renewable Capacity (GW)
2010	18.4	0.8	0.0	3.9	0.2	1.3	24.6	1253
2011	18.0	1.3	0.0	4.5	0.2	1.4	25.4	1356
2012	17.8	1.8	0.0	5.1	0.2	1.5	26.5	1470
2013	17.6	2.4	0.1	5.5	0.2	1.5	27.3	1579
2014	17.5	2.9	0.1	6.1	0.2	1.5	28.5	1712
2015	17.0	3.6	0.1	6.9	0.2	1.7	29.5	1848

Fonte: (SHAHSVARI; AKBARI, 2018).

Esse rápido crescimento da energia renovável se dá principalmente pela competitividade dos tipos de gerações, com o avanço da tecnologia esses sistemas de geração têm reduzido cada vez mais o custo de instalação e até mesmo de O&M, e pelos incentivos do governo, tornando financiamentos para esse tipo de investimento cada vez mais atrativo para a população (KANNAN; VAKEESAN, 2016).

O Brasil é um país localizado na região intertropical, possui uma série de fatores que beneficiam a geração solar, como altos níveis de irradiação solar, grandes reservas de quartzo de qualidade para produção de silício de alta pureza para fabricar células e módulos solares, trazendo grandes benefícios para o país, como o desenvolvimento de regiões remotas onde o custo da energia convencional é muito alto em relação ao retorno financeiro, além de fazer com que o país deixe de depender somente da geração hidrelétrica (DHERE et al., 2005). A Tabela 6 representa a potência instalada por cada classe no Brasil no ano de 2021.

Tabela 6: Potência instalada por classe no Brasil

Class	Installed Power (kW)	Number of generating units	Mean (Installed Power/Number of generating units)
Commercial	1,838,381.76	64,334	28.57 kW
Residential	1,792,042.20	283,132	6.33 kW
Rural	645,015.19	27,121	23.78 kW
Industrial	431,339.38	9,436	45.71 kW
Public power	57,089.29	1,455	39.24 kW
Public service	3,317.69	111	29.89 kW
Public illumination	823.89	26	31.69 kW
Total	4,768,015.40	385,615	12.36 kW

Fonte: (ANEEL, 2021).

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em dois tipos, sendo eles o Sistema Fotovoltaico Isolado e o Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede, também conhecidos como sistemas off-grid e on-grid, respectivamente (SILVA, 2019). Os sistemas on-grid estão conectados diretamente à rede elétrica, onde a energia elétrica fornecida pelos painéis fotovoltaicos é utilizada para suprir a demanda do local de instalação, e quando essa geração é insuficiente, a rede elétrica complementa com a carga necessária, o que ocorre no caso no período

noturno, onde os painéis não estão gerando nenhuma energia. Este tipo de sistema é o mais utilizado em residências e empresas, não sendo necessário o uso de baterias, mas sim de inversores solares ou micro inversores para converter a corrente contínua em corrente alternada, utilizada pela maioria dos equipamentos. Para este tipo de sistema, o excedente da energia elétrica gerada é exportado para a rede de distribuição elétrica, sendo convertido em créditos. (CLEAN ENERGY REVIEWS, 2021).

Já os sistemas off-grid são completamente isolados da rede elétrica, sendo muito utilizados em locais que geralmente não são atendidos pelas concessionárias de energia elétrica, devido ao difícil acesso. Como os painéis fotovoltaicos não produzem energia no período noturno e em momentos de chuva, é necessário que a energia gerada durante o dia seja armazenada em baterias com controlador de carga, para que possa ser usada em momentos de não geração pelos painéis (LIMA, 2018). Estes sistemas requerem um banco de baterias para que a energia seja armazenada, e isso torna um sistema muito mais caro, quando comparado ao sistema on-grid, portanto deve ser usado somente em extrema necessidade, como em áreas remotas de não haver acesso a rede de distribuição. Além disso, para estes sistemas off-grid, é necessário que haja um sistema de geração complementar, que é acionado quando o sistema detecta baixa carga nas baterias ou quando está em um período nublado ou noturno, para que a residência ou empresa não fique sem energia elétrica (CLEAN ENERGY REVIEWS, 2021).

2.3 Análise da Viabilidade Econômica

A análise da viabilidade econômica é de suma importância na hora de fazer o estudo de implantação do projeto, pois com os valores calculados é possível entender se este projeto é ou não viável para instalação com as condições que foram impostas.

Segundo Hawawini (2019), indicadores como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), Payback e o Custo Nivelado de Energia (LCOE) são de suma importância para este tipo de análise envolvendo geração elétrica. Dentro da vida útil do sistema de geração, o VPL representa o quanto de retorno o projeto trará, o TIR representa a porcentagem de retorno que é obtido com relação ao valor investido no projeto, o Payback é em quanto tempo será recuperado o valor investido, dado em anos, enquanto o LCOE é o preço no qual deveria ser vendido a eletricidade para que o VPL seja igual a zero, ou seja, que o valor total que foi investido seja recuperado, não havendo perdas e nem ganhos. Estudos de (DOILE) Thevenard e Pelland (2013), Rodrigues, Chen e Morgado-Dias (2017), Tao e Finenko (2016) e Bendato, Cassettari et al (2017) mostraram em seus estudos também o quanto é importante este tipo de análise na geração elétrica.

3 METODOLOGIA

Para realização da análise de viabilidade técnica e econômica da implantação para um sistema de geração eólico e solar para um pavilhão de aulas da Universidade Federal de Lavras, foi realizado o levantamento da demanda energética do pavilhão em estudo, a avaliação do potencial eólico da cidade de Lavras, o cálculo dos parâmetros necessários para geração solar, por fim, foi apresentado o projeto preliminar da instalação selecionada para geração de energia e feito a análise de viabilidade econômica para implantação do sistema.

3.1 Demanda Energética

Para obter a demanda do pavilhão de aulas 9, foi levantado o número de equipamentos que estão ligados a rede elétrica, descritos na Tabela 7.

Tabela 7: Descrição dos aparelhos do pavilhão de aulas 9

Equipamento	Quantidade por sala de aula	Quantidade total no pavilhão de aulas
Lâmpadas fluorescentes por sala de aula	24	288
Lâmpadas fluorescentes corredores e escada	10	30
Desktop	1	12
Monitor	1	12
Datashow	1	12
Ventiladores	2	24

Para o cálculo do consumo mensal do pavilhão, foi considerado um mês com 4 semanas, e com 5 dias letivos, totalizando 20 dias letivos mensais. O horário em que as aulas são ministradas é das 7 às 12h, havendo um intervalo para horário do almoço e das 13 às 23h. Porém, nem todos os equipamentos funcionam durante todo período de aulas, como por exemplo as lâmpadas, em que as das salas de aulas estão ligadas durante todo tempo, enquanto as lâmpadas dos corredores e escadas são ligadas somente no período noturno. Para isso foi estabelecido um período no qual os aparelhos estariam em funcionamento conforme descrito na Tabela 8, assim como a energia consumida por cada um desses aparelhos, conforme Tabela 9.

