



Ozéias Andrei Quitaiski

**PROPOSIÇÃO DE UM SISTEMA DE RASTREAMENTO SOLAR PARA USINAS
FOTOVOLTÁICAS**

Horizontina-RS

2021

Ozéias Andrei Quitaiski

**PROPOSIÇÃO DE UM SISTEMA DE RASTREAMENTO SOLAR PARA USINAS
FOTOVOLTÁICAS**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Controle e Automação da Faculdade Horizontina, sob orientação do professor Fauzi de Moraes Shubeita, Dr.

Horizontina-RS

2021

RESUMO

Uma das formas de cuidar do planeta é aproveitando o máximo os recursos, sem desperdiçá-los. Quando se pensa em aproveitar a energia solar, busca-se o maior rendimento possível em kwh que um determinado sistema possa oferecer. E este rendimento está limitado, principalmente, a potência watt-pico que os painéis solares fornecem, e às horas de geração que as células fotovoltaicas estão expostas à máxima irradiação, com o fim de aproveitar o maior rendimento de absorção e geração de energia durante o dia. Pensando em aproveitar o máximo de energia que uma célula fotovoltaica possa absorver, buscou-se desenvolver um protótipo que possa reposicionar os módulos fotovoltaicos com a face o mais perpendicular aos raios solares possível, à medida que o sol vai alterando a posição com relação à quem observa da terra durante o dia. Também buscou-se estudar qual a configuração que pode oferecer o maior rendimento, permitindo otimizar o uso desses materiais, contribuindo também para um mundo mais sustentável. Observou-se que com *tracker* é possível aumentar ganho de energia conforme aumenta o distanciamento entre os módulos, onde alcançamos a marca de 4,65% a mais que um sistema estático com 15% de distanciamento entre os módulos, e 31,7% a mais com distanciamento de 250% entre as fileiras de módulos. E que um sistema com um eixo de rotação inclinado a 27 graus ao Norte, oferece um rendimento de energia muito próximo de um sistema com dois eixos, que alcançou cerca de 40% a mais de energia comparando este com um sistema estático.

Palavras-chave: Fotovoltaica, Irradiação solar, Watt-pico, *Tracker*.

ABSTRACT

One of the ways to take care of the planet is to make the most of resources, without wasting them. When thinking about taking advantage of solar energy, one seeks the highest possible yield in kWh that a given system can offer. And this performance is mainly limited to the watt-peak power that the solar panels provide and the hours of generation that the photovoltaic cells are exposed to maximum irradiation in order to take advantage of the highest energy absorption and generation efficiency during the day. Thinking about making the most of the energy that a photovoltaic cell can absorb, we sought to develop a prototype that could reposition the photovoltaic modules with the face as perpendicular to the sun's rays as possible, as the sun changes its position in relation to whoever observes from the ground during the day. We also sought to study which configuration can offer the highest yield, allowing us to optimize the use of these materials, also contributing to a more sustainable world. It was observed that it is possible to increase energy gain than a system with tracker, as the distance between modules increases, where we reach the mark of 4.65% more than a static system with 15% distance between modules, and 31.7% more with a distance of 250% between the rows of modules. And that a system with an axis of rotation inclined 27 degrees to the North, can offer an energy efficiency very close to a system with two axes, which reached about 40% more energy comparing this with a static system.

Keywords: Photovoltaic, Solar irradiation, Watt-peak, Tracker.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comparação de usinas estáticas com usinas com tracker	19
Figura 2: Painéis com espaçamento de 15%.....	222
Figura 3: Painéis com espaçamento de 150% e respectivo sombreamento às 7 horas no dia 06 de dezembro.....	233
Figura 4: Exibição dos ângulos solares no software PV*Sol as 8 horas no dia 06 de dezembro	24
Figura 5: Imagem da maquete (parte posterior)	266
Figura 6: Imagem da maquete (parte frontal)	26
Figura 7: Imagem do protótipo criado	299
Figura 8: Projeto eletrônico (protótipo).....	299
Figura 9 Esquema de posicionamento dos sensores LDR no protótipo	30
Figura 10:Esquema do circuito em malha fechada.....	311
Figura 11: Imagem do software PV*Sol.....	388
Figura 12: Projeto de painéis com dois eixos (verão).....	433
Figura 13: Projeto de painéis com dois eixos (inverno)	455

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ângulos solares nos horários do estudo	25
Tabela 2: Comparação dias de maior geração próximo ao solst. de verão	32
Tabela 3: Comparação dias de maior geração próximo ao solst. de inverno .	32

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Geração nos dias 21 e 22 de dezembro	3333
Gráfico 2: Geração no dia 06 de dezembro	3333
Gráfico 3: Geração nos dias 12 e 13 de junho.....	34
Gráfico 4: Geração no dia 08 de julho	34
Gráfico 5: Diferença de simulação comparando os dados de um dia completo com dados de meio dia de simulação	36
Gráfico 6: Comparação da geração do cálculo com o simulador (ano todo) .	37
Gráfico 7: Geração de energia com espaçamento de 25% verão	39
Gráfico 8 : Geração de energia com espaçamento de 25% inverno.....	39
Gráfico 9: Geração de energia com espaçamento de 150% verão	40
Gráfico 10: Geração de energia com espaçamento de 150% inverno.....	40
Gráfico 11: Rendimento x espaçamento.....	41
Gráfico 12: Tracker a 150% de dist. com diferentes inclinações Norte.....	42
Gráfico 13: Resultado da geração com dois eixos de inclinação (verão)	44
Gráfico 14: Resultado da geração com dois eixos de inclinação (inverno)	46
Gráfico 15: Comparação do ganho de energia do <i>tracker</i> com usina estática	Erro! Indicador não definido.

LISTA DE SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
FAHOR	Faculdade Horizontina
IDE	Integrated Development Environment
Kwh	Quilowatt-hora
k Ω	Quilohoms
LDR	Sensor LDR
W	Watt
Wh	Watt-hora
Wp	Watt-pico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 TEMA	12
1.2 PROBLEMA DE PESQUISA	12
1.3 HIPÓTESES	13
1.4 OBJETIVOS	14
1.4.1 Objetivo geral	14
1.4.2 Objetivos específicos.....	14
1.5 JUSTIFICATIVA	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 FATORES PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA SOLAR.....	16
2.2 SISTEMAS DE RASTREAMENTO SOLAR	17
2.3 TRACKING.....	18
3 METODOLOGIA	20
3.2 RECURSOS NECESSÁRIOS	20
3.2.1 Software PV*Sol 2022.....	21
3.2.2 Microsoft Excel 2019.....	25
3.2.3 Solid Works.....	26
3.2.4 Protótipo	27
3.2.4.1 Circuito Eletrônico	28
3.2.4.2 Programação	31
3.3 Escolha das datas	31
4 RESULTADOS	35
4.1 DIFEERENÇA DOS VALORES DO CÁLCULO DE MEIO DIA COMPARADOS COM O CÁLCULO DE UM DIA COMPLETO.....	35
4.2 DIFEERENÇA DOS VALORES DO CÁLCULO DE MEIO DIA COMPARADOS COM O CÁLCULO DE UM ANO COMPLETO	37
4.3 DISTANCIAMENTOS	3842
4.4 TRACKER COM UM EIXO INCLINADO	4142
4.2 TRACKER COM DOIS EIXOS DE INCLINAÇÃO	4242
5 RESULTADOS	47
6 CONCLUSÃO	48
REFERÊNCIAS	50
APENDICES	Erro! Indicador não definido.

1 INTRODUÇÃO

A possibilidade de usar a energia proveniente do sol através de painéis fotovoltaicos é algo que já revolucionou o mercado de energia elétrica no mundo. E quando se trata de investir em um sistema de geração própria, sempre se pensa em se ter o maior rendimento possível, aproveitando ao máximo o investimento.

O rendimento dos painéis fotovoltaicos (whats/metro) evoluiu 41% nos últimos 25 anos (Demarco, 2019). Mas ainda existe o fato de o quanto mais perpendicular à face dos painéis for a direção dos raios solares, maior será a geração de energia daquele painel, limitando-se à potência (wp) daquele painel. Assim sendo, nos sistemas estáticos, busca-se instalar os painéis fotovoltaicos com a face o mais direcionadas possível para o sol do meio-dia, pois geralmente é neste horário que a incidência de irradiação solar é maior. E dessa maneira é neste horário ou próximo dele que se tem o pico de geração de energia diário nos sistemas de geração fotovoltaicos estáticos.

Com o objetivo de aproveitar o máximo de energia que os painéis possam captar do sol durante o dia todo, esse trabalho propõe a implementação de uma usina solar fotovoltaica com sistema de rastreamento solar, onde se consiga avaliar quais distancias entre as fileiras de módulos oferecem maior rendimento de energia. Assim como comparar diferentes tipos de configuração de *tracker* solar, buscando observar o ganho que cada um deles proporciona.

Isso permitirá obter dados a fim de calcular se um maior distanciamento entre os módulos poderia oferecer um maior rendimento, a ponto de justificar o investimento em uma usina solar com tal tecnologia. Outra comparação que se pode fazer é com um sistema estático, que requer baixíssima manutenção ao longo da sua vida útil, se este poderia gerar a energia que um sistema com *tracker* fornece, se o vão livre que o *tracker* requer for preenchido com painéis estáticos.

1.1 TEMA

Sistema de rastreamento solar para usina fotovoltaica.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O principal objetivo deste trabalho visa avaliar o rendimento energético em supostos distanciamentos das fileiras de painéis solares em usinas fotovoltaicas em

configurações de inclinações diferenciadas. Buscou-se obter dados a fim de decidir qual o distanciamento e configuração entre os painéis que pode atender a certa demanda de energia quando se trata de investir em uma usina fotovoltaica com sistema *tracker*. Foi considerado uma usina solar virtual com máxima irradiação de inverno e verão, na cidade de Horizontina, Rio Grande do Sul. Não se aprofundando em tipos de mecanismos e hardwares que possam executar essas tarefas, pois os valores desses podem variar consideravelmente.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

Conforme Toniazco (2019), um sistema fotovoltaico com rastreador solar consegue oferecer um ganho, que pode alcançar quase 45% a mais de eficiência gerada quando comparado com um sistema estático com a mesma quantidade de painéis solares.

Porém é também perceptível que, quando se tem uma usina com mais de uma fileira de módulos de painéis, a instalação de um sistema com rastreamento solar requer uma distância entre as fileiras, para que se possa ter a maior inclinação possível sem que se projete sombra sobre os painéis que estão na parte posterior. No caso de uma usina com painéis estáticos, não há necessidade de se deixar esse espaço, de forma que ele poderia ser praticamente todo aproveitável.

Além disso, existe o fato que na instalação de painéis com sistema de rastreamento, necessita-se um investimento mais elevado que um sistema fixo com mesmo número de painéis, ele também gera mais manutenção preditiva, e o fato de que um sistema desses é mais frágil quando comparado a um sistema estático.

Certamente há uma proporção de distanciamento entre as fileiras dos painéis solares que pode oferecer um rendimento que justifique adquirir menor número de painéis, para instalar com um sistema *tracker*. Para assim alcançar o maior ganho de energia com menor desperdício de materiais e consequentemente valores investidos.

Então fica a questão: qual seria o distanciamento e configuração de inclinação nos módulos que fornece o rendimento de energia que justifique o investimento em um sistema *tracker*?

1.3 HIPÓTESES

a. O investimento inicial superior de um sistema de geração de energia fotovoltaica com rastreamento comparado um sistema estático pode ser compensado

pelo ganho de energia, que segundo Toniazzo (2019), pode chegar a quase 45% a mais que em um sistema estático.

b. Para se alcançar o máximo ganho no sistema de rastreamento solar é necessário uma configuração e espaçamento que começa a ser desvantagem quando comparado com o que um sistema estático poderia oferecer na mesma área.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

Verificar qual a melhor configuração e distanciamento entre as fileiras dos módulos, para instalação desse tipo de sistema. Pois quanto mais as placas inclinarem-se para permanecer com a face perpendicular aos raios do sol, em horários que o sol está mais baixo na linha do horizonte, maior deverá ser o espaçamento entre as colunas para que não se projete sombra nos painéis que ficam na parte posterior.

Observar quais dos sistemas se torna mais vantajoso de se utilizar em situações que se permite instalar os dois tipos de sistemas.

1.4.2 Objetivos específicos

- a) Fazer uma revisão bibliográfica sobre o tema
- b) Simular testes para avaliação de rendimento com pelo menos 3 diferentes distâncias entre os módulos de maneira a buscar o maior rendimento possível.
- c) Avaliação do ganho que se tem com um sistema *tracker* com um eixo de rotação e comparar com o ganho que se teria em instalar um sistema *tracker* com dois eixos de rotação com um sistema estático na mesma área.
- d) Desenvolver um protótipo que simule o funcionamento de uma usina com *tracker* com o rendimento que melhor justifique o investimento.
- e) Documentar e apresentar os resultados

1.5 JUSTIFICATIVA

Comparando um sistema de geração de energia fotovoltaica com rastreamento solar com um sistema estático, é indiscutível que o sistema com rastreamento solar tem custo de instalação maior do que um sistema estático. Mas como há possibilidade

de aumentar significativamente o rendimento de um sistema desses, e essa tecnologia ainda não é muito difundida, foi desenvolvido este trabalho.

Com este estudo, buscou-se projetar um sistema com rastreamento de baixo custo, com o objetivo principal de avaliar o rendimento dele em diferentes distâncias de separação entre os módulos. Buscando assim a configuração que oferece o maior rendimento de energia no menor espaço possível. E assim ter dados para comparar se o ganho com um sistema desses é algo que justifique o investimento.

A correta avaliação do distanciamento se deve ao fato de que quanto mais os painéis inclinarem-se para permanecer com a face perpendicular aos raios do sol, em horários que o sol está mais baixo na linha do horizonte, maior deverá ser o espaçamento entre as fileiras de painéis para que não se projete sombra nos painéis que ficam na parte posterior.

Mas este distanciamento também tem um custo, que pode variar de acordo com fatores como: os tipos de mecanismos que serão usados no sistema *tracker*, e custo da área onde será instalado o sistema. Assim justifica-se este estudo para buscar encontrar dados que possam avaliar se uma usina com tracker é algo viável, ou qual a configuração que justifique usá-la.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O aumento da demanda energética global tem feito com que se procure cada vez mais novos métodos de geração de energia, principalmente por energia renovável, devido à preocupação com o aquecimento global. Nesse cenário, a produção de energia via incidência solar, através de placas fotovoltaicas, cumpre seu papel como uma opção de produção energética limpa, viável e barata (ORTIZ et al., 2018).

2.1 FATORES PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA SOLAR

Os principais fatores levados em conta na produção de energia fotovoltaica são a quantidade, a qualidade e o tamanho das placas fotovoltaicas. Além disso, para melhorar a eficiência desse sistema é necessário adequá-lo, da melhor forma possível, à captação solar fazendo com que a incidência dos raios solares seja o mais perpendicular possível ao painel fotovoltaico. (FARIA DUARTE, 2019).

O Sol, observado a partir da Terra, movimenta-se do sentido Leste para Oeste, com variações durante o ano, e esse deslocamento é a base para os mecanismos de rastreamento solar (RIBEIRO, PRADO, GONÇALVES, 2012). O ângulo de incidência da radiação solar varia de -90° ao nascer do sol, passe por 0° ao meio-dia, e chegue a 90° no pôr do sol, podendo ser maior ou menor dependendo do azimute da terra. Isso faz com que as radiações solares sejam máximas a cada dia durante o horário próximo do meio-dia.

Para ORTIZ et al. (2018), esta variação faz com que o painel solar fixo desperdice cerca de 40% da energia coletada. O conhecimento da trajetória do Sol durante o dia, nas quatro estações do ano, permite o devido posicionamento de sensores do sistema de rastreamento para redirecioná-lo de forma a absorver o máximo da incidência de radiação solar possível. (RIBEIRO, PRADO, GONÇALVES, 2012).

Uma das principais barreiras que impedem maior difusão da tecnologia da geração de energia solar são as baixas eficiências que as placas solares comercialmente disponíveis possuem. As placas solares mais eficientes no mercado possuem um índice em torno de 22%. Uma forma de melhorar a eficiência desse sistema é adequá-lo, da melhor forma possível, à captação solar fazendo com que a incidência dos raios solares seja o mais perpendicular possível ao painel fotovoltaico.

(FARIA DUARTE, 2019). Comparados com sistemas fixos, os sistemas com seguidores solares convertem mais energia, devido ao aumento da exposição direta aos raios solares, fazendo com que se consiga um ganho de eficiência que pode chegar a 45% (Portal solar, 2021).

Conforme Faria Duarte (2019), há diversos fatores que fazem com que a energia elétrica produzida por uma célula solar estática, durante o ano, não seja aproveitada ao máximo, como por exemplo: as variações na intensidade da insolação durante o dia, a inclinação do eixo de rotação da terra em relação ao sol, e a distância entre a Terra e o Sol. O uso de um rastreamento solar pode vir a reduzir esse problema, pois aumenta significativamente a perpendicularidade entre a superfície receptora de energia e a radiação solar incidente durante o dia, aumentando assim sua eficiência.

2.2 SISTEMAS DE RASTREAMENTO SOLAR

Um dos principais problemas do sistema com rastreamento é o custo para sua implementação, devido principalmente à utilização de tecnologias mais complexas e um número maior de peças a fim de garantir a mobilidade da estrutura (FARIA DUARTE, 2019).

Para Melo et al. (2020), o seguidor solar, apesar de aumentar a eficiência do sistema, a movimentação dos painéis também acarreta em custos energéticos devido ao acionamento dos motores para movimentação. Portanto, é importante otimizar a frequência de acionamento dos motores de maneira a maximizar o ganho de energia e minimizar o seu consumo.

Segundo Faria Duarte (2019) os rastreadores solares existentes no mercado podem ser de diferentes tipos, sendo classificados de acordo com as tecnologias relacionadas à sua construção. Eles podem ser classificados através do número de eixos rotativos e do tipo de controle utilizado.

Quanto ao número de eixos ele pode ser de eixo único ou de eixo duplo. O rastreador de eixo único faz uso de apenas um eixo rotativo, podendo ser posicionado na horizontal, na vertical ou inclinado. Além disso, sua orientação pode seguir dois sentidos: Norte-Sul ou Leste-Oeste. Já os rastreadores de eixo duplo têm a capacidade de seguir o sol verticalmente e horizontalmente, possuindo assim dois graus de movimento, apresentando uma melhor taxa de conversão de energia pois possibilita o acompanhamento de todos os movimentos solares (ORTIZ, et al, 2018).

Quanto ao tipo de controle, eles podem ser classificados em três níveis diferentes: passivo, eletro-óptico e microprocessado (sem o uso de sensores) (FARIA DUARTE, 2019). Ainda segundo o autor, os de controle passivo trazem um custo menor e precisam menos manutenção devido a não possuir motores nem circuitos eletrônicos. Por outro lado, as estratégias que envolvem o controle eletro-óptico e microprocessado trazem uma eficiência maior ao projeto.

Segundo Loeblein et al. (2013, apud CAIRES, 2014) o planeta Terra se move por um plano fixo ao redor do Sol, e que sua órbita é uma elipse onde o Sol fica situado em um dos lados. O plano elíptico é conhecido como o plano fixo que comporta a órbita terrestre.

De acordo Kreider e Kreith(1981, apud CAIRES, 2014) as estações do ano existem por causa do movimento de translação da Terra, bem como a inclinação do eixo de rotação da Terra perpendicular ao plano elíptico, sendo $23,45^\circ$ o valor máximo do ângulo. Então, conclui-se que o acompanhamento da posição do Sol exige dois eixos, um para acompanhar o movimento diário de rotação enquanto o outro acompanha o movimento anual de translação.

A posição da superfície plana que indica se ela será ou não mais eficiente na captação da energia solar, pois para ser eficiente é necessário que sua posição seja relacionada à incidência dos raios solares. Como o Sol se move ao longo do dia e do ano, para uma melhor captação dessas incidências solares, é importante que a placa fotovoltaica acompanhe esses movimentos.

O equipamento necessário para realizar a movimentação das placas para o acompanhamento das incidências solares é conhecido por Tracker. E seus movimentos dependem não apenas da hora do dia e da época do ano como também da sua localização exata no globo terrestre, dada por ângulos. (DUFFIE e BECKMAN, 2006, apud CAIRES, 2014).

