

Simulação de cenários de geração energética por meio de sistemas fotovoltaicos e bancos de baterias para análise de viabilidade

Simulation of energy generation scenarios using photovoltaic systems and battery banks for feasibility analysis

Simulación de escenarios de generación energética mediante sistemas fotovoltaicos y bancos de baterías para el análisis de viabilidad

DOI: 10.55905/oelv23n4-173

Receipt of originals: 3/28/2025

Acceptance for publication: 4/18/2025

Cesar Lucas Caetano de Abreu Lopes

Especialista em Processos

Instituição: Universidade Federal de Goiás

Endereço: Aparecida de Goiânia, Goiás, Brasil

E-mail: cesar.lopes.ind@gmail.com

Lorrany Guilherme Santos

Mestre em Engenharia de Produção

Instituição: Universidade Federal de Goiás

Endereço: Aparecida de Goiânia, Goiás, Brasil

E-mail: lorranyguilherme@ufg.br

Fernando Nunes Belchior

Doutor em Sistemas Elétricos de Potência - Qualidade da Energia Elétrica

Instituição: Universidade Federal de Uberlândia

Endereço: Aparecida de Goiânia, Goiás, Brasil

E-mail: fnbelchior@ufg.br

Maico Roris Severino

Doutor em Engenharia de Produção

Instituição: Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR)

Endereço: Aparecida de Goiânia, Goiás, Brasil

E-mail: maico_severino@ufg.br

Marcelo Nunes Fonseca

Doutor em Engenharia de Produção

Instituição: Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

Endereço: Aparecida de Goiânia, Goiás, Brasil

E-mail: marcelo_nunes@ufg.br

RESUMO

Nas últimas décadas, o aumento da preocupação ambiental tem levado as indústrias a adotarem estratégias mais sustentáveis, como o *Green Supply Chain Management*, com destaque para o *Green Manufacturing*. Inserido nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade da implantação de uma usina fotovoltaica para suprir a demanda energética de uma fábrica do ramo do agronegócio localizada no centro-oeste brasileiro, motivado pela necessidade de aliar eficiência energética e sustentabilidade ambiental. A pesquisa foi estruturada em cinco etapas: fundamentação teórica, definição do objeto de estudo, dimensionamento de bancos de baterias, dimensionamento do sistema fotovoltaico e análise de viabilidade econômica. Foram desenvolvidos quatro cenários de teste, sendo um *on-grid* e três *off-grid*, estes últimos considerando o uso de bancos de baterias. Os resultados indicaram que apenas o cenário *on-grid* apresentou VPL positivo, TIR superior ao custo de capital adotado e *payback* de 20 anos, enquanto os cenários *off-grid* demandaram investimentos elevados em tecnologias de armazenamento, justificando novos estudos com alternativas tecnológicas para avaliar sua viabilidade econômica.

Palavras-chave: Banco de Baterias, Sistemas Fotovoltaicos, Viabilidade Econômica, Sustentabilidade Industrial, Gestão Sustentável da Cadeia de Suprimentos.

ABSTRACT

In recent decades, the growing environmental concern has led industries to adopt more sustainable strategies, such as Green Supply Chain Management, with an emphasis on Green Manufacturing. Within this context, the present study aims to analyze the feasibility of implementing a photovoltaic power plant to meet the energy demand of an agribusiness factory located in the Central-West region of Brazil, motivated by the need to combine energy efficiency with environmental sustainability. The research was structured into five stages: theoretical foundation, definition of the object of study, sizing of battery banks, sizing of the photovoltaic system, and economic feasibility analysis. Four test scenarios were developed—one on-grid and three off-grid—the latter considering the use of battery banks. The results showed that only the on-grid scenario presented a positive Net Present Value (NPV), an Internal Rate of Return (IRR) higher than the adopted cost of capital, and a payback period of 20 years. In contrast, the off-grid scenarios required high investments in storage technologies, thus encouraging further studies with alternative technologies to assess their economic feasibility.

Keywords: Battery Bank, Photovoltaic Systems, Economic Viability, Industrial Sustainability, Green Supply Chain Management.

RESUMEN

En las últimas décadas, el creciente interés por el medio ambiente ha llevado a las industrias a adoptar estrategias más sostenibles, como el *Green Supply Chain Management*, con énfasis en el *Green Manufacturing*. En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo analizar la viabilidad de implantar una planta de energía fotovoltaica para satisfacer la demanda energética de una fábrica del sector agroindustrial

ubicada en la región Centro-Oeste de Brasil, motivado por la necesidad de aliar eficiencia energética y sostenibilidad ambiental. La investigación fue estructurada en cinco etapas: fundamentación teórica, definición del objeto de estudio, dimensionamiento de bancos de baterías, dimensionamiento del sistema fotovoltaico y análisis de viabilidad económica. Se desarrollaron cuatro escenarios de prueba, uno on-grid y tres off-grid, estos últimos considerando el uso de bancos de baterías. Los resultados indicaron que solo el escenario on-grid presentó un Valor Presente Neto (VPN) positivo, una Tasa Interna de Retorno (TIR) superior al costo de capital adoptado y un período de recuperación de la inversión de 20 años. En cambio, los escenarios off-grid requirieron elevadas inversiones en tecnologías de almacenamiento, lo que justifica la realización de nuevos estudios con alternativas tecnológicas para evaluar su viabilidad económica.

Palabras clave: Banco de Baterías, Sistemas Fotovoltaicos, Viabilidad Económica, Sostenibilidad Industrial, Gestión Verde de la Cadena de Suministro.