Tabela 8: Período de funcionamento dos aparelhos durante o dia

Equipamento	Atividade de uso	Horas por dia (h)
Lâmpadas fluorescentes em salas de aula	Das 7 às 12h e das 13 às 23h	17
Lâmpadas fluorescentes dos corredores e escadas	Das 17 às 23h	6
Desktop	Das 7 às 12h e das 13 às 23h	17
Monitor	Das 7 às 12h e das 13 às 23h	17
Datashow	Das 7 às 12h e das 13 às 23h	17
Ventiladores	Das 13 às 18h	5

Tabela 9: Energia consumida por cada aparelho do pavilhão de aulas 9

Equipamento	Modelo	Energia consumida (kWh)
Lâmpadas fluorescentes da sala de aula	Philips tubular T8	3916,8
Lâmpadas fluorescentes em corredores e escada	Philips tubular T8	144
Desktop	Desktop Dell	612
Monitor	Monitor Dell	204
Datashow	Acer X1126AH	1122
Ventiladores	Ventisol 50cm	312

A partir dos valores obtidos na Tabela 9, conclui-se que a energia total consumida no pavilhão 9 é de 6.310,8 kWh por mês.

2.2 Parâmetros para Cálculo do Potencial Eólico

Os parâmetros para análise do potencial para geração eólica na Universidade Federal de Lavras foram obtidos no estudo de caso realizado por Rocha Lara (2021), onde o autor levantou a distribuição média de velocidade na cidade de Lavras a partir de dados meteorológicos

disponibilizados pelo INMET. Para as análises foi aplicada a ferramenta estatística de distribuição de Weibull.

Para levantamento dos dados de velocidade média de vento foram considerados dados de velocidades diárias de vento entre os anos de 2010 e 2019. A partir desses valores foi aplicada a ferramenta estatística de distribuição de Weibull. Esta ferramenta indica com que frequência de velocidade de vento distintas terá no local para escolha do aerogerador eólico ideal para o local desejado (ISLAM; SAIDUR; RAHIM, 2011).

A expressão matemática utilizada para aplicar a distribuição de Weibull é representada pela Equação (1) (ISLAM; SAIDUR; RAHIM, 2011):

$$f(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k \right] \quad (1)$$

Em que k é um valor adimensional e c é um fator de forma em m/s, sendo $c > 1$ e V e $k > 0$.

Posteriormente é preciso determinar a velocidade média v e o desvio padrão σ a partir dos dados conhecidos, conforme representado pela Equação (2) e (3) respectivamente (ISLAM; SAIDUR; RAHIM, 2011).

$$v = \frac{1}{n} [\sum_{i=1}^n V_i] \quad (2)$$

$$\sigma = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (V_i - v)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

A partir dos dados obtidos anteriormente é possível determinar o valor de k e o fator de forma c de acordo com a Equação (4) e (5) respectivamente (ISLAM; SAIDUR; RAHIM, 2011).

$$k = \left(\frac{\sigma}{v}\right)^{-1.086} \quad (4)$$

$$c = \frac{v}{\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)} \quad (5)$$

Onde a função gama Γ pode ser obtida através da integral representada pela Equação (6) (ISLAM; SAIDUR; RAHIM, 2011).

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-x} u^{x-1} du \quad (6)$$

A partir de então, será escolhido o modelo do aerogerador para aplicação no sistema eólico, sendo possível calcular a potência eólica a partir da Equação (7) (ISLAM; SAIDUR; RAHIM, 2011):

$$Potência\ eólica = \frac{1}{2} \rho A V^3 F C \quad (7)$$

Em que ρ é a massa específica do ar, sendo igual a 1,25 kg/m³ em condições normais de temperatura e pressão ao nível do mar, A é a área varrida pelas pás do aerogerador, V é a velocidade em m/s e FC é o fator de capacidade do modelo escolhido (ISLAM; SAIDUR; RAHIM, 2011).

A partir da aplicação desta ferramenta, é possível obter diversos parâmetros necessários para obter resultados mais precisos e satisfatórios sobre o potencial eólico real da região como a densidade de potência, que mostra o quanto a região é propensa a extrair potência dos ventos independente do modelo de aerogerador que se escolha (ISLAM; SAIDUR; RAHIM, 2011).

As regiões podem ser classificadas quanto a força do vento, podendo ser divididas em 8 classes, onde a classe 1 não sendo adequada para instalação de turbinas eólicas, a classe 2 são marginais, enquanto a área 3 ou superior já são adequadas para instalação de turbinas eólicas, conforme representado pela Tabela 10 (PISHGAR-KOMLEH; KEYHANI; SEFEEDPARI, 2015).

Tabela 10: Classificação das regiões quanto a força de vento

Classe de Potência Eólica	10 metros	
	Densidade de Potência Eólica (W/m ²)	Velocidade (m/s)
1	0-100	0 - 4,4
2	100-150	4,4 - 5,1
3	150-200	5,1 - 5,6
4	200-250	5,6 - 6,0
5	250-300	6,0 - 6,4
6	300-400	6,4 - 7,0
7	400-1000	7,0 - 9,4
8	> 1000	> 9,4

Fonte: (PISHGAR-KOMLEH; KEYHANI; SEFEEDPARI, 2015 (MODIFICADA)).

Por fim, foi feito uma pesquisa no mercado para escolher o melhor modelo de aerogerador que atendesse a região de Lavras. A partir do modelo escolhido, foi possível obter o fator de capacidade do mesmo para região da Universidade, onde é possível calcular a partir da Equação (8).

$$FC = \frac{\text{Potência Nominal}}{\text{Energia Gerada no ano}} \quad (8)$$

Onde a potência nominal é a potência do aerogerador quando operado em sua velocidade nominal que é extraído pela curva de potência do modelo, enquanto a energia gerada ao ano é a energia que esse aerogerador gera dentro de um ano na velocidade de vento da região de estudo.

2.3 Parâmetros para Cálculo da geração solar

Para o cálculo de geração de energia solar de acordo com a demanda calculada para a instalação em estudo no presente trabalho, foi utilizado uma ferramenta para cálculo de energia solar através do site PVWatts (2021). Nesta ferramenta de simulação devem ser inseridos o local de instalação, a potência de demanda, o valor pago da eletricidade de acordo com concessionária de distribuição do local, que para Lavras é a CEMIG.

Ao entrar com os dados no simulador do PVWatts (2021), o sistema mostra o resultado da simulação, fornecendo a radiação de cada mês do ano em kWh/m².dia e a energia mensal, de acordo com a radiação do respectivo mês, em kWh, assim como a energia acumulada durante todo ano, e a economia mensal e conseqüentemente a anual que será obtida com o investimento no sistema. Além disso, é fornecido o valor do fator de capacidade do sistema solar para região de Lavras, no qual é utilizado para o cálculo da energia que é gerada pela usina. Posteriormente foi obtido o valor do custo de aquisição de todos os equipamentos para implantação do sistema solar de acordo com a demanda do projeto.

