

INDICADORES DE DESEMPENHO FINANCEIRO EM OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE USINAS FOTOVOLTAICAS

Graciele Rediske – grarediske@gmail.com

Paula Donaduzi Rigo

Julio Cezar Mairesse Siluk

Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Engenharia de Produção

Leandro Michels

Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Processamento de Energia Elétrica

Resumo. A gestão de operação e manutenção (O&M) de usinas solares fotovoltaicas (FVs) é essencial para manter o alto rendimento e o baixo custo de geração desses sistemas, que estão em crescente expansão nos últimos anos. Além dos aspectos técnicos, o desempenho financeiro de O&M também é um fator importante para monitorar a viabilidade e a rentabilidade dos sistemas de geração de energia solar FV. No entanto, nem sempre os gestores dispõem de indicadores-chaves de desempenho (KPIs) financeiros adequados para essa finalidade. Neste trabalho, propõe-se uma metodologia para identificar e ponderar os KPIs financeiros mais relevantes para a avaliação do desempenho financeiro de O&M de usinas FVs. Para isso, foi realizada uma revisão sistemática de literatura (RSL) sobre os principais indicadores financeiros utilizados na avaliação de desempenho de sistemas FVs, bem como uma pesquisa com especialistas do setor para obter suas opiniões utilizando ao método Delphi, e verificado suas preferências com o auxílio do método SWARA. Os resultados apresentam cinco indicadores que são importantes para os gestores considerarem monitorar em seus empreendimentos, sendo o KPI Custo equivalente de peças de reposição o mais importante, com 22,96% de peso.

Palavras-chave: Operação e Manutenção, Indicadores Financeiros, SWARA.

1. INTRODUÇÃO

O aumento do consumo de energia e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa impulsionam a transição para fontes renováveis, como a energia solar fotovoltaica (FV). Essa fonte é eficiente, sustentável e versátil, podendo ser instalada em diferentes locais e escalas (Rigo, 2022). No entanto, para ser competitiva no mercado elétrico, a energia solar FV precisa ter um custo menor ou igual ao das outras tecnologias. Para isso, é preciso considerar vários fatores que influenciam o custo da eletricidade gerada pela FV, como o custo do combustível, o custo de operação e manutenção, e o horário de funcionamento (Rediske *et al.*, 2022). O setor FV está em constante crescimento e, por isso, as atividades de operação e manutenção (O&M) se tornam cada vez mais relevantes (Rediske *et al.*, 2024). A qualidade e a confiabilidade da energia gerada por um sistema FV dependem diretamente da gestão de O&M, que também é fundamental para garantir a rentabilidade dos investimentos. Nesse sentido, os gestores necessitam de métodos precisos para acompanhar o desempenho dos sistemas FV durante todo o seu ciclo de vida e detectar possíveis falhas ou perdas de eficiência. As práticas de O&M são particularmente importantes em instalações comerciais/industriais, onde o fornecimento de energia é crítico para a continuidade das atividades e a segurança dos usuários (Keisang, Bader e Samikannu, 2021).

Um sistema FV é um investimento caro e de longo prazo que requer monitoramento contínuo (Rosa *et al.*, 2021). Indicadores são necessários para informar o desempenho dos processos e permitir a otimização das estratégias de operação, aprimoramento da eficiência da manutenção e monitoramento do desempenho. Esses atributos são essenciais para garantir a competitividade das geradoras de energia solar FV no mercado de energia. As atividades ideais de O&M devem buscar um equilíbrio entre maximizar a produção e minimizar os custos. Os serviços de O&M reduzem os riscos, melhoram o LCOE e aumentam o retorno sobre o investimento.

Assim como as questões técnicas de desempenho de uma usina FV, a situação financeira também requer atenção dos gestores durante toda a sua vida útil. Os KPIs financeiros são ferramentas fundamentais para elaborar um resumo do status do ativo (Gonzalez *et al.*, 2017a). Consequentemente, eles podem ser usados como um mecanismo de *feedback* para a avaliação das decisões de gerenciamento. O estudo econômico tem por objetivo determinar a rentabilidade intrínseca de um empreendimento, permitindo ao gestor planejar seu projeto FV e ter uma ideia geral sobre as possíveis limitações para reduzir seus riscos (Trabelsi *et al.*, 2016). A ineficiência da gestão de O&M de uma usina solar FV afeta a confiabilidade da operação do sistema (Velayutham e Ismail, 2018). Além disso, uma gestão adequada pode estender o período para a próxima falha e, ao mesmo tempo, pode equilibrar o custo e os riscos da operação diária.

O custo do gerenciamento da operação pode ser reduzido quando o sistema de monitoramento e gerenciamento é usado (Liu *et al.*, 2017). Assim, é fundamental para o sucesso do empreendimento estabelecer uma estrutura que possa avaliar de forma abrangente o desempenho dessas usinas FV. Essa estrutura oferece aos gestores e prestadores de serviço de O&M da usina o entendimento da situação de cada etapa e assim a identificação dos problemas e proposição de

soluções para a formação de estratégias futuras. Isso também auxiliaria os responsáveis a supervisionar adequadamente o status da produção, possibilitando garantir uma produção sustentável dessas usinas (Li e Zhao, 2016).

Tendo em vista a necessidade de gerenciar o *status* financeiro de O&M de usinas FVs este estudo tem como objetivo identificar KPIs relevantes para a avaliação do desempenho financeiro de O&M de usinas FVs, e ponderá-los conforme sua importância. Para isso, foi realizada uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL) sobre os principais indicadores financeiros utilizados na análise de projetos de energia solar, bem como uma pesquisa com especialistas do setor para obter suas opiniões e preferências. Os resultados obtidos foram analisados por meio de técnicas de auxílio a tomada de decisão, visando identificar os indicadores mais adequados para cada cenário e contexto.