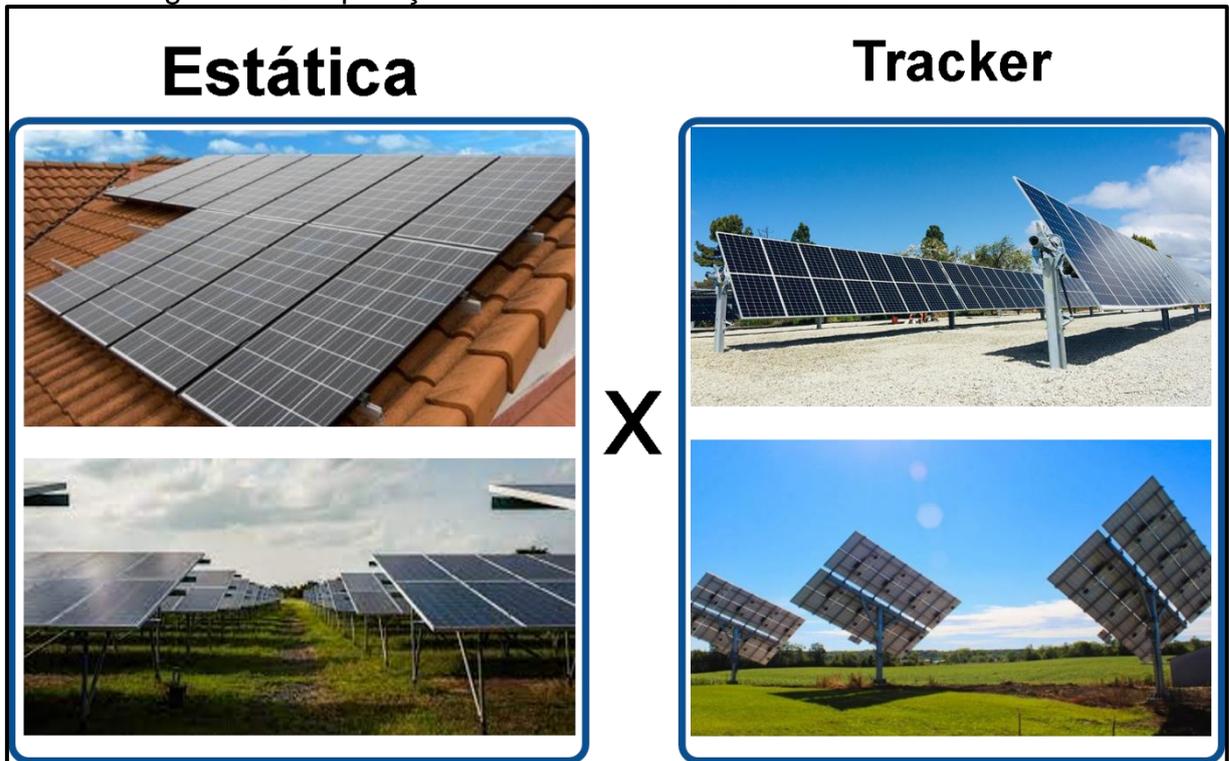
2.3 TRACKING

Tracking é o nome do movimento que a placa faz para seguir o Sol. Com este movimento é possível que a eficiência do coletor das incidências solares seja maior. Como todos os pontos positivos e negativos de cada sistema, a instalação deste método de acompanhamento do movimento relativo do Sol aumenta os ganhos de energia, porém também aumenta consideravelmente os custos de instalação e manutenção do mesmo. Nos projetos de engenharia, o aumento do ganho de

eficiência de coletores solares móveis é considerado importante porque depende da localização geográfica do local (particularmente pela latitude). (LOEBLEIN et al., 2013).

Loeblein et al. (2013) relatou um estudo onde foram medidas as temperaturas médias da água através do uso de placas fixas e móveis expostas à radiação solar ao longo de um dia. O resultado do estudo constatou que as temperaturas do tanque de água que continha a placa móvel foram superiores ao da placa fixa durante a maior parte do tempo de medição, e somente por volta das 14h que a temperatura média das duas placas foi semelhante porque neste horário ambas estavam com aproximadamente o mesmo ângulo azimutal.

Figura 1: Comparação de usinas estáticas com usinas com tracker



Fonte: Elaborado pelo autor (utilizando *software* Power Point), 2021.

3 METODOLOGIA

Conforme Ander-Egg (1978) uma pesquisa é definida como um “procedimento reflexivo sistemático, controlado e crítico, que permite descobrir novos fatos ou dados, relações ou leis, em qualquer campo do conhecimento”. Sendo assim é natural o homem pesquisar de alguma maneira (BARROS; LEHFELD, 1990), buscando reunir informações pertinentes a fim de resolver um problema observado anteriormente.

Este trabalho foi realizado em pesquisa exploratória experimental com objetivo de ter levantamento de dados.

3.1 SIMULAÇÕES REALIZADAS EM MUNICÍPIO DO RIO GRANDE DO SUL

Todos os dados foram obtidos em simulação realizada no município de Horizontina, Rio Grande do Sul. A localização geográfica deste município é de latitude 27°37'33" Sul, e longitude de 54°18'28" Oeste. A altitude é de 343 metros em relação ao nível do mar e a área é de 231,2 km² (GEÓGRAFOS, 2021).

Esses dados podem variar de um município para outro de acordo com a incidência de irradiação do local em que se for criado o projeto de simulação.

3.2 RECURSOS NECESSÁRIOS

Para se ter condições de criar um protótipo com um rendimento satisfatório, executou-se várias simulações via *software*, que forneceram as tabelas de dados de geração de energia para comparar os melhores rendimentos. Esses dados permitiram a criação de gráficos com as informações relevantes para o estudo em questão. Na sequência foi projetado um protótipo que simulasse a ideia de uma usina com tracker.

Os *softwares* utilizados foram:

- a) PVSOL premium 2022
- b) Microsoft Excel 2019
- c) Microsoft Power Point 2019
- d) SolidWorks 2021
- e) Arduino IDE
- f) Proteus Professional 8.6

Para criação do protótipo, foram usados os seguintes materiais:

- g) Arduino UNO
- h) Relés

- i) LEDs
- j) Protoboard
- k) Madeira
- l) Motores CC
- m) Fontes CC
- n) Sucatas metálicas
- o) Cabos de cobre
- p) Fios de nylon
- q) Fita isolante
- r) Lâmpada led
- s) Sensores LDR
- t) Resistores
- u) Parafusos
- v) Pregos
- w) Tinta

3.2.1 Software PV*Sol 2022

Este *software* permite criar projetos 3D para estudo de sombreamento e simulação da geração de energia média em usinas solares de acordo com os registros histórico de radiação solar diários do local que se escolher.

A usina solar a ser estudada precisa ser configurada pelo usuário no *software*, possibilitando definir os modelos de módulos e inversores, bem como outras especificações, de acordo com marcas que já existem no mercado. E até criar os próprios módulos e inversores.

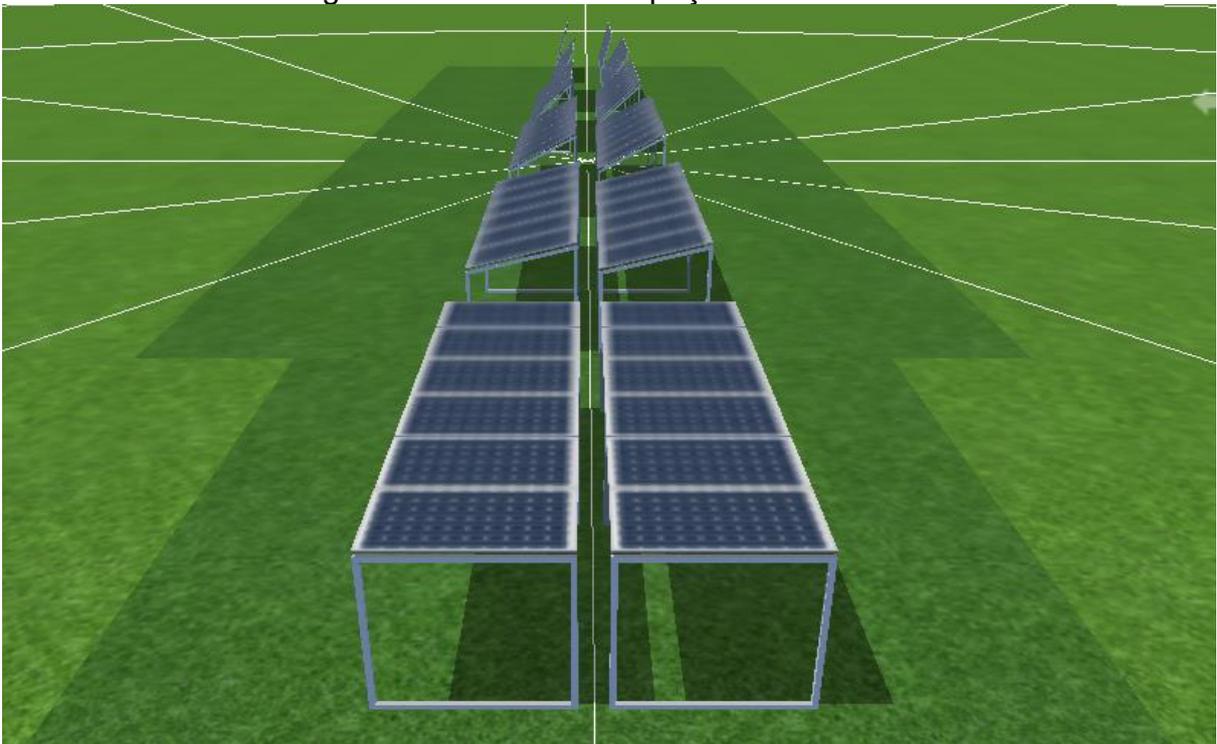
Uma vez definida e criada a usina solar virtual, é possível simular a geração de energia média pelo período de um ano, assim como coletar dados diários da geração específica do inversor, além de várias outras informações que são possíveis através de um relatório detalhado. O próprio *software* faz a simulação de alguns dias nublados e outros dias com insolação alta, definidas pela média histórica do local geográfico que a usina está sendo simulada.

Como o *software* não possibilita criar uma usina virtual com tracker, mas apenas para painéis estáticos, buscou-se criar uma configuração de usina que possa se fazer a leitura como se a usina está seguindo o sol durante o dia.

Foram criadas várias miniusinas, cada uma com uma inclinação diferente específica, de forma que se possa encontrar a inclinação que forneça o maior rendimento de energia a cada horário. E para encontrar a configuração que possibilite o maior rendimento no distanciamento entre os módulos, foram criados diferentes projetos com distanciamentos específicos de 15%, 25%, 35%, 45%, 60%, 75%, 100%, 150% e 250% da medida do módulo como distância entre as fileiras dos módulos quando estes estiverem em posição horizontal. Os módulos foram posicionados de forma que uma usina não projete sombra sobre a outra, e foi usado apenas os módulos que ficam na parte posterior para leitura de potência, buscando-se encontrar uma simulação próxima de uma usina com várias fileiras de painéis.

A Figura 1 mostra as seis miniusinas, organizadas em duas fileiras de seis painéis cada uma, com inclinações nos módulos de 0° (a primeira), 15° , 30° , 45° , 60° e 75° (a última), com espaçamento entre os módulos em 15% da medida dos módulos quando esses estiverem na posição horizontal 0 graus.

Figura 2: Painéis com espaçamento de 15%

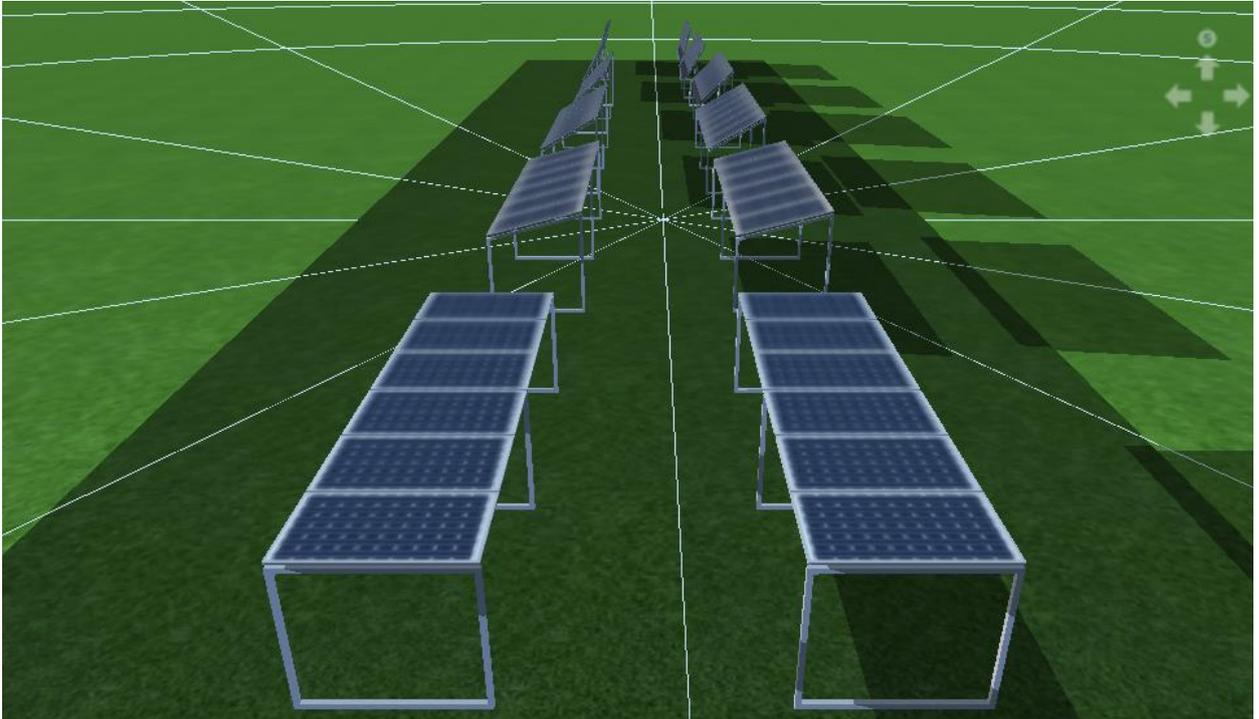


Fonte: Elaborado pelo autor (utilizando *software* PV*SOL), 2021.

Já a figura 2, mostra os painéis em configuração de inclinação idêntica a figura 1, porém com espaçamento de 150% da medida dos módulos quando esses

estiverem na posição horizontal. E além da distribuição também foi simulado a sombra que é projetada às 7:00 horas do dia 06 de dezembro.

Figura 3: Painéis com espaçamento de 150% e respectivo sombreamento às 7:00 horas do dia 06 de dezembro



Fonte: Elaborado pelo autor (utilizando *software* PV*SOL), 2021.

Os módulos foram posicionados de forma que cada usina tenha uma *string* que possa ser avaliada, e outra que fique na frente dessa com relação ao sol, para projetar sombra conforme a altitude do sol e a distância e inclinação das fileiras. Mas como cada projeto possui várias usinas dessas, buscou-se posicioná-las de forma que uma usina não projete sombra sobre a outra durante os horários que foram coletados os dados de geração de energia delas, dentro da área livre que o *software* cria. A ideia de coletar os dados apenas dos módulos que ficam na parte posterior, seria para que o cálculo servisse de base para simular uma usina com várias fileiras de painéis em uma usina com apenas duas fileiras de painéis.

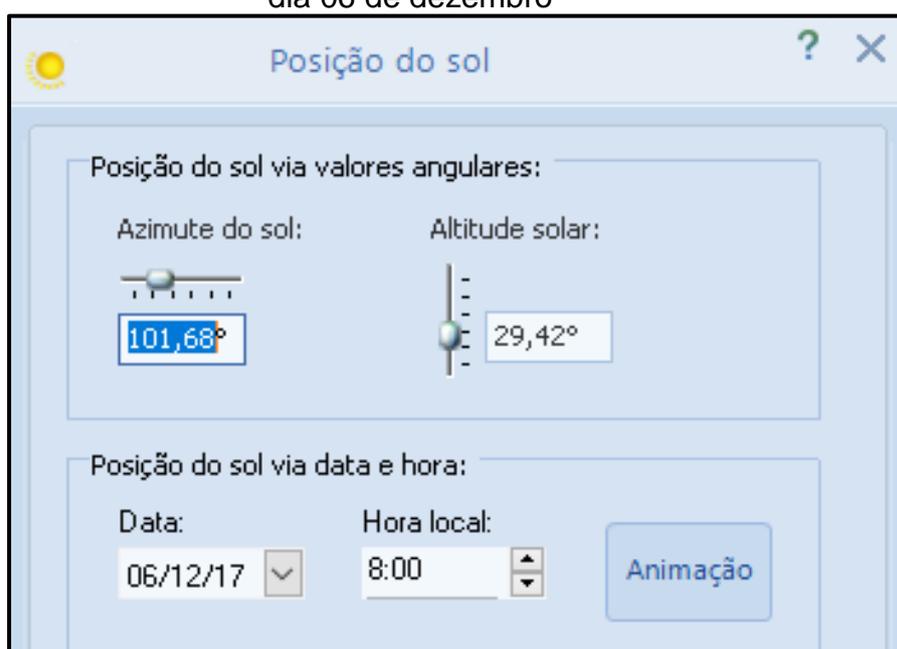
O *software* permite simulações com vários modelos de módulos e inversores. Para este projeto foram criadas usinas com doze módulos Tiger Pro JKM460M-60HL4-(V) da empresa Jinko Solar, com potência nominal de 460 watts pico cada. Esses possuem eficiência de 21,32%, e as medidas são 1903mm X 1134mm X 30mm.

Já o inversor foi escolhido foi modelo SPH 5000TL3 BH da empresa *GROWATT New Energy Co. Ltd.* Este inversor possui duas entradas PMP e suporta uma potência de até 6500 watts de entrada. Já a saída dele pode trabalhar com até 5000 watts de potência em corrente alternada.

O *software* pode fazer automaticamente o dimensionamento dos cabos das *strings* C.C. e da rede C.A., mas também permite redimensionamento desses se o usuário assim desejar. Assim como faz a simulação diária do sombreamento projetado nos módulos pelo período de um ano, o que permite verificar no projeto 3D se os módulos vão estar na sombra quando tiver obstáculos no projeto.

Outro dado importante que o *software* PV*Sol também fornece é a posição do sol durante o dia, para simular a usina com inclinação nos dois eixos. Pois como teria que simular a inclinação de uma usina que sempre tivesse os painéis voltados para o sol em diferentes horários durante o dia em usinas estáticas, era necessário saber a posição exata do sol em cada horário para saber para onde direcionar as fileiras de painéis em cada horário, principalmente no que diz respeito ao ângulo azimute. O *software* nos fornece os valores de azimute e altitude solar que foram usados para posicionamento dos módulos de maneira que sempre tivesse alguma miniusina com a face voltada para o sol em cada horário.

Figura 4: Exibição dos ângulos solares no *software* PV*Sol as 8 horas da manhã do dia 06 de dezembro



Fonte: Elaborado pelo autor (utilizando *software* PV*SOL), 2021.

Tabela 1: Ângulos solares nos horários do estudo

Horario	Azimute verão	Altitude Verão	Azimute inverno	Altitude inverno
08:00	101,68°	29,42°	58,71°	7,28°
10:00	91,52°	56,03°	38,99°	27,42°
12:00	59,89°	82,04°	8,79°	38,43°

Fonte: Elaborado pelo autor (utilizando *software* Excel), 2021.

3.2.2 Microsoft Excel

O *software* Microsoft Excel foi uma das ferramentas utilizadas para fazer grande parte dos cálculos a partir das tabelas de dados geradas a partir do *software* PV*Sol. Este, por sua vez possibilitou a criação de tabelas e gráficos que nos permitem uma comparação dos resultados de forma clara.