2.4 Projeto Preliminar do Sistema de Geração

A partir dos cálculos realizados tanto para geração eólica quanto para geração solar, foi possível analisar e escolher o sistema que apresentasse o melhor custo x benefício para implantação na UFLA e seguido com ele para definição do projeto e análise da viabilidade econômica. Para implantação do sistema de geração eólico, foi definido que os aerogeradores seriam de eixo vertical, visto que esses apresentam um menor custo unitário, e apresenta melhores condições de geração para velocidades mais baixas, e os mesmos seriam instalados a uma altura de 10 metros acima do solo. Já para o caso da energia solar, foi determinado que o modelo seria *ongrid*, visto que possui rede de distribuição elétrica dentro da Universidade, em que a energia gerada será injetada na rede elétrica da distribuidora local e o excedente ficará como créditos para uso no futuro quando for necessário, não havendo necessidade de armazenar a energia gerada, pois acaba encarecendo muito o projeto de implantação.

Para instalação do sistema devem ser considerados alguns pré-requisitos como, por exemplo, o local, onde não deve haver nenhum obstáculo ao redor, tanto para a turbina eólica, devido a interferência que o relevo geraria nas pás dos aerogeradores por causa da influência deste no perfil de velocidades do vento, podendo atrapalhar a geração elétrica, e até mesmo

causar vibração indesejada nas turbinas, o que poderia danificar o equipamento ou até mesmo acarretar uma quebra dele. Já para geração solar, a usina deve estar longe de obstáculos que podem gerar sombras em cima dos módulos fotovoltaicos, pois isso afetaria a geração e poderia até mesmo sobreaquecer o painel solar, danificando o equipamento. O local selecionado também precisa atender a área estimada para instalação de todos módulos e equipamentos do sistema solar. Além disso é necessário que um sistema ou ambos estejam de preferência próximos da rede de distribuição elétrica para que a energia gerada pela usina seja injetada na rede da operadora de distribuição do local, evitando assim gastos desnecessários com instalação de rede elétrica.

2.5 Parâmetros para Cálculo da Viabilidade Econômica

A partir do sistema de geração escolhido para implantação na Universidade no Item 2.4, foi realizado o cálculo da viabilidade econômica para este sistema de geração em específico com intuito de analisar se este projeto é viável ou não, e o quanto de retorno financeiro ele trará para a UFLA.

Para este estudo será calculado o valor presente líquido (VPL), que é um sucessão de pagamentos futuros que são tragos a valor presente, a taxa interna de retorno (TIR), que mostra o percentual de retorno financeiro que será obtido no projeto, o payback simples, que resulta em quantos ano será necessário para que o valor investido seja recuperado, além do custo nivelado de energia (LCOE), que mostra o valor pelo qual energia deveria ser vendida para que pelo menos o custo total fosse recuperado até o fim da vida útil do sistema.

Para realizar os cálculos é necessário determinar alguns parâmetros como a taxa de juros atual, quanto tempo de vida útil todo sistema terá, o custo de Operação e Manutenção (O&M) de ambos os sistemas de geração, custo de instalação, além do custo de eletricidade da operadora de distribuição da região. Todo cálculo será realizado utilizando o Microsoft Excel.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Levantamento do potencial eólico

Primeiramente foi calculado a média mensal da velocidade do vento a 10 metros obtida através da torre anemométrica localizada na Universidade Federal de Lavras de janeiro a dezembro de seu respectivo ano, desde 2010 a 2019. Vale ressaltar que em alguns dias do ano não houve valores devido algum problema de medição, logo esse valor e seu respectivo dia foi descontado ao realizar o valor médio. A Tabela 11 mostra os valores de velocidade média mensal calculados para cada ano do período definido por Rocha Lara (2021).

Com os valores médios mensais calculados para velocidade do vento encontrados na Tabela 10, foi realizado o cálculo da média anual destas velocidades, de acordo com os valores mensais. Os valores de velocidade de vento média anual são apresentados na Tabela 12.

Com os valores de velocidade de vento média mensal, foi possível iniciar os cálculos para obtenção dos parâmetros necessários para aplicar na ferramenta de distribuição de Weibull. Utilizando a Equação (3) foi calculado o valor do desvio padrão (σ) de todos os meses do ano, utilizando os valores de velocidade de vento e velocidade de vento média encontrados anteriormente, conforme representado na Tabela 13.

Tabela 11: Velocidade do vento média mensal

Ano	Mês	Velocidade Média (m/s)												
2010	1	1,9409	2012	1	2,2640	2014	1	2,3129	2016	1	1,6989	2018	1	1,2043
	2	2,0274		2	2,1793		2	2,6333		2	1,4195		2	1,7043
	3	2,3183		3	2,3903		3	2,4753		3	1,3871		3	1,2258
	4	2,2500		4	2,1767		4	2,1919		4	1,4333		4	1,7556
	5	1,9032		5	2,3634		5	1,9237		5	1,4194		5	1,5591
	6	2,1411		6	1,8278		6	1,8770		6	1,1222		6	1,0222
	7	2,3441		7	1,9935		7	2,2644		7	1,3763		7	1,1720
	8	2,5871		8	2,9430		8	2,3710		8	1,5484		8	1,4774
	9	2,6233		9	2,5811		9	2,4767		9	1,9444		9	1,8343
	10	2,5785		10	2,5840		10	2,6484		10	1,9892		10	1,4839
	11	2,4889		11	2,7473		11	2,4711		11	1,6556		11	1,6333
	12	2,3634		12	2,0828		12	2,1258		12	1,8860		12	1,1624
2011	1	2,1796	2013	1	2,5280	2015	1	1,8937	2017	1	1,3763	2019	1	0,9032
	2	2,0702		2	1,7786		2	2,1238		2	1,9507		2	1,1786
	3	2,2634		3	2,1204		3	2,0157		3	1,7527		3	1,3656
	4	2,2278		4	2,2144		4	2,2167		4	1,7778		4	1,3111
	5	2,0204		5	1,8215		5	2,2194		5	1,6581		5	1,3011
	6	2,0544		6	1,6733		6	2,1744		6	1,7111		6	1,3222
	7	2,1763		7	2,1863		7	2,0161		7	2,3333		7	1,7849
	8	2,3908		8	2,4484		8	1,8613		8	2,0108		8	2,2903
	9	2,9967		9	2,5167		9	1,7778		9	2,0451		9	1,7778
	10	2,8409		10	2,5648		10	1,9140		10	1,7100		10	1,5376
	11	2,8011		11	2,5222		11	1,5222		11	1,5562		11	1,5222
	12	2,3731		12	2,2555		12	1,5591		12	1,5705		12	1,7228

Fonte: (ROCHA LARA, 2021).

Tabela 12: Velocidade de vento média anual

Ano	Velocidade Média (m/s)
2010	2,2972
2011	2,3662
2012	2,3444
2013	2,2192
2014	2,3143
2015	1,9412
2016	1,5734
2017	1,7877
2018	1,4362
2019	1,5015

Fonte: (ROCHA LARA, 2021).