2. MÉTODO

O método adotado neste estudo compreendeu três etapas, as quais correspondem às seguintes subseções desta seção. Inicialmente, realizou-se uma RSL para identificação dos fatores financeiros pertinentes à operação e manutenção de usinas fotovoltaicas. Simultaneamente, desenvolveram-se os Key Performance Indicators (KPIs) destinados à mensuração desses fatores. Em seguida, para validar o conjunto de KPIs, recorreu-se a um Painel de Especialistas, utilizando o Método Delphi. Por último, para avaliar a relevância dos indicadores, promoveu-se uma nova consulta aos especialistas, utilizando o Método SWARA, a fim de ponderar os diferentes KPIs.

2.1 Revisão Sistemática da Literatura

A identificação dos fatores relevantes na avaliação de desempenho financeiro de O&M iniciou por uma RSL. Para os profissionais do setor, as revisões sistemáticas podem ajudar a resolver problemas gerenciais, fornecendo uma base de conhecimento confiável por meio da agregação de evidências de uma série de estudos científicos (Schanes, Dobernig e Gözet, 2018; Donaduzzi Rigo et al., 2019). As revisões sistemáticas na academia fornecem rigor metodológico ao estudo, orientado por princípios flexíveis e irrestritos que garantem veracidade, neutralidade e extensão suficiente em relação a uma área específica do conhecimento científico, produzindo resultados acadêmicos confiáveis (Diógenes *et al.*, 2020).

Os principais passos desenvolvidos para obtenção dos resultados estão organizados na Fig. 1. Esse processo foi dividido em dois estágios e faz parte do protocolo sistemático de estudos, o qual apresenta o plano de ação da pesquisa. Inicia-se com a identificação dos fatores relevantes de serem considerados na avaliação de desempenho financeiro de O&M de uma usina FV, para, na sequência, determinar os KPIs capazes de medir o desempenho dos fatores encontrados.