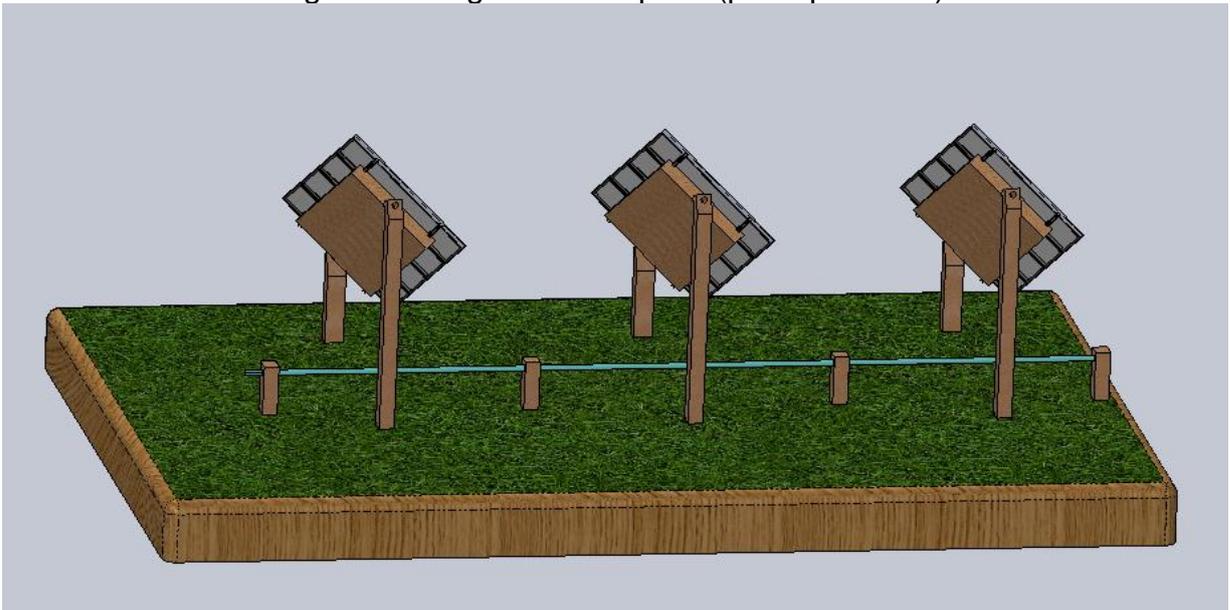
De forma geral, os dados avaliados foram apenas até o meio dia, mas servem de referência para observar quanto representa de ganho em proporções de um tipo de sistema com os outros.

Através de fórmulas simples foi possível construir tabelas no Microsoft Excel que condicionassem resultados para construção de gráficos detalhados e simplificados.

3.2.3 Solid Works

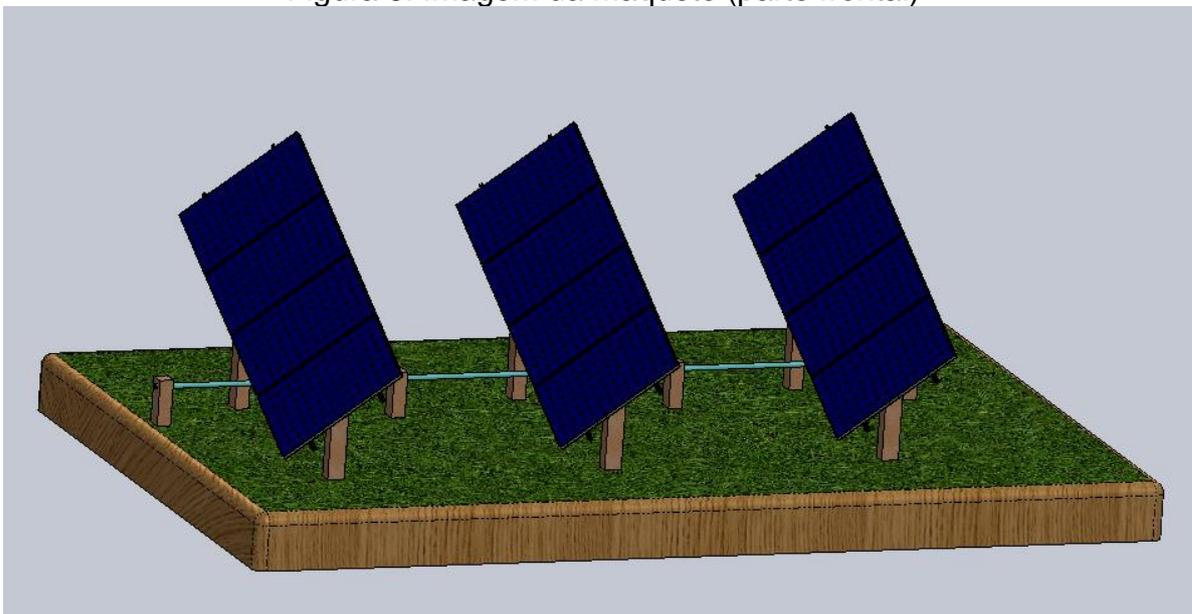
O projeto que serviu de base para a construção da maquete foi criado utilizando o *software* Solid Works. O projeto foi criado em escala 1:12 a fim de que a maquete tivesse um tamanho para observação de detalhes de funcionamento e condicionasse a montagem com os recursos que se tinha a disposição.

Figura 5: Imagem da maquete (parte posterior)



Fonte: Elaborado pelo autor (utilizando *software* SolidWorks), 2021.

Figura 6: Imagem da maquete (parte frontal)



Fonte: Elaborado pelo autor (utilizando *software* SolidWorks), 2021.

3.2.4 Protótipo

Para a criação do protótipo, como *hardware* foi utilizado o Arduino UNO com sua respectiva IDE. Ele foi configurado para trabalhar com mecanismos de

transmissão e alguns componentes eletrônicos, como sensores LDR, transistores, resistores e relés.

O protótipo foi criado usando-se basicamente se peças de madeira e sucatas metálicas. Os motores DC com suas transmissões foram utilizados de sucatas de eletrônicos.

Figura 7: Imagem do protótipo criado



Fonte: Autor, 2021.

3.2.4.1 O Circuito Eletrônico

O acionamento do motor acontece através do acionamento de um dos dois relés de 5 volts que foram utilizados. Os relés permitem a criação de um circuito de forma que a carga do motor não tem nenhuma interferência sobre o Arduino. Para acionamento dos relés foram usados dois transistores BC547 B, com ganho que varia de 200 a 450, conforme o *datasheet* do transistor. O cálculo do resistor de base do transistor se encontra abaixo:

$$\text{Resistencia do coletor (relé)} = 70 \text{ ohms}$$

$$\text{Tensão sobre o coletor} = 5 \text{ volts}$$

$$\text{Hfe BC547b} = 200$$

$$I_c = T_c / R$$

$$I_c = 5 / 70$$

$$I_c = 0,07$$

$$I_b = I_c / H_{fe}$$

$$I_b = 0,07 / 200$$

$$I_b = 3,6 \cdot 10^{-4}$$

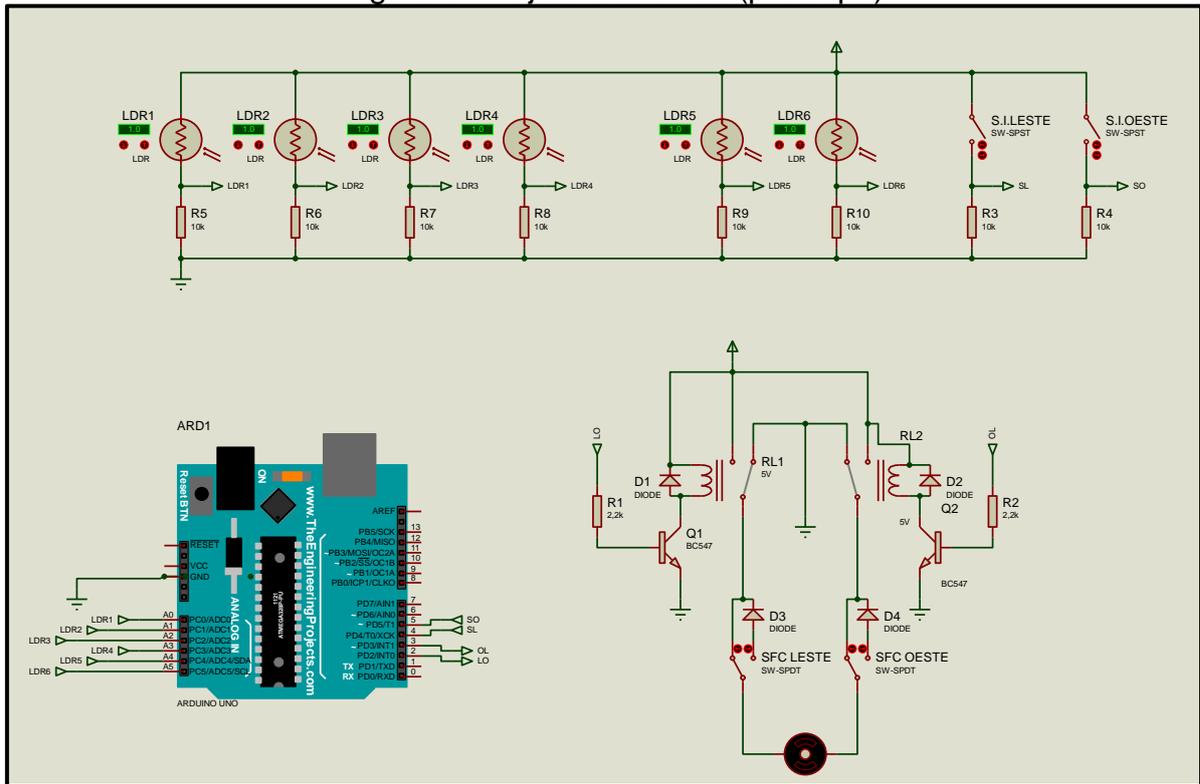
$$R_b = T_b / I_b$$

$$R_b = 5 / (3,6 \cdot 10^{-4})$$

$$R_b \approx 14 \text{ k}\Omega$$

O projeto do circuito eletrônico foi desenvolvido usando o *software* Proteus 8.6 e pode ser visto na figura abaixo:

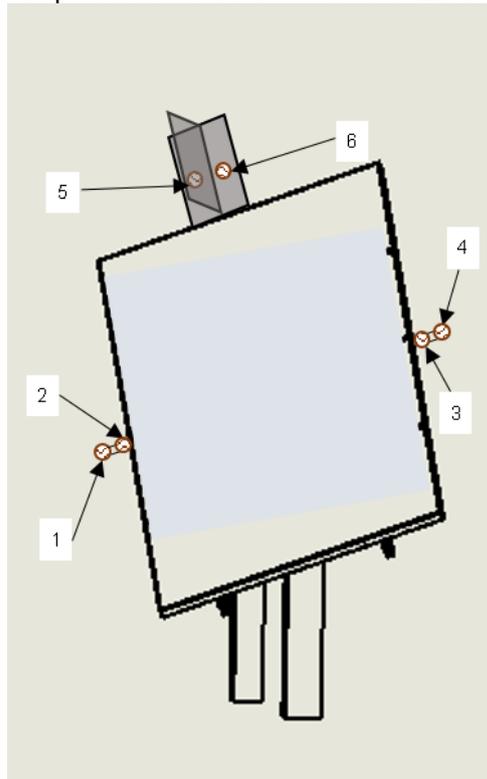
Figura 8: Projeto eletrônico (protótipo)



Fonte: Elaborado pelo autor (utilizando *software* Proteus 8.6), 2021.

Os sensores LDR mencionados na imagem anterior fazem comparativos de iluminação entre eles próprios, indicando para o Arduino se o painel pode virar-se mais para o sol, ou se precisa “recuar”. Dessa maneira, sempre busca-se manter toda a face dos módulos no sol o dia todo e o mais próximo do ângulo de 90° possível dos raios solares. Quatro dos sensores foram posicionados nas extremidades dos módulos, sendo 2 de um lado e 2 do outro, conforme a imagem os sensores 1, 2, 3 e 4. E os outros dois sensores (o número 5 e o número 6) foram posicionados em um “dispositivo” que fica fixo aos módulos de forma que verifica se a face do módulo está exatamente perpendicular aos raios solares.

Figura 9 Esquema de posicionamento dos sensores LDR no protótipo

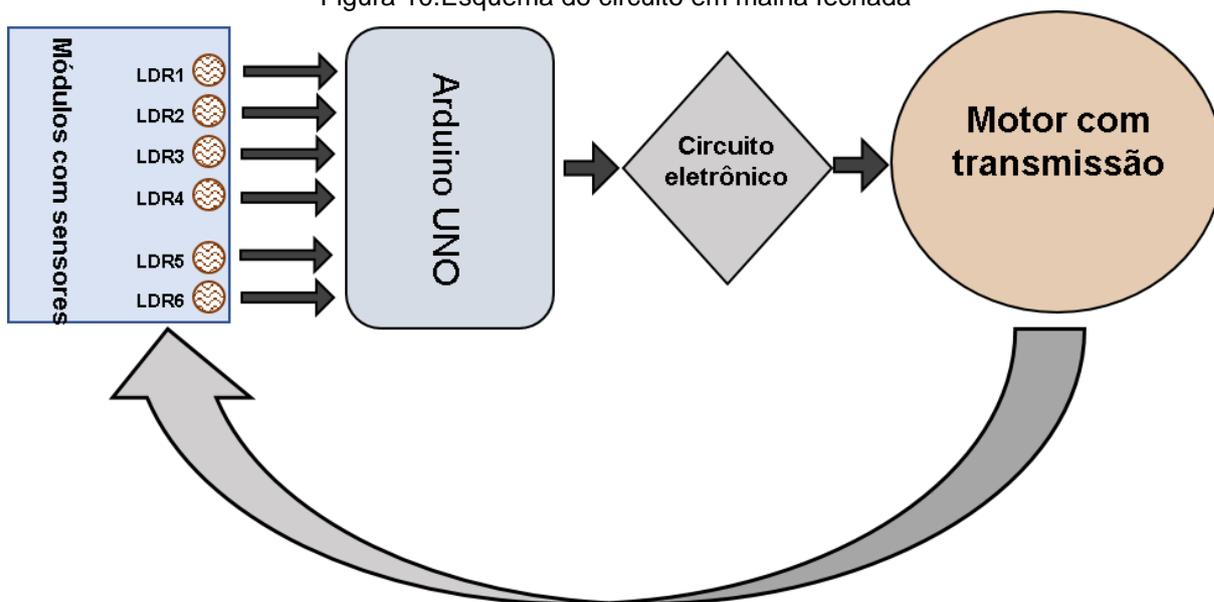


Fonte: Elaborado pelo autor (utilizando *software* PowerPoint), 2021.

A distância que os LDR's 1, 2, 3 e 4 devem ser posicionados da borda do módulo deve ser avaliado de acordo com o distanciamento que se usar entre as fileiras, o tamanho do módulo, e o tempo que se irá usar no programa a fim de reposicionar os módulos.

Mesmo não tendo um sensor que nos dá a posição exata em graus dos módulos neste projeto, nós podemos entender o circuito como um circuito de malha fechada. Pois através da leitura que o Arduino faz dos sensores de luz, ele entende se precisa avançar ou recuar o motor. E uma vez que avança ou recua, ele relê novamente o sensor até que este informe a posição satisfatória do módulo a fim de que não se tenha sombra projetada sobre os módulos em nenhum momento do dia.

Figura 10: Esquema do circuito em malha fechada



Fonte: Elaborado pelo autor (utilizando *software* PowerPoint), 2021.

3.2.4.2 Programação

O programa desenvolvido no *software* do Arduino IDE, e foi pensado em se trabalhar de maneira que os painéis solares sempre mantivessem a face o mais perpendicular aos raios solares possível. Mas quando o sol ainda está com uma elevação baixa no horizonte ele deve manter todas as faces dos painéis sem sombreamento da parte dos módulos que ficam na frente.

Basicamente, conforme a figura7 nos enumera os sensores LDR, foi programado o sistema de forma que os sensores 2 e 3 nunca tenham sombra sobre eles. E os sensores 1 e 4 sempre tenham sombra em um deles enquanto os sensores 5 e 6 não permitirem estar ambos sem sombreamento.

Existem outras formas de programar um sistema desses, porém isso vai depender da forma como os sensores serão usados e posicionados no projeto. Há inclusive a possibilidade de não usar sensores LDR, mas apenas sensores que indicam a posição (inclinação) exata do módulo, e assim corrigi-lo de acordo com o conhecimento dos valores dos ângulos de posição do sol.

3.3 ESCOLHA DAS DATAS

A simulação foi realizada em apenas dois dias, como “representantes” a fim de calcular o ano todo. Buscou-se os dias que o *software* condicionasse o maior

rendimento possível, o mais próximo do solstício de verão e de inverno. Essa simulação visa encontrar valores fictícios, sob condições perfeitas de máxima geração, apenas para um comparativo entre cada tipo de usina.

Os dados foram observados nos gráficos do simulador com uma usina estática com inclinação 27 graus para o norte, e foram coletados os dados dos dias com maior geração de energia, sendo eles observados nas tabelas abaixo.

Tabela 2: Comparação dos dias de maior geração próximo ao solstício de verão

COMPARAÇÃO DOS DIAS DE MAIOR GERAÇÃO PRÓXIMO AO SOLSTÍCIO DE VERÃO									
data	06/dez	09/dez	10/dez	14/dez	20/dez	22/dez	23/dez	25/dez	05/jan
Tempo	W	W	W	W	W	W	W	W	W
05:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
06:00	312,19	291,76	283,36	272,64	250,66	249,62	244,49	321,82	182,97
07:00	958,67	918,70	901,70	880,66	842,42	860,25	837,08	984,04	736,98
08:00	1579,62	1542,14	1518,61	1487,96	1447,44	1482,41	1444,52	1606,46	1342,13
09:00	2085,54	2061,10	2030,18	1995,48	1957,30	2004,33	1945,97	2107,53	1862,42
10:00	2331,71	2327,45	2304,66	2287,84	2270,16	2291,85	2282,25	2333,60	2238,71
11:00	2360,62	2360,52	2338,90	2324,39	2315,93	2328,81	2336,62	2359,18	2312,06
12:00	2358,83	2358,69	2336,18	2323,36	2317,82	2328,36	2341,36	2356,44	2320,68
13:00	2339,19	2336,98	2312,79	2302,73	2297,54	2306,99	2321,45	2333,58	2301,93
14:00	2283,54	2274,20	2249,19	2245,28	2239,99	2253,03	2262,45	2273,67	2245,89
15:00	2005,45	1954,23	1933,05	1963,27	1970,91	1998,64	1972,17	1971,40	1973,66
16:00	1495,21	1443,71	1425,77	1460,39	1483,99	1502,97	1486,34	1437,64	1497,44
17:00	886,91	849,94	839,44	873,27	902,88	916,53	917,33	822,78	923,90
18:00	286,03	278,19	278,31	304,00	329,42	337,23	347,96	230,37	366,01
19:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Soma	21283,51	20997,60	20752,15	20721,27	20626,45	20861,02	20739,98	21138,50	20304,77

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

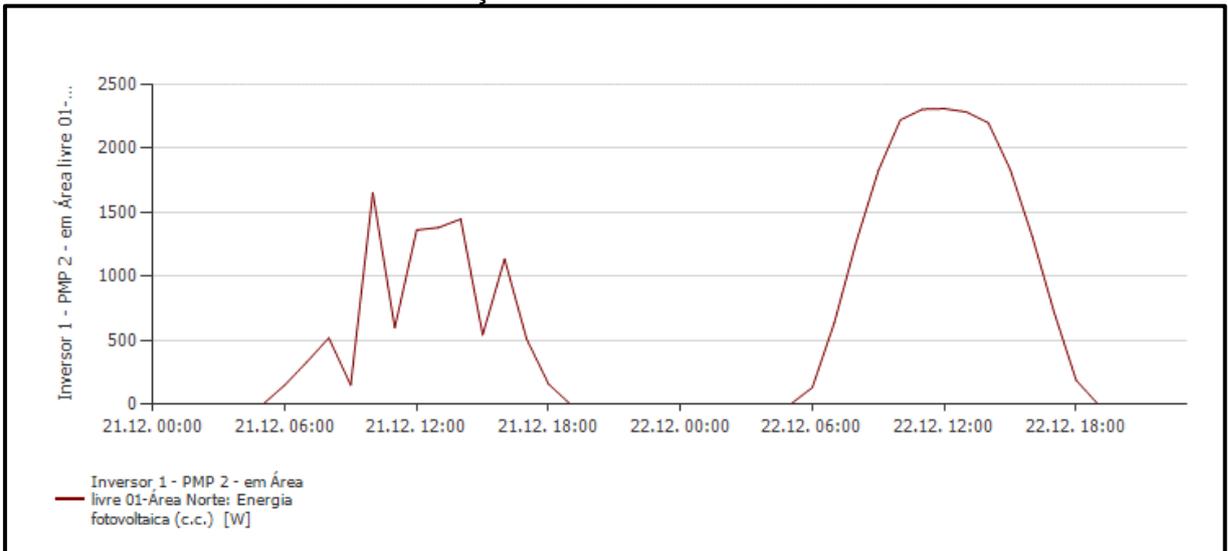
Tabela 3: Comparação dos dias de maior geração próximo ao solstício de inverno