1 INTRODUÇÃO

As indústrias geram muitos impactos ambientais ao longo do ciclo produtivo, desde a extração de matérias-primas até o descarte de resíduos, destacando a necessidade de práticas sustentáveis para manter a competitividade empresarial (González-Benito; González-Benito, 2006). Nesse contexto, destaca-se a Gestão Sustentável da Cadeia de Suprimentos (GSCM), que integra critérios ambientais em todas as etapas da cadeia, sendo a gestão ambiental interna e a logística reversa as práticas mais adotadas no Brasil (Jabbour e Souza, 2015). A implementação da GSCM enfrenta desafios, sobretudo quando envolve múltiplas empresas. A GSCM se baseia na Green Manufacturing (GM), que busca eficiência no uso de recursos e redução de impactos ambientais (Joshi, 2012), com destaque para o uso de energias renováveis.

Apesar da predominância da energia hidrelétrica no Brasil (PENA, 2019), esta também possui impactos ambientais. A energia solar, por meio de módulos fotovoltaicos, surge como alternativa limpa, mas sua viabilidade depende de fatores climáticos e custos com armazenamento (LUTHRA et al., 2016; Trepani e Millar, 2016; Silveira, Tuna e Lamas, 2013). A escassez de estudos sobre GSCM e GM no Brasil evidencia a necessidade de aprofundamento do tema. Assim, o objetivo do trabalho é analisar a viabilidade da implantação de uma usina fotovoltaica em uma fábrica do setor do

agronegócio no centro-oeste brasileiro, incluindo a análise econômica de diferentes cenários off-grid com uso de banco de baterias, por meio da elaboração de fluxos de caixa e cálculo dos indicadores VPL e TIR.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SUSTENTABILIDADE

Ao longo dos anos, os debates sobre questões climáticas e ambientais têm se intensificado, destacando-se as fontes tradicionais de energia, como carvão, petróleo e gás natural, como principais responsáveis pelo aquecimento global (LUTHRA et al., 2016). Diante disso, empresas passaram a se preocupar com seu desempenho sustentável, adotando práticas como a GSCM, que, segundo Zheng (2010), prioriza aspectos ambientais em atividades como compra, projeto, produção sustentável (Green Manufacturing), entre outras.

A produção sustentável envolve logística reversa, reaproveitamento de materiais e redução de resíduos, sendo a fonte de energia utilizada um fator relevante de impacto ambiental. A queima de combustíveis fósseis gera gases de efeito estufa (GEE), como CO, CO₂ e CH₄, considerados grandes contribuintes para o aquecimento global.

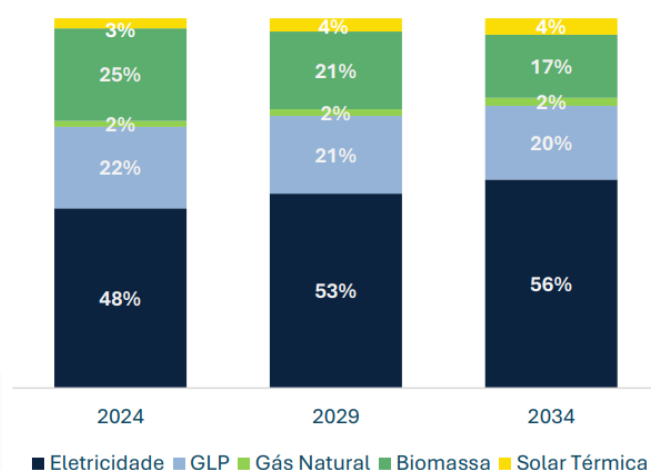
Com base nesse cenário, o Brasil atualizou suas metas climáticas: redução de 48% das emissões de GEE até 2025 e de 53% até 2030, com uma nova meta entre 59% e 67% até 2035, conforme anunciado na COP29 (BRASIL, 2023; 2024). Para alcançar essas metas, medidas vêm sendo adotadas no setor energético, com destaque para a implementação de fontes renováveis, como a energia eólica e solar.

2.2 CONSUMO ENERGÉTICO NO BRASIL

De acordo com Torrini et al. (2016), o consumo energético tornou-se uma variável relevante diante das recorrentes crises no setor de energia no Brasil, sendo influenciado diretamente pela distribuição e crescimento populacional. O Plano Decenal de Expansão

de Energia 2034 (PDE 2034) projeta que, até 2027, a população brasileira atinja cerca de 221,1 milhões de habitantes, um aumento de 6,3% em relação a 2017, e que o número de residências cresça 16,68% no mesmo período. Em 2019, a eletricidade representava 61% do consumo energético residencial, com previsão de alcançar 69% até 2030. Para o período de 2024 a 2034, o PDE 2034 estima um crescimento populacional médio de 0,5% ao ano, atingindo 228,8 milhões de pessoas, e um aumento médio de 1,4% ao ano no número de domicílios, chegando a 87,1 milhões. Nesse contexto, a participação da energia elétrica no consumo final residencial deve passar de 48% em 2024 para 56% em 2034.

