



**UFC**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE RUSSAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS**

**BRENO MOREIRA ALVES**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA CALCULADORA WEB PARA  
DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS OFF-GRID APLICADOS  
AO BOMBEAMENTO DE ÁGUA NA CIDADE DE RUSSAS-CE PELO MÉTODO DO  
MÊS CRÍTICO**

**RUSSAS**

**2026**

BRENO MOREIRA ALVES

DESENVOLVIMENTO DE UMA CALCULADORA WEB PARA DIMENSIONAMENTO  
DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS OFF-GRID APLICADOS AO BOMBEAMENTO DE  
ÁGUA NA CIDADE DE RUSSAS-CE PELO MÉTODO DO MÊS CRÍTICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Programa de Graduação em Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal do Ceará,  
como requisito parcial à obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa  
Lobo.

RUSSAS

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

A477d Alves, Breno Moreira.

Desenvolvimento de um calculadora web para dimensionamento de sistemas fotovoltaicos off-grid aplicados ao bombeamento de água na cidade de Russas-CE pelo método do mês crítico. / Breno Moreira Alves. – 2026.

54 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2026.

Orientação: Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo.

1. energia solar fotovoltaica. 2. sistemas fotovoltaicos off-grid. 3. bombeamento de água. I. Título.

CDD 620.1

---

BRENO MOREIRA ALVES

DESENVOLVIMENTO DE UMA CALCULADORA WEB PARA DIMENSIONAMENTO  
DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS OFF-GRID APLICADOS AO BOMBEAMENTO DE  
ÁGUA NA CIDADE DE RUSSAS-CE PELO MÉTODO DO MÊS CRÍTICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Programa de Graduação em Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal do Ceará,  
como requisito parcial à obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 19/01/2026.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. George Luiz Gomes de Oliveira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Eptácio e Conceição e minha  
esposa Sânela Moreira

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder saúde, sabedoria, força e perseverança ao longo de toda a minha caminhada acadêmica e pessoal, permitindo-me superar desafios e concluir uma das mais importantes etapas da minha vida.

À Universidade Federal do Ceará (UFC), em especial ao Curso de Engenharia Mecânica, agradeço pela sólida formação acadêmica, pela infraestrutura disponibilizada e pelo suporte institucional oferecido ao longo da graduação, fundamentais para o meu desenvolvimento profissional e intelectual.

Ao Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo, expressei minha sincera gratidão pela excelente orientação, disponibilidade, dedicação e pelos conhecimentos compartilhados ao longo deste trabalho. Sua postura profissional, paciência e comprometimento foram essenciais para a condução, amadurecimento e conclusão deste TCC.

Aos professores membros da banca examinadora, agradeço pela disponibilidade, pelo tempo dedicado à avaliação deste trabalho e pelas valiosas contribuições, críticas construtivas e sugestões, que enriqueceram significativamente o conteúdo e a qualidade desta pesquisa.

Aos colegas de curso, agradeço pelo companheirismo, pelas trocas de experiências, pelo apoio nos estudos, pela colaboração em trabalhos acadêmicos e pelo incentivo constante ao longo da graduação. Em especial, agradeço a Jardel, Itacy, Eugênio, Edgar, Vinícius, Dayse, J.Victor e Evando, que estiveram presentes em momentos importantes dessa trajetória e contribuíram de forma direta para que eu pudesse concluir este curso.

À empresa Máxima Energia Solar, agradeço pela oportunidade de desenvolver este trabalho com base em um ambiente profissional real, alinhado ao nicho de atuação da empresa, o que contribuiu significativamente para o aprofundamento técnico e prático deste estudo. À diretoria Tony e Irton; à gerência Francileide, Jorgeanne e Reigivaldo; aos colaboradores Alyson e José Ari. Deixo meu agradecimento pela confiança, apoio e pelas contribuições, diretas ou indiretas, que foram importantes para a elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Aos meus pais, Conceição Moreira e Epitácio Alves, minha eterna gratidão por todo o esforço, dedicação e sacrifício ao longo de suas vidas para me proporcionar uma boa educação, oportunidades de estudo e condições para que eu pudesse trabalhar e crescer. Até

hoje, dedicam suas vidas para que eu possa prosperar, e tudo o que sou e conquistei tem como base o amor e os ensinamentos de vocês.

À minha mais nova família, minha sogra Socorro, meu sogro Alexandre, ao meu cunhado e irmão Anderson Cardoso, e minha amiga Marcia Ligia agradeço por terem me acolhido com carinho, respeito e afeto, tornando-se uma verdadeira família para mim. Vocês ocupam um lugar especial no meu coração e são fundamentais para o meu equilíbrio pessoal e familiar.

Por fim, e de forma muito especial, agradeço à minha esposa, Sâmela Paz Cardoso Moreira, pelo amor, companheirismo, apoio incondicional e incentivo constante. Sua dedicação à nossa família, seu esforço diário e sua confiança em mim foram determinantes para que eu chegasse até aqui. É a pessoa que mais amo neste mundo e a quem desejo ver sempre bem, crescendo e conquistando seus sonhos ao meu lado.

## RESUMO

A utilização de sistemas fotovoltaicos off-grid para bombeamento de água tem se consolidado como uma alternativa técnica e economicamente viável para propriedades agrícolas localizadas em regiões com acesso limitado à rede elétrica convencional. No entanto, o correto dimensionamento desses sistemas ainda representa um desafio prático, especialmente quando o cliente dispõe apenas de informações básicas sobre o sistema de bombeamento existente. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver uma calculadora automatizada na WEB para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos *off-grid* aplicados ao bombeamento de água em propriedades agrícolas do município de Russas-CE, com base no método do mês crítico, utilizando informações de fácil obtenção pelo cliente e dados solarimétricos oficiais da cidade de Russas-CE. A metodologia proposta baseia-se no balanço energético diário, considerando a potência nominal do motor da bomba, o tempo de operação informado e a irradiação solar local obtida a partir da base SunData/CRESESB. O método adotado é o método do mês crítico, por avaliar o dimensionamento no cenário mais desfavorável de recurso solar ao longo do ano, garantindo maior robustez operacional do sistema. O método estabelece ainda um critério objetivo para a inclusão de banco de baterias, adotando como padrão sistemas sem armazenamento elétrico e contemplando baterias apenas quando há operação noturna. Para demonstrar a aplicabilidade da metodologia, realizou-se um estudo de caso teórico no município de Russas-CE, referente a uma propriedade agrícola com sistema de bombeamento existente. Os resultados obtidos no estudo de caso teórico aplicado ao município de Russas-CE demonstraram a consistência técnica da metodologia e a coerência dos valores estimados com práticas adotadas no mercado de sistemas fotovoltaicos isolados. Observou-se, entretanto, que a adoção de critérios conservadores, baseados em valores críticos de irradiação solar e elevados fatores de segurança, pode resultar em sistemas superdimensionados, com elevado número de módulos fotovoltaicos e grande capacidade de armazenamento energético, impactando diretamente o custo total do projeto. Dessa forma, conclui-se que, embora a metodologia proposta apresenta elevado nível de confiabilidade, sua aplicação pode ser flexibilizada conforme o perfil do usuário, por meio da utilização de parâmetros menos conservadores, como valores médios de irradiação, de modo a promover um melhor equilíbrio entre robustez técnica e viabilidade econômica.

**Palavras-chave:** energia solar fotovoltaica; sistemas fotovoltaicos *off-grid*; bombeamento de água;

## ABSTRACT

The use of *off-grid* photovoltaic systems for water pumping has become a technically and economically viable alternative for agricultural properties located in regions with limited access to the conventional electricity grid. However, the correct sizing of these systems still represents a practical challenge, especially when the client only has basic information about the existing pumping system. In this context, this work aims to develop an automated web-based calculator for sizing off-grid photovoltaic systems applied to water pumping on agricultural properties in the municipality of Russas-CE, based on the critical month method, using information easily obtainable by the client and official solarimetric data from the city of Russas-CE. The proposed methodology is based on the daily energy balance, considering the nominal power of the pump motor, the reported operating time, and the local solar irradiance obtained from the SunData/CRESESB database. The method adopted is the critical month method, as it evaluates the sizing in the most unfavorable scenario of solar resources throughout the year, ensuring greater operational robustness of the system. The method also establishes an objective criterion for the inclusion of battery banks, adopting systems without electrical storage as the standard and considering batteries only when there is nighttime operation. To demonstrate the applicability of the methodology, a theoretical case study was conducted in the municipality of Russas-CE, concerning an agricultural property with an existing pumping system. The results obtained in the theoretical case study applied to the municipality of Russas-CE demonstrated the technical consistency of the methodology and the coherence of the estimated values with practices adopted in the market for isolated photovoltaic systems. However, it was observed that the adoption of conservative criteria, based on critical values of solar irradiance and high safety factors, can result in oversized systems, with a high number of photovoltaic modules and a large energy storage capacity, directly impacting the total cost of the project. Thus, it is concluded that, although the proposed methodology presents a high level of reliability, its application can be made more flexible according to the user's profile, through the use of less conservative parameters, such as average irradiance values, in order to promote a better balance between technical robustness and economic viability.

**Keywords:** solar photovoltaic energy; *off-grid* photovoltaic systems; water pumping;

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Sistema fotovoltaico .....	17
Figura 2	- Módulos fotovoltaicos .....	18
Figura 3	- Inversor de frequência Weg CFW500 V1.8X .....	19
Figura 4	- Componentes do sistema fotovoltaico off-grid .....	21
Figura 5	- Bombeamento de água com energia solar .....	22
Figura 6	- Bombeamento de água com energia solar .....	23
Figura 7	- Utilização do Sun Data V 3.0 .....	28
Figura 8	- Interface Google Ai Studio .....	29
Figura 9	- Fluxograma do desenvolvimento do protótipo .....	43
Figura 10	- Interface inicial da Calculadora Candido's FV .....	43
Figura 11	- Utilização da calculadora Candido's FV e resultados .....	44
	- Comparação de Resultados: Cálculo Manual x Calculadora WEB .....	