COMPARAÇÃO DOS DIAS DE MAIOR GERAÇÃO PRÓXIMO AO SOLSTÍCIO DE INVERNO									
Inclinação dos painéis	02/jun	11/jun	12/jun	16/jun	28/jun	05/jul	07/jul	08/jul	10/jul
Tempo	W	W	W	W	W	W	W	W	W
05:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0
06:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0
07:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0
08:00	401,2139194	379,4695361	411,9010389	387,0172194	387,8951	348,7716278	426,2183861	416,0395972	396,6088139
09:00	881,2268639	842,3011806	897,7100778	867,6798194	878,9794056	830,050175	940,0672944	920,7793917	893,7934417
10:00	1223,675983	1227,310997	1285,4229	1238,259172	1271,785097	1242,845581	1353,615208	1334,64725	1307,337792
11:00	1482,085517	1479,623908	1537,320239	1487,319447	1524,332194	1474,615789	1614,364922	1595,871364	1577,439064
12:00	1607,218578	1576,765453	1632,726683	1569,445175	1641,164961	1588,205967	1718,449403	1708,626558	1688,759433
13:00	1525,2006	1528,248669	1569,034389	1481,904189	1580,470867	1574,679708	1682,690122	1662,109069	1625,564522
14:00	1254,427622	1313,654547	1352,681947	1279,761242	1372,669383	1352,435728	1472,114978	1453,343408	1409,334783
15:00	897,1726	942,0346694	992,3113722	914,9224417	1013,080044	992,2200917	1111,512494	1100,285444	1059,884417
16:00	477,3136306	489,650325	521,7124278	472,3935111	550,0438889	549,7760778	631,2235833	631,0247667	589,9021944
17:00	0	0	0	0	26,87674722	34,42755833	36,79600278	38,66193889	37,20057778
18:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9749,535314	9779,059286	10200,82108	9698,702217	10247,29769	9988,028303	10987,05239	10861,39	10585,82504

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

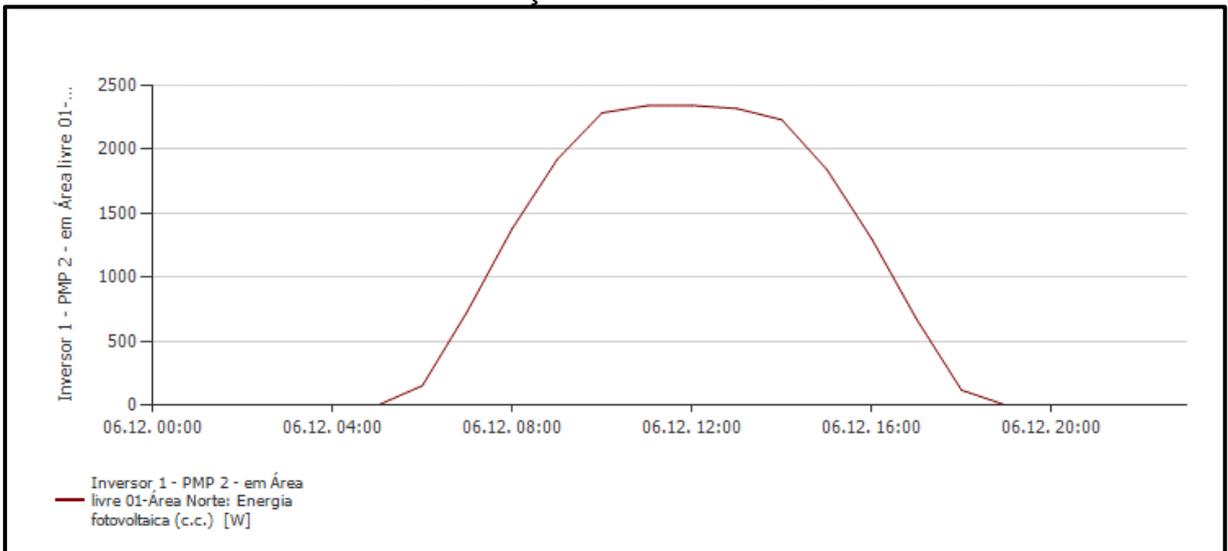
As datas que foram escolhidas foram as que geravam um gráfico mais uniforme possível, sendo descartadas as datas que criavam um gráfico menos uniforme.

Gráfico 1: Geração nos dias 21 e 22 de dezembro



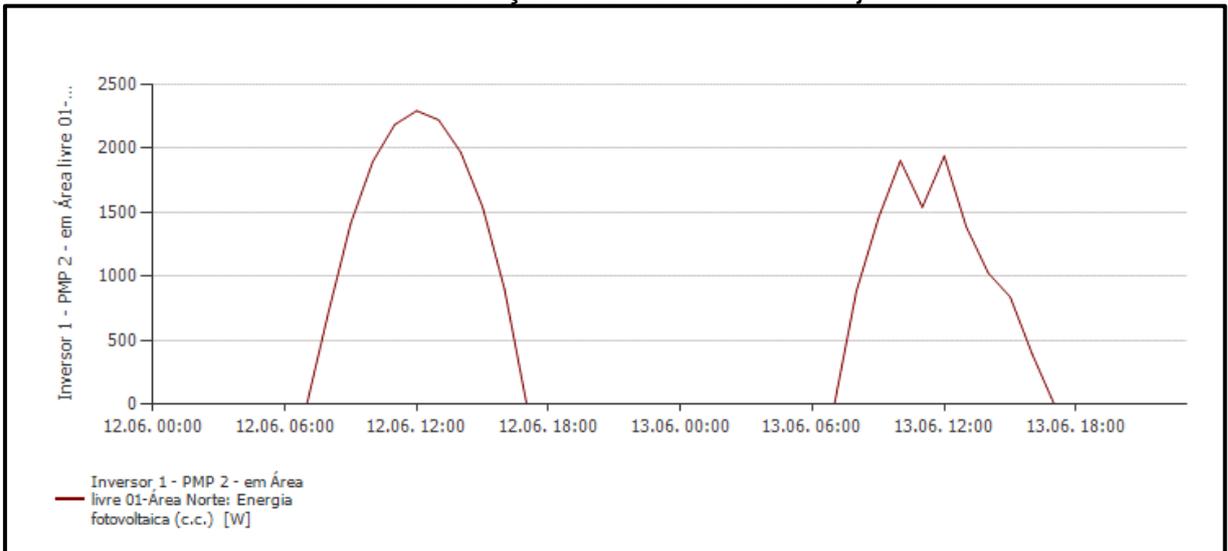
Fonte: Elaborado pelo autor (utilizando *software* PV*SOL), 2022.

Gráfico 2: Geração no dia 06 de dezembro



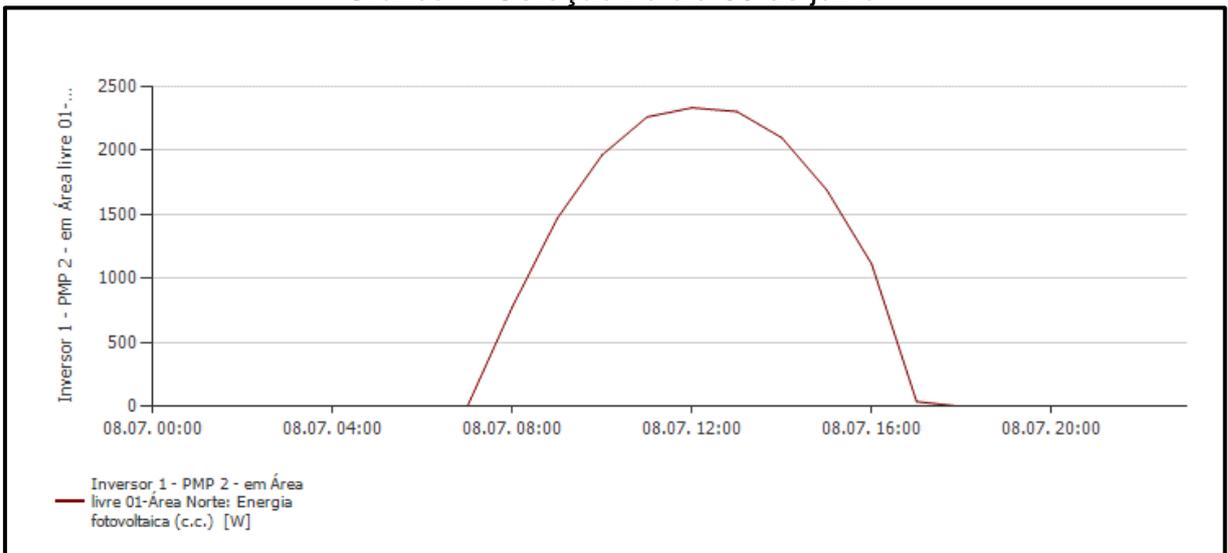
Fonte: Elaborado pelo autor (utilizando *software* PV*SOL), 2022.

Gráfico 3: Geração nos dias 12 e 13 de junho



Fonte: Elaborado pelo autor (utilizando *software* PV*SOL), 2022.

Gráfico 4: Geração no dia 08 de julho



Fonte: Elaborado pelo autor (utilizando *software* PV*SOL), 2022.

Dessa forma podemos observar que os dias que oferecem melhor rendimento médio histórico de energia, segundo o *software*, foram os dias 08 de julho e 06 de dezembro, assim optou-se por usar essas datas como representante de solstício de inverno e verão. Isso imaginando uma usina na condição o mais perfeita possível, livre de obstáculos que possam produzir sombreamento, e desconsiderando ao máximo os dias nublados.

As simulações foram criadas de forma a avaliar qual o distanciamento entre os módulos que fornecem o maior rendimento em uma usina com *tracker* com apenas

um eixo de inclinação para o sentido Leste-Oeste, com o eixo na horizontal. E uma vez encontrado o distanciamento que fornece o maior rendimento, buscou-se avaliar se inclinações de 15, 21, 27 e 33 graus para o norte poderiam oferecer um rendimento maior. Assim como uma usina com dois eixos de inclinação, para acompanhar tanto o movimento que o sol faz da nascente para o poente e o movimento Norte-Sul, que se dá principalmente nas diferentes estações do ano.

Os posicionamentos dos módulos a cada 15 graus de inclinação no sentido Leste-Oeste foram usados dessa maneira pensando em se fazer a atualização da posição dos módulos na programação do *tracker* apenas de hora em hora, buscando minimizar o consumo de energia pelo sistema de rastreamento.

4. RESULTADOS

Há algumas formas específicas de observar o que uma tecnologia dessas pode oferecer de ganho. Especialmente pela dificuldade que há em se ter valores de mercado tabelados desses tipos de sistemas. Mas foi levantado comparações dos resultados observados para poder avaliar o quão rentável a criação de uma usina dessas pode se tornar, independentemente do valor.

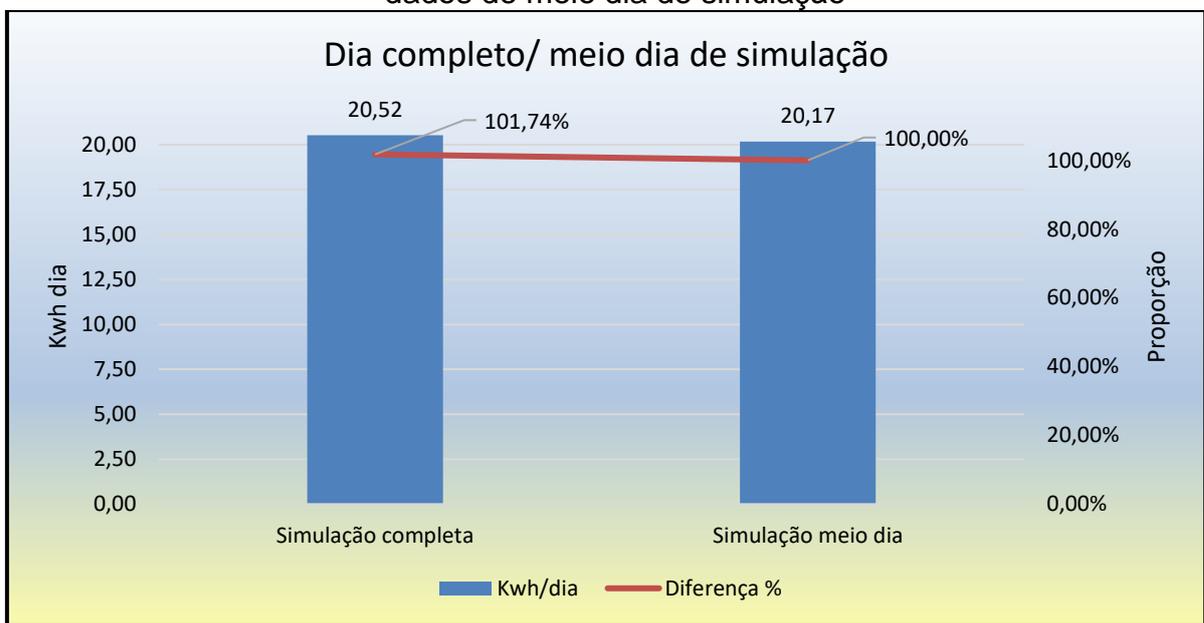
4.1 DIFEERENÇA DOS VALORES DO CÁLCULO DE MEIO DIA COMPARADOS COM O CÁLCULO DE UM DIA COMPLETO

Objetivando diminuir as dimensões das tabelas e dos gráficos, avaliou-se a possibilidade de considerar os cálculos da geração de energia apenas até o meio dia, e multiplicar o número gerado por 2 para se ter uma média de geração diária. Mas a fim de comparar o quanto há de diferença sobre a simulação real de um dia completo, criou-se uma usina virtual que possibilite simular a geração de energia a partir do início do dia até o final do dia, mas usar os dados apenas até o meio dia, e comparar com a simulação que o *software* faz de um dia inteiro.

Este comparativo foi feito apenas com uma usina. Sendo escolhida a usina plana com *tracker* com distanciamento de 150% entre as fileiras dos módulos.

Os resultados foram que em simulações realizadas nos dias 08 de julho, e 06 de dezembro, apenas até o meio dia, resultaram em uma diferença de 1,71% da simulação dos dois dias completos. Os cálculos foram feitos multiplicando a soma dos quilowatt-hora calculados desde as 5 horas da manhã no verão e a partir das 7 horas da manhã no inverno, ambos até o meio dia, por 2 para se ter a quantidade total nos dias, depois somados eles, e dividido por 2 para se ter a média das duas.

Gráfico 1: Diferença de simulação comparando os dados de um dia completo com dados de meio dia de simulação



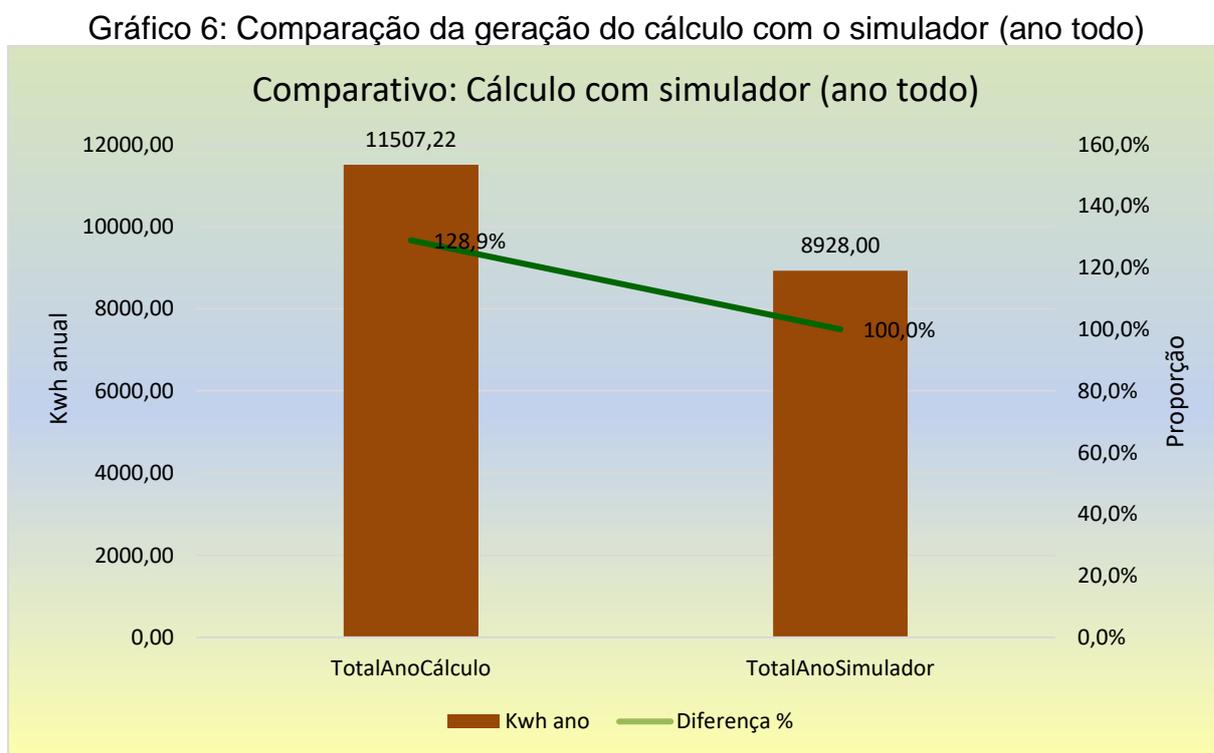
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Informações complementares se encontram nos apêndices: A, B, C, D, E e F.

4.2 DIFEERENÇA DOS VALORES DO CÁLCULO DE MEIO DIA COMPARADOS COM O CÁLCULO DE UM ANO COMPLETO

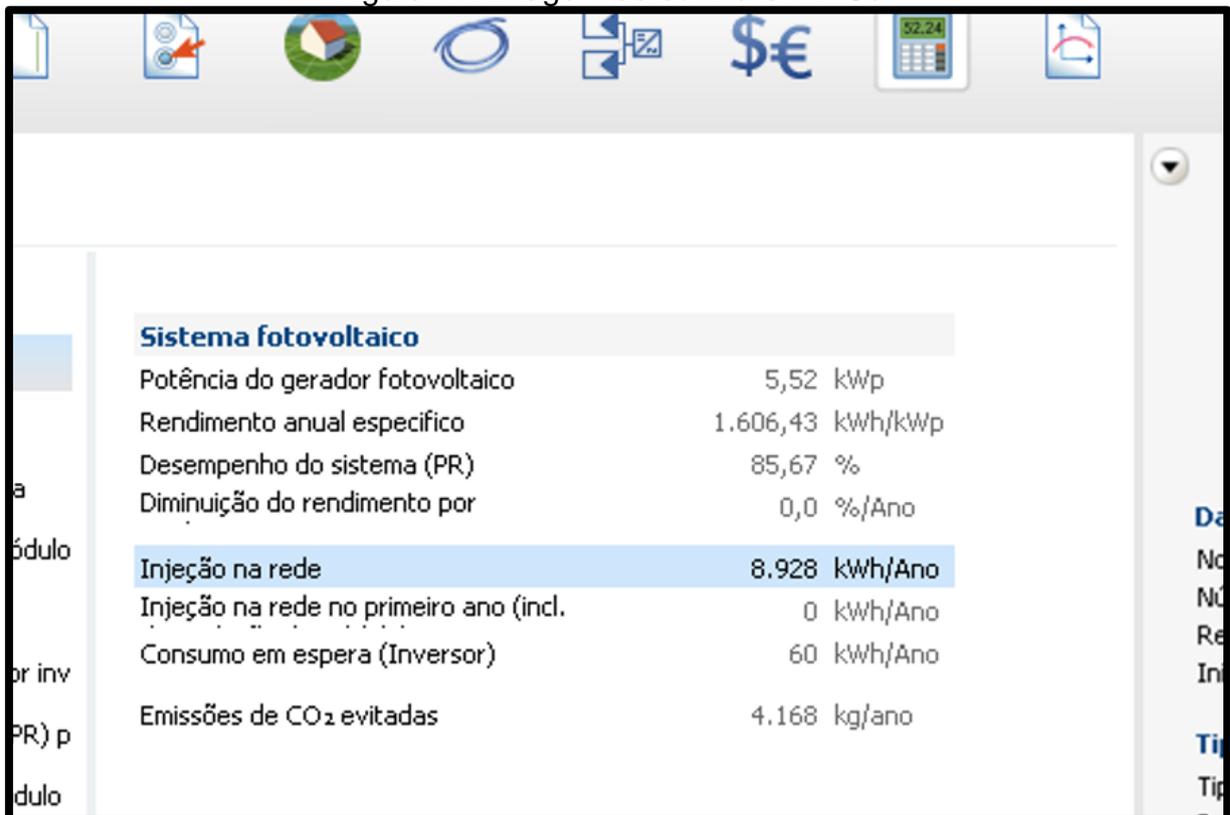
Também foi realizado o comparativo do que o simulador considerava pelo período de um ano, com o cálculo tendo como base as leituras das datas escolhidas como representantes do solstício de inverno e verão. Este cálculo visa apenas considerar qual a porcentagem que a soma do “tipo ideal de simulação” dos dias de maior rendimento gera a mais que a simulação completa pelo período de um ano, considerando todos os dias nublados que o simulador gera pela média do registro histórico.

