

Viabilidade Econômica de Microrredes Baseadas em Sistemas de Armazenamento de Energia: Um Estudo de Caso no Instituto Federal de Goiás

Rafael Ribeiro de Carvalho Vaz
CEHTES

Centro de Excelência em Hidrogênio e
Tecnologias Energéticas Sustentáveis
Goiânia, Goiás, Brasil
engrafaelrcv@gmail.com

Fernando Nunes Belchior
Engenharia de Produção
Universidade Federal de Goiás - UFG
Goiânia, Goiás, Brasil
fnbelchior@ufg.br

Pedro José Abrão
Dep. IV - IFG – Campus Goiânia
Instituto Federal de Goiás
Goiânia, Goiás, Brasil
pedro.abrao@ifg.edu.br

Samuel Cesar Mota de Paula
Dep. IV - IFG – Campus Goiânia
Instituto Federal de Goiás
Goiânia, Goiás, Brasil
samuel.paula@ifg.edu.br

Sérgio Granato de Araújo
Escola de Engenharia Elétrica,
Mecânica e de Computação
Universidade Federal de Goiás - UFG
Goiânia, Goiás, Brasil
sergiogranato@ufg.br

Abstract— Este trabalho apresenta uma metodologia para o estudo de viabilidade econômica de microrredes (MRs) baseadas em sistemas de armazenamento de energia em baterias (SAEB) no modelo Zero-Grid, integradas ao mercado livre de energia. O estudo de caso realizado no campus Goiânia do Instituto Federal de Goiás (IFG-G) destaca os benefícios da implementação de MRs, incluindo redução de custos operacionais e aumento da resiliência energética. Foram analisados dois cenários: um com ampliação da geração fotovoltaica (Cenário 1) e outro sem ampliação (Cenário 2). O *payback* de ambos os cenários se manteve na faixa dos sistemas fotovoltaicos convencionais. Os resultados mostram que o Cenário 1 apresenta maior atratividade financeira, com menor período de retorno do investimento e melhores indicadores econômicos, como Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR). Além disso, o Cenário 1 demonstrou menor sensibilidade a variações no investimento inicial, reforçando sua viabilidade. Conclui-se que a adoção de MRs não só melhora a eficiência energética e a sustentabilidade ambiental, como também oferece uma solução robusta para os desafios relacionados à qualidade e à continuidade do fornecimento de energia elétrica. A metodologia e os resultados apresentados podem servir como modelo replicável para outras instituições, promovendo inovação tecnológica e incentivando a transição para um setor elétrico mais sustentável e resiliente.

Keywords—Microrredes, sistemas de armazenamento de energia, viabilidade econômica, mercado livre de energia, energia renovável.

I. INTRODUÇÃO

As microrredes (MRs) emergiram como uma solução inovadora em resposta à crescente demanda por fontes de energia mais resilientes e sustentáveis. A ideia de MRs remonta às primeiras redes elétricas do século XX, quando as comunidades locais utilizavam pequenos geradores para atender suas necessidades energéticas [1]. Com o avanço tecnológico e a expansão das redes de transmissão centralizadas, essas soluções locais foram gradualmente substituídas. No entanto, nos últimos anos, a crescente preocupação com a sustentabilidade, a resiliência energética, qualidade da energia elétrica (QEE) e a integração de fontes

renováveis trouxeram as MRs de volta ao foco como uma alternativa viável e eficiente [2].

Uma MR é definida como um sistema composto por um conjunto de cargas interconectadas e recursos de energia distribuída, como painéis solares, turbinas eólicas, baterias e geradores, operando dentro de limites elétricos claramente definidos [3]. Este sistema atua como uma única entidade controlável, capaz de se conectar e desconectar da rede principal. Isso permite que a MR funcione tanto em modo conectado quanto isolado, oferecendo flexibilidade e segurança energética. Além disso, as MRs promovem a criação de comunidades energéticas [4], onde a geração e o consumo de energia são geridos localmente, contribuindo para a eficiência energética e a sustentabilidade ambiental.

A QEE desempenha um papel central nas MRs, garantindo o fornecimento de energia confiável, estável e livre de distúrbios que possam comprometer os equipamentos conectados mesmo em situações em que o fornecimento principal de energia pela distribuidora fica indisponível [5]. Os sistemas de armazenamento de energia em baterias (SAEB) veem contribuindo para desenvolvimentos na área de gestão da energia, serviços ancilares, eficiência energética e QEE [6].

As MRs permitem maior integração de recursos energéticos distribuídos, incluindo sistemas autossuficientes (Zero-Grid), regulamentados no Brasil e isentos de análises de fluxo reverso de conexão [7]. Esses sistemas utilizando-se de SAEB, proporcionam flexibilidade no uso de fontes renováveis, como a energia solar. A energia gerada pode ser armazenada para utilização em horários estratégicos [8], atendendo aos limites estabelecidos pelas concessionárias.

Com a abertura do mercado de energia para consumidores do grupo A, esses consumidores encontram na adoção de MRs uma alternativa sustentável e eficiente ao uso de grupos geradores a diesel e mitigação dos custos com energia elétrica. Além disso, as MRs oferecem benefícios significativos em termos de qualidade de energia e indicadores de continuidade [9].