Tabela 13: Desvio padrão

Ano	Mês	Desvio Padrão (σ)	Ano	Mês	Desvio Padrão (σ)	Ano	Mês	Desvio Padrão (σ)	Ano	Mês	Desvio Padrão (σ)	Ano	Mês	Desvio Padrão (σ)
2010	1	0,6175	2012	1	0,9899	2014	1	0,4574	2016	1	0,6275	2018	1	0,5753
	2	0,7006		2	0,6032		2	0,5793		2	0,4357		2	0,6544
	3	0,6879		3	0,8370		3	0,7242		3	0,5450		3	0,5862
	4	0,7256		4	0,7270		4	0,7275		4	0,4476		4	0,7424
	5	0,4605		5	0,8224		5	0,7212		5	0,8198		5	0,5776
	6	0,8257		6	0,5896		6	0,5974		6	0,6104		6	0,6896
	7	0,6074		7	0,8511		7	0,8034		7	0,5781		7	0,7347
	8	1,0130		8	0,8189		8	0,9938		8	0,7396		8	0,6975
	9	1,1919		9	0,9520		9	1,0191		9	0,7551		9	0,6707
	10	0,8666		10	0,7491		10	1,1333		10	1,0106		10	0,8333
	11	1,0526		11	0,8880		11	0,6717		11	0,8757		11	0,5629
	12	0,8474		12	0,6766		12	0,7897		12	1,0448		12	0,6191
2011	1	0,6376	2013	1	0,7311	2015	1	0,6266	2017	1	0,5610	2019	1	0,7167
	2	0,6027		2	0,7686		2	0,8417		2	0,8132		2	0,7116
	3	0,8238		3	0,7582		3	0,7163		3	0,8083		3	0,9139
	4	0,6992		4	0,7582		4	0,6974		4	1,0413		4	0,5868
	5	0,6203		5	0,6714		5	0,7495		5	0,7344		5	0,7085
	6	0,8690		6	0,5546		6	0,8755		6	0,8873		6	0,8188
	7	0,8575		7	0,7357		7	0,6203		7	0,7123		7	1,1145
	8	0,7797		8	0,7518		8	0,8115		8	0,7976		8	1,3253
	9	0,9593		9	0,7646		9	0,8457		9	0,5741		9	1,1170
	10	0,8952		10	0,8688		10	0,9417		10	0,8153		10	0,6605
	11	0,7674		11	0,7799		11	0,6045		11	0,6052		11	0,8787
	12	0,8786		12	0,5605		12	0,4680		12	0,6625		12	0,8986

Os demais parâmetros necessários para aplicar a ferramenta estatística de Weibull, são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14: Parâmetros anuais da Distribuição de Weibull

Ano	Velocidade Média (m/s)	Desvio Padrão (σ)	k	Função Gama	Fator de forma (c)
2010	2,2972	0,7997	3,14533	0,8949	2,5670
2011	2,3662	0,7825	3,32576	0,8973	2,6370
2012	2,3444	0,7921	3,24943	0,8962	2,6159
2013	2,2192	0,7253	3,36871	0,8979	2,4717
2014	2,3143	0,7682	3,31248	0,8972	2,5795
2015	1,9412	0,7332	2,87869	0,8917	2,1770
2016	1,5734	0,7075	2,38212	0,8865	1,7748
2017	1,7877	0,7510	2,56465	0,8882	2,0127
2018	1,4362	0,6620	2,31903	0,8859	1,6212
2019	1,5015	0,8709	1,80670	0,8893	1,6884

Fonte: (ROCHA LARA, 2021).

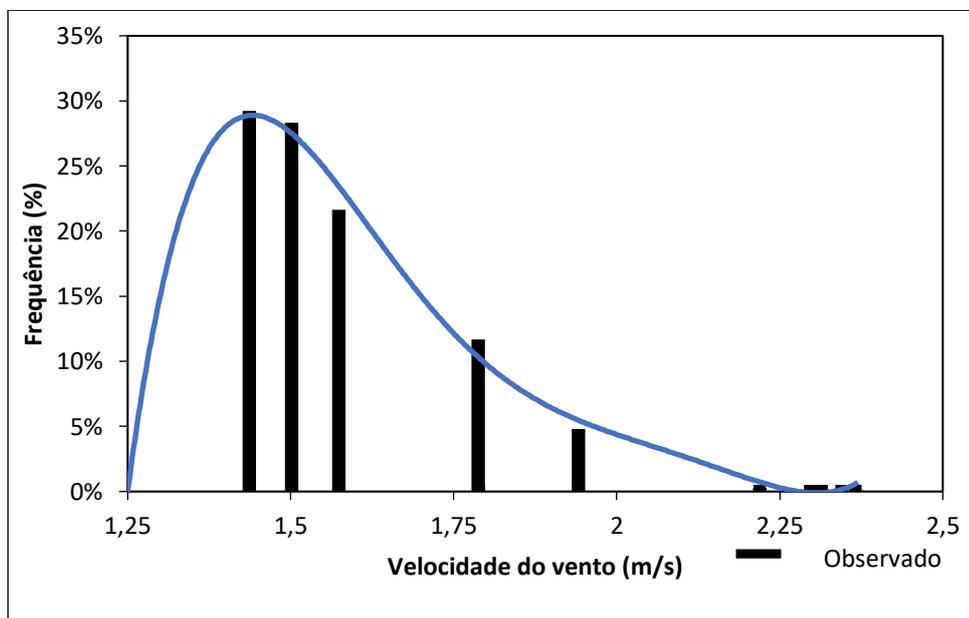
A partir dos parâmetros obtidos na Tabela 14, foi possível calcular os valores da frequência de ocorrência das velocidades de vento da cidade de Lavras, Tabela 15 e a construção do gráfico da distribuição de Weibull, conforme representado pela Figura 3.

Tabela 15: Parâmetros calculados da distribuição de Weibull

Pontos	Velocidade (m/s)	Frequência de ocorrência
0	1,25	0
1	1,4362	29,2%
2	1,5015	28,3%
3	1,5734	21,6%
4	1,7877	11,7%
5	1,9412	4,8%
6	2,2192	0,3%
7	2,2972	0,5%
8	2,3143	0,2%
9	2,3444	0,2%
10	2,3662	0,1%

Fonte: (ROCHA LARA, 2021).

Figura 3: Distribuição de Weibull para região de Lavras



Fonte: (ROCHA LARA, 2021).

A partir do gráfico da Figura 3 e da Tabela 15 foi possível concluir que as maiores frequências de ocorrência foram para velocidades mais baixas, sendo menores que 1,75 m/s, possuindo a maior frequência de aproximadamente 29%, para a velocidade de 1,4362 m/s, que foi a velocidade média anual do ano de 2018, possuindo as velocidades maiores que 1,75 m/s uma frequência extremamente pequena.

A partir dos dados de velocidade de vento foram calculadas a densidade de potência eólica e a densidade de energia eólica anual, sendo estes dados de suma importância para entender do real potencial eólico da região estudada, sem levar em consideração o aerogerador que será

instalado. Na Tabela 16 são apresentados os valores encontrados para a densidade de potência e de energia eólica para torres de medição meteorológica a 10 metros de altura.

