

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS ARARANGUÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE
DEPARTAMENTO DE ENERGIA E SUSTENTABILIDADE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Camila Careli de Almeida

**Estudo de microrredes híbridas com armazenamento de energia no
agronegócio brasileiro**

Araranguá

2023

Camila Careli de Almeida

**Estudo de microrredes híbridas com armazenamento de energia no
Agronegócio brasileiro**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao curso de Graduação em
Engenharia de Energia, do Centro de
Ciências, Tecnologias e Saúde, da
Universidade Federal de Santa Catarina,
como requisito parcial para a obtenção do
título de Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Lopes
Pfischer

Araranguá

2023

Camila Careli de Almeida

**Estudo de microrredes híbridas com armazenamento de energia no
Agronegócio brasileiro**

O presente Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia de Energia,
foi avaliado e aprovado pela banca examinadora composta pelos seguintes
membros:

Prof. Luciano Lopes Pfischer, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof Leonardo Elizeire Bremermann, Dr,
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Maicon Coelho Evaldt, Dr
Universidade Federal da Integração Latino-Americana

Certificamos que essa é a versão original e final do trabalho que foi julgado
adequado para obtenção do título de Engenheiro/a de Energia.

Prof. Elise Sommer Watzko, Dr(a).
Subcoordenadora do Curso

Prof. Luciano Lopes Pfischer, Dr.
Orientador

Camila Careli de Almeida
Autora

Araranguá, 04 de Dezembro de 2023.

Careli, Camila Almeida

Estudo de microrredes híbridas com armazenamento de energia no Agronegócio brasileiro / Camila Almeida Careli ; orientador, Luciano Lopes Pfischer, 2023.

49 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Graduação em Engenharia de Energia, Araranguá, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia de Energia. 2. Microrredes Híbridas. 3. Armazenamento de Energia. 4. Problemas de energia no Agronegócio Brasileiro. I. Pfischer, Luciano Lopes. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Energia. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo aos meus pais. Todos os dias me deram forças para seguir em frente, apoiando cada passo que eu dava.

Aos meus irmãos. Sempre foram os meus conselheiros, me guiando e me ajudando em todas as situações.

Às grandes mulheres da minha vida, minha vó, cunhadas, tias, primas e principalmente a você, mãe. Você me inspira todos os dias, me ensinou garra, determinação e me ensinou a ser mulher e nunca desistir, sempre lutar por aquilo que eu quero.

RESUMO

O custo, o acesso e a necessidade de energia elétrica afetam vários setores no Brasil, incluindo o setor do agronegócio. No Brasil, em especial nas regiões Norte e Nordeste, fazendeiros enfrentam desafios de acesso à energia elétrica devido à distância das concessionárias ou à localização de suas instalações nas extremidades das linhas de distribuição. Como solução, muitos usam geradores a diesel para geração própria de energia, tornando-se então suscetíveis às flutuações de preço desse combustível. Nos anos recentes, uma alternativa para esses problemas tem sido o uso de microrredes híbridas, que combinam fontes de energia renovável e fontes de *backup*, integradas também ao armazenamento de energia por meio de baterias. Neste contexto, este estudo analisará o dimensionamento de três microrredes híbridas reais, usando o *Software Homer Pro*, com o objetivo de aprimorar a compreensão, destacar sua importância técnica e econômica e promover o aprofundamento de pesquisas nesta área. Os resultados fornecerão dados de fração renovável, geração fotovoltaica, uso de diesel e emissões de CO₂. Com base nos resultados e análises, será avaliada a viabilidade econômica dessa solução para o agronegócio, juntamente com os seus benefícios ambientais. Conclui-se que é um investimento com bom retorno financeiro, além de obter uma redução no preço do diesel e redução de emissão dos gases do efeito estufa.

Palavras-chave: microrredes híbridas; armazenamento de energia; agronegócio.

ABSTRACT

The cost, access, and the need for electrical power impact many sectors in Brazil, including agribusiness. Farmers in the North/Northeast of Brazil face challenges in accessing electricity due to their distance from utility companies or their location at the outer reaches of distribution lines. As a solution, many use diesel gensets to generate their own energy becoming susceptible to diesel fuel prices fluctuations. In the past few years, an alternative to these problems has been the use of hybrid microgrids, which combine renewable energy sources and backup sources, along with energy storage through batteries. In this context, this study will analyze the sizing of three hybrid microgrids using the software Homer Pro, aiming to enhance understanding, emphasize its technical and economic significance, and promote research in this field. The results will provide data on renewable fraction, photovoltaic generation, diesel usage and CO₂ emissions. Based on these results, it will be possible to assess the economic viability of this solution for agribusiness, along with its environmental benefits. It is concluded that it is an investment with a good financial return, in addition to obtaining a reduction in diesel prices and a reduction in CO₂ emissions.

Key Words: hybrid microgrids; energy storage; agrobusiness.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Projeção de capacidade de armazenamento de energia.....	12
FIGURA 2 – Custo de armazenamento de um quilowatt-hora de eletricidade.....	12
FIGURA 3 – Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil.....	14
FIGURA 4 – Demanda Mensal do Óleo Diesel.....	15
FIGURA 5 – Projeção anual da demanda do óleo diesel.....	15
FIGURA 6 – Preço dos combustíveis.....	16
FIGURA 7 – Fluxo.....	24
FIGURA 8 – Software Homer Pro.....	28
FIGURA 9 – Software Homer Pro.....	28
FIGURA 10 – Perfil de Carga da Fazenda A.....	32
FIGURA 11 – Yearly Profile da Fazenda A.....	32
FIGURA 12 – Funcionamento Anual da Microrrede para a Fazenda A.....	33
FIGURA 13 – Funcionamento Diário da Microrrede para a Fazenda A.....	33
FIGURA 14 – Funcionamento Diário da Microrrede para a Fazenda A.....	34
FIGURA 15 – Perfil de Carga da Fazenda B.....	35
FIGURA 16 – Yearly Profile da Fazenda B.....	35
FIGURA 17 – Funcionamento Anual da Microrrede para a Fazenda B.....	36
FIGURA 18 – Funcionamento Diário da Microrrede para a Fazenda B.....	36
FIGURA 19 – Funcionamento Diário da Microrrede para a Fazenda B.....	37
FIGURA 20 – Perfil de Carga da Fazenda C.....	38
FIGURA 21 – Yearly Profile da Fazenda C.....	38
FIGURA 22 – Funcionamento Anual da Microrrede para a Fazenda C.....	38
FIGURA 23 – Funcionamento diário da Microrrede para a Fazenda C.....	39
FIGURA 24 – Funcionamento diário da Microrrede para a Fazenda C.....	39
FIGURA 25 – Exemplo de funcionamento de Microrrede.....	42

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Sizing de Microrrede para cada Fazenda.....	31
TABELA 2 – Resultados Fazenda A.....	34
TABELA 3 – Resultados Financeiros Fazenda A.....	34
TABELA 4 – Resultados Fazenda B.....	37
TABELA 5 – Resultados Financeiros Fazenda A.....	37
TABELA 6 – Resultados Fazenda B.....	40
TABELA 7 – Resultados Financeiros Fazenda A.....	40
TABELA 8 – Resultados Gerais.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSAE	Associação Brasileira de Soluções de Armazenamento de Energia
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional de Petróleo
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	Gases de Efeito Estufa
SAEs	Sistemas de Armazenamento de Energia
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	Justificativa.....	17
1.2	Objetivos.....	18
1.2.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>18</i>
1.2.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>18</i>
1.3	Descrição dos Capítulos.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3	METODOLOGIA PROPOSTA.....	24
3.1	Levantamento do perfil de carga da fazenda.....	25
3.2	Definição do pico de carga.....	25
3.3	Parâmetros de entrada do gerador diesel.....	25
3.4	Parâmetros de entrada do Sistema Solar e Baterias.....	26
3.5	Simulação no Software.....	27
3.6	Obtenção da Economia em Diesel e de Redução de CO ₂	28
3.7	Obtenção de Preços de Venda, de Aluguel, de VPL e Payback.....	29
4	RESULTADOS.....	31
4.1	Fazenda A.....	32
4.2	Fazenda B.....	35
4.3	Fazenda C.....	37
5	DISCUSSÕES E CONCLUSÃO.....	41
	REFERÊNCIAS.....	46

1 INTRODUÇÃO

O agronegócio brasileiro é um setor de extrema importância para a economia do país, abrangendo diversos segmentos e desempenhando um papel fundamental em áreas como as de alimentos, exportação, geração de empregos e desenvolvimento regional (Silva, 2013). Nesse contexto, destaca-se o importante papel da tecnologia para impulsionar a produtividade, a eficiência e a sustentabilidade no agronegócio (Pinto, 2012).

As tecnologias permitem diversas vantagens no ramo da agricultura, como uma gestão mais eficiente dos recursos naturais, redução de custos e aumento da produtividade. Dentre as tecnologias que vêm sendo introduzidas no agronegócio brasileiro estão o armazenamento de energia por meio do uso de baterias e os sistemas híbridos em microrredes *off-grid* (Bueno, 2016). Tais configurações têm sido implementadas em regiões onde o acesso às redes elétricas de distribuição é precário ou inexistente.

No contexto deste trabalho, o termo microrrede refere-se a uma rede elétrica de distribuição interna de uma instalação (unidade consumidora/prosumidora), constituída por geração, armazenamento e cargas, interconectada ou não a uma rede elétrica externa convencional.

Percebe-se que o armazenamento de energia associado a microrredes vem sendo integrado ao agronegócio brasileiro nos últimos anos. No entanto, nas últimas décadas essa tecnologia tem se mostrado importante para a sociedade como um todo, e hoje se tornou uma solução para diversos problemas encontrados em muitos setores no Brasil. Tornou-se essencial na infraestrutura moderna, permitindo o uso eficiente e confiável de diferentes formas de energia, e desempenhando um papel crucial na transição energética e no desenvolvimento de sistemas de energia mais sustentáveis (Bueno, 2016).

Sistemas de energia híbridos utilizam mais de uma fonte primária de energia, como solar, eólica, hidroelétrica, biomassa, entre outras. Esses sistemas possuem diversas vantagens, como: oferecer maior equilíbrio e estabilidade, oferecer melhor qualidade de energia, e fornecer saídas estáveis a partir de suas fontes primárias, reduzindo a dependência de mudanças externas, como variações climáticas e escassez de combustíveis. Além disso, otimiza-se a utilização das fontes alternativas de energia disponíveis (Iberdrola, 2022).

No agronegócio brasileiro, em termos de energia, o diesel é muito utilizado para alimentar maquinários e outros equipamentos. Para diminuir o impacto ambiental e econômico, e a dependência deste combustível, tem sido feita a hibridização com uma fonte renovável, que em quase a totalidade dos casos tem sido a fonte solar fotovoltaica.

Para sistemas *off-grid*, ou seja, sistemas que não estão conectados com a rede de distribuição elétrica local, em que uma fonte de energia sustentável intermitente é empregada - como fotovoltaica ou eólica, é necessário um componente que traga estabilidade para o sistema, reduzindo ou amortecendo a intermitência dessa fonte. Esse equipamento tende a ser um banco de baterias. Um sistema de microrrede híbrido típico é formado por baterias, sistema solar fotovoltaico e gerador a diesel (Cunha, 2020).

De modo geral, o funcionamento de uma microrrede híbrida típica ocorre da seguinte forma: durante o dia, a planta solar fotovoltaica produz energia para o consumo direto, e o excedente de energia é armazenado em baterias. O sistema ideal seria aquele que conseguisse fornecer 100% da energia necessária por meio do conjunto planta solar e bateria. No entanto, quando isso não é possível, ou seja, quando a planta solar não gera energia e não existe energia suficiente armazenada nas baterias, o gerador a diesel é ligado (Farret, 2006).

O armazenamento se refere à capacidade de armazenar energia gerada em momentos de baixa demanda ou de alta produção de energia por uma fonte renovável ou não renovável. Assim, quando existe essa disponibilidade, a bateria é carregada, e quando for necessário, ela descarrega, fornecendo energia para o sistema e dando flexibilidade e estabilidade ao suprimento energético do local (Zareipour, 2015).

As tecnologias referentes aos Sistemas de Armazenamento de Energia (SAEs) possuem diferentes papéis e características, e todos desempenham um papel importante para a unificação, distribuição e ampliação da capacidade dos sistemas de geração distribuída (Farret; Simoes, 2006). Além disso, elas também aliviam o congestionamento da rede, visto que armazenam o excesso de energia gerada, aumentando a eficiência de todo o sistema.

Existem diferentes tipos de tecnologias para armazenamento. Neste trabalho foca-se nas que são voltadas para o setor elétrico, em especial para microrredes não conectadas à rede de distribuição. As tecnologias possuem a mesma função, no

entanto a escolha entre qual ou quais utilizar depende de diversos critérios de decisão como, por exemplo, a limitação de espaço, a eficiência requerida, o custo dos componentes, os requisitos de desempenho, o ciclo de vida da tecnologia, entre outros critérios.

