

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

SISTEMA MÓVEL AUTÔNOMO DE ELIMINAÇÃO SELETIVA DE ERVAS
DANINHAS APLICADO AO AUMENTO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE
USINAS SOLARES BIFACIAIS

por

William Henry Braunstein Dawson

Porto Alegre – Julho de 2024

Sistema móvel autônomo de eliminação seletiva de ervas daninhas aplicado ao aumento de eficiência energética de usinas solares bifaciais

por

William Henry Braunstein Dawson

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre – Julho de 2024

CIP - Catalogação na Publicação

Dawson, William Henry Braunstein
Sistema móvel autônomo de eliminação seletiva de
ervas daninhas aplicado ao aumento de eficiência
energética de usinas solares bifaciais / William Henry
Braunstein Dawson. -- 2024.

33 f.

Orientador: Eduardo André Perondi.

Coorientador: André Tura Markus.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2024.

1. Usina fotovoltaica. 2. Energia solar. 3.
Protótipo. 4. Plantas daninhas. I. Perondi, Eduardo
André, orient. II. Markus, André Tura, coorient. III.
Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

William Henry Braunstein Dawson

PROJETO DE SISTEMA MÓVEL PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA DE USINAS SOLARES BIFACIAIS ATRAVÉS DE CONTROLE
SELETIVO DE ERVAS DANINHAS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

ENGENHEIRO MECÂNICO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Ignácio Iturrioz
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Eduardo André Perondi

Coorientador: Prof. Dr. André Tura Markus

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Eduardo André Perondi (presidente)

Prof. Dr. Herbert Martins Gomes

Prof. Dr. Tiago Becker

Dr. Geomar Mateus Corassa

Porto Alegre – Julho de 2024

Dedico este trabalho a meus familiares que sempre acreditaram no meu potencial e me ajudaram durante toda a graduação, apoiando e incentivando na elaboração deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

No decorrer de um trabalho de conclusão de curso sempre haverá muitos agradecimentos e, em uma área multidisciplinar, essa gratidão é multiplicada, passando por várias pessoas que contribuíram de forma significativa para que este trabalho pudesse tornar-se realidade.

Agradeço o Professor Dr. Eduardo André Perondi, meu orientador, que no decorrer de minha graduação sempre acreditou no meu potencial, convidando para fazer parte do Laboratório de Mecatrônica e Controle (LAMECC) e aconselhando no decorrer do tempo como bolsista e orientando.

Agradeço, em seguida, o Professor Dr. André Tura Markus, que mesmo chegando na fase final da minha graduação, inspirou com incontáveis conselhos e colaborações e sem o qual, este trabalho não seria possível.

Agradeço também a Cooperativa Central Gaúcha Ltda. (CCGL) e sua equipe, principalmente nas figuras do Dr. Geomar Mateus Corossa, Sr. Claudinei Jacobowski e a Sra. Bruna Ignez Kloeckner pela apresentação do problema e disponibilização de material e componentes sempre que necessário.

Agradeço ao LAMECC pela estrutura para desenvolvimento do trabalho e por me acolher durante pouco mais de um ano, capacitando para a resolução de problemas de engenharia e soluções de simulação computacional.

Agradeço ao Professor Dr. José Antônio Valle Antunes Junior, que me apoiou e ajudou sempre que precisei, ensinando sobre os conceitos de engenharia da produção.

Agradeço aos Srs. Gabriel Rigo Pigosso, Felipe Almeida Stenger e Gabriel Souza Mozel por todo apoio na criação da simulação, protótipo e entendimento dos sensores respectivamente.

Agradeço a Sra. Paula Janovik Diehl pelo incentivo imensurável no decorrer da graduação e na elaboração deste trabalho.

Agradeço à comissão de graduação de engenharia mecânica por estar possibilitando a formação e difusão de conhecimento nas áreas pertinentes à Engenharia Mecânica.

Dawson, William Henry Braunstein. **Sistema móvel autônomo de eliminação seletiva de ervas daninhas aplicado ao aumento de eficiência energética de usinas solares bifaciais**. 33 p. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

RESUMO

O contexto deste trabalho de conclusão está associado às questões ambientais, de segurança dos trabalhadores e à eficiência na geração de energia. Ele decorre da percepção de perda de eficiência da transformação energética por placas fotovoltaicas bifaciais em uma usina onde ocorre crescimento de plantas sob as placas. Esse trabalho baseou-se na usina da Cooperativa Central Gaúcha Ltda, em Cruz Alta - RS. Seus objetivos são o de identificar formas seguras de aumentar a eficiência da usina, desenvolver um protótipo preliminar para eliminação seletiva de ervas daninhas e descrever o processo de desenvolvimento e seus resultados. Para tanto, desenvolveu-se um sistema de aspersão de herbicida, realizou-se a simulação do acionamento do sistema, considerando seus sensores e o movimento do robô, e criou-se um protótipo preliminar sem capacidade de deslocamento e sensor de clorofila, mas capaz de permitir a avaliação de suas principais características. Adicionalmente, um sistema de controle e monitoramento (padrão SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition) foi implantado, considerando seu futuro uso em um sistema robótico móvel. A partir dos resultados deste trabalho, que integra elementos de engenharia, descreve o projeto conceitual e físico de um dispositivo para melhorar a eficiência energética da usina, buscando sua capacidade nominal.

Palavras-chave: Usina fotovoltaica. Energia solar. Protótipo. Plantas daninhas.

Dawson, William Henry Braunstein. **Autonomous mobile system for selective weed removal applied to increasing the energy efficiency of bifacial solar plants**. 33 p. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

ABSTRACT

The context of this monography is associated with environmental issues, worker safety, and energy generation efficiency. It derives from the perception of reduced energy transformation efficiency in bifacial photovoltaic panels in a plant where weeds grow beneath the panels. This monography was based in the Cooperativa Central Gaúcha Ltda plant in Cruz Alta - RS. Its objectives are to identify safe ways to increase the plant's efficiency, develop a preliminary prototype for selective weed elimination, and describe the development process and its results. To accomplish this, an herbicide spraying system was developed, its actuation simulated, considering its sensors and the robot's movement, and a preliminary prototype without mobility and chlorophyll sensor was created, but capable of evaluating its main features. Additionally, a control and monitoring system (SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition) was implemented, considering its future use in a mobile robotic system. Based on the results, this study integrates engineering elements, describing the conceptual and physical design of a device to improve the plant's energy efficiency, aiming to reach its nominal capacity.

Keywords: Photovoltaic plant. Solar power. Prototype. Weeds.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Principais fatores que influem na eficiência de geradores fotovoltaicos bifaciais. | 3 |
| Figura 2 - Planta de Leite em pó da CCGL localizada em Cruz Alta - RS. | 4 |
| Figura 3 - Mapeamento da usina solar em estudo. | 6 |
| Figura 4 - Disposição e dimensões das placas solares utilizadas na usina. | 7 |
| Figura 5 - Protótipo utilizado para prova de conceito do projeto. | 8 |
| Figura 6 - Lógica do circuito eletrônico, para acionamento da válvula solenoide de disparo do herbicida. | 9 |
| Figura 7 - Esquema de abertura e funcionamento da válvula solenoide. | 10 |
| Figura 8 - Experimento de medição do alcance do jato. | 10 |
| Figura 9 - Esquema de funcionamento de um sensor capacitivo. | 11 |
| Figura 10 - Espaço simulado da usina, contando com alguns painéis solares e o artefato do projeto. | 12 |
| Figura 11 - Fluxograma da operação simulada no sistema MatLab/Simulink. | 12 |
| Figura 12 - Sistema programado no ambiente MatLab/Simulink. | 13 |
| Figura 13 - Simulação da rotação e deslocamento do robô, em relação à distância percorrida. | 14 |
| Figura 14 - Resultados da simulação, com gráficos em relação à distância percorrida do nível de fluido, sensor de clorofila, botão e acionamento da válvula solenoide. | 14 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|---------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas e Técnicas |
| AGO | Assembleia Geral Ordinária |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| BEN | Balanco Energético Nacional |
| BRDE | Banco Regional de Desenvolvimento do Extremo Sul |
| CA | Corrente Alternada |
| CC | Corrente Contínua |
| CCGL | Cooperativa Central Gaúcha Ltda. |
| CH | Distância do ponto mais baixo da placa até o solo |
| CSP | Energia Solar Concentrada |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária |
| ESG | <i>Environmental, Social and Governance</i> |
| GCR | Razão da cobertura do solo |
| NBR | Norma Brasileira Regulamentadora |
| NREL | Laboratório Nacional de Energia Renovável |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| OPC | <i>Open Platform Communication</i> |
| pH | Potencial Hidrogeniônico |
| PV | Energia Solar Fotovoltaica |
| RS | Rio Grande do Sul |
| SCADA | <i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> |
| STE | Energia Solar Térmica |