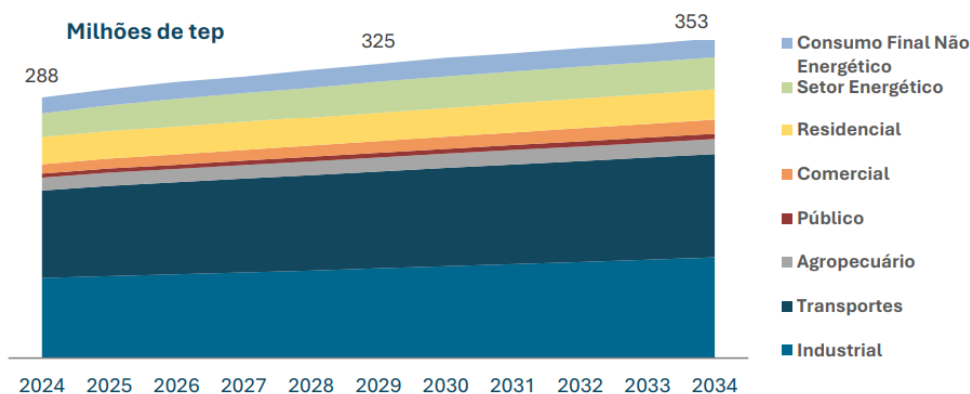
Figura 1. Consumo final percentual de energia no setor residencial



Fonte: Elaboração EPE

O fato é que consumo de eletricidade no Brasil não se limita ao setor residencial. Conforme apresentado na Figura 2, entre 2024 e 2034 todos os setores deverão registrar aumento no consumo de energia, impulsionados por um cenário de crescimento econômico. O setor de transportes se destaca com a maior participação, passando de 32% para 33% do consumo final no período. Já a indústria se consolida como um dos principais vetores de expansão da demanda energética, com um crescimento médio anual de 2,7% no seu valor adicionado.

Figura 2. Consumo final de energia por setor



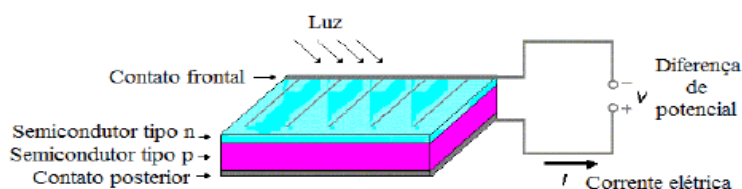
Fonte: Elaboração EPE

A partir deste cenário do consumo energético no Brasil, entende-se como necessário maior foco para as fontes de energias consideradas renováveis e com menor nível de agressão ao meio ambiente.

2.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Diante da crescente demanda por eletricidade, impulsionada por fatores econômicos, demográficos e pela transição energética, torna-se essencial alinhar a expansão da oferta com a sustentabilidade ambiental. Nesse contexto, Queiroz et al. (2016) destacam a importância de novos investimentos em energia renovável para atender à demanda sem agravar o aquecimento global. Entre as fontes renováveis, destaca-se a energia solar fotovoltaica (FV), que converte a luz solar em corrente elétrica por meio de placas compostas por fotocélulas de materiais semicondutores como arsenieto de gálio e silício cristalino (Cabral e Vieira, 2012). De acordo com Silveira, Tuna e Lamas (2013), um sistema fotovoltaico inclui módulos, controladores de carga e, quando necessário, baterias. A geração de energia ocorre pela incidência de luz sobre as células semicondutoras, gerando tensão e corrente elétrica conforme explicado por Rezende e Pereira (2018).

Figura 3. Efeito fotovoltaico em uma célula

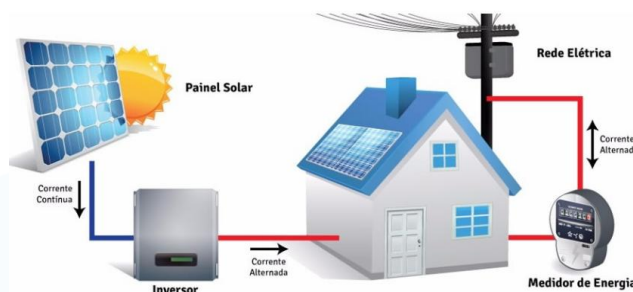


Fonte: (HAUSCHILD, 2006)

O aumento da demanda global por energia fotovoltaica, aliado ao crescente interesse por práticas sustentáveis, tem impulsionado o desenvolvimento e a implantação de tecnologias baseadas em painéis solares (FLOWERS et al., 2016). Esse avanço projeta maior incentivo à pesquisa, com o objetivo de tornar os painéis mais acessíveis economicamente. Apesar dos altos custos iniciais, os sistemas fotovoltaicos oferecem vantagens como alta confiabilidade, baixa necessidade de manutenção e operação (SILVEIRA, TUNA e LAMAS, 2013). Além disso, a energia solar é limpa e disponível para uso (HU e MONROY, 2012), sendo considerada simples, confiável, econômica e ambientalmente amigável (AMEEN, PASUPULETI e KHATIB, 2015).

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em on-grid e off-grid. O sistema on-grid é conectado à rede elétrica, permitindo que o excedente de energia seja injetado na rede e convertido em créditos com validade de até três anos (BOSO, 2015). Já o sistema off-grid é independente da rede elétrica, exigindo baterias para armazenar a energia gerada pelas placas fotovoltaicas. Dado o papel essencial das baterias em sistemas off-grid, torna-se necessária a definição de cálculos específicos para o correto dimensionamento dos bancos de baterias.

Figura 4. Sistema *On-Grid*



Fonte: Ecomais, 2019

Figura 5. Sistema *Off-Grid*



Fonte: Ecomais, 2019

2.4 BATERIAS

Segundo Rezende e Pereira (2018), um dos desafios da geração fotovoltaica está na não coincidência entre os momentos de geração e consumo de energia, devido à variabilidade da irradiação solar, o que torna o uso de baterias uma alternativa viável. Cada tipo de bateria possui diferentes parâmetros elétricos, influenciados por seu tamanho, forma de ligação e composição. Entre as principais variáveis a considerar estão: corrente elétrica (Ampère - A), tensão elétrica (Volts - V) e capacidade (Ampère-hora - Ah) (OLIVEIRA, 2019).