Tabela 16: Densidade de potência e energia eólica para 10 metros

Ano	Velocidade	Densidade de Potência (W/m ²)	Densidade de energia (W/m ² .ano)
2010	2,2971833	79,7151	698,3042
2011	2,3662324	119,3228	1045,2677
2012	2,3444470	101,4294	888,5216
2013	2,2191788	106,3315	931,4637
2014	2,3142821	109,0101	954,9282
2015	1,9411865	31,0614	272,0976
2016	1,5733727	8,1062	71,0099
2017	1,7877121	15,2035	133,1828
2018	1,4362177	5,6915	49,8574
2019	1,5014563	3,6833	32,2661

Fonte: (ROCHA LARA, 2021).

Com base nos dados padrão obtidos da torre anemométrica, a 10 metros de altura, o valor médio para densidade de potência eólica foi de 57,95 W/m², onde o menor valor foi de 3,68 w/m² para o ano de 2019 e a maior foi 119,32 W/m² em 2011. Já para a densidade de energia eólica, a média foi de 507,68 W/m².ano, sendo a menor também para o ano de 2019 de 32,26 W/m².ano, e a maior para 2011 no valor de 1045,26 W/m².ano.

A partir da densidade de potência eólica média da região de Lavras, esta é classificada na classe 1 de acordo com a Tabela 10, assim para a altura de 10 metros não é viável a instalação de turbinas eólicas de eixo horizontal para geração elétrica.

A partir dos dados de distribuição de velocidades em Lavras, foi escolhido um aerogerador de eixo vertical, pois apresenta um custo de instalação menor, e velocidade de partida também menor, visto que as velocidades de maior ocorrência é uma velocidade menor que 2 m/s. O aerogerador escolhido foi o modelo FX-400, do fabricante Maglev e tem um custo unitário de R\$5.217,10 sem levar em consideração os impostos de importação, representado pela Figura 4.

O modelo FX-400 possui como características técnicas uma velocidade de partida de 1,3 m/s, diâmetro do rotor de 0,60 metros, possui 3 lâminas com altura de 0,80 metros e pesa menos de 20 kg. Ele apresenta velocidade nominal de operação 10 m/s com potência nominal de 400W neste ponto de operação. A Figura 5 representa a curva de potência do modelo de aerogerador escolhido.

Figura 4: Aero gerador FX-400 Maglev



Fonte: (ALIEXPRESS, 2021).

Figura 5: Curva de potência do aerogerador FX-400



Fonte: (ALIEXPRESS, 2021).

A partir da velocidade que possui a maior frequência de ocorrência em Lavras, que foi de 29,2% para velocidade de 1,4362 m/s, é possível calcular a potência gerada por um aerogerador através da Equação (7), utilizando os dados de diâmetro do rotor, altura das lâminas, massa específica do ar de 1,25 kg/m³, chegando a um valor de 0,000418588150 kW. Considerando que o sistema eólico gera energia 24 horas por dia e 365 dias ao ano, o resultado de energia gerada em um ano por cada aerogerador é de 3,6166 kWh.

A partir da energia anual gerada por esse aerogerador utilizando a velocidade de vento de maior frequência de ocorrência e da potência nominal da turbina extraída da curva de potência,

Figura 5, foi possível obter o fator de capacidade médio para este aerogerador na região de Lavras através da Equação (8), resultando em um FC de aproximadamente 11%.

3.2 Cálculo para geração solar

A partir da demanda energética calculada para o pavilhão de aulas 9 da Universidade Federal de Lavras, é possível realizar a simulação do projeto da usina de geração solar a partir do simulador do PVWatts, conforme citado no Item 2.3, considerando o gasto mensal de energia elétrica, 6.310,8 kWh/mês, totalizando uma usina solar de 48 kWp. Porém não foi encontrado um sistema que tivesse essa mesma especificação de geração, e para cálculo de custo exato de instalação foi escolhido um sistema com valores próximos, sendo encontrado dois sistemas próximos, de 42,3 e 50,4 kWp (MEU GERADOR, 2021), sendo escolhido o sistema de maior potência para suprir a demanda do pavilhão de aulas. Portanto foi utilizado no simulador PVWatts a configuração de potência de 50,4 kWp, e de acordo com a Cemig (2021) o valor cobrado atualmente para cada kWh é de R\$0,69. Vale ressaltar que para este estudo não foi considerado o uso de bandeira amarela ou vermelha, visto que está se modifica conforme a demanda, ao nível dos reservatórios hídricos ao decorrer do ano. A Figura 6 ilustra os resultados que foram obtidos através do simulador.

Figura 6: Resultado obtido através do simulador PVWatts

RESULTADOS 80.508 kWh / ano *

Resultados de impressão

Mês	Radiação solar ² (kWh / m ² / dia)	Energia AC (kWh)	Valor (\$)
Janeiro	5,76	6.774	813
fevereiro	5,86	6.167	740
marchar	5,60	6.579	790
abril	5,92	6.692	803
Poderia	5,61	6.622	795
Junho	5,61	6.468	776
Julho	5,63	6.657	799
agosto	6,51	7.608	913
setembro	6,21	6.980	838
Outubro	6,38	7.427	891
novembro	5,40	6.119	734
dezembro	5,37	6.414	770
Anual	5,82	80.507	\$ 9.662

Fonte: (PVWATTS, 2021).

A Figura 6, mostra a radiação, a energia gerada e o valor economizado em cada mês do ano em dólares, assim como o valor acumulado em um ano, e o valor do fator de capacidade da

região de Lavras utilizado nos cálculos do simulador é de 18,2%. Outro ponto importante mostrado é que a geração anual acumulada é de 80.508 kWh, suprimindo a demanda do prédio de aulas durante todo ano, sobrando um excedente que será injetado na rede como créditos para ser abatido na fatura mensal de energia do restante da Universidade. Segundo o Meu Gerador (2021), o número total de painéis fotovoltaicos é de 112 de 450 W cada, e de acordo com a Solarizar (2021) para cada kWp é necessária uma área de 7 a 10 m², logo a maior área necessária seria de aproximadamente 500 m².

O preço total dos equipamentos necessários para instalação seria de R\$176.848,81 para o kit de 50,4 kWp à vista, ou R\$192.765,20 para pagamento via financiamento (MEU GERADOR, 2021). Além disso, segundo a simulação feita através do PVWatts, o valor economizado anualmente é de \$9.662, aproximadamente R\$54.590,30.

3.4 Definição do Projeto de Implantação do Sistema de Geração

A partir dos cálculos para levantamento do potencial eólico e dos cálculos para geração solar da região, foi possível obter detalhadamente sobre ambos os sistemas e analisar qual tem o melhor custo x benefício para implantar na Universidade.