Muitas instituições de ensino do país, que atualmente são do grupo A, se enquadram como potenciais candidatas para a implantação de uma MR. Muitas dessas instituições têm problemas com QEE principalmente relacionada a indicadores de continuidade e nível de tensão [10].

Como aplicação de MR em instituições de ensino, o projeto de P&D ANEEL se destaca no cenário nacional com a implantação da MR MERGE – CampusGrid com um SAEB de 1MW/1,27MWh no campus da Unicamp [11].

Nesse contexto, este trabalho propõe uma metodologia para realização de estudo de viabilidade econômica para implantação de uma MR baseada em SAEB utilizando o modelo Zero-Grid com a migração para o mercado livre de energia para uso no horário de ponta e melhoria dos indicadores de continuidade em instituições de ensino.

O trabalho apresenta uma revisão do panorama regulatório atual para MRs e o Mercado livre de energia na seção II. Na seção III é realizado um estudo de caso tendo como base o campus do Instituto Federal de Goiás – Campus Goiânia (IFG-G). Também na seção III é apresentada o estudo de viabilidade econômica da solução por meio da apuração de indicadores econômicos como payback, VPL e TIR. Ao final, na seção IV, é apresentada a conclusão do estudo apontando como o modelo de MRs pode ser aplicação como uma alternativa para melhorias dos indicadores e otimização dos custos com energia elétrica em instituições de ensino.

II. PANORAMA REGULATÓRIO

A. Regulamentação para MRs

As regulamentações relacionadas às MRs ainda estão em desenvolvimento, exigindo maior atenção dos formuladores de políticas e reguladores para consolidar seu papel no sistema elétrico moderno [12]. As MRs não possuem uma regulação no Brasil que especifica de maneira precisa a sua delimitação no mercado de energia, as possibilidades de implementação e os modelos de negócio permitidos.

Em âmbito nacional, houve um importante passo com publicação da NT nº 033/2022-SRD/ANEEL, que apresenta uma avaliação técnica de mais de 2.000 contribuições enviadas por 63 agentes e consumidores no período de 24/06 a 24/09/2021 sobre propostas de modelos regulatórios para inserção de recursos energéticos distribuídos, incluindo resposta da demanda, usinas virtuais (VPPs) e MRs [13].

De acordo com as contribuições, a regulação deveria estabelecer as características das MRs, os possíveis proprietários, as responsabilidades e os limites de atuação, bem como os serviços que poderiam ser prestados e os critérios estabelecidos para conexão à rede da distribuidora. Dado esse contexto, lista-se abaixo alguns desafios regulatórios relacionados a promoção das MRs.

- Atualmente, os consumidores do mercado regulado de energia só podem comprar energia da distribuidora. No modelo de MRs, a comercialização de energia poderia ser feita entre os participantes da microrrede; no entanto, não há previsão legal para essa prática.

- A prestação de serviços ancilares, como a redução de carga no horário de ponta, injeção de energia e controle de tensão, foi tema da consulta pública acima mencionada. De modo semelhante, ainda não se tem uma base legal para a remuneração desses serviços.
- A definição de quais os parâmetros técnicos e econômicos a ANEEL deveria regular sobre as MRs continua aberta. Deveriam ser seguidos os mesmos limites para o mercado cativo ou alguns seriam flexibilizados? São temas ainda abertos.
- A implantação de um modelo de tarifa dinâmica, como a tarifa hora-hora, pode oferecer benefícios importantes, entre eles, o fortalecimento das MRs. Esse modelo incentiva os consumidores a investir em tecnologias que viabilizem uma gestão energética mais eficiente, promovendo maior adesão a sistemas descentralizados e flexíveis. Assim, a tarifa dinâmica pode desempenhar um papel estratégico na criação de um ambiente propício para o avanço das MRs, fomentando a modernização do setor elétrico e a transição energética no país.

Em complemento, a RN nº 1.000/2021/ANEEL define procedimentos e condições gerais de fornecimento para dois tipos de sistemas de geração isolada: MIGDI (Microssistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica), para até 100 kW de geração com mais de uma UC; e SIGFI (Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente), para 45 a 180 kwh/mês por UC. Esses modelos de atendimento são voltados para áreas remotas, muitas vezes participantes do programa de universalização de energia, não sendo necessariamente aderentes ao modelo de MRs urbano ou semi-rural [14].

Dadas as vantagens que elas podem oferecer em um cenário de déficit de infraestrutura de rede elétrica, é essencial o desenvolvimento de políticas de incentivo e, principalmente, de um arcabouço regulatório para as MRs. Além disso, o estabelecimento de normas técnicas específicas para garantir a QEE dentro desses sistemas é imprescindível para fomentar a confiança nos projetos e assegurar a integração harmoniosa com a rede elétrica convencional.

B. Mercado livre de energia

A Portaria Normativa Nº 50/2022, publicada pelo Ministério de Minas e Energia (MME), estabelece diretrizes para a abertura gradual do mercado livre de energia elétrica no Brasil. Essa regulamentação permite que consumidores conectados em tensão igual ou superior a 1 kV, pertencentes ao Grupo A, migrem para o Ambiente de Contratação Livre (ACL), onde podem negociar diretamente com fornecedores e comercializadoras de energia [15].