O dimensionamento dos bancos de baterias pode ser feito com associações em série ou paralelo. A associação em série aumenta a tensão do sistema, enquanto a associação em paralelo fornece maior corrente mantendo a mesma tensão (VILLALVA; GAZOLI, 2012). O número de baterias em série é determinado pela relação entre a tensão

desejada no banco de baterias e a tensão individual das baterias utilizadas, conforme descrito na Equação 2.5.1.

$$N_{BS} = \frac{V_{banco}}{V_{bateria}} \quad (2.4.1)$$

onde:

NBS = Número de baterias ligadas em série;

Vbanco = Tensão desejada do banco de baterias (V);

Vbateria = Tensão das baterias utilizadas para compor o banco (V).

Posteriormente, deve-se medir a quantidade de energia que o banco deve armazenar, Equação 2.5.2, para isto relaciona-se o quantitativo de energia consumido pelo sistema a ser alimentado e um fator conhecido como profundidade de descarga. Conforme Rezende e Pereira (2018), um valor a ser considerado para a profundidade é de 20% uma vez que se busca maximizar a vida útil da mesma.

$$E_A = \frac{E_c}{PD} \quad (2.4.2)$$

onde:

EA = Energia a ser armazenada no banco (Wh);

Ec = Energia a ser consumida (Wh);

PD = Profundidade de descarga (20%).

Ainda, tem-se a capacidade do banco (Cbanco), calculada por meio da relação entre EA e a tensão do banco (Vbanco), conforme a equação 2.5.3:

$$C_{\text{banco}} = \frac{Ea}{V_{\text{banco}}} \quad (2.4.3)$$

Por fim, deve-se determinar o tipo e a bateria a ser empregado no sistema levando em consideração a capacidade da bateria empregada (C_{bateria}). Assim, relacionando este fator com a C_{banco} temos o número de baterias em paralelo (NBP), conforme Equação 2.5.4:

$$N_{\text{BP}} = \frac{C_{\text{banco}}}{C_{\text{bateria}}} \quad (2.4.4)$$

Para ter exatamente o número de baterias empregadas no banco, basta multiplicar o número de baterias em série pelo número de baterias em paralelo, resultando, portanto, na matriz de baterias.

Após, dimensionamento do projeto como um todo, abordando tanto o sistema fotovoltaico quanto o banco de baterias e os equipamentos necessários para instalação, é necessário análise sólida para verificar a viabilidade econômica, o que irá apoiar a decisão de execução ou não do projeto.

2.5 ANÁLISE DE INVESTIMENTO EM ENERGIA RENOVÁVEL

Ao se tratar de qualquer projeto, indicadores são utilizados para mensurar o desempenho antes, durante e depois de seu desenvolvimento. Um dos principais fatores seria estudar a viabilidade econômica do projeto, para auxílio na tomada de decisão de se realmente é rentável o projeto. Filho e Kopittke (2011) definiram os seguintes indicadores:

- a) Taxa Mínima de Atratividade (TMA): É a taxa utilizada nos comparativos dos indicadores e o seu valor é baseado no custo de oportunidade.
- b) Valor Presente Líquido (VPL): É a soma algébrica de todas as receitas e despesas transcorridas no tempo do projeto, descontadas à data inicial segundo a TMA;

- c) Taxa Interna de Retorno (TIR): É uma taxa de desconto que iguala o valor presente das receitas e o investimento inicial;
- d) *Payback*: Esse índice fornece o tempo necessário para que um investimento seja recuperado.

Rosa e Gonçalves (2017) definem os principais indicadores econômicos da seguinte forma: o VPL avalia o impacto do valor futuro dos investimentos ao trazer os fluxos de caixa futuros ao presente e subtrair o investimento inicial, sendo o projeto atrativo se o resultado for positivo; a TMA representa a taxa mínima esperada para compensar o risco; e a TIR é a taxa que zera o valor presente do fluxo de caixa, sendo o projeto rentável quando superior à TMA. Arnold e Crack (2004) apresentam o WACC, ou custo médio ponderado de capital, como um método de fácil implementação e apresentação. Casarotto e Kopittke (2010) destacam que os investimentos podem ser financiados, exigindo amortização do valor adquirido com juros, caracterizando os chamados “sistemas de amortização”. Os dois principais são o SAC e o PRICE. No SAC, as prestações são decrescentes, compostas por juros e capital, sendo a parcela de capital constante e os juros decrescentes (SANTOS et al., 2007; Vieira Sobrinho, 1997). Já no PRICE, as prestações são constantes, com amortizações crescentes e juros decrescentes, sem abatimento dos juros pagos no saldo devedor (Nogueira, 2002).

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados os métodos: Definição do objeto de estudo através da revisão da literatura, elaboração de modelo e estudo de cenários. Este capítulo é dividido em quatro seções, uma para cada etapa apresentada.

3.1 DEFINIR OBJETO DE ESTUDO

Com base na revisão da literatura e nas lacunas identificadas, a pesquisa foi direcionada à área do Green Manufacturing, com foco no consumo energético. O desafio inicial foi identificar uma empresa parceira disposta a fornecer dados de consumo e tarifas

energéticas. Após tentativas com empresas dos setores de cartonagem, moveleiro e alimentício, foi firmada parceria com uma empresa do ramo de agronegócio, que cedeu os dados necessários, solicitando anonimato.

3.2 DIMENSIONAR BANCO DE BATERIAS

Com base na demanda energética nos horários de ponta, foram definidos três cenários: média anual, maior consumo e menor consumo. Utilizando as equações da seção 2.4, foram calculados os bancos de baterias necessários para cada cenário, considerando fornecimento de energia no horário de ponta.