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos

| | | |
|-------------------|---------------------------------------|---------------------|
| P_{total} | Pressão total | [Pa] |
| $P_{entrada}$ | Pressão de entrada | [Pa] |
| g | Aceleração da gravidade | [m/s ²] |
| h | Altura do orifício | [m] |
| V_{vc} | Velocidade média de saída do orifício | [m/s] |
| $P_{atmosférica}$ | Pressão atmosférica ao nível do mar | [Pa] |
| Q | Vazão | [L/h] |
| A_{vn} | Área do ponto de maior velocidade | [m ²] |
| A_o | Área do orifício | [m ²] |
| C_d | Coefficiente de descarga | |
| D_o | Diâmetro do orifício | [mm] |

Símbolos gregos

| | | |
|----------|--|-----------------------|
| α | Razão de irradiação do lado traseiro/frontal | |
| β | Ângulo de inclinação | [graus] |
| γ | Azimute | [graus] |
| ρ | Massa específica do sólido | [kg m ⁻³] |
| π | Constante Matemática | |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2 OBJETIVO | 2 |
| 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 2 |
| 3.1 Geradores fotovoltaicos..... | 2 |
| 3.2 Fatores que reduzem a eficiência de geradores fotovoltaicos bifaciais..... | 3 |
| 3.3 Tecnologias de aspersão | 3 |
| 4 METODOLOGIA..... | 4 |
| 4.1 A empresa | 4 |
| 4.2 A usina..... | 5 |
| 4.3 Solução | 6 |
| 4.4 O protótipo..... | 8 |
| 4.4.1 Subsistema hidráulico..... | 8 |
| 4.4.2 Subsistema eletrônico | 8 |
| 4.4.3 A simulação | 9 |
| 5 RESULTADOS | 9 |
| 5.1 Construção do protótipo | 9 |
| 5.2 Lógica do circuito eletrônico do protótipo | 10 |
| 5.3 Simulação da operação | 11 |
| 6 CONCLUSÕES | 15 |
| 6.1 Sugestões para trabalhos futuros | 15 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 16 |
| ANEXO A - TECNOLOGIAS DE ASPERSÃO | 19 |
| ANEXO B - HERBICIDAS NECESSÁRIOS | 19 |
| APÊNDICE A - USINA FOTOVOLTAICA DA CCGL | 19 |
| APÊNDICE B - CÁLCULO DO BOCAL | 19 |
| APÊNDICE C – CONCEITO PRELIMINAR | 21 |
| APÊNDICE D - CIRCUITO ELETRÔNICO | 21 |

1 INTRODUÇÃO

O mundo globalizado passa por grandes transformações focadas nos princípios ESG (do inglês *Environmental, Social and Governance*), onde cada letra da sigla significa uma das grandes preocupações que o mundo necessita transformar em ações de melhorias ambientais, sociais e de governança. Estes princípios foram fortemente apoiados em 2015 por 193 países da Assembleia Geral da ONU (Organização das Nações Unidas), onde foram definidos 17 objetivos globais interligados ao desenvolvimento sustentável. Dentre estes objetivos, estão aqueles ligados à proteção do meio ambiente. Portanto, neste campo, de acordo com a ONU, entram todas as condições de uma matriz energética com menor pegada de carbono e maior preocupação com o uso de energias renováveis.

Segundo Pinho e Galdino (2014), o território brasileiro recebe elevados índices de irradiação solar quando comparado com países europeus, por exemplo. Os autores destacam que a tecnologia fotovoltaica já é significativamente disseminada para a produção de energia elétrica no Brasil, porém constatam que o avanço da tecnologia no Brasil tem passado por fases de crescimento e períodos com dificuldades.

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2023, historicamente, o Brasil tem tido uma matriz energética focada principalmente em hidroelétricas. Porém, destaca-se recentemente o forte avanço na construção de usinas solares e eólicas, tendo, segundo a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), da energia total gerada em 2024, a energia solar e eólica representado 17% e 12,9%, respectivamente. No Rio Grande do Sul em especial, devido à sua localização geográfica e aos mapas de ventos do estado, a geração eólica se concentrou no litoral e a geração solar se espalhou por todo território. Segundo Mariano *et al* (2023), a energia solar se popularizou, com as políticas de incentivo à energia solar do Ministério de Minas e Energia, como o Novo Marco da Energia Solar de 2022, chegando às residências e em muitas empresas.

A autoprodução de energia através de usinas fotovoltaicas constitui tanto um elemento sustentável como uma opção de redução dos custos com energia elétrica contratada das concessionárias. Contudo, de acordo com Mahajan (2012), também existem impactos negativos da tecnologia: o custo em carbono para a manufatura dos componentes, sua vida útil e a dificuldade de reciclagem das placas solares. A evolução tecnológica na geração fotovoltaica traz artefatos cada vez mais eficientes, sendo este o caso das placas bifaciais, que, diferente das monofaciais, transformam a irradiação solar em ambos os lados, além da instalação de buscadores solares, que permitem que a placa siga a trajetória do sol.

Segundo Stein (2018) em seus estudos na NREL (Laboratório Nacional de Energia Renovável), este tipo de placa tem capacidade de geração 9% superior às monofaciais, com um custo semelhante. No entanto, ainda há desafios a serem vencidos na melhoria dos processos de captação. Este é o caso das grandes usinas solares que ocupam vários hectares de área, sendo geralmente implantadas em terreno rural. Para alcançar maior eficiência, são colocadas em terreno coberto por pedras de cor branca, que refletem luz de volta para a placa e, assim, aumentam a incidência solar e proporcionam maior transformação energética. Segundo Toppman (2019), o crescimento de ervas daninhas tem se tornado um importante fator redutor da eficiência de transformação de solar em energia elétrica desses sistemas, pois reduzem o coeficiente de reflexão do solo. As possíveis alternativas de controle consistem na contratação de pessoas especializadas em corte e na retirada destas plantas ou na colocação convencional de produtos químicos herbicidas. No entanto, ambas

as formas são consideradas impróprias, pois exigem que os trabalhadores fiquem expostos a riscos elevados devido à possibilidade de acidentes em um ambiente carregado de energia elétrica.

Uma solução inovadora é a que propõe o presente trabalho, na qual um mecanismo de aspersão controlada de herbicida é colocado sobre um robô móvel comercial para detectar e eliminar as ervas daninha localizadas sob os painéis solares bifaciais da usina.

2 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é o de desenvolver um sistema autônomo capaz de reduzir a presença de plantas daninhas no solo abaixo das placas solares bifaciais. Para tanto, serão buscados os seguintes objetivos específicos:

- a) Identificar soluções possíveis para o problema levando em consideração a segurança dos trabalhadores;
- b) Projetar um sistema autônomo de controle seletivo com relação à presença de plantas;
- c) Descrever conceitualmente a operação do protótipo do sistema.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

De forma a discorrer sobre a aplicação de herbicida de forma controlada em usinas solares bifaciais, é necessária uma apresentação dos principais tópicos envolvidos: geradores fotovoltaicos; fatores que reduzem a eficiência dos geradores fotovoltaicos bifaciais; tecnologias de aspersão existentes.

3.1 Geradores fotovoltaicos

O Protocolo de Kyoto foi criado com o objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa nos países signatários e, portanto, estimula a utilização de fontes renováveis de energia, tal como a solar (Oliveira Filho *et al*, 2009).

Segundo Singhal *et al* (2015), a energia solar é dividida em três grandes grupos: I) a energia solar térmica (STE) e energia solar concentrada (CSP), que transformam a irradiação solar em vapor; II) a energia solar passiva, que é utilizada para aquecer espaços através de materiais que absorvam calor ou permitam a passagem de calor; III) a energia solar fotovoltaica (PV), que utiliza painéis solares, monofaciais ou bifaciais para converter a irradiação solar em corrente contínua, utilizada para abastecer a população e indústrias.