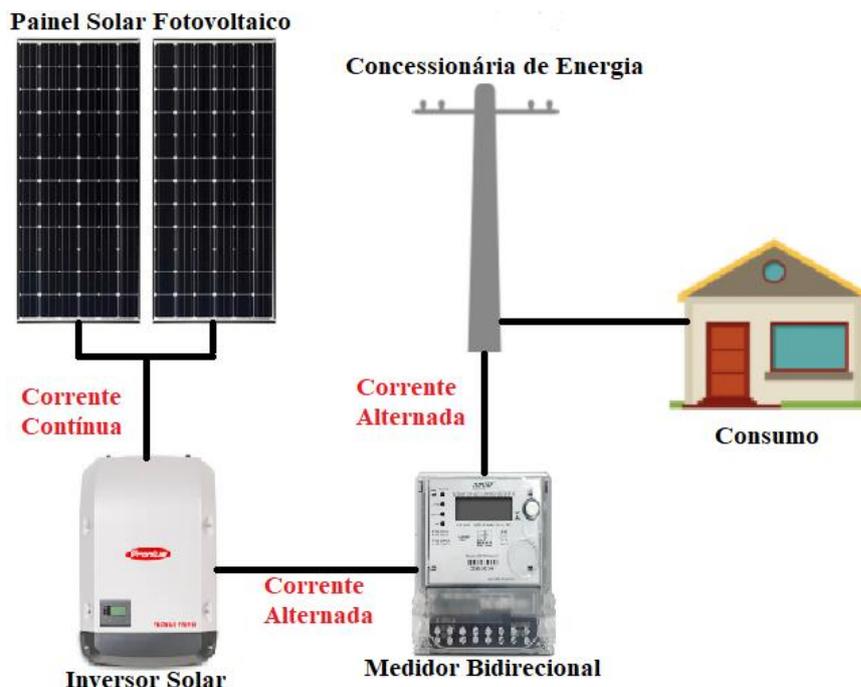
Com base no levantamento do potencial eólico calculado no Item 3.1, foi obtido a energia gerada por cada aerogerador, e a partir da demanda do pavilhão de aulas, 6.310,8 kWh ao mês, foram necessários 20.940 aerogeradores do modelo FX-400, totalizando um investimento para implantação com a compra deste modelo de R\$109.246.074,00, ressaltando que os impostos de importação não foi levando em consideração.

Já para o levantamento de geração solar no Item 3.2, o sistema de 50,4 kWp possui 112 módulos de 450W cada além de outros aparelhos necessários para o sistema, como os inversores, tendo um custo total à vista de R\$176.848,81, além do fato de que esse sistema gera 80.508 kWh ao ano de energia, gerando energia a mais do que o pavilhão de aulas necessita, que é de 75.729,6, sendo esse excedente injetado na rede elétrica da CEMIG, podendo ser abatido no valor restante para o restante que é consumido em toda Universidade.

Levando em consideração ambos os sistemas, conclui-se que o sistema de geração solar é o projeto mais viável para implantação na UFLA, visto que este gera energia suficiente para suprir a demanda do pavilhão de aulas e possui um custo de instalação menor que o sistema eólico, isso sem levar em consideração o custo de O&M, que para a energia solar tem um custo menor quando comparado ao sistema eólico por ser um sistema menos complexo.

A Figura 7 representa o esquema no qual o sistema solar é ligado, desde a geração elétrica no painel solar fotovoltaico até a distribuição para a rede e o consumo.

Figura 7: Representação da ligação do sistema solar



O local de instalação do sistema solar foi escolhido foi o estacionamento do Complexo de Engenharia da Universidade, visto que esse estacionamento possui uma ampla área que possa ser utilizada, e devido ao fato de haver muitos veículos estacionados todos os dias, o próprio painel fotovoltaico funcionaria como uma cobertura para os carros, e o local está próximo a uma rede de distribuição elétrica e não há nenhum obstáculo ao redor, como altos prédios ou árvores que podem ocasionar sombra em todos painéis, afetando a geração elétrica. A Figura 8 mostra o local de instalação em questão, e a Figura 9 mostra a área total desse estacionamento, sendo 4.620,02 m², atendendo a área máxima que é necessária para instalação, que é de aproximadamente 500 m².

Figura 8: Local para instalação da usina solar



Fonte: (GOOGLE EARTH, 2021).

Figura 9: Área do estacionamento para projeto



Fonte: (GOOGLE EARTH, 2021).

Para um melhor aproveitamento da radiação solar, os painéis solares fotovoltaicos devem estar orientados com a face voltada para o Norte, além disso, estes devem ser montados com uma inclinação igual a Latitude do local, sendo a Latitude da região da Lavras de 21° , logo os módulos fotovoltaicos devem ser instalados com a face orientada para o Norte com inclinação de 21° .

3.5 Viabilidade Econômica do Sistema Solar

Para o cálculo da viabilidade do sistema solar, é necessário estabelecer alguns parâmetros para realizar os cálculos necessários. A taxa de juros utilizada foi a taxa atual no país, sendo 6,25% ao ano, o valor da eletricidade obtida pela CEMIG (2021) foi de R\$0,69504448 por cada kWh, o custo de manutenção e operação (O&M) para energia solar é de R\$52,00 para cada kWp ao ano segundo o Plano Nacional de Energia 2050 (2021), e a durabilidade do sistema que será instalado na Universidade é de 25 anos conforme o catálogo do fabricante.

Posteriormente, com os parâmetros estabelecidos, foi cálculo o Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), Payback simples e o Custo Nivelado de Energia (LCOE) com auxílio do Microsoft Excel. O retorno obtido (VPL) obtido foi de R\$489.061,60, com uma taxa de retorno (TIR) de 30,12%, Payback de 3,32 anos, ou seja, levaria pouco mais de 3 anos para ter o retorno do valor investido e o LCOE de R\$0,21, que é o valor mínimo pelo qual deve ser vendida cada kWh para que o VPL seja igual a zero, para que pelo menos tenha um retorno financeiro igual ao valor que foi investido, para que não haja prejuízo com o projeto.

4 CONCLUSÃO

No presente trabalho de conclusão de curso foi realizada a análise da viabilidade técnica e econômica para implantação de um sistema de geração eólica e/ou solar para atender a demanda energética de um pavilhão de aulas da Universidade Federal de Lavras.

O estudo do potencial eólico mostrou que a velocidade de vento com maior frequência de ocorrência é baixa (colocar o valor de velocidade e a frequência dela), e os resultados da geração eólica mostrou que a região não possui um bom potencial de geração eólica, enquanto para a geração solar a região possui bons valores de radiação solar, tendo um grande potencial para instalação de uma usina fotovoltaica. A partir dos cálculos realizados e da análise de viabilidade econômica, foi possível concluir que o tipo de usina mais viável é a solar, não havendo geração eólica devido aos baixos valores de velocidade de vento, mostrando de acordo com o VPL e o LCOE o quanto a geração eólica é inviável financeiramente, onde não é possível obter retorno financeiro dentro da vida útil do projeto. o projeto de uma usina solar, apresentou um retorno financeiro de R\$489.061,60, TIR de 30,12%, valor bem maior que a taxa atual de juros, payback de 3,32 anos, possuindo o retorno do valor investido em pouco mais de 3 anos, sendo um tempo bem curto comparado a vida útil do sistema de 25 anos, além de um custo nivelado de energia de R\$0,21, ou seja, para que pelo menos o valor investido seja recuperado, a energia deveria ser vendida por R\$0,21, valor bem abaixo do que é praticado no mercado atualmente, tendo uma segurança para implantação do projeto.