3.3 DIMENSIONAR SISTEMA FOTOVOLTAICO

Foi incluído um quarto cenário “full”, que considera a demanda energética total. O dimensionamento das usinas fotovoltaicas foi baseado na capacidade dos bancos de baterias (cenários 1 a 3) e na demanda média anual (cenário full), utilizando o valor médio de horas solares da região conforme Cresesb (2019), e planilhas em Excel para simular os cenários.

3.4 ANALISAR A VIABILIDADE DO PROJETO

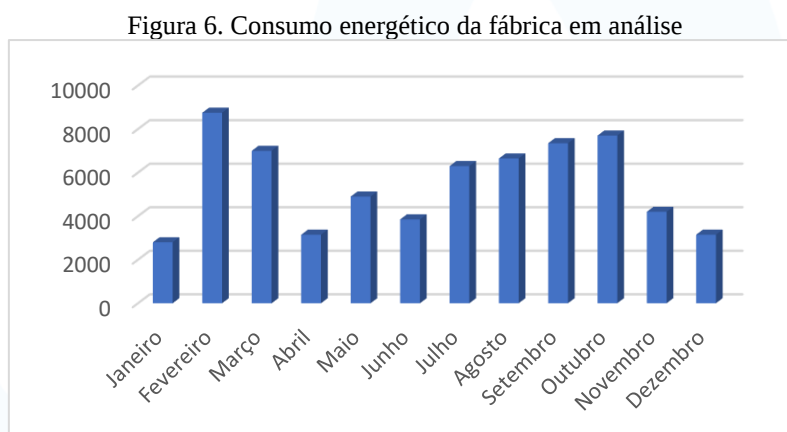
A viabilidade econômica foi analisada por meio dos indicadores VPL e TIR gerados automaticamente em planilhas Excel, além do cálculo do tempo de retorno com diferentes formas de financiamento e uso de capital próprio. Para cenários inviáveis, aplicou-se análise de sensibilidade a fim de determinar reduções de custo da tecnologia ou aumentos tarifários que tornariam o projeto viável.

Por fim, foi realizada análise de risco com Simulação de Monte Carlo (SMC), conforme Metropolis e Ulam (2008), utilizando os softwares Crystall Ball e Excel 2020. Foram definidas variáveis para análise de sensibilidade e, com 10.000 iterações, identificou-se a probabilidade de VPL negativo como medida de risco.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DIMENSIONAMENTO DO BANCO DE BATERIAS

O dimensionamento do banco de baterias consiste na definição da quantidade de baterias conectadas em série e paralelo para atender à capacidade de armazenamento necessária, considerando corrente, voltagem e profundidade especificadas. O processo inicia-se com a determinação da demanda energética da fábrica nos horários de ponta, conforme apresentado na Figura 6.



Fonte: Os autores

Com valores que apresentam grande oscilação ao longo do ano devido período de safra e entressafra produtiva, foi decidido ampliar a análise em 3 cenários diferentes, nomeando-os em 1, 2 e 3, com relação ao menor valor de consumo anual, a média anual e o maior valor, respectivamente, os quais são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Demanda energética para cada cenário do tipo *off-grid*

Cenário	Demanda (kWh)
1	2800,00
2	5323,08
3	8750,00

Fonte: Os autores

Para todos os cenários *off-grid*, foram consideradas baterias da marca Victron, com carga padrão de 300 Ah e tensão de 12V. Ainda, foi considerado no projeto uma profundidade de 20% de descarga, visando alcançar o melhor desempenho da vida útil das baterias. Ainda, estipulou-se a tensão desejada do banco de baterias em 48 V.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados alcançados para o banco de baterias em cada cenário do tipo *off-grid*, baseado na profundidade estabelecido:

Tabela 2. Resultados do dimensionamento do banco de baterias por cenário

Tópico	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Demanda Diária (kWh)	122,73	237,41	393,18
Energia Banco (kWh)	613,64	1187,06	1965,91
Carga Banco (Ah)	12784,09	24730,48	40956,44
Nº Série	4	4	4
Nº Paralelo	43	83	137
Total baterias	172	332	548

Fonte: Os autores

4.2 DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Tratando-se de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, o objetivo principal é apresentar a potência efetiva do sistema em kWp, respeitando todas as variáveis condicionantes do sistema, como rendimento das placas, inversor e horas solar diária da região.

Nesta fase do trabalho, partiu-se para um projeto que considera 4 cenários, os três citados no tópico anterior relacionados a sistemas do tipo *off-grid*, e agora também o cenário 4, caracterizado pela demanda energética média da fábrica no horário de ponta e fora de ponta, 49.261,54 kWh. Ressalta-se que devido ao ramo da empresa atuante as características de corrosão ou de deterioração do sistema foram desconsideradas a título de análise.

A respeito dos painéis solares, foram considerados painéis da marca BYD, modelo BYD 335PHK-36 POLICRISTALINO 144 CEL, com potência de 335 W. Com respeito ao inversor, foi considerado da marca VICTRON e modelo VICTRON QUA481030010 QUATTRO 10.000VA 48V/230V SENOIAL PURA+CARREGADOR.

Com relação ao rendimento das placas, a Tabela 6 apresenta a faixa de perdas possíveis para cada item apresentado e o valor adotado pelos autores do trabalho, resumindo, portanto, uma redução de 21% da eficiência, trabalhando, portanto, com 79%.

Ainda, com relação a disponibilidade de horas solar na região em que a fábrica está localizada, utilizou-se a média anual de 5,14 horas por dia conforme Cresesb (2019). Contudo, deste valor foi deduzido 21%, perdas consideradas na Tabela 3, apresentando um valor efetivo considerado de 4,07 horas disponíveis por dia.

