

Sistema fotovoltaico off-grid com baterias em zona rural – estudo de caso

Off-grid photovoltaic system with batteries in rural areas – case study

Sistema fotovoltaico aislado de la red con baterías en zonas rurales – estudio de caso

DOI: 10.55905/oelv23n1-126

Receipt of originals: 12/13/2024

Acceptance for publication: 1/8/2025

Fernando Carvalho Assunção da Silva

Mestre em Engenharia de Produção
Instituição: Universidade Federal de Goiás
Endereço: Aparecida de Goiânia, Goiás, Brasil
E-mail: fernandocads.eng@gmail.com

Fernando Nunes Belchior

Doutor em Engenharia Elétrica
Instituição: Universidade Federal de Uberlândia
Endereço: Aparecida de Goiânia, Goiás, Brasil
E-mail: fnbelchior@ufg.br

Marcelo Nunes Fonseca

Doutor em Engenharia de Produção
Instituição: Universidade Federal de Itajubá
Endereço: Consolação, São Paulo, Brasil
E-mail: marcelo.fonseca@mackenzie.br

RESUMO

Através da energia elétrica se é capaz de movimentar máquinas, produzir calor e transmitir informações, energia esta que é gerada, transmitida e distribuída até o consumo final. Porém, interrupções no fornecimento de energia são obstáculos enfrentados principalmente para os produtores localizados na zona rural do estado de Goiás, onde enfrentam prejuízos devido a perda de alimentos armazenados e morte de animais em criadouros. A popularização da geração distribuída possibilitou que o consumidor de energia fosse capaz de produzir sua própria energia, tornando assim um prosumidor. Este trabalho realiza um estudo de caso em uma propriedade rural localizado no município de Cezarina-GO, utilizando diferentes cenários como: 1) Rede Elétrica + GMG; 2) Rede Elétrica + Sistema fotovoltaico off-Grid; e 3) Rede Elétrica + Sistema fotovoltaico off-Grid + Baterias. Com base na demanda energética do local são dimensionados os equipamentos para cada cenário e é, também, realizada uma análise financeira utilizando

os indicadores financeiros VPL, TIR, *Payback* descontado e LCOE, considerando os principais custos de implantação e operação de cada configuração em estudo. Assim, foi observado que o cenário Rede Elétrica + Sistema fotovoltaico off-Grid + Baterias apresentou melhor viabilidade entre as soluções analisadas, pois apresentou maior VPL negativo e menor LCOE em 30 anos, mesmo apresentando investimento inicial 9 vezes maior que o cenário mais tradicional Rede Elétrica + GMG.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica, Interrupções, GMG, *Off-Grid* e Baterias.

ABSTRACT

Through electrical energy, it is possible to operate machinery, generate heat, and transmit information. This energy is generated, transmitted, and distributed until final consumption. However, interruptions in the power supply pose obstacles, especially for producers located in the rural areas of the state of Goiás. These producers face losses due to spoiled stored food and the death of animals in breeding facilities. With the rise of distributed generation, consumers have been enabled to produce their own energy, thus becoming prosumer. This study conducts a case analysis on a rural property located in the municipality of Cezarina-GO, aiming to investigate the optimal solution for maintaining a consistent energy supply through alternative generation sources. Different scenarios are explored: 1) Grid Electricity + Backup Generator; 2) Grid Electricity + Off-Grid Photovoltaic System; and 3) Grid Electricity + Off-Grid Photovoltaic System + Batteries. Based on the energy demand of the location, equipment is sized for each scenario, and a financial analysis is performed using indicators such as Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Discounted Payback Period, and Levelized Cost of Energy (LCOE). The results show that the scenario "Grid Electricity + Off-Grid Photovoltaic System + Batteries" exhibits the best feasibility among the analyzed solutions. Despite having an initial investment nine times higher than the more traditional "Grid Electricity + Backup Generator" scenario, it presents a higher negative NPV and a lower LCOE over a 30-year period.

Keywords: Photovoltaic Solar Energy, Interruptions, Standby Generator, Off-Grid, and Batteries

RESUMEN

A través de la energía eléctrica es capaz de mover máquinas, producir calor y transmitir información, energía que se genera, transmite y distribuye hasta el consumo final. Sin embargo, las interrupciones en el suministro de energía son obstáculos que enfrentan principalmente los productores ubicados en la zona rural del estado de Goiás, donde enfrentan pérdidas por la pérdida de alimentos almacenados y la muerte de animales en los criaderos. La popularización de la generación distribuida ha permitido que los consumidores de energía puedan producir su propia energía, convirtiéndose así en prosumidores. Este trabajo realiza un estudio de caso en una propiedad rural ubicada en el municipio de Cezarina-GO, utilizando diferentes escenarios como: 1) Red Eléctrica + GMG; 2) Red Eléctrica + Sistema Fotovoltaico Aislada; y 3) Red Eléctrica + Sistema Fotovoltaico Aislada + Baterías. Con base en la demanda energética de la ubicación, se

dimensiona el equipo para cada escenario y también se realiza un análisis financiero utilizando los indicadores financieros NPV, TIR, Discounted Payback y LCOE, considerando los principales costos de implementación y operación de cada configuración en estudio. Así, se observó que el escenario Red Eléctrica + Sistema Fotovoltaico Aislado + Baterías presentó la mejor viabilidad entre las soluciones analizadas, al presentar el mayor VAN negativo y el menor LCOE en 30 años, presentando incluso una inversión inicial 9 veces mayor que el escenario más tradicional de Grid Electric + GMG.