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Dados de entrada do estudo de caso .....	39
----------	--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	Interface de Programação de Aplicações
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CRESESB	Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S Brito
CV	Cavalo Vapor
FV	Fotovoltaico
HSP	Horas de Sol Pleno
SFI	Sistema Fotovoltaico Isolado
SFV	Sistema Fotovoltaico
STC	Condições Padrão de Teste
SPPM	Seguimento do Ponto de Máxima Potência
UFC	Universidade Federal do Ceará

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1	Justificativa .....	15
1.2	Objetivos .....	15
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i> .....	15
1.2.2	<i>Objetivo Específico</i> .....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	17
2.1	Energia Solar Fotovoltaica .....	17
2.2	Componentes de Sistemas Fotovoltaicos para Bombeamento .....	18
2.2.1	<i>Módulos Fotovoltaicos</i> .....	18
2.2.2	<i>Inversores e Drives para Bombeamento</i> .....	19
2.2.3	<i>Sistemas de Armazenamento de Energia</i> .....	20
2.3	Sistemas Fotovoltaicos Off-Grid .....	20
2.4	Bombeamento de Água com Energia Solar .....	21
2.5	Irradiação solar e uso do SunData/CRESESB .....	22
2.6	Método de Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos Off-Grid .....	23
2.6.1	<i>Caracterização e Correção Energética das cargas em SFI</i> .....	24
2.6.2	<i>Método do Mês Crítico e Dimensionamento do Gerador Fotovoltaico</i> .....	25
2.6.3	<i>Configuração do gerador e relação com o controlador de carga</i> .....	25
2.6.4	<i>Dimensionamento do Banco de Baterias</i> .....	26
2.7	Desenvolvimento Web da Ferramenta Utilizando Google IA Studio .....	27
2.7.1	<i>Funcionamento do Google AI Studio na Prototipagem de Sistemas</i> .....	27
2.7.2	<i>Aplicações no Desenvolvimento de Sistemas Web</i> .....	27
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	29
3.1	Fundamentação Teórica do Dimensionamento Fotovoltaico Isolado .....	30
3.2	Dados de Entrada e Levantamento das Variáveis do Problema .....	30
3.2.1	<i>Dados da carga (bomba)</i> .....	30
3.2.2	<i>Dados do sistema</i> .....	31
3.2.3	<i>Dados do Recurso Solar</i> .....	31
3.3	Cálculo do Consumo Energético Diário (carga CA) .....	31

3.3.1	<i>Potência Elétrica Equivalente da Bomba em W</i> .....	32
3.3.2	<i>Energia diária consumida em CA (Wh/dia)</i> .....	32
3.4	<b>Considerações para Sistema Off Grid (Perdas e Energia Ativa Requerida)</b> ..	32
3.5	<b>Dimensionamento do Gerador Fotovoltaico pelo Método do Mês Crítico ..</b>	33
3.5.1	<i>Potência Necessária do Gerador FV</i> .....	33
3.5.2	<i>Fatores de Redução do Gerador FV</i> .....	34
3.6	<b>Dimensionamento do Arranjo de Módulos (série/paralelo)</b> .....	34
3.6.1	<i>Número de Módulos em Série</i> .....	34
3.6.2	<i>Número de Fileiras em Paralelo e Corrente do Arranjo</i> .....	34
3.7	<b>Dimensionamento do Banco de Baterias (Método do Mês Crítico)</b> .....	35
3.7.1	<i>Estimativa de Dias de Autonomia Quando Não Há Dados Experimentais</i> ....	35
3.8	<b>Desenvolvimento da Calculadora na Web com Google Ai Studio</b> .....	36
3.8.1	<i>Entradas do método na interface da calculadora</i> .....	36
3.8.2	<i>Valores pré fixados no algoritmo</i> .....	36
3.8.3	<i>Fluxo do algoritmo</i> .....	37
3.8.4	<i>Saídas do método</i> .....	37
3.8.5	<i>Desenvolvimento do Contexto do Prompt</i> .....	37
3.9	<b>Limitações da Metodologia</b> .....	38
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	39
4.1	<b>Dados de Entrada do Estudo de Caso</b> .....	39
4.2	<b>Parâmetros e Premissas Adotadas</b> .....	40
4.2.1	<i>Energia Diária em CA</i> .....	40
4.2.2	<i>Energia Diária Requerida Corrigida</i> .....	40
4.2.3	<i>Potência do Gerador FV</i> .....	40
4.2.4	<i>Autonomia Estimada e Banco de Baterias</i> .....	41
4.2.4.1	<i>Cálculo da Autonomia Estimada do Sistema (N)</i> .....	41
4.2.4.2	<i>Capacidade do Banco de Baterias em Wh</i> .....	41
4.2.4.3	<i>Capacidade do Banco de Baterias em Ah</i> .....	41
4.2.4.4	<i>Como Calcular o Número de Baterias</i> .....	42
4.2.4.5	<i>Driver (controlador + inversor)</i> .....	42
4.3	<b>Aplicação do Estudo de Caso na Calculadora Web</b> .....	42
4.4	<b>Análise e Discussão dos Resultados</b> .....	44

<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>46</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>48</b>
	<b>ANEXO A – PROMPT UTILIZADO PARA GERAR A CALCULADORA .....</b>	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por soluções energéticas sustentáveis tem impulsionado a expansão do uso da energia solar fotovoltaica em diferentes setores produtivos, em razão de sua elevada disponibilidade como recurso renovável, da modularidade dos sistemas e da possibilidade de geração distribuída. As restrições ambientais e o avanço tecnológico têm promovido um significativo crescimento da geração de energia elétrica a partir da irradiação solar, tanto no Brasil quanto no mundo, reforçando a importância de estudos e aplicações dessa fonte energética (VIAN; TAHAN, 2021).

No semiárido nordestino, particularmente no interior do estado do Ceará, os elevados níveis de irradiação solar ao longo do ano representam uma oportunidade estratégica para o desenvolvimento de soluções energéticas baseadas em fontes renováveis. O município de Russas-CE, localizado no Vale do Jaguaribe, destaca-se nesse contexto por apresentar condições climáticas favoráveis à geração de energia solar, fator que tem contribuído para o crescimento de iniciativas voltadas à exploração desse recurso. Um exemplo representativo desse potencial é o Parque Solar da Lagoinha de Russas, empreendimento que evidencia a viabilidade técnica e econômica da geração fotovoltaica na região, além de reforçar o papel da energia solar como vetor de desenvolvimento local.

Paralelamente, a atividade agrícola na região depende fortemente do bombeamento de água para irrigação e abastecimento, exigindo sistemas confiáveis de captação e transporte hídrico. Entretanto, em áreas rurais afastadas dos centros urbanos, o acesso à rede elétrica convencional é, muitas vezes, limitado ou economicamente inviável, o que compromete a continuidade das atividades produtivas. Nesse cenário, os sistemas fotovoltaicos *off-grid* aplicados ao bombeamento de água surgem como uma alternativa técnica viável, ao possibilitarem autonomia energética e aproveitamento direto do elevado potencial solar local.

Todavia, para que esses sistemas apresentem desempenho adequado e confiabilidade operacional, é fundamental que sejam corretamente dimensionados, considerando tanto as características da carga quanto às condições locais de disponibilidade do recurso solar. Dessa forma, a adoção de metodologias consistentes de dimensionamento torna-se essencial para garantir a eficiência, a segurança e a aplicabilidade prática dos sistemas fotovoltaicos *off-grid* em regiões como Russas-CE.

## 1.1 Justificativa

O bombeamento de água por meio de sistemas fotovoltaicos *off-grid* configura-se como uma alternativa tecnológica alinhada aos princípios de sustentabilidade, eficiência energética e aproveitamento de fontes renováveis, sendo especialmente indicada para aplicações rurais localizadas em regiões com elevada disponibilidade de irradiação solar. A adoção desses sistemas contribui para a redução dos custos operacionais associados ao uso de energia elétrica convencional, além de ampliar a segurança hídrica em atividades agrícolas dependentes de irrigação.

Entretanto, o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos *off-grid* aplicados ao bombeamento de água apresenta elevada complexidade técnica, uma vez que envolve a análise simultânea de diversos parâmetros, tais como potência e regime de operação da bomba, perfil de consumo diário, disponibilidade do recurso solar, perdas do sistema e, quando aplicável, a necessidade de armazenamento de energia. Essa complexidade exige conhecimento técnico específico e maior tempo de análise por parte dos profissionais responsáveis, o que, no contexto das empresas integradoras, pode resultar em processos de dimensionamento mais lentos e suscetíveis a imprecisões quando realizados de forma manual ou não padronizada.

Nesse cenário, observa-se que a ausência de ferramentas computacionais automatizadas e padronizadas para o dimensionamento desses sistemas representa um desafio recorrente para as empresas integradoras de sistemas fotovoltaicos. A necessidade de realizar cálculos detalhados e análises técnicas individualizadas tende a aumentar o tempo de resposta ao cliente, impactando diretamente a agilidade no processo comercial e na entrega de soluções técnicas adequadas.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma calculadora automatizada na WEB para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos *off-grid* aplicados ao bombeamento de água em propriedades agrícolas do município de Russas-CE, com base no método do mês crítico, utilizando informações de fácil obtenção pelo cliente e dados solarimétricos oficiais da cidade de Russas-CE.

### ***1.2.2 Objetivo Específico***

- I. Estudar os métodos de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos off-grid aplicados ao bombeamento de água, com ênfase no método do mês crítico, visando à obtenção das equações necessárias ao dimensionamento energético do sistema;
- II. Analisar abordagens de simplificação do processo de dimensionamento, de modo a identificar um conjunto reduzido de informações técnicas que possam ser facilmente fornecidas pelo cliente final sem comprometer a confiabilidade do projeto;
- III. Definir uma metodologia de modelagem do recurso solar local, baseada no uso de dados oficiais de irradiação solar provenientes da base SunData/CRESESB, adequada à aplicação em sistemas fotovoltaicos isolados;
- IV. Estabelecer critérios técnicos para o dimensionamento do gerador fotovoltaico e para a inclusão de sistemas de armazenamento, considerando o regime de operação da bomba e a necessidade de atendimento em períodos noturnos;
- V. Determinar o método e a abordagem tecnológica a serem utilizados no desenvolvimento de uma calculadora computacional para sistemas fotovoltaicos *off-grid*, visando sua implementação em ambiente web;
- VI. Implementar a metodologia proposta em um protótipo computacional funcional, com interface web, capaz de automatizar o processo de dimensionamento do sistema fotovoltaico;
- VII. Aplicar a metodologia desenvolvida a um estudo de caso, analisando os resultados obtidos quanto à coerência técnica e à aplicabilidade prática do método.

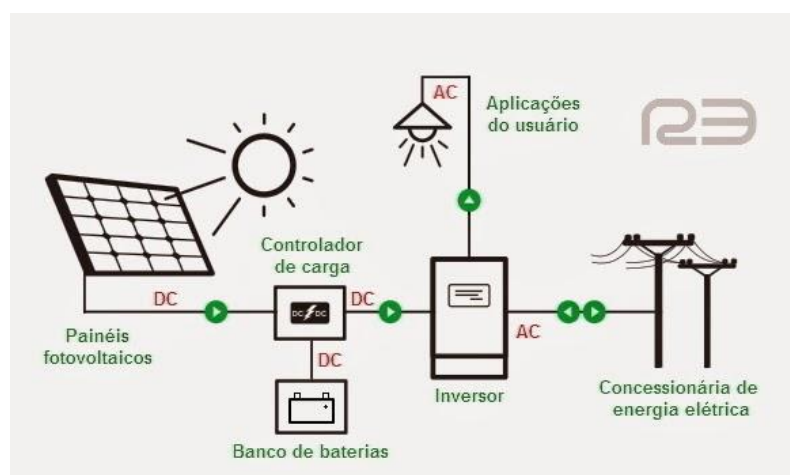
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica baseia-se na conversão direta da radiação solar em energia elétrica, por meio de dispositivos semicondutores organizados em células e módulos. Em termos de engenharia, o sistema fotovoltaico (SFV) pode ser compreendido como um gerador de corrente contínua (CC) cuja grandeza elétrica de saída (tensão e corrente) depende fortemente da irradiância e da temperatura das células, o que impõe a necessidade de caracterização elétrica (curvas I–V e P–V) e de condicionamento de potência para atendimento às cargas (PINHO; GALDINO, 2014). Essa tecnologia destaca-se por características como modularidade, operação silenciosa e reduzida necessidade de manutenção, o que favorece sua aplicação em diferentes escalas e contextos de uso (VILLALVA, 2012).