Do presente trabalho de conclusão de curso fica como sugestão para trabalho futuro a necessidade de um estudo para utilização de energia eólica considerando alturas acima de 10 metros, onde as distribuições de vento são melhores, outros tipos de aerogeradores disponíveis no mercado para utilização nestas regiões de velocidades baixas de vento e, até mesmo, o projeto de aerogeradores para operar com velocidades baixas de vento.

5 REFERÊNCIAS

ADARAMOLA, M. S.; PAUL, S. S. Analysis of wind speed data and wind energy potential in three selected locations in south-east Nigeria. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, v. 3, n. 1, p. 1-11, 2012.

ADEJUMOBI, I. A.; OYAGBINRIN, S. G.; AKINBORO, M. B.; OLAJIDE, M. B.; STATE, O. Hybrid solar and wind power: an essential for information communication technology infrastructure and people in rural communities. *IJRRAS*, 9(1), 130-138.

AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA, disponível em < <https://iea-pvps.org/> > Acesso em 20/08/2021.

ANÁLISE DA GERAÇÃO EÓLICA NA MATRIZ BRASILEIRA DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em: < https://www.researchgate.net/figure/Figura-8-Complementaridadesolar-e-eolica-diariamente-melhor-hipotese11_fig1_267212574 > Acesso: 20/05/2021.

ANEEL, Resolução Normativa no 482, 2012, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2012. Disponível em < <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> > Acesso em 20/08/2021.

ANEEL, Geração Distribuída Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em < <https://app.powerbi.com/view?r%4eyJrIjoiZjM4NjM0OWYtN2IwZS00YjViLTllMjItN2E5MzBkN2ZlMzVkIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9> > Acesso em 20/10/2021.

ANTÓNIO, A.; FERREIRA, D. A. Sistema de produção de energia eólica. p. 160, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEÓLICA) 2018. < <http://abeeolica.org.br> > Acesso em 22/08/2021.

ATLAS EÓLICO BAHIA, disponível em < http://www2.secti.ba.gov.br/atlasWEB/apendice_p3.html#:~:text=1%20Distribuições%20de%20Weibull%20e, valores%20bastante%20superiores%20a%202.&text=A%20Tabela%20C.,para%20diversos%20valores%20de%20k > Acesso em 25/01/2021.

BASILE, A.; GHASEMZADEH, K.; FIGOLI, A. Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes: Renewable Energy Integrated with Membrane Operations, 893p, 2018.

BAJPAI, P.; DASH, V. Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, n. 5, p. 2926-2939, 2012.

BENDATO, L. I.; CASSETTARI, R.; MOSCA, E.; WILLIAMS, M. M. A stochastic methodology to evaluate the optimal multi-site investment solution for photovoltaic plants. Journal of Cleaner Production, v. 151, p. 526-536, 2017.

CEMIG, disponível em < <https://www.cemig.com.br/atendimento/valores-de-tarifas-e-servicos/> > Acesso em 22/08/2021.

CHOW, T. T. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. Applied energy, v. 87, n. 2, p. 365-379, 2010.

CLEAN ENERGY REVIEWS, disponível em < <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/2014/5/4/how-solar-works> > Acesso em 25/09/2021.

DANESHAZARIAN, R.; CUCE, P. M.; SHER, F. Concentrating photovoltaic thermal (CPVT) collectors and systems: Theory, performance assessment and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 81, p. 473-492, 2018.

DAUT, I, IEWANTO, M, IRWAN, Y. M, GOMESH, N, AHMAD, N. S. Potential of solar radiation and wind speed for photovoltaic and wind power hybrid generation in Perlis, Northern Malaysia. In: 2011 5th International Power Engineering and Optimization Conference. IEEE, 2011. p. 148-153.

DHERE, N. G. The development of solar photovoltaic energy in Brazil. Solar cells, v. 26, n. 1-2, p. 13-23, 1989.

DHERE, N. G.; CRUZ, L. R.; LOBO, P. C.; BRANDO, J. R. T.; RUTHER, R.; LIMA, J. H. G.; ZANESCO, I. History of solar energy research in Brazil. In: Proceedings of ISES 2005 Solar World Congress. 2005. p. 1-6.

DIDANE, D. H. et al. Evaluation of wind energy potential as a power generation source in Chad. International Journal of Rotating Machinery, v. 2017, 2017.

EPE, Projeções da demanda de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional 2014 -2018, Empresa Pesquisa Energética, 2014, disponível em < <http://www.epe.gov.br> > Acesso em 22/08/2021.

EPE. "Nota Técnica DEA 19/15 - Projeção Da Demanda De Energia Elétrica Para Os Próximos Cinco Anos (2016-2020)". Empresa de Pesquisa Energética, 2015b. Rio de Janeiro.

FONTES, R. Energia Solar Barata: Verdade ou Mentira? As Informações Que Você Precisa Saber + Um Simulador Para Sua Casa ou Empresa. Blue Sol Energia Solar, 2019. Disponível em: < <https://blog.bluesol.com.br/energia-solar-barata/> > Acesso em 20/05/2021.

GELER, H.; SCHAEFFER, R.; SZKLO, A.; TOLMASQUIM, M. Policies for advancing energy efficiency and renewable energy use in Brazil. Energy Policy, v. 32, n. 12, p. 1437-1450, 2004.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC) 2017. Disponível em < http://gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2017_EN-003_FINAL.pdf > Acesso em 22/08/2021.

HABASH, R. W. Y. et al. Performance of a contrarotating small wind energy converter. International Scholarly Research Notices, v. 2011, 2011.

HAWAWINI, C. V. G. Finanças para Executivos: Gestão para criação de valor. São Paulo, 2019

ISLAM, M. R.; SAIDUR, R.; RAHIM, N. A. Assessment of wind energy potentiality at Kudat and Labuan, Malaysia using Weibull distribution function. Energy, v. 36, n. 2, p. 985–992, 2011.

BORUNDA, M. et al. Technical assessment of small-scale wind power for residential use in Mexico: A Bayesian intelligence approach. PloS one, v. 15, n. 3, p. e0230122, 2020.

JOHARI, M. K.; JALIL, M. A. A.; SHARIFF, M. F. M. Comparison of horizontal axis wind turbine (HAWT) and vertical axis wind turbine (VAWT). *International Journal of Engineering and Technology*, v. 7, n. 4.13, p. 74-80, 2018.

KABIR, E.; KUMAR, P.; ADELODUN, A. A.; KIM, K. H. Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 894-900, 2018.

KHANDAKAR, A.; KASHEM, S. B. A. Feasibility study of Horizontal-Axis Wind Turbine. *International Journal of Technology*, Volume1,(2), p. 140-164, 2020.