Palabras clave: Energía Solar Fotovoltaica, Cortes, GMG, Off-Grid y Baterías.

1 INTRODUÇÃO

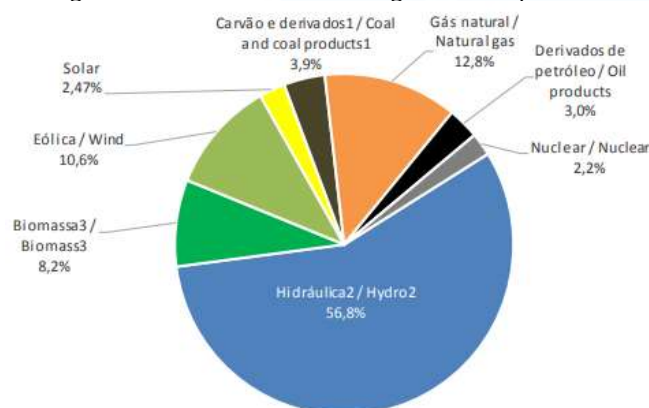
A energia elétrica apresenta papel fundamental no desenvolvimento de uma sociedade, seja esta, localizada na zona urbana ou zona rural. É considerada a forma de energia mais flexível, de modo que pode ser transmitida através de longas distâncias, além de poder ser transformada em luz, calor, movimento e informação (Villalva, 2021).

O fornecimento de energia elétrica aos estabelecimentos residenciais, comerciais ou industriais ocorre através de redes de distribuição, em baixa ou média tensão, onde para este fornecimento o Brasil conta com uma matriz elétrica formada pelas fontes renováveis como a hidráulica, biomassa, eólica, solar, e não renováveis como o gás natural, nuclear, derivados de petróleo e carvão e derivados. Assim, como fonte predominante no Brasil a hidráulica é formada por centrais hidrelétricas que representam 56,8% da oferta interna de energia elétrica (ENERGY RESEARCH OFFICE - EPE, 2021). Desta forma, a matriz brasileira se constitui predominantemente na forma de geração centralizada de energia elétrica, de modo que esta é gerada e consequentemente transmitida e distribuída até o consumo final. Além da geração centralizada de energia, o Brasil conta com uma crescente utilização da geração distribuída, isto é, gerando energia próximo ao local de consumo. Na geração distribuída predomina-se a fonte solar fotovoltaica, de modo que esta representou no ano de 2021, 88,3% da geração distribuída (ENERGY RESEARCH OFFICE - EPE, 2021). A Figura 1 apresenta a geração de energia elétrica por fonte.

O sistema fotovoltaico conectado à rede é uma forma de geração de energia

elétrica que utiliza a energia proveniente dos raios solares, abundante no planeta, de modo que esta é convertida em energia elétrica. Através dessa fonte ocorre a descentralização da geração de energia, de modo que os consumidores não fiquem tão dependentes da concessionária distribuidora de energia e consequentemente aos efeitos sazonais da geração centralizada que impactam no valor da tarifa de energia, como ocorre em usinas hidrelétricas. Os consumidores de energia que também geram sua própria energia são chamados de prossumidores.

Figura 1: Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.



Fonte: (EPE, 2022).

Sistemas fotovoltaicos possuem variadas aplicações, sejam eles conectados à rede, com o objetivo de minimizar os custos diretamente na fatura de energia, sistemas isolados, utilizados para a geração de energia em locais onde não possuem rede de distribuição de energia elétrica, e sistemas híbridos, para locais que possuem rede de distribuição de energia elétrica, porém apresentam intermitência no seu fornecimento. Para os sistemas isolado e híbrido, estes podem utilizar as tecnologias de armazenamento de energia em baterias, de modo a utilizar energia também em momentos em que a energia proveniente do Sol não seja suficiente.

Como alternativa para manter a continuidade da produção fabril e minimizar os prejuízos, muitas indústrias fazem uso de Grupo Motor-Gerador (GMG) a diesel. Porém a utilização de GMGs a diesel aumenta o custo operacional, bem com a emissão de poluentes no ambiente (Babajide; Brito, 2021). Apesar do baixo valor inicial de aquisição

de tal fonte alternativa de geração de energia, é importante observar as novas tecnologias disponíveis no mercado que apresentem melhor eficiência e viabilidade financeira.