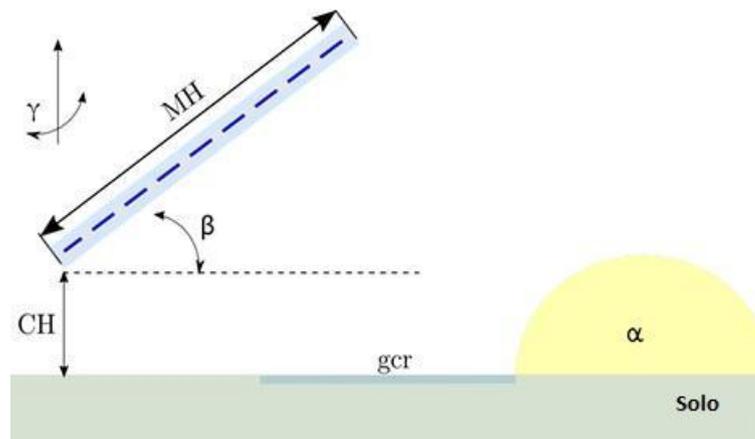
O foco do trabalho se dará na utilização da energia solar fotovoltaica grupo III. Genericamente, uma usina solar consiste em uma instalação que converte a energia térmica no formato de irradiação solar em energia elétrica de forma limpa e renovável. Segundo Luceño-Sánchez (2019), ela é composta por uma série de painéis solares, os quais contêm células fotovoltaicas feitas de materiais semicondutores, como o arsenieto de gálio (GaAs) e principalmente o silício (Si). De acordo com Asdrubali e Desideri (2017), quando os raios solares atingem essas células, elas geram eletricidade através do efeito fotovoltaico, fenômeno observado primeiramente por Hertz, 1887 e Becquerel, 1939. Neste cenário, é de grande importância maximizar a eficiência de tais painéis.

3.2 Fatores que reduzem a eficiência de geradores fotovoltaicos bifaciais

Segundo Sánchez *et al* (2020), existem 7 principais fatores que podem reduzir a eficiência de geradores fotovoltaicos bifaciais: o coeficiente de reflexão do solo, com medida de 0 a 1; a razão de irradiação do lado traseiro/frontal (α), também medido de 0 a 1; a altura entre o ponto mais baixo da placa até o solo (CH), o ângulo de inclinação (β), a altura modular (MH), que impacta na possibilidade de coletar irradiação traseira; o azimute (γ); e a razão da cobertura do solo (gcr). Esses fatores estão mostrados de maneira visual na Figura 1.

De acordo com a *Enel Green Power*, empresa que gerencia mais de 1.300 usinas solares, esse coeficiente de reflexão do solo é de 0,1 a 0,3 em solo com vegetação natural, com fatores como a neve aumentando para até 0,5 e lâmina de água diminuindo para perto de 0%. O controle de ervas daninhas e deposição de pedras de cor branca na superfície sob os painéis solares serve para aumentar esse coeficiente.

Figura 1 - Principais fatores que influem na eficiência de geradores fotovoltaicos bifaciais.



Fonte: Sánchez *et al.* (2020)

3.3 Tecnologias de aspersão

A aplicação de herbicidas representa, segundo Kraehmer (2014), parcela significativa do custo total da produção agrícola e o uso excessivo de herbicidas pode levar a sérios problemas no meio ambiente, como aumentar a resistência de ervas daninhas a certos produtos químicos e queda na biodiversidade. Porém, ainda consiste no método mais eficiente e fácil de controle de plantas daninhas. Portanto, é de suma importância que a aspersão seja feita de maneira controlada e econômica.

Segundo Ahmad *et al* (2021), as tecnologias de aspersão de herbicida atualmente mais utilizadas são divididas em terrestres e aéreas, tendo como principais equipamentos os pulverizadores e os drones. Os pulverizadores são extremamente ineficientes economicamente, pois dispersam herbicida indiscriminadamente em toda uma área. A partir deste problema, surgem os sensores de clorofila, que ajudam a detectar e aplicar de forma controlada o herbicida, ou seja, diretamente na planta daninha. Os drones de pulverização são um avanço em relação aos aviões e helicópteros, pois conseguem ser mais econômicos e eficazes, por possibilitar uma aplicação mais próxima do solo, criando também menor turbulência no ar. Segundo Okzan (2024), os drones de pulverização também têm a vantagem de poder utilizar discos rotativos, apresentados no Anexo A,

Figura A.1, que evitam os problemas de entupimento dos bocais tradicionais e conseguem uma aplicação mais uniforme, pois o tamanho das gotas depende da aceleração centrípeta gerada pelo disco rotativo (EMBRAPA, 2006).

4 METODOLOGIA

O presente trabalho é desenvolvido tomando como base uma usina de geração de energia fotovoltaica de um laticínio de grande porte, o qual pertence ao sistema cooperativo do Rio Grande do Sul, de acordo com o site da empresa. A usina foi projetada em 2022 e instalada em 2023 e deverá iniciar a plena operação no segundo semestre de 2024. Nas próximas seções é realizada a apresentação da empresa, na Seção 4.1. Na Seção 4.2 é apresentado o funcionamento de uma usina solar e seus componentes, enquanto que na Seção 4.3 é proposta uma solução para o problema de controle populacional de ervas daninhas e, por fim, na Seção 4.4 será apresentado o protótipo conceitual.

4.1 A empresa

A usina de geração de energia solar pertence à Cooperativa Central Gaúcha e está localizada na cidade de Cruz Alta, RS. A cooperativa foi fundada em 1976 e conta com três unidades de negócios: laticínio, logística e tecnologia. Segundo Dawson Junior (2022), a CCGL é uma cooperativa de segundo grau, ou seja, uma cooperativa de cooperativas, contando com 32 associadas e, a estas cooperativas estão associados cerca de 171.000 produtores agropecuários do RS. A CCGL tem por missão ser uma organização para integrar as atividades do agronegócio com sustentabilidade, escala e rentabilidade, gerando diferenciais competitivos aos seus produtores. O laticínio da CCGL atende a 15 % do consumo de leite em pó no Brasil e conta com a maior planta de leite em pó do país, apresentada na Figura 2, com a capacidade de 3.400.000 l/dia. O faturamento da CCGL, segundo documento interno da Assembleia Geral Ordinária (AGO), cujos dados foram cedidos para o trabalho, em 2023 chegou em R\$ 2 bilhões em suas três unidades. Dentre os principais elementos de custo da planta, estão a matéria-prima, os recursos humanos e a energia elétrica. A gestão da cooperativa tem se pautado por constante responsabilidade ambiental, buscando entre outras ações a reutilização da água obtida a partir da secagem do leite para transformação em leite em pó e, mais recentemente, o uso de energia elétrica de fonte renovável, foco do presente trabalho.

Figura 2 - Planta de Leite em pó da CCGL localizada em Cruz Alta - RS.



Fonte: Elaborada pelo autor.

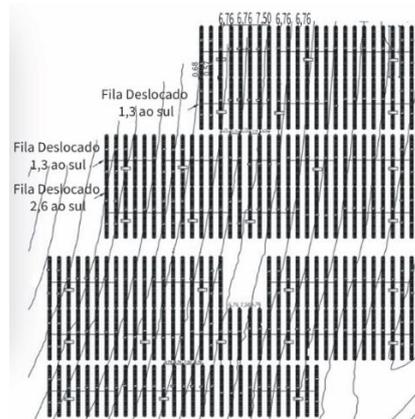
4.2 A usina

Os painéis solares são montados em estruturas articuladas visando maximizar a exposição aos raios solares. Segundo Poulek (1998), uma das formas com as quais esses seguidores solares funcionam é baseada no ângulo de incidência solar. As placas são originalmente instaladas para o leste. Assim, conforme o sol move-se de leste a oeste, o ângulo de incidência aumenta, até a energia gerada ser o suficiente para mover um motor CC utilizado para ajustar a disposição dos painéis. Isso ocorre até que o ângulo de incidência faça com que a energia solar gerada não seja mais suficiente para movimentá-lo. No protótipo original usavam-se pequenos painéis solares auxiliares para retornar à posição original, porém, na planta construída optou-se, conforme destacado por Poulek (1998), por utilizar painéis solares bifaciais para comandar a volta, usando a irradiação solar indireta no lado inferior das placas. A usina solar da CCGL possui uma estrutura móvel do tipo rastreadora (ou *tracker*), um pouco diferente da estudada por Poulek (1998), pois, de acordo com o manual do fabricante *Valmont Convert*, disponível digitalmente, ele utiliza microcontroladores baseados em relógios astronômicos para indicar a movimentação ideal, o que permite um melhor acompanhamento do movimento do sol ao longo do dia, tendo ao total 129 desses dispositivos instalados na área da usina.