Com essa portaria, o mercado livre se torna acessível a consumidores de menor porte em comparação aos grandes consumidores anteriormente elegíveis, ampliando as oportunidades de adesão e promovendo maior flexibilidade na escolha de fornecedores. Entre os consumidores que podem se enquadrar na Portaria estão aqueles pertencentes ao Grupo A, como indústrias, comércios, shopping centers, hospitais e grandes consumidores de energia em geral, desde que estejam conectados em média tensão ou superior.

Essa ampliação do acesso beneficia especialmente empresas interessadas em reduzir custos, adotar práticas mais sustentáveis, ou investir em tecnologias como sistemas Zero-

Grid e MRs, que podem operar de forma autônoma ou complementar, otimizando o consumo de energia e proporcionando maior independência da rede elétrica convencional. A Portaria também incentiva o uso de fontes renováveis, alinhando-se aos objetivos de transição energética e sustentabilidade do setor elétrico.

Com a migração para ACL o consumidor deixa de pagar a tarifa de energia da concessionária e demanda contratada e passa adquirir diretamente no mercado livre. O contrato de fornecimento de energia tem preços geralmente mais baixos e possuem mais flexibilidade no consumo e na demanda podendo ajustá-los a sua necessidade. Os consumidores que optam por fontes renováveis (incentivadas) podem ter isenção parcial de encargos. No entanto o consumidor ainda paga pelos custos de transmissão e distribuição (TUSD) e encargos e tributos [16].

III. ESTUDO DE CASO

A. Contextualização

O Instituto Federal de Goiás (IFG) possui atualmente 14 campus em funcionamento e o Instituto Federal Goiano possui 12 campus, localizados em várias cidades do estado de Goiás, incluindo o maior campus que é o de Goiânia (IFG). Várias dessas localidades estão presentes em regiões do estado com carência de infraestrutura de distribuição de energia elétrica como por exemplo na região de Campos Belos (IF Goiano) onde a Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) é da ordem de 43h [17].

O IFG-Campus Goiânia (IFG-G), com aproximadamente 5000 alunos, é o maior do estado de Goiás e oferece uma ampla gama de cursos técnicos, de graduação e pós-graduação. Está localizado no conjunto Ferroviário S3 e atualmente, não possui uma fonte alternativa de suprimento, ficando vulnerável a falhas na rede de distribuição. A Fig. 1 mostra os indicadores de continuidade apurados para o conjunto Ferroviário S3 no qual o campus está localizado.

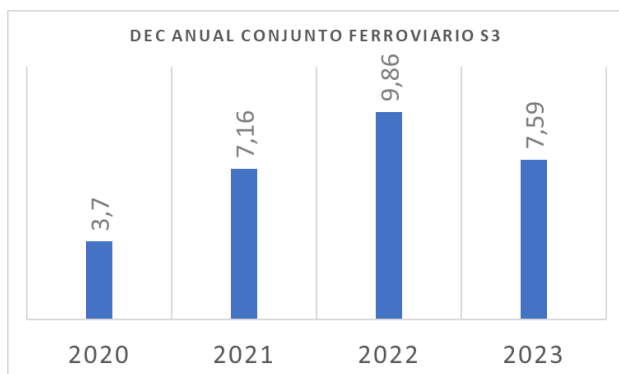


Fig. 1. DEC experimentada pelo IFG-G [17]. (elaborado pelo autor)

Pela análise da Fig. 1 nota-se que o conjunto tem apresentado duração equivalente de interrupção no fornecimento de energia na média de aproximadamente 8,2h desde 2021. Esse valor é bastante expressivo considerando a natureza do IFG que além do ensino também realiza pesquisas em áreas como a química, que necessitam do

fornecimento de energia confiável para o bom andamento delas.

Além disso, o campus enfrenta altos custos de energia no horário de ponta, quando a tarifa chega a ser seis vezes mais cara. Esse cenário também é comum em outros campi do estado.

Para mitigar esses problemas, propõe-se a implementação de um projeto piloto de MR no campus do IFG-G. A integração de sistemas solares com armazenamento de energia em baterias apresenta uma solução eficaz para melhorar significativamente a continuidade do fornecimento de energia, além de reduzir as emissões de carbono. Essa MR oferecerá uma fonte de energia confiável e sustentável, especialmente em situações de interrupções no suprimento, garantindo o funcionamento ininterrupto de um maior número de instalações no IFG-G.

Além disso, a adoção dessa tecnologia em todos os campi do IFG pode amplificar seus benefícios, promovendo a sustentabilidade ambiental em uma escala maior e aumentando a resiliência energética da instituição como um todo. Com a expansão das MRs para todos os campi, o IFG-G se posicionará como um líder em inovação e sustentabilidade no setor educacional, servindo como um modelo para outras instituições de ensino. Essa iniciativa não só reduzirá os custos operacionais a longo prazo, devido à diminuição da dependência de fontes de energia convencionais, mas também contribuirá significativamente para a formação de uma cultura de responsabilidade ambiental entre estudantes e funcionários.