Do ponto de vista de circuitos, a análise e a modelagem de SFVs requerem fundamentos consolidados de grandezas elétricas, associação de elementos, interpretação de curvas e aplicação de leis de conservação em redes elétricas, que constituem a base para o entendimento de conversão e condicionamento de energia em sistemas reais (BOYLESTAD, 2012).

Figura 1 - Sistema fotovoltaico



Fonte: R3 Técnica Brasil, 2014

No contexto de transição energética, a energia solar se consolida como alternativa tecnológica relevante por possibilitar geração distribuída e atendimento de cargas em regiões

com limitações de infraestrutura. Em especial, aplicações produtivas rurais (como bombeamento de água) ganham destaque por articularem energia e segurança hídrica, reduzindo a dependência de combustíveis e de redes extensas (SILVA; BASCOPE, 2020).

No âmbito de fundamentos, tecnologia e aplicações, Vian e Tahan sistematizam a energia solar como campo tecnológico abrangente, com ênfase em aspectos de conversão, componentes e aplicações, fornecendo base conceitual para o enquadramento dos SFVs como sistemas eletroenergéticos integrados (VIAN; TAHAN, 2021).

No Brasil, a elevada disponibilidade de irradiação solar torna essa fonte particularmente atrativa para aplicações em regiões remotas ou com infraestrutura elétrica limitada. A energia solar fotovoltaica tem se consolidado como uma alternativa estratégica para a diversificação da matriz energética, sendo amplamente utilizada tanto em sistemas conectados à rede quanto em sistemas isolados (off-grid), especialmente em aplicações rurais.

Figura 2 - Módulos Fotovoltaicos



Fonte: Portal Solar, 2023

## 2.2 Componentes de Sistemas Fotovoltaicos para Bombeamento

### 2.2.1 Módulos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são formados por células solares conectadas eletricamente e encapsuladas de modo a garantir proteção mecânica e durabilidade. A potência nominal dos módulos é definida em condições padrão de teste (STC). A eficiência dos módulos fotovoltaicos depende do material semicondutor, do processo de fabricação e das condições de operação.

Constituem a unidade construtiva fundamental do gerador, sendo formados por associações de células. Em termos de integração, a escolha de níveis de tensão/corrente do



### **2.2.3 Sistemas de Armazenamento de Energia**

O armazenamento de energia em sistemas fotovoltaicos off-grid é geralmente realizado por meio de bancos de baterias. As tecnologias mais comuns incluem baterias chumbo-ácido e baterias de íon-lítio, sendo estas últimas caracterizadas por maior densidade energética, maior profundidade de descarga e maior vida útil. A inclusão de baterias deve ser criteriosamente avaliada, uma vez que impacta significativamente o custo do sistema. Em aplicações de bombeamento, a adoção de reservatórios de água como forma de armazenamento energético indireto pode representar uma solução mais econômica e eficiente. (PINHO; GALDINO, 2014).

Em SFVs *off-grid*, baterias podem atuar como reserva energética, amortecendo a intermitência solar e permitindo operação fora dos períodos de irradiância. Contudo, sua aplicação envolve limitações técnicas e econômicas. No contexto do bombeamento fotovoltaico, destaca-se que “a utilização de baterias eleva o custo do sistema e necessita de trocas periódicas, diminuindo a vida útil do sistema” (SILVA; BASCOPE, 2020, p. 1).

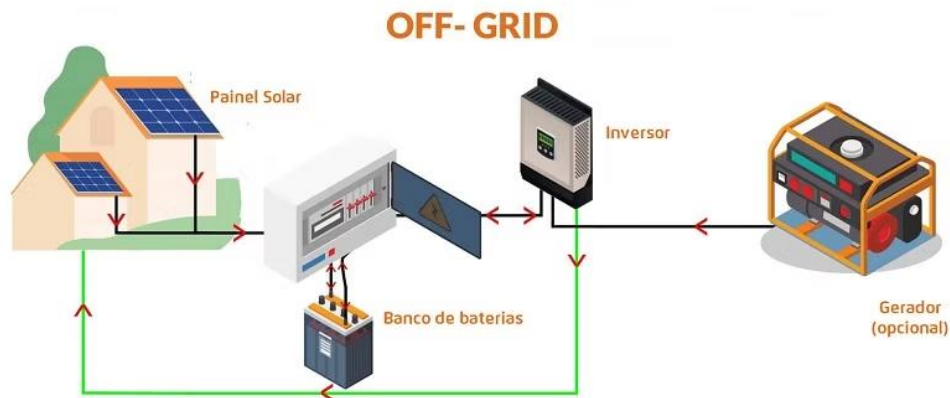
A literatura de engenharia de SFVs também enfatiza condicionantes operacionais e de manutenção associados ao armazenamento, incluindo efeitos de temperatura e necessidade de ventilação adequada, bem como ajustes de controladores de carga e compatibilidade entre controlador e banco de baterias (PINHO; GALDINO, 2014).

## **2.3 Sistemas Fotovoltaicos Off-Grid**

Os sistemas fotovoltaicos podem ser configurados tanto para operação conectada à rede elétrica quanto para funcionamento isolado. De acordo com Vian e Tahan (2021), os sistemas fotovoltaicos off-grid são particularmente indicados para regiões com restrições de acesso à rede convencional, permitindo autonomia energética e maior flexibilidade de aplicação, especialmente em áreas rurais. Esses sistemas podem operar com ou sem armazenamento elétrico, dependendo do perfil de carga e da estratégia de projeto adotada. A configuração básica desses sistemas inclui módulos fotovoltaicos, dispositivos de controle e conversão de energia (controladores de carga e inversores) e, quando necessário, sistemas de armazenamento.

Em aplicações de bombeamento de água, os sistemas off-grid podem operar de forma direta, utilizando a energia solar durante o período de insolação, ou com o auxílio de baterias, quando há necessidade de operação fora do horário solar.

Figura 4 - Componentes do sistema fotovoltaico off-grid



Fonte: Blog do Luvik, 2023

## 2.4 Bombeamento de Água com Energia Solar

O bombeamento de água utilizando energia solar fotovoltaica consiste na conversão da radiação solar em energia elétrica, a qual é empregada para acionar motores elétricos acoplados a bombas hidráulicas, possibilitando a captação, elevação e distribuição de água sem a necessidade de conexão à rede elétrica convencional. Essa aplicação apresenta especial relevância em áreas rurais e remotas, onde o acesso à eletricidade é limitado ou economicamente inviável.

De acordo com Silva e Bascopé (2020), os sistemas de bombeamento fotovoltaico configuram-se como uma solução técnica eficiente para o abastecimento de água e para a irrigação agrícola, sobretudo em regiões com elevada disponibilidade de irradiação solar. Os autores destacam que a adoção dessa tecnologia permite reduzir custos operacionais associados ao uso de combustíveis fósseis e ampliar a autonomia energética das propriedades rurais.

Ainda segundo Silva e Bascopé (2020), a configuração dos sistemas de bombeamento solar pode variar conforme o perfil de uso, podendo operar de forma direta durante o período de insolação ou associada a estratégias de armazenamento, seja por meio de reservatórios de água ou de sistemas de armazenamento elétrico. A escolha da configuração mais adequada deve considerar fatores como a demanda hídrica, o regime de operação da bomba e as condições climáticas locais.

Figura 5 - Bombeamento de água com energia solar



Fonte: ReytecSolar.com

Em áreas rurais, o bombeamento solar é aplicado para abastecimento humano e animal, irrigação e usos produtivos em propriedades com limitações de rede elétrica ou com custos elevados de extensão. Tais aplicações demandam soluções robustas, com dimensionamento coerente do gerador FV e do acionamento, e com estratégias operacionais que considerem sazonalidade de irradiância, perfil de consumo hídrico e disponibilidade de manutenção local (SILVA; BASCOPE, 2020; PINHO; GALDINO, 2014).

Sob o prisma socioambiental, a viabilização de bombeamento em localidades remotas contribui para segurança hídrica e apoio a atividades produtivas, com potencial redução de emissões associadas ao uso de motobombas a combustão e diminuição de custos operacionais recorrentes, especialmente quando se evita o emprego de baterias em favor de estratégias de operação diurna e/ou reservação hídrica (SILVA; BASCOPE, 2020).

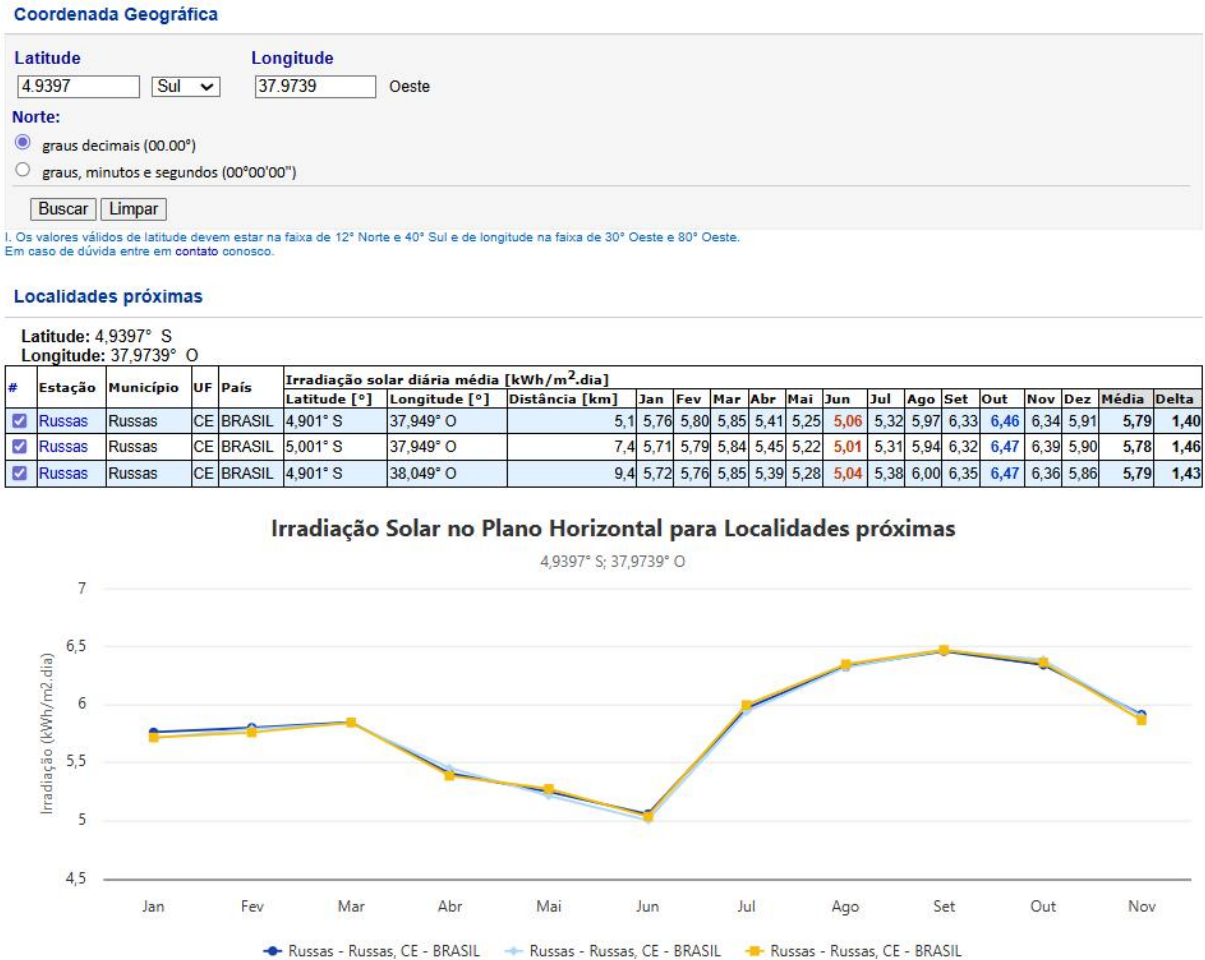
## 2.5 Irradiação solar e uso do SunData/CRESESB

A irradiação solar é um dos principais parâmetros para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. No Brasil, o Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB) disponibiliza a ferramenta SunData, que fornece valores de irradiação solar diária média mensal para diversas localidades do país.

