

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA PARA INSERÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM UMA INDÚSTRIA BRASILEIRA¹

José Fárlei Olivera Lima – jose.farlei@hotmail.com

Patrício Rodolfo Impinnisi – rodolfo@lactec.com.br

Resumo. Este trabalho discute uma alternativa metodológica para estudo da redução do custo da energia elétrica em uma empresa do setor industrial brasileiro a partir de uma análise de viabilidade técnico-econômica, a qual depende de fatores como custo dos componentes, legislação e avanços tecnológicos. Estudos recentes mostram que a análise técnico-econômica tem se tornado cada vez mais favorável para o aproveitamento de energias renováveis, especialmente para consumidores residenciais, mas que ainda há desafios a serem superados no caso de cenários com armazenamento. O estudo analisou a viabilidade técnico-econômica de instalar um sistema híbrido de geração de energia elétrica, composto por painéis fotovoltaicos e armazenamento por baterias, em uma indústria farmacêutica de dispositivos médicos. Foi comparado, aplicando simulação no software Homer Pro, o contrato atual da empresa no mercado livre com outras tarifas da concessionária, e verificado que o contrato atual é menos favorável para a instalação do sistema alternativo devido ao custo da energia ser menor que a tarifa da distribuidora. A partir dos resultados foi identificada a opção mais viável como sendo um sistema híbrido composto pela rede elétrica com contrato atual com adição de 3.200 kW de energia fotovoltaica instalada e conversor de corrente, e indicado que o sistema é viável tanto técnica quanto economicamente, sem a instalação de sistema de armazenamento. Contudo, o payback simples próximo à 8 anos pode ser considerado longo, o que pode dificultar sua implantação na prática a depender das políticas de cada empresa. O estudo sugere, a partir do teste de hipóteses baseadas na condição do 'e se' pela análise de sensibilidade do software, que com o barateamento das tecnologias de painéis fotovoltaicos, assim como o aumento da eficiência destes e a variabilidade do preço das tarifas de energia, a implantação de microgeração distribuída nas indústrias brasileiras pode ser melhor viabilizada.

Palavras-chave: Geração fotovoltaica, Armazenamento de energia, Tarifação binômica.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem-se observado cada vez mais estudos, desenvolvimentos e discussões em torno da busca por formas (alternativas) para redução do custo da energia elétrica (LIU et al., 2019). Atualmente, perante um possível cenário de crescimento da demanda, a procura por soluções que permitam garantir o fornecimento de energia elétrica se tornou um dos focos das grandes empresas. Esta procura para garantir o fornecimento pode incluir (e inclui) sistemas de geração que utilizam combustíveis fósseis, mas há um movimento acentuado para evitar os combustíveis fósseis e utilizar sistemas baseados na geração de energia a partir de fontes renováveis (YANG; SUN, 2019). Neste sentido, esta tendência tem que ser compatível com a procura das empresas para se tornarem mais eficientes, mais competitivas e sustentáveis. Em outras palavras, a implementação de um sistema de geração de energia a partir de fontes renováveis, com ou sem armazenamento deverá ser técnica e economicamente viável. Esta viabilidade técnico-econômica depende de vários fatores e cenários.

Nos cenários em que não se utiliza o armazenamento (injeção direta de energia), além dos custos dos painéis fotovoltaicos, inversores e outros componentes, a legislação, que determina as regras para esta aplicação, pode ter um impacto importante na viabilidade econômica. Todos estes fatores têm um caráter dinâmico e demandam atualizações dos estudos de viabilidade, por exemplo, em 06 de janeiro de 2022 foi publicada a Lei nº 14.300/2022 que institui o Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída de Energia, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS) (BRASIL, 2022) o que tem impacto direto nestes estudos de viabilidade. Paralelamente, nos cenários que incluem sistemas de geração fotovoltaica com armazenamento de energia, além da legislação e dos custos dos componentes já mencionados há que considerar os avanços nas tecnologias de armazenamento e as quedas de preços devidas aos ganhos em volume de produção.

Dentre todas as tecnologias utilizadas para o armazenamento de energia ligadas ao aproveitamento de fontes de energia renováveis, as baterias se destacam pela sua modularidade e capacidade de apresentar soluções relativamente simples para demandas de poucos kW/kWh até casos de centenas de MW/MWh (ENFORMER, 2022). Por esse motivo atualmente o armazenamento de energia a base de baterias é um dos mais utilizados

ILACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento



(SANDIA, 2022). Dentre todas as tecnologias de baterias disponíveis, as mais utilizadas para armazenamento de energia são as já consideradas tradicionais baterias de íons de lítio e as de chumbo-ácido (KAMIVA, 2021). Outras tecnologias de baterias que também são utilizadas, mas em menor escala, são as baterias de fluxo e as baterias de chumbo-carbono (conhecidas como baterias de chumbo-ácido avançadas) (BOWEN et al., 2021).

Esta pesquisa traz uma visão detalhada das possibilidades de ganhos técnico-financeiros a partir da redução da energia elétrica consumida da rede da concessionária ao longo do ano, assim como avaliar o potencial de eficiência energética que pode ser obtido a partir do diagnóstico global da empresa versus a solução apresentada incluindo os possíveis cenários de viabilidade futura.

2. ESTUDO BIBLIGRÁFICO

Plantas industriais são compostas por diversos equipamentos com diferentes consumos de energia elétrica e cada um opera com diversas características de regime. O perfil de consumo de energia de uma planta fabril se dá pelo olhar geral do regime combinado de todos seus equipamentos. Alguns destes podem operar em regimes não uniformes, com intermitência diária ou horária, a depender do planejamento de produção. Devido a todas essas possibilidades as demandas de energia elétrica estão em constante mudança com forte correlação entre a potência consumida e os volumes em produção no processo industrial. O perfil de consumo inerente de processos industriais tem sido estudado em diversas fábricas, buscando sua otimização e redução de custos para aumento da eficiência operacional e ganho em competitividade (MACHALEK; POWELL, 2019).

A partir de um perfil de demanda (potência em operação) é possível estudar e dimensionar sistemas de geração de energia elétrica para atendimento de tal demanda. Sendo que uma das opções de tecnologia de geração de energia são os painéis fotovoltaicos que demandam o devido dimensionamento da capacidade de geração de energia elétrica e dados de irradiação solar na posição geográfica em que se pretende instalar o sistema.