Segundo a CCGL, em documento interno, cujos dados foram cedidos para o trabalho, a potência nominal da usina é de 3450,75 kWp, distribuída entre os 6450 módulos fotovoltaicos bifaciais instalados. A potência individual dos módulos é de 535W, podendo chegar a 642W por serem bifaciais, aproveitando a luz solar refletida pelo solo. Além disso, a usina possui 22 inversores de corrente elétrica, sendo 20 de 125 kW e 2 de 100 kW, responsáveis por converter a corrente contínua (CC) produzida pelos painéis fotovoltaicos em corrente alternada (CA), adequada para uso industrial. Para a distribuição da energia gerada, a usina conta com uma subestação elevadora equipada com um transformador de 2700 kVA. Isso permite que a eletricidade seja transmitida de forma eficiente para a rede elétrica.

A usina solar, representada na Figura 3, ocupa uma área de aproximadamente 7 hectares, com certo declive em sua topografia. Será a maior do Rio Grande do Sul, consistindo em uma fonte sustentável de energia que contribuirá para a redução das emissões de gases de efeito estufa e diminuição da dependência de combustíveis fósseis. Sua produção anual de energia será de aproximadamente 5.134.140 kWh, o que representará, assim que colocada em operação, 37% da demanda de energia da unidade industrial de Cruz Alta. O investimento total na usina de aproximadamente dezoito milhões de reais, sendo financiado pelo Banco Regional de Desenvolvimento do Extremo Sul – BRDE.

Figura 3 - Mapeamento da usina solar em estudo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

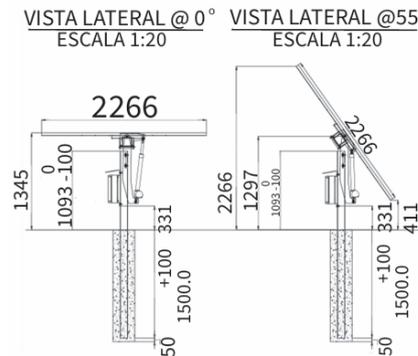
As placas foram posicionadas em uma área cujo solo foi revestido com uma camada de pedras de cor branca para aumentar a irradiação na parte inferior das placas. A usina pode ser vista no Apêndice A, Figura A.1, onde também são apresentados os sistemas de rastreamento (*trackers*) que posicionam as placas, além de ser possível observar parcialmente a vegetação que cresce no solo na parte inferior das placas.

4.3 Solução

A solução proposta para o controle seletivo de ervas daninhas foi inspirada nas máquinas de aspersão de herbicida que realizam essa operação de forma controlada em lavouras. Os sensores indicam onde e quanto de herbicida deve ser aplicado, de forma a evitar o uso excessivo do produto. Segundo Blackshaw *et al* (1994), o uso em demasia de herbicidas pode trazer diversos problemas como a alteração do pH e condutividade elétrica do solo, redução da população e atividade microbiana, fertilidade e disponibilidade de nutrientes e comprometer a composição nutritiva do solo através do declínio da matéria orgânica.

Propõe-se no contexto do presente trabalho o desenvolvimento de um sistema de aspersão de herbicida em escala reduzida, utilizando uma pequena bomba hidráulica, uma válvula de retenção para controlar a pressão e um bocal com área suficientemente pequena para alcançar aproximadamente metade da largura da placa solar padrão. Estes requisitos de projeto foram definidos baseados nas características da planta do estudo de caso e da necessidade de um jato localizado apenas na região onde for detectada clorofila, ao contrário da aspersão em uma área uniforme que seria obtida com o uso de discos pulverizadores. Desta forma o sistema móvel não poderá ter mais do que 400 mm de altura, no seu ponto de aspersão, e deverá ter pressão suficiente para lançar o herbicida a uma distância de até 1103 mm, ou seja, até metade da placa, conforme apresentado na Figura 4. Desta forma, uma varredura de cada lado cobre a área sob a placa, otimizando a trajetória e, assim, permitindo um aumento da eficiência energética da usina solar.

Figura 4 - Disposição e dimensões das placas solares utilizadas na usina.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A seguir são apresentadas algumas premissas do sistema a ser projetado, também baseadas nas características da planta do estudo de caso e nas demais características do sistema desejado:

- a) Para a unidade móvel propõe-se utilizar um robô com rodas omnidirecionais, ou seja, capaz de se movimentar em mais direções que o seu número de graus de liberdade, o que aumenta significativamente a flexibilidade e a manobrabilidade do robô, facilitando a navegação (Corke, 2017). O robô selecionado como base é a plataforma comercial “Husqvarna Automower 450X”, que foi selecionado, pois, de acordo com o manual do fabricante, o robô consegue seguir uma trajetória definida através de um sistema de fio guia. Esse sistema de fio guia foi escolhido por já ter uma interface nativa com o robô selecionado como base. O fio guia é enterrado no solo e cria um campo eletromagnético que o robô pode detectar por meio de decodificadores e seguir uma trajetória específica. O robô e o sistema de fio guia serão adquiridos e não serão desenvolvidos, pois o escopo do projeto é sua adaptação para a função de controle de ervas daninha.
- b) O tanque de herbicida adicionado deve ter seu volume controlado, o que será feito através de um sensor de nível de fluido, o qual não entrará em contato com o herbicida.
- c) A bomba utilizada para o projeto é do tipo centrífuga (utilizada largamente em aquários), de baixo custo, com o objetivo de aumentar a relação custo-benefício do projeto.
- d) O fluido bombeado deverá passar por uma válvula de retenção, com um ajuste de pressão de alívio, localizada no topo do tanque, de forma a maximizar a pressão do jato de herbicida sem prejudicar a bomba. Assim, caso o fluido passe da pressão pré-estabelecida, o sistema de alívio é acionado liberando o excesso de volta ao tanque.
- e) Para controle, é utilizada uma plataforma microcontrolada econômica, como os da família Arduino. Essa solução é considerada adequada por causa da sua plataforma de código aberto, baixo consumo, custo e facilidade de uso para pequenos projetos (Kondaveeti, 2021).
- f) Foi desenvolvido um controlador para comandar os disparos dos jatos de herbicida após a passagem do fluido na válvula de retenção por meio de válvula solenoide, quando o sensor de clorofila detecta presença de áreas verdes e a distância mínima, selecionada para evitar disparos consecutivos sobre a mesma área, for atingida.
- g) O sensor de clorofila escolhido é semelhante aos modelos das marcas WEED-IT e WeedSeeker, que utilizam sensores infravermelhos para detectar a presença da clorofila e distinguir áreas verdes que devem ser pulverizadas com herbicida.

h) Quanto aos herbicidas utilizados, em um estudo do solo feito pela CCGL, cujos resultados restritos foram cedidos para o trabalho, foram detectados 4 grupos de ervas daninha que estão presentes na área da usina, os quais podem ser visualizados no Anexo B, Tabela B.1, junto do herbicida necessário.

4.4 O protótipo

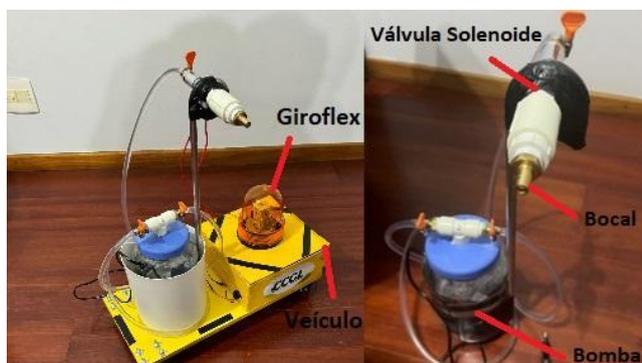
O protótipo criado no decorrer do projeto consiste em dois sistemas integrados: I) subsistema hidráulico, o qual será tratado na Seção 4.4.1, II) subsistema eletrônico, apresentado na Seção 4.4.2.

4.4.1 Subsistema hidráulico

Um conjunto que atenda a todas essas premissas foi desenvolvido no decorrer do trabalho, de forma a criar uma solução única e inovadora para aumentar a eficiência do sistema de coleta de energia solar de placas bifaciais. No Apêndice C, Figura C.1, está apresentado um esboço preliminar do sistema e no Apêndice C está apresentado o cálculo do diâmetro do bocal, necessário para otimizar o disparo e a aspersão de herbicida, cujo resultado foi de 4 mm. Este valor foi utilizado para a criação do projeto conceitual.

Após o desenvolvimento do conceito preliminar, foi construído um protótipo experimental, apresentado na Figura 5, utilizado para prova de conceito. Seus resultados e montagem são apresentados no decorrer do presente trabalho. Este protótipo segue a legislação brasileira que estabelece, através das ABNT NBR 7195, nas quais amarelo deve ser utilizado como cor de advertência, tendo como seu contraste o preto, ocupando menos de 50% da área visível e a cor branca para material potencialmente perigoso, além da necessidade de sinais sonoros, luminosos e pictogramas, estabelecidos através da ABNT NBR 14725-3, para operação em ambiente onde circulem trabalhadores.