Dentre os principais parâmetros de um sistema de armazenamento de energia em baterias, tem-se (Fabre, 2022):

- a) Capacidade: termo utilizado para quantificar a carga elétrica que pode ser armazenada pela bateria;
- b) Potência e energia nominal: a relação de potência e energia de um elemento de armazenamento define o período de carga e descarga do sistema aplicado;
- c) Taxa de carga e descarga *C-rate*: taxa de velocidade de carga e descarga;
- d) Tempo de resposta: período existente entre o momento de demanda de energia da carga, até o momento de início de descarga.

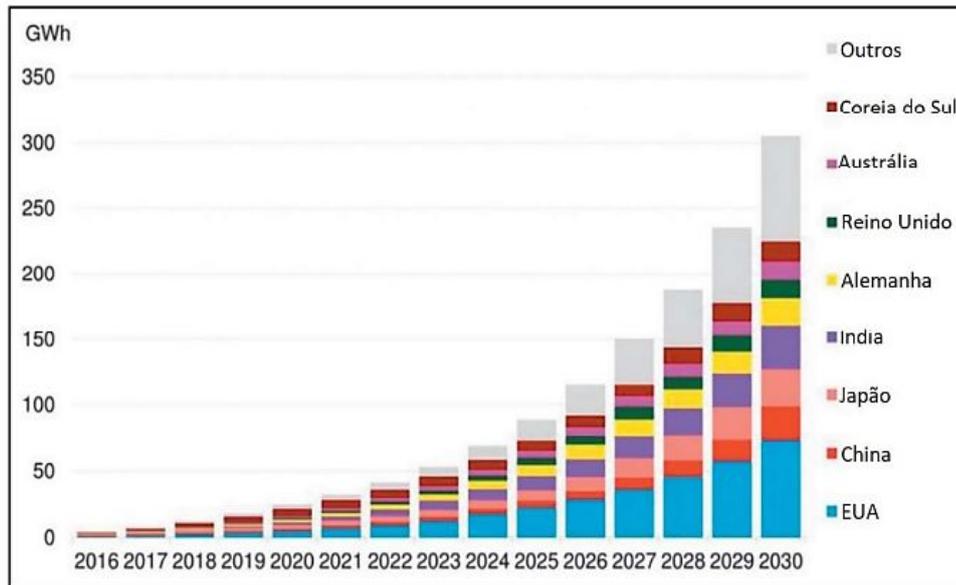
Como exemplo de tipos de baterias para aplicações estacionárias, tem-se (Fabre, 2022):

- a) Baterias de íon lítio sem cobalto: o cobalto foi substituído pelo níquel em elevadas concentrações usando manganês e alumínio para os outros componentes do sistema. Vantajoso pois aumentou tanto o desempenho quanto o tempo de vida útil do ativo, além da substituição do cobalto, componente caro para o sistema;
- b) Bateria íon lítio de anodo de silício: possui um desempenho três vezes melhor que as baterias de íon lítio e grafite. Possui a desvantagem de rápida degradação do silício junto com a dificuldade da sua produção;
- c) Baterias livres de metais pesados, como níquel e cobalto: vantagem da produção de baterias ambientalmente corretas, visto que ela será livre de metais pesados.

Apesar de seu grande potencial, a capacidade de armazenamento de energia elétrica instalada mundialmente ainda é de apenas 2% (Zareipour, 2015). A baixa adesão por esse tipo de tecnologia está relacionada a diversos motivos, como o alto custo dos equipamentos e a falta de incentivo por parte de governos. No entanto, de acordo com o Estudo Estratégico de Mercado de Armazenamento (Greener; New Charge, 2021), realizado por diversas empresas do setor elétrico, o aumento da

demanda por baterias para mobilidade elétrica e para outros vieses estacionários fará com que ocorra uma redução significativa no custo de baterias. Por consequência, a capacidade de energia mundial armazenada tende a aumentar, como mostrado na Figura 1.

FIGURA 1 – Projeção de capacidade de armazenamento de energia.

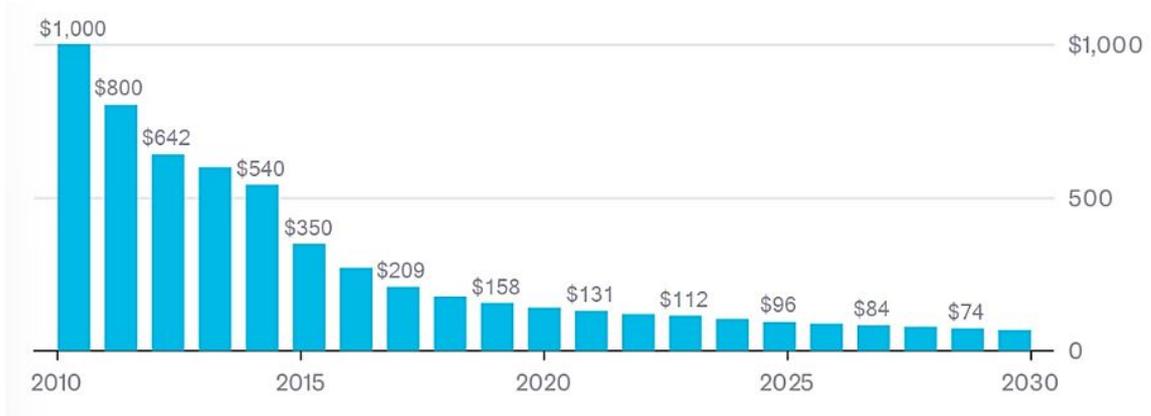


Fonte: Vian *et al.* (2021).

O aumento do uso de baterias está diretamente ligado com a versatilidade de suas funções e vantagens, como o fato de permitirem a obtenção de ganhos com a qualidade de energia, a partir da estabilização do fluxo de potência, da regulação de tensão e frequência da rede” (Fabre, 2022).

A queda no custo do lítio, causado pela abertura de novas minas, tende a diminuir o preço das baterias. A Figura 2 representa uma diminuição no preço de baterias, causado pelo aumento de investimentos em carros elétricos.

FIGURA 2 – Custo de armazenamento de um quilowatt-hora de eletricidade



Fonte: NeoCharge (2022).

O principal sistema responsável por gerar energia para a microrrede é a planta fotovoltaica, uma fonte renovável e que vem ganhando destaque nos últimos tempos. O mercado de energia solar fotovoltaica no Brasil tem apresentado um crescimento significativo nos últimos anos, impulsionado por diversos fatores. Atualmente, a energia solar fotovoltaica é a segunda principal fonte de energia do país (Gasparin, 2022). De acordo com a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) dos quase 7 GW de capacidade instalada de fontes renováveis, 43,9% vieram de usinas solares fotovoltaicas.

De acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR):

No segmento de geração distribuída de energia, o País possui 22,4 GW de potência instalada da fonte solar. Isso equivale a cerca de R\$113 bilhões em investimentos, R\$29.9 bilhões em arrecadação e mais de 672 mil empregos acumulados desde 2012, espalhados pelas cinco regiões do Brasil (Exame, 2023, online).

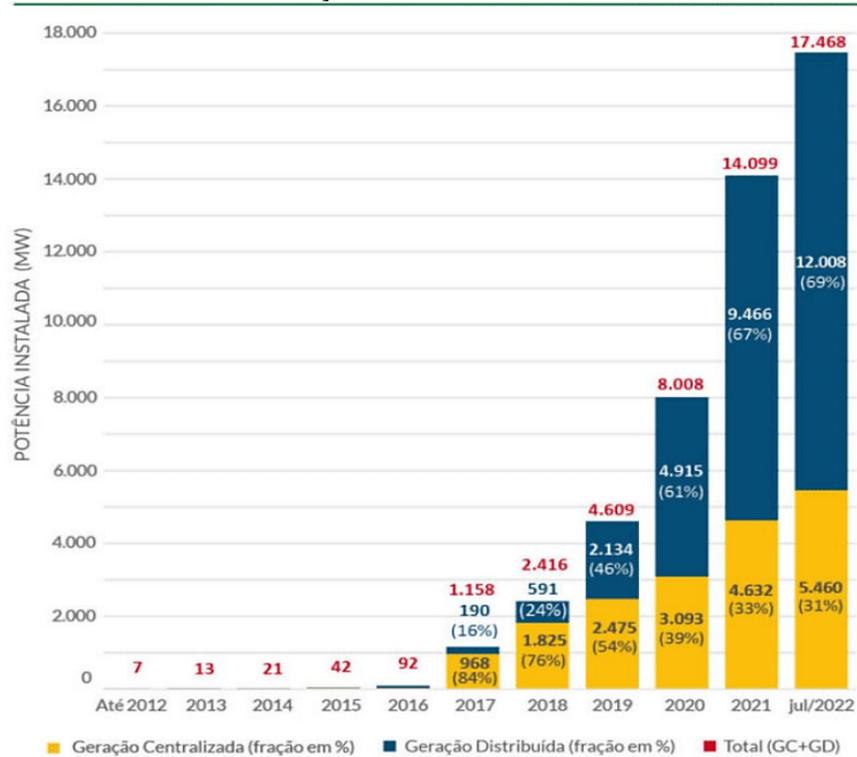
O crescimento do setor de energia solar no Brasil pode ser atribuído a vários fatores, incluindo (Gasparin, 2022):

- a) Legislação que permite o sistema de créditos na fatura de energia elétrica;
- b) Custos reduzidos comparado com outras fontes renováveis e com o custo de combustíveis fósseis;
- c) Linhas de financiamento com maior disponibilidade, além de maiores prazos e juros mais baixos;
- d) Boa irradiação solar no território brasileiro.

Espera-se que o mercado de energia solar fotovoltaica no Brasil continue a

crescer nos próximos anos, impulsionado por vantagens econômicas, avanços tecnológicos e pela conscientização sobre os benefícios ambientais dessa fonte de energia (Gasparin, 2022). A evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil pode ser vista na Figura 3.

FIGURA 3 – Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil



Fonte: ANEEL/ABSOLAR (2022).

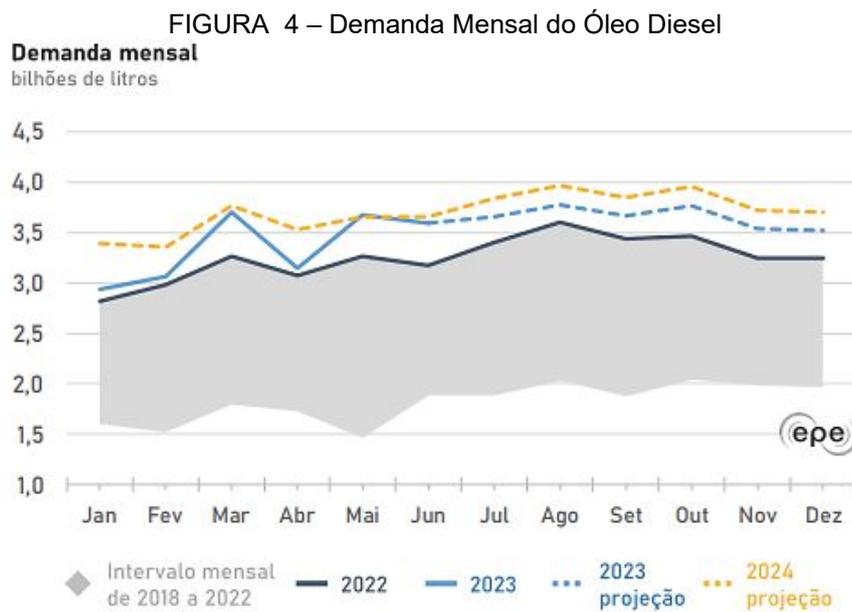
No Brasil, especialmente nas regiões Norte e Nordeste, existem fazendas que, por não terem conexão com a rede elétrica convencional, dependem 100% da geração fotovoltaica.

Por conta da sua localização, as fazendas agrícolas podem sofrer com problemas do tipo:

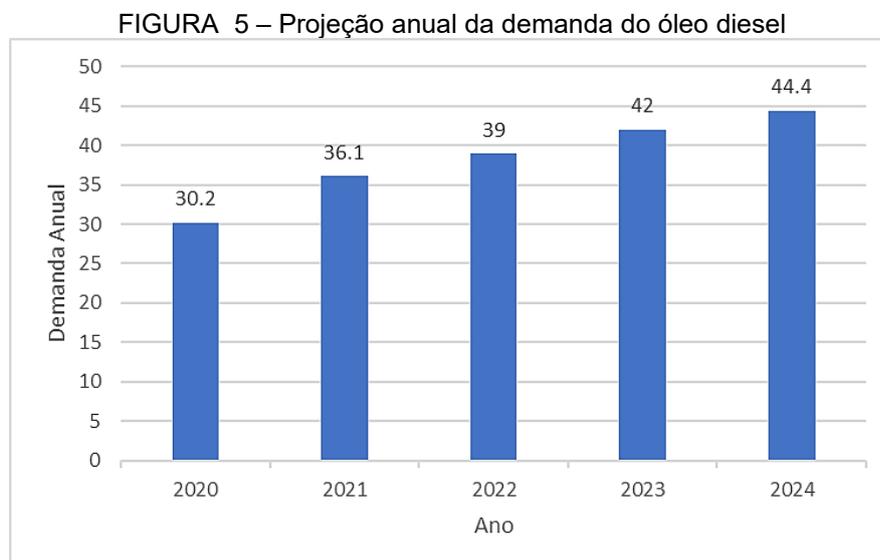
- Falta de disponibilidade de fornecimento de energia elétrica - Por estarem no final da rede de distribuição, a concessionária não disponibiliza energia de boa qualidade, ou até mesmo energia suficiente, caso o fazendeiro deseje ampliar o consumo.
- Falta de disponibilidade de rede elétrica - Como as fazendas estão em locais remotos, a rede de distribuição não chega até o fazendeiro; e para chegar, é este quem tem que arcar com os custos da rede, tornando inviável o investimento em energia devido aos altos custos.