Tabela 3. Redução de eficiência

Tipo	Faixa	Valor
Perdas por Temperatura	7 a 18 %	11,5
Incompatibilidade Elétrica	1 a 2 %	1,5
Acúmulo de sujeira	1 a 8 %	2
Cabeamento CC	0,5 a 1%	1
Cabeamento CA	0,5 a 1%	1
Inversor	2,5 a 5 %	4

Fonte: Os autores

Ao dividir o consumo mensal considerado por cada cenário, pela quantidade de dias no mês e pelas horas corrigidas disponíveis diárias, tem-se a potência corrigida, conforme Tabela 4:

Tabela 4. Potência calculada por cenário

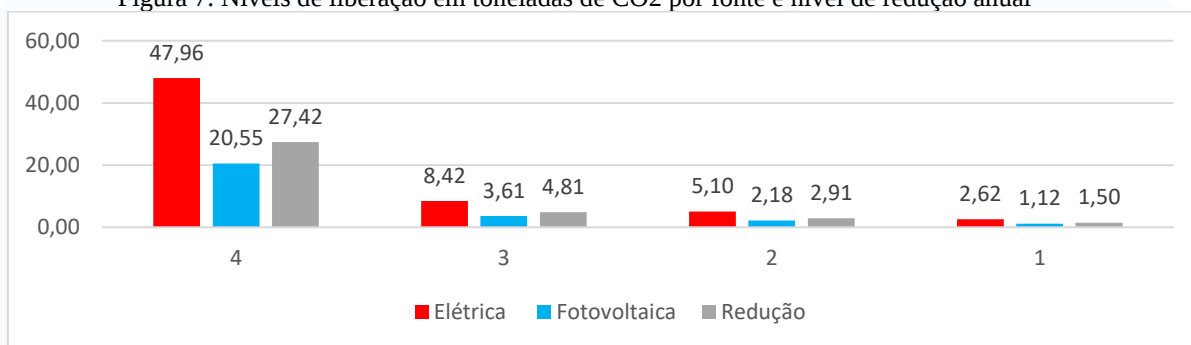
Cenário	Potência (kWp)
1	30,150
2	58,625
3	96,815
4	551,410

Fonte: Os autores

Os principais benefícios da implantação dos sistemas propostos em cada cenário incluem a redução das emissões de CO₂, por evitar o uso de energia convencional de fonte hidrelétrica, e a diminuição ou isenção nas tarifas de energia. Segundo o MCTIC (2020), em 2020 o fator de emissão era de 0,0617 toneladas de CO₂ por MWh gerado no Sistema Interligado Nacional, enquanto Oliveira et al. (2017) aponta que sistemas fotovoltaicos emitem 0,035 toneladas de CO₂ por MWh. Assim, a redução efetiva de emissões é obtida pela diferença entre esses valores, conforme ilustrado na Figura 7.

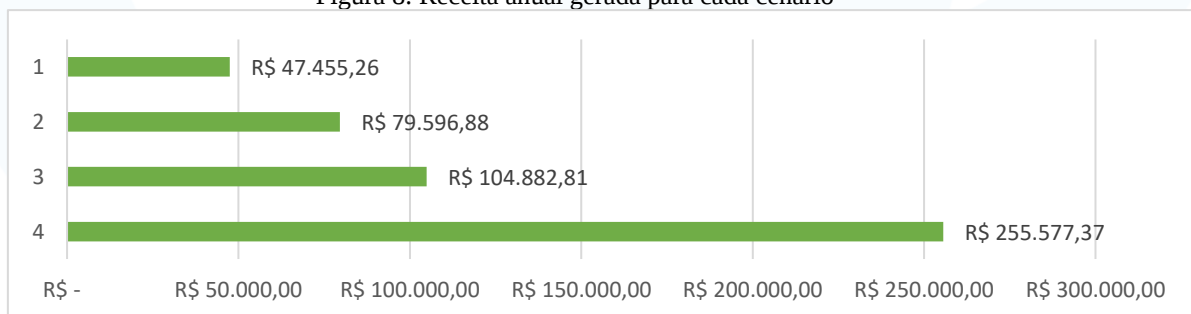
Quanto à redução de tarifas, a Figura 8 apresenta a economia mensal em cada cenário. No cenário off-grid, o valor original pago por kWh consumido foi de R\$ 1,48. Já no cenário on-grid, considera-se o abatimento da parcela mensal quando a geração é menor ou igual ao consumo, ou a geração de créditos junto à fornecedora quando a geração excede o consumo. Nesse caso, a tarifa fora de ponta considerada foi de R\$ 0,31 por kWh.

Figura 7. Níveis de liberação em toneladas de CO2 por fonte e nível de redução anual



Fonte: Os autores

Figura 8. Receita anual gerada para cada cenário



Fonte: Os autores

4.3 ANÁLISE DE VIABILIDADE DO PROJETO

Após o dimensionamento, a principal preocupação passa a ser a viabilidade do projeto, pois é ela que determinará se sua implementação é de fato satisfatória. A análise considera um horizonte de 25 anos, correspondente à vida útil do sistema fotovoltaico. Os investimentos estimados para cada cenário, apresentados na Tabela 5, incluem a substituição do inversor após 12 anos e a troca dos bancos de baterias a cada cinco anos.