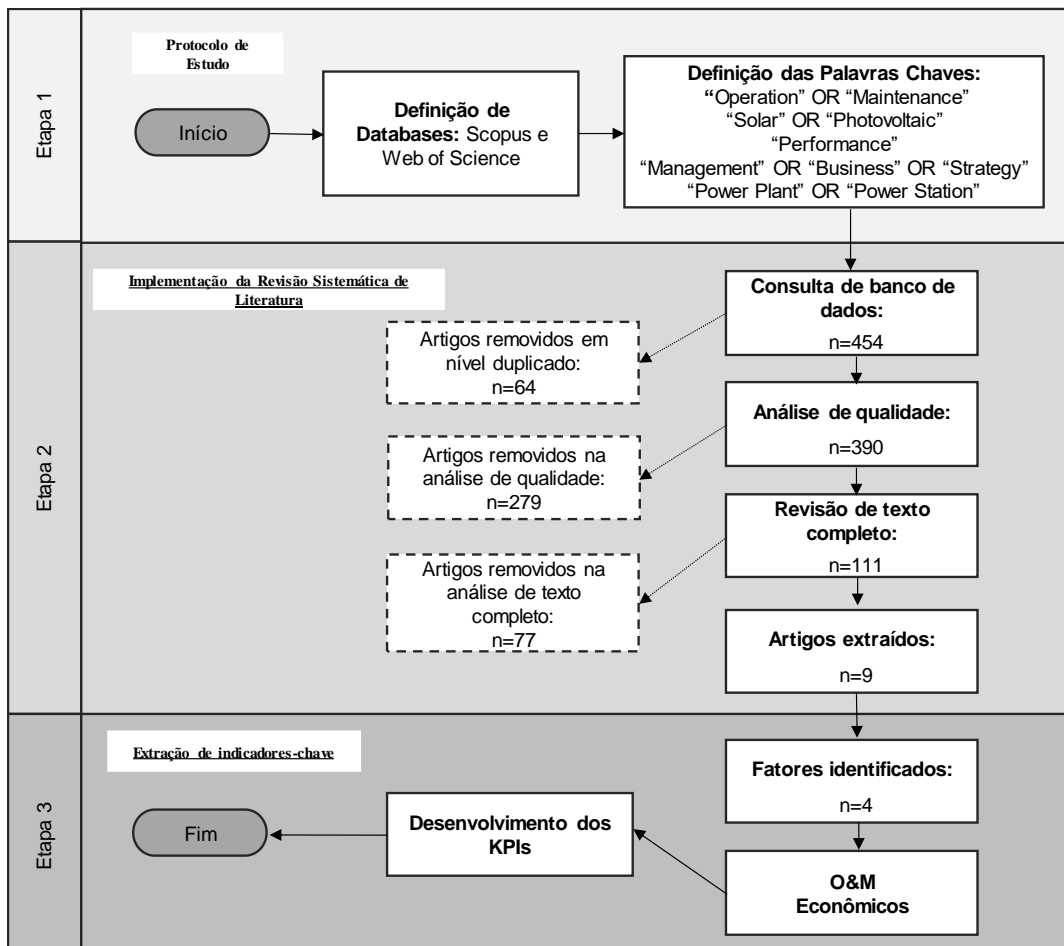


Figura 1 – Processo de Revisão Sistemática da Literatura

Para a extração da literatura relacionada, desenvolveu-se uma consulta nas plataformas *Web of Science* e *Scopus*, que possuem uma ampla gama de periódicos de alta qualidade indexados, elevando a qualidade dos resultados obtidos neste estudo. Buscou-se artigos relevantes de janeiro de 2010 a outubro de 2022, período estabelecido em função do representativo aumento no número de publicações relacionadas aos termos utilizados na *string* de pesquisa. Para a definição dos termos de busca, foram utilizados sinônimos associados às palavras principais envolvendo as questões de pesquisa que poderiam retornar artigos relevantes. Assim, a estratégia de busca utilizada foi de título-resumo-palavras-chave, utilizando a seguinte frase booleana: (“*Operation*” OR “*Maintenance*”) AND (“*Solar*” OR “*Photovoltaic*”) AND “*Performance*” AND (“*Management*” OR “*Business*” OR “*Strategy*”) AND (“*Power Plant*” OR “*Power Station*”), com uma restrição de idioma e tipo de pesquisa para “Inglês” e “Artigo”, respectivamente. Retornando das bases um total de 454 artigos.

Na sequência, foi usado o gerenciador de referências *Mendeley* para auxiliar no processo de revisão, restando 454 estudos após a remoção dos duplicados. A partir disso, os artigos foram revisados com o intuito de separar os artigos candidatos a fornecer uma resposta à questão de pesquisa daqueles que não agregam nenhuma informação relevante. Inicialmente, os autores analisaram o título, resumo e palavras-chave. Esse processo resultou em 111 artigos, pois muitos artigos retornados não condiziam com o tema abordado pelas palavras-chave, ou seja, o estudo deveria tratar de problemas relacionados a desempenho de usinas ou processos específicos de operação ou manutenção. Em seguida, a análise contemplou a leitura completa do artigo em busca de fatores relevantes na gestão de O&M de usinas fotovoltaicas. A lista final de artigos incluídos para revisão foi composta por 9 artigos.

Na sequência, com a intenção de extrair os fatores relevantes, um banco de dados foi elaborado usando uma planilha eletrônica, em que todos os 9 artigos foram analisados e classificados quanto a sua contribuição à pesquisa. Nesses 9 artigos, foram identificados 4 fatores relevantes na avaliação de desempenho financeiro de O&M de uma usina FV. Após a identificação dos fatores, foram elaborados os KPIs capazes de medir e avaliar, de fato, a realidade específica de uma usina FV.

A complexidade dos sistemas fotovoltaicos necessita de um elevado número de KPIs cobrindo diferentes aspectos relacionados à gestão de O&M. Sob a perspectiva financeira, os KPIs selecionados devem extrair apenas as informações mais relevantes sobre o desempenho financeiro de gestão do sistema, a fim de limitar seu número. Na escolha dos KPIs, a organização deve assegurar que esses fornecem informações que são mensuráveis, precisas, confiáveis e utilizáveis para implementar ações corretivas quando o desempenho não está em conformidade com os objetivos ou para melhorar a eficiência de processos. Sendo assim, a elaboração dos KPIs responsáveis por medir o desempenho de cada um dos fatores encontrados na literatura científica devem atender aos seguintes requisitos: válido para todos os tipos de sistemas FV, independente de capacidade, do local, entre outros; ser medido com frequência; suficientemente simples e fácil de interpretar para diferentes partes interessadas; atribuir responsabilidades a um indivíduo ou equipe; impactar significativamente no desempenho.; quantificável, claramente definido e cientificamente válido; descritivo, pois deve facilitar a avaliação e comparação entre diferentes estratégias de eficiência energética; adequado para apoio à tomada de decisão em sistemas existentes e novos; e flexíveis, pois deve estar aberto para melhorias.

A lista de KPIs apresentada neste estudo foi desenvolvida seguindo os requisitos apresentados por consenso que envolveu todas as partes interessadas relevantes, constituindo um conjunto de medidas que a usina necessita para avaliar sua performance ao longo do tempo. Essas métricas são usadas para determinar o progresso de gestão na O&M da usina FV e se ela está mais próxima, ou não, de alcançar seus objetivos estratégicos.

2.2 Método Delphi

Com a identificação dos fatores relevantes e os KPIs capazes de medi-los, é realizada a construção do Instrumento de Pesquisa 1, conforme Fig. 2. Em seguida foi selecionado um painel com 6 especialistas do setor FV com base na experiência no campo de O&M em usinas FV e 2 doutores na área de engenharia elétrica que possuem experiência no setor FV. Usando o método Delphi e rodadas iterativas de pesquisa, os especialistas tiveram a oportunidade de expressar opiniões através de uma sessão de discussão ao vivo, em que os participantes estabeleciam suas opiniões sobre exclusão de KPIs, alteração na forma de mensuração e inclusão de novos KPIs quando viam necessidade, indicando também a consulta a estudos relevantes do setor para aprimorar a lista de KPIs e formas de medi-los.

KPIs Financeiros		
Fator	KPI	Variáveis Relacionadas
Taxa Anual de Seguro	$AIT = \frac{C_{ins}}{TOC}$	C_{ins} = Custo do Seguro (R\$) TOC = Custo Total de Operação (R\$)
Custo Equivalente de Peças de Reposição	$ESPC = \frac{SPC}{TMC}$	SPC = Custo de Peças de Reposição (R\$) TMC = Custo Total de Manutenção (R\$)
Custo Equivalente de Mão de Obra	$ELB = \frac{LC}{TMC}$	LC = Custo de Mão de Obra Manutenção (R\$) TMC = Custo Total de Manutenção (R\$)
Planejamento de Manutenção	$MP = \frac{TMC}{AMB}$	AMB = Orçamento Anual de Manutenção (R\$) TMC = Custo Total de Manutenção (R\$)
Considerando a sua visão de gestor de O&M de usinas fotovoltaicas, como você avalia os fatores técnicos de manutenção apresentados no quadro acima. Você considera um ou mais itens não adequados?		
() Sim () Não		
Se sim, favor listar o item e sua justificativa para exclusão.		
Você considera que está faltando um ou mais itens de avaliação?		
() Sim () Não		
Se sim, favor apresentar proposta de item e justificativa para sua inclusão.		