Nesse sentido a MR para o IFG-G tem por objetivos:

- Reduzir o consumo de energia proveniente da distribuidora proporcionando redução dos gastos com energia elétrica. A MR pode ajudar a gerenciar a demanda de energia de forma mais eficaz, evitando tarifas elevadas durante os períodos de pico.
- Otimização a gestão da energia elétrica do campus tendo o suprimento de energia sendo realizado por um sistema de armazenamento de energia com baterias reduzindo as emissões de poluentes e CO2 evitando a adoção de geradores à diesel.
- Aumentar a resiliência da instalação ampliando as zonas que operam de forma ininterruptas em caso de falha no suprimento de energia da fonte principal.
- O projeto serve como um laboratório vivo para estudantes e pesquisadores, proporcionando uma plataforma para estudar tecnologias de energia renovável, armazenamento de energia, automação de rede e outras inovações.
- Servir como case para adoção da tecnologia de MRs nos demais campi do IF espalhados pelo Brasil.

B. Premissas

O estudo será realizado com a carga atual do IFG-Campus Goiânia (IFG-G), não levando em consideração futuras ampliações. Também não serão consideradas as instalações existentes, nesse sentido, qualquer impedimento técnico para a implementação das propostas deverá ser analisado antes da implantação do projeto elétrico definitivo.

Será contemplado no estudo a migração do IFG-G para o mercado livre de energia uma vez que ele é elegível pela portaria nº 50/2022, do Ministério de Minas e Energia. Destaca-se também que o IFG-G Campus Goiânia é atualmente enquadrado como minigeração distribuída nos moldes da Resolução Normativa 482/2012, atualizada pela 1.059/2023.

Nesta análise de *payback*, não é considerado o custo de oportunidade. Da mesma forma, não são incluídas projeções de inflação para o período, nem a possibilidade de financiamento privado para a execução do projeto, o que exclui a necessidade de análise de taxas de juros. Aplica-se ao estudo de viabilidade a metodologia de *payback* descontado, na qual os fluxos de caixa são trazidos a valor presente pela taxa de inflação. Além disso, não é considerado o aumento do preço do kWh no mercado cativo ao longo do período analisado.

Para que os cenários sejam considerados viáveis, estabelece-se que o valor de *payback* deve apresentar tempos de retornos semelhantes aos valores considerados para sistemas fotovoltaicos sem o uso de SAEB que se encontram entre 4 e 7 anos [18].

Durante uma interrupção no fornecimento de energia o sistema automaticamente comuta para o modo ilhado, todavia, o haverá indisponibilidade momentânea no fornecimento. A norma da concessionária prevê que o sistema de geração só pode atuar após o término do ciclo de religamento, caracterizando uma falta permanente na rede. Até que a falta seja dada como permanente, o sistema de gerenciamento da MR não deve atuar, sendo que, durante esse breve período (geralmente < 1min), a MR não deve suprir a demanda do IFG-G.

Uma vez que o alimentador se encontra em um conjunto onde o valor de DEC gira em torno de 8h, a autonomia de 3 horas para a MR é suficiente para reduzir o consumo na ponta e melhorar a resiliência da instalação. Além disso o fator de simultaneidade será adotado como 1 onde toda a energia gerada pela usina fotovoltaica (UFV) é utilizada para suprir a demanda do IFG-G.

C. Propostas

Implementar uma solução de MR que possa operar durante as 3 horas do período de ponta (18h às 21h) através do uso de baterias suprimindo a atual demanda do IFG-G. Além disso o IFG-G é migrado para ACL na modalidade Zero-Grid.

O consumo mensal estimado no horário de ponto da IFG-G é da ordem de 16.9 MWh e uma demanda de 244kW. Um SAEB para suprir a demanda no horário de pico deve ter uma capacidade de 732kWh. A Tabela I mostra as características do SAEB proposto.

TABELA I - CARACTERÍSTICAS DO SAEB PROPOSTO

ACL + MR (R\$/mês)	Cativo (R\$/mês)
Preço (R\$/kWh) ^a	1.900,00
Nível Máx/Min de carga	100-10%
Tipo de bateria	Li-ion
C-Rate	1
O&M	0.5% CAPEX a.a.

^a. Incluso custos com equipamento, troca de inversores, engenharia e instalação

A geração solar fotovoltaica é a fonte principal de energia da MR durante o período em que há irradiação solar disponível. Atualmente o IFG-G Campus Goiânia possui um sistema de geração fotovoltaica. Os sistemas instalados nos blocos 300, 400, 500 e Central tem inversores de potência ativa CA nominal de 30kW (modelo SIW500H ST030) e os módulos de potência elétrica máxima (Pmax) de 325W (modelo GCL-P6/72325). O valor total instalado de geração fotovoltaica é de 253 kWp. Para a aplicação da proposta os inversores tem que ser substituídos por inversores *off-grid* possibilitando a operação no modo ilhado.

A Fig. 2 mostra a composição da MR do IFG-G.