Devido a esses problemas, muitas fazendas localizadas no Nordeste do Brasil ficam 100% dependentes do uso do combustível diesel. De acordo com a Petrobras, o preço médio do diesel está em torno de R\$ 6,22 o litro, enquanto no Nordeste esse preço pode chegar a R\$ 6,50 o litro (valores em 2023).

De acordo com o estudo Perspectivas para o Mercado Brasileiro de Combustíveis no Curto Prazo (EPE,2023), realizado pela Empresa de Pesquisa Energética-EPE, a demanda do óleo diesel S-10 (combustível utilizado em geradores) para o ano de 2024 irá crescer em 5,6% em comparação com o ano de 2023, sendo que em 2023 a demanda foi maior que nos anos 2020, 2021 e 2022. Isso é mostrado na Figura 4.



A Figura 5 representa uma projeção para a demanda anual do óleo diesel para os próximos anos.

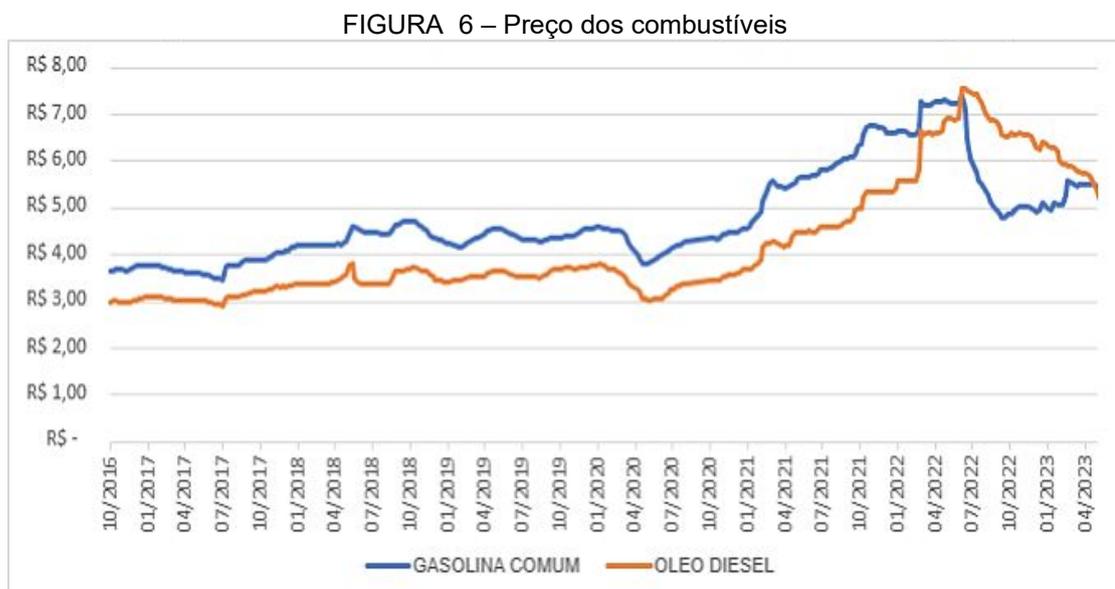


O preço do óleo diesel é influenciado por diversos motivos, como o preço do petróleo, que está sempre em variação por causa da oferta e procura mundial. Atualmente, o preço final do diesel é um resultado das seguintes porcentagens (Petrobras, 2023):

- a) Aproximadamente 55% correspondem à fornecedora;
- b) Aproximadamente 15% correspondem aos impostos estaduais;
- c) Aproximadamente 20% correspondem à distribuição e revenda;
- d) Aproximadamente 8% correspondem ao biodiesel;
- e) Aproximadamente 2% correspondem aos impostos federais.

De acordo com a Agência Nacional de Petróleo (ANP), o preço do diesel sofre diversas variações ao longo dos anos, e em sua maioria, ficando mais caro. Essa volatilidade do preço do diesel, além do alto custo, pode dificultar os agricultores, que dependem 100% dessa fonte de combustível para a prospecção de suas fazendas.

Com base nos dados da ANP em 2023, a variação de preço dos combustíveis foi de 43,29% para a gasolina e 72,05% para o diesel. A Figura 6 representa um compilado de tais dados.



Fonte: ANP (2023).

Além do preço do diesel, algumas fazendas ainda gastam com o aluguel do gerador, custo que tende a variar muito dependendo do local da fazenda.

Esse estudo contemplará fazendas localizadas no Nordeste e Norte do Brasil.

Será focado em propriedades que não possuem acesso à rede de distribuição elétrica convencional, por estarem localizadas longe dos centros urbanos.

1.1 Justificativa

O setor agrícola é altamente dependente de energia para diversas atividades. Como exemplo, tem-se o uso de pivôs de irrigação, maquinário responsável pela irrigação de toda a fazenda, que em sua maioria são movidos à diesel devido ao fato de muitas fazendas não possuírem acesso à rede de distribuição de energia. Outras atividades que dependem, em sua maioria, de energia provinda de fontes não renováveis é o processamento e armazenamento de alimentos, além do uso de maquinário agrícola e de sistemas de climatização em estufas. Assim, as microrredes *off-grid* integradas ao armazenamento de energia possuem extrema importância no agronegócio, proporcionando aos agricultores os seguintes benefícios:

- a) maior autonomia no quesito energético, visto que muitas fazendas no Brasil estão localizadas em locais remotos, tendo como consequência infraestrutura de rede elétrica limitada ou até mesmo inexistente. Assim, os agricultores se tornam menos dependentes de redes elétricas convencionais;
- b) proporciona um uso eficiente de energia renovável, visto que os agricultores conseguem capturar o excesso de energia provinda de momentos de pico de fontes como solar ou eólica, e armazenar para diferentes usos e em qualquer momento;
- c) maior flexibilidade operacional, permitindo que a energia armazenada seja utilizada em momentos estratégicos;
- d) proporcionam maiores práticas sustentáveis, diminuindo o uso de fontes não renováveis;
- e) redução de custos e um gerenciamento de demanda, visto que os agricultores conseguem gerenciar a demanda de energia, evitando picos de consumo e reduzindo custos com tarifas de eletricidade mais altas durante horários de pico.

Com o passar dos anos, o agronegócio brasileiro vem se preocupando cada vez mais com o meio ambiente, o que tornou a adoção de práticas sustentáveis mais

comum nesse meio. Uma das práticas implementadas é a agricultura de baixo carbono, que se refere às práticas agrícolas e sistemas de produção que visam reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas à produção agrícola. Assim, a implantação da tecnologia de armazenamento de energia, além de trazer benefícios econômicos para o agricultor, traz benefícios para o meio ambiente, reduzindo consideravelmente o consumo de combustíveis fósseis, contribuindo também para mitigação de mudanças climáticas e para os cumprimentos de metas sustentáveis desse setor.

Por não terem acesso à rede elétrica, ou pelo acesso limitado a ela, muitas fazendas se tornam reféns do diesel. Assim, para diminuir a dependência com a volatilidade do preço do diesel, muitos fazendeiros optam pela implementação de sistemas híbridos, sendo esses, sistemas que contemplam três tipos de fonte: diesel, armazenamento e uma fonte renovável (em sua maioria das vezes, solar). Como lidam com fontes intermitentes de energia, os sistemas de armazenamento asseguram um suprimento contínuo de potência mesmo durante os períodos de baixa produção ou indisponibilidade da fonte primária, se tornando assim indispensáveis para o sistema como um todo. Logo, o estudo de sua operação torna-se importante para o entendimento de seu uso neste tipo de aplicação.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

A partir da comparação de três casos de microrredes *off-grid* híbridas, será realizado um estudo econômico, técnico e ambiental com o objetivo de avaliar a viabilidade e a pertinência do investimento em um sistema híbrido (planta solar fotovoltaica, bateria e gerador à diesel) não conectado à rede de distribuição elétrica convencional, em fazendas agrícolas no Norte e Nordeste do Brasil.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Avaliar a importância dos sistemas de armazenamento em baterias em fazendas agrícolas *off-grid*;
- b) Ressaltar a importância da melhoria e estruturação da regulamentação no

setor de armazenamento de energia e a importância de incentivos fiscais por parte do governo.

A partir da comparação dos três casos propostos, será possível entender com mais clareza as vantagens e desvantagens de sistemas híbridos *off-grid*.

As três microrredes serão simuladas no *software Homer Pro*, um modelo de otimização híbrida para múltiplos recursos de energia. Para a compilação de dados e análise dos resultados, será utilizado o *Microsoft Excel*. Será feita uma comparação entre 3 casos de fazendas. Para manter o sigilo, o nome e a localização dessas fazendas não serão expostos. Porém é importante saber que todas elas estão localizadas na mesma cidade, com o intuito de deixar os dados e as respostas das comparações mais coerentes. Os dados que serão comparados são:

- a) Fração de Energia Renovável;
- b) Capacidade do sistema (solar, bateria e gerador a diesel);
- c) CAPEX - do inglês *Capital Expenditure* (Despesas de Capitais);
- d) Quantidade de CO₂ emitido;
- e) VPL - Valor Presente Líquido;
- f) *Payback*.

1.3 Descrição dos Capítulos

Este trabalho está organizado em 5 capítulos. O capítulo 1 é o introdutório. O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica de publicações pertinentes à geração e uso de energia no escopo deste trabalho. O capítulo 3 apresenta a Metodologia do trabalho. No capítulo 4 são apresentados os resultados e discussões dos mesmos. O Capítulo 5 encerra o trabalho com as Conclusões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados trabalhos e revisões que irão auxiliar no entendimento do tema energia elétrica no agronegócio e em comunidades isoladas.

Barbosa e Pinho (2004) apresentam um estudo de sistemas híbridos de geração de energia elétrica no estado do Pará, abordando o perfil de comunidades locais, tecnologias de conversão empregadas, impactos socioeconômicos e ambientais e a gestão destes sistemas. A análise contribui para compreender o panorama da universalização da energia elétrica no Brasil e as possibilidades de suprimento em regiões isoladas. Ela destaca o perfil de cada comunidade, as tecnologias de conversão utilizadas, os impactos e gestão desses sistemas. Nesse estudo, os autores concluíram que os sistemas híbridos de geração de energia elétrica nas comunidades contribuíram para o desenvolvimento e a integração social. Concluíram também que os modelos de gestão governamental dificultam a sustentabilidade desses sistemas. A falta de regulamentação específica para atender as comunidades isoladas com fontes renováveis e a escassez de incentivos são obstáculos adicionais para a contemplação destas comunidades no plano de universalização energética do país.

Díaz-Rodríguez e Pabón-Fernández (2012) também apresentam um estudo de um sistema híbrido de energia, porém utilizando a rede elétrica e energia solar com banco de baterias e inversores, com o objetivo de alimentar diferentes tipos de cargas, como equipamentos de refrigeração, ventiladores ou para alimentar dispositivos que precisam operar em regiões de temperaturas acima da média nacional. O sistema é implementado em uma área de alta radiação solar, o que reduz a dependência da rede convencional e contribui para a sustentabilidade ambiental do local. O estudo feito por esses dois autores tem como título “Sistema Híbrido de Energia utilizando energia solar e rede elétrica” e nele é concluído que é importante garantir que as baterias operem com um fluxo de carga ideal e que a descarga não exceda os níveis e tempos recomendados pelo fabricante.

Outro estudo de aplicação de microrrede isolada é feito por Cosme (2021) e ele aborda a necessidade de fornecer energia elétrica de forma eficiente e sustentável em comunidades remotas, especialmente em ilhas, que possuem acesso limitado à rede elétrica. Nesse caso, a microrrede combina energia solar e eólica com geradores a diesel e é instalada na Ilha de Lençóis, com o objetivo de

reduzir custos operacionais e minimizar emissões de poluentes, fornecendo energia de forma mais sustentável. O sistema de microrrede desse estudo possui 52,74 kWp de potência total instalada proveniente de geração solar, o que representa 258 módulos fotovoltaicos, além de 30 kWp de potência total instalada de geração eólica, representando 3 turbinas, 2 geradores a diesel com 65kW e 42kW de potência e um sistema de armazenamento com banco de baterias em 2 *strings* em paralelo, sendo 120 baterias de chumbo ácido por string, onde cada bateria possui tensão de 2V e 600Ah.