KANNAN, N.; VAKEESAN D. Solar energy for future world:-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 62, p. 1092-1105, 2016.

LAWAN, S. M.; ABIDIN, W. A. W. Z. A Review of hybrid renewable energy systems based on wind and solar energy: modeling, design and optimization. *Wind Solar Hybrid Renewable Energy System*, 2020.

LEUNG D. Y. C.; YANG Y. Wind energy development and its environmental impact: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 1, p. 1031-1039, 2012.

LIMA, M. S. de et al. Sistema híbrido eólico e solar off grid. *Revista Inovação, Tecnologia e Sustentabilidade na Engenharia Elétrica*. Bebedouro, p. 180-202, 2018.

LUCENA, J. A Y.; AZEVEDO LUCENA, K. A. Wind energy in Brazil: an overview and perspectives under the triple bottom line. *Clean Energy*, v. 3, n. 2, p. 69-84, 2019.

MACIEL, W. J. O futuro sol. *Ciência hoje das crianças*, ano 8, nº 46, São Paulo, 1995.

MAHMOOD, F. H.; RESEN, A. K.; KHAMEES, A. B. Wind characteristic analysis based on Weibull distribution of Al-Salman site, Iraq. *Energy reports*, v. 6, p. 79-87, 2020.

MAT, S.; OTHMAN, M. Y.; ZAHARIM, A.; SOPIAN, K. Recent advances in energy & environment: proceedings of the 7th WSEAS International Conference on energy & environment (EE'09). Cambridge, UK: WSEAS; 24-26 February 2009. pp. 246-250.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Disponível em < http://www.mma.gov.br/images/arquivos/clima/convencao/indc/BRAZIL_iNDC_english.pdf > Acesso em 22/08/2021.

MODI, A.; BUHLER, F.; ANDREASEN, J. G.; HAGLIND, F. A review of solar energy based heat and power generation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 67, p. 1047-1064, 2017.

OLIVEIRA, A. S. DE. Modalidades e procedimentos simplificados do mecanismo de desenvolvimento limpo e a eletrificação residencial rural baseada em projetos de geração de energia renovável em pequena escala. *Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural*, 2002.

PEREIRA, R. B. S.; TUTIDA, V. U. C. Proposta de perfis aerodinâmicos para aerogeradores em baixas velocidades; 2015.

PINHO, J. T. et al. Sistemas híbridos. Brasília: Ministério de Minas e Energias, 2008.

PISHGAR-KOMLEH, S. H.; KEYHANI, A.; SEFEEDPARI, P. Wind speed and power density analysis based on Weibull and Rayleigh distributions (a case study : Firouzkooch county of Iran) \$. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 42, p. 313–322, 2015.

PLANO NACIONAL DE ENERGIA 2050, disponível em < <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/PNE%202050%20-%20Anexo.pdf> > Acesso em 24/10/2021.

PORTAL UFLA, disponível em < <https://ufla.br/noticias/institucional/12589-green-metric-2018-ufla-mantem-destaque-como-universidade-sustentavel> > Acesso em 20/10/2021.

PVWatts , disponível em < <https://pvwatts.nrel.gov/index.php> > Acesso em 22/08/2021.

REZAEIHA, A.; MONTAZERI, H.; BLOCKEN, B. Characterization of aerodynamic performance of vertical axis wind turbines: impact of operational parameters. *Energy Conversion and Management*, v. 169, p. 45-77, 2018.

RIAHI, A.; BEN HAJ ALI, A.; FADHEL, A.; GUIZANI, A.; BALGHOUTHY, M. Performance investigation of a concentrating photovoltaic thermal hybrid solar system combined with thermoelectric generators. *Energy Conversion and Management*, v. 205, p. 112377, 2020.

RIBEIRO, A. E. D.; AROUCA, M. C.; COELHO, D. M. Electric energy generation from small-scale solar and wind power in Brazil: The influence of location, area and shape. *Renewable Energy*, v. 85, p. 554-563, 2016.

RICARDO, G.; MACHADO, I. C. L.; ZEM, V. R. H. Estudo da complementariedade entre as fontes eólica e solar fotovoltaica na matriz elétrica do estado do Paraná. 2015. 138 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

RIGO, Paula D. et al. Is the success of small-scale photovoltaic solar energy generation achievable in Brazil? *Journal of Cleaner Production*, v. 240, p. 118243, 2019.

ROCKENBACH, G. C. D.; SILVA, L. L.; MELLO, T. A. Proposta de geração híbrida eólico/solar on-grid no setor de avicultura na região de Dourados-MS. 2018. 92 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

RODRIGUES, X. S.; CHEN, F.; MORGADO-DIAS. Economic analysis of photovoltaic systems for the residential market under China's new regulation. *Energy Policy*, v. 101, p. 467-472, 2017.

SHAHSAVARI, A.; AKBARI, M. Potential of solar energy in developing countries for reducing energy-related emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 90, p. 275-291, 2018.

SILVA, E. R. R. G. "Projeto De Uma Turbina Eólica De Eixo Horizontal". Projeto apresentado para obtenção do título de Engenheiro, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

SILVA, L. C. L. da. Projeto de um Caracterizador Automático de Curvas para Painéis Fotovoltaicos Utilizando Sistema de Aquisição de Dados Assistido por Supervisório. 2019. 137 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) Curso de Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Itumbiara, 2019.

SINGH G. K. Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review. *Energy*, v. 53, p. 1-13, 2013.

SOLARIZAR, disponível em < <https://www.solarizar.com.br/wp-content/uploads/2017/06/Prepare-a-sua-contrução-para-a-instalação-de-energia-solar2.pdf> > Acesso em 24/10/2021.

SOLIENS. Entenda o que é sistema solar híbrido.

TAO, A. J.; FINENKO. Moving beyond LCOE: impact of various financing methods on PV profitability for SIDS. *Energy Policy*, v. 98, p. 749-758, 2016.

THEVENARD, S. D.; PELLAND. Estimating the uncertainty in long-term photovoltaic yield predictions. *Solar energy*, v. 91, p. 432-445, 2013.

TOLMASQUIM, M. T. Renewable energy, hydro, biomass, wind, solar, oceanic. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE); 2016.

UFLA. Eco Universidade: Plano Ambiental para uma universidade socioambientalmente correta. p. 13, 2009.

URBANETZ, I. V.; MOURA NETTO, A. DE; SCOLARI, B.; LEITE, V.; URBANETZ, J. Current Panorama and 2025 Scenario of Photovoltaic Solar Energy in Brazil. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 62, 2019.

WEG. Gestão eficiente da energia elétrica, 2017.

WESSIER D. A. A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. *Energy*, v. 32, n. 9, p. 1543-1559, 2007.

WIZELIUS T. Developing Wind Power Projects: Theory and Practice, 1st edn. London: Routledge, 2015.

ZÚÑIGA, G. C. R. “Proposta De Regulamentação Para Usinas Eólicas Através Da Sua Energia Firme”. Dissertação para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.