Tabela 5. Relações de investimento por cenário proposto

Cenário	Potência (kWp)	Investimento	R\$/kWp
1	30,15	R\$ 639.929,25	R\$ 21.224,85
2	58,625	R\$ 1.549.479,17	R\$ 26.430,35
3	96,815	R\$ 2.257.812,50	R\$ 23.320,90
4	551,41	R\$ 2.167.633,82	R\$ 3.931,07

Fonte: Os autores

Observa-se que os cenários com uso de bancos de baterias apresentam taxa de investimento por kWp em média cinco vezes maior, evidenciando o elevado custo atual de sistemas off-grid. A análise de viabilidade considerou orçamentos reais para cada cenário, com custos de operação e manutenção de 3% a.a, depreciação de 4% a.a para o sistema fotovoltaico e 20% a.a para as baterias (ANEEL, 2019), alíquota de IRPJ e CSLL de 30%, redução de eficiência de 0,08% a.a e inflação tarifária de 4%. Utilizou-se alavancagem financeira com 100% de investimento financiado pelo BNDES a 7,5% a.a, modelo SAC e quitação em 10 anos. O payback ocorreu apenas no cenário 1, no ano 20; os cenários 2 e 3 não apresentaram retorno em 25 anos. Para avaliação mais robusta, adotou-se o WACC de 10,35% a.a (FONSECA, 2017) para cálculo de VPL e TIR, conforme Tabela 6.

Tabela 6. Indicadores do projeto

Cenário	VPL	TIR (a.a)
4	R\$ 109.389,64	11,66%
3	-R\$ 1.166.116,72	-2,55%
2	-R\$ 739.827,04	-1,43%
1	-R\$ 189.844,11	3,20%

Fonte: Os autores

A análise dos valores demonstrou que apenas o cenário 4 foi considerado viável, apresentando VPL positivo e TIR superior à TMA. Nos cenários off-grid, todos os VPLs foram negativos, indicando que não são investimentos vantajosos. Dentre esses, o cenário 1 teve o melhor desempenho, seguido pelos cenários 2 e 3, respectivamente. Essa diferença está possivelmente relacionada ao volume de baterias necessário, pois, embora o investimento por kWp tenha sido semelhante, a maior quantidade de energia a ser armazenada exigiu mais baterias, elevando os custos.

Pensando nisso, considera-se relevante obter respostas para o quanto a tecnologia relacionada a baterias deveria reduzir para que os cenários *off-grids* começassem a fazer sentido. Para tanto, tem-se a análise de sensibilidade com auxílio do *software* Excel na funcionalidade “teste de hipóteses”.

A primeira variável a ser analisada seria o investimento, como mencionado anteriormente. Portanto, na Tabela 7 apresenta-se o valor mínimo para o kWp do sistema para cada cenário onde o VPL do projeto se igualaria a 0, encontrando o ponto de equilíbrio.

Tabela 7. Valores mínimos do investimento para VPL igual a 0

Cenário	R\$/kWp	Investimento
1	R\$ 14.110,52	R\$ 425.432,20
2	R\$ 12.171,92	R\$ 713.579,03
3	R\$ 9.711,98	R\$ 940.265,19

Fonte: Os autores

Conforme os dados da Tabela 7, verifica-se a necessidade de redução de 33,52% do valor inicial de investimento proposto pelo fornecedor para o cenário 1, 53,95% para o cenário 2 e 58,36% para o cenário 3.

Pensando no valor da tarifa no horário de ponta, pode-se calcular o quanto deveria ser de custo mais elevado para que o sistema proposto atingisse o ponto de equilíbrio. Desta maneira, apresenta-se na Tabela 8 os dados das novas tarifas para cada cenário.

Tabela 8. Valores mínimos da tarifa para VPL igual a 0

Cenário	R\$/kWh
1	R\$ 2,23
2	R\$ 3,29
3	R\$ 3,84

Fonte: Os autores

De acordo com os dados apresentados na Tabela 8, verifica-se a necessidade de aumento da tarifa por kWh consumido pela fábrica em 50,68% para o cenário 1, 122,30% para o cenário 2 e de 159,46% para o cenário 3.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo propor simulações de dimensionamento de usinas fotovoltaicas para avaliar a viabilidade econômica de diferentes cenários. A pesquisa foi estruturada em estudo teórico, dimensionamento de bancos de baterias e sistemas fotovoltaicos, análise de ganhos e viabilidade econômica. Constatou-se uma dispersão na literatura sobre o tema, reforçando a importância da pesquisa para orientar estudos futuros. Entre os cenários avaliados, apenas o cenário 4 mostrou-se viável, com payback mais curto, VPL positivo de R\$109.389,64 e TIR de 12% ao ano, superior ao custo de capital. Os demais cenários apresentaram VPL negativo e TIR inferior à TMA, sendo inviáveis, embora o cenário 2 tenha alcançado payback dentro do prazo de análise. Foram calculadas reduções mínimas de investimento para viabilização dos cenários 1, 2 e 3, bem como os reajustes necessários na tarifa de energia. Diante disso, conclui-se que, nas condições atuais, os investimentos são inviáveis, mas o estudo contribui para identificar pontos de equilíbrio e fomentar futuras pesquisas e o uso de energias limpas, alinhadas às práticas de Green Manufacturing.

REFERÊNCIAS

AMEEN, A. M.; PASUPULETI, J.; KHATIB, T. Simplified performance models of photovoltaic/diesel generator/battery system considering typical control strategies. **Energy Conversion and Management**, v. 99, p. 313-325, 2015.

ARNOLD, T.; CRACK, T. F. Using the WACC to value real options. **Financial Analysts Journal**, v. 60, n. 6, p. 78-82, 2004.

BOSO, A. C. M. R.; GABRIEL, Camila Pires Cremasco; GABRIEL FILHO, Luís Roberto Almeida. Análise de custos dos sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid no brasil. **Revista Científica ANAP Brasil**, v. 8, n. 12, p. 57-66, 2015.

BRASIL. Em Baku, Brasil destaca meta de redução de 67% nas emissões de gases de efeito estufa até 2035. *Planalto*, 28 nov. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2024/11/em-baku-brasil-destaca-meta-de-reducao-de-67-nas-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-ate-2035>. Acesso em: 10 abr. 2025.