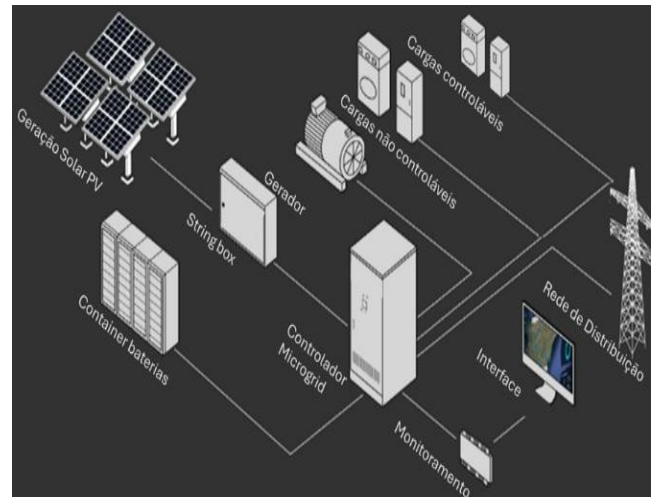


Fig. 2. Microrrede IFG - Campus Goiânia (IFG-G). (Adaptado de [19])

Como pode ser observado na Fig. 2 a MR do IFG-G é composta por uma usina de geração fotovoltaica e seu quadro de distribuição CC (*stringbox*), o SAEB, um controlador de MR responsável pelo carregamento do SAEB, monitoramento da rede, sincronismo dos inversores *off-grid* bem como o quadro de automação responsável pelo despacho e controle dos intertravamentos (comutação entre os modos conectado e ilhado) da MR e limitação da exportação de energia.

Nesse sentido tem-se dois cenários para o atendimento da MR. No cenário 1 a MR é autônoma e consegue, por meio da UFV, carregar o SAEB sem necessitar da rede de energia da concessionária. No cenário 2, o SAEB é carregado durante a madrugada onde a energia é mais barata. Para ambos os cenários deve-se realizar o estudo de viabilidade econômica optando-se por aquele de menor *payback*.

No cenário 1, a potência da UFV necessária segue a seguinte equação:

$$P = kWh_{dia} / (kWh/kWp) \quad (1)$$

onde P é a potência necessária para atendimento à demanda, kWh_{dia} é a demanda pretendida, kWh/kWp é a quantidade de energia gerada pela UFV por kWp. O valor típico para o Brasil na região Centro-Oeste é de 5,5kWh/kWp.

A demanda obtida para o SAEB utilizando (1) com o valor típico de kWh/kWp é de 133kWp, sendo assim, a potência atual da UFV do IFG-G é insuficiente para conseguir suprir a MR no período de 3h inteiramente com sua

própria geração, dependendo da concessionária para conseguir manter o SAEB carregado para o uso durante o horário de ponta. A Fig. 3 mostra a ampliação da UFV do IFG-G para atendimento da MR no cenário 1.



Fig. 3. Ampliação proposta da UFV do IFG-G para atender o cenário 1.

Na proposta de ampliação apresentada na Fig. 3 temos um aumento de 684 painéis fotovoltaicos de 440Wp. A escolha de painéis dessa potência foi devido a área reduzida de telhados disponíveis e que já se encontra preenchida pela instalação atual. No dimensionamento da UFV foi pensado de modo a cobrir futuras ampliações do IFG-G bem como aumento futuro da autonomia do SAEB. A UFV do IFG-G passa então a ter 542kWp. Nessa proposta o sistema de geração fotovoltaico conseguirá suprir a demanda do sistema e carregar o SAEB.

D. Análise econômica

Ao se realizar o estudo de migração para o mercado livre considerando que o consumo na ponta será suprido pelo SAEB não demandando energia da rede, pode-se chegar ao cálculo de economia entre o cenário livre e cativo.

Nesse caso tem-se uma redução da quantidade de energia necessária para carregar o banco de baterias que pode ser abatida do consumo do campus. Considerando a geração adicional de energia de 288 kWp x 5,5kWh/kWp/dia x 30 = 47.623,95kWh/mês. Descontando o valor da energia para carregar o SAEB $244\text{kW} \times 3\text{h} \times 30 = 21.960 \text{ kWh/mês}$ – 47.623,95kWh/mês = -25.663,95kWh de redução no consumo de energia do campus.

Já para o cenário 2 não há a ampliação da UFV. Nesse caso desloca-se o consumo do horário de ponta para o período da madrugada que possui uma tarifa de energia mais baixa, porém temos um acréscimo no consumo de energia para carregar o SAEB. Porém, para $244\text{kW} \times 3\text{h} \times 30 = 21.960 \text{ kWh/mês}$. A Tabela II mostra os valores utilizados na simulação de migração para o ACL nos cenários 1 e 2.

A Tabela III mostra os resultados da simulação de migração para o ACL + MR na modalidade Zero-Grid. Como pode ser visualizado, o valor pago de energia no cenário 1 com a migração é de R\$26.495,00 por mês enquanto que no cenário

2 esse valor é de R\$40.807,00 por mês. A diferença dos cenários com aumento de geração fotovoltaica e sem o aumento é de 30% ou R\$171.744,00 por ano.