Para esta comparação foi usada uma usina estática, com o mesmo inversor, porém com 12 módulos com inclinação de 27 graus ao Norte. O resultado foi que na simulação usando como referência os dias de máxima insolação obtivemos aproximadamente 29% a mais de energia do que a simulação realizada pelo *software* do ano completo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 11: Imagem do software PV*Sol



Sistema fotovoltaico	
Potência do gerador fotovoltaico	5,52 kWp
Rendimento anual específico	1.606,43 kWh/kWp
Desempenho do sistema (PR)	85,67 %
Diminuição do rendimento por	0,0 %/Ano
Injeção na rede	8.928 kWh/Ano
Injeção na rede no primeiro ano (incl.	0 kWh/Ano
Consumo em espera (Inversor)	60 kWh/Ano
Emissões de CO ₂ evitadas	4.168 kg/ano

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A observação destes valores visa considerar que, como o cálculo foi executado em uma usina com apenas 6 módulos, poderíamos chegar a um valor próximo. Se for usado tais valores como base de cálculo para uma usina estática com quantidade diferente de módulos ou potência e aplicarmos a proporção para o *tracker*. Os resultados obtidos poderiam ser mais atrativos

4.3 DISTANCIAMENTOS

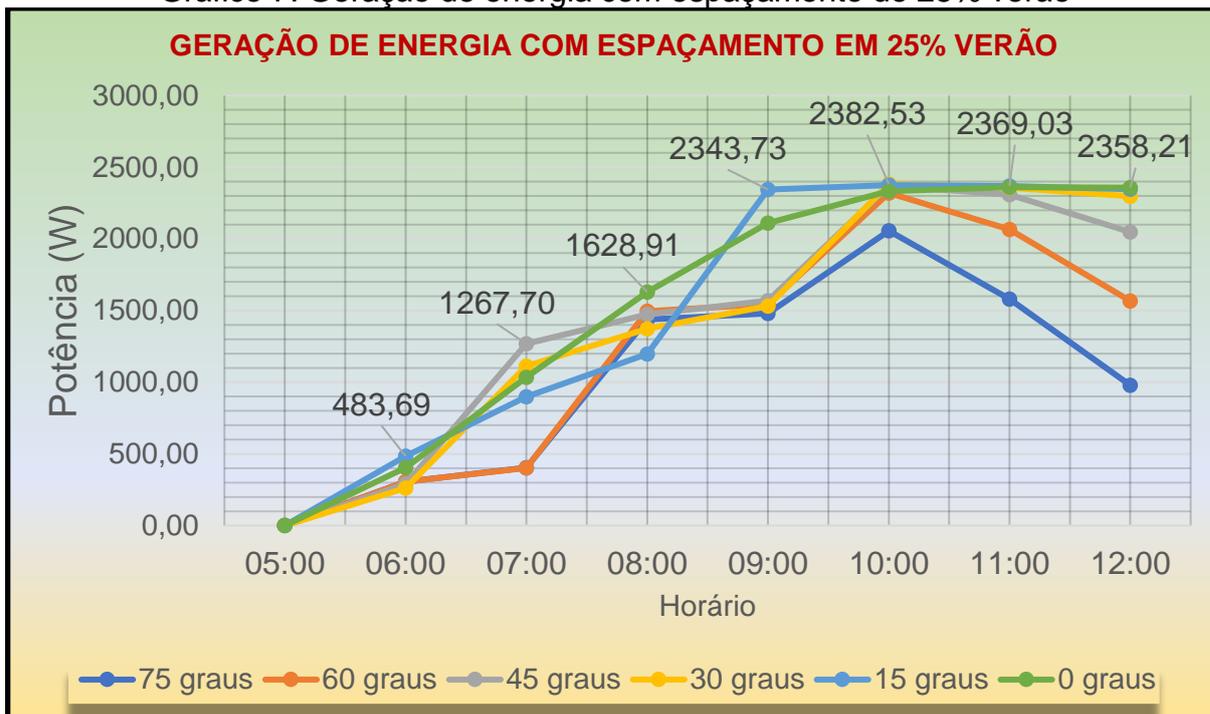
Buscando avaliar qual o distanciamento entre as fileiras que condicionasse o maior rendimento de energia possível com o mesmo número de painéis, criou-se 9 projetos. Cada projeto tinha um distanciamento entre os módulos respectivamente de 15%, 25%, 35%, 45%, 60%, 75%, 100%, 150% e 250% da medida do módulo quando esse estiver na posição horizontal.

Cada projeto tinha seis micro usinas sendo essas com 0, 15, 30, 45, 60 e 75 graus de inclinação nos módulos. Foram escolhidas essas inclinações pensando em se reposicionar os módulos em relação ao sol na usina com seguidor solar apenas a cada uma hora, o que resulta em 15 graus de diferença da posição anterior. Também não foi usado a posição de 90 graus pelo fato de que para se ter os raios solares

exatamente perpendiculares à face do módulo nesta posição seria apenas quando o sol estiver na linha do horizonte, e assim os módulos que ficariam na parte posterior não teriam nenhuma incidência solar mesmo que a distância entre as fileiras dos módulos tendesse ao infinito.

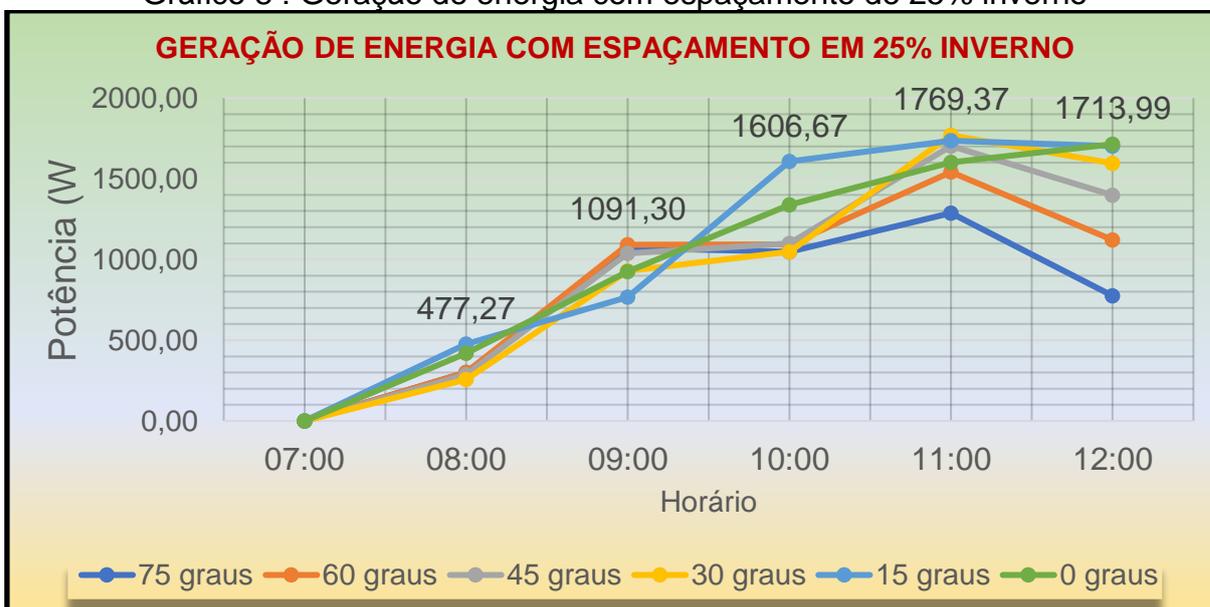
Alguns resultados podem ser vistos nos gráficos seguintes.

Gráfico 7: Geração de energia com espaçamento de 25% verão



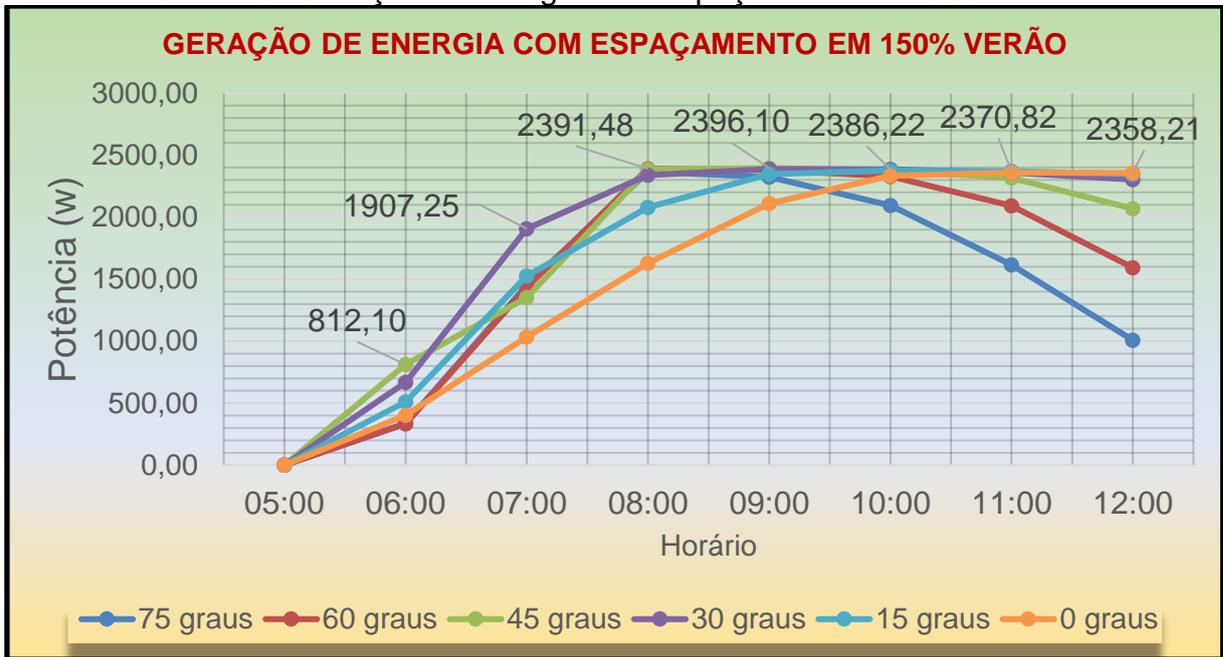
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Gráfico 8 : Geração de energia com espaçamento de 25% inverno



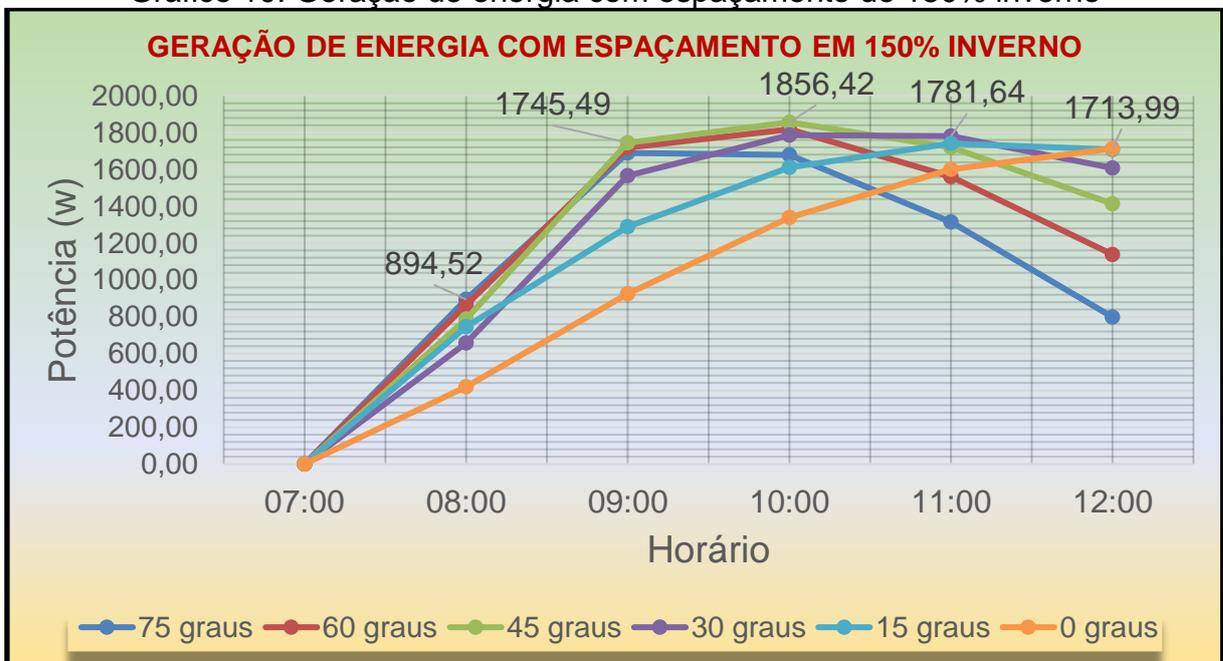
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Gráfico 9: Geração de energia com espaçamento de 150% verão



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Gráfico 10: Geração de energia com espaçamento de 150% inverno

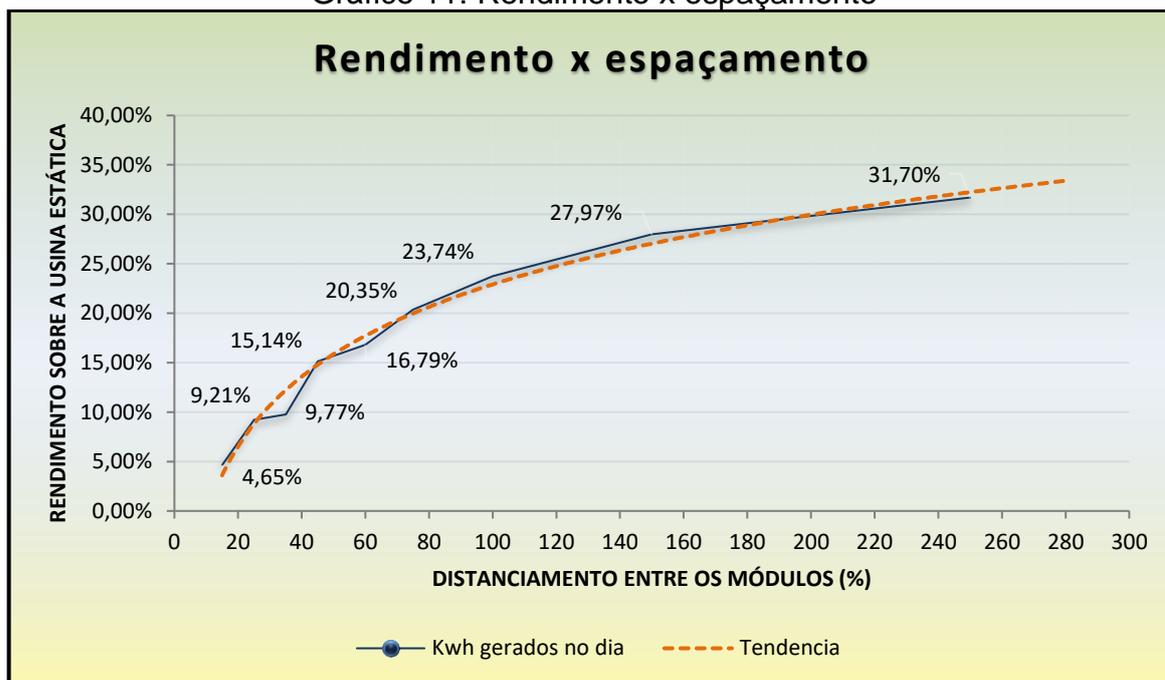


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Outras informações podem ser obtidas em apêndices: G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q e R.

Depois dessas simulações completas, foi estudado qual seria a tendência de geração conforme o distanciamento das fileiras de módulos. Para este cálculo foi feito um comparativo com a usina estática inclinada a 27 graus Norte, para que se possa ter o valor em porcentagem do quanto de rendimento se alcança com o *tracker* em diferentes distâncias. Os valores simulados podem ser observados no gráfico abaixo.

Gráfico 11: Rendimento x espaçamento



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Através do gráfico acima podemos observar que, conforme aumentamos o distanciamento das fileiras dos módulos, também aumentamos o ganho de geração de energia quando comparamos com uma usina estática.

O Excel também possibilitou criar uma linha de tendência aproximada do ganho real da usina com *tracker* sobre uma usina estática com inclinação a 27 graus Norte, conforme o distanciamento que se deseja usar entre as fileiras dos módulos. Essa linha nos mostra que quanto maior for a distância entre as fileiras dos módulos, maior será o ganho de energia comparado a uma usina estática. Mas percebe-se que o ganho tende a aumentar cada vez mais sutilmente conforme aumenta a distância entre os módulos.

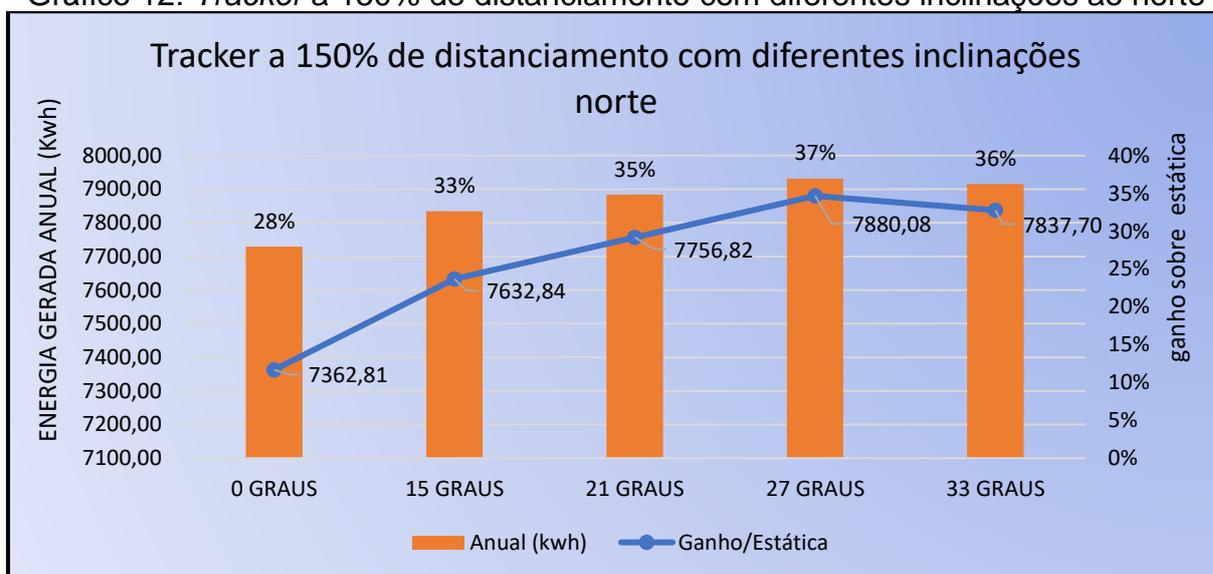
4.4 TRACKER COM UM EIXO INCLINADO

Outra opção de configuração desse tipo de *tracker* com apenas um eixo de rotação é simular com o eixo inclinado para o norte. De forma que quando for o meio

dia, que é o período de maior incidência de radiação solar, se tenha um valor mediano entre a inclinação dos raios solares e o horizonte, pela posição do sol no inverno e no verão.

Para calcular o ganho nesta configuração, utilizou-se o espaçamento de 150% entre as fileiras, e foi realizada a simulação com inclinação de 0 graus Norte, 15 graus Norte, 21 graus Norte, 27 graus Norte e 33 graus Norte. Os resultados podem ser observados no gráfico abaixo.

Gráfico 12: *Tracker* a 150% de distanciamento com diferentes inclinações ao norte



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

4.5 TRACKER COM DOIS EIXOS DE INCLINAÇÃO

E por último foi avaliado a condição de *tracker* com inclinação em dois eixos.