Figura 2 – Instrumento de pesquisa 1 para aplicação do método Delphi

O Instrumento de Pesquisa 1 foi aplicado utilizando o Delphi de maneira modificada, ou seja, ao invés de aplicar um questionário engessado com os KPIs e perguntas, a aplicação do método aos especialistas ocorreu em formato de conversa com os participantes, no qual foram apresentados a eles toda a estrutura retornada da literatura e questionada a relevância da estrutura aplicada em uma planta FV em operação. A conversa com cada especialista foi realizada separadamente, acreditando assim deixá-los à vontade para expor suas experiências no setor de O&M em usinas FV. Os resultados das conversas foram extremamente produtivos e os especialistas se sentiram à vontade para expor suas opiniões em relação aos KPIs, relatando a não necessidade de alguns, instruindo a modificação da forma de mensuração, adição de KPIs e aconselhando importantes materiais que fornecem discussões sobre o tema O&M em plantas FV como o relatório intitulado *O&M Best Practice Guidelines da Solar Europe* e os relatórios desenvolvidos pela IEA-PVPS. A partir das respostas dos especialistas, o estudo obteve contribuições significativas, que resultaram em modificações em todos os KPIs financeiros extraídos da literatura, tanto em relação à sua denominação quanto aos seus parâmetros de cálculo e medição. A principal contribuição dos especialistas foi na divisão do KPI Custo Equivalente de Mão de Obra em preventiva e corretiva, totalizando cinco KPIs. A forma de normalização dos indicadores de Custo Equivalente de Mão de Obra e de Peças de Reposição também foi alterado, os especialistas acreditam que o retorno dos indicadores fica mais realista se foram divididos pela previsão de seus atributos, como por exemplo no KPI de Custo Equivalente de Peças de Reposição (ESPC) que estava com seu cálculo realizado pela divisão entre o somatório de custos de peças de reposição pelo custo total de manutenção, agora é calculado pelo somatório de custos de peças de reposição dividido pelo custos de peças de reposição previsto. Assim como o KPI Índice de Despesas de Manutenção (ME) que os especialistas acreditam ser melhor a mensuração pela divisão do somatório total dos custos de manutenção pelas despesas operacionais (OPEX).

O método Delphi é um método de consolidação das opiniões dos respondentes. Assim, após a conversa com todos os especialistas, a lista de KPIs e suas formas de mensuração foram enviados a todos os especialistas novamente para validação final. Essa é a principal característica que diferencia o método Delphi dos métodos de pesquisa comuns. Os entrevistados que não estão confiantes em suas respostas geralmente tendem a apoiar a opinião da maioria, assim é possível consolidar suas opiniões. Posteriormente à avaliação do retorno dos especialistas e análise dos resultados dessa etapa, foi possível validar o conjunto final de KPIs.

2.3 Método SWARA

Nesta etapa, foi desenvolvido o Instrumento de Pesquisa 2, que consiste em um questionário preparado e enviado aos 6 especialistas do setor FV, que auxiliaram na etapa posterior de desenvolvimento da lista de KPIs. De acordo com a literatura, o número ideal de especialistas para ponderação de critérios é muito variado e um número muito elevado gera uma quantidade desconexa de dados quantitativos e torna a administração e a análise muito complexas. Assim, este estudo focou na seleção de especialistas com amplo conhecimento em gestão de O&M, considerando tempo e formação desses profissionais.

A pesquisa foi conduzida eletronicamente usando a ferramenta de pesquisa online, *Survey Monkey Inc*¹. O questionário é preparado de acordo com as diretrizes do método SWARA, em que os respondentes têm a liberdade de expor o percentual de peso que consideram para cada KPI. Na Fig. 3, é possível visualizar o formato do questionário aplicado, em que o respondente avalia o KPI e marca o percentual de importância que acredita que o KPI representa no desempenho energético da usina FV.