Sistemas fotovoltaicos possuem algumas limitações em função das condições climáticas da região onde serão aplicadas, além de serem um sistema de geração de energia inerentemente intermitente. Entretanto, ao instalar um sistema de armazenamento de energia combinado a este tipo de geração pode-se obter um modelo apropriado para mitigar essa intermitência. Devido ao tipo de material e tecnologias aplicadas, os custos dos sistemas de geração de energia fotovoltaicos ainda são relativamente altos, o que limita a popularização e disseminação desta. Mas, a fim de promover maior compreensão e visualizar os benefícios deste tipo de sistema, é necessário estudar a viabilidade e eficiência destes em termos econômicos para cada aplicação (YANG; SUN, 2019).

Fu e Remo (2018) sugerem modelos e cenários para garantir o melhor desempenho e o menor custo. Um dos cenários se refere à instalação de um sistema fotovoltaico combinado a um sistema de armazenamento de energia ligado à rede concessionária e o outro cenário trata somente de um sistema individual de armazenamento de energia por baterias da tecnologia de íons de lítio ligado à rede concessionária.

Já Tahir et al (2021) apresentam um estudo de desenvolvimento e otimização de um sistema integrado híbrido para geração de energia, a partir da simulação no software HOMERPRO, para fornecimento de energia para uma área rural. Os autores explicam que um sistema híbrido pode ser composto de dois ou mais sistemas de geração e/ou armazenamento de energia. Para uma análise mais acurada da viabilidade foram realizadas simulações com diferentes cenários utilizando o software HOMER que modela e simula as diferentes condições para definir a melhor opção de sistema de alimentação e armazenamento, dado um perfil de carga.

Tahir et al. (2021), em sua pesquisa, consideraram o impacto do sistema de armazenamento de energia e concluiu que um dos grandes desafios para este sistema é o tamanho e espaço ocupado, visto que ainda se trata de sistemas grandes se se pretende armazenar uma quantidade satisfatória de energia. Um sistema de armazenamento de energia pode ser usado de duas formas, sendo uma para armazenar a energia que sobra da geração enquanto a demanda é menor que a oferta e a segunda é para compensar a intermitência da geração renovável, como o caso dos painéis fotovoltaicos e turbinas hidro cinéticas.

2

Na análise de sensibilidade para o sistema já identificado como sendo o melhor é possível avaliar o impacto de algumas mudanças em parâmetros como a intermitência da fonte de energia renovável, variações de demanda de carga, incidência solar etc. (TAHIR et al., 2021).

Tahir e colaboradores (2021) finalizam concluindo que após as diversas simulações a partir de diferentes cenários e estratégias realizadas com o software HOMER e posteriormente analisadas, a solução otimizada de sistema híbrido incluem 40 kW instalados em capacidade de energia fotovoltaica, 25 kW instalados para geração a partir de gerador de biomassa e duas turbinas hidrocínéticas, todos integrados a rede para gestão da demanda de acordo a necessidade. Este sistema atingiu 94% da demanda anual na pequena cidade do paquistão, a partir de onde o estudo foi realizado.

ZHU e colaboradores, (2018) também apresentam sua conclusão com a afirmativa de que a aplicação de sistemas de armazenagem de energia em locais onde exista uma variação dinâmica da tarifa da energia elétrica pode gerar um ganho significativo, quando da aplicação combinada de diferentes métodos, a depender da melhor condição do momento e custo. Isso pode ser aplicado de forma estratégica na implantação de sistemas similares, visto que cada vez mais as variações de preço da energia têm sido observadas dados os impactos de fatores externos.

A respeito das tecnologias de baterias, Zubi et.al (2018) concluem que de todas essas a de maior sucesso em eficiência é a de íons de lítio considerada a mais promissora para tal aplicação, isso porque o lítio não é tóxico, tem baixa densidade e é altamente eletropositivo. Por isso, segundo o autor, outros metais ou opções de armazenamento de energia elétrica não conseguem competir com o lítio. No caso do presente trabalho, isso não se aplica devido ao fato das baterias de íons de lítio serem importadas (dificultando a logística na manutenção destes sistemas, na substituição de peças, disponibilidade de sobressalentes no mercado, etc. como já mencionado) e pelo seu elevado custo comparado com a tecnologia de baterias de chumbo-ácido disponíveis no mercado nacional.

Em relação ao sistema de geração de energia por painéis fotovoltaicos, existe a limitação do espaço físico disponível além dos fatores econômicos. Das limitações físicas mais comuns tem-se a disponibilidade de área de telhado para instalação dos painéis, e dependendo do caso, esta limitação pode acarretar um baixo retorno econômico, inviabilizando o projeto. Assim para se ter uma visão completa da análise técnico financeira, primeiramente precisam ser analisados os gastos anuais com energia elétrica que poderão vir a se tornar o ganho do projeto. De fato existe uma correlação direta entre os ganhos potenciais anuais versus a potência nominal total dos painéis fotovoltaicos.

Adicionalmente, quando toda a energia produzida é consumida existe a compensação da energia adquirida da rede, assim os ganhos anuais são dados pelo custo da energia comprada, incluindo todas as taxas, dividido pela quantidade de unidades de energia consumidas pela carga (R\$/kWh). Já em relação à análise de retorno pela venda da energia produzida/armazenada, esta se refere aos ganhos resultantes da venda (ou compensação) da energia injetada na rede (KOSKELA et.al, 2019).

Sistemas de armazenamento de energia são mais comuns para aplicações na opção por energia mais barata em determinadas situações, por exemplo, em casos de variação de carga, para momentos de pico. Por exemplo, fazer a carga do sistema de armazenamento em momentos em que o custo da energia é mais barato e descarregar quando o custo é mais alto. Estes sistemas são utilizados em diversos nichos ou cenários com o principal objetivo de reduzir o custo da energia para operação industrial ou consumo doméstico. A expectativa é que os custos dessas tecnologias se reduzam cada vez mais no futuro o que iria facilitar a disseminação da tecnologia. Outra aplicação primária destes sistemas é em horários de ponta, onde o custo da energia da rede da concessionária aumenta consideravelmente. O sistema de armazenamento de energia por baterias pode tanto ser carregado diretamente pela rede em horários fora da ponta, como também por alguma outra fonte geradora, por exemplo, por fontes de energia renováveis, utilizando painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas, entre outros (VENKATARAMAN et.al, 2018).