TABELA II - TARIFA DE ENERGIA BASE DO ESTUDO

Distribuidora	Equatorial GO	Equatorial GO
Subgrupo	A4	A4
THS	Verde	Verde Livre Incentivada 50%
Horario de Ponta	18h às 21h	18h às 21h
PIS/COFINS	5%	5%
ICMS	18%	18%
TUSD-D Ponta	R\$ -	R\$ -
TUSD-D Fora Ponta	R\$ 25,22	R\$ 12,61
TUSD-E Ponta	R\$ 1.571,74	R\$ 834,79
TUSD-E Fora Ponta	R\$ 97,83	R\$ 97,83
TE Ponta	R\$ 421,04	R\$ -
TE Fora Ponta	R\$ 268,50	R\$ -
Tarifa Bandeira Amarela	R\$ 18,85	
Tarifa Bandeira Vermelha I	R\$ 44,63	
Tarifa Bandeira Vermelha II	R\$ 78,77	
Esc. Hidrica	R\$ 4,13	R\$ 4,13
Conta COVID	R\$ 10,14	R\$ 10,14
Preço Energia Livre	R\$ -	R\$ 195,50
Custos Associados	R\$ -	R\$ 38,57

TABELA III - ECONOMIA COM ENERGIA ELÉTRICA

Proposta	Comparativo de gastos com energia elétrica		
	ACL + MR (R\$/mês)	Cativo (R\$/mês)	Economia Bandeira Patamar 2 (R\$/mês)
1	26.495,00	74.044,00	47.549,00 (-64%)
2	40.807,00	74.044,00	33.237,00 (-42%)

Uma vez verificados os potências de economia com as propostas dos cenários 1 e 2, devemos realizar a análise de indicadores econômicos que nos permitam tomar a decisão entre qual cenário seguir. Para tanto será realizado a análise de *payback* descontado bem como dos indicadores de Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR)

Para as análises considera-se uma taxa de inflação fixa de 5%. Esse valor é condizente com os índices projetados pelas agências especializadas [20]. O valor do investimento para aquisição do armazenamento por baterias é de R\$1.900,00 por kWh para sistemas com porte de 200 a 400 kWh. O valor para o sistema fotovoltaico é de R\$2.250,00/kWp. Sendo assim para a proposta de aquisição do sistema de armazenamento e acréscimo da usina fotovoltaica como na Tabela IV.

TABELA IV - CUSTOS DOS EQUIPAMENTOS

Cenários	Equipamento	Tamanho	Valor investimento (R\$/mês)
1	SAEB	732kWh	R\$ 1.390.800,00
	Aumento UFV	288kWp	R\$ 648.000,00
2	SAEB	732kWh	R\$ 1.390.800,00

Como pode ser observado na Tabela IV, no cenário 1 o valor do investimento em equipamento é maior. Os valores de investimento para ambas as propostas são apresentados na Tabela V.

TABELA V - INVESTIMENTO POR CENÁRIO E TEMPO DE RETORNO DO INVESTIMENTO - PAYBACK

Proposta	Investimento	Payback
1	R\$ 2.038.800,00	5 anos
2	R\$ 1.390.800,00	5,5 anos

Como pode ser visualizado Tabela V os tempos de retorno de investimento são bastante parecidos para os dois cenários, todavia o tempo de retorno é menor na proposta 1. Nesse sentido precisamos de mais indicadores econômicos que nos permitam tomar a decisão. Uma das análises possíveis é o VPL e a TIR. A mostra os valores de VPL e TIR para as propostas 1 e 2.

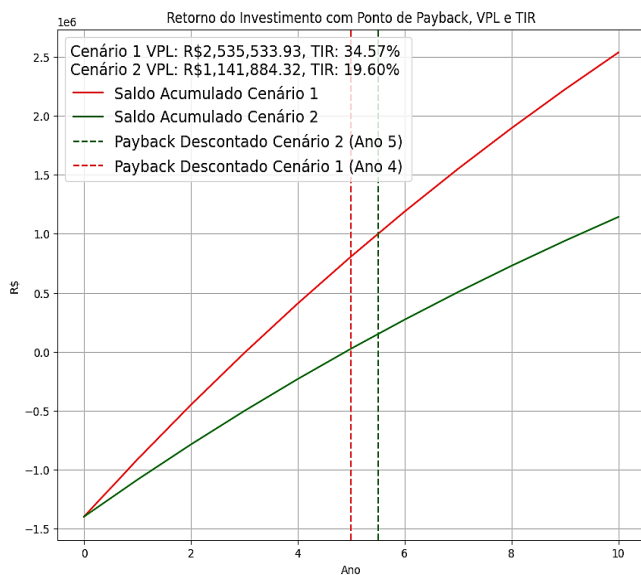


Fig. 4. Retorno do investimento com ponto de payback, VPL e TIR para os cenários 1 e 2.

Como pode ser visualizado na Fig. 4 o VPL das duas propostas é positivo o que indica viabilidade do investimento, todavia o VPL do cenário 1 é 120% maior do que no cenário 2. Além disso, a TIR é 76% maior no cenário 1 do que no cenário 2.

Como métrica de segurança do investimento podemos realizar a análise de sensibilidade. Para tanto podemos variar o valor do investimento inicial e verificar como se comportam os indicadores econômicos. A mostra a análise de sensibilidade do payback em relação ao investimento inicial entre os cenários.

A Fig. 5 mostra que o Cenário 1 é menos sensível ao investimento inicial do tempo de retorno do investimento que o Cenário 2 apresentando menor taxa de variação a medida que o valor do investimento inicial aumenta. Nesse sentido, podemos concluir que o cenário 1 é mais atrativo financeiramente do que o cenário 2.

Outra análise de sensibilidade do investimento é em relação a variação na taxa de inflação. A Fig. 6 mostra o resultado na análise de sensibilidade do VPL em relação a taxa de inflação para o Cenário 1.