O SunData permite a obtenção de dados solarimétricos em diferentes planos de inclinação, sendo amplamente utilizado em estudos acadêmicos e projetos técnicos. A

utilização dessa base de dados garante confiabilidade ao processo de dimensionamento e possibilita a automatização do cálculo por localidade, conforme proposto neste trabalho. (CRESESB, 2023).

Figura 6 - Utilização do Sun Data V 3.0



Fonte: CRESESB - Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito

## 2.6 Método de Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos *Off-Grid*

Os sistemas fotovoltaicos isolados (*off-grid*), também denominados sistemas fotovoltaicos isolados (SFI), são concebidos para suprir cargas elétricas sem dependência da rede pública, exigindo, em geral, armazenamento eletroquímico (baterias) e condicionamento de potência (controlador de carga e inversor, quando há cargas em corrente alternada). No contexto de projeto, o dimensionamento adequado desses componentes é determinante para garantir continuidade de suprimento, confiabilidade e redução de perdas, uma vez que o

balanço energético do sistema passa a depender simultaneamente do recurso solar disponível e do perfil temporal de consumo.

No livro *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos* os autores Pinho e Galdino apresentam uma metodologia de dimensionamento denominada método do mês crítico, caracterizada por empregar valores médios mensais (de irradiação/horas de sol pleno e consumo) e selecionar o mês mais desfavorável na relação carga/recurso solar como base para o dimensionamento do gerador fotovoltaico, resultando em um sistema capaz de atender a demanda no pior cenário mensal considerado. A lógica do método assume que, ao dimensionar para o pior mês, os meses mais favoráveis tendem a apresentar excedente energético, o que é inerente à simplificação proposta (PINHO; GALDINO, 2014, p. 308).

### ***2.6.1 Caracterização e Correção Energética das cargas em SFI***

A etapa inicial do método consiste em levantar o consumo diário das cargas e distinguir, quando aplicável, consumo em corrente contínua (c.c.) e consumo em corrente alternada (c.a.), pois as cargas em c.a. tipicamente passam por conversão em inversor, introduzindo perdas adicionais. Para representar a energia ativa diária efetivamente requerida do sistema, os autores propõem a correção do consumo por eficiências globais associadas ao armazenamento e à conversão, expressa por:

$$L = \left( \frac{L_{cc}}{\eta_{bat}} \right) + \left( \frac{L_{ca}}{\eta_{bat} \cdot \eta_{inv}} \right) \quad \text{Equação (6.2)}$$

em que  $L_{cc}$  é a energia diária consumida em c.c.,  $L_{ca}$  a energia diária consumida em c.a.,  $\eta_{bat}$  a eficiência global da bateria e  $\eta_{inv}$  a eficiência do inversor

A justificativa do uso dessa relação é que, em sistemas isolados, a energia demandada pelas cargas não pode ser tratada como igual à energia fornecida pelo gerador fotovoltaico, pois parte da energia é dissipada em processos de armazenamento (baterias) e conversão (inversor), devendo ser explicitamente incorporada ao balanço energético do dimensionamento (PINHO; GALDINO, 2014, p. 308–309). No Capítulo 6.2, os autores ainda salientam que a eficiência do inversor depende do carregamento (fração da potência nominal), aspecto relevante para projetos em que o inversor opera frequentemente em cargas parciais, podendo reduzir a eficiência efetiva e aumentar perdas.

### 2.6.2 Método do Mês Crítico e Dimensionamento do Gerador Fotovoltaico

Após a obtenção de L para cada mês, calcula-se o valor médio diário mensal requerido e dimensiona-se a potência do painel fotovoltaico para atender ao pior mês (mês crítico). Esse procedimento é formalizado pela Equação (6.3), que relaciona consumo mensal diário, horas de sol pleno (HSP) e fatores de redução (derating):

$$P_m = \max(i = 1 \dots 12) \left( \frac{L_i}{HSP_i \cdot Red1 \cdot Red2} \right) \quad \text{Equação (6.3)}$$

Onde  $P_m$  é a potência do painel fotovoltaico,  $L_i$  é a energia diária consumida no mês  $i$  (obtida pela Eq. 6.2),  $HSP_i$  é a hora de sol pleno no plano do painel no mês  $i$ , e  $Red1$  e  $Red2$  são fatores de redução que agregam perdas e desvios entre condições reais e nominais (PINHO; GALDINO, 2014, p. 309).

Os autores definem  $Red1$  como um fator associado à redução de potência do módulo em relação ao valor nominal, englobando efeitos como acúmulo de sujeira, degradação, tolerância de fabricação e perdas por temperatura; e recomendam, como valor default para módulos c-Si,  $Red1 = 0,75$ . Já  $Red2$  agrega perdas do sistema (fiação, controlador, diodos etc.), com recomendação default de  $Red2 = 0,9$  (PINHO; GALDINO, 2014, p. 309).

A interpretação física do método é direta: para uma carga fixa ao longo do ano, o mês crítico tende a coincidir com o período de menor disponibilidade solar (menor HSP), pois o quociente  $L_i/HSP_i$  se torna máximo nesse cenário, elevando  $P_m$  (PINHO; GALDINO, 2014, p. 309).

### 2.6.3 Configuração do gerador e relação com o controlador de carga

O Capítulo 6.2 do livro descreve a definição do arranjo série/paralelo de módulos para compatibilização elétrica com o sistema e com o controlador de carga. Para controladores convencionais (sem seguimento do ponto de máxima potência), o dimensionamento do número de módulos em série considera a tensão nominal do sistema ( $V_{sist}$ ) e a tensão de máxima potência do módulo na temperatura máxima ( $V_{mpTmax}$ ), incluindo um fator para garantir carregamento adequado (PINHO; GALDINO, 2014, p. 310). Em seguida, a corrente do painel é associada ao consumo e à tensão do sistema e, por fim,

obtém-se o número de módulos em paralelo a partir da corrente no ponto de máxima potência do módulo ( $I_{mp}$ ) (PINHO; GALDINO, 2014, p. 310–311).

Para controladores com seguimento do ponto de máxima potência (SPPM), os autores destacam que a tensão de saída do painel deve permanecer dentro da faixa ótima recomendada pelo fabricante do controlador, o que conduz a uma desigualdade para o número de módulos em série, e o número de fileiras em paralelo passa a ser calculado a partir da potência total do gerador e da potência de cada fileira, com verificação posterior da corrente do painel (PINHO; GALDINO, 2014, p. 311).

#### 2.6.4 Dimensionamento do Banco de Baterias

Em sistemas isolados, o banco de baterias é dimensionado para suprir energia quando não há geração suficiente (noite e períodos de baixa irradiação). No método do mês crítico, Pinho e Galdino estabelecem que o dimensionamento deve usar a maior energia mensal corrigida ( $L_m$ ), pois representa a condição mais exigente para o subsistema de acumulação (PINHO; GALDINO, 2014, p. 312). A Equação (6.10) define  $L_m$  como o máximo dos valores mensais  $L_i$ :

$$L_m = \max (i = 1 \dots 12) = (L_i) \quad \text{Equação (6.10)}$$

A capacidade do banco em Wh (regime C20) é então obtida por:

$$CBc20 = \left( \frac{L_m \cdot N}{P_d} \right) \quad \text{Equação (6.11)}$$

Em que  $N$  é o número de dias de autonomia e  $P_d$  é a profundidade máxima de descarga admissível. A conversão para capacidade em Ah é dada por:

$$CBic20 (Ah) = \left( \frac{CBc20}{V_{sist}} \right) \quad \text{Equação (6.12)}$$

Os autores ainda indicam que  $N$  varia conforme a região e é tipicamente entre 2 e 4 dias, recomendando que não seja inferior a 2, e registram faixas típicas de profundidade de descarga para diferentes classes de baterias (PINHO; GALDINO, 2014, p. 312). Quando o

parâmetro de autonomia não tiver sido determinado experimentalmente para a localidade, o Capítulo 6.2 apresenta uma alternativa empírica baseada na HSP mínima do pior mês:

$$N = (-0,48 \cdot HSP_{min} + 4,58) \quad \text{Equação (6.13)}$$

## **2.7 Desenvolvimento Web da Ferramenta Utilizando Google IA Studio**

O Google AI Studio é uma plataforma disponibilizada pelo Google com o objetivo de facilitar o desenvolvimento, teste e prototipagem de aplicações baseadas em modelos de Inteligência Artificial generativa. A ferramenta permite a interação direta com modelos avançados de linguagem por meio de uma interface web, possibilitando a criação, avaliação e refinamento de prompts de forma iterativa (GOOGLE, 2024).

Segundo a documentação oficial, o Google AI Studio foi projetado para reduzir a complexidade associada ao uso direto de APIs de modelos de IA, oferecendo um ambiente acessível para desenvolvedores e pesquisadores que desejam validar conceitos antes da implementação em aplicações finais (GOOGLE, 2024).

### ***2.7.1 Funcionamento do Google AI Studio na Prototipagem de Sistemas***

O funcionamento do Google AI Studio baseia-se na definição de prompts, que atuam como instruções textuais responsáveis por orientar o comportamento dos modelos de linguagem. Esses comandos podem incluir contexto, regras, exemplos e restrições, permitindo controlar a forma como o modelo responde às solicitações do usuário (GOOGLE, 2024).