Quando se fala em aplicações reais de tais tecnologias, para se encontrar uma solução ótima em termos técnicos e econômicos é importante considerar todo o contexto da instalação, incluindo o fornecimento de energia, seus custos, taxas, a demanda da carga e espaço disponível, para então avaliar o impacto de um potencial projeto neste sentido. Todos os fatores devem ser levados em conta para se obter a melhor análise econômica, como subsídios, diminuição de perdas de transmissão, ganhos na postergação de expansões da rede e a redução dos impactos causados ao meio ambiente, pelo uso de geração renovável de energia elétrica no local de consumo. Assim os estudos de avaliação econômica devem incluir o custo de instalação do sistema para aproveitamento da energia renovável e sua manutenção, possíveis trocas e qualquer outro custo decorrente da sua operação ao longo do tempo (LIU et.al, 2020).

Apesar dos estudos encontrados e analisados em relação à instalação de sistemas híbridos de geração e armazenamento, a relevância e contribuição deste estudo estão centradas na análise da aplicação em uma indústria Brasileira a partir de um modelo tarifário específico do país e do estado onde a empresa estudada está instalada. Haja visto que muitos dos estudos encontrados estão voltados para países no exterior, poucos abordam a especificidade do Brasil, sendo que somente foram encontrados alguns trabalhos de aplicação do software Homer Pro para análises voltadas a regiões remotas, ambientes rurais e instalações comerciais. Com isso, este trabalho aproxima este tipo de análise ao segmento industrial nacional considerando sua bi tarifação a partir de um estudo de caso com dados reais de uma indústria local.

3. MATERIAIS E MÉTODO

3.1 Materiais

Foram utilizados os seguintes materiais:

- a) *Software* para captura de dados de consumo: Gerenciador CCK
 - Aplicativo para o Gerenciamento do Sistema CCK.
 - i. Versão 8.18.12.1.
 - ii. CCK Automações Ltda.
- b) *Software* de modelagem e simulação: HOMER Pro®
 - Versão 3.147880.21077 (2017)

3.2 Método

O método utilizado no desenvolvimento deste trabalho foi a simulação computacional para análise de viabilidade econômico-financeira aplicada a um Estudo de Caso, onde a principal ferramenta foi o software Homer Pro a partir dos dados coletados da empresa Farmacêutica, objeto do estudo. Todas as etapas deste podem ser observadas nos passos a seguir:

O passo 1 consistiu na coleta de dados de consumo de energia (kWh), de 15 em 15 minutos, referentes ao ano de 2019 utilizando software CCK®. A demanda foi calculada a partir dos dados de consumo (kWh), sendo a razão do consumo de 15 minutos pela fração de tempo (0,25 horas) para se obter o kW, isso porque os dados existentes para demanda estão em escala diária, o que impede a obtenção do perfil hora-a-hora;

No passo 2 foi estudado o contrato vigente atualmente e suas características, tal como tipo de tarifa, custos, limites contratados, multas, tempo de vigência e outros;

No passo 3 foi feito um estudo de componentes existentes no mercado quanto às tecnologias potenciais a serem aplicadas, seus custos e características operacionais;

No passo 4 foi analisada a área disponível para instalação dos painéis fotovoltaicos;

O passo 5 foi para a definição das simulações: sendo 3 simulações em condições reais de preço de energia e tecnologias, variando somente a característica de contrato;

No passo 6 são apresentadas as simulações considerando o contrato A4 azul no Mercado livre, A4 azul da concessionária Copel Distribuidora e A4 verde da concessionária Copel Distribuidora;

No passo 7 executou-se a simulação da análise de sensibilidade com os parâmetros extrapolados para identificação do seu impacto no resultado final do estudo e assim determinar sua estabilidade (em relação aos parâmetros avaliados);

O passo 8 consistiu na análise dos resultados e na discussão das simulações;

Finalmente, no passo 9 foram, apresentadas as conclusões.

4. ESTUDO DE CASO

O objeto do presente estudo é uma planta fabril média, filial de uma empresa farmacêutica multinacional americana de dispositivos médicos de grande porte, instalada na cidade industrial de Curitiba no Paraná, Brasil.

Este estudo de caso tem por objetivo levantar informações que poderão ser utilizadas para a criação de um sumário executivo que possa ser utilizado como parte de uma justificativa de um projeto real de instalação de um sistema de geração de energia fotovoltaico, com ou sem um sistema de armazenamento de energia elétrica (a base de baterias) para a gestão energética da empresa, visando a redução de custos.

O principal intuito é a redução dos custos da energia em horário de ponta e fora de ponta; mas outros cenários também foram simulados para identificar a melhor configuração e determinar sua sensibilidade aos componentes do sistema.

4

4.1 Contratos e suas definições de base

A Fig. 1 apresenta toda a categorização das modalidades tarifárias e discrimina as particularidades de cada uma. Dentro das subdivisões verde e azul, para tarifas dos grupos de alta tensão percebe-se que as tarifas de demanda e de consumo estão discriminadas.



Figura 1 - Modalidades de tarifas

Com base nas definições e caracterizações mencionadas, a Tab. 1 apresenta os parâmetros do contrato do objeto de estudo desta dissertação, referentes ao ano de 2022.

Tabela 1 - Parâmetros de contrato

Parâmetros	Contrato
Tensão	13,8 KV
Demanda Horo-sazonal (potência KW) contratada	3500 KW (na ponta); 3600 kw (fora de ponta)
Consumo de energia (KWh) contratado	1.620 MWh +/- 10% por mês
Preço da energia consumida (Copel - TUSD)	R\$ 0,1231 por KWh
Preço da energia consumida (Cemig Mercado Livre - TE)	R\$ 0,1917 por KWh
Tarifa demanda Fora de Ponta	R\$ 12,7168 por KW
Tarifa demanda na Ponta	R\$ 26,8777 por KW
Grupo	Azul
Tarifa horária	A4
Horário de ponta	De 18:01h a 21:00h

Ainda que atualmente está vigente o contrato na tarifa azul, este estudo pretende apresentar uma simulação para o contrato de tarifa verde e analisar as diferenças, na prática, entre os dois modelos tarifários. Para isso foram utilizados dados das Fig. 2 e 3, tarifas aplicadas ao grupo A4 atualmente, dentro de 2 simulações distintas quanto ao esquema tarifário.

A Tab. 1 não apresenta preços diferentes para o kWh entre o período de ponta e fora de ponta devido à vigência do contrato com o mercado livre. Desta forma o valor do kWh consumido é o mesmo dentro e fora da ponta e é somado e composto pelo custo do mercado livre (Cemig) e da taxa cobrada pela concessionária para transmissão (Copel).