Este cálculo foi usado uma usina com espaçamento em 150%, com inclinação de hora em hora (15 em 15 graus) no sentido Leste a Oeste. E pelos valores que o simulador nos dá de posição de inclinação e a azimute do sol durante o dia, foi buscado trabalhar a inclinação dos painéis no sentido Norte Sul pela posição que o sol se encontra em horários específicos, atualizando a cada duas horas. Sendo assim, foi usado a posição do sol às 8:00 horas da manhã, cuja altitude do sol em relação a linha do horizonte é de 29,7° no verão e 7,28° no inverno, e azimutes de 102,6° no verão e 58,71° no inverno. Depois foi reposicionado para às 10:00 horas da manhã, cuja altitude do verão é de 56,6° no verão, e 27,42° no inverno, e azimutes de 91,52° no verão e 38,99° no inverno. E por último também foi considerado às 12 horas, cuja

altitude do sol é de $82,4^\circ$ no verão e $38,43^\circ$ no inverno, e azimutes respectivamente em $59,89^\circ$ e $8,79^\circ$.

Então para estudo do verão criou-se o projeto da seguinte maneira: para o horário das 8 horas, foram posicionadas todas as seis usinas, com inclinações de 75, 60, 45, 30, 15 e 0 graus com a face direcionadas para um ângulo de 102° de azimute para ser avaliadas. Para o horário das 10 horas foram posicionadas apenas as usinas de 75, 60, 45, 30 e 15 graus, pois considerou-se que neste horário o sol não estaria exatamente acima dos módulos a 0 graus para oferecer o maior rendimento, nem tão baixo que necessitasse dos painéis nesta inclinação para que não projetassem sombra um sobre o outro. E no horário das 12 horas foi usado os painéis apenas de 30, 15 e 0 graus, todos estes com inclinação de altitude de 82 graus Norte. Pois considerou-se que neste horário o ângulo azimute seria em torno de zero graus.

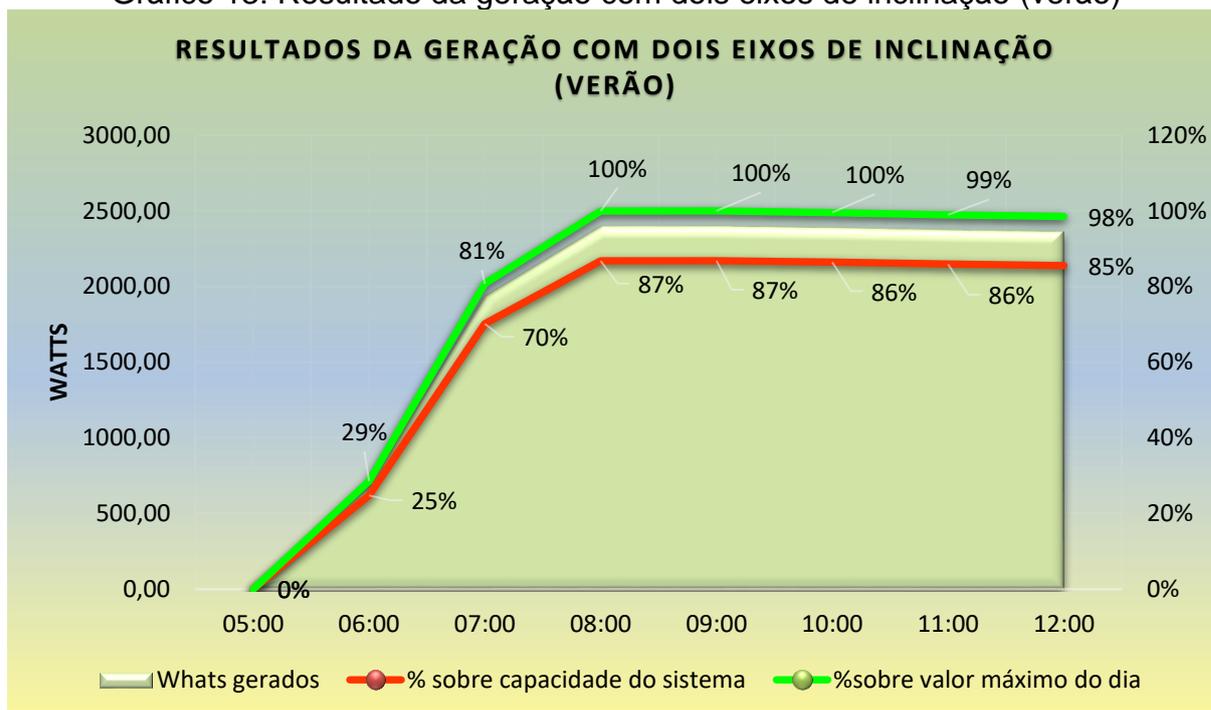
Figura 12: Projeto de painéis com dois eixos (verão)



Fonte: Elaborado pelo autor (utilizando software PV*SOL), 2021.

Nesta configuração também observamos a diferença que o sistema alcançou, em porcentagem, da capacidade máxima do sistema, que é de 2760 watts, a cada hora. Assim também se fez o comparativo da proporção que o sistema estava gerando a cada hora considerando o valor máximo que ele alcançou durante o dia. Os resultados podem ser observados no gráfico 14.

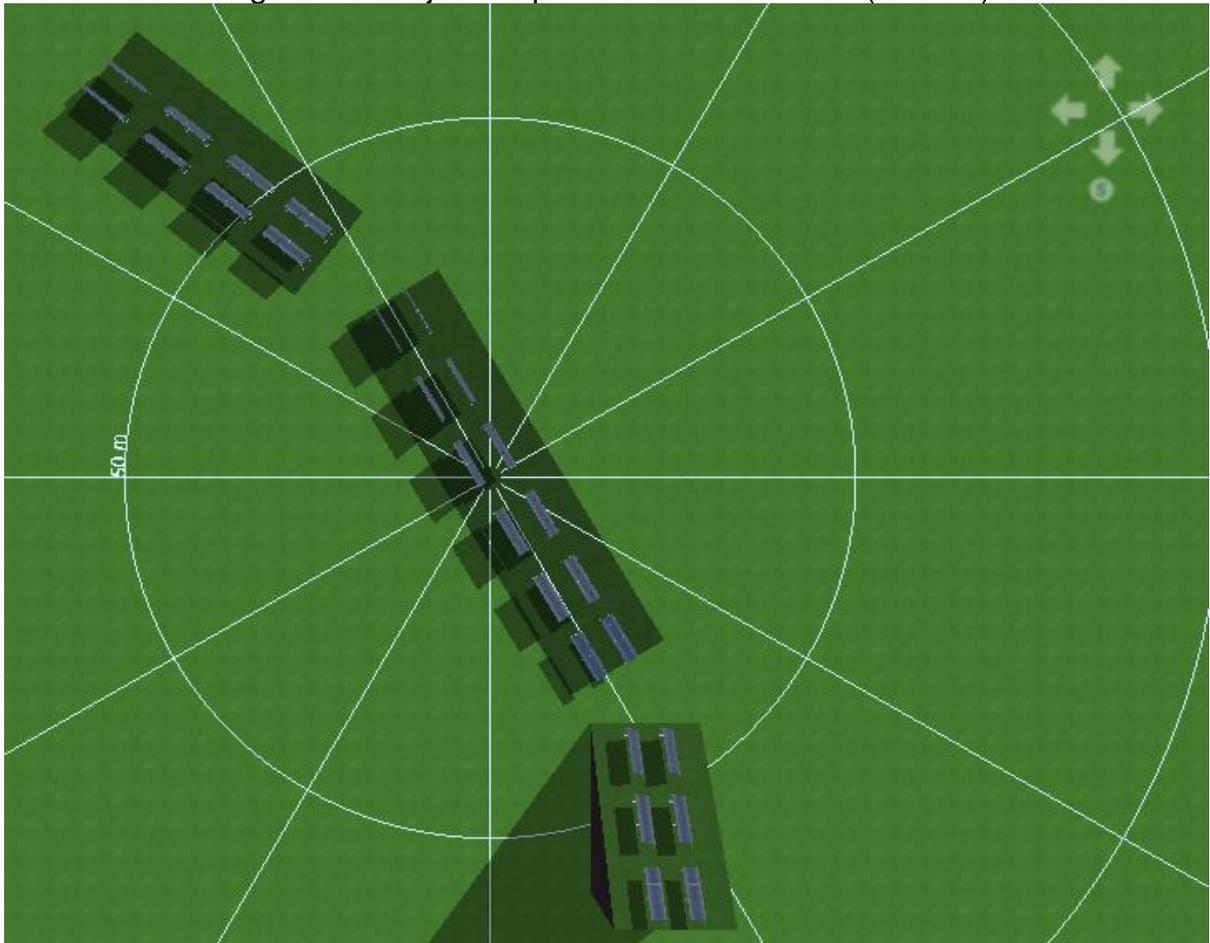
Gráfico 13: Resultado da geração com dois eixos de inclinação (verão)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Já para o estudo do inverno fez-se da seguinte maneira: para o horário das 8 horas também foram posicionadas as 6 usinas com inclinações de 75, 60, 45, 30, 15 e 0 graus com a face direcionada a 59 graus de azimute para avaliação. E para o horário das 10 horas foram posicionadas apenas as usinas de 60, 45, 30 e 15 graus com a face direcionada a 39 graus de azimute, pois considerou-se que nem a usina de 0 graus, nem a de 75 graus estariam com o sol exatamente direcionado para elas neste horário, e a incidência de sombra não seria adequada para avaliação destas inclinações neste horário. E para o horário das 12 horas foram posicionadas as usinas de 30, 15 e 0 graus com a face em 90 graus de azimute e 38 graus de altitude de inclinação.

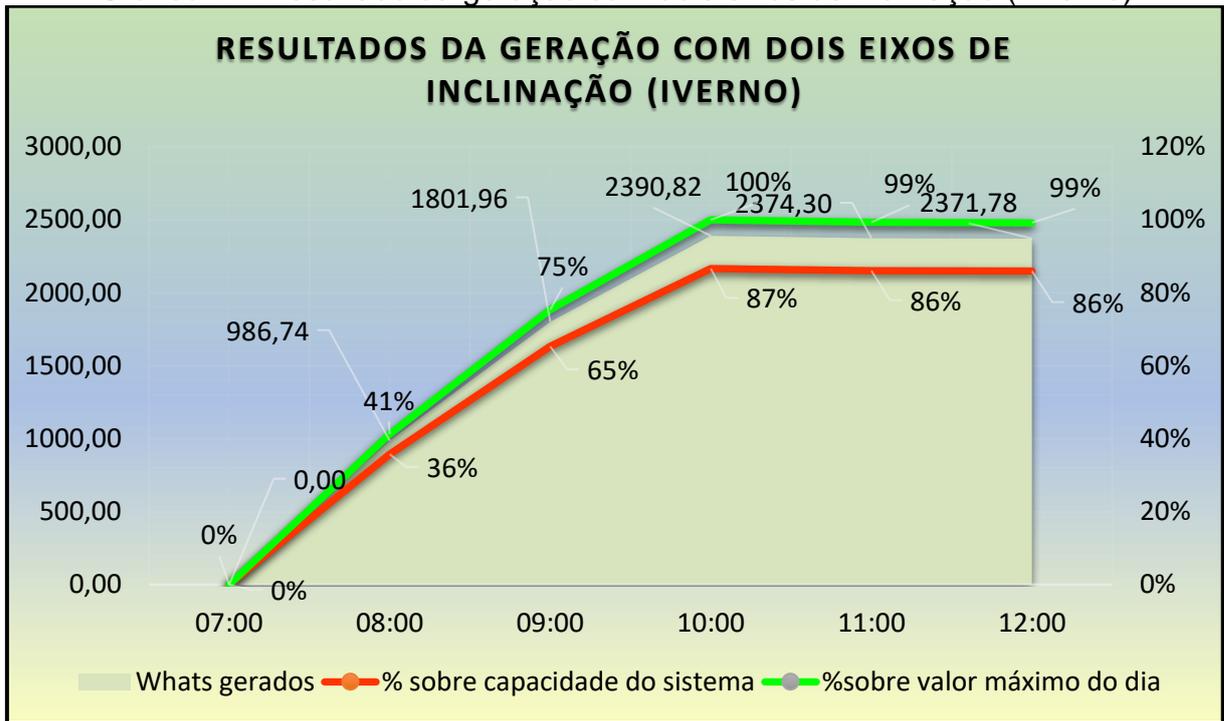
Figura 13: Projeto de painéis com dois eixos (inverno)



Fonte: Elaborado pelo autor (utilizando *software* PV*SOL), 2021.

Nesta configuração também comparamos as proporções alcançadas do sistema com a capacidade máxima do sistema e as proporções alcançadas com o valor máximo que ele alcançou durante o dia. Os resultados podem ser observados no gráfico 14.

Gráfico 14: Resultado da geração com dois eixos de inclinação (inverno)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

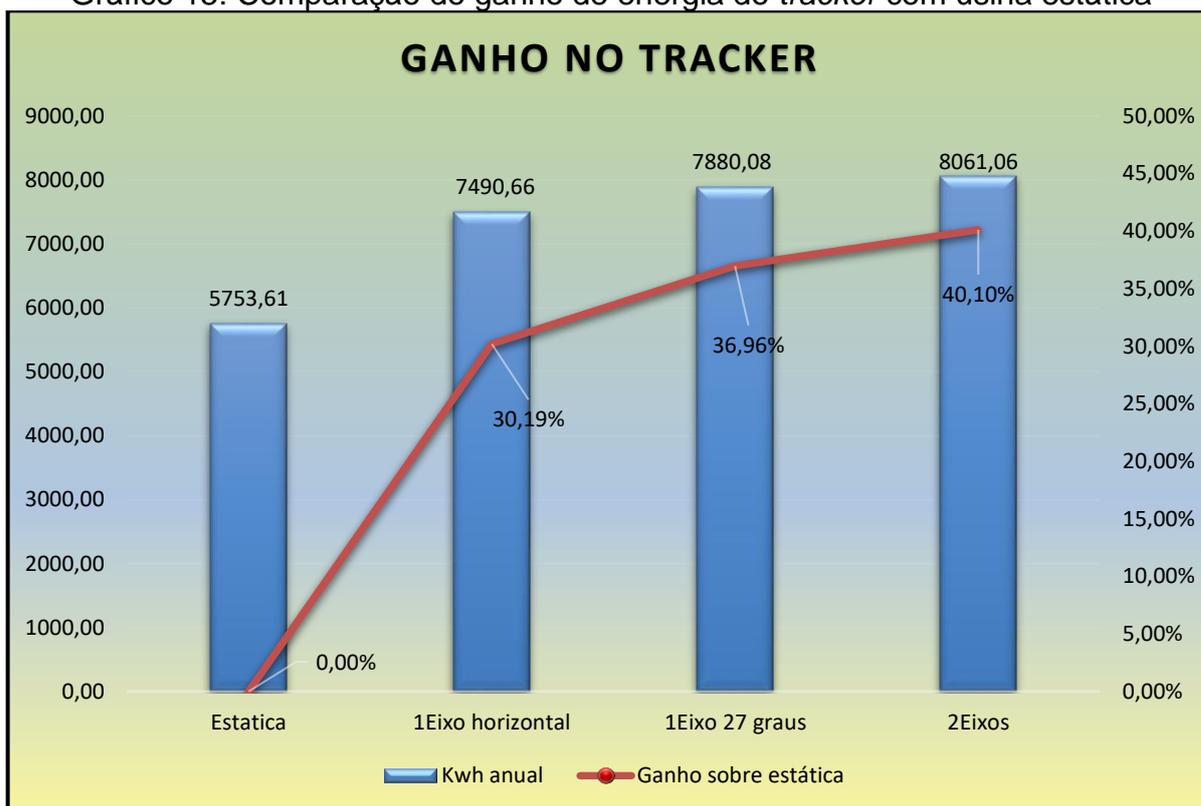
Comparando os dois últimos gráficos percebemos que a capacidade máxima de geração diária da usina com dois eixos de inclinação, durante o solstício de verão é alcançada as 8:00 horas da manhã. Já no solstício de inverno a capacidade máxima da geração diária só é alcançada as 10:00 horas.

5. RESULTADOS

Os custos reais de um sistema com *tracker* não foram obtidos, mas eles podem variar de acordo com o tipo de estrutura que será instalada, os mecanismos que serão utilizados, *hardware*, a qualidade e quantidade de sensores e componentes eletrônicos e o custo de mão de obra de instalação. Algumas empresas fornecem orçamento sob projeto detalhado, mas os maiores fornecedores desse tipo de sistema são do exterior, e também só fornecem orçamento sob projeto para usinas em proporções muito grandes.

Com os dados colhidos, o gráfico 15 compara as informações obtidas. O objetivo é comparar o ganho que alguns sistemas de geração de energia com *tracker* oferecem sobre um sistema estático, a fim de que se possa comparar se o custo em se investir em um sistema desses compensa.

Gráfico 15: Comparação do ganho de energia do *tracker* com usina estática



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Na usina estática, através da simulação de meio dia e feito o cálculo para obter a geração de energia completa de um ano, obteve-se o valor de 5753,6 kwh. Todas as usinas utilizadas nesta comparação são de seis módulos Jinko de 460 wp e um inversor Growatt de 5 kw de potência. Os módulos foram posicionados com

distanciamento de 150% entre os módulos para as simulações das quais obtivemos esses valores. Vale ressaltar que se a distância entre os módulos for menor, esse valor diminui. Isso pode ser observado com atenção no gráfico 12.

Já com o *tracker* em um eixo horizontal, pode-se alcançar uma geração de 7490,7 kwh em um ano. Isso representa um ganho de 30,19% a mais que a usina estática. Financeiramente, em kwh, no mês de outubro de 2021, obtivemos um ganho de R\$ 1.737,05 em um ano. Para esse cálculo buscou-se o valor da energia no mês de novembro de 2021, cobrado pela RGE.

Com o *tracker* em um eixo inclinado a 27 graus ao Norte, obtivemos uma geração de 7880,08 kwh em um ano. Isso representa 36,96% a mais de geração de energia que uma usina estática. Em valores, consegue-se gerar R\$ 2.126,48 em um ano.

E por último, observando o *tracker* com dois eixos de inclinação, alcançamos a marca de geração de 8061,06 kwh no período de um ano, o que representa um ganho de 40,1% a mais do que em uma usina estática. O ganho financeiro calculado chega a R\$ 3.307,45 em um ano.

Observa-se também que o ganho de uma usina com dois eixos de rotação, quando comparada com a usina de um eixo inclinado, o ganho é de pouco mais de 3% quando comparamos as duas com a usina estática, e apenas 2,3% a mais quando comparamos a usina com dois eixos de rotação sobre a usina com um eixo inclinado a 27 graus norte.

Já o ganho de uma usina com um eixo de rotação inclinado a 27 graus norte, quando comparado com a usina com um eixo de rotação plana, o ganho é de quase 7% a mais quando comparamos as duas com a usina estática. E o ganho da usina com o eixo inclinado comparada sobre a usina com eixo no sentido horizontal, representa um ganho de 5,2%.

6. CONCLUSÃO

Analisando todos os dados desses tipos de usinas solares com *tracker*, e fazendo o comparativo da capacidade delas com a usina estática estudada, percebemos que para alcançar o ganho máximo, que pode ultrapassar dos 40% sobre uma usina estática, em uma usina dessas é necessário manter um afastamento bem significativo, pelo menos 150% de espaçamento livre entre os módulos. E ainda para alcançar esse ganho é necessário usar uma usina com dois eixos de rotação.

Quando pensamos em produção máxima em uma determinada área (kwh/m²), é fácil de perceber que um sistema desses não compensa. Pois onde seriam usadas 2 fileiras de painéis com *tracker*, já podem ser usados 3,5 fileiras de painéis estáticos. Assim, na usina com *tracker*, 2 fileiras x 1,4 = 2,8 ou 280%. Enquanto em usina estática poderíamos ter 3,5 fileiras ou 350% de geração de energia. Isso representa 25% a mais de geração de energia em uma usina estática usando bem a área.

Porém, a área possivelmente será um dos menores custos a se avaliar. O custo de um sistema estático leva em média 5 anos para pagar o investimento. Se o custo de um sistema com *tracker*, para gerar a mesma potência que um sistema estático, for igual ou menor que o custo com o sistema estático, então concluímos que ele é vantajoso. Mas isso vai depender do custo de um sistema com *tracker*, que pode variar de acordo com os fatores mencionados anteriormente.

Para ter-se os dados de quais sistemas com *tracker* podem ser vantajosos sobre uma usina estática, é preciso considerar os valores desses. Fica a proposta de se pesquisar os valores de mercado desses sistemas e até estudar a criação de um sistema *tracker* com o menor custo possível, a fim de considerar se um sistema desses pode ser vantajoso comparando com esses ganhos de energia.

Também seria relevante avaliar os ganhos obtidos neste estudo em uma usina real, para considerar os consumos de energia que os motores terão ao realizar movimentos dos eixos do *tracker*, objetivando encontrar o sistema que ofereça a melhor relação de ganho de energia pelo consumo do sistema.