Figura 5 - Protótipo utilizado para prova de conceito do projeto.

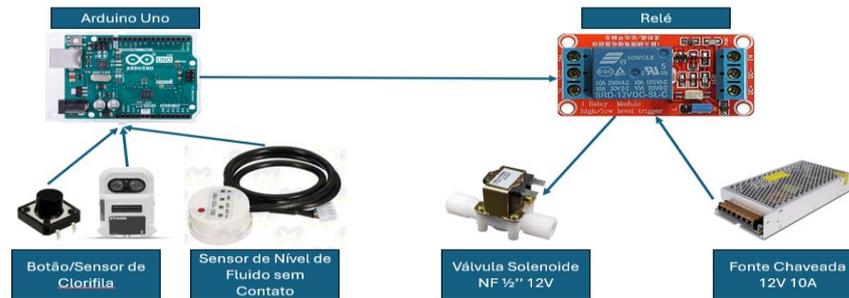


Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4.2 Subsistema eletrônico

O circuito eletrônico proposto é apresentada na Figura 6, o qual foi projetado para acionar a válvula solenoide para o disparo somente se o sensor de nível de fluido indicar que há fluido no recipiente e o botão/sensor de clorofila for acionado. Este circuito deve ser capaz de controlar a válvula solenoide e disparar herbicida toda vez que for necessário e houver suficiente fluido no recipiente.

Figura 6 - Lógica do circuito eletrônico, para acionamento da válvula solenoide de disparo do herbicida.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4.3 A simulação

Previamente à construção do protótipo, foi criado um modelo de simulação no Software Elipse E3. Esse pacote computacional é comumente utilizado na criação de sistemas de controle e aquisição de dados (SCADA) na indústria (Kichaloesky, 2010). Para tanto, foi criado um modelo de simulação no ambiente do software MatLab/Simulink, capaz de criar diagramas de blocos para simulações matemáticas (Chaturvedi, 2010), com posterior envio dos dados através do pacote *Industrial Communications Toolbox*. Esse pacote permite a criação de uma interface OPC (*Open Platform Communications*), que, segundo Nascimento Filho (2005), consiste em uma série de padrões e especificações para telecomunicação industrial, criada em 1996 para facilitar a interface entre softwares SCADA e outros programas, com o Elipse E3.

A simulação compreende o trajeto que o robô faria em torno da usina de energia, disparando herbicida toda vez em que ocorre a detecção de ervas daninhas.

5 RESULTADOS

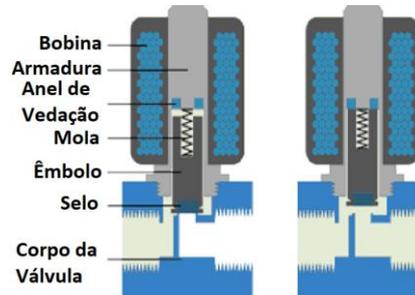
Os resultados são divididos em 3 partes, sendo primeiramente a construção do protótipo, seguida da criação do circuito eletrônico e, por fim, a análise baseada em simulação do robô operando na usina.

5.1 Construção do protótipo

A lista de componentes do protótipo construído ao longo do trabalho está discriminada em Dawson W. (2024). Utilizando esses componentes, foi criada uma base de madeira com rodas para testes práticos do protótipo. O restante do protótipo consiste em um recipiente plástico transparente com tampa contendo uma bomba centrífuga em seu interior, além de mangueiras ligadas a um sistema de distribuição, contendo a válvula de retenção com alívio e uma válvula solenoide, para controlar eletricamente os disparos. Esse sistema de válvulas foi utilizado para manter a bomba centrífuga ligada tornando possível aumentar a distância dos disparos proporcionalmente ao aumento de pressão do fluido na linha. Por fim, a válvula solenoide é conectada a um bocal.

O protótipo utiliza uma válvula solenoide normalmente fechada para controlar o disparo do jato de herbicida. Esse tipo de válvula possui um êmbolo que, quando não energizado, não permite a passagem de fluido e, ao energizá-lo, é criado um campo magnético que movimenta o êmbolo e permite que o fluido passe. Uma versão esquemática da válvula é apresentada na Figura 7.

Figura 7 - Esquema de abertura e funcionamento da válvula solenoide.



Fonte: Casa das válvulas (2022).

Durante os testes práticos do protótipo, foi possível determinar que o alcance do jato, ficou próximo dos 1,35 metros necessários, chegando a aproximadamente 1 metro. Isso se deve ao fato de a bomba centrífuga adquirida ter baixa capacidade, de apenas 0,12 bar, ou 4% comparada a bomba projetada de 3 bar e, portanto, o bocal utilizado para o experimento teve que ser reduzido na mesma proporção, de 4mm para 0,8mm, ou 4% da área calculada. O experimento, apresentado na Figura 8, consistiu em um jato único medido com o auxílio de uma trena.

Figura 8 - Experimento de medição do alcance do jato.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A seguir é apresentado o desenvolvimento da parte eletroeletrônica de controle dos disparos de herbicida.

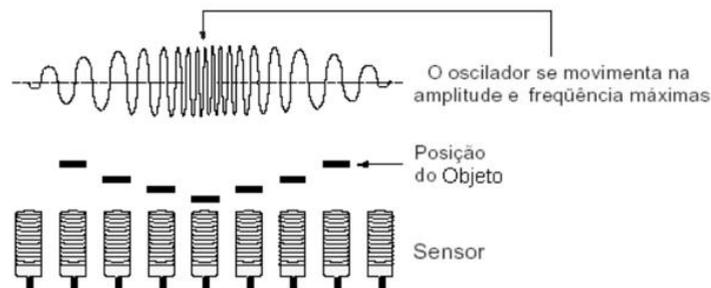
5.2 Lógica do circuito eletrônico do protótipo

Segundo as especificações do projeto, o sistema deve poder disparar herbicida assim que o sensor de clorofila detectar a presença de ervas daninha, ou, para efeito de testes, quando um botão de emulação for acionado. A válvula solenoide necessita de 12V para comutar. Portanto, devido à limitação de 5V da placa Arduino utilizada, foi utilizado um relé para o acionamento da válvula. O relé atua como uma chave que liga em série uma

fonte de 12 V com a válvula, cujo acionamento é controlado pelo sinal de 5V fornecido pelo Arduino. Desta forma, montou-se um circuito em uma protoboard, com o Arduino, um relé, uma fonte 12V, o botão e o sensor de nível de fluido, ligado no recipiente plástico, como pode ser visto no Apêndice D, Figura D.1. Entre o acionamento do botão até o acionamento da válvula solenoide ocorre um atraso de aproximadamente 100ms devido à estrutura da válvula. Além disso, o código, presente na referência Dawson W. (2024), do presente trabalho, possui um temporizador para acionamento de forma a emular a ação do sensor de clorofila.

O sensor utilizado para detectar o nível de fluido no recipiente é do tipo capacitivo. Segundo Hota (2019), os sensores capacitivos funcionam detectando mudanças na capacitância elétrica, consistindo em duas placas condutoras separadas por um material dielétrico. Quando um objeto, especialmente materiais com alta constante dielétrica, se aproxima ou toca o sensor, a capacitância entre as placas altera, como apresentado na Figura 9. Essa variação é detectada por um circuito dedicado e convertida em um sinal elétrico. Sensores capacitivos são usados para detectar materiais sólidos ou líquidos, não necessitando de contato físico com o objeto detectado e são comumente usados em automação industrial com aplicações de controle de nível, por exemplo.

Figura 9 - Esquema de funcionamento de um sensor capacitivo.



Fonte: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (2024).

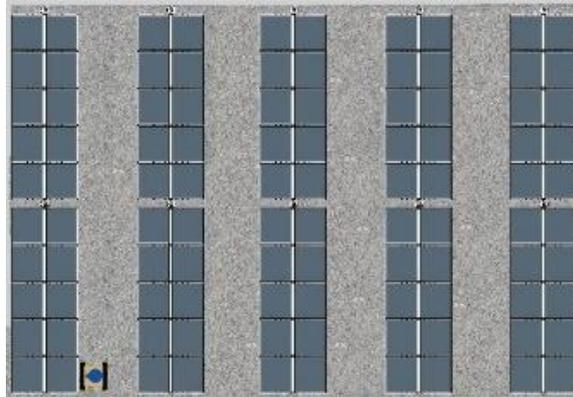
Utilizou-se o sensor XKC-Y25-T12V, que opera em uma faixa de tensão de 5-12V, com uma saída de sinal de nível alto/baixo. Ele é capaz de detectar líquidos até 12mm de distância do sensor, com um tempo de resposta de 500ms, e é projetado para operar em temperaturas de -20 a 85°C. Sua construção à prova d'água permite uso em ambientes úmidos.