Os resultados apresentados na Fig. 6 mostram que o VPL é positivo mesmo com a taxa de desconto 3 vezes maior. O valor do VPL em relação ao valor de referência do estudo varia de +40% para a menor taxa de inflação a -70% para a maior taxa de inflação. Essa variação indica que mesmo a taxa de desconto variando em 3 vezes, o valor do VPL reduziu a uma taxa menor de 70%.

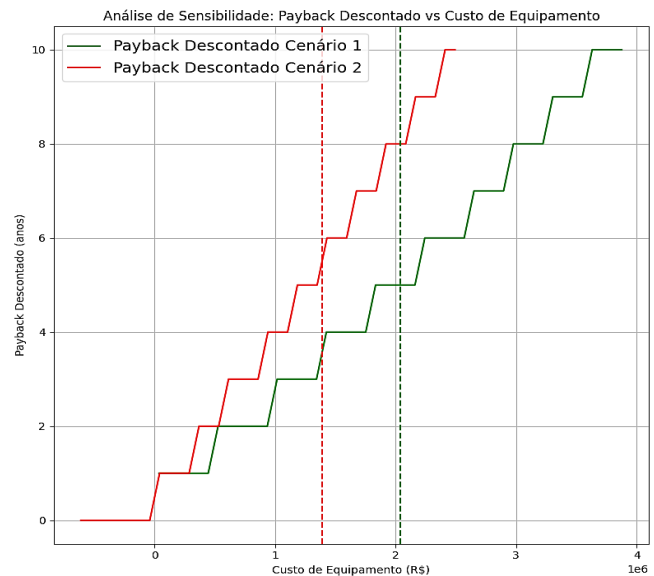


Fig. 5. Tempo de retorno do investimento em relação ao investimento inicial.

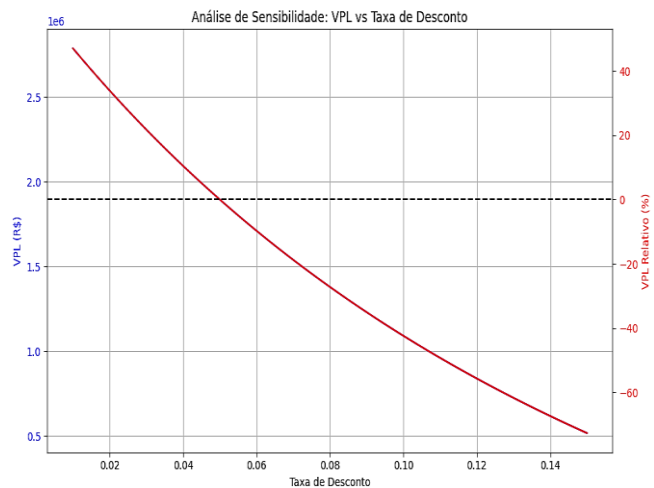


Fig. 6. Análise de sensibilidade VPL em relação a taxa de desconto - Cenário 1.

IV. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma metodologia para estudo de viabilidade econômica de MRs baseadas em SAEB, com foco na modalidade Zero-Grid e no mercado livre de energia. O estudo de caso realizado no campus Goiânia do Instituto Federal de Goiás demonstrou como a implementação de uma MR pode contribuir significativamente para a redução de custos operacionais e a melhoria da resiliência energética da instituição.

De acordo com a premissa do tempo de retorno do investimento se manter entre 4 e 7 anos, ambos os cenários se mostravam viáveis em termos do *payback*. A dos demais indicadores econômicos apontou que o cenário com ampliação da geração fotovoltaica (cenário 1) oferece maior viabilidade financeira, com um tempo de retorno do investimento reduzido e melhores indicadores econômicos, como VPL e TIR, em comparação ao cenário sem ampliação (cenário 2). Além disso, a sensibilidade do investimento inicial mostrou que o cenário 1 é menos suscetível a variações nos custos de implantação, reforçando sua atratividade.

Cabe destacar ainda que o modelo de MR baseado em SAEB, em comparação ao uso de geradores diesel na ponta, possui vantagens do ponto de vista operacional. Nesse modelo não é necessário contratos de gestão de combustível para os geradores o que facilita a implantação desses sistemas em instituições de ensino no país.

Os resultados obtidos evidenciam que a adoção de microrredes não apenas contribui para a eficiência energética e sustentabilidade ambiental, mas também oferece uma solução robusta para instituições de ensino que enfrentam desafios relacionados à qualidade e continuidade do fornecimento de energia elétrica.

Portanto, a implantação de microrredes no contexto de instituições como o IFG-G pode servir como um modelo replicável para outras instituições no Brasil, promovendo inovação tecnológica e incentivando a transição para um setor elétrico mais sustentável e resiliente.

Para trabalhos futuros recomenda-se a análise de cenários econômicos prospectivos, incorporando variáveis como taxas de juros, variações no preço da energia elétrica, obsolescência tecnológica, e flutuações na oferta e demanda de geração distribuída. Tais incertezas e desafios podem ser modelados por meio de simulações estocásticas, como o método de Monte Carlo [21], permitindo uma abordagem mais realista e robusta da viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos diante de possíveis instabilidades de mercado e avanços tecnológicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do projeto Centro de Excelência em Hidrogênio e Tecnologias Energéticas Sustentáveis (CEHTES)/ Universidade Federal de Goiás (UFG)/Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), do Instituto Federal de Goiás (IFG) – Campus Goiânia e da Secretaria Geral do Governo de Goiás (SGG).