Dado o exposto acima, o presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a solução mais viável técnica e economicamente de diferentes configurações de sistemas fotovoltaicos híbridos e GMG para redução dos impactos causados por interrupções de energia. Assim, se adotará como objeto de estudo uma propriedade localizada na zona rural do estado de Goiás. Como objetivos específicos tem-se a apresentação de novas fontes alternativas de geração distribuída para substituição ou redução da utilização de GMG, principal fonte utilizada nas propriedades rurais para manter a continuidade de energia elétrica, e consequentemente a redução de gastos com combustíveis e emissões de poluentes.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta as principais referências da literatura relacionadas à geração distribuída, através da contextualização desta na matriz elétrica brasileira, de modo a apresentar as principais aplicações em estudo, sendo elas: Sistemas fotovoltaicos conectados à rede (*on-grid*) e isolados (*off-grid*), armazenamento de energia em baterias, GMG e sistemas fotovoltaicos híbridos.

2.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA (GD)

A maior parte da geração de energia elétrica no Brasil consiste na geração centralizada, através de grandes usinas hidrelétricas e termelétricas, onde a matriz geradora encontra-se afastada dos centros urbanos, sendo a energia é transportada através de linhas de transmissão e redes de distribuição até o consumo (CANAL SOLAR, 2020).

A diversificação da matriz elétrica no país caminha cada vez mais para a utilização de fontes renováveis, devido à grande abundância de recursos naturais disponíveis. Além da utilização dos recursos hídricos, a incidência de irradiação solar é favorável para a utilização da geração solar fotovoltaica, da mesma forma como a incidência de ventos,

para a geração eólica.

A GD apresenta benefícios relevantes ao sistema elétrico, de forma a minimizar os efeitos relacionados às falhas e perdas no sistema de transmissão e distribuição de energia, onde esses sistemas percorrem longos caminhos até o ponto de consumo, assim como aumentar a estabilidade do sistema elétrico e a relação com as tarifas praticadas pelas concessionárias distribuidoras de energia (Silva *et al.*, 2018).

O sistema *on-grid* permite a interligação do sistema de GD à rede elétrica da concessionária ou permissionária. O *off-grid*, por sua vez, não possuem interligação com a rede elétrica da concessionária. Está representado na Figura 2 (a) e (b) a forma de conexão e os principais componentes do sistema fotovoltaico *on-grid* (a) e *off-grid* (b).



Fonte: (a) (SIQUEIRA, 2019); (b) (NEOSOLAR, 2020).

Painel Solar Fotovoltaico: Também chamado de módulo fotovoltaico é o equipamento responsável pela conversão de irradiação solar em energia elétrica, através do efeito fotovoltaico. É fabricado em material semicondutor, sendo o silício monocristalino e policristalino as principais tecnologias utilizadas no mercado.

Inversor On-grid: Dispositivo utilizado para conversão da energia elétrica gerada pelo painel fotovoltaico em corrente contínua DC, para energia elétrica em corrente alternada com parâmetros adequados de tensão, corrente e frequência, em relação à rede de distribuição. Os inversores possuem vida útil estimada de 10 a 15 anos e possui garantia média de 5 anos (Fernandes, 2020).

Medidor de energia bidirecional: Equipamento instalado pela concessionária de energia, para registro da energia elétrica em dois sentidos, sendo a energia injetada, aquela produzida pelo sistema fotovoltaico e injetada na rede elétrica (após o consumo instantâneo) e a energia consumida, aquela fornecida pela concessionária.

Controlador de Carga: Equipamento responsável pelo controle e regulação dos parâmetros elétricos adequados para o carregamento e o descarregamento do banco de baterias, aumentando assim a vida útil deste (Pinho; Galdino, 2014).

Baterias: Sistema de armazenamento de energia em corrente contínua, com tensão de operação de 12V, 24V ou 48V, responsável pelo suprimento de energia em momentos que não possui irradiação solar suficiente. As principais tecnologias de baterias são: Bateria de Chumbo-Ácido, Níquel-Cádmio, Fosfato de Ferro de Lítio e íons de Lítio.

Inversor Off-grid: Dispositivo utilizado para a conversão da energia elétrica gerada pelo painel fotovoltaico em corrente contínua DC, com tensão de 12V, 24V ou 48V, para energia elétrica em corrente alternada, com tensão de 127V ou 220V e parâmetros adequados aos equipamentos atendidos.

2.2 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM BATERIAS

São utilizados há muitos anos, sendo as mais antigas aplicações feitas através de baterias de chumbo-ácido, para abastecimento de energia em locais remotos no Brasil. A aplicação de sistemas fotovoltaicos com armazenamento de energia em baterias de chumbo-ácido foi impulsionada pelo Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios – PRODEEM, onde foram instalados mais de 6200 sistemas deste tipo em comunidades isoladas (Greener, 2021).

Esta aplicação representa uma solução para locais isolados, onde a entrega de energia por parte das concessionárias não é viável, seja em termos econômicos ou técnicos e também, em áreas urbanas, podendo ser utilizados como sistemas auxiliares para economia de energia, oferecendo benefícios em termos financeiros, qualidade da energia, estabilidade e confiabilidade (Andrade, *et al.*, 2021).