O circuito eletroeletrônico obteve sucesso ao acionar a válvula solenoide, baseado na lógica desenvolvida. Com pequenas alterações, como por exemplo a troca do sinal digital do botão pelo sinal analógico de um sensor de clorofila no código do Arduino, poderá ser utilizado também no robô a ser futuramente construído.

5.3 Simulação da operação

Utilizando o software Elipse E3 em conjunto com o sistema MatLab/Simulink, foi criado um volume espacial virtual contendo alguns painéis solares como o do exemplo, e um elemento representativo do robô, conforme apresentado na Figura 10. Uma simulação realizada por meio desse sistema visou reproduzir virtualmente a proposta de como o robô irá interagir com o ambiente, percorrendo, por meio de um fio guia, o caminho designado na usina e, através de seu sensor de clorofila, disparar herbicidas para controle das ervas daninhas detectadas sob os painéis solares.

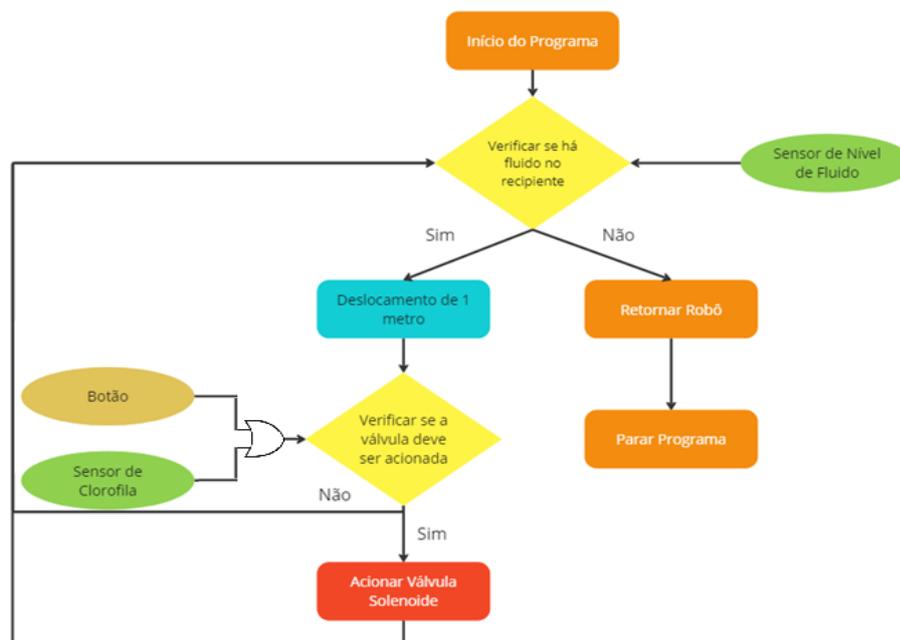
Figura 10 - Espaço simulado da usina, contando com alguns painéis solares e o artefato do projeto.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O fluxograma apresentado na Figura 11 ajuda a compreender o funcionamento da simulação no ambiente MatLab/Simulink, tendo como acionamentos o botão e o sensor de clorofila para definir se o jato deve ou não ser acionado, desde que o sensor de nível de fluido identifique herbicida suficiente no recipiente. Caso não haja herbicida o suficiente, o robô deve retornar para reabastecimento e parar.

Figura 11 - Fluxograma da operação simulada no sistema MatLab/Simulink.

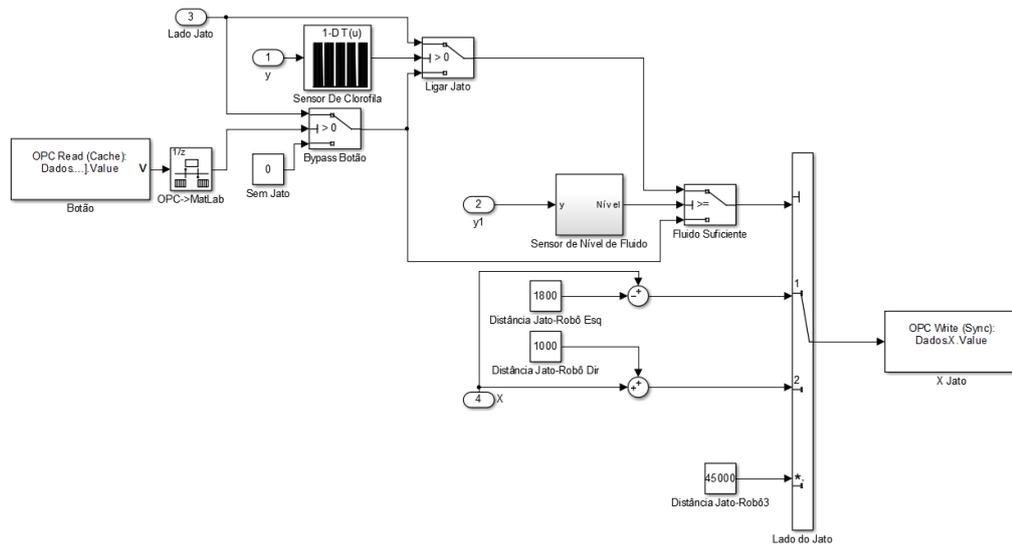


Fonte: Elaborada pelo autor.

A simulação realizada no ambiente MatLab/Simulink busca os dados adicionados previamente, por meio de uma *Lookup Table*, com coordenadas do robô e rotação no espaço simulado, baseadas na distância e tempo percorridos desde o início da simulação. Estes dados são então associados, através de *tags* internos do software Elipse E3, utilizando a comunicação OPC (*Open Platform Communications*) aos objetos da simulação.

O sensor de clorofila também teve seus disparos simulados, como apresentado na Figura 12, através de uma *Lookup Table* com um botão opcional de acionamento para demonstração. O sensor de nível de fluido tem seu funcionamento simulado, diminuindo o nível do fluido a cada disparo.

Figura 12 - Sistema programado no ambiente MatLab/Simulink.



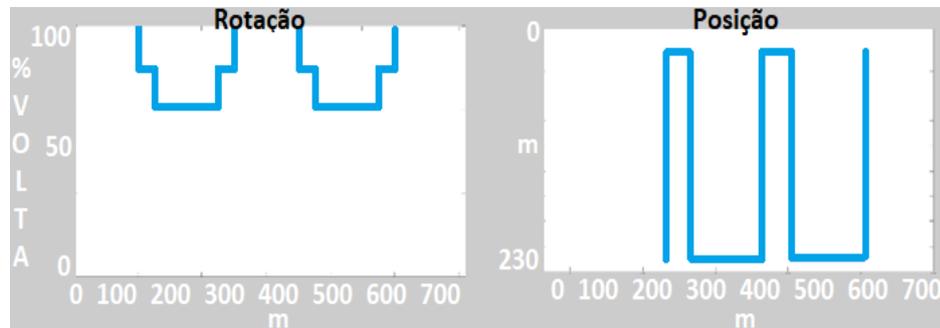
Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 13 apresenta a simulação da rotação do robô, na imagem à esquerda, e sua trajetória na imagem à direita. Nota-se que a rotação é dada em percentual de volta, sendo 100% considerado quando o robô segue o eixo X. Como o eixo Y é invertido no SCADA, com relação à representação cartesiana foi necessário espelhar as coordenadas desse eixo na simulação.

Na Figura 14 estão apresentados os seguintes resultados da simulação: I) o nível de fluido no recipiente, com mínimo em 20%, devido à necessidade de a bomba estar submersa; II) medição do sensor de clorofila, que detecta ervas daninhas, distribuídas a cada 10 metros; III) o resultado da operação do botão, que aciona a válvula solenoide de aspersão (desde que o nível de fluido esteja suficientemente alto); IV) a ação de acionamento da válvula solenoide.