De acordo com o Google (2024), o ambiente possibilita a execução de testes iterativos, nos quais o desenvolvedor ajusta continuamente os parâmetros e instruções fornecidas ao modelo, avaliando a coerência, relevância e adequação das respostas geradas. Esse processo é fundamental para a prototipagem de sistemas inteligentes, pois permite identificar limitações e oportunidades de melhoria antes da integração com aplicações externas.

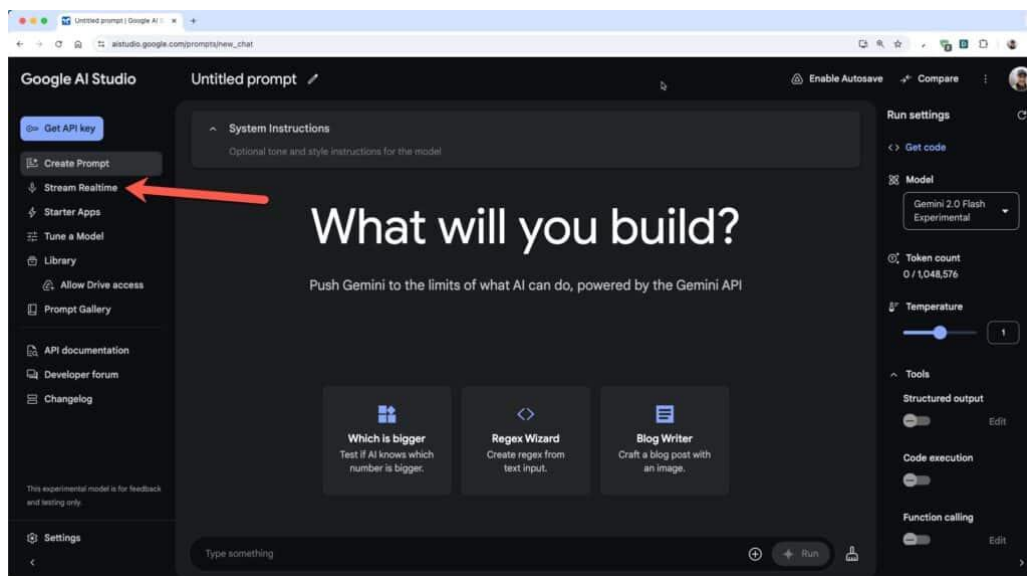
### ***2.7.2 Aplicações no Desenvolvimento de Sistemas Web***

No contexto do desenvolvimento de sistemas web, o Google AI Studio pode ser utilizado como ferramenta de apoio à concepção de funcionalidades baseadas em Inteligência

Artificial, como assistentes virtuais, geração automática de conteúdo e suporte interativo ao usuário. A possibilidade de simular fluxos de interação diretamente na plataforma contribui para a validação de requisitos funcionais e de usabilidade (GOOGLE, 2024).

Além disso, o uso de ambientes de prototipagem baseados em IA está alinhado às práticas modernas de engenharia de software, especialmente às metodologias ágeis, que priorizam ciclos curtos de desenvolvimento, validação contínua e evolução incremental do sistema (GOOGLE, 2024).

Figura 7 - Interface Google Ai Studio

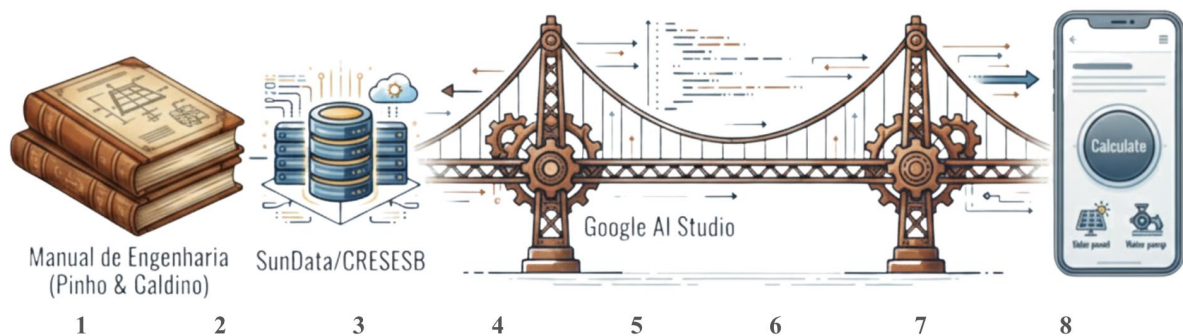


Fonte: Google AI Studio

### 3 METODOLOGIA

Esta pesquisa é de natureza aplicada, com abordagem quantitativa e finalidade descritivo-procedimental, pois estrutura e sistematiza um conjunto de equações e decisões de projeto para dimensionar um Sistema Fotovoltaico Isolado (SFI) destinado ao atendimento de uma carga elétrica específica, sem dependência da rede pública. O método adotado é o método do mês crítico, por avaliar o dimensionamento no cenário mais desfavorável de recurso solar ao longo do ano, garantindo maior robustez operacional do sistema (PINHO; GALDINO, 2014, cap. 6).

Figura 8 - Fluxograma do desenvolvimento do protótipo



Fonte: Desenhado pelo Autor

A metodologia é apresentada em forma de fluxo lógico: 1. Estudo do método e definição de cálculos; 2. Levantamento de dados para o método; 3. Definição de recurso solar do local (HSP); 4. Cálculo do consumo de energia do equipamento; 5. Cálculo das equações do método e obtenção da capacidade do sistema FV; Aplicação da metodologia no Google AI Studio; 7. Obtenção da interface do protótipo; 8. Testes da Calculadora Web e comparação de resultados.

A partir dos cálculos definidos pelo método proposto é possível gerar um prompt com as fórmulas, entradas e variante pré-definidas, utilizadas para projetar o sistema web de cálculo de dimensionamento de sistemas fotovoltaico off-grid no Google AI Studio que vai gerar um protótipo computacional que pode ser hospedado na web e utilizado por empresas do setor de energia solar.

### 3.1 Fundamentação Teórica do Dimensionamento Fotovoltaico Isolado

Sistemas fotovoltaicos isolados são arranjos em que a energia elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos é condicionada e gerenciada para atender cargas sem conexão com a rede, normalmente com apoio de armazenamento em baterias e conversão CC/CA por inversores quando a carga opera em corrente alternada (PINHO; GALDINO, 2014).

No dimensionamento de SFI, a premissa central é que a potência instalada do gerador FV e a capacidade do banco de baterias sejam suficientes para: suprir o consumo diário; compensar perdas manter a continuidade de serviço em períodos de baixa irradiação. Nesse contexto, o método do mês crítico dimensiona o gerador FV tomando o maior valor da razão entre demanda energética e recurso solar ao longo dos 12 meses do ano (PINHO; GALDINO, 2014, p. 309, Eq. 6.3).

Um conceito essencial é o de Horas de Sol Pleno (HSP), definido como o “número de horas em que a irradiação solar deveria permanecer constante e igual a 1000 W/m<sup>2</sup>, de forma que a energia recebida diária fosse a mesma para aquela localidade” (PINHO; GALDINO, 2014, glossário, p. 41–42).

Os principais componentes considerados nesta metodologia são:

- I. Gerador FV (módulos fotovoltaicos): convertem a irradiância em energia elétrica CC.
- II. Banco de baterias: armazena energia para suprir carga em ausência de sol e estabiliza o barramento CC

### 3.2 Dados de Entrada e Levantamento das Variáveis do Problema

Para aplicação da metodologia ao caso de bombeamento em Russas–CE, os dados mínimos implementar o método são:

#### 3.2.1 Dados da carga (bomba)

- I. Potência mecânica/nominal em CV
- II. Regime de operação em horas
- III. Tipo de carga: trifásica
- IV. Natureza elétrica: corrente alternada (CA).

### 3.2.2 Dados do sistema

- I. Tensão desejada do sistema:  $V_{sist} = 24 \text{ V}$  (Para este método foi definido a tensão desejada do sistema em 24 V pois é um tensão comumente encontrada em bombas d'água trifásicas)
- II. Profundidade de descarga admissível:  $P_d = 0,8$  (Consideramos neste método uma bateria de lítio, comum em sistemas off-grid. Esta possui  $P_d$  recomendada pelo fabricante de 80 a 90%. Logo, tomamos  $P_d$  como 0,8). (RELION BATTERY)

### 3.2.3 Dados do Recurso Solar

Para a determinação do recurso solar local, utilizou-se a base de dados SunData, desenvolvida pelo Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB). O SunData fornece valores de irradiação solar diária média mensal, expressos em  $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$ , para diferentes localidades do território brasileiro. No método proposto, a localidade informada é associada aos dados solarimétricos correspondentes no SunData. Os valores mensais de irradiação são tratados como equivalentes às Horas de Sol Pleno (HSP), utilizadas na modelagem energética do sistema fotovoltaico.

Para aplicações off-grid, adota-se um critério conservador de dimensionamento, considerando o mês mais desfavorável, correspondente ao menor valor mensal de HSP, de modo a garantir o atendimento da demanda energética mesmo em períodos de menor disponibilidade solar.

HSP: por metodologia, deve ser obtido mensalmente; porém, para este trabalho será adotado a cidade de Russas como referência e assim temos que:  $HSP = 5,0 \text{ h/dia}$ .

### 3.3 Cálculo do Consumo Energético Diário (carga CA)

O consumo energético diário da carga é calculado a partir da potência elétrica equivalente e do tempo de uso diário.

### 3.3.1 Potência Elétrica Equivalente da Bomba em W

$$P_{bomba} = 1CV \cdot 735W/CV = 735W$$

### 3.3.2 Energia diária consumida em CA (Wh/dia)

$$L_{ca} = P_{bomba} \cdot t$$

temos que:

$L_{ca}$  = Energia diária consumida (Wh/dia)

t = tempo em horas de uso

### 3.4 Considerações para Sistema Off Grid (Perdas e Energia Ativa Requerida)

Em sistemas isolados com baterias e inversor, o dimensionamento do gerador FV deve considerar que a energia que “sai” do sistema fotovoltaico precisa compensar as perdas associadas ao armazenamento e à conversão CC/CA. Para isso, Pinho e Galdino definem a energia ativa necessária diariamente  $L$  (Wh/dia) pela Equação (6.2), que incorpora separadamente cargas CC e CA e as eficiências globais de bateria e inversor (PINHO; GALDINO, 2014, p. 308):

$$L = \left( \frac{L_{cc}}{\eta_{bat}} \right) + \left( \frac{L_{ca}}{\eta_{bat} \cdot \eta_{inv}} \right) \quad \text{Equação (6.2)}$$

Onde:

$L$  = energia ativa necessária diariamente (Wh/dia);

$L_{cc}$  = energia diária consumida em corrente contínua (Wh/dia);

$L_{ca}$  = energia diária consumida em corrente alternada (Wh/dia);

$\eta_{bat}$  = eficiência global da bateria;

$\eta_{inv}$  = eficiência do inversor.

Justificativa de uso: esta equação é utilizada porque o dimensionamento do gerador FV deve partir da demanda energética efetiva vista “antes” das perdas de bateria e

inversor, exatamente como estabelecido no procedimento de dimensionamento da geração do SFI (PINHO; GALDINO, 2014, p. 308).