REFERÊNCIAS

ANDER-EGG, E. **Introducción a las técnicas de investigación social: para trabajadores sociales**. 7. ed. Buenos Aires: Humanitas, 1978.

BARROS, A. J. P.; LEHFELD, A. S. **Projeto de pesquisa: propostas metodológicas**. 8. ed. Petrópolis: Vozes, 1990

CAIRES, Suzane Machado Pires; **Estudo sobre posicionamento de placas fotovoltaicas** – Faculdade Independente do Nordeste. Vitória da Conquista – BA, 2014

DEMARCO, Maurilio. **Evolução da Célula Fotovoltaica**. Eng&Tech, 2019. Disponível em: <<https://www.eet.eng.br/evolucao-da-celula-fotovoltaica/>>. Acesso em: 08 de nov. de 2021.

FARIA DUARTE, Gustavo. **Desenvolvimento de um protótipo de Seguidor Solar biaxial**. Dissertação (Curso de Engenharia Elétrica) UFRJ - Escola Politécnica. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10028431.pdf>. Acesso em: 03 maio 2021.

FERNANDES, A. M.; BRUCHÊZ, A.; D'ÁVILA, A. A. F.; CASTILHOS, N. C.; OLEA, P. M. **Metodologia de Pesquisa de Dissertações sobre Inovação: Análise Bibliométrica**. Desafio Online, v. 6, n. 1, p. 141-159, 2018.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

Coordenadas Geográficas de Horizontina. **Geógrafos**, 2021, disponível em: <<https://www.geografos.com.br/cidades-rio-grande-do-sul/horizontina.php>>. Acesso em: 08 de nov. de 2021.

LOEBLEIN, L. C. ; GODOY, L. P. ; LOVATO, A. ; RODRIGUES, M. K. . **Comparação da eficiência de placas solares térmicas em diferentes modos de operação**. In: XIII Semana de Engenharia de Produção Sul-americana, 2013, Gramado. Anais XIII SEPROSUL. Porto Alegre: UFRGS/FEENG, 2013.

MELO, Cleberson L.A. *et al.* Controle de Um painel Solar Para Rastreamento de Orientações de Máxima Geração de Potência. **Anais do Congresso Brasileiro de Automática**. Campinas/SP Brasil, v 2, n. 1: CBA 2020. Disponível em: https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/sba/article/view/1094/1050. Acesso em: 03 maio 2021.

ORTIZ, Fernando. ALVES, Vinicius. HOLDEFER, Antônio. MEDEIROS, Antônio. **Desenvolvimento de sistema automático de rastreamento solar para painéis fotovoltaicos**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, abril, 2018.

PRADO, G. O.; ULHOA, T. F.; DAMASCENO, J. J. R.; VIEIRA, L. G. M.; **Estado da arte em mecanismos de rastreamento solar**, p. 8333-8340 . In: Anais do XX

Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ 2014 [= Blucher Chemical Engineering Proceedings, v.1, n.2]. São Paulo: Blucher, 2015.

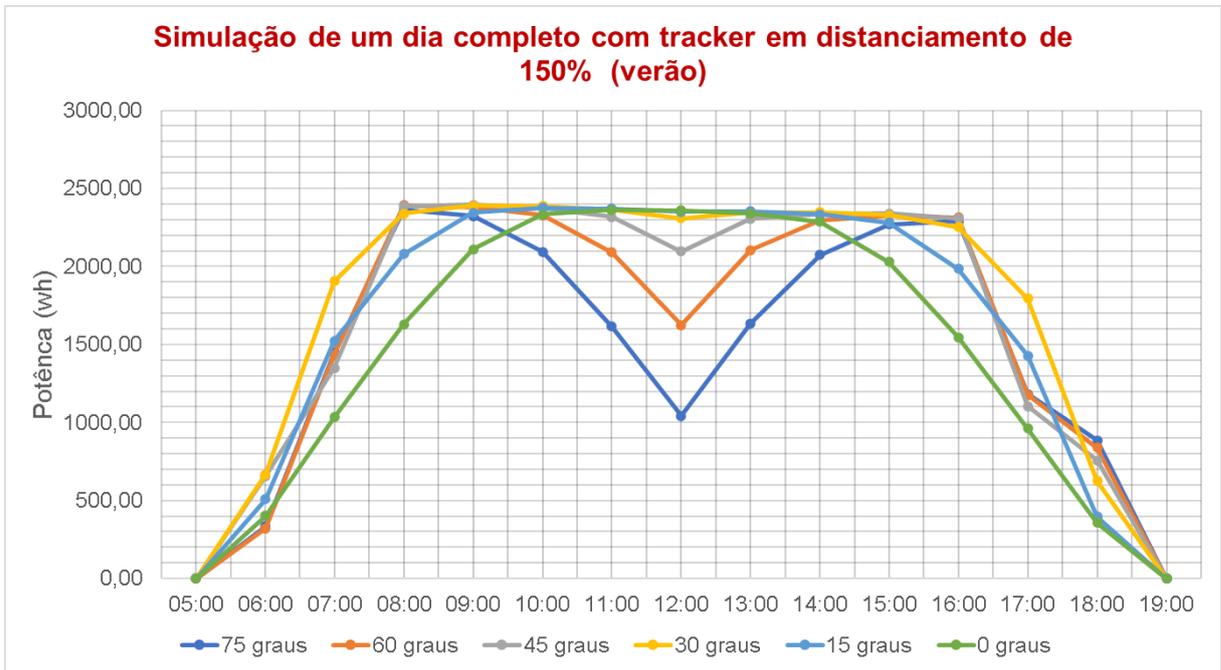
ISSN 2359-1757, DOI 10.5151/chemeng-cobeq2014-1188-20561-183983

PORTAL SOLAR, **Seguidor solar – Tracker: vantagens e desvantagens**, disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/painel-solar/seguidor-solar-tracker-vantagens-e-desvantagens.html>>. Acesso em 08 de nov. de 2021.

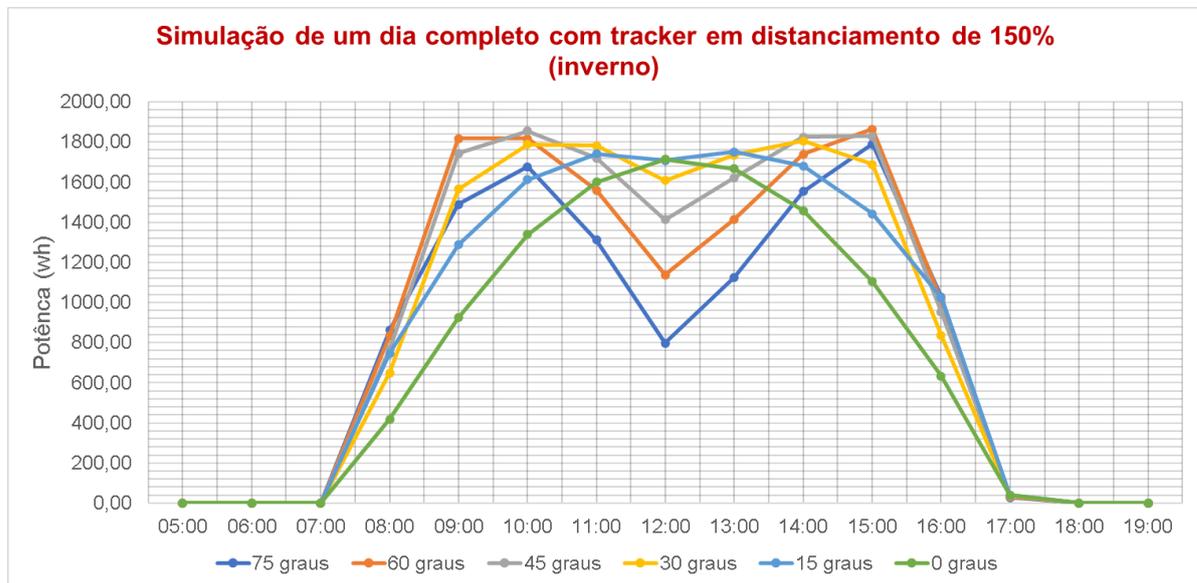
RIBEIRO, Sandro Carneiro; PRADO, Pedro Paulo Leite Do; GONÇALVES, João Bosco. **Projeto e desenvolvimento de um rastreador solar para painéis fotovoltaicos**; 2012; Dissertação (Mestrado em Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica) - Universidade de Taubaté. Resende - RJ, 2012.

TONIAZZO, Eduardo Cardoso. **Estudo de viabilidade para implementação de um sistema fotovoltaico com rastreamento solar**; 2019; Dissertação (Graduação em Engenharia Elétrica) - Unijuí. Ijuí- RS, 2019.

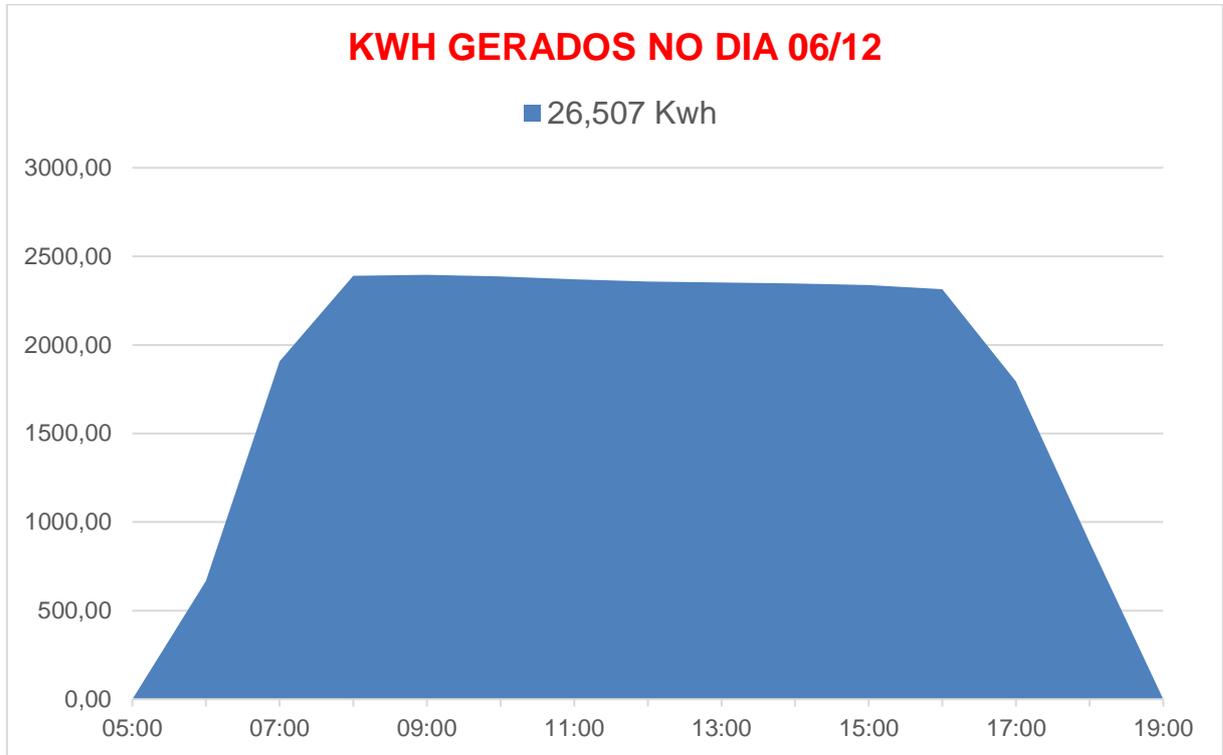
Apêndice 3.



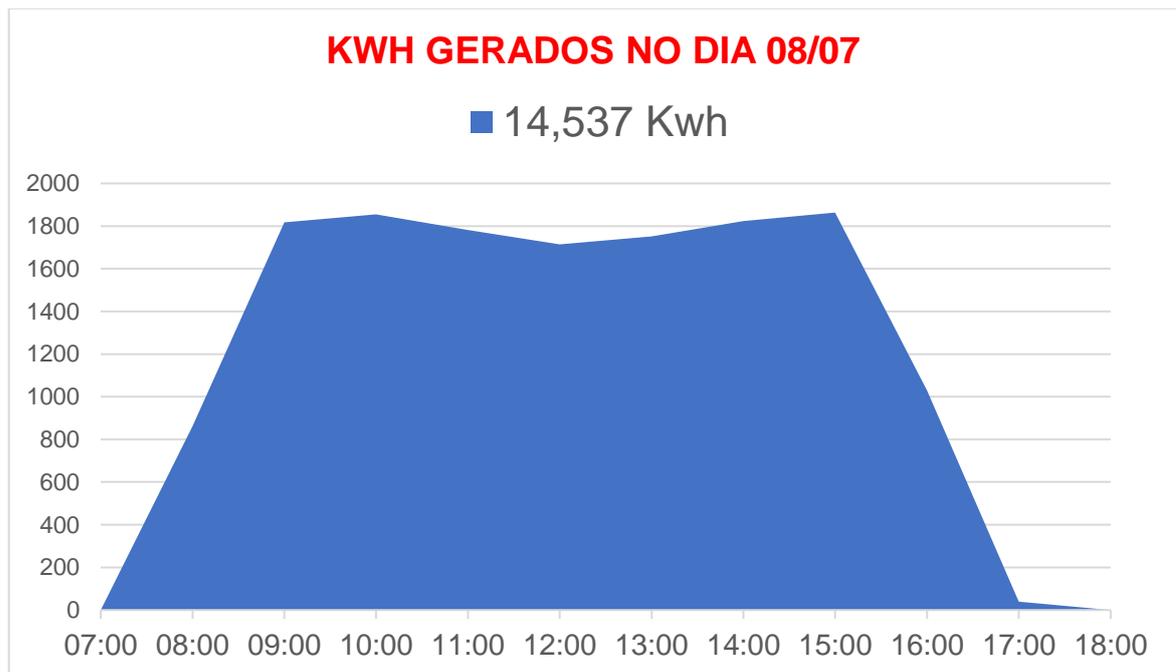
Apêndice 4.



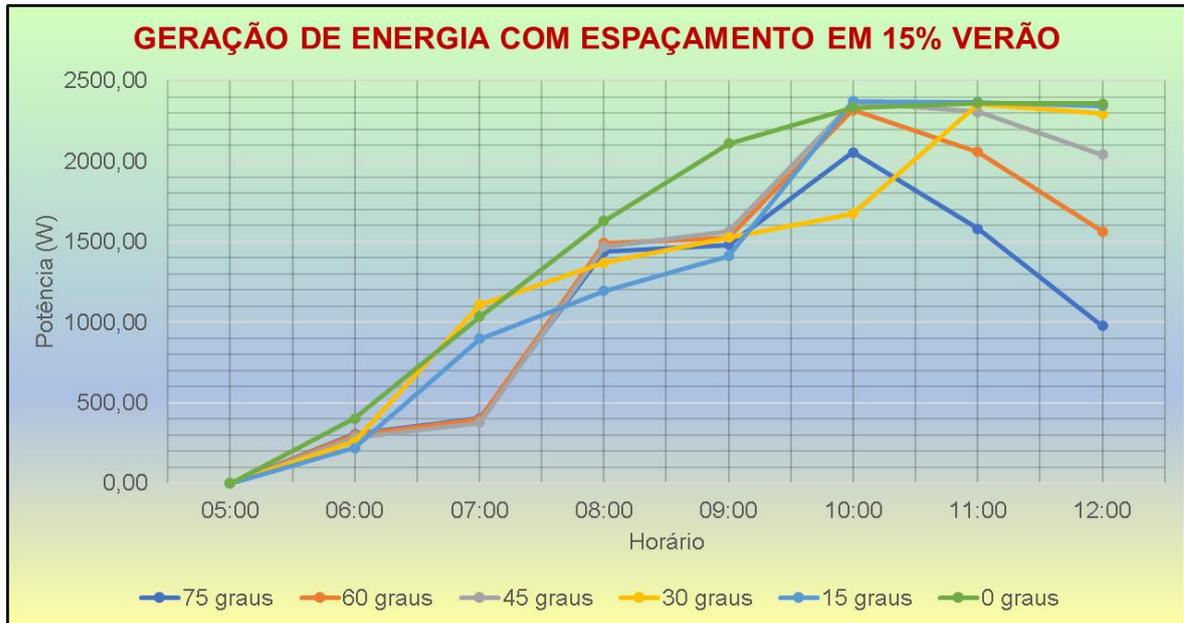
Apêndice 5.



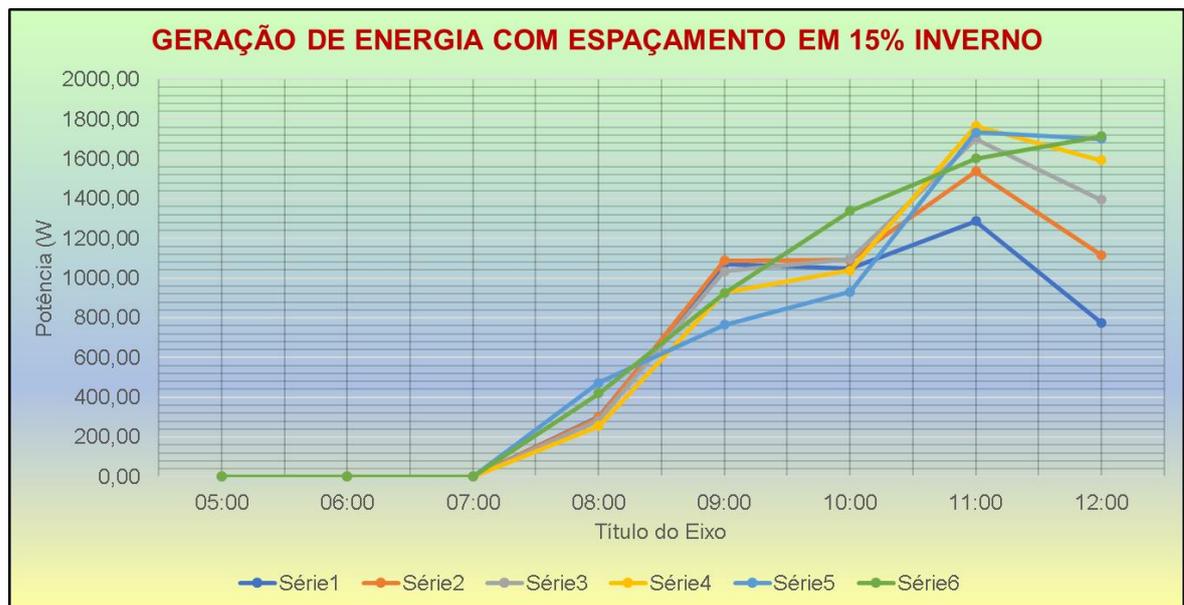
Apêndice 6.



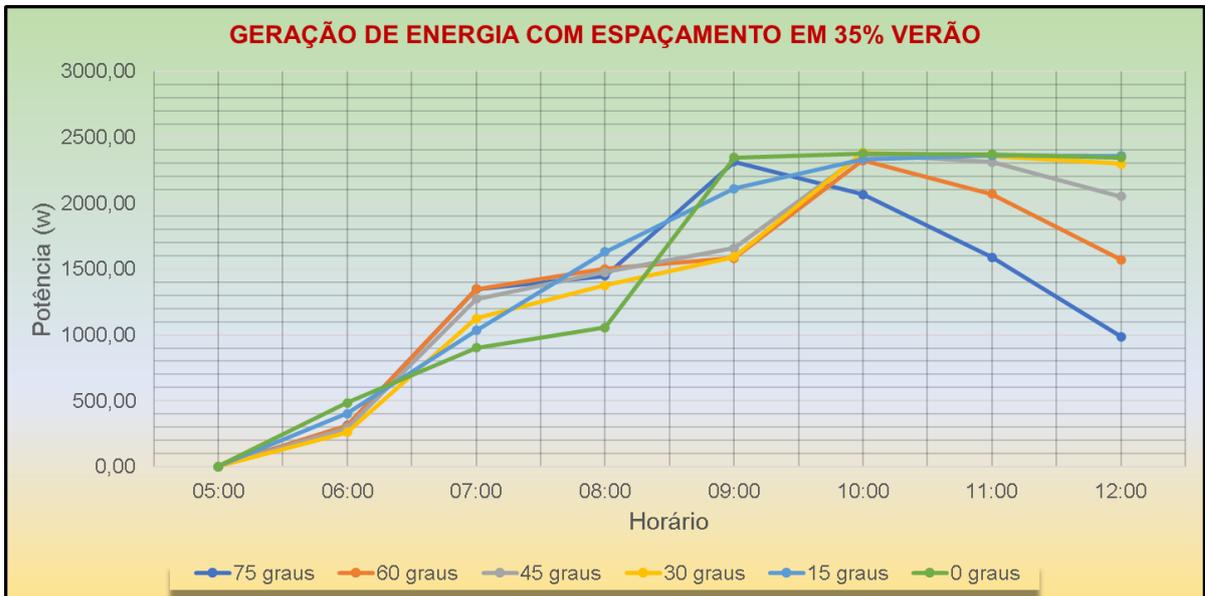
Apêndice 7.