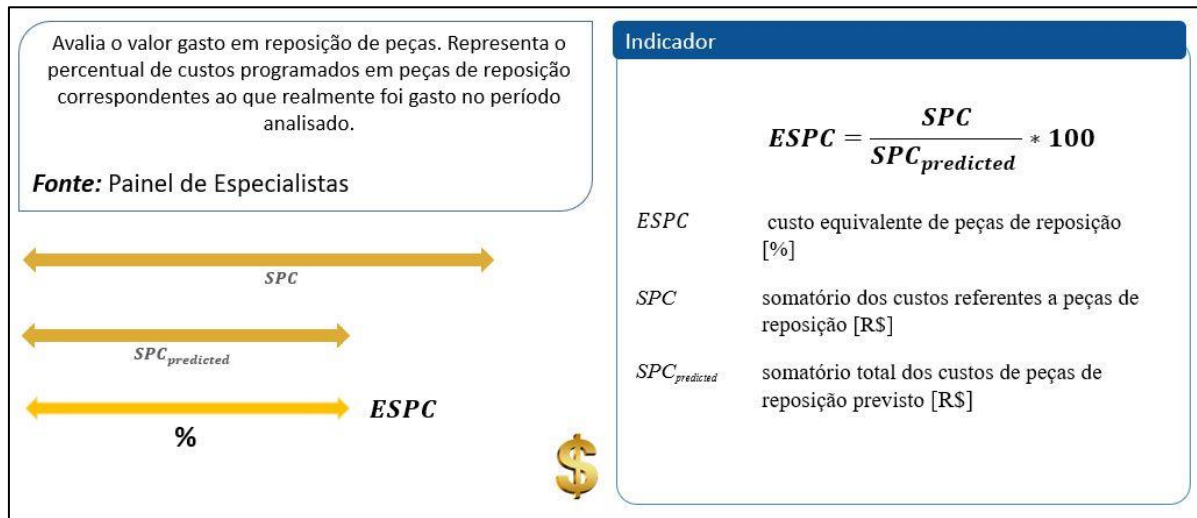


Figura 3 – Questão “Qual a importância que o indicador “Custo Equivalente de Peças de Reposição” possui no desempenho financeiro operacional da usina?” como exemplo do questionário de aplicação do SWARA

Após o retorno dos questionários, as respostas foram analisadas de acordo com as etapas apresentadas no SWARA, sendo possível obter a ponderação de cada um dos KPIs frente ao sistema como um todo. O processo do SWARA pode ser dividido em seis etapas (Keršulienė, Zavadskas e Turskis, 2010):

Etapa 1: Definição dos Critérios de Decisão. Essa etapa se caracteriza pelo levantamento dos critérios que serão ponderados pelo método.

Etapa 2: Determinação da Classificação e Importância dos critérios de decisão. Nessa etapa, os tomadores de decisão envolvidos definem os critérios de decisão e os classificam do melhor ao pior com base em sua experiência e conhecimento. Esses critérios podem ser denotados como C_j ($j = 1, 2, \dots, n$), em que C_1 e C_n representam respectivamente o melhor e o pior critério ordenados de acordo com seus ranks atribuídos. O respondente atribui o percentual de importância que cada critério apresenta na sua perspectiva. Os critérios são classificados em ordem decrescente, com base em seus significados esperados, ou seja, primeiro o respondente atribui a nota ao critério que ele considera mais importante, na sequência o segundo mais importante (na atribuição da nota do segundo critério é importante que o respondente faça a comparação com a nota do primeiro e assim sucessivamente). Conforme (Thakkar, 2021), a partir do segundo critério, os respondentes atribuem o valor de importância de j th critérios com base na comparação relativa com $(j - 1)$ th critério.

Etapa 3: Determinação da importância comparativa de cada critério. Nessa etapa, é calculada a importância comparativa do valor médio (s_j). O valor médio de importância comparativa de cada critério passa a ser determinado com base na classificação correspondente. Basicamente, descreve como o critério C_j é mais importante que o critério C_{j+1} .

Etapa 4: Estimação do coeficiente (k_j) de cada critério. O coeficiente de cada critério pode ser obtido pela Eq. (1). Na primeira linha (critério com maior nota), automaticamente fica o valor 1. Nos critérios seguintes é somado 1 ao valor de s_j .

$$k_j = \begin{cases} 1, & j = 1 \\ s_j + 1, & j > 1 \end{cases} \quad (1)$$

Etapa 5: Determinação do peso recalculado (q_j) de cada critério. O peso recalculado de cada critério agora pode ser estimado pela Eq. (2). Na primeira linha (critério com maior nota), automaticamente fica o valor 1. Nos critérios seguintes, é dividido o valor q_j do critério anterior pelo k_j do critério analisado.

¹ Ferramenta usada para criar formulários online que atende as expectativas do estudo (San Mateo, Califórnia, EUA; www.surveymonkey.com).

$$q_j = \begin{cases} 1, & j = 1 \\ \frac{x_{j-1}}{k_j}, & j > 1 \end{cases} \quad (2)$$

Etapa 6: Cálculo do peso relativo (w_j). O peso final de cada critério pode ser calculado dividindo-se o peso obtido na etapa anterior pela soma dos pesos, conforme a Eq. (3).

$$w_j = \frac{q_j}{\sum_{j=1}^n q_j} \quad (3)$$

Com base no procedimento exposto acima, percebe-se que na etapa 2 o especialista estabelece sua opinião quanto ao peso de cada um dos critérios. Na sequência, as etapas 3 a 6 realizam os cálculos estipulados pelo SWARA para aprimoramento da pontuação. Os especialistas, frequentemente, abordam o problema de maneiras diferentes e podem fornecer julgamentos dispersos. Uma opção para resolver esse problema é tratar os dados com a média geométrica, que é superior à média aritmética.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são compartimentalizados em seis subseções. As cinco primeiras detalham cada um dos cinco indicadores, oferecendo uma descrição de cada um e explicando como foram mensurados. Já na sexta subseção, são apresentados os pesos atribuídos a cada indicador.

3.1 Custo Equivalente de Peças de Reposição

O fator Custo Equivalente de Peças de Reposição (*ESPC*) foi observado na literatura pelos autores (Gonzalez et al., 2017a; Peters e Madlener, 2017) e corroborado pelo Painel de Especialistas. Para tal foi definido que sua mensuração seria através da razão entre somatório dos custos referentes a peças de reposição, expresso como uma porcentagem do somatório total dos custos de peças de reposição previsto $SPC_{predicted}$. O *ESPC* está diretamente relacionado ao número de falhas seguidas pelas substituições. Além disso, valores históricos podem ajudar no planejamento do orçamento de gastos desta natureza. Esse indicador fornece informações sobre a proporção do custo de peças de reposição do valor previsto (Peters e Madlener, 2017). A Eq. (4) apresenta o cálculo para sua mensuração.

$$ESPC = \frac{SPC}{SPC_{predicted}} * 100 \quad (4)$$

Os parâmetros de coleta para mensurar o indicador da Eq. (4) são: SPC = somatório dos custos referentes a peças de reposição (R\$) e $SPC_{predicted}$ = somatório total dos custos de peças de reposição previsto (R\$).