Valores de referência (quando não se tem curva/ficha detalhada): o livro registra que, na faixa de operação entre 50% e 100% da potência nominal, a eficiência mínima requerida para inversores (conforme requisito do Inmetro citado no manual) é 85%, e sugere eficiência global de bateria de 86% (PINHO; GALDINO, 2014, p. 309). Nesta metodologia, quando o catálogo do equipamento não disponibilizar a curva, adota-se inicialmente  $\eta_{inv} = 0,85$  e  $\eta_{bat} = 0,86$ , com posterior substituição pelos valores do fabricante.

Como a carga é CA e não há carga CC considerada, define-se  $L_{cc} = 0$ .

### 3.5 Dimensionamento do Gerador Fotovoltaico pelo Método do Mês Crítico

O método do mês crítico também é chamado de intuitivo e consiste na realização do dimensionamento do SFI considerando um balanço de energia durante o período do ano no qual ocorrem as condições médias mais desfavoráveis para o sistema. Supõe-se que se o sistema funcionar adequadamente neste mês, isso ocorrerá também nos demais meses do ano, assim sendo, o sistema produzirá mais energia nos outros meses nos quais as condições forem mais favoráveis. (PINHO; GALDINO, 2014, p. 308)

#### 3.5.1 Potência Necessária do Gerador FV

Com o valor de  $L_i$  (energia diária requerida) calculado para cada mês  $i$ , a potência necessária do painel fotovoltaico (potência do gerador FV) é obtida pela Equação (6.3), que seleciona o mês crítico por maximização.

$$P_m = \max(i = 1 \dots 12) \left( \frac{L_i}{HSP_i \cdot Red1 \cdot Red2} \right) \quad \text{Equação (6.3)}$$

Onde:

$P_m$  = potência do gerador FV (Wp);

$L_i$  = energia diária requerida no mês  $i$  (Wh/dia);

$HSP_i$  = horas de sol pleno no mês  $i$  (h/dia);

$Red1$  e  $Red2$  = fatores de redução/perdas.

Justificativa de uso: a Equação (6.3) é o núcleo do método do mês crítico, pois assegura que o gerador FV seja dimensionado para o pior cenário mensal de disponibilidade solar em relação à demanda.

### **3.5.2 Fatores de Redução do Gerador FV**

Para o caso de módulos de silício cristalino, é recomendado por Pinho e Galdino(2014), quando não há dados mais específicos, os seguintes valores:

Red1 = 0,75 para representar sujeira, degradação e perdas diversas;

Red2 = 0,9 para representar perdas adicionais (associadas ao conjunto, conforme procedimento do capítulo).

## **3.6 Dimensionamento do Arranjo de Módulos (série/paralelo)**

### **3.6.1 Número de Módulos em Série**

Para o número de módulos em série é adotado a recomendação explícita do livro para um sistema de tensão de 24V.  $N_s = 2$  módulos

### **3.6.2 Número de Fileiras em Paralelo e Corrente do Arranjo**

O número de módulos em paralelo é calculado pela potência total requerida do gerador FV e pela potência de cada fileira (PINHO; GALDINO, 2014, p. 311):

$$N_p = \left( \frac{P_m}{N_s \cdot P_m} \right) \quad \text{Equação (6.8)}$$

A corrente do arranjo é:

$$N_p = (N_p \cdot I_{mp}) \quad \text{Equação (6.9)}$$

Onde:

$I_m$  = corrente do arranjo

$P_{mod}$  = potência nominal do módulo (Wp);

$I_{mp}$  = corrente no ponto de máxima potência do módulo (A).

### 3.7 Dimensionamento do Banco de Baterias (Método do Mês Crítico)

O dimensionamento do banco de baterias é feito a partir do consumo máximo corrigido, do número de dias de autonomia e da profundidade de descarga admissível, conforme as seguintes equações:

$$Lm = \max (i = 1 \dots 12) = (Li) \quad \text{Equação (6.10)}$$

$$CBc20 = \left( \frac{Lm \cdot N}{Pd} \right) \quad \text{Equação (6.11)}$$

Onde:

CBc20 = Capacidade do Banco de Baterias em Wh

$$CBic20 (Ah) = \left( \frac{CBc20}{Vsist} \right) \quad \text{Equação (6.12)}$$

Onde:

CBic20 = Capacidade do Banco de Baterias em Ah

N = dias de autonomia (dias);

Pd = profundidade de descarga admissível (adimensional);

Vsist = tensão do sistema (V).

O livro ressalta que, tipicamente, utiliza-se autonomia entre 2 e 4 dias, e que N “não deve ser menor que 2” em aplicações usuais (PINHO; GALDINO, 2014, p. 312).

#### 3.7.1 Estimativa de Dias de Autonomia Quando Não Há Dados Experimentais

Quando não há determinação experimental para N, o livro apresenta uma aproximação em função do mês crítico por (PINHO; GALDINO, 2014, p. 312):

$$N = (-0,48 \cdot HSPmin + 4,58) \quad \text{Equação (6.13)}$$

Justificativa de uso: esta equação é indicada como estimativa inicial para autonomia em função do recurso solar mínimo, auxiliando quando não há série histórica/definição de projeto mais detalhada (PINHO; GALDINO, 2014, p. 312).

### **3.8 Desenvolvimento da Calculadora na Web com Google Ai Studio**

A metodologia desenvolvida foi implementada em um protótipo computacional em ambiente web desenvolvido pelo Google AI Studio, com o objetivo de automatizar o processo de dimensionamento e reduzir a ocorrência de erros operacionais. O protótipo permite a inserção dos dados de entrada pelo usuário e executa automaticamente as etapas de cálculo descritas neste capítulo.

#### ***3.8.1 Entradas do método na interface da calculadora***

O usuário já deve ter definido as seguintes informações

1. Potência em CV do motor
2. Horas de uso no dia
3. Horas de uso na noite
4. Localização/cidade onde está o sistema

#### ***3.8.2 Valores pré fixados no algoritmo***

São valores pré estabelecidos pela literatura, fabricante e o autor do trabalho

1.  $N =$  dias de autonomia (dias) = 2
2.  $P_d =$  profundidade de descarga admissível (adimensional) = 0,8
3.  $V_{sist} =$  tensão do sistema (V) = 24
4. Fase da Bomba = trifásico
5. Cidade = Russas-CE
6. HSP = 5 h/dia
7. Sistema em Corrente Alternada CA
8. Potência dos módulos fotovoltaicos = 550W
9.  $\eta_{bat} =$  eficiência global da bateria = 0,86
10.  $\eta_{inv} =$  eficiência do inversor. 0,85
11.  $Red_1 =$  Fator de Redução dos modulos = 0,75
12.  $Red_2 =$  Fator de redução a perdas = 0,9

### ***3.8.3 Fluxo do algoritmo***

O fluxo lógico do algoritmo pode ser resumido nas seguintes etapas:

1. leitura dos dados de entrada fornecidos pelo usuário;
2. definição do recurso solar de Russas-CE equivalente a 5,0h;
3. cálculo da potência e da energia requerida pelo sistema de bombeamento;
4. dimensionamento da potência do sistema fotovoltaico;
5. dimensionamento do banco de baterias, quando aplicável;
6. geração do relatório de saída com os resultados.

### ***3.8.4 Saídas do método***

O método fornece como resultados:

1. potência total do sistema fotovoltaico (kWp);
2. quantidade de módulos necessários
3. indicação da capacidade energética de baterias em kWh e Ah

### ***3.8.5 Desenvolvimento do Contexto do Prompt***

Para desenvolver a calculadora web que foi nomeada de Calculadora Candido's FV, primeiro é necessário definir um escopo inicial de protótipo voltado a sistemas off-grid aplicados ao bombeamento de água, priorizando entradas mínimas e de fácil compreensão para o usuário. Selecionar como dados de entrada a potência da bomba em CV, as horas de uso durante o dia e à noite e a localização do sistema, fixar inicialmente a cidade de Russas-CE para padronizar o valor de irradiação empregado no cálculo, por meio de uma HSP de referência.

Em seguida, se deve informar para converter as etapas do método em um algoritmo de cálculo sequencial, estabelecer constantes e premissas do modelo (eficiências, redutores, tensão do sistema, autonomia e profundidade de descarga) e organizar as equações necessárias para determinar a potência do gerador fotovoltaico, o número de módulos e a capacidade do banco de baterias. Com base nisso se deve elaborar um prompt técnico com variáveis, fórmulas, unidades, regras de arredondamento e validações e orientar a geração de um sistema web com interface simples e autoexplicativa, composta por formulário de entradas e área de resultados.

Durante a construção, realizar iterações para ajustar prompt e código, assegurar consistência de unidades (W, Wh, kWp, kWh e Ah), garantir a aplicação correta dos arredondamentos (principalmente para o número inteiro de módulos) e melhorar a clareza na apresentação dos parâmetros fixados do protótipo. Por fim, incluir na interface seções informativas com os valores adotados (como a HSP fixada para Russas-CE) e explicações introdutórias sobre a interpretação do banco de baterias, de modo a tornar a ferramenta adequada como estimativa inicial para apoio à tomada de decisão e ao orçamento do sistema. Em anexo foi enviado o Prompt aplicado para gerar esta calculadora.

### **3.9 Limitações da Metodologia**

A metodologia proposta apresenta limitações inerentes às premissas adotadas. A não consideração explícita de parâmetros hidráulicos detalhados pode introduzir incertezas caso o sistema de bombeamento não opere em condições próximas às nominais. Além disso, variações climáticas e operacionais ao longo do tempo podem afetar o desempenho real do sistema fotovoltaico.

A calculadora ainda apresentou limitação na variedade de resultados entregues devido os valores pré fixados, ela entregou informações limitadas àqueles valores, em que o usuário fica restringido a aos módulos e localização definidas previamente. Necessitando de maior complexidade nas suas equações para ter maior abrangência nas respostas.

Entretanto, tais limitações são compatíveis com o objetivo do trabalho, que visa fornecer uma ferramenta prática, simplificada e automatizada para o dimensionamento preliminar de sistemas fotovoltaicos off-grid aplicados ao bombeamento de água.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo de caso apresentado neste capítulo refere-se a uma propriedade agrícola localizada no município de Russas-CE, região do Vale do Jaguaribe. A propriedade utiliza um sistema de bombeamento de água acionado por um motor elétrico trifásico, já existente, destinado à irrigação agrícola.

Os cálculos apresentados neste capítulo seguem integralmente a metodologia de dimensionamento energético descrita por Pinho e Galdino (2014), utilizando dados solarimétricos obtidos a partir do SunData/CRESESB. O estudo de caso permite verificar a aplicabilidade prática da metodologia proposta para uma situação representativa da realidade agrícola do interior do Ceará.

### 4.1 Dados de Entrada do Estudo de Caso

A Tabela 1 apresenta os dados de entrada utilizados no estudo de caso, os quais representam informações de fácil obtenção pelo usuário final, conforme estabelecido na metodologia.