É importante esclarecer que o método utilizado (simulações com o *software* Homer Pro) não permite a adição de multas em caso da ultrapassagem dos limites contratados para a demanda, ou seja, no caso da demanda consumida ser superior à contratada (3600 kW), o *software* não considera a aplicação de multas. O que o *software* faz é impedir o consumo de energia a partir da rede quando os valores contratados são excedidos. Além disso, nas simulações foram incluídos 3 níveis de contrato sendo estes 4500 kW, 3600 kW e 3000 kW para o pior caso fora da ponta. No contrato vigente na empresa, a multa por exceder os valores do contrato é a cobrança do dobro do preço por kW contratado para cada kW excedido, dentro e fora de ponta.

As tarifas de energia (TE) se referem à energia consumida, ou seja, o custo do kWh utilizado. Já a tarifa de uso do sistema de distribuição (TUSD) se divide em 2, a de consumo, que se refere ao kWh de energia e a de demanda contratada, que está relacionada ao kW de potência.



Figura 2 - Tarifas aplicadas ao contrato A4 Verde



Figura 3 - Tarifas aplicadas ao contrato A4 Azul

No presente momento a empresa farmacêutica, objeto deste estudo, possui um contrato de energia junto ao mercado livre. Desta forma, ela faz parte de um grupo de empresas privadas sem vínculo com as concessionárias de energia do estado, o que garante a ela um preço de energia menor que o praticado atualmente pela empresa concessionária local. Logo as tarifas apresentadas na Fig. 3 não correspondem com a situação atual da empresa. Portanto, para a simulação A4 azul do mercado livre foram utilizados os preços atuais vigentes no contrato da empresa.

Já para a simulação do contrato A4 verde Copel e azul Copel, foram utilizados os dados das Fig. 2 e 3, simulando a condição de consumidor cativo. Importante pontuar que os valores das tarifas, utilizados no estudo, foram sem impostos, uma vez que grande parte dos impostos (ICMS) são recuperáveis para o caso da empresa estudada neste trabalho devido ao benefício permitido pelo governo do estado do Paraná.

A condição de tarifa binômia, onde se paga pela demanda e pelo consumo, presente atualmente no contrato da empresa apresenta um percentual do valor total pago na fatura mensal em média de 26% para a demanda e 71% para o consumo, sendo a diferença referente à impostos e tarifa de iluminação pública.

a) Topologia do projeto (HOMER PRO®)

A Fig. 4 apresenta o esquema do projeto que possibilita o *software* HOMER® fazer as simulações de modelagem otimizada. Abaixo é possível identificar duas linhas, que representam os barramentos AC (corrente alternada) e DC (corrente contínua), entre eles vemos um conversor que faz a devida conversão de contínuo, proveniente do sistema de armazenamento de energia elétrica e do sistema de geração por painéis fotovoltaicos para corrente contínua, que é a consumida pela carga.

Conforme já comentado acima, os componentes à direita do esquema representam a geração e o sistema de armazenamento e a esquerda estão a rede, com sinal de entrada para o sistema, indicando o fluxo da energia, e a carga com sinal de saída do sistema, indicando o consumo.

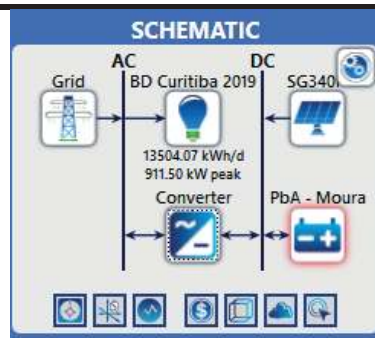


Figura 4 - Topologia esquemática da configuração do projeto

Para cada elemento inserido no projeto, faz-se necessário a parametrização de seu componente. Estes parâmetros precisam seguir dados mais realistas possíveis para que o modelo possa refletir a situação encontrada na fábrica em estudo e na possibilidade de instalar estes elementos auxiliares com o sucesso pressuposto pela saída das simulações, quando aplicável.

b) Características da rede

A configuração da foi feita a partir de dados reais da empresa, e das características do contrato vigente. Dentre as opções de tarifas, se optou pelas tarifas agendadas por existir diferentes tarifas a depender do horário de consumo, ponta e fora de ponta, conforme Tab. 2.

O item “reliability” dentro das configurações da rede, refere-se à confiabilidade da rede e possíveis intermitências na alimentação. Mas como não existe histórico conhecido de falta de energia na rede que alimenta a empresa, a confiabilidade foi mantida em 100%.

c) Carga e perfil de demanda

Para a definição da necessidade de energia demandada para o sistema, foi utilizado o histórico de consumo da empresa. Este histórico está registrado no sistema de gerenciamento energético da empresa, denominado CCK.

Para o propósito do estudo foram utilizados dados de registros feitos no ano de 2019, pois devido à variabilidade do consumo energético durante a pandemia (que alterou as taxas de produção da empresa), se escolheu utilizar dados pré-pandêmicos, pois eles representam melhor a operação normal da empresa.

d) Sistema de geração: Sistema fotovoltaico

Através do endereço da empresa objeto de estudo dessa dissertação, é possível obter os dados de irradiação solar. Estes dados são essenciais para o programa definir os parâmetros de geração de energia pelos painéis fotovoltaicos. O *software* Homer utiliza a base de dados da NASA para apresentar o perfil anual de irradiação. Estes dados são valores médios de 22 anos entre 1983 e 2005 e são apresentados em kWh/m²/dia.

Para a presente simulação foram utilizados dados de painéis fotovoltaicos da empresa OSDA (painéis comerciais disponíveis no mercado, referência na data de julho de 2022). Também ressaltar aqui a informação de utilização da sucata como parte do valor de reposição dos painéis, isso foi extraído de cotação do fornecedor e demonstra a gestão completa de todo o ciclo deste tipo de produto. Estas características são apresentadas na Tab. 2 e foram estas as transferidas para o software de simulação.

Tabela 2 - Características do painel fotovoltaico

Característica	Parâmetro
Fabricante	OSDA
Modelo	ODA465-36 V-MH
Potência	465 +/- 3 Wp
Eficiência padrão em condições de teste	21.3%
Dimensões	2102 x 1040 x 35 mm
Vida útil	25 anos
Coefficiente de redução	80%
Efeito da temperatura	-0,35%/°C
Temperatura nominal de operação	45°C



Reposição (com reaproveitamento da sucata)	65% do valor de aquisição
Operação e manutenção (referência de cotação)	1% ao ano
Reflectância do asfalto (PUTTONEN et. al, 2009)	20%
Valor de referência (NEOSOLAR, 2022)	R\$ 1049,00 por painel

Importante salientar que o dimensionamento dos KW instalados é resultado do otimizador do próprio software, com níveis limitantes de 0 até 3.200 KW de potência instalada e que os custos de instalação compõe o valor da unidade do painel (estimado aproximadamente 25% com ganho de negociação de escala). O limite superior (capacidade máxima instalada) foi obtido a partir do limite de área disponível para instalação dos painéis no telhado.