Cosme conclui que a gestão das baterias de chumbo-ácido em microrredes isoladas é fundamental e impacta significativamente os custos operacionais do sistema, e que a principal estratégia a ser tomada nesses sistemas é a de gestão, que visa determinar o momento ideal para recarregar as baterias usando o gerador a diesel, com base no estado de carga das baterias.

Junior (2023) desenvolveu um estudo sobre os desafios relacionados à energia fotovoltaica, que se destaca devido à acessibilidade econômica, e o dimensionamento de baterias, atraindo tanto consumidores domésticos quanto industriais que investem em fontes alternativas, especialmente em sistemas de armazenamento. No entanto, o autor também destaca os desafios relacionados às baterias, como o dimensionamento adequado, escolha de tecnologia, uso integrado a geradores a diesel, custos de implementação e operação, e impacto ambiental em caso de falhas nos equipamentos e no descarte de materiais.

Junior (2023) destaca também algumas resoluções importantes no contexto da energia solar fotovoltaica, como a resolução normativa 482/2012 e a resolução 687/2015, da ANEEL, e a Lei 5829/2019. O autor aborda a utilização de algumas baterias químicas: a de chumbo/ácido, com ânodo de chumbo e cátodo de dióxido de chumbo em uma solução ácida, amplamente usada em baterias automotivas; a de níquel/cádmio, com uso predominante em dispositivos móveis; e as baterias de íons de lítio, que usam lítio tanto no ânodo quanto no cátodo, oferecendo alta densidade de energia e peso leve, porém mais caras, frágeis e sensíveis ao calor. O artigo destaca duas principais categorias de baterias utilizadas no fotovoltaico: as de chumbo ácido (em versões estacionárias e automotivas), e as baterias de íons de lítio, que apresentam uma tecnologia mais avançada. O autor ressalta que as baterias de lítio oferecem maior densidade de energia, permitindo a construção de bancos de energia mais compactos, mantendo a mesma capacidade de carga,

enquanto as de chumbo ácido são consideradas mais seguras por não liberarem gases explosivos, mas são sensíveis a variações de temperatura. As baterias de íon/lítio possuem recursos avançados de segurança e uma vida útil mais longa, podendo ser descarregadas em até 80% de sua capacidade nominal, tornando-as mais eficientes, embora o custo inicial possa ser até 4 vezes maior que o das baterias de chumbo.

O mesmo trabalho (Júnior, 2023) destaca também a necessidade de regulamentação na produção de painéis solares e uma legislação sobre a reciclagem de baterias após o fim de sua vida útil. O crescimento das fazendas solares como alternativa para a geração de energia solar levanta preocupações ambientais, uma vez que a criação de áreas muitas vezes envolve o desmatamento de terrenos, resultando em erosão e perda de habitat para a fauna. Junior (2023) conclui sobre a importância de garantir a qualidade dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede, dada sua crescente frequência no Brasil, e que apesar da intermitência da geração fotovoltaica, seu baixo custo operacional e o recurso solar inesgotável a tornam uma atraente para o sistema elétrico brasileiro, junto com o armazenamento de energia.

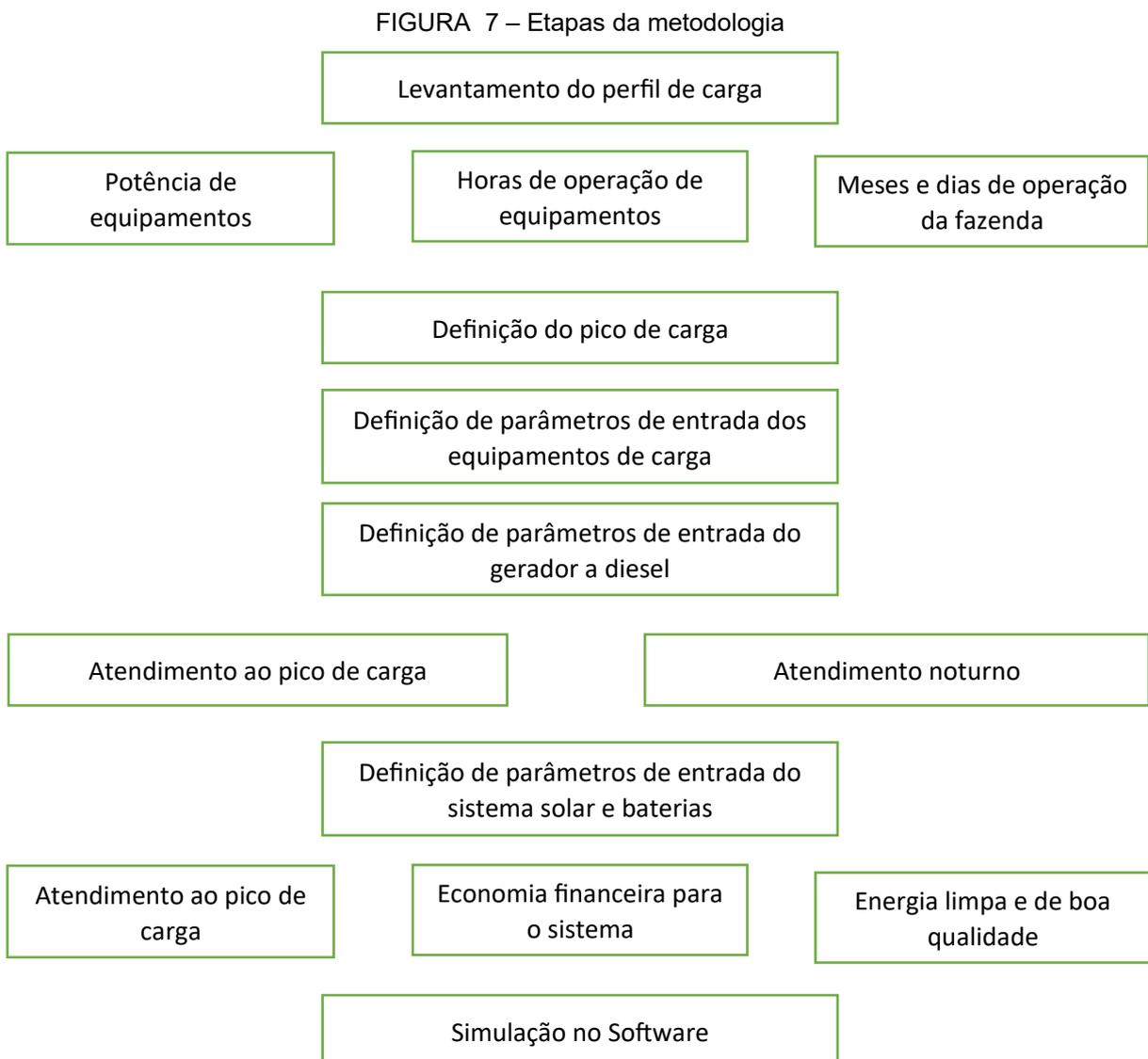
O artigo de Nadeem (2021) trata da necessidade de energia em países em desenvolvimento, como o Paquistão, que enfrenta uma escassez de energia de cerca de 4,5 GW, afetando cerca de 50 milhões de pessoas. Esse artigo propõe um sistema *off-grid* para eletrificar edifícios residenciais em áreas remotas do Paquistão. O sistema projetado terá capacidade total de 6 kW, composto por 42 módulos fotovoltaicos de 250W, 24 baterias de 165 Ah e 12V para armazenamento de energia e 2 inversores de 3 kW para conversão CC para CA. O sistema será capaz de armazenar energia o suficiente para operações noturnas, evitando sub ou super capacidade da bateria. No mesmo trabalho, o autor calcula o Valor Presente Líquido (VPL) e o *Payback*, mostrando os benefícios econômicos do sistema em um cenário de longo prazo. O VPL indicou que o sistema é economicamente benéfico. O período do retorno do investimento é de aproximadamente 3 anos. O autor conclui que o sistema gera eletricidade limpa e não emite gases do efeito estufa, ao contrário das usinas de energia convencionais que emitem 0,61 toneladas de CO₂ por mês. Portanto o projeto é vantajoso tanto do ponto de vista técnico quanto econômico, com benefícios ambientais significativos.

De acordo com o estudo de Oliveira (2016), sistemas híbridos combinam

múltiplas fontes de energia, com o objetivo de mitigar as fraquezas de uma com os pontos fortes de outra, além de maximizar a produção de energia e minimizar os riscos de interrupção no fornecimento. Dentro desses sistemas, o armazenamento de energia desempenha um papel na estabilização do sistema durante flutuações abruptas na geração e consumo de energia. Esse estudo considera como principais desafios para os sistemas híbridos: avançar nas tecnologias de geração renovável para melhorar a eficiência de conversão, altos custos de fabricação de tecnologias de geração e baixo ciclo de vida dos dispositivos de armazenamento, como baterias. Oliveira (2016) indica como melhorias para essa área o contínuo desenvolvimento de tecnologias relacionadas aos sistemas híbridos e a implementação de políticas governamentais que incentivem fontes renováveis e sistemas mais eficientes, por meio de benefícios fiscais e financiamentos subsidiados.

3 METODOLOGIA PROPOSTA

O objetivo das microrredes estudadas nesse trabalho é o provimento de energia elétrica para os sistemas de irrigação, armazenamento e produção das fazendas, ou seja, prover energia principalmente para os pivôs de irrigação, para as bombas d'água, para os silos e para a sede de produção. Ressalta-se que são fazendas não conectadas à rede elétrica, conforme detalhamento que será apresentado nas seções seguintes. Para fazer o dimensionamento e análise das microrredes objeto de estudo neste trabalho foi considerado o fluxo da Figura 7.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O detalhamento das etapas de dimensionamento e análise é apresentado nas

seções a seguir.

3.1 Levantamento do perfil de carga da fazenda

As fazendas que compõem o agronegócio brasileiro são diferentes entre si. Cada uma delas possui equipamentos diferentes, tamanhos diferentes e por consequência, algumas consomem mais energia e outras menos. Assim, o primeiro passo é definir o perfil de carga para poder obter então o pico de carga de cada fazenda.

O perfil de carga de cada fazenda está diretamente ligado com a quantidade e com o tamanho dos equipamentos utilizados para realizar diversas funções, como irrigação e armazenamento de grãos. Para obter esse perfil, as seguintes informações sobre os equipamentos são necessárias:

- a) potência de cada equipamento;
- b) horas de operação de cada equipamento;
- c) meses e dias de operação da fazenda.

A partir desses dados, e considerando que os equipamentos operam em sua maioria durante o dia, o perfil de carga é traçado.

3.2 Definição do pico de carga

A partir do perfil de carga, é obtido o pico de carga. Ou seja, um valor que corresponde à potência máxima que pode ocorrer quando todos os equipamentos estiverem operando simultaneamente.

O pico de carga é importante pois garante que a microrrede conseguirá prover energia suficiente para o momento em que ocorrer a maior demanda. Assim, se o sistema é capaz de fornecer energia para o pico de carga da fazenda, ele é capaz de fornecer energia sempre que for demandado.

3.3 Parâmetros de entrada do gerador diesel

As microrredes estudadas nesse trabalho não estão conectadas à rede elétrica de distribuição. Assim, elas precisam de uma fonte de energia que seja capaz de fornecer energia contínua para o local, independente de clima ou de

demanda. Nessas microrredes quem faz esse papel é o gerador a diesel.

Além de atuar como um *backup* para dias chuvosos ou com baixa radiação solar, o gerador possui outras funções em uma microrrede *off-grid*, como:

- a) atendimento à demanda de pico, para dias em que o sistema de solar e baterias não for capaz de prover energia suficiente para o atendimento do pico de carga;
- b) atendimento noturno, para as situações em que a fazenda precisa operar durante a noite e não tenha energia suficiente armazenada em baterias.

Assim, os parâmetros de entrada do gerador são definidos para atender o pico de carga do sistema, em que a potência total do gerador deve ser maior ou igual à potência do pico de carga.

3.4 Parâmetros de entrada do Sistema Solar e Baterias

O sistema solar fotovoltaico em conjunto com o armazenamento em baterias devem possuir parâmetros de entrada de forma que atendam as seguintes premissas:

- a) Atendimento do pico de carga da fazenda, assim quando todos os equipamentos estiverem ligados, tal usina será capaz de fornecer energia;
- b) Obtenção de uma fração renovável maior do que 75%, com o intuito de diminuir o uso do diesel;
- c) Maior economia financeira para o sistema;
- d) Garantia de estabilidade de controle de frequência e carga para o sistema *off-grid*;
- e) Armazenamento do excedente de energia gerada e não utilizada instantaneamente;
- f) Garantia de energia limpa e de boa qualidade.

Para garantir a estabilidade de energia para a fazenda, ou seja, uma energia sem interrupções, o sistema de baterias deve absorver as variações causadas pela intermitência provinda da usina fotovoltaica. Essa intermitência pode ocorrer por diversos motivos, como passagem de nuvens, dias de chuva, sombreamento de edificações ou árvores no entorno da usina, entre outros.

O objetivo da usina solar é gerar energia tanto para o funcionamento eficaz da fazenda quanto para ser armazenada.