Os principais tipos de baterias utilizadas em sistemas fotovoltaicos são:

Bateria de Chumbo-Ácido: Essa tecnologia de armazenamento de energia apresenta o menor custo por Wh em aplicações de sistemas fotovoltaicos, porém sofrem maior influência com o aumento de temperatura, reduzindo a eficiência e vida útil, sendo recomendadas para aplicações com temperaturas máximas de 25°C a 30°C (Ferreira, 2021). A vida útil também está diretamente relacionada à profundidade de descarga, assim, variando de 2500 ciclos, para uma profundidade de 10%, a 500 ciclos, para uma descarga de 50% (Costa; Villalva, 2020).

Bateria de Níquel-Cádmio: Quando comparadas às baterias de chumbo-ácido, apresentam custo inicial cerca de 5,24% maior, porém necessitam de menor manutenção e possuem ciclo de vida maior. Essa tecnologia possui menor impacto para o aumento de temperatura, sendo recomendada para temperaturas máximas de 35°C a 40°C (Ferreira, 2021).

Esta tecnologia possui ciclo de vida de 10000 ciclos, considerando uma profundidade de descarga de 15%, segundo informações do fabricante SAFT (2022).

Bateria de íons de Lítio: Esta tecnologia possui vida útil superior às baterias de chumbo-ácido, de modo a atingir 3000 ciclos para uma profundidade de descarga de 80% (Coppez, 2010).

Bateria de Lítio Ferro Fosfato: Tecnologia mais recentes implementadas em sistemas fotovoltaicos, de modo a suprir cargas críticas, apresentando maior potência e maior desempenho em relação às tecnologias existentes (Silva Neto, 2019). Segundo o fabricante de baterias BYD (2022), a vida útil dessa tecnologia está estimada em mais de 6000 ciclos, sendo assim superior às outras tecnologias de baterias.

A Tabela 1 apresenta os valores relacionados ao ciclo de vida e profundidade de descarga por tipo de bateria.

Tabela 1: Ciclo de vida para diferentes baterias

Tipo de bateria	Profundidade de descarga	Ciclo de vida
Chumbo-Ácido	10%	2500
Níquel-Cádmio	15%	10000
Íons de Lítio	80%	3000
Lítio Ferro Fosfato	100%	6000

Fonte: O autor.

2.3 GRUPO MOTOR GERADOR (GMG)

O conjunto GMG consiste em um motor a combustão alimentado a diesel, gasolina ou gás, responsável por gerar energia mecânica ao sistema, agrupado a um gerador de corrente alternada, capaz de gerar energia elétrica a um determinado conjunto de cargas (Zorzetto; Cauduro, 2021).

Com o baixo custo inicial de implantação entre as principais fontes geradoras, o GMG é amplamente utilizado no setor rural, de modo a manter a continuidade da energia elétrica em períodos de intermitência ou ausência no fornecimento desta por parte da rede de distribuição. São utilizados também como aplicação em comunidades remotas, onde o atendimento via redes de distribuição se torna inviável pela concessionária (Costa; Villalva, 2020).

A vida útil dos GMGs depende de diversos fatores, como o tempo de operação, temperatura de trabalho, manutenções preventivas, entre outras. Segundo (Cartaxo; Januzzi, 2006) essa vida útil é de 30000 horas, já para (Nocera; Pereira; Gomes, 2015) a vida útil é de 15000 horas.

2.4 SISTEMA FOTOVOLTAICO HÍBRIDO

Sistemas fotovoltaicos híbridos são constituídos por um sistema fotovoltaico *on-grid* ou *off-grid*, que possui diferentes fontes alternativas de geração de energia, sendo estas, renováveis ou tradicionais. Na Figura 3 está representado uma configuração possível de sistema fotovoltaico híbrido.

Um estudo realizado por (Costa; Villalva, 2020) investigou um sistema híbrido *off-grid* instalado na reserva extrativista Tapajós-Arapiuns, formado por gerador fotovoltaico com banco de baterias de chumbo-ácido, como fonte principal e GMG à diesel como fonte secundária. Através de simulações computacionais foi analisado o comportamento do sistema para o aumento de 10 a 50% no perfil de carga, onde este sistema apresentou desempenho satisfatório, de modo que o GMG à diesel, para atendimento ao pico de consumo, não representou mais que 15% da geração de energia.

Figura 3: Sistema de Geração de Energia Elétrica Híbrido.



Fonte: (SANNI *et al.*, 2021)

Na maioria dos sistemas híbridos, os GMGs à diesel e as baterias são utilizados como backup de energia.