A área disponível para instalação dos painéis fotovoltaicos se limita à 14.000 m² (Eq.(5) e Eq.(6)). A partir deste valor de área, e levando em conta as dimensões de cada painel instalado, é determinado o número máximo de painéis.

$$n^{\circ} \text{ de painéis} = \frac{\text{área total disponível}}{\text{área do painel}} \quad (5)$$

Fonte: O Autor (2022).

em que:

é à quantidade de painéis que podem ser instalados dentro da área disponível;

= trata-se da área livre para instalação dos painéis;

= área de ocupação de cada painel em sua instalação.

(6)

$$\text{limite máx instalado} = n^{\circ} \text{ painéis} \times \text{potência painel}$$

Fonte: O Autor (2022).

em que:

é a capacidade máxima instalada (kWp);

é a quantidade de painéis que cabem na área de instalação.

e) Sistema de armazenamento de energia elétrica por baterias

Como referência para o SAEEB (Sistema de armazenamento de energia elétrica por baterias) foi utilizada uma bateria de mercado com as características e atributos descritos na Tab. 3. Este item foi parametrizado como uma unidade da biblioteca do software de simulação.

Tabela 3 - Características da unidade de bateria

Característica	Parâmetro
Fabricante	Moura
Modelo	Pb-Acido - Moura 12MS234
Potência	2,8 kWh
Tensão	12 V
Capacidade máxima	234 Ah
Tecnologia	Chumbo-ácido
Máxima temp. de operação	65°C
Mínima temp. de operação	-10°C
Estado inicial de carga	100%
Mínimo estado de carga	80%
Limite de degradação	20%
Configuração em Série	45 unidades (540 V)

8

Para a simulação foram utilizados os valores de mercado (de julho de 2022) para os custos de aquisição, reposição, manutenção e tempo de vida útil, de acordo Tab. 4.

Tabela 4 - Atributos de mercado para o modelo de bateria

Atributo	Valor
Valor de aquisição (MINHACASASOLAR, 2022)	R\$ 1349,00 por unidade
Reposição por unidade	60% do valor de aquisição (referência dos contatos com fabricante MOURA)
Manutenção por unidade	1% do valor de aquisição (referência dos contatos com fabricante MOURA)

Assim como para os painéis, a utilização da sucata no custo de reposição é um grande aliado para estes sistema e demonstra a gestão completa do ciclo de vida do material, trazendo mais sustentabilidade para sua aplicação.

f) Unidade de conversão de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA)

Além das baterias e painéis fotovoltaicos é necessário incluir na simulação o conversor de corrente CC/CA, que permite interligar o barramento de corrente contínua com o de corrente alternada. O sistema fotovoltaico de geração de energia, assim como o de armazenamento com baterias, operam em corrente contínua, no entanto a carga é alimentada por corrente alternada. Para a inclusão do conversor é necessário fornecer ao *software* as informações operacionais do mesmo. Os dados do conversor utilizado na simulação foram extraídos de um produto comercialmente disponível (no mercado nacional, na data de julho de 2022) e são apresentados na Tab. 5.

Tabela 5 - Características do conversor de frequência (conversor de corrente)

Características	Parâmetro
Capacidade	123KW
Vida útil	10 anos
Eficiência (entrada do conversor)	98%
Capacidade relativa (a depender do regime de operação)	100%
Eficiência (entrada do retificador)	98%
Valor de aquisição (MAGAZINELUIZA, 2022)	R\$100.000,00
Reposição unidade (referência na cotação)	65% do custo de aquisição
Manutenção unidade (referência na cotação)	1% da aquisição (anual)

1.1 Modelagem

As seguir são apresentados os resultados das simulações realizadas com o auxílio do *software* Homer utilizando os dados inseridos para cada elemento do projeto. O *software* permite configurar as simulações de forma que os elementos do projeto possam mudar alguns dos seus parâmetros operacionais, Tab. 6, dentro de faixas de valores preestabelecidas, adicionando ou retirando alguns elementos, conforme definido na análise de sensibilidade. Após finalizadas as simulações (utilizando todas as combinações permitidas de valores de parâmetros e componentes), os resultados são apresentados de forma a identificar a melhor combinação de componentes e dimensionamento, sempre visando o menor custo do projeto (além de permitir comparar a solução proposta com a situação atual).

O principal parâmetro comparativo para a escolha da melhor configuração do sistema é o custo por unidade de energia consumida (R\$/KWh) pela carga, mas outras informações também são obtidas como resultado das simulações, como o custo de operação e manutenção ao longo de toda a vida útil do sistema (O&M), o valor presente líquido, o fluxo de caixa, entre outros.

A análise de viabilidade econômica realizada pelo *software* é baseada no custo por unidade de energia (R\$/kWh) e no *payback* simples, este último calculado a partir do retorno do investimento no tempo, para se obter, em quantos anos o valor investido retorna de forma direta, sem taxa de desconto. A melhor opção (menor custo de operação da carga em termos de energia elétrica em R\$/kWh consumido) será apresentada como a configuração vencedora, ou seja, classificada em primeira posição como a melhor opção de sistema a ser instalado com o menor custo de operação.

a) Índices econômicos

Os índices econômicos utilizados nas simulações são: taxa mínima de atratividade de 15% é uma referência

para o investimento em renda fixa no Brasil, tomando como base a atual taxa Selic (BANCO CENTRAL DO BRASIL, janeiro de 2023), a inflação (IBGE, 2023) considerada foi a dos últimos 12 meses até novembro de 2022, e o tempo de projeto analisado foi de 25 anos.

b) Sensibilidade

Para a análise de sensibilidade foram atribuídos diferentes valores potencialmente viáveis para os componentes escolhidos conforme Tab. 6. Os componentes presentes na tabela foram definidos pelo critério de serem as principais variáveis de impacto financeiro na análise de aplicação de geração por painéis fotovoltaicos e para o armazenamento de energia elétrica por baterias. Os valores potencialmente viáveis para cada componente foram escolhidos para evidenciar o potencial de impacto de cada um nos custos da energia nos cenários simulados. A forma de introduzir estes valores potencialmente viáveis é por meio de fatores multiplicadores do custo de referência..