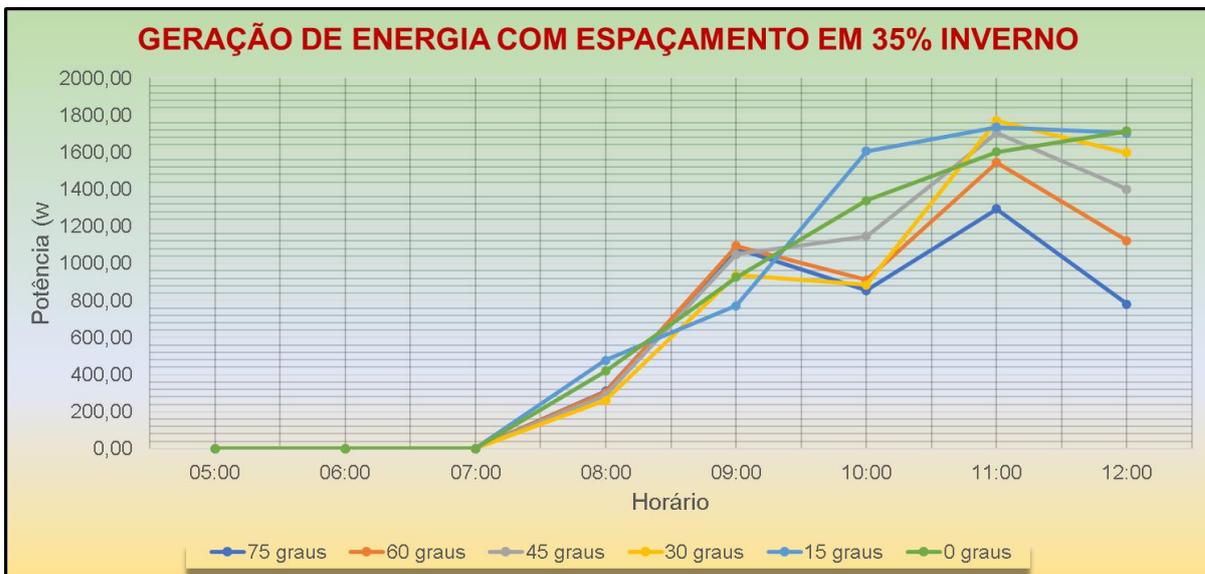
Apêndice 8.



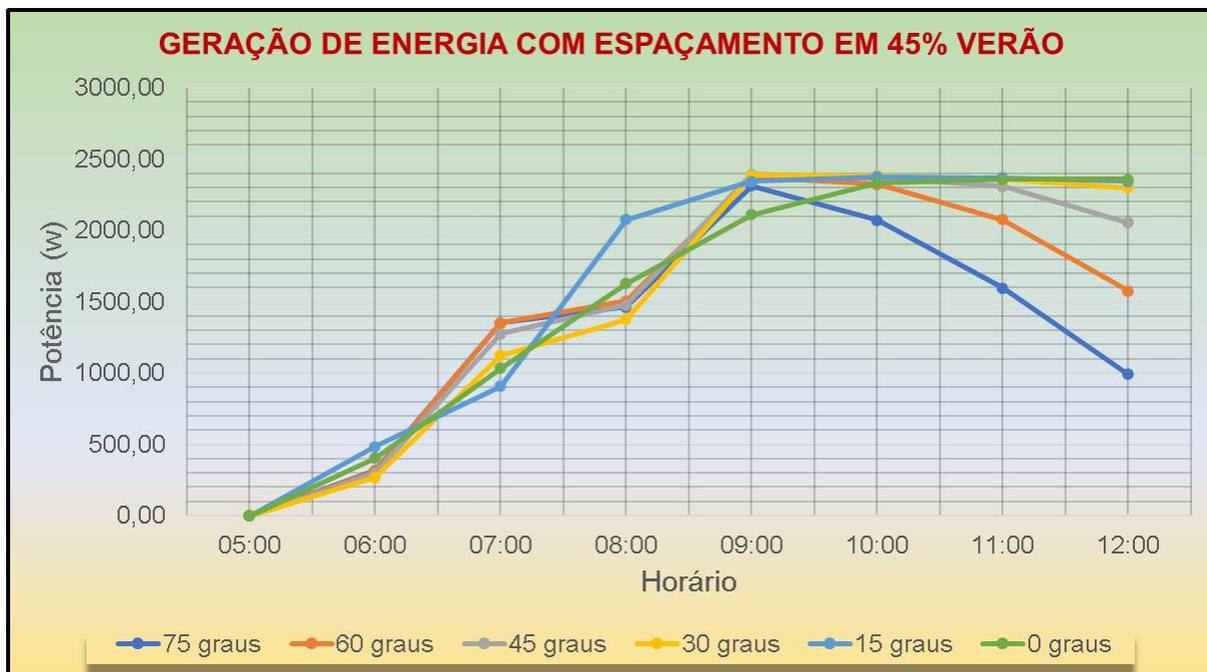
Apêndice 9.



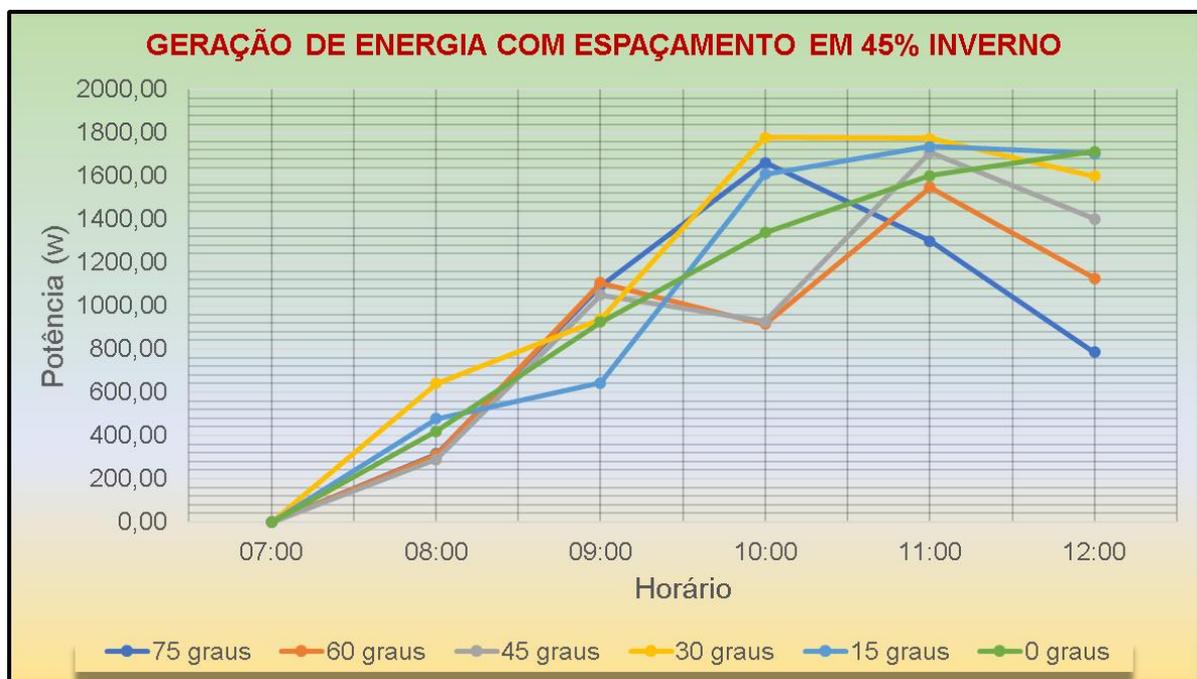
Apêndice 10.



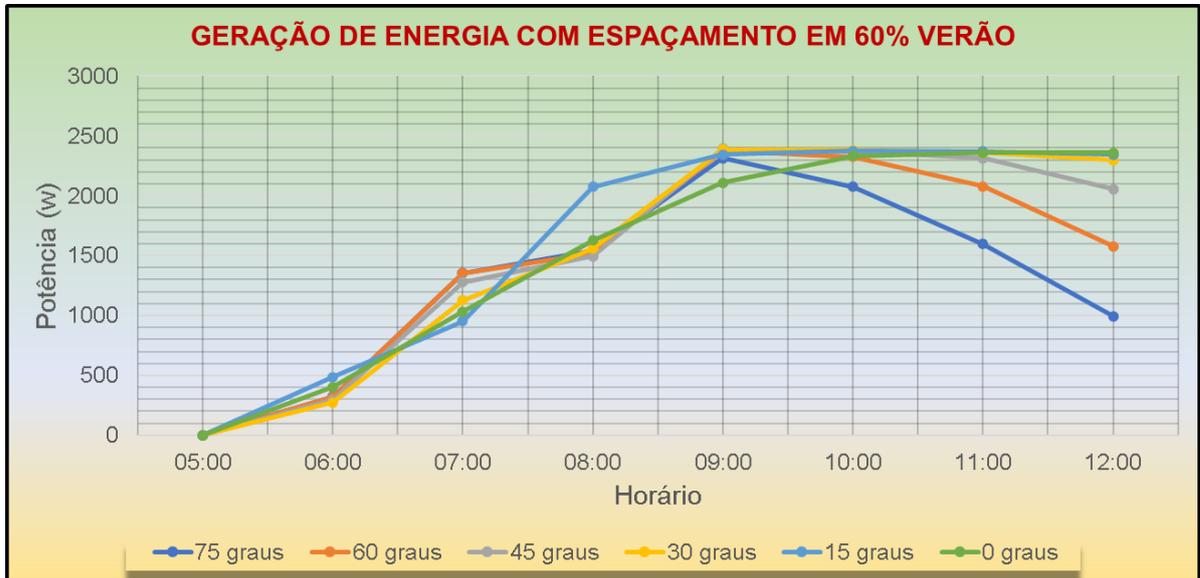
Apêndice 11.



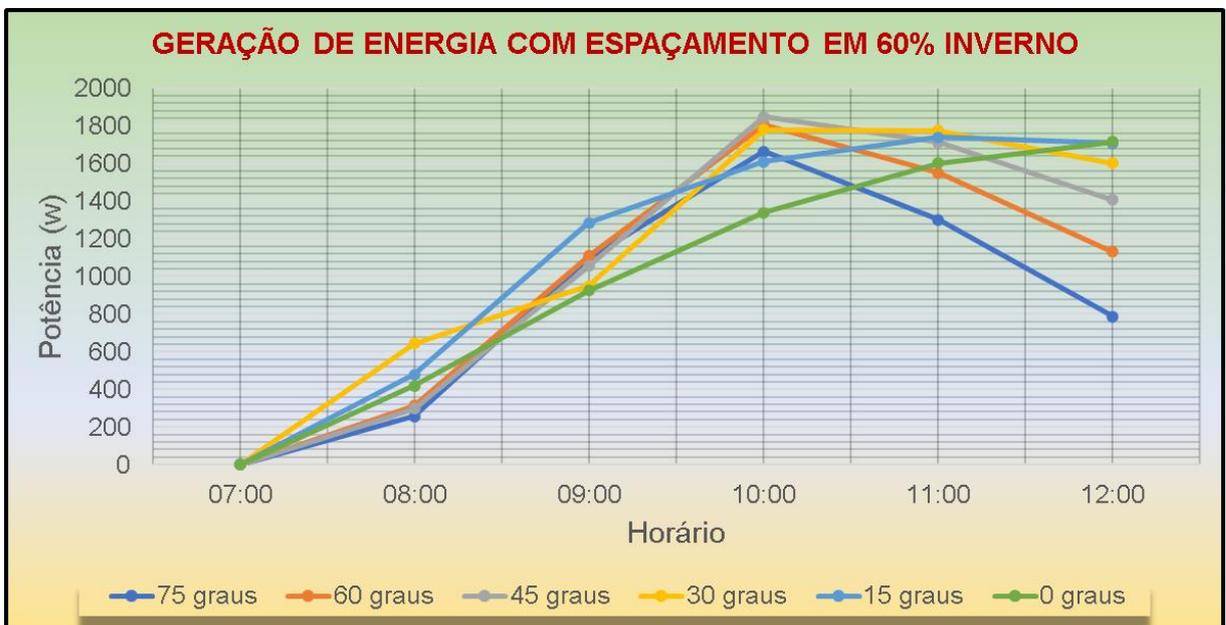
Apêndice 12.



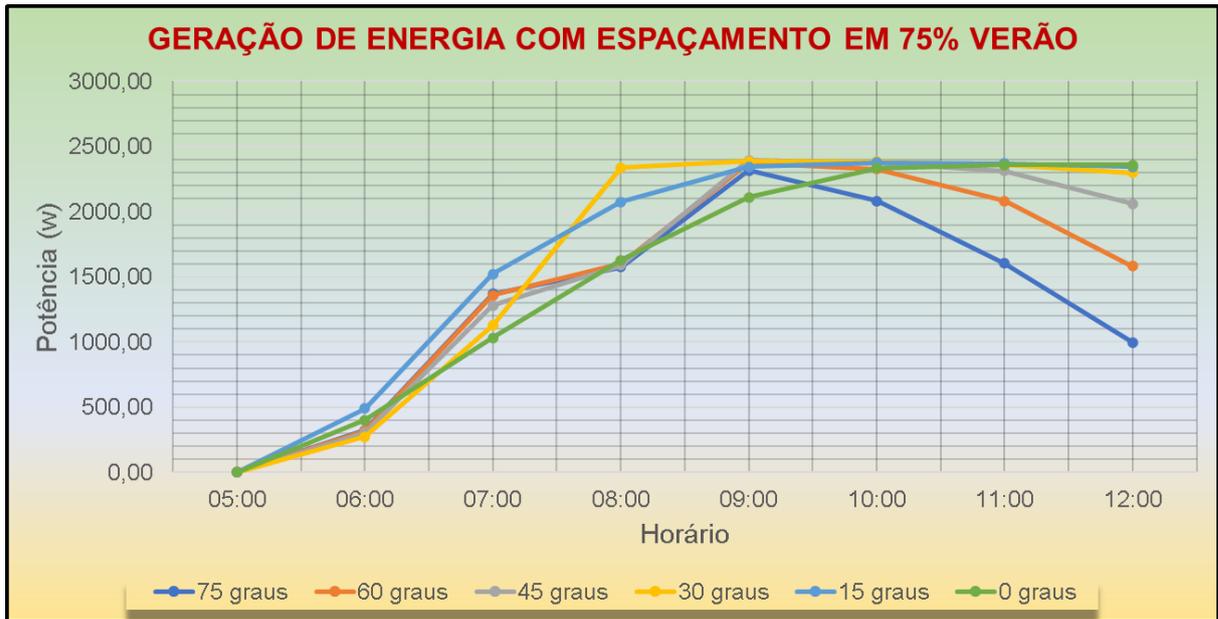
Apêndice 13.



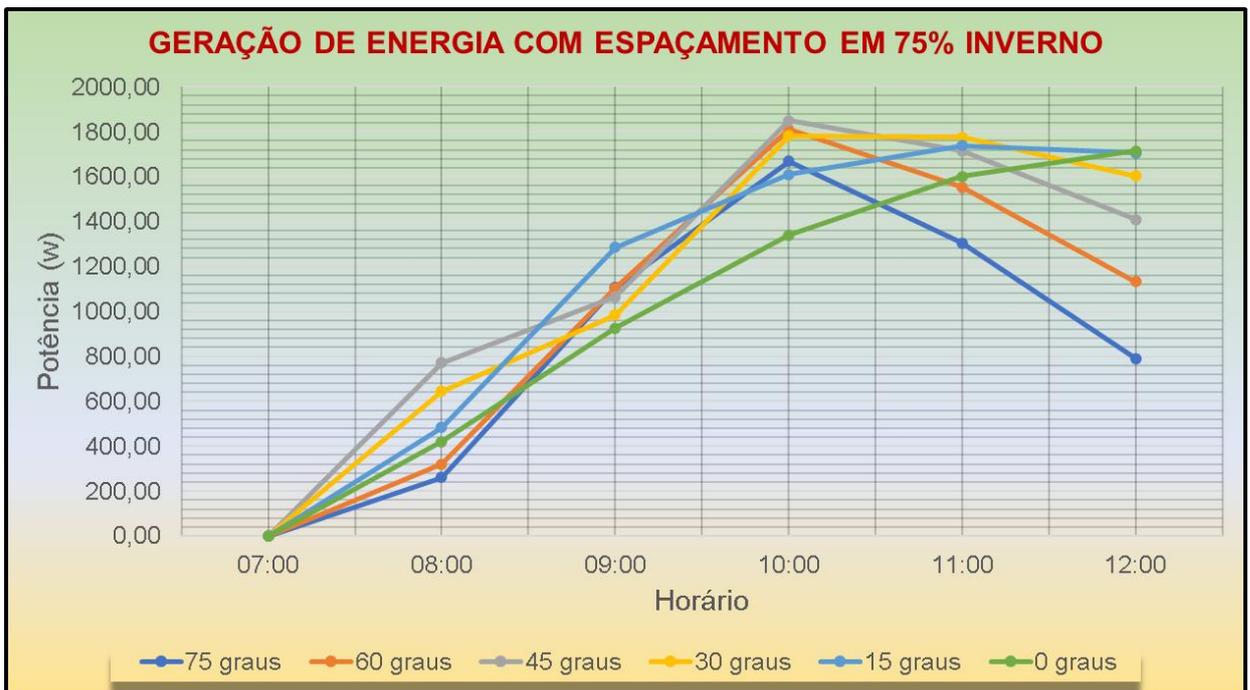
Apêndice 14.



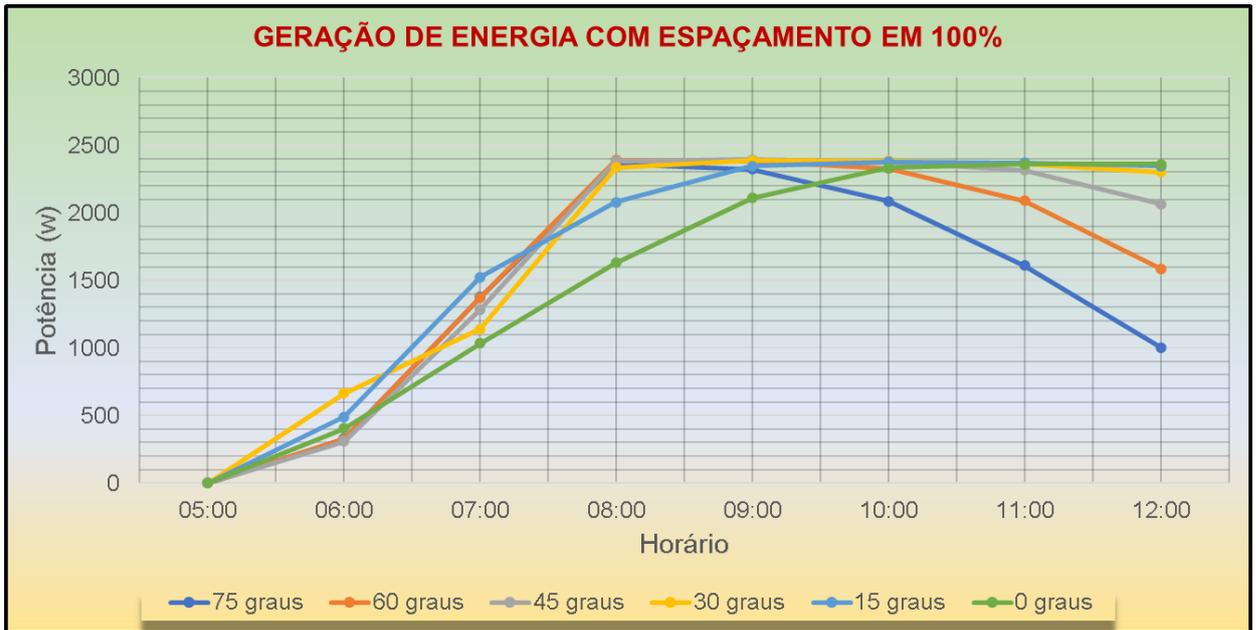
Apêndice 15.



Apêndice 16.



Apêndice 17.



Apêndice 18.