BRASIL. Governo amplia para 48% a meta de redução da emissão de gases de efeito estufa até 2025. Agência Gov, 26 set. 2023. Disponível em: <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202309/governo-amplia-para-48-a-meta-de-reducao-da-emissao-de-gases-de-efeito-estufa-ate-2025>. Acesso em: 10 abr. 2025.

CABRAL, I.; VIEIRA, R. Viabilidade econômica x viabilidade ambiental do uso de energia fotovoltaica no caso brasileiro: uma abordagem no período recente. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL**, 3., 2012. Anais [...]. [S.l.]: [s.n.], 2012.

CASAROTTO, N. F.; KOPITKE, B. H. **Análise de investimentos: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial**. 11. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

CRESESB – Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito. **Potencial solar – Sundata v 3.0**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>. Acesso em: abr. 2022.

ECOMASIS Efficient Energy. **Energia solar**. Disponível em: <http://ecomais.ind.br/energia-solar>. Acesso em: abr. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2034 – PDE 2034**. Brasília: Ministério de Minas e Energia / EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-804/topico-756/PDE2034_Aprovado.pdf. Acesso em: 10 abr. 2025.

FILHO, N. C.; KOPITTKKE, B. H. **Análise de investimentos: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial**. 11. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

FLOWERS, M. E. et al. Climate impacts on the cost of solar energy. **Energy Policy**, v. 94, p. 264-273, 2016.

FONSECA, M. N. **Proposta para configuração ótima de projetos híbridos isolados de geração de energia**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.

GONZÁLEZ-BENITO, J.; GONZÁLEZ-BENITO, Ó. A review of determinant factors of environmental proactivity. **Business Strategy and the environment**, v. 15, n. 2, p. 87-102, 2006.

HAUSCHILD, L. **Avaliação de estratégias de operação de sistemas híbridos fotovoltaico-eólico-diesel**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

HU, Yu; MONROY, Carlos Rodríguez. Chinese energy and climate policies after Durban: Save the Kyoto Protocol. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 5, p. 3243-3250, 2012.

JOSHI, A. **Green Manufacturing**. 2012. Disponível em: <http://pt.slideshare.net/ashwinbj/green-manufacturing-12678894>. Acesso em: abr. 2022.

LUTHRA, S. et al. Evaluating the enablers in solar power developments in the current scenario using fuzzy DEMATEL: An Indian perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 63, p. 379-397, 2016.

MCTIC – Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Fator médio – Inventários corporativos**. Disponível em: https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_corporativos.html. Acesso em: abr. 2022.

NOGUEIRA, J. J. M. **Tabela Price: da prova documental e precisa elucidação do seu anatocismo**. Campinas, SP: Editora Servanda, 2002.

OLIVEIRA, G. F. L. **Abastecimento de veículos elétricos considerando energia fotovoltaica**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.

OLIVEIRA, L. A. N. et al. Potencial de redução de CO₂ pelo uso de energia elétrica em motobombas utilizadas no processo de irrigação no município de Dona Euzébia - MG: um estudo comparativo das matrizes hidrelétricas e fotovoltaicas. In: **SIMPÓSIO DE**

ENGENHARIA DE PRODUÇÃO – SIENPRO, 1., 2017, Catalão. Anais [...]. Catalão: [s.n.], 2017.

QUEIROZ, Anderson Rodrigo et al. Climate change impacts in the energy supply of the Brazilian hydro-dominant power system. **Renewable energy**, v. 99, p. 379-389, 2016.

REZENDE, A. C. B.; PEREIRA, J. B. J. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico com backup de baterias para suprimento de um tanque resfriador de leite na ocorrência de rede elétrica convencional**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Goiás, 2018.

ROSA, G. R.; GONÇALVES, I. A. Estudo de viabilidade econômico-financeira da implantação de um sistema fotovoltaico conectado à rede convencional de energia: estudo de caso no centro administrativo de uma prefeitura municipal em SC. In: **CONGRESSO DE ADMINISTRAÇÃO, SOCIEDADE E INOVAÇÃO**, 10., 2017, Petrópolis. Anais [...]. Petrópolis: [s.n.], 2017.

SANTOS, E. D. et al. **Matemática financeira: uma abordagem contextual**. Londrina: UEL, 2007.

JABBOUR, A. B. L. S.; SOUZA, C. L. Oportunidades e desafios para lidar com as barreiras à adoção de práticas de green supply chain management: Guidelines à luz de um estudo de múltiplos casos no Brasil. **Gestão & Produção**, v. 22, n. 2, p. 295-310, 2015.

SILVEIRA, J. L.; TUNA, C. E.; QUEIROZ LAMAS, W. The need of subsidy for the implementation of photovoltaic solar energy as supporting of decentralized electrical power generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p. 133-141, 2013.

TORRINI, F. C. et al. Long term electricity consumption forecast in Brazil: a fuzzy logic approach. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 54, p. 18-27, 2016.

TRAPANI, K.; MILLAR, D. L. Floating photovoltaic arrays to power the mining industry: A case study for the McFaulds lake (Ring of Fire). **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 35, n. 3, p. 898-905, 2016.

VIEIRA SOBRINHO, J. D. **Matemática financeira**. São Paulo: Atlas, 1997.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Érica, 2012.

ZHENG, F. et al. Practices and research on green supply chain management in China and abroad. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON E-PRODUCT E-SERVICE AND E-ENTERTAINMENT (ICEEE)**, 2010, Henan. Proceedings. [S.l.]: [s.n.], 2010. p. 1-4.