Os índices econômicos considerados na análise de sensibilidade foram os mesmos utilizados na simulação e apresentados no item a des capítulo, com exceção do índice de inflação que teve adição de dois valores limites conforme Tab. 6.

Tabela 6 - Fatores e níveis para análise de sensibilidade

Variáveis de nível	Componentes considerados na sensibilidade								
	Custo da energia na rede (R\$/kWh)	Crédito para compensação na rede (kWh)	Multiplicador do Custo painéis fotovoltaicos	Multiplicador do custo de manutenção dos painéis fotovoltaicos	Multiplicador do Custo de substituição dos painéis fotovoltaicos	Multiplicador do Custo Baterias	Multiplicador do custo de manutenção Baterias	Multiplicador do Custo de substituição das Baterias	Inflação anual
Valor 1	0,3148	0	75%	50%	50%	10%	50%	50%	3%
Valor 2	0,6256	3000	50%	0	0	1%	10%	10%	10%

c) Execução das simulações

Foram realizadas quatro simulações no total, sendo três referentes aos valores e parâmetros nominais do sistema com alteração entre elas somente das tarifas de contrato (A4 verde Copel, A4 azul Copel – Fig. 2 e 3 – e A4 azul Mercado Livre) e uma de sensibilidade, com limites variáveis para cada componente (Tab. 6), e as devidas restrições como no caso da quantidade de painéis fotovoltaicos (0 a 3200 kW), permitindo que o software otimize o sistema dentro destes limites. Estas faixas de variação dos valores (exemplo: custo dos painéis fotovoltaicos em 75% ou 50%) apresentados na Tab. 6, foram propostos para permitir ao *software* analisar o impacto destes parâmetros no resultado da viabilidade econômica (e sua sensibilidade). Importante salientar que para a sensibilidade, os valores nominais de base para os custos dos componentes e seus custos de operação e manutenção não foram considerados, já que o impacto destes valores já estão presentes nas primeiras simulações feitas somente com valores nominais.

5. RESULTADOS

Os resultados das simulações para as diferentes características de contrato estão apresentados de forma sumarizada na Tab. 7, com cada sistema vencedor nas 3 simulações.

Tabela 7 - Resumo comparativo entre os cenários

Contrato					VPL	Custo de Operação	Capital inicial	Custo do kWh	Payback Simples
A4 azul Mercado Livre	3200 kW	-	45000 kW/ano	2051 kW	R\$ 94 milhões	R\$ 8,38 milhões/ano	R\$ 8,89 milhões	R\$ 0,367	7,6 anos
A4 verde Copel	3200 kW	-	45000 kW/ano	2108 kW	R\$ 129 milhões	R\$ 11,8 milhões/ano	R\$ 8,93 milhões	R\$ 0,505	6,6 anos
A4 azul Copel	3200 kW	-	45000 kW/ano	2108 kW	R\$ 114 milhões	R\$ 10,3 milhões/ano	R\$ 8,93 milhões	R\$ 0,443	6,6 anos

Observa-se que em todos os casos se obtém o mesmo resultado, com o mesmo sistema vencedor, em que o contrato vigente é com o mercado livre, mais a instalação de um sistema de geração fotovoltaica com capacidade instalada de 3.200 kW e um conversor de corrente com 2.051 kW de capacidade.

É válido complementar que entre os contratos com as tarifas diretas da Copel Distribuição S.A., o melhor sistema seria com contrato A4 azul. Outro ponto importante é que o *payback* observado em ambas condições da Copel é justificado pelo maior custo da energia e, portanto, maior ganho quando da geração fotovoltaica.

4.2 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade foi realizada a partir dos multiplicadores de valor atribuídos a cada componente, novamente apresentados na Tab. 8. O *software* Homer realizou as diversas simulações com todas as combinações possíveis entre os valores parametrizados e buscou a melhor configuração de componentes e valores (melhor caso para cada componente dados seus custos e condições de operação).

Tabela 8 - Fatores e níveis para análise de sensibilidade

Níveis dos componentes	Componentes considerados na sensibilidade								
	Custo da energia na rede R\$/kWh	Crédito para compensação na rede (kWh)	Multiplicador do Custo painéis fotovoltaicos	Multiplicador do custo de manutenção dos painéis fotovoltaicos	Multiplicador do Custo de substituição dos painéis fotovoltaicos	Multiplicador do Custo Baterias	Multiplicador do custo de manutenção Baterias	Multiplicador do Custo de substituição das Baterias	Inflação anual
Valor 1	0.3148	0	75 %	50 %	50 %	10 %	50 %	50 %	3 %
Valor 2	0.6256	3000	50 %	0	0	1 %	10 %	10 %	10 %

Como saída da simulação de sensibilidade são apresentadas as principais configurações com o melhor custo de operação (R\$/kWh). A Tab. 9 resume este resultado com a classificação das configurações e o modelo vencedor.

Tabela 9 - Cenário otimizado da sensibilidade

Classificação					VPL	Custo de Operação	Capital inicial	Custo do kWh
1	3200 kW	-	45000 kW/ano	2108 kW	R\$ 129 milhões	R\$ 8,35 milhões/ano	R\$ 5,32 milhões	R\$ 0,345
2	3200 kW	450 unid.	45000 kW/ano	2152 kW	R\$ 129 milhões	R\$ 8,34 milhões/ano	R\$ 5,37 milhões	R\$ 0,345
3	-	-	45000 kW/ano	-	R\$ 140 milhões	R\$ 9,45 milhões/ano	0	R\$ 0,375
4	-	630 unid.	45000 kW/ano	28,5 kW	R\$ 140 milhões	R\$ 9,45 milhões/ano	R\$ 32 mil	R\$ 0,375

Nota-se que a configuração vencedora possui o sistema de geração de energia fotovoltaica, com capacidade instalada no limite máximo permitido de 3.200 kW devido à área disponível, a rede contratada com 45.000 kW/ano e o conversor com capacidade de 2.108 kW; sem utilização de sistema de armazenamento por baterias. A esta configuração vencedora foi aplicada a análise de sensibilidade permitindo variações de valores (parametrizados pelos fatores multiplicadores) em seus componentes, o que permite avaliar seu impacto nos indicadores econômicos.

O gráfico a seguir, Fig. 5, apresenta a comparação de uma configuração analisada pela sensibilidade contra o sistema atual do contrato com a rede na tarifa A4 azul com o Mercado Livre, com seus indicadores econômicos e de viabilidade do projeto.