As baterias utilizadas nesse dimensionamento são as de 1 C (definição do *C-rate*). Isso significa que em relação às baterias de 0,25 C e de 0,5 C, elas possuem uma relação de carga e descarga mais rápida, ou seja, essas baterias são capazes de carregar ou de descarregar mais rapidamente do que as outras.

Baterias do tipo 0,5 C demoram o dobro de tempo para carregar e descarregar enquanto as baterias do tipo 0,25 C demoram quatro vezes o tempo, em relação às baterias de 1 C.

Considerando que as baterias ainda possuem um custo relativamente alto em comparação com o restante do sistema solar fotovoltaico, no seu dimensionamento esse alto custo é levado em conta, considerando sempre que o objetivo final é que seja economicamente viável para o cliente.

3.5 Simulação no Software

A partir da determinação dos equipamentos que compõem a microrrede, o próximo passo a ser tomado é a implementação da modelagem do sistema no *software Homer Pro*.

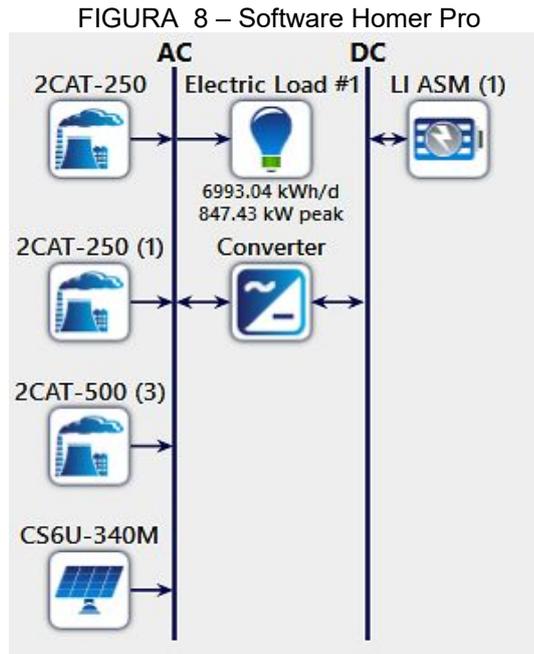
A partir de entradas (*inputs*) como: perfil de carga do local, dados solarimétricos da localização da fazenda, potência dos equipamentos, custo de manutenção de equipamentos, custo do diesel, mínima fração renovável requerida, entre outras, o *software* fornece como saída (*output*) o resultado de cada dimensionamento feito, como fração renovável, litros de diesel consumido, geração fotovoltaica e dados de emissão de carbono.

O *software Homer Pro* realiza despacho dinâmico de fontes de geração, que simula o perfil de carga minuto a minuto, cruzando com os dados solarimétricos históricos da região analisada e as outras fontes inseridas no modelo. A modelagem leva em conta a degradação natural dos componentes do sistema.

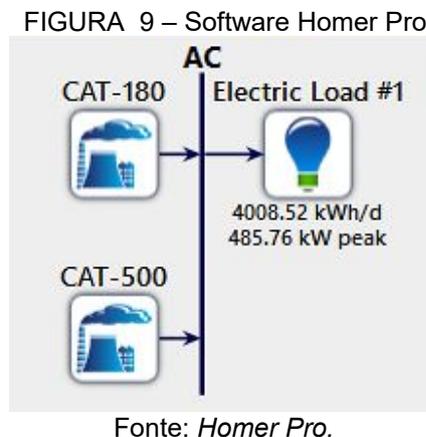
A modelagem de cargas e a performance solarimétrica do sistema é orientativa, para fins de resultados de despacho e fração renovável. Pode haver variações de energia entregue e fração de contribuição da planta solar com baterias devidas a mudanças operacionais de manejo, recurso solar anual, entre outros. Os dados de Fração Renovável são gerados pelo próprio *software*.

A Figura 8 apresenta o modelo utilizado para a simulação de sistemas híbridos, contendo gerador diesel, planta solar fotovoltaica e baterias, no *software*

Homer Pro.



A Figura 9 apresenta o modelo utilizado para a simulação de sistemas não híbridos, contendo apenas o gerador diesel (para fins de comparação).



Os principais resultados e o estudo de cada modelo são apresentados no Capítulo 4.

3.6 Obtenção da Economia em Diesel e de Redução de CO₂

Para obter a economia de diesel, é feita uma nova modelagem no *software Homer Pro*. Essa modelagem irá conter apenas geradores à diesel, com o intuito de saber o quanto de diesel o fazendeiro gastaria anualmente, considerando que a sua

fazenda utilizasse energia apenas desse combustível. O número e o tamanho de geradores devem ser suficientes para suprir o perfil de carga da fazenda o ano todo.

O *software* disponibiliza como resultado da simulação a quantidade de diesel utilizada ao ano, assim tem-se dois dados:

- a) Litros de diesel com a microrrede instalada;
- b) Litros de diesel sem a microrrede.

A redução em litros de diesel é calculada pela diferença dos dois valores.

O mesmo acontece com a redução de CO₂, onde o *software* também irá disponibilizar o quanto será emitido com a instalação da microrrede e o quanto será emitido, caso a fazenda opere apenas no diesel. Assim como a redução em litros de diesel, a redução de CO₂ é calculada pela diferença desses dois valores.

3.7 Obtenção de Preços de Venda, de Aluguel, de VPL e Payback

Para obter o Preço de Venda e o Preço de Aluguel do sistema, foram feitas diversas estimativas de preços para todos os equipamentos e serviços necessários para o desenvolvimento desses projetos.

O Valor Presente Líquido (VPL) é utilizado para calcular a atratividade de um investimento e é dado pela Equação 1, onde “*n*” representa o tempo total de investimento, “FC_{*t*}” representa o fluxo de caixa em um dado período “*t*” e “*r*” representa a taxa de desconto.

$$Vpl = \sum_{t=1}^{n=N} \square \frac{FC_t}{(1+i)^n} \quad (1)$$

Valores positivos de VPL indicam que o projeto é viável. Por outro lado, se o VPL for negativo, o projeto não é viável.

O *Payback* é uma ferramenta financeira usada para avaliar a viabilidade de projetos e de investimentos pela ótica temporal, representando o período (em anos) necessário para que o investimento inicial seja recuperado. A forma de calcular essa métrica é mostrada na Equação 2.

$$Payback = \frac{\textit{investimento inicial}}{\textit{economia de diesel mensal}} \quad (2)$$

Para o cálculo do VPL e do *Payback*, foram considerados CDI-Certificado de Depósito de 12,65% ao ano e preço do diesel de R\$ 6,20 por litro (valor típico corrente em novembro de 2023).

4 RESULTADOS

Para o melhor entendimento da atuação do sistema de microrrede híbrida em uma fazenda que não está conectada à rede, foram selecionadas três fazendas no Norte/Nordeste do Brasil. Para que as comparações ocorressem de forma justa, as 3 fazendas encontram-se na mesma região do Brasil e possuem as mesmas premissas para a definição do *sizing* de suas microrredes.

Algumas das premissas que foram levadas em conta para chegar no dimensionamento ótimo de cada microrrede, considerando as prioridades do agronegócio brasileiro, são:

- a) fração renovável;
- b) diminuição no consumo de diesel;
- c) redução no custo da energia.

Sendo assim, na Tabela 1 é mostrado o *optimal sizing* de cada fazenda. Na coluna da bateria, kWac representa a medida de potência do lado ac do inversor.

TABELA 1 – Sizing de Microrrede para cada Fazenda

Fazenda	Pico de carga (kW)	Solar (kWp)	Bateria (kWac)	Gerador diesel (kVA)
A	500	700	510	500
B	900	1750	1000	900
C	2500	3100	1700	2500

Fonte: O autor (2023).

Todos os resultados a seguir foram obtidos a partir da modelagem das microrredes no *software Homer Pro*.

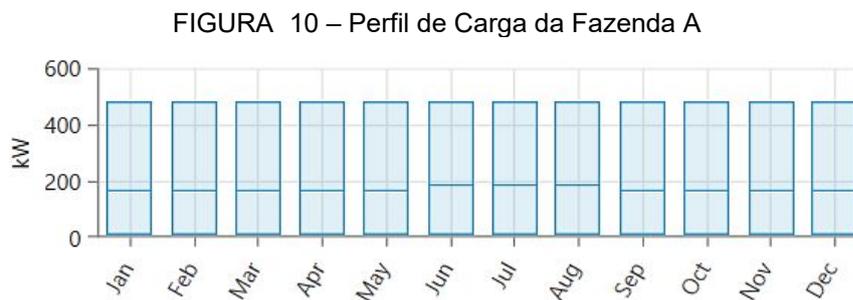
Para os Figuras de número 12, 13, 14, 17, 18, 19, 22, 23 e 24, considera-se que:

- a) Marrom representa a geração de energia solar fotovoltaica anual, a partir de dados solarimétricos inseridos no *software*;
- b) Verde representa o funcionamento das baterias 1C, de acordo com a sua capacidade de armazenamento;
- c) Vermelho representa o funcionamento dos geradores movidos à diesel;

- d) Azul representa a carga da fazenda a ser suprida, ou seja, o quanto de energia o sistema terá que fornecer para a fazenda.

4.1 Fazenda A

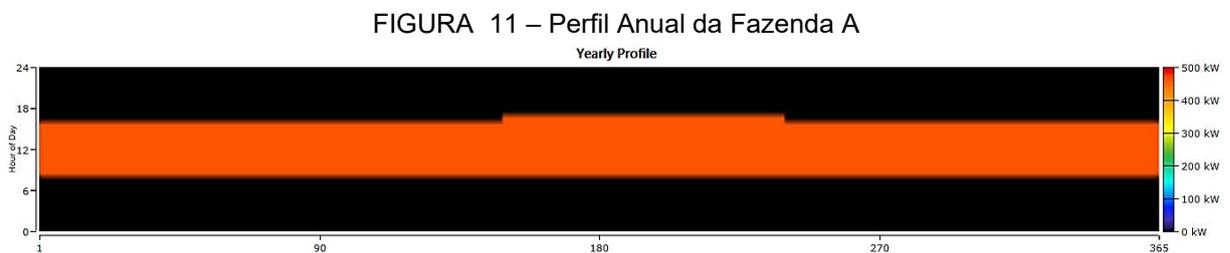
O perfil de carga do primeiro caso é mostrado na figura 10. A partir dela é possível perceber que a fazenda opera durante todo o ano, indicando que toda a energia produzida pela microrrede terá um destino final apropriado.



Fonte: *Homer Pro*.

As linhas em azul na Figura 10 representam as médias mensais de kW, que variam a cada mês devido ao consumo das cargas.

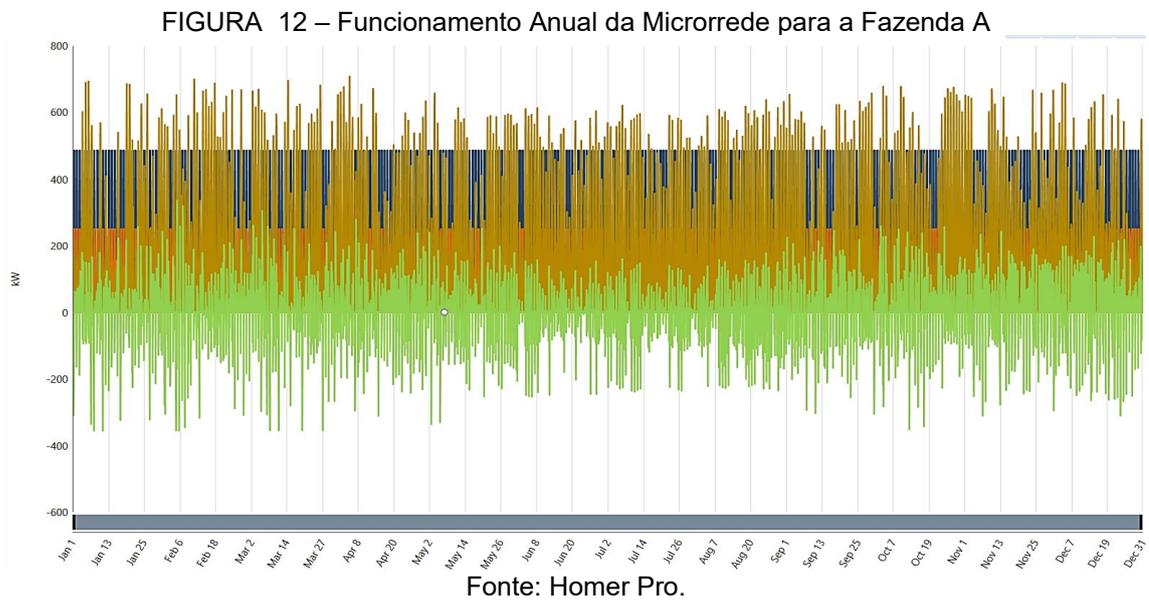
O perfil de carga anual é mostrado na figura 11. A partir dela é possível perceber também que a fazenda opera durante todo o ano, porém que as horas de operação dos equipamentos da fazenda (eixo y, à esquerda) mudam conforme os meses. Isso acontece pois cada fazenda possui a sua própria forma de operação, de acordo com a finalidade de cada uma. Também é possível visualizar o pico de carga da fazenda, em torno de 500 kW (conforme escala de cor à direita).