3.2 Custo Equivalente de Mão de Obra para Manutenção Corretiva

O fator Custo Equivalente de Mão de Obra para Manutenção Corretiva (*ELB_c*) foi observado na literatura pelos autores (Bensebaa, 2011; Li e Huang, 2012; Corona, Cerrajero, López e Miguel, 2016; Starke et al., 2016a; Gonzalez et al., 2017a; Villarini et al., 2017; Topel e Laumert, 2018) e corroborado pelo Painel de Especialistas. É pertinente a gestão de O&M medir o desempenho econômico da mão de obra nos serviços de manutenção (Bensebaa, 2011; Gonzalez et al., 2017a; Peters e Madlener, 2017). Reforçando essa importância, este fator é medido como o somatório dos custos referentes a mão de obra de manutenção corretiva *LCC* expressos como uma porcentagem do somatório total dos custos de mão de obra de manutenção corretiva prevista $LCC_{predicted}$, informando sobre a eficácia da execução da manutenção (Peters e Madlener, 2017). A Eq. (5) apresenta o cálculo para sua mensuração.

$$ELB_c = \frac{LCC}{LCC_{predicted}} * 100 \quad (5)$$

Os parâmetros de coleta para mensurar o indicador da Eq. (5) são: LCC = somatório dos custos referentes a mão de obra de manutenção corretiva (R\$) e $LCC_{predicted}$ = somatório total dos custos de mão de obra de manutenção corretiva prevista (R\$).

3.3 Custo Equivalente de Mão de Obra para Manutenção Preventiva

O fator Custo Equivalente de Mão de Obra para Manutenção Preventiva (ELB_p) foi observado na literatura pelos autores (Bensebaa, 2011; Li e Huang, 2012; Corona, Cerrajero, López e Miguel, 2016; Starke et al., 2016b; Gonzalez et al., 2017a; Villarini et al., 2017; Topel e Laumert, 2018) e corroborado pelo Painel de Especialistas. A maioria dos operadores concorda com a importância de ter pessoal de manutenção qualificado para garantir uma porcentagem ideal de custos de mão-de-obra (Gonzalez *et al.*, 2017a). Essa mensuração deve ser feita também na manutenção preventiva por meio desse fator, que é medido como o somatório dos custos referentes à mão de obra de manutenção preventiva LCP expressos como uma porcentagem do somatório total dos custos de mão de obra de manutenção corretiva prevista $LCP_{predicted}$. Esse KPI, somado ao anterior, são os responsáveis por informar aos gestores o valor gasto na folha de pagamento de funcionários de manutenção frente ao valor previsto. A Eq. (6) apresenta o cálculo para sua mensuração.

$$ELB_p = \frac{LCP}{LCP_{predicted}} * 100 \quad (6)$$

Os parâmetros de coleta para mensurar o indicador da Eq. (6) são: LCP = somatório dos custos referentes a mão de obra de manutenção preventiva (R\$) e $LCP_{predicted}$ = somatório total dos custos de mão de obra de manutenção preventiva prevista (R\$).

3.4 Taxa Anual de Seguro

O fator Taxa Anual de Seguro (AIT) foi observado na literatura pelos autores (Corona, Cerrajero, López e San Miguel, 2016; Starke et al., 2016c; Aly et al., 2019) e corroborado pelo Painel de Especialistas. Um dos suportes de que pouco se fala são os seguros de energias renováveis, que englobam não só os riscos de engenharia, relacionados à construção de usinas, mas coberturas de riscos operacionais, por isso este fator é proposto, e sua mensuração consiste na razão entre o custo do seguro C_{ins} e os custos anuais considerando O&M mais seguros A_t . Esse KPI avalia o percentual dos custos que foram utilizados no seguro da usina, informando o valor do seguro comparado ao total de gastos na O&M. A Eq. (7) apresenta o cálculo para sua mensuração.

$$AIT = \frac{C_{ins}}{A_t} * 100 \quad (7)$$

Os parâmetros de coleta para mensurar o indicador da Eq. (7) são: C_{ins} = custo anual de seguro (R\$) e A_t = custos anuais considerando O&M mais seguros (R\$).

3.5 Índice de Despesas de Manutenção

O fator Índice de Despesas de Manutenção (ME) foi observado na literatura pelos autores (Corona, Cerrajero, López e San Miguel, 2016; Gonzalez et al., 2017b) e corroborado pelo Painel de Especialistas. Esse é fator econômico que mede exatamente o desempenho da gestão de manutenção, e é definido como o somatório total dos custos de manutenção TMC em relação às despesas operacionais $OPEX$ (AMB). O ME pode fornecer informações sobre a qualidade do planejamento de manutenção (Gonzalez *et al.*, 2017a), sendo relevante para os responsáveis pelo setor de manutenção. Esse KPI representa o percentual dos custos de operação do sistema que foram gastos na manutenção e avalia a eficácia dos gastos de manutenção. A Eq. (8) apresenta o cálculo para sua mensuração.

$$ME = \frac{TMC}{OPEX} * 100 \quad (8)$$

Os parâmetros de coleta para mensurar o indicador da Eq. (8) são: TMC = somatório total dos custos de manutenção (R\$) e $OPEX$ = despesas operacionais (R\$).