Tabela 1 - Dados de entrada do estudo de caso

<b>Parâmetro</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Potência Nominal do Motor	CV	3	CV
Tipo de Motor	-	Trifásico	-
Horas no Dia	Hdia	6	h/dia
Horas na Noite	Hnoite	6	h/dia
Horas Totais	Htotal	12	h/dia
Cidade	-	Russas-CE	-
Operação Noturna	-	Sim	-
Autonomia do Banco de Baterias	A	2	dias
Tensão do Banco de Baterias	Vsys	24	V

Fonte: Elaborada pelo autor

## 4.2 Parâmetros e Premissas Adotadas

Aplicação do método estudado ao caso da bomba (3 CV; 12 h/dia; 24 V; HSP = 5 h/dia). Esta subseção ilustra a aplicação numérica do método. Os valores externos usados aqui (conversão CV→W e HSP local quando não se usa série mensal) devem ser referenciados.

### 4.2.1 Energia Diária em CA

$$P_{bomba} = 1CV \cdot 735W/CV = 735W$$

$$P_{bomba} = 3CV \cdot 735W/CV = 2205W$$

$$Lca = P_{bomba} \cdot t$$

$$Lca = 2205 \cdot 12$$

$$Lca = 26460 Wh/dia$$

### 4.2.2 Energia Diária Requerida Corrigida

$$L = \left( \frac{Lcc}{\eta_{bat}} \right) + \left( \frac{Lca}{\eta_{bat} \cdot \eta_{inv}} \right)$$

Adotando  $\eta_{inv} = 0,85$  e  $\eta_{bat} = 0,86$  como referência e  $Lcc = 0$ , temos:

$$L = \left( \frac{Lca}{\eta_{bat} \cdot \eta_{inv}} \right)$$

$$L = \left( \frac{26460}{0,86 \cdot 0,85} \right)$$

$$L = 36196,9$$

### 4.2.3 Potência do Gerador FV

Para: HSP = 5 h/dia    Red1 = 0,75    Red2 = 0,9

$$Pm = \max(i = 1 \dots 12) \left( \frac{Li}{HSPi \cdot Red1 \cdot Red2} \right)$$

$$Pm = \left( \frac{36196,9}{5 \cdot 0,75 \cdot 0,9} \right)$$

Adotamos a potência dos módulos  $P_{mod} = 550W$

$$N_{mod} = \left( \frac{Pm}{P_{mod}} \right) = 20 \text{ módulos}$$

Observação: o livro não fixa uma potência padrão de módulo; a seleção do módulo (ex.: 550 W) deve ser referenciada por datasheet/fabricante.

#### 4.2.4 Autonomia Estimada e Banco de Baterias

##### 4.2.4.1 Cálculo da Autonomia Estimada do Sistema (N)

$$N = (-0,48 \cdot HSP_{min} + 4,58)$$

$$N = (-0,48 \cdot 5 + 4,58) = 2,18 \text{ dias}$$

Adotando  $N = 2$  dias (arredondamento para aplicação prática),

Temos pelo  $P_d = 0,8$  informando pelo fabricante

$V_{sist} = 24$  V (Pré definido no sistema)

##### 4.2.4.2 Capacidade do Banco de Baterias em Wh

$$CBc20 = \left( \frac{Lm \cdot N}{P_d} \right) = \left( \frac{36196,9 \cdot 2}{0,8} \right) = 90492 \text{ Wh} = 90,49 \text{ kWh}$$

$$CBc20 = 90,49 \text{ kWh}$$

##### 4.2.4.3 Capacidade do Banco de Baterias em Ah

$$CBic20 (Ah) = \left( \frac{CBc20}{V_{sist}} \right) = \left( \frac{90,49}{24} \right)$$

$$CBic20 (Ah) = 3770,5$$

#### 4.2.4.4 Como calcular o Número de Baterias

A partir da capacidade requerida do banco de baterias, expressa em kWh e em Ah, o número de baterias é determinado após a escolha de uma bateria de referência, definida por sua tensão nominal e capacidade em Ah (usualmente no regime C20). Para um banco em 24 V, calcula-se inicialmente o número de baterias em série necessário para atingir a tensão do banco e, em seguida, o número de ramais em paralelo para atender a capacidade total requerida. O número total de baterias resulta do produto entre a quantidade em série e a quantidade em paralelo (PINHO; GALDINO, 2014).

#### 4.2.4.5 Driver (controlador + inversor)

Controlador: dimensionar  $I_c$  pela Eq. (6.18) (PINHO; GALDINO, 2014, p. 314), exigindo  $I_{sc}$  e configuração série/paralelo do módulo (datasheet). Inversor: deve suportar potência da bomba e surto de partida; o livro alerta para motor de indução podendo exigir  $>10$  vezes  $I_n$  por curto intervalo (PINHO; GALDINO, 2014, p. 231) e discute arranjos para obter saída trifásica via associação, quando aplicável (PINHO; GALDINO, 2014, p. 315).

### 4.3 Aplicação do Estudo de Caso na Calculadora Web

Com base na metodologia de dimensionamento adotada neste trabalho, fundamentada no método do mês crítico, tornou-se possível implementar uma calculadora web capaz de automatizar as etapas de cálculo e fornecer, de forma rápida e padronizada, as principais grandezas de dimensionamento de um sistema fotovoltaico off-grid aplicado ao bombeamento de água. Dessa forma, a ferramenta desenvolvida representa a materialização prática da metodologia proposta, traduzindo as equações, premissas e parâmetros definidos em uma interface acessível ao usuário final.

Figura 9 - Interface inicial da Calculadora Candido's FV

Fonte: Desenvolvido pelo autor

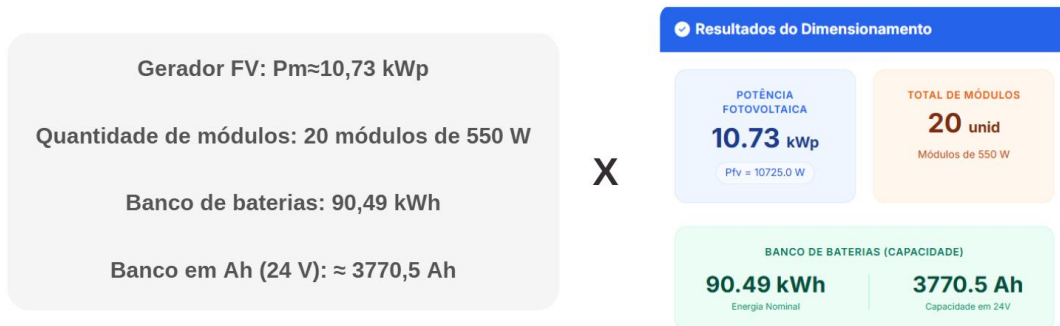
Na sequência, fará uso dos dados de entrada definidos no estudo de caso para preenchimento da interface inicial da calculadora, contemplando as variáveis necessárias ao dimensionamento (por exemplo, potência da bomba em CV, horas de operação no período diurno e noturno e localização adotada no protótipo). Após a inserção dessas informações, o sistema realizará automaticamente o processamento conforme o encadeamento de equações implementado, gerando como saídas a potência do arranjo fotovoltaico (kWp), o número de módulos e a capacidade do banco de baterias em unidades adequadas.

Figura 10 - Utilização da calculadora Candido's FV e resultados

Fonte: Desenvolvido pelo autor

Com os resultados obtidos pela calculadora, se procede à comparação direta com os valores calculados no estudo de caso por meio da aplicação da metodologia do método do mês crítico. Essa comparação tem como finalidade verificar a consistência da implementação e confirmar se a automação reproduz corretamente os resultados esperados a partir do modelo teórico. Assim, ao confrontar as saídas da ferramenta com os resultados do dimensionamento realizado pela metodologia de referência, torna-se possível avaliar a aderência do sistema ao procedimento de cálculo proposto e sustentar a utilização da calculadora como um instrumento verídico dentro do escopo estabelecido.

Figura 11 - Comparação de Resultados: Cálculo Manual x Calculadora WEB



Fonte: Desenhado pelo autor

#### 4.4 Análise e Discussão dos Resultados

Os resultados obtidos demonstram que a metodologia proposta permite o dimensionamento completo de um sistema fotovoltaico off-grid para bombeamento de água a partir de informações simples fornecidas pelo cliente. O sistema fotovoltaico dimensionado apresentou potência instalada de 10,73 kWp, valor compatível com a demanda energética do motor de 3 CV operando 12 horas diárias.

Observa-se que a necessidade de operação noturna implica a inclusão de um banco de baterias com capacidade significativa, o que impacta diretamente o custo total do sistema. Esse resultado reforça a recomendação técnica de priorizar, sempre que possível, o bombeamento no período diurno associado ao armazenamento hídrico, estratégia que pode reduzir substancialmente o investimento inicial e os custos de manutenção.

Ainda assim, o estudo de caso evidencia que a metodologia é capaz de atender diferentes perfis de operação de potências de Bomba, fornecendo ao usuário uma base técnica

sólida para a tomada de decisão quanto à configuração do sistema fotovoltaico. O software da calculadora web cumpre com o objetivo proposto. Sendo uma opção valiosa para as empresas de integração solar que pretendem calcular a potência de sistemas fotovoltaicos *Off-Grid* de forma mais rápida e precisa.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de uma calculadora web automatizada para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos off-grid aplicados ao bombeamento de água em propriedades agrícolas do município de Russas-CE, utilizando informações de fácil obtenção pelo cliente final aliadas a dados solarimétricos oficiais. Com base nos resultados obtidos ao longo do desenvolvimento da metodologia e da aplicação do estudo de caso, conclui-se que o objetivo proposto foi plenamente alcançado.

A metodologia desenvolvida mostrou-se tecnicamente consistente para estimar a potência do gerador fotovoltaico necessária ao atendimento da demanda energética do bombeamento, bem como para avaliar, de forma objetiva, a necessidade de inclusão de sistemas de armazenamento em função do perfil de operação informado. A integração dos dados de irradiação solar provenientes da base SunData/CRESESB conferiu maior confiabilidade ao processo de dimensionamento, além de permitir a automatização dos cálculos conforme a localidade analisada, tornando a ferramenta replicável para diferentes cenários geográficos.

A aplicação da metodologia em um estudo de caso teórico representativo da realidade agrícola do interior do Ceará evidenciou que, a partir de informações simples como potência nominal do motor, tempo diário de operação e localização geográfica é possível obter resultados coerentes com práticas adotadas no mercado de sistemas fotovoltaicos isolados. Observou-se, ainda, que a operação em período noturno exerce influência significativa sobre o dimensionamento do banco de baterias, impactando diretamente o custo global do sistema, o que reforça a importância da correta definição do perfil de uso na tomada de decisão técnica e econômica.

Entretanto, ao analisar de forma crítica os resultados obtidos a partir dos cálculos das equações propostas, verificou-se que o dimensionamento resultou em valores elevados para o número de módulos fotovoltaicos e para a capacidade do banco de baterias. No estudo de caso analisado, o sistema demandou aproximadamente 20 módulos fotovoltaicos de 550 W e um banco de baterias com capacidade da ordem de 90 kWh, valor superior à capacidade energética de baterias utilizadas em veículos elétricos. Tal resultado evidencia que a metodologia adotada, fundamentada em critérios críticos de irradiação solar e elevados fatores de segurança, apresenta caráter conservador, o que pode conduzir a um

superdimensionamento do sistema e, conseqüentemente, a um custo elevado, podendo inviabilizar economicamente a aplicação em determinados contextos.