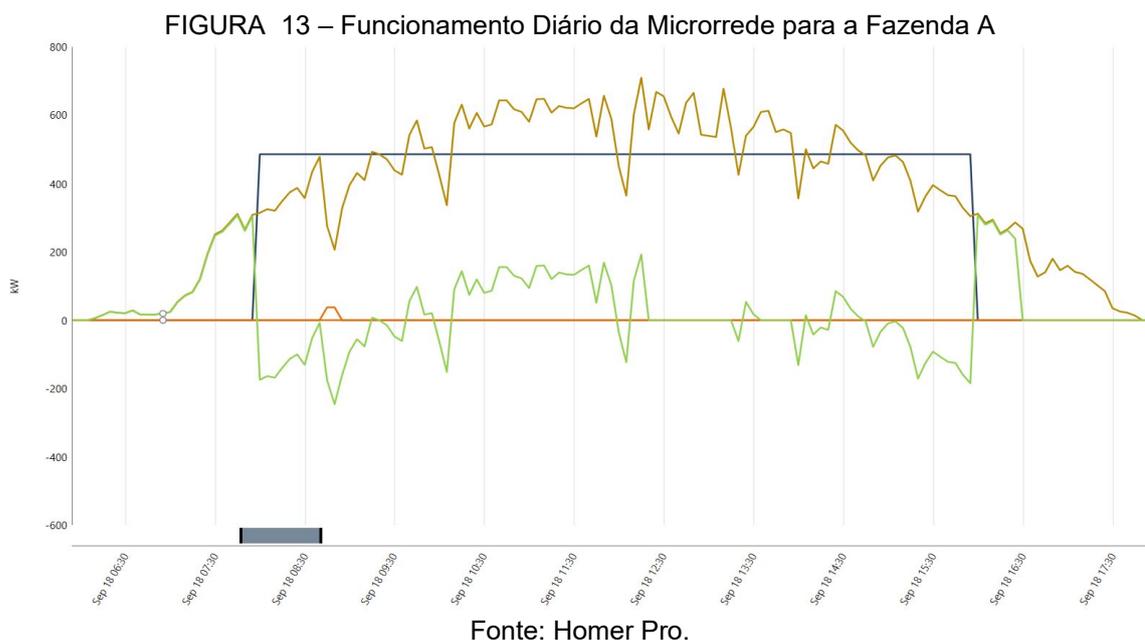
Fonte: *Homer Pro*.

Depois de simulado o sistema de microrrede, o *software* retorna o que está previsto para o funcionamento de cada equipamento (gerador diesel - vermelho, sistema solar - marrom e baterias - verde) durante o ano. É possível ver que os equipamentos operam complementando um ao outro, com o objetivo de fornecer

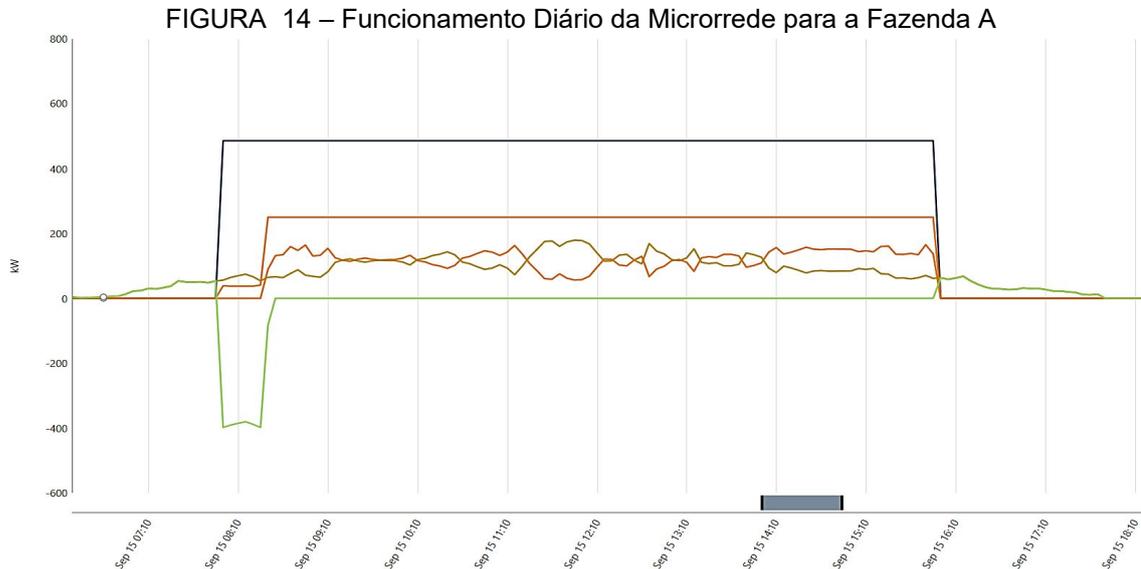
energia para toda a fazenda.



A figura 12 mostra como está previsto o funcionamento da Microrrede durante todo o ano. Na figura 13, é possível ver um detalhe da figura anterior (resultado de um dia), que mostra como os equipamentos se complementam para o fornecimento de energia. Esse dia é considerado um dia com muita incidência solar, visto que aproximadamente 85% da energia vem da planta solar, outros 10% vêm da bateria e 5% do gerador diesel.



A Figura 14 exemplifica um dia de baixa radiação solar na fazenda em questão.



Fonte: Homer Pro.

Como resultados da microrrede para a primeira fazenda obtidos pelo *software Homer Pro*, tem-se os dados da Tabela 2.

TABELA 2 – Resultados Fazenda A

Fração Renovável (%)	Geração Fotovoltaica Anual (kWh)	Economia em diesel (L)	Redução de CO ₂ (ton/ano)	Excesso de Energia (%)
45%	1.150.000	264.283	713	35%

Fonte: O autor (2023).

Como resultados financeiros da microrrede, solar de 700 kWp, bateria de 510 kWac e gerador de 500 Kva, para a fazenda A obtidos pelo *software Homer Pro*, tem-se os dados da Tabela 3.

TABELA 3 – Resultados Financeiros Fazenda A

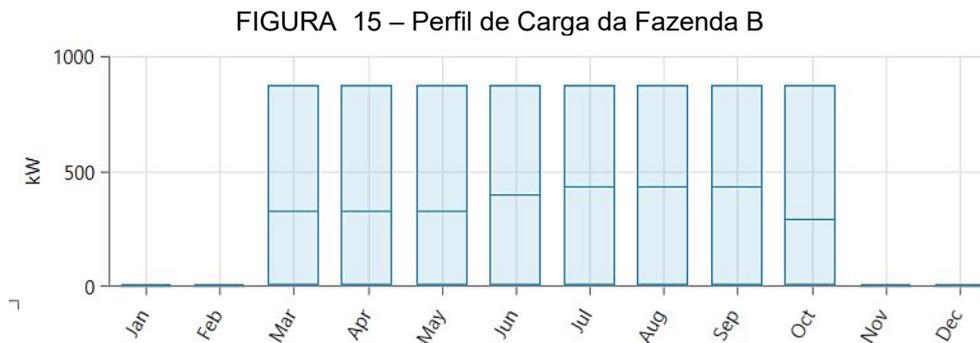
Custo(R\$)	Payback (anos)	VPL (R\$)	Aluguel anual (R\$)
10.000.000	4,5	4.000.000	1.500.000

Fonte: O autor (2023).

O custo, tanto nesta quanto nas tabelas a seguir representa, aproximadamente, o valor em dinheiro que a solução de microrrede como um todo irá custar, incluindo os equipamentos, serviços, fretes, e outras despesas.

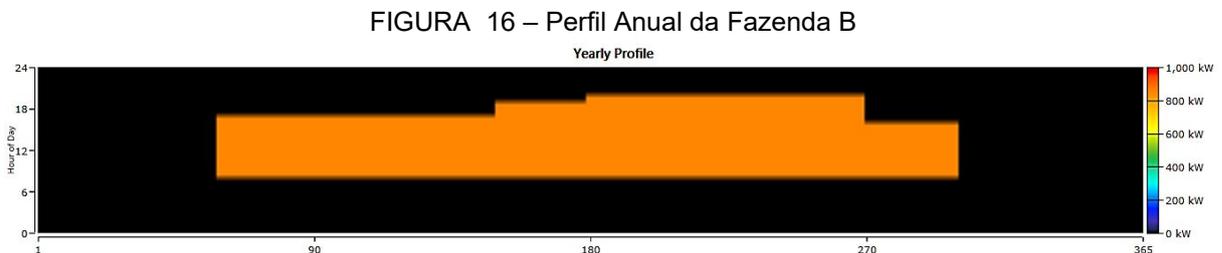
4.2 Fazenda B

O perfil de carga do segundo caso é mostrado na figura 15. A partir dela é possível perceber que a fazenda opera somente durante 8 meses do ano, não possuindo assim carga significativa nos outros 4 meses.



Fonte: *Homer Pro*.

O perfil de carga anual é mostrado na figura 16. Além da fazenda não operar o ano todo, ve-se também uma alteração no período de funcionamento dos equipamentos. É possível ver o pico de carga da fazenda, em torno de 800 kW.



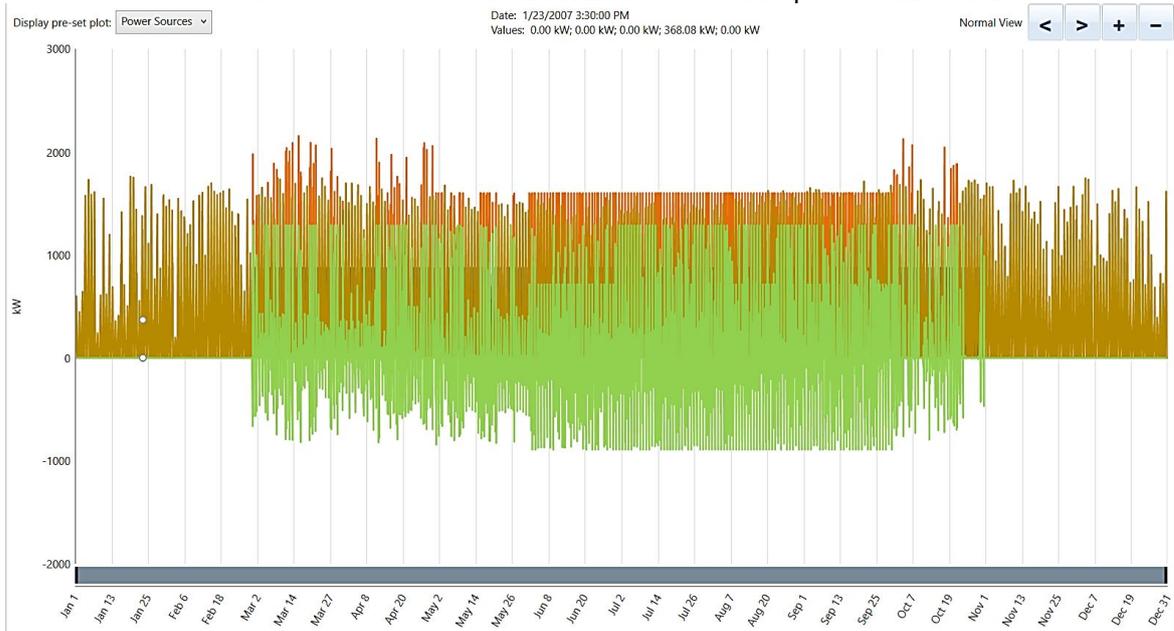
Fonte: *Homer Pro*.

Depois de simulado o sistema de microrrede, o *software* retorna o que está previsto para o funcionamento de cada equipamento durante o ano. Esse funcionamento é mostrado na Figura 17.

É possível ver que os equipamentos operam complementando um ao outro,

com o objetivo de fornecer energia para toda a fazenda, como no caso anterior.

FIGURA 17 – Funcionamento Anual da Microrrede para a Fazenda B



Fonte: *Homer Pro*.

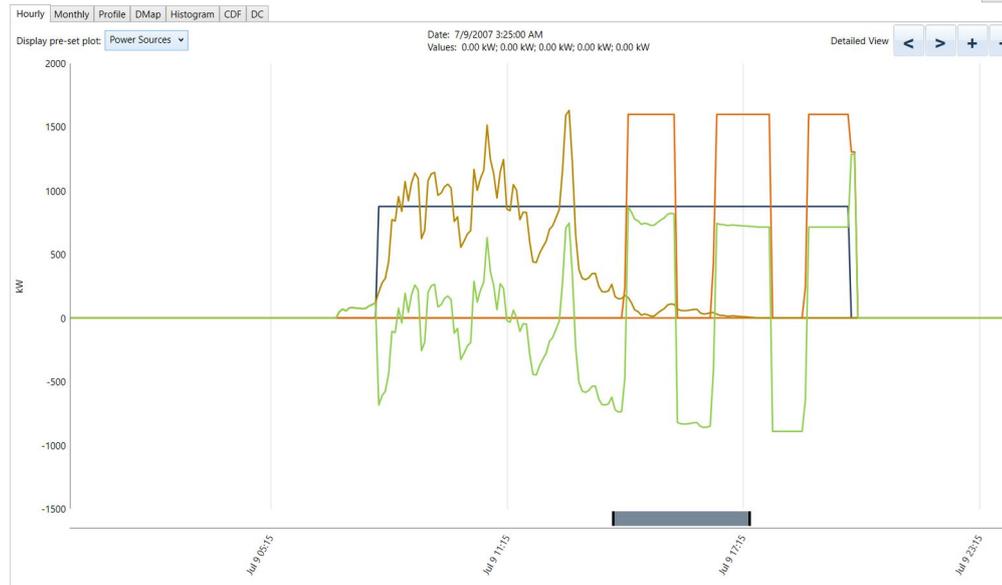
A Figura 18 apresenta o detalhe de um dia com boa incidência solar, enquanto a Figura 19 apresenta um dia com pouca incidência solar.