REFERÊNCIAS

- [1] Roosa, S.A. (Ed.). (2020). *Fundamentals of Microgrids: Development and Implementation* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003082408>
- [2] Ericson, Sean, Grue, Nicholas, Hotchkiss, Eliza, and Brown, Maxwell. *Applications of Measuring and Valuing Resilience in Energy Systems*. United States: N. p., 2023. Web. doi:10.2172/1999383.
- [3] Department of Energy (DOE). (2014). *Microgrid Definitions and Applications*. DOE Publications.
- [4] International Energy Agency (IEA). (2020). *Energy Communities and Microgrids*. IEA Reports.
- [5] HIRSCH, A.; PARAG, Y.; GUERRERO, J. Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. "Renewable and Sustainable Energy Reviews", v. 90, p. 402–411, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.040>
- [6] MME/EPE, Ministério de Minas e Energia do Brasil. Empresa de Pesquisa Energética: "Plano Decenal de Expansão de Energia 2031". Rio de Janeiro: EPE, 2022.
- [7] ANEEL, Ofício nº 0149/2022 – SRD/ANEEL. Disponível em < <https://energes.com.br/grid-zero/>>. Acesso em: 18/01/2025.
- [8] M. D. Teixeira, A. R. Aoki, C. U. Vila and M. A. Da Costa, "MRs como ferramenta na melhoria da qualidade da energia elétrica," 2023 XV Brazilian Conference on Quality of Power (CBQEE), São Luiz, Brazil, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/CBQEE59548.2023.10503986
- [9] ANEEL, RN nº 1.000/2021. Disponível em < <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf> >.
- [10] Barbosa, Daniel, et al. Qualidade da Energia Elétrica em Instituição de Ensino: Monitoramento e Mitigação, January 2016 DOI:10.20906/CPS/SBSE2016-0019 Conference: VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos
- [11] Mateus, F, Calixto A., Camargo L. Unicamp and CPFL inaugurate micro-power grid on the Barão Geraldo campus Disponível em: <https://unicamp.br/en/noticias/2024/11/22/unicamp-e-cpfl-inauguram-microrrede-de-energia-no-campus-de-barao-geraldo/>
- [12] Assis, F.A.; Coelho, F.C.R.; Castro, J.F.C.; Donadon, A.R.; Roncolatto, R.A.; Rosas, P.A.C.; Andrade, V.E.M.S.; Bento, R.G.; Silva, L.C.P.; Cypriano, J.G.I.; et al. Assessment of Regulatory and Market Challenges in the Economic Feasibility of a Nanogrid: A Brazilian Case. *Energies* 2024, 17, 341. <https://doi.org/10.3390/en17020341>
- [13] ANEEL, Nota Técnica nº 0033/2022-SRD/ANEEL. Processo: 48500.002655/2021-41. Análise das contribuições recebidas na Tomada de Subsídios no 11/2021 sobre propostas de modelos regulatórios para a inserção de recursos energéticos distribuídos, incluindo resposta da demanda, usinas virtuais e MRs.
- [14] ANEEL, Sistemas Isolados e com Fontes Intermitentes, Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/distribuicao/sistemas-isolados-e-com-fontes-intermitentes>
- [15] MME, Portaria Normativa Nº 50/2022 - Ministério de Minas e Energia (MME). Disponível em <https://in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-normativa-n-50/gm/mme-de-27-de-setembro-de-2022-432279937>
- [16] Heloísa Pereira Burin, Flavio Sanson Fogliatto, Juliana Hsuan, The electricity market in Brazil: A multilevel perspective of sector agents for liberalization to residential consumers, *Energy for Sustainable Development*, Volume 76, 2023, 101289, ISSN 0973-0826, <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.101289>.
- [17] Dados Abertos Aneel, Indicadores Coletivos de Continuidade (DEC e FEC) Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/indicadores-coletivos-de-continuidade-dec-e-fec>
- [18] ABSOLAR, Energia solar em casa leva de 4 a 7 anos para dar retorno; entenda, 2022. Disponível em: [ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica](https://www.absolar.org.br/associacao-brasileira-de-energia-solar-fotovoltaica)
- [19] Rosenpowered, 1MW solar power plant deep cycle lithium ion batteries energy storage. Disponível em: <https://rosenpowered.com/product/1mw-solar-power-plant-deep-cycle-lithium-ion-batteries-energy-storage/>
- [20] Trading Economics, Disponível em: [Brasil - Taxa de Inflação | 1980-2025 Dados | 2026-2027 Previsão](https://tradingeconomics.com/brasil/taxa-de-inflacao)
- [21] MÁRQUEZ, Juan F.; GIL, M. I. M.; DOMINGUEZ, E. A.; MARTÍNEZ, C. G. Economic risk assessment based on Monte Carlo simulation in photovoltaic-based energy communities. *Heliyon*, v. 10, n. 4, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235248472400862X> Acesso em: 7 abr. 2025.