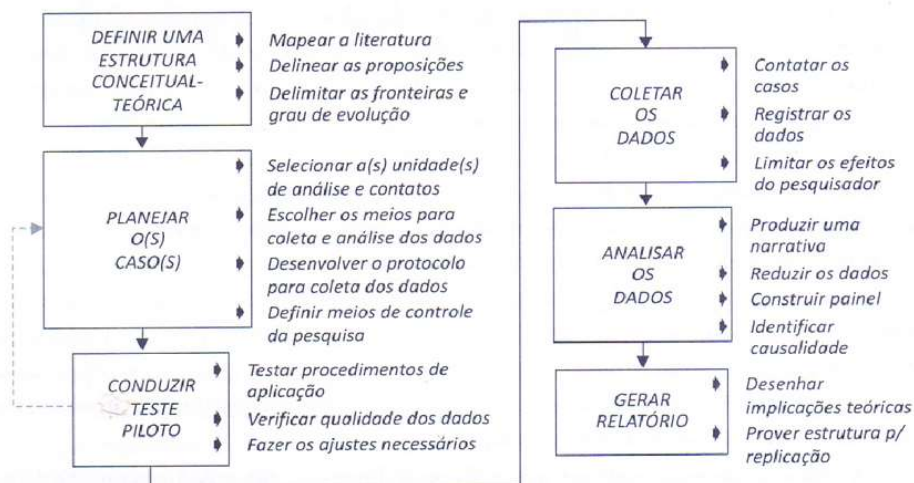
Em locais que possuem intermitência no fornecimento de energia através de redes de distribuição, é comum a utilização de GMGs à diesel como forma de manter a continuidade do fornecimento. Assim, segundo o estudo de caso realizado por (Chedid; Sawwas, 2021), na Universidade Americana de Beirute, como alternativa para minimizar a dependência e custos de operação do gerador, a migração para um sistema fotovoltaico (PV) híbrido + Bateria + Diesel mostrou-se viável, através da economia de energia e redução significativa do custo da energia.

3 METODOLOGIA

Devido à complexidade dos parâmetros utilizados nas investigações e dimensionamento das tecnologias utilizadas na pesquisa, esta possui abordagem qualitativa, de modo ao aprofundamento da teoria e aplicações em estudo. O método utilizado é o estudo de caso, assim, este é um trabalho de caráter empírico que investiga o fenômeno que ocorre no cenário real e atual, de tal forma, uma análise aprofundada de um objeto de análise (caso) é realizada.

O trabalho segue a estrutura abaixo, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4: Estrutura do Estudo de Caso.



Fonte: O Autor.

3.1 DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA CONCEITUAL TEÓRICA

Defini-se o referencial conceitual teórico da pesquisa, assim identificando o contexto em que o tema da pesquisa está inserido. Através da identificação de trabalhos existentes sobre interrupções de energia elétrica, sistemas fotovoltaicos *off-grid*, GMG e armazenamento de energia, é possível realizar um mapeamento da literatura, de modo a identificar sua abrangência, bem como determinar as fronteiras que o estudo estará limitado.

3.2 PLANEJAMENTO DO CASO

Para o presente trabalho são investigados os dados históricos de interrupções de energia, funcionamento do GMG e prejuízos causados ao longo do tempo por interrupções. O caso é escolhido por apresentar característica desejável para o estudo, desta forma é escolhido um estabelecimento que apresenta constantes registros de interrupções de energia elétrica, dessa forma apresentando maiores impactos sejam relativos à falta de

energia ou ao uso de GMG, com isso a escolha do caso é caracterizada como uma amostragem teórica.

3.3 COLETA DE DADOS

3.3.1 Levantamento operacional

A etapa inicial do processo de coleta de dados é o levantamento operacional do estabelecimento em estudo, onde esta etapa possui caráter de maior importância e complexidade, visto que o comportamento das cargas durante um período de 24 horas pode sofrer variações em diferentes dias. A identificação das cargas e período de operação das mesmas são a base de referência para o dimensionamento dos equipamentos geradores, condicionadores e armazenadores de energia.

3.3.2 Recurso solar

A forma de quantificar o recurso solar que incide sobre uma determinada superfície é através da irradiância solar, definida como a taxa da energia incidente por unidade de área (W/m^2). A irradiância solar incidida por unidade de área acumulada em um intervalo de tempo é denominada de Irradiação solar (Wh/m^2) (Nocera; Pereira; Gomes, 2015).

3.4 CENÁRIOS

De modo a minimizar os efeitos técnicos e financeiros causados por interrupções no fornecimento de energia elétrica na zona rural, foram analisados 3 cenários de possíveis soluções em autoconsumo, utilizando fontes alternativas de geração de energia elétrica, são eles:

- 1) Rede Elétrica + GMG (RE+GMG);
- 2) Rede Elétrica + Sistema fotovoltaico *off-grid* + GMG (RE+SFV+GMG);
- 3) Rede Elétrica + Sistema fotovoltaico *off-grid* + Baterias (RE+SFV+Bat).

Ao analisar técnica e financeiramente os 3 cenários, é levado em consideração os impactos e prejuízos financeiros causados pela falta de energia, ocasionados pela perda de produto estocado, parada da linha de produção, mortalidade de animais, entre outros prejuízos. Desta forma, são analisados os custos totais de cada cenário e comparados entre si, de modo a determinar a solução mais viável.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através do estudo das tecnologias disponíveis no mercado é possível determinar os principais equipamentos e configurações a serem utilizadas. Por meio da investigação de uma propriedade rural, na qual sofre com demasiadas interrupções no fornecimento de energia pela concessionária, ocasionando assim, impactos financeiros ao proprietário, é possível coletar informações para o dimensionamento das tecnologias disponíveis e analisar técnica e financeiramente os 3 cenários.

O local em estudo é composto por uma estrutura de ordenha de vacas e uma residência, onde estes são atendidos por um centro de medição monofásico a três condutores (duas fases + neutro), transformador monofásico particular de 10kVA com tensão no secundário de 220V/440 V, e disjuntor bipolar de 32A. A curva de carga do laticínio está representada na Figura 6.