FIGURA 18 – Funcionamento Diário da Microrrede para a Fazenda B



Fonte: *Homer Pro*.

FIGURA 19 – Funcionamento Diário da Microrrede para a Fazenda B



Fonte: *Homer Pro*.

Como resultados da microrrede para a segunda fazenda, obtidos pelo *software Homer Pro*, tem-se os dados da Tabela 8.

TABELA 4 – Resultados Fazenda B

Fração Renovável (%)	Geração Fotovoltaica Anual (kWh)	Economia em diesel (L)	Redução de CO ₂ (ton/ano)	Excesso de Energia (%)
68	3,000,000	500,000	1400	3%

Fonte: O autor (2023).

Como resultados financeiros da microrrede solar de 900 kWp, bateria de 1000 kWac e gerador de 900 Kva para a segunda fazenda, obtidos pelo *software Homer Pro*, tem-se os dados da Tabela 5.

TABELA 5 – Resultados Financeiros Fazenda A

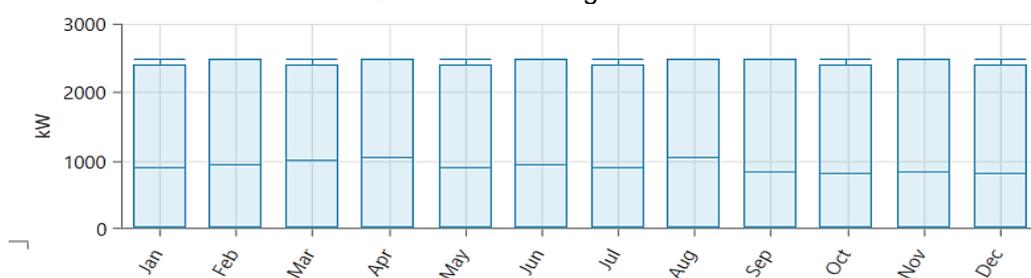
Custo (R\$)	Payback (anos)	VPL (R\$)	Aluguel anual (R\$)
15,000,000	4,0	10,000,000	2,500,000

Fonte: O autor (2023).

4.3 Fazenda C

O perfil de carga do terceiro caso é mostrado na figura 20. A partir dela é possível perceber que a fazenda opera durante todo ano, como no primeiro caso.

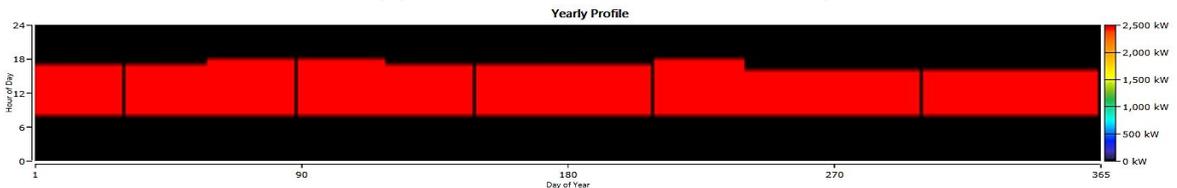
FIGURA 20 – Perfil de Carga da Fazenda C



Fonte: *Homer Pro*.

O perfil de carga anual é mostrado na figura 21. A partir dela, vê-se que as horas de operação dos equipamentos da fazenda mudam conforme os meses. Vê-se também que o pico de carga da fazenda é em torno de 2 MW.

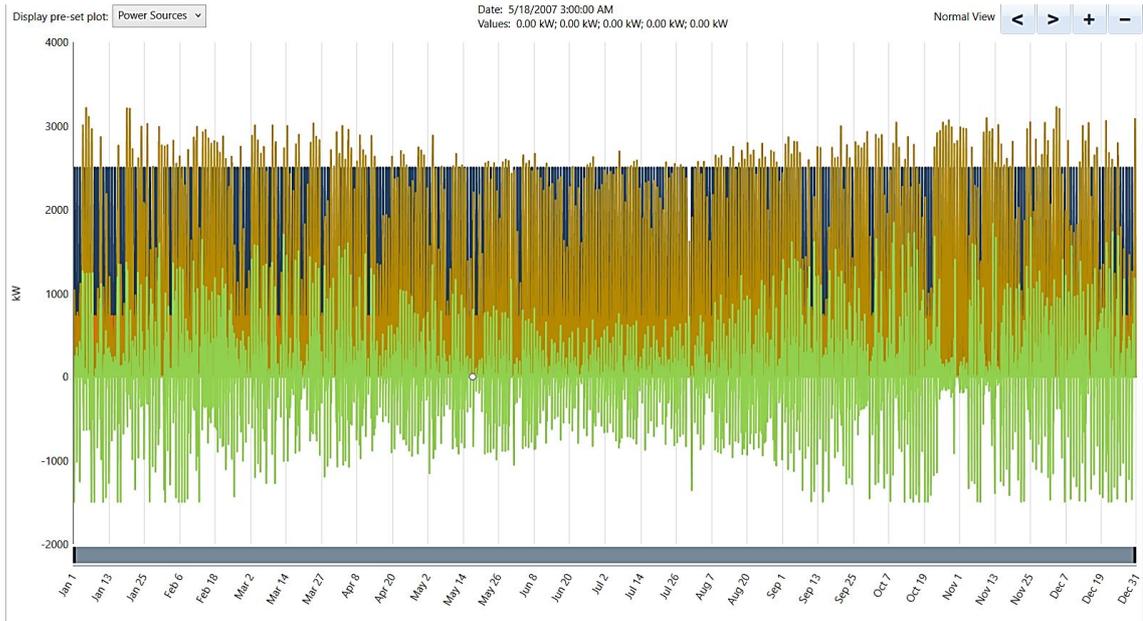
FIGURA 21 – Perfil Anual da Fazenda C



Fonte: *Homer Pro*.

Depois de simulado o sistema de microrrede, o *software* retorna o que está previsto para o funcionamento de cada equipamento durante o ano, conforme a Figura 22.

FIGURA 22 – Funcionamento Anual da Microrrede para a Fazenda C



Fonte: *Homer Pro*.

A Figura 23 representa um dia com boa incidência solar, enquanto a Figura 24 representa um dia com pouca incidência solar.

FIGURA 23 – Funcionamento diário da Microrrede para a Fazenda C



Fonte: *Homer Pro*.

FIGURA 24 – Funcionamento diário da Microrrede para a Fazenda C



Fonte: *Homer Pro*.

Como resultados da microrrede, solar de 3100 kWp, bateria de 1700 kWac e gerador de 2500 Kva, solar de 700 kWp, bateria de 510 kWac e gerador de 500 Kva obtidos pelo *software Homer Pro*, tem-se os dados da Tabela 6.

TABELA 6 – Resultados Fazenda B

Fração Renovável (%)	Geração Fotovoltaica Anual (kWh)	Economia em diesel (L)	Redução de CO ₂ (ton/ano)	Excesso de Energia (%)
64	5,600,000	1,000,000	3200	2

Fonte: O autor (2023).

Como resultados financeiros da microrrede, obtidos pelo *software Homer Pro*, tem-se os dados da Tabela 7.

TABELA 7 – Resultados Financeiros Fazenda A

Custo (R\$)	Payback (anos)	VPL (R\$)	Aluguel anual (R\$)
30,000,000	3	27,000,000	6,000,000

Fonte: O autor (2023).

5 DISCUSSÕES E CONCLUSÃO

A Tabela 8 apresenta um resumo dos principais resultados obtidos para cada uma das fazendas analisadas no Capítulo 4.

TABELA 8 – Resultados Gerais

Fazenda	FR (%)	Geração Solar (kWh/ano)	Economia em Diesel (L)	Redução de CO ₂	Custo (R\$)	Payback (anos)	VPL (R\$)	Aluguel Anual (R\$)
A	60	1.150.000	264.283	713	10,000,000	4,5	4,000,000	1.500.000
B	68	3.000.000	500.000	7500	15,000,000	4	10,000,000	2.500.000
C	64	5.600.000	800.000	3200	30,000,000	3	27,000,000	6.000.000

Fonte: O autor (2023).

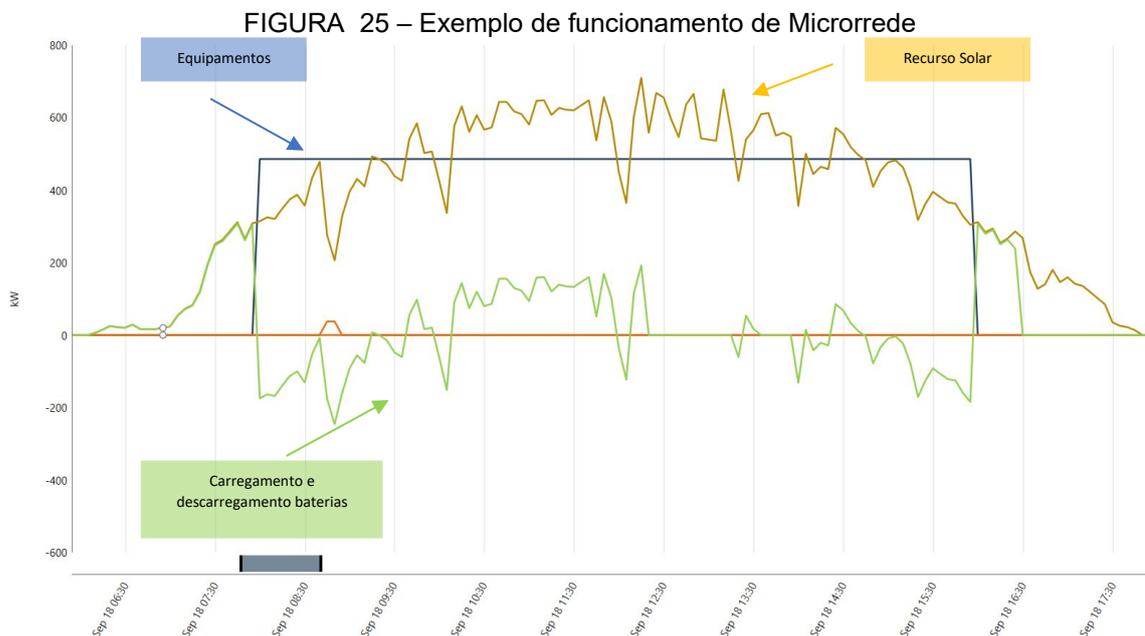
Inicialmente, é possível fazer uma comparação entre o perfil de carga anual da fazenda e o excedente de energia produzida pela microrrede. A partir dessa comparação percebe-se que esses dois fatores estão ligados entre si. Vê-se que quando o perfil de carga é bem distribuído durante o ano, ou seja, quando tem-se carga dos equipamentos da fazenda durante todos os meses, o excedente de energia produzido pela microrrede diminui consideravelmente. Isso acontece pelo fato da microrrede continuar produzindo energia, com ou sem carga. Assim, quando tem carga, a energia é destinada diretamente, para o armazenamento de energia (quando este não estiver totalmente carregado) ou para os equipamentos da fazenda. Quando não tem carga, a energia é desperdiçada, afetando a economia do projeto

Outra comparação possível de ser feita é quanto a localização da fazenda e a quantidade de energia que é produzida a partir da planta solar. Quanto melhor localizada a fazenda em termos de dados solarimétricos e de incidência solar, maior será a geração de energia solar. No caso das fazendas estudadas nessa análise, sabe-se que todas estão localizadas no mesmo estado ou próximo, assim as três possuem ótimas incidência solar, portanto uma boa geração de energia solar. Nas Figuras 12, 17 e 22, é possível ver na cor amarela, a geração solar fotovoltaica distribuída durante o ano, e considerando que essas fazendas estão localizadas no Norte/Nordeste do Brasil, possuem alta incidência solar durante boa parte do ano.