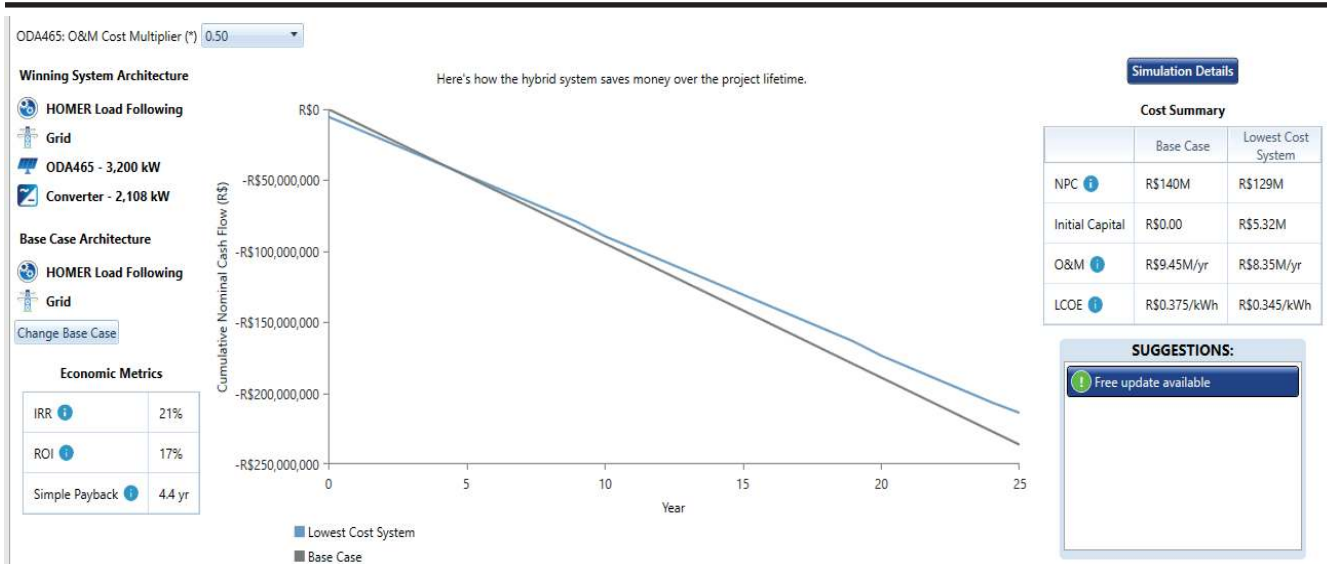


Figura 5 - Resultado da comparação configuração vencedora e sistema atual de rede

Observa-se que os indicadores apresentam uma considerável diferença em relação à simulação com os valores nominais, da Tab. 7, o custo de operação total anual ficaria em R\$ 8,35 milhões nesta condição e isso leva à uma taxa interna de retorno muito mais atraente de 21%, com 17% de retorno do investimento e *payback* simples caindo para 4,4 anos.

Os valores da sensibilidade que foram aplicados pelo *software* para o sistema acima estão apresentados na Tab. 10.

Tabela 10 - Valores da configuração otimizada

Valores do sistema vencedor considerados na sensibilidade								
Custo da energia na rede (R\$/kWh)	Crédito para compensação n rede (kWh)	Multiplicador do Custo painéis fotovoltaicos	Multiplicador do custo de manutenção dos painéis fotovoltaicos	Multiplicador do Custo de substituição dos painéis fotovoltaicos	Multiplicador do Custo Baterias	Multiplicador do custo de manutenção Baterias	Multiplicador do Custo de substituição das Baterias	Inflação anual
0,3148	0	50 %	50 %	50 %	1 %	10 %	10 %	10 %

Uma das conclusões que derivam desta análise é que mesmo com um valor irreal de aquisição das baterias (1% do custo atual do mercado) e mesmo considerando uma redução de 90% no custo de operação e manutenção, mesmo assim, o acréscimo do sistema de armazenamento de energia com baterias não se torna economicamente mais viável do que a utilização somente da rede com o sistema de geração fotovoltaica. Vale ressaltar que neste caso os valores estão combinados com uma redução de 50% dos custos de aquisição, manutenção e substituição dos painéis fotovoltaicos.

CONCLUSÕES

O que ficou identificado a partir deste estudo é que as tecnologias de geração de energia elétrica por painéis fotovoltaicos, assim como para armazenamento de energia, são viáveis econômica e tecnicamente para se aplicar na empresa estudada, a qual possui perfil de demanda praticamente nivelado, e potencial para empresas similares. Também foi observado que alguns fatores, como a inflação e a taxa de substituição, possuem pouco impacto no custo da energia consumida pela carga, em comparação com as outras variáveis. Em contrapartida a tarifa de consumo por kWh, o próprio custo de aquisição e manutenção das tecnologias de geração fotovoltaica possuem grande influência na modelagem de uma solução deste tipo.

12

Por fim, apesar do potencial de viabilidade técnica-econômica deste tipo de sistema, notou-se um *payback* simples próximo à 8 anos, em relação ao contrato atual e ao perfil de consumo da empresa aqui estudada, e isso pode dificultar a instalação prática deste sistema. Mas, a partir do estudo de sensibilidade, vê-se que no caso de um maior custo da energia proveniente da rede ou no caso de queda nos custos das tecnologias aplicadas, o resultado de retorno do capital pode ser fortemente reduzido. Desta forma é válido afirmar que com o barateamento das tecnologias de armazenamento de energia existentes e a contínua evolução das tecnologias de



painéis fotovoltaicos, a utilização destes sistemas combinados pode ser melhor viabilizada, principalmente para implantação de micro-geração distribuída nas indústrias Brasileiras.

Em trabalhos futuros é recomendada uma análise quanto à utilização de geradores a diesel como opção de modal de geração de energia e baterias de íon de lítio para armazenagem e a aplicação de ganhos intangíveis para este tipo de projeto, como selo verde e marketing de sustentabilidade. Outra recomendação para estudos futuros, para os próprios desenvolvedores do software Homer, é da consideração de multas em caso da ultrapassagem da potência de demanda contratada, visto que existe essa limitação na condiação da versão atual, e da formulação para monetização da demanda. Recomenda-se também, a partir de outra metodologia que não por simulações no software Homer devido as limitações para tal, avaliar a implantação de sistemas de armazenamento de energia exclusivamente para suprir a demanda em horário de ponta.