Com relação à duração média da falta, esta tem duração média de 12 horas, até que seja retornado o fornecimento normal. Como parâmetro importante para o dimensionamento do banco de baterias foi informado o tempo médio entre duas interrupções, sendo este de 2 dias.

Figura 5: Curva de carga do estabelecimento.



Fonte: O autor.

4.1 CENÁRIO ATUAL DO ESTABELECIMENTO

A principal atividade financeira do estabelecimento que está intimamente ligado a qualidade da energia é a venda do leite armazenado para o distribuidor, dessa forma, quando ocorre interrupção no fornecimento de energia, esse leite antes vendido por R\$3,50, passa a ser vendido por R\$3,00 o litro, assim 25% de prejuízo nesta operação, visto que se não for vendido e coletado pelo distribuidor este insumo é perdido.

Assim, para o cenário atual do estabelecimento os custos e o prejuízo relacionado a venda do leite produzido e armazenado são apresentados na Tabela 2.

Os custos diários da energia incluem a quantidade de energia consumida em dia com e sem interrupção e a tarifa de energia do local em estudo, na Tabela 3 estão os custos diários com energia.

Tabela 2: Custos de venda do leite

Venda do Leite	
Tanque de leite	500L
Preço do leite sem interrupção	R\$3,50
Preço do leite com interrupção	R\$3,00
Ganho sem interrupção	R\$1.750,00
Ganho com interrupção	R\$1.500,00
Prejuízo relativo	R\$250,00

Fonte: O autor.

Tabela 3: Custo da energia distribuída pela concessionária

Custo da energia diário	
Consumo diário rede elétrica sem interrupção	35,74kWh
Consumo diário rede elétrica com interrupção	21,88 kWh
Tarifa de energia	R\$0,77/kWh
Custo diário rede elétrica sem interrupção	R\$27,52
Custo diário rede elétrica com interrupção	R\$16,85

Fonte: O autor.

Para determinar o custo total anual do estabelecimento são considerados os custos do consumo de energia em dias que não ocorrem interrupção, adicionado aos custos do consumo de energia em dias que ocorre interrupção e ao prejuízo relativo da venda do leite. Este custo total anual é apresentado na Tabela 3.

Tabela 4: Custo Anual do estabelecimento - SEM SOLUÇÃO

Custos	Dias	Valor Total
Custo rede elétrica sem interrupção	17	R\$467,82
Custo rede elétrica com interrupção	13	R\$219,05
Prejuízo relativo à venda do leite	13	R\$3.250,00
Custo total mês	30	R\$3.936,87
Custo total ano		R\$47.242,42

Fonte: O autor.

4.2 ANÁLISE REDE ELÉTRICA + GMG – RE+GMG

Na solução utilizando a rede elétrica de distribuição e o GMG como *backup* de energia, este último opera durante as 12 horas de interrupção, período compreendido de 19hrs até as 6:59hrs.

Após o levantamento dos principais custos deste cenário é possível estender estes para o horizonte de 30 anos. Assim, esta configuração apresenta um investimento inicial de **R\$11.819,94**, fluxo de caixa negativo de **R\$29.752,40** por ano e substituição do GMG a cada 11 anos. O fluxo de caixa negativo engloba os custos de operação desse cenário, ou seja, custo com energia elétrica da rede da concessionária, custo com o óleo diesel no GMG e custo com manutenções.

4.3 ANÁLISE REDE ELÉTRICA + SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID + GMG – RE+SFV+GMG

Este cenário envolve o sistema fotovoltaico *off-grid* como forma de economia da energia durante o dia, sendo o GMG a fonte de *backup* durante o período noturno nos momentos em que a rede elétrica da concessionária apresenta interrupção no fornecimento.

Assim, esta configuração apresenta um investimento inicial de **R\$67.960,12**, fluxo de caixa negativo de **R\$25.050,21** por ano, substituição do GMG a cada 11 anos e substituição dos inversores a cada 10 anos. De forma, semelhante ao cenário anterior, o fluxo de caixa negativo se dá pelos custos de operação, ou seja, custo com energia elétrica da rede da concessionária, custo com o óleo diesel no GMG e custo com manutenções.

4.4 ANÁLISE REDE ELÉTRICA + SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID + BATERIAS – RE+SFV+BAT

Nesta configuração de solução o sistema opera de maneira semelhante à configuração anterior, porém a fonte de *backup* de energia é o banco de baterias, atuando nos momentos de interrupção do fornecimento da rede.

Esta configuração de solução apresenta-se um investimento inicial, CAPEX, de **R\$106.578,00** e fluxo de caixa negativo de **R\$3.540,23** no primeiro ano. Como valor adicional ao fluxo de caixa, ocorre a substituição dos inversores a cada 10 anos. Diferente dos cenários anteriores, o fluxo de caixa negativo ocorre apenas considerando o custo com a energia elétrica da rede da concessionária e custo com manutenções como custo operacional, OPEX.