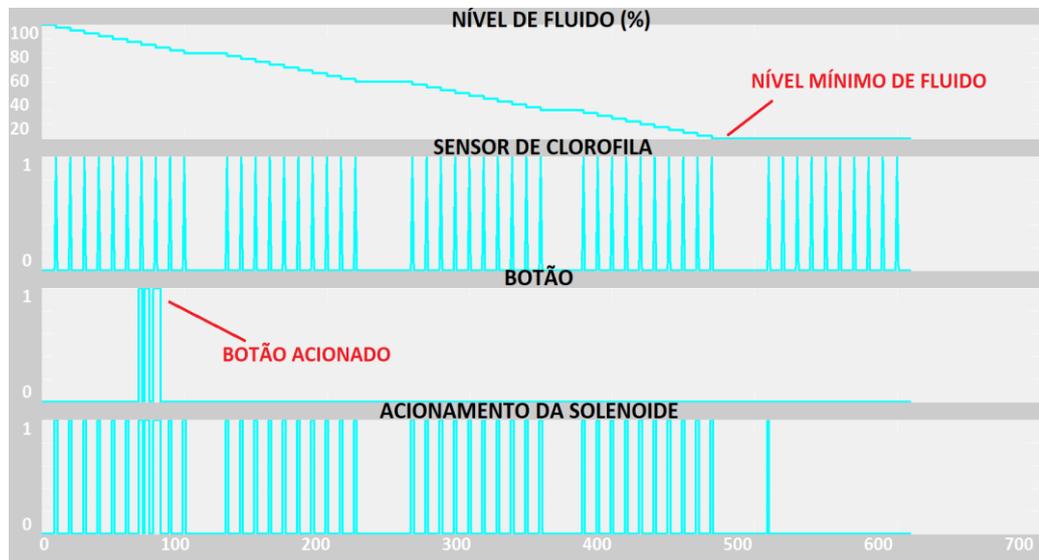
O nível de fluido decai cada vez que é realizado um disparo, mantendo-se constante nos momentos em que o robô está se deslocando para um novo conjunto de placas. Também é importante ressaltar que o botão aciona com sucesso a válvula solenoide e que, apesar de o sensor de clorofila detectar novas ervas daninhas após o nível de fluido no recipiente chegar a 20%, a válvula não é mais acionada.

Figura 13 - Simulação da rotação e deslocamento do robô, em relação à distância percorrida.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 14 - Resultados da simulação, com gráficos em relação à distância percorrida do nível de fluido, sensor de clorofila, botão e acionamento da válvula solenoide.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Utilizando o auxílio de ferramentas de simulação é possível avaliar se o trajeto percorrido pelo robô corresponde às especificações de projeto e se os disparos nas plantas daninhas ocorriam nas situações desejadas. No futuro serão integradas novas capacidades, permitindo, por exemplo, obter indicadores de funcionamento e integrar o artefato a uma rede de controle. Um vídeo da simulação está disponível digitalmente na referência Dawson (2024), o qual auxilia na demonstração da simulação e da movimentação do robô na usina.

6 CONCLUSÕES

Baseando-se nos resultados obtidos pode-se concluir que foi possível identificar uma solução para combater um dos fatores que reduzem a eficiência de geradores fotovoltaicos que consiste no crescimento de plantas daninhas em solo sob as placas solares bifaciais. No âmbito do desenvolvimento deste trabalho (que inclui as fases de preparação, revisão bibliográfica, visita técnica, reuniões com os orientadores, trocas de mensagens com os responsáveis pela construção da usina solar, planejamento, debate com a área agrônômica, aquisição de materiais e montagem do protótipo, bem como seu sistema de operação) foi possível adquirir conhecimento significativo sobre o problema causado pelo crescimento de ervas daninhas e outras plantas invasoras no solo localizado na parte inferior das placas fotovoltaicas bifaciais. O sistema concebido em fase de protótipo demonstrou sua viabilidade operacional, pois integra elementos de Engenharia na busca seletiva de plantas daninhas, bem como seu controle, sem que para tanto ocorra a necessidade de expor os trabalhadores da cooperativa a diversos riscos, tanto ergonômicos quanto físicos e químicos.

É importante também mencionar que o sistema SCADA proposto possibilitou a criação de uma forma de controle do sistema autônomo, por meio da qual será possível avaliar a atuação do futuro robô.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Por fim, o desenvolvimento deste trabalho levantou vários questionamentos que, para serem respondidos, exigem um estudo mais aprofundado. Desta forma surgem elementos que permitem apresentar sugestões para futuros trabalhos, destacando-se dentre elas:

- Avaliar a eficiência do método seletivo de controle das plantas daninhas desenvolvido;
- Verificar experimentalmente o ganho energético alcançado com a eliminação das plantas daninhas;
- Instalar o dispositivo de combate às plantas daninhas em um robô omnidirecional e avaliar sua eficiência junto à usina da cooperativa;
- Transformar o protótipo em um artefato capaz de combater as ervas daninhas conforme concebido neste trabalho, realizando um estudo de viabilidade econômica, financeira e mercadológica, visando à sua comercialização futura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMAD, F. *et al.* Advancements of Spraying Technology. **Technology in Agriculture**, p. 33-50, 2021.
- ANEEL. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **Relatório ABSOLAR**. 2024. Disponível em:
<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/fevereiro/2024>. Acesso em: 02 jul. 2024.
- ASDRUBALI, F.; DESIDERI, U. **Handbook of Energy Efficiency in Buildings: A Life Cycle Approach**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7195**: Cores de Segurança. Rio de Janeiro. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14725-3**: Produtos Químicos – Informações sobre segurança, saúde e meio ambiente. Parte 3: Rotulagem. Rio de Janeiro. 2012.
- BLACKSHAW, R. E.; MOYER, J. R.; KOZUB, G. C. Efficacy of downy brome herbicides as influenced by soil Properties. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 74, n. 1, 1994.
- CORKE, P. I. **Robotics, Vision & Control: Fundamental Algorithms in MATLAB**. 2. ed. Berlin: Springer, 2017.
- CCGL. CCGL Termasa. **Cooperativas associadas**. Disponível em:
<https://www.termasa.com.br/associadas.html>. Acesso em: 29 maio 2024.
- CHARDUVEDI, D. A. **Modeling and Simulation of Systems Using MATLAB and Simulink**. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- DAWSON JUNIOR, G. E. **A Intercooperação como princípio para criação de uma plataforma digital no sistema cooperativo agropecuário do Rio Grande do Sul**. 158 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Universidade do Vale dos Sinos, 2022.
- DAWSON (2024a). **Simulação MatLab Simulink + Elipse E3, Sistema de controle de ervas daninhas – TCC UFRGS – 2024**. 2024. Disponível em:
<https://youtu.be/o0ehMvLMaiQ>. Acesso em: 21 jun. 2024.
- DAWSON (2024b). **Lista de Componentes do Protótipo, 2024**. Disponível em:
<https://pastebin.com/FdNx4VPM>. Acesso em: 21 jun. 2024.
- Dawson (2024c). **Código de Controle do Arduino, 2024**. Disponível em:
<https://pastebin.com/CHdWnSj9>. Acesso em: 21 jun. 2024.
- Documento interno. **Apresentação Assembleia Geral Ordinária CCGL, 2023**. Cooperativa Central Gaúcha Ltda., janeiro/2023.

EMBRAPA AGROINDÚSTRIA TROPICAL. **Tecnologias de aplicação de defensivos agrícolas**. Fortaleza, 2006. Disponível em: infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/426350/1/Dc102.pdf. Acesso em: 29 jun. 2024.

ENEL GREEN POWER. **Albedo the unknown: a green boost for photovoltaic systems**. Disponível em: <https://www.enelgreenpower.com/media/news/2023/11/albedo-photovoltaic-panel>. Acesso em: 11 jun. 2024.

EPE. **Relatório Síntese 2023: Balanço Energético Nacional**. 2023. Disponível em: epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023. Acesso em: 8 maio 2024.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

HOTA, A. A. **Estudo de sensores capacitivos para detecção de variação no escoamento de fluidos e formação de vórtices**. 64 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

HUSQVARNA. **Operator's Manual: Husqvarna Automower 450X**. Estocolomo, 2023.

KICHALOWSKI, M. A. **E3 – Uma visão geral**. Porto Alegre: Elipse Software, 2010.

LUQUEÑO-SÁNCHEZ, J. A.; DIÉZ-PASCUAL, A. M.; CAPILLA, R. P. Materials for Photovoltaics: State of Art and Recent Developments. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 20, n. 5, 2019.

MAHAJAN, B. Negative environmental impacts of Solar Energy. **Energy Police**, 2012.

MARIANO, D. C. L. *et al.* Análise do mercado de sistemas de energia solar fotovoltaica com ênfase na área rural brasileira. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 2, 2023.

NASCIMENTO FILHO, O. A. **Desenvolvimento de Servidores OPC DA e OPC XML para Sistemas de Aquisição de Dados via Telefonia Celular**. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005.

KRAEHMER, H. Herbicide as Weed Control Agents: State of the Art: I. Weed Control Research and Safener Technology: The Path to Modern Agriculture. **Plant Physiol**, v. 166, n. 3, 2014.