As Figuras 13, 18 e 23 representam o despacho energético dos equipamentos pertencentes à microrrede em dias com muita incidência solar. O despacho energético é definido com o objetivo de atender o perfil de consumo de cada fazenda. Nestas três figuras, o princípio de funcionamento do despacho funciona da seguinte forma:

- Antes de algum equipamento começar a entrar em operação na fazenda (linha azul), já existe geração solar fotovoltaica (linha amarela). Neste caso, a geração solar está carregando as baterias (crescimento da linha verde).
- Quando os equipamentos começam a operar, ou seja, quando a linha azul começa a crescer, a energia solar produzida (linha amarela) deixa de carregar a bateria e é destinada para tal carga (correspondente a linha verde decrescente).
- Quando a geração solar está baixa (linha amarela está com valores mais baixos), raro em dias como os representados nas figuras, e a bateria está totalmente descarregada (linha verde no menor valor), o gerador a diesel entra em ação (linha vermelha crescendo).
- No fim do dia, ainda existe energia provinda do sistema solar e como não existe carga, tal energia é destinada para o carregamento da bateria.

Esse ciclo se repete ao longo dos dias, meses e ano, nas três fazendas. Uma demonstração mais detalhada é mostrada na Figura 25.



Fonte: *Homer Pro e O autor (2023)*.

As imagens 14, 19 e 24 também mostram que mesmo em dias em que a incidência solar é alta, ainda ocorre variações vindo na geração fotovoltaica. Devido a esse fator, a bateria se torna importante para microrredes *off-grid*, pois elas são capazes de absorver as variações de potência causadas por tal intermitência.

As imagens 8, 13 e 18 representam o despacho energético da microrrede em dias com pouca incidência solar. Vê-se que a microrrede funciona da mesma forma que em dias com muita incidência solar, porém vê-se um aumento do uso dos geradores diesel no decorrer do dia (linha vermelha).

A linha verde presente nos gráficos de despacho energético representa a bateria carregando, descarregando, ou estacionária. Conforme a capacidade da bateria aumenta, mais armazenamento ela tem, suportando assim, mais energia vinda da fonte solar.

Vê-se nos gráficos de despacho energético que a bateria carrega e descarrega inúmeras vezes em um dia. Assim, é necessário que o equipamento possua elevado número de ciclos de carga e que seja seguro, para que não ocorra acidentes no local.

A fração renovável, nos casos apresentados, representa a porcentagem de energia solar e armazenamento de energia limpa em relação ao uso de diesel. Assim, quanto maior a porcentagem, menos diesel está sendo utilizado.

Observa-se que, mesmo para diferentes fazendas em relação ao tamanho da microrrede, as frações renováveis são bem parecidas, ficando entre 60% e 70%. Isso ocorre pois o dimensionamento da microrrede exige uma alta utilização da usina solar e das baterias para armazenamento, usufruindo o máximo possível desses dois equipamentos.

Vê-se que o gerador diesel é utilizado apenas para casos extremos, ou seja, nos casos em que não há geração fotovoltaica e/ou energia armazenada suficientes para atender a demanda da fazenda.

De acordo com a Tabela 8, todos os resultados para o Valor Líquido Presente - VPL foram positivos, assim é possível dizer que as três fazendas operam de forma economicamente viável. Para o *payback*, todos os casos apresentaram resultados menores do que 5 anos.

No mês de Agosto de 2023 foi fundada pelas empresas: Unicoba,

NewCharge, *Micropower* e Moura (empresas que atuam na área de armazenamento de energia), a ABSAE - Associação Brasileira de Soluções de Armazenamento de Energia. Essa associação tem como um de seus principais objetivos, impulsionar o setor de diversas formas, visto que atualmente esse setor não possui regulamentações ou legislações que favoreçam o seu crescimento, fornecendo benefícios ao comprador final, facilitando a importação desses equipamentos, fornecendo créditos de carbono ou outros.

A partir do momento que uma Associação Brasileira específica para a área de armazenamento é criada pelas maiores empresas desse mercado, fica claro a importância e o tamanho do peso que o desenvolvimento dessa área pode trazer para o país. Conclui-se que a associação seja capaz de lutar por melhores condições financeiras e regulatórias para o setor, tornando-o mais atrativo tanto para os consumidores quanto para os vendedores dessa solução. Além disso, acredita-se que a associação seja capaz de disseminar informações cruciais sobre o armazenamento de energia tanto para a população, quanto para o governo, obtendo assim mais apoio.

A partir da análise das microrredes estudadas nesse trabalho, é possível concluir que essa solução como um todo é essencial para locais que não possuem nenhuma conexão com a rede e rodam apenas com geradores a diesel, pois fornecem energia mais barata, mais segura e também ajudam o meio ambiente. Dentro dessa solução, as baterias são componentes insubstituíveis, sendo responsáveis pelo funcionamento da microrrede *off-grid*, pelo suprimento de energia sem interrupção e também por mitigar e absorver as variações de potência e de tensão causadas por outras fontes.

O *software Homer Pro* utilizado neste estudo é programado para fornecer a energia excedente da fonte considerada mais barata, dentro da microrrede, para a bateria. Assim, é considerado que o único equipamento que fornece essa energia, é o sistema solar fotovoltaico. É possível dizer que o *optimal sizing* fornecido pelo *software* terá sempre o menor custo e não utilizará energia do gerador a diesel para carregar a bateria, aumentando a fração renovável do sistema e garantindo que toda a energia produzida pela microrrede terá um destino final apropriado. O uso desse *software* promove então uma otimização da solução.

Em fazendas agrícolas, a distribuição de produção ao longo do ano pode aprimorar o perfil de carga, garantindo um suprimento estável e confiável de energia.

Enquanto as microrredes com baterias ainda possuem custos elevados, é notável que os custos estão em declínio e as simulações indicam que já existem sistemas que são economicamente viáveis.

Há espaço para um contínuo estudo e aprimoramento de cada componente e aspecto das microrredes, à medida que avançamos para um futuro mais sustentável e energeticamente eficiente. Portanto, o campo das microrredes, do seu funcionamento, vantagens, desvantagens e equipamentos pertencentes ao sistema, oferecem oportunidades para pesquisas futuras, inovação e aprimoramento constante.

Pesquisas quanto às baterias, podem ser voltadas para qual deve ser a utilização correta desse equipamento, para os avanços dessa tecnologia. Quanto às microrredes, neste trabalho não foi mencionado sobre os controladores que tem como função controlar o despacho de cada fonte presente na solução, logo, podem ser feitos trabalhos com foco nesse equipamento.

Conclui-se então que fica claro a importância de estudos que demonstrem os benefícios e a execução de projetos que incluem o armazenamento de energia a partir de fontes renováveis, principalmente a solar, e o uso de diesel em fazendas brasileiras. Fica claro também como é importante que melhorem as regulamentações para esse setor, assim como que invistam mais em armazenamento de energia.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, C. F. de O. *et al.* Situação da geração elétrica através de sistemas híbridos no estado do Pará e perspectivas frente à universalização da energia elétrica. *In: Encontro de Energia no Meio Rural*, v. 5, 2004, Campinas. **Proceedings online[...]**.
- BARBOSA, C. F. de O. *et al.* Conceitos sobre sistemas híbridos de energia para produção de eletricidade. *In: VI Congresso Brasileiro de Energia Solar*. Belo Horizonte, 2016. p. 1-8.
- BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário Estatístico 2022**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-2022>. Acesso em: 13 jun. 2023.
- BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Série histórica do levantamento de preços**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-revenda-e-de-distribuicao-combustiveis/serie-historica-do-levantamento-de-precos>. Acesso em: 15 jun. 2023.
- BRASIL. **Matriz elétrica brasileira cresce mais de 1,2 GW em agosto**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2023. Disponível em: [https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/matriz-eletrica-brasileira-cresce-mais-de-1-2-gw-em-agosto#:~:text=At%C3%A9%20o%20final%20de%20agosto,%2C6%20gigawatts%20\(GW\)](https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/matriz-eletrica-brasileira-cresce-mais-de-1-2-gw-em-agosto#:~:text=At%C3%A9%20o%20final%20de%20agosto,%2C6%20gigawatts%20(GW)). Acesso em: 15 out. 2023.
- BUENO, A. F. M.; BRANDAO, C. A. L. Visão geral de tecnologia e mercado para os sistemas de armazenamento de energia elétrica no Brasil. **Associação Brasileira de Armazenamento e Qualidade de Energia**, v. 1, p. 1-62, 2016.
- COSME, D. L. S. **Análise de Desempenho da Operação da Microrrede Isolada da Ilha de Lençóis**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, MA, 2021.
- CUNHA, T. H. JR.; SILVA, A. M. B. da. Baterias estacionárias e tracionárias aplicadas em sistemas off-grid e híbridos. **Encontro de Desenvolvimento de Processos Agroindustriais**. Uberaba: Uniube, UFTM, IFMT, 2020.
- DÍAZ-RODRÍGUEZ, J.; PABÓN-FERNÁNDEZ, L.; PARDO-GARCÍA, A. Sistema híbrido de energía utilizando energía solar e rede eléctrica. **Lámpsakos** (revista descontinuada), n. 7, p. 69-77, 2012.
- EXAME. Brasil atinge 32 GW de capacidade instalada em energia solar fotovoltaica. **Absolar**, 2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/brasil-atinge-32-gw-de-capacidade-instalada-em-energia-solar-fotovoltaica/>. Acesso em: 15 jul. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Perspectivas para o Mercado Brasileiro de Combustíveis no Curto Prazo**. EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/perspectivas-para-o-mercado-brasileiro-de-combustiveis-no-curto-prazo>. Acesso em: 17 nov. 2023

FABRE, Y. F. **Estudo da viabilidade de associação de supercapacitores com baterias de chumbo ácido para uso em microrredes**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Bauru – UNESP, Bauru, SP, 2022.

FARRET, F. A.; SIMÕES, M. G. **Integration of alternative sources of energy**. Piscataway: IEEE press, 2006.

GASPARIN, F. B. A Influência de Políticas Públicas para o Progresso da Geração Solar Fotovoltaica e Diversificação da Matriz Energética Brasileira. **Revista Virtual de Química**, v. 14, n. 1, 2022.

GREENER; NEWCHARGE. Estudo Estratégico. Mercado de Armazenamento: Aplicações, Tecnologias e Análises Financeiras. Greener, 2021.

IBERDROLA S.A. Energia Elétrica por Hibridização: quando a união das energias renováveis faz a força. **Iberdrola**, c2023. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/inovacao/energia-hibrida#:~:text=Os%20sistemas%20de%20energia%20h%C3%ADbrida,um%20mesmo%20ponto%20de%20conex%C3%A3>. Acesso em: 8 jun 2023.

JÚNIOR, G. G. L. *et al.* A relação entre o dimensionamento de bateria e cenários solar para usinas industriais offgrid. **Diálogos Interdisciplinares**, v. 12, n. 1, p. 231-252, 2023.

NADEEM, T. B. *et al.* Designing of an off-grid photovoltaic system with battery storage for remote location. **Tecciencia**, v. 16, n. 31, p. 15-28, 2021.

NEOCHARGE. Bateria de um veículo elétrico. **NeoCharge**, 2022. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/bateria-veiculo-eletrico#preco>. Acesso em: 08 jun. 2023.

PINTO, H. S. *et al.* **Diretrizes para uma economia verde no Brasil**: avanços tecnológicos para a agricultura familiar. Rio de Janeiro: Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável, 2012. (Coleção de estudos sobre diretrizes para uma economia verde no Brasil).

SILVA, M. G.; CESARIO, A. V.; CAVALCANTI, I. R. Relevância do agronegócio para a economia brasileira atual. **X Encontro de Iniciação à Docência, Universidade Federal da Paraíba**. UFPB – PRG, 2013. Disponível em: <http://www.prac.ufpb.br/anais/IXEnex/iniciacao/documentos/anais/8.TRABALHO/8CCSADAMT01.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2023.

VIAN, Â. *et al.* **Armazenamento de Energia**: Fundamentos Tecnologia e Aplicações. São Paulo: Blucher, 2021.

ZAREIPOUR, H. **Tutorial Energy Storage**: An Introduction to Technologies, Applications and Best Practices. Part 1. Denver: IEEE PES General Meeting, 2015.

APÊNDICE A – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

A ABSAE – Associação Brasileira de Sistemas de Armazenamento de Energia formada pelas empresas Unicoba, Newcharge, Moura e Micropower.

Objetivos – promover o armazenamento de energia como uma solução para o setor elétrico brasileiro, seguindo três prioridades:

1. Divulgação de informações para conscientizar a sociedade sobre a importância do armazenamento de energia para a segurança e eficiência do sistema elétrico;
2. Marco regulatório adequado para incentivar o investimento em armazenamento de energia;
3. Políticas públicas que garantam a competitividade do armazenamento de energia.

Objetivos Principais

1. Estabelecer legalmente em 2023 o Agente Armazenador de Energia Elétrica;
2. Aumentar a competitividade do BESS (Battery Energy Storage system) com a redução da sua carga tributária até o fim do terceiro trimestre de 2023;
3. Assegurar a realização em 2023 de um Leilão de Reserva de Capacidade (LRC) no produto potência com requisitos que permitam a participação do BESS de forma competitiva
4. Assegurar a realização em 2023 de um leilão de Sistemas Isolados (SISOL), e/ou mudanças regulatórias para adequações das usinas existentes, que contenham requisitos que permitam a participação competitiva do BESS em soluções híbridas com fontes renováveis e térmicas