3.6 Ponderação

Após o retorno dos especialistas, as respostas foram calculadas utilizando as diretrizes do método SWARA. O comitê classificou os KPIs em ordem decrescente de importância e, a seguir, avaliou a preferência de cada KPI sobre o seguinte. Com base nas Equações 1, 2 e 3, foram derivados os pesos subjetivos, que estão listados na Tab. 1.

Tabela 1 – Nível de importância dos KPIs

KPIs	Abreviatura	w_j
Custo equivalente de peças de reposição	<i>ESPC</i>	22,96%
Custo equivalente de mão de obra para manutenção corretiva	<i>ELB_c</i>	18,23%
Custo equivalente de mão de obra para manutenção preventiva	<i>ELB_p</i>	17,52%
Taxa anual de seguro	<i>AIT</i>	17,18%
Índice de despesas de manutenção	<i>ME</i>	24,11%

Verifica-se com a leitura da Tab. 1 que o KPI mais significativo é o “Índice de Despesas de Manutenção” (24,11%), fato que condiz com a extensão de informações financeiras que este KPI abrange. Outro KPI em evidência, na opinião dos especialistas, é o de “Custo equivalente de peças de reposição” (22,96%), que também se justifica pelo fato das peças sobressalentes de usinas FV obterem um custo elevado. Na sequência, aparecem o “Custo equivalente de mão de obra para manutenção corretiva” (18,23%), “Custo equivalente de mão de obra para manutenção preventiva” (17,52%) e “Taxa anual de seguro” (17,18%).

4. CONCLUSÃO

O conjunto de KPIs proposto nesta pesquisa auxilia os gestores na avaliação e otimização do aspecto financeiro da O&M da usina FV. Primeiro, os KPIs são úteis para descrever um quadro completo das práticas no sistema a partir dos dados da usina. Essas informações ajudarão a identificar as principais áreas de melhoria, estabelecer metas de desempenho e pré-selecionar um conjunto de ações para alcançá-las. Por isso, os KPIs foram desenvolvidos pensando tanto no proprietário da usina assim como no provedor de serviços de O&M. É perceptível ao setor FV que boas práticas de O&M garantem que as usinas FV forneçam os volumes de energia esperados e melhorias de desempenho essenciais para o sucesso dos sistemas FV. De forma resumida, a operação é responsável por atender às necessidades operacionais do usuário final e a manutenção se concentra em manter a planta operando em seu projeto original (Zhang *et al.*, 2022).

A fase de O&M envolve a empresa de rede elétrica, a empresa provedora de serviço O&M, os proprietários das usinas e demais interessados que precisam assumir suas respectivas responsabilidades e equilibrar as necessidades de todas as partes. Como forma de registrar os direitos e deveres de cada parte existem os contratos de O&M, que incluem o gerenciamento de todo o processo de planejamento, assinatura, execução, alteração e cancelamento, nele deve constar os direitos, responsabilidades e benefícios de cada parte interessada para garantir a implementação tranquila do projeto. Alguns termos, como prazo de contrato, preço, escopo, resolução de disputas e critérios de aceitação, podem ser ajustados ou negociados com base no desempenho da usina para atingir parâmetros de contrato ideais para ambas as partes. Os KPIs apresentados neste estudo servem como instrumentos de avaliação e discussão na alteração de itens desses contratos, eles facilitam os interessados a comprovar suas motivações de alterações de itens estabelecidos anteriormente no contrato.

Agradecimentos

Este trabalho recebeu apoio do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Geração Distribuída (INCTGD) e das agências de financiamento (processo CNPq 465640/2014-1, processo CAPES No. 23038.000776/2017-54 e FAPERGS 17/2551-0000517-1). Siluk e Rigo foram beneficiados por uma bolsa de pesquisa do CNPq – Brasil (processo CNPq Siluk No. 311926/2017-7, processo CNPq Rigo No. 168269/2023-6). Os autores expressam sua gratidão ao INCTGD, à CAPES, ao CNPq e à FAPERGS pelo apoio financeiro e pelo suporte integral fornecido para a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

- Aly, A. *et al.* (2019) ‘Is Concentrated Solar Power (CSP) a feasible option for Sub-Saharan Africa?: Investigating the techno-economic feasibility of CSP in Tanzania’, *Renewable Energy*, 135, pp. 1224–1240. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.065>.
- Bensebaa, F. (2011) ‘Solar based large scale power plants: What is the best option?’, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 19(2), pp. 240–246. Available at: <https://doi.org/10.1002/pip.998>.
- Corona, B., Cerrajero, E., López, D. and Miguel, G.S. (2016) ‘Full environmental life cycle cost analysis of concentrating solar power technology: Contribution of externalities to overall energy costs’, *Solar Energy*, 135, pp. 758–768. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.059>.
- Corona, B., Cerrajero, E., López, D. and San Miguel, G. (2016) ‘Full environmental life cycle cost analysis of concentrating solar power technology: Contribution of externalities to overall energy costs’, *Solar Energy*, 135, pp. 758–768. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.059>.
- Diógenes, J.R.F. *et al.* (2020) ‘Barriers to onshore wind energy implementation: A systematic review’, *Energy Research & Social Science*, 60, p. 101337. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101337>.
- Donaduzzi Rigo, P. *et al.* (2019) ‘Evaluation of the success of a small-scale photovoltaic energy system’, *IEEE Latin America Transactions*, 17(9), pp. 1474–1481. Available at: <https://doi.org/10.1109/TLA.2019.8931141>.