KONDAVEETI, H. K. A systematic literature review on prototyping with Arduino: Applications, challenges, advantages, and limitations. **Computer Science Review**, v. 40, 2021.

OKZAN, E. Drones for Spraying Pesticides – Opportunities and Challenges. **Department of Food, Agricultural and Biological Engineering**, 2024.

OLIVEIRA FILHO, V. L.; DINIZ, A. S. A. C. Gerador Fotovoltaico: Modelagem e Simulação. **Revista Energia na Agricultura**, v. 17, n. 4, 2009.

ONU. Organização das Nações Unidas. **Transforming the World: The 2030 Agenda for Sustainable Development**. 2015.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia de Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL ; CRESESB, 2014.

POULEK, V.; LIBRA, M. New Solar Tracker. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 51, n. 2, 1998.

SÁNCHEZ, H. *et al.* The effect of clearance height, albedo, tilt and azimuth angle in bifacial PV energy estimation using different existing algorithms. *In: Ibero-American Conference on Smart Cities*, 3., 2020, San José. **Proceedings [...]** Berlin: Springer, 2020.

SINGHAL, A. K.; YADAV, N.; BENIWAL, N. S. Global Solar Energy: A Review. **International Electrical Engineering Journal**, v. 6, n. 3, p. 1828-1833, 2015.

STEIN, J. S. **Performance Models and Standards for Bifacial PV Module Technologies**. Washington DC: Department of Energy, 2018.

TOPPMAN, L. Innovation gets in the weeds under solar panels. **Duke Energy**, 2019. Disponível em: illumination.duke-energy.com/articles/innovation-gets-in-the-weeds-under-solar-panels. Acesso em: 12 de julho de 2024.

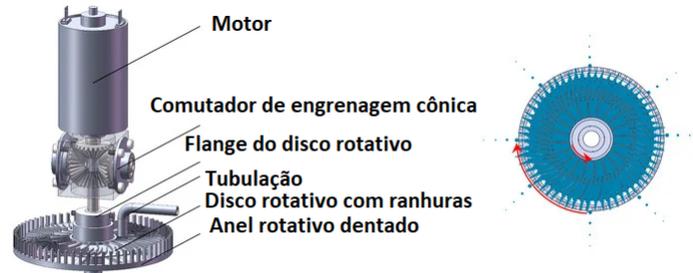
VALMONT Convert. **Tracker Mono-Eixo TRJ. Manual de Instalação**. Disponível em: <https://www.valmontsolar.com/products-and-services/solar-tracker>. Acesso em: 24 jun. 2024.

NAYLAMP Mechatronics. **XKC-Y25-T12V. Datasheet do sensor de nível de fluido sem contato**. 2024. Disponível em: <https://naylampmechatronics.com/img/cms/Datasheets/XKC%20Y25%20T12V.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2024.

YANG, Z. *et al.* Optimization-Design and Atomization-Performance Study of Aerial Dual-Atomization Centrifugal Atomizer. **Agriculture**, v. 13, n. 2, 2023.

ANEXO A - TECNOLOGIAS DE ASPERSÃO

Figura A.1 – Disco rotativo, onde o fluido é depositado sobre uma placa e rotativa onde, por meio do princípio da força centrífuga, é disparado pelos orifícios laterais.



Fonte: Yang (2023).

ANEXO B - HERBICIDAS NECESSÁRIOS

Tabela B.1 – Herbicidas necessários para controle das ervas daninhas na área da usina solar da empresa (CCGL, 2024).

| Planta Daninha | Herbicida |
|------------------------------------|------------------|
| Buva e Guanxuma | 2,4-D + Picloran |
| Corda-de-viola e Braquiária | Glifosato |
| Azevém (resistente ao Glifosato) | Cletodim |
| Braquiária e Azevém (sobras) | Diquat |
| Buva (sobras) + Ação pré-emergente | Imazapir |

APÊNDICE A - USINA FOTOVOLTAICA DA CCGL

Figura A.2 - Usina fotovoltaica da CCGL, com pedras de cor branca sob as placas solares à esquerda e *Trackers Mono-Eixo TRJ*, da empresa Valmont Convert que movimentam as placas no seu eixo dependendo do ângulo de incidência solar, à direita.



Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE B - CÁLCULO DO BOCAL

É necessário calcular o diâmetro adequado para o bocal de saída do aspersor, para o alcance necessário de 1,35 metros, que é metade da largura da placa somada à distância da lateral do robô até o bocal, além de considerar a altura de 0,65 metros do solo. Utiliza-se a teoria de Mecânica dos Fluidos para vazão volumétrica em bocais, para determinar o diâmetro adequado para o orifício.

Primeiramente, a pressão necessária P_{total} devido à altura e à $P_{entrada}$ pode ser expressa, na Equação (1), como:

$$P_{total} = P_{entrada} + \rho gh \quad (1)$$

Com $P_{entrada}$ sendo uma pressão da bomba projetada de 3 bar ($3 \times 10^5 Pa$), ρ a densidade do fluido (Assumido como $1000 kg/m^3$), g a aceleração devido à gravidade ($9,81 m/s^2$) e h a altura inicial de 0,65m.

Em seguida, com os dados do projeto, a velocidade média de saída do orifício V_{vc} , em m/s, pode ser expressa pela Equação (2):

$$V_{vc} = \sqrt{\frac{2(P_{total} - P_{atmosférica})}{\rho}} \quad \therefore P_{total} = 306376,5 Pa \quad \therefore V_{vc} = 20,32 m/s \quad (2)$$

Considerando na equação pressão atmosférica ao nível do mar, $P_{atmosférica} = 10^5 Pa$.

Levando em conta o valor da velocidade média das partículas V_{vc} , pode-se encontrar a área do ponto ou região de maior velocidade A_{vn} , em m^2 , através da Equação (3):

$$A_{vn} = \frac{Q}{V_{vc}} \quad \therefore A_{vn} = 0,0000082 m^2 \quad (3)$$

com Q sendo a vazão (m^3/s) da bomba centrífuga do protótipo de 600 L/h e V_{vc} a velocidade média do fluido na saída do orifício (m/s).

Estando com o dado da área de maior velocidade, pode-se calcular a área do orifício A_o , em m^2 , dada pela Equação (4):

$$A_o = \frac{A_{vn}}{C_d} \quad \therefore A_o = 0,0000126 m^2 \quad (4)$$

onde C_d é o coeficiente de descarga, que varia entre 0,60 e 0,70 de acordo com o Fox *et al* (2014), sendo 0,65 a média utilizada nesse cálculo.

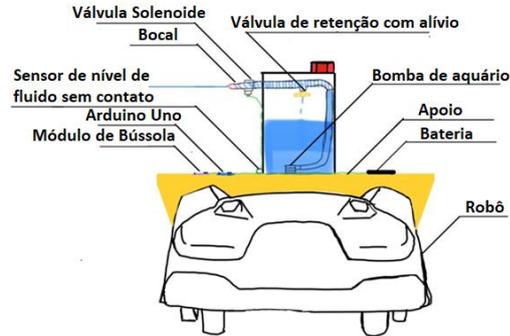
Utilizando a área do orifício podemos facilmente encontrar qual seria seu diâmetro D_o , em m, utilizando a Equação (5):

$$D_o = \left(\frac{4 \cdot A_o}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \therefore D_o = 4,0 mm \quad (5)$$

com A_o sendo a área do orifício (m^2).

APÊNDICE C – CONCEITO PRELIMINAR

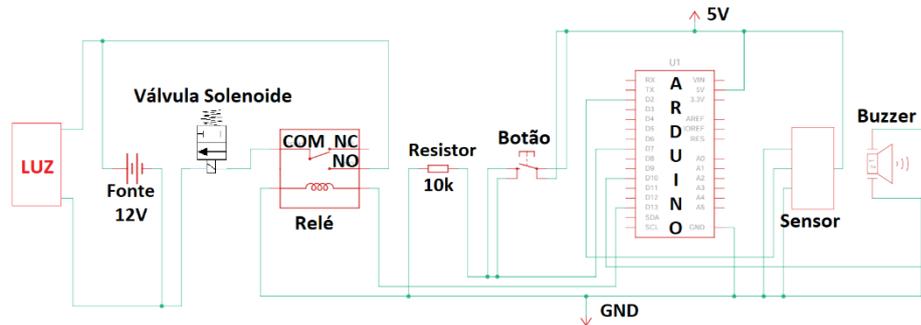
Figura C.1 - Conceito preliminar do sistema móvel de aspersão de herbicida de forma controlada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE D - CIRCUITO ELETRÔNICO

Figura D.1 – Representação esquemática do circuito eletrônico do protótipo.



Fonte: Elaborada pelo autor.