4.5 ANÁLISE COMPARATIVA

Os principais custos dos 3 cenários estão apresentados na Tabela 5.

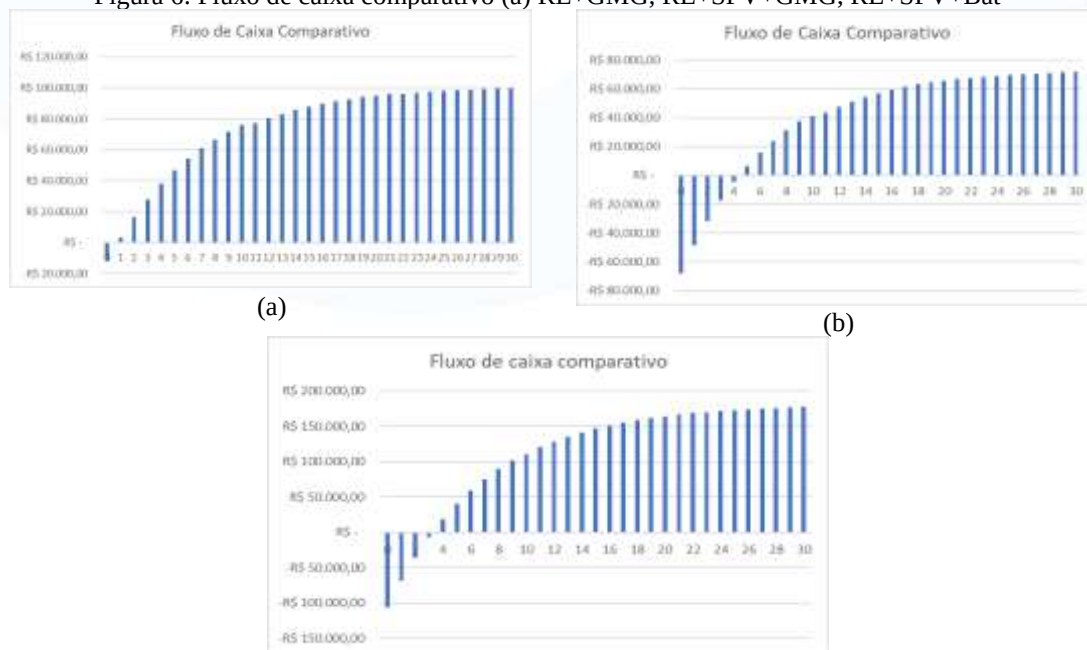
Tabela 5: Principais custos dos 3 cenários

	RE+GMG	RE+SFV+GMG	RE+SFV+Bat
CAPEX			
aquisição do GMG	R\$11.819,94	R\$11.819,94	-
aquisição Sistema off-grid	-	R\$50.000,18	R\$50.000,18
Instalação Sistema off-grid	-	R\$6.140,00	R\$6.140,00
aquisição Baterias	-	-	R\$50.437,82
OPEX			
energia ano Rede	R\$8.242,42	-	-
energia ano GMG	R\$19.509,98	-	-
Manutenção Preventiva 4 vezes	R\$2.000,00	R\$2.000,00	-
Horas de Operação por ano GMG	1872 horas	1872 horas	-
Substituição do GMG	11 anos	11 anos	-
Manutenção Sistema off-grid	-	R\$637,50	R\$637,50
Substituição do Inversor	-	10 anos	10 anos
Inversores	-	R\$7.346,07	R\$7.346,07

Fonte: O autor.

É possível visualizar o retorno do investimento através do fluxo de caixa comparativo representado, para os 3 cenários, na Figura 6 (a), (b), (c).

Figura 6: Fluxo de caixa comparativo (a) RE+GMG, RE+SFV+GMG, RE+SFV+Bat



(c)

Fonte: O autor.

Os principais indicadores financeiros analisados neste trabalho estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 6: Principais indicadores financeiros de cada cenário em 30 anos

Cenário	VPL	Payback descontado	LCOE
RE+GMG	-R\$210.260,29	0,48 anos	R\$0,547/kWh
RE+SFV+GMG	-R\$238.379,30	4,43 anos	R\$0,593/kWh
RE+SFV+Bat	-R\$132.676,36	3,27 anos	R\$0,330/kWh

Fonte: O autor.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como foco central investigar as tecnologias do mercado de fontes alternativas de geração de energia de forma off-grid e analisar a solução mais viável para o cenário atual de um estabelecimento comercial produtor e armazenador de leite localizado no município de Cezarina, interior do estado de Goiás, que sofre com severas interrupções no fornecimento da energia elétrica.

Através do método de estudo de caso foram identificadas as características técnicas, financeiras e operacionais do estabelecimento analisado. Com isso, foram dimensionados 3 cenários de possíveis soluções utilizando fontes alternativas de geração, utilizando GMG, sistema fotovoltaico off-grid e Baterias, são eles: RE+GMG, RE+SFV+GMG e RE+SFV+Bat.

De posse dos 3 cenários dimensionados tecnicamente considerando as tecnologias disponíveis no mercado, foram estabelecidos os principais custos de cada cenário, sendo eles o investimento inicial (CAPEX), custo operacional (OPEX) e eventuais substituições em um horizonte de 30 anos de análise, período referente à garantia de produção estabelecida pelo fabricante dos módulos fotovoltaicos.