REFERÊNCIAS

- BANCO CENTRAL DO BRASIL. Controle de Inflação. Taxas de Juros. [Online]. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>. Acesso em: 02-jan-2023.
- BOWEN, Thomas; CHERNYAKHOVSKIY, Ilya; XU, Kaifeng; GADZANKU, Sika; CONEY, Kamyria. Usaid grid-scale energy storage technologies primer. National Renewable Energy Laboratory (2021)
- BRASIL. Diário oficial da união. Publicado em: 07/01/2022 | Edição: 5 | Seção: 1 | Página: 4. Órgão: Atos do Poder Legislativo. Disponível em <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.300-de-6-de-janeiro-de-2022-372467821>. Acesso em: 21 de fevereiro de 2022.
- COPEL Distribuição. (2022). Tarifas de energia elétrica. Disponível em: <https://www.copel.com/site/copel-distribuicao/tarifas-de-energia-eletrica/>. Acesso em 30-dez-2022 às 14:44h.
- FU. Ran; REMO, Timothy; MARGOLIS, Robert. 2018. 2018 U.S. Utility-scale photovoltaics-plus-energy storage system cost benchmark. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-6A20-71714. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/71714.pdf>. Acesso em: 13 de março de 2022.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Inflação. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/inflacao.php>. Acesso em: 02 jan. 2023.
- KAMIVA, George. Energy Storage Report. International Energy Agency - IEA, Paris (2021). Disponível em: <https://www.iea.org/reports/energy-storage> . Acesso em: 13 de março de 2022.
- KOSKELA, Juha; RAUTIAINEN, Antti; JÄRVENTAUSTA, Pertti. Using electrical energy storage in residential buildings – Sizing of battery and photovoltaic panels based on electricity cost optimization. Applied Energy 239, p1175:1189, 2019.
- LIU, Jia; CHEN, Xi; CAO, Sunliang; and YANG, Hongxing. Overview of hybrid solar photovoltaic electrical energy storage Technologies for power supply to buildings. Energy conversion and management v 187, p 103: 121, 2019.
- LIU, Jia; WANG, Meng; PENG, Jinqing; CHEN, Xi; CAO, Suliang; YANG, Hongxing. Techno-economic design optimization of hybrid renewable energy applications for high-rise residential buildings. Energy Conversion and Management 213, 112868, 2020.
- MACHALEK, Derek; POWELL, Kody. Automated electrical demand peak leveling in a manufacturing facility with short term energy storage for smart grid participation – Journal of manufacturing systems v 52, p 100: 109, 2019.
- MAGAZINE LUIZA. (s.d.). Inversor Solar Fotovoltaico on Grid Inversor 3Q189901000A PVS 120 TL SX2 Full 120 0KW Trifásico 480V 6 MPPT FIMER ABB. <https://www.magazineluiza.com.br/inversor-solar-fotovoltaico-on-grid-inversor-3q189901000a-pvs-120-tl-sx2-full-120-0kw-trifasico-480v-6-mppt-fimer-abb/>. Acesso em julho de 2022.
- MINHA CASA SOLAR. Retirado de – Disponível em: https://www.minhacasasolar.com.br/produto/bateria-solar-moura-234ah-ms234ah-antiga-220ah-78829?utm_source=&utm_medium=&utm_campaign=&utm_parceiro=82&gclid=cj0kcqjw9zgybhcearisaeuxituwubn6jz5luxh1uosx_vewa-wsuuftxfzel6mtgmvgqli5vppmd-vaaamjlealw_wcb. Acesso em: julho de 2022.
- S.A, Neosolar. Pannel Solar Fotovoltaico 465W OSDA ODA-465 36V MH. Neosolar. Disponível em: https://www.neosolar.com.br/loja/pannel-solar-fotovoltaico-465w-osda-oda-465-36v-mh.html?gclid=cj0kcqjwidswbhddarisaiotvb1xtsbakmmaf4rnz0zxvtsnmpai3nbrrrzl9pese90xfu2iozsrwaatn4ealw_wcb. Acesso em julho-2022.
- SANDIA. Doe global energy storage database. Disponível em: <https://www.sandia.gov/ess-ssl/gesdb/public/statistics.html>. Acesso em: 21 de fevereiro de 2022.



- TAHIR, Muti ur Rehman; AMIN, Adil; BAIG, Ateeq Ahmed; MANZOOR, Sajjad; HAQ, Anwar Ul; AS-GHA, Muhammad Awais e KHAWAJA, Wahab Ali Gulzar. Design and optimization of grid integrated hybrid on site energy generation system for rural area in AJK-Pakistan using HOMER software. AIMS Energy v051, p1113:1135, 2021.
- VENKATARAMAN, S.; ZIESLER, Chris; JOHNSON, Peter; KEMPEN, Stephanie Van. Integrated Wind, Solar, and Energy Storage. *ieee power & energy magazine* 1540-7977/18 p74:83, 2018.
- YANG, Changhui; SUN, Tianyi. Economic efficiency evaluation of distributed photovoltaic-energy storage hybrid system based on the Dynamic load – IMMS 2019: Proceedings of the 2019 2nd international conference on information management and management sciences p 213: 218, 2019.
- ZHU, K; LI, X; CAMPANA, P; LI, H; YAN, J. Techno-economic feasibility of integrating energy storage systems in refrigerated warehouses. *Applied Energy* 216, p348:357, 2018.

TECHNICAL-ECONOMIC FEASIBILITY STUDY FOR THE INSERTION OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS AND ENERGY STORAGE IN A BRAZILIAN INDUSTRY

Abstract. *This paper discusses alternative ways to reduce the cost of electricity in companies in the industrial sector, focusing on the technical-economic feasibility analysis, which depends on factors such as cost of components, legislation, and technological advances. Recent studies show that the technical-economic viability has become increasingly favorable for the use of renewable energies, especially for residential consumers, but that there are still challenges to be overcome in the case of scenarios with storage. The study analyzed the technical-economic viability of installing a hybrid system of electric power generation, composed of photovoltaic panels and battery storage, in an industry. The company's current contract in the free market was compared with other concessionaire tariffs, and it was verified that the current contract is less favorable for the installation of the alternative system due to the low cost of energy available. The most viable option was identified as a hybrid system composed of the electrical grid plus 3,200 kW of installed photovoltaic energy and a current converter, which indicates that the system is feasible both technically and economically. However, the payback was considered long, which may hinder its implementation in practice. The study suggests, based on the sensitivity analysis, that with the cheaper technologies for photovoltaic panels, the increase in their efficiency and the variability in the price of energy tariffs, the implementation of distributed microgeneration in Brazilian industries can be better made possible.*

Keywords: *Photovoltaic generation, Energy storage, Binomial pricing.*