- Gonzalez, E. *et al.* (2017a) ‘Key Performance Indicators for Wind Farm Operation and Maintenance’, *Energy Procedia*, 137, pp. 559–570. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.385>.
- Gonzalez, E. *et al.* (2017b) ‘Key Performance Indicators for Wind Farm Operation and Maintenance’, *Energy Procedia*, 137, pp. 559–570. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.385>.
- Keisang, K., Bader, T. and Samikannu, R. (2021) ‘Review of Operation and Maintenance Methodologies for Solar Photovoltaic Microgrids’, *Frontiers in Energy Research*, 9. Available at: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.730230>.
- Keršuliene, V., Zavadskas, E.K. and Turskis, Z. (2010) ‘Selection of rational dispute resolution method by applying new step-wise weight assessment ratio analysis (Swara)’, *Journal of Business Economics and Management*, 11(2), pp. 243–258. Available at: <https://doi.org/10.3846/jbem.2010.12>.
- Li, N. and Zhao, H. (2016) ‘Performance evaluation of eco-industrial thermal power plants by using fuzzy GRA-VIKOR and combination weighting techniques’, *Journal of Cleaner Production*, 135, pp. 169–183. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.113>.
- Li, Y.P. and Huang, G.H. (2012) ‘Electric-power systems planning and greenhouse-gas emission management under uncertainty’, *Energy Conversion and Management*, 57, pp. 173–182. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.12.018>.
- Liu, G. *et al.* (2017) ‘Architecture and experiment of remote monitoring and operation management for multiple scales of solar power plants’, in *Proceedings of 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference, IAEAC 2017*, pp. 2489–2495. Available at: <https://doi.org/10.1109/IAEAC.2017.8054471>.
- Peters, L. and Madlener, R. (2017) ‘Economic evaluation of maintenance strategies for ground-mounted solar photovoltaic plants’, *Applied Energy*, 199, pp. 264–280. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.060>.
- Rediske, G. *et al.* (2022) ‘The impact of the COVID-19 pandemic on the economic viability of distributed photovoltaic systems in Brazil’, *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 41(5). Available at: <https://doi.org/10.1002/ep.13841>.
- Rediske, G. *et al.* (2024) ‘A proposed set of indicators for evaluating the performance of the operation and maintenance of photovoltaic plants’, *Applied Energy*, 354. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122158>.
- Rigo, P.D. (2022) *Modelo de Avaliação do Potencial Competitivo para Instaladoras de Sistemas Fotovoltaicos*. Universidade Federal de Santa Maria.
- Rosa, C.B. *et al.* (2021) ‘How to measure organizational performance of distributed generation in electric utilities? The Brazilian case’, *Renewable Energy*, 169, pp. 191–203. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.027>.
- Schanes, K., Dobernick, K. and Gözet, B. (2018) ‘Food waste matters - A systematic review of household food waste practices and their policy implications’, *Journal of Cleaner Production*, 182, pp. 978–991. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.030>.
- Starke, A.R. *et al.* (2016a) ‘Assessing the performance of hybrid CSP + PV plants in northern Chile’, *Solar Energy*, 138, pp. 88–97. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.09.006>.
- Starke, A.R. *et al.* (2016b) ‘Assessing the performance of hybrid CSP + PV plants in northern Chile’, *Solar Energy*, 138, pp. 88–97. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.09.006>.
- Starke, A.R. *et al.* (2016c) ‘Assessing the performance of hybrid CSP + PV plants in northern Chile’, *Solar Energy*, 138, pp. 88–97. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.09.006>.
- Thakkar, J.J. (2021) ‘Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA)’, in *Multi-Criteria Decision Making*. Singapore: Springer Singapore, pp. 281–289. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-33-4745-8_16.
- Topel, M. and Laumert, B. (2018) ‘Improving concentrating solar power plant performance by increasing steam turbine flexibility at start-up’, *Solar Energy*, 165, pp. 10–18. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.02.036>.
- Trabelsi, S.E. *et al.* (2016) ‘Techno-economic performance of concentrating solar power plants under the climatic conditions of the southern region of Tunisia’, *Energy Conversion and Management*, 119, pp. 203–214. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.033>.
- Velayutham, Puvanesan and Ismail, Firas Basim (2018) ‘A Review on Power Plant Maintenance and Operational Performance’, *MATEC Web Conf.*, 225, p. 5003. Available at: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822505003>.
- Villarini, M. *et al.* (2017) ‘Optimization of photovoltaic maintenance plan by means of a FMEA approach based on real data’, *Energy Conversion and Management*, 152, pp. 1–12. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.090>.
- Zhang, Z. *et al.* (2022) ‘Do operation and maintenance contracts help photovoltaic poverty alleviation power stations perform better?’, *Energy*, 259, p. 124990. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124990>.

FINANCIAL PERFORMANCE INDICATORS IN OPERATION AND MAINTENANCE OF PHOTOVOLTAIC PLANTS

Abstract. Operation and maintenance (O&M) management of photovoltaic solar plants (PVs) is essential to maintain the high yield and low generation cost of these systems, which have been expanding recently. In addition to technical aspects, O&M's financial performance is also an essential factor for monitoring the viability and profitability of solar PV power generation systems. However, managers only sometimes have adequate financial key performance indicators (KPIs) for

this purpose. In this work, a methodology is proposed to identify and weigh the most relevant financial KPIs for evaluating the financial performance of O&M of PV plants. To this end, a systematic literature review (SLR) was carried out on the leading financial indicators used in evaluating the performance of PV systems, as well as a survey with sector experts to obtain their opinions using the Delphi method, and their preferences were verified with the aid of the SWARA method. The results present five essential indicators for managers to consider monitoring in their projects, with the KPI Equivalent cost of spare parts being the most important, with 22.96% weight.

Keywords: *Operation and Maintenance, Financial Indicators, SWARA.*