Analisando financeiramente, foi observado que a solução RE+SFV+Bat apresentou o maior investimento inicial entre os cenários, sendo o cenário RE+GMG um valor 9 vezes menor. Quando investigado o custo operacional, o cenário contendo o banco de baterias apresentou o menor valor, visto que proporciona economia de energia através do

sistema fotovoltaico off-grid durante o dia e não apresenta custo operacional durante os períodos de interrupções de energia.

Através da análise dos principais indicadores financeiros, a solução que apresentou o menor VPL foi o cenário RE+SFV+Bat valor -R\$132.676,36, valor significativamente menor entre as soluções analisadas. Já através da comparação do fluxo de caixa de cada solução com o fluxo de caixa atual do estabelecimento foi determinado o payback descontado para os 3 cenários, com isso o cenário RE+GMG apresentou o menor tempo de retorno do investimento entre as soluções com um valor de 0,48 anos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) e à Secretaria-Geral de Governo (SGG) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

BABAJIDE, A.; BRITO, M. C. Solar PV systems to eliminate or reduce the use of diesel generators at no additional cost: A case study of Lagos, Nigeria. **Renewable Energy**, v. 172, p. 209–218, 1 jul. 2021.

CANAL SOLAR. **Geração distribuída fotovoltaica cresce 230% ao ano no Brasil**. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/noticia/geracao-distribuida-fotovoltaica-cresce-230-ao-ano-no-brasil/>>. Acesso em: 17 dez. 2023.

CARTAXO, E. F.; JANUZZI, G. DE M. Fornecimento de serviço de energia elétrica para comunidades isoladas da Amazônia: um estudo de caso. 2006.

CHEDID, R.; SAWWAS, A. A Techno-economic feasibility study of a green energy initiative for a university campus. **International Journal of Smart Grid and Clean Energy**, p. 203-214, 2021.

COPPEZ, G. ; C. S. P. C. S. **The importance of energy storage in Renewable Power Generation: A review**. Zhejiang: 2010.

COSTA, T. S.; VILLALVA, M. G. Technical Evaluation of a PV-Diesel Hybrid System with Energy Storage: Case Study in the Tapajós-Arapiuns Extractive Reserve, Amazon, Brazil. **Energies 2020, Vol. 13, Page 2969**, v. 13, n. 11, p. 2969, 9 jun. 2020.

ENERGY RESEARCH OFFICE - EPE. Summary Report 2021 - Reference year 2020. 2021.

EPE. **Balanco energético nacional**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>.

FERNANDES, C. G. **Estudo comparativo do uso de inversor string e microinversores na geração de energia elétrica em instalações fotovoltaicas**. Trabalho de Conclusão de Curso—Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2020.

FERREIRA, R. T. **Análise da Viabilidade Econômica da Substituição de Banco de Baterias: Chumbo-Ácido x Ni-Cd, Considerando Diferentes Temperaturas Ambiente**. Seminar on Power Electronics and Control - SEPOC, 18 maio 2021.

NEOSOLAR. **Sistemas de energia solar fotovoltaica e seus componentes**. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>>. Acesso em: 5 nov. 2024.

NOCERA, A. D.; PEREIRA, V. C.; GOMES, G. **Análise da viabilidade técnica e financeira da implantação do gerador a Diesel no horário de ponta em um hospital de Curitiba**. Trabalho de Conclusão de Curso—Curitiba-PR: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

GREENER. **Estudo do mercado de armazenamento de energia**. Disponível em: <<https://www.greener.com.br/pagina-estudo-do-mercado-de-armazenamento-de-energia/>>. Acesso em: 5 nov. 2024.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. [s.l: s.n.].

SANNI, S. O. et al. Analysis of backup power supply for unreliable grid using hybrid solar PV/diesel/biogas system. **Energy**, v. 227, p. 120506, 15 jul. 2021.

SILVA, J. L. DE S. et al. **Análise do avanço da geração distribuída no Brasil**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. **Anais...** Gramado-RS: abr. 2018. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/535/535>>. Acesso em: 5 nov. 2024

SILVA NETO, F. G. DA. **Sistema fotovoltaico conectado à rede com utilização de baterias de lítio ferro fosfato para backup: viabilidade econômica e perspectiva futura**. Trabalho de Conclusão de Curso—Palmas-TO: Universidade Federal de Tocantins, 2019.

SIQUEIRA, N. **Como Funciona a Energia Solar?** Disponível em: <<https://fotonengenharia.com/como-funciona-a-energia-solar/>>. Acesso em: 5 nov. 2024.

VILLALVA, M. G. **Armazenamento de energia: tecnologias de baterias elétricas**. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/armazenamento-de-energia-tecnologias-de-baterias-eletricas/>>. Acesso em: 17 dez. 2023.

ZORZETTO, R.; CAUDURO, C. R. **Premissas de eficiência energética no dimensionamento elétrico de um motor gerador a diesel**. Camargo-RS: Universidade Federal de Santa Maria, 2021.