Nesse sentido, torna-se relevante considerar a possibilidade de flexibilização da metodologia proposta, seja por meio da revisão de alguns coeficientes de redução, seja pela adoção de valores médios de irradiação solar em substituição aos valores críticos, de modo a obter um dimensionamento mais equilibrado entre confiabilidade técnica e viabilidade econômica. Tal abordagem permitiria ajustar a quantidade de módulos fotovoltaicos e a capacidade do banco de baterias a níveis mais compatíveis com o propósito e as condições financeiras do usuário final, sem comprometer de forma significativa o desempenho do sistema.

Cabe destacar, ainda, que o presente trabalho não contempla o redimensionamento do sistema hidráulico de bombeamento, partindo do pressuposto de que a bomba já se encontra adequadamente selecionada para a aplicação analisada. Além disso, o dimensionamento baseou-se em dados teóricos e parâmetros médios de desempenho, não considerando variações operacionais específicas, como degradação dos componentes ao longo do tempo, flutuações sazonais extremas ou medições experimentais em campo. A análise econômica também foi conduzida de forma qualitativa, baseada em valores representativos de mercado, não abrangendo estudos aprofundados de viabilidade financeira.

Dessa forma, o trabalho contribui para a padronização do processo de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos off-grid aplicados ao bombeamento de água, ao disponibilizar uma ferramenta computacional automatizada, prática e de fácil utilização, capaz de auxiliar produtores rurais e empresas integradoras na elaboração de projetos mais confiáveis. Como perspectivas futuras, destaca-se a validação experimental da metodologia em sistemas reais, a incorporação de medições em campo para calibração dos parâmetros, a ampliação para diferentes perfis de carga e tipos de bombas, bem como o aprimoramento do protótipo computacional com análises econômicas mais detalhadas e interfaces gráficas mais avançadas.

## REFERÊNCIAS

BOYLESTAD, Robert L. **Introdução à análise de circuitos**. 12. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012.

CRESESB - Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Potencial Solar - SunData v 3.0**. Rio de Janeiro: CEPEL/Eletronbras, 2018. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>. Acesso em: 2025.

GOOGLE. Google AI Studio: overview and features. Mountain View, 2024. Disponível em: <https://ai.google.dev>. Acesso em: 2025

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Sistema Internacional de Unidades (SI)**. Rio de Janeiro: Inmetro, 2012.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL/Cresesb, 2014.

RELION BATTERY. **Tech Tuesday: Depth of Discharge**. [S. l.]: Relion Battery Blog, 3 mar. 2020. Disponível em: <https://www.relionbattery.com/blog/tech-tuesday-depth-of-discharge>. Acesso em: 2025.

SILVA, Emerson Neto da; BASCOPE, René Pastor Torrico. **Sistema de Bombeamento de Água Usando Energia Fotovoltaica**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, VIII. Fortaleza, 2020.

VIAN, Ângelo; TAHAN, Carlos Marcio Vieira. **Energia Solar: Fundamentos, Tecnologia e Aplicações**. 1ª ed. Blucher, 2021.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações**. 1ª ed. São Paulo. Editora Érica Ltda, 2012.

WEG S.A. **CFW500 V1.8: Manual do Usuário - Inversor de Frequência**. Jaraguá do Sul: WEG, 2014.

## ANEXO A – PROMPT UTILIZADO PARA GERAR A CALCULADORA

### PROMPT UTILIZADO NO GOOGLE AI STUDIO

Crie um SISTEMA WEB (frontend + backend simples) para uma calculadora de dimensionamento fotovoltaico OFF-GRID (isolado) baseada no método do “mês crítico”, com foco em bombeamento de água. O objetivo é um protótipo funcional, intuitivo e autoexplicativo, com entradas mínimas e resultados claros.

=====

#### 1) ESCOPO DO SISTEMA (V1)

=====

- Aplicação web responsiva (desktop e mobile).
- Uma página principal com formulário (inputs) + uma área de resultados.
- O protótipo trabalha com a cidade Russas-CE fixa e HSP fixo.
- Entradas mínimas:
  - 1) Potência da bomba (CV) -> número (float)
  - 2) Horas de uso no dia (Hd) -> número (float)
  - 3) Horas de uso na noite (Hn) -> número (float)
  - 4) Localização (Cidade) -> string (fixar “Russas-CE” no V1, apenas exibir no UI)
- Saídas:
  - Potência do sistema FV: Pfv em kWp
  - Número total de módulos: Nm (inteiro, sempre arredondar para cima)
  - Capacidade do banco de baterias: CBc20 em kWh
  - Capacidade do banco de baterias: CBlc20 em Ah (em 24 V)
- Mostrar também os valores intermediários (opcional, em um “detalhes do cálculo” expansível):
  - Pb (W), Lca (Wh/dia), L (Wh/dia), Pfv (W)

=====

## 2) CONSTANTES DO MODELO (FIXAS V1)

=====

Defina estas constantes no código e exiba na interface em um bloco "Parâmetros adotados":

$N_{\text{autonomia\_dias}} = 2$

$Pd_{\text{profundidade\_descarga}} = 0.8$

$V_{\text{sist\_V}} = 24$

$HSP\_h = 5$

$P_{\text{mod\_W}} = 550$

$\eta_{\text{bat}} = 0.86$

$\eta_{\text{inv}} = 0.85$

$Red1 = 0.75$

$Red2 = 0.9$

$Cidade = \text{"Russas-CE"}$

$Fase\_bomba = \text{"Trifásico"}$

=====

## 3) EQUAÇÕES (DEFINIÇÃO EXATA DO CÁLCULO)

=====

IMPORTANTE: use exatamente as fórmulas abaixo, com unidades consistentes.

(1) Converter CV -> W:

$Pb\_W = CV * 735$

(2) Energia diária na carga (Wh/dia):

$$Lca\_Wh\_dia = Pb\_W * (Hd + Hn)$$

(3) Energia diária corrigida por eficiências (Wh/dia):

$$L\_Wh\_dia = Lca\_Wh\_dia / (eta\_bat * eta\_inv)$$

(4) Potência FV necessária (W):

$$Pfv\_W = L\_Wh\_dia / (HSP\_h * Red1 * Red2)$$

(5) Número de módulos (real) e inteiro:

$$Nm\_real = Pfv\_W / Pmod\_W$$

$$Nm = ceil(Nm\_real) \quad // \text{SEMPRE arredondar para cima}$$

(6) Banco de baterias - energia nominal requerida (Wh):

$$CBc20\_Wh = (L\_Wh\_dia * N\_autonomia\_dias) / Pd\_profundidade\_descarga$$

(7) Banco de baterias - capacidade em Ah (24 V):

$$CBlc20\_Ah = CBc20\_Wh / Vsist\_V$$

(8) Conversões para exibição:

$$Pfv\_kWp = Pfv\_W / 1000$$

$$CBc20\_kWh = CBc20\_Wh / 1000$$

=====

4) REGRAS E VALIDAÇÕES (OBRIGATÓRIO)

=====

- CV > 0

- $H_d \geq 0$
- $H_n \geq 0$
- $(H_d + H_n) > 0$
- Se qualquer validação falhar: não calcular e mostrar mensagens claras ao lado do campo.
- Use ponto flutuante para cálculos; para exibição:
  - Pfv\_kWp com 2 casas decimais
  - CBc20\_kWh com 2 casas decimais
  - CBlc20\_Ah com 0 casas (inteiro) OU 1 casa (você escolhe, mas seja consistente)
  - Nm é inteiro (ceil)

=====

## 5) UI/UX (INTERFACE INTUITIVA V1)

=====

Crie uma interface moderna e muito simples:

Layout:

- Header: “Calculadora Off-Grid (Mês Crítico) — Protótipo Russas-CE”
- Seção “Entradas” (card):
  - Campo: Potência da bomba (CV) [placeholder: “ex.: 2.0”]
  - Campo: Horas de uso no dia (Hd) [placeholder: “ex.: 4”]
  - Campo: Horas de uso na noite (Hn) [placeholder: “ex.: 2”]
  - Campo: Cidade (fixo, desabilitado): “Russas-CE”
  - Botão primário: “Calcular”
  - Botão secundário: “Limpar”
- Seção “Parâmetros adotados” (card informativo):
  - Mostrar: HSP=5h, Vsist=24V, N=2 dias, Pd=0.8,  $\eta_{bat}$ =0.86,  $\eta_{inv}$ =0.85, Red1=0.75, Red2=0.9, Pmod=550W

- Texto curto: “Este é um protótipo com valores fixos para Russas-CE. Em versões futuras, HSP variará por cidade.”
- Seção “Resultados” (card):
  - Potência FV: Pfv\_kWp (kWp)
  - Módulos: Nm (unid) e indicação “módulos de 550 W”
  - Baterias: CBc20\_kWh (kWh) e CBlc20\_Ah (Ah em 24 V)
  - Um box “Como montar o banco de baterias (explicação simples)”:
    - Explicar: série soma tensão; paralelo soma Ah.
    - Exemplo textual genérico (sem marcas): “para 24V, normalmente usa 2 baterias 12V em série por ramal”.
  - Um box “Controlador e inversor (noções básicas)” (texto curto):
    - Controlador (MPPT/PWM) regula carga das baterias e melhora aproveitamento.
    - Inversor converte DC->AC; motores podem exigir margem por partida; trifásico pode requerer solução específica.
- Seção “Detalhes do cálculo” (accordion expansível):
  - Mostrar Pb\_W, Lca\_Wh\_dia, L\_Wh\_dia, Pfv\_W, Nm\_real, CBc20\_Wh

#### Comportamentos:

- Calcular ao clicar no botão.
- Opcional: recalculer ao pressionar Enter.
- “Limpar” zera inputs e resultados.

=====

#### 6) IMPLEMENTAÇÃO (REQUISITOS TÉCNICOS)

=====

- Entregue o código completo.
- Pode ser:
  - (A) Um app simples com HTML/CSS/JS (tudo em um arquivo) OU

(B) React (front) + Node/Express (back) — mas mantenha simples.

- A lógica das equações deve ficar em uma função única e testável:

calculateOffGrid({CV, Hd, Hn}) -> retorna objeto com todos os valores.

- Inclua testes rápidos (mesmo que simples) ou um bloco de “caso de teste” no código:

Ex.: CV=2, Hd=4, Hn=2 e mostre o output esperado (apenas para sanity check).

=====

## 7) O QUE ENTREGAR NA RESPOSTA

=====

- 1) Código fonte completo (com instruções de execução).
- 2) Uma explicação breve (máximo 10 linhas) de como a UI foi organizada.
- 3) Garantir que:
  - Nm é inteiro (ceil)
  - Unidades e conversões estão corretas
  - Validações estão implementadas
  - O layout é limpo e autoexplicativo

Comece gerando o projeto completo agora.