

NÍVEL DE IMPORTÂNCIA DE CRITÉRIOS NA TOMADA DE DECISÃO QUANTO A LOCALIZAÇÃO DE USINAS FOTOVOLTAICAS

Graciele Rediske¹ – gracielerediske@mail.ufsm.br

Paula Donaduzzi Rigo¹ – paularigo@mail.ufsm.br

Carmen Brum Rosa² – carmen.b.rosa@ufsm.br

Heloísa Pereira Burin¹ – burinheloisa@gmail.com

Julio Cezar Mairesse Siluk¹ – jsiluk@ufsm.br

Leandro Michels² – michels@gepoc.ufsm.br

¹Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

²Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Resumo. *A energia solar fotovoltaica desempenha um papel importante na evolução da participação de fontes alternativas na matriz energética mundial. Embora a energia fotovoltaica apresente diversas vantagens, considerando a oportunidade de agregar mais escala aos empreendimentos, a viabilização e atratividade do projeto dependem diretamente do local definido para instalação da usina. Por este motivo, a escolha da localização da instalação de um parque solar fotovoltaico é uma tomada de decisão complexa devido aos cuidados necessários que devem ser levados em consideração, como aspectos climáticos, proximidade de instalações e a presença de áreas ambientais protegidas. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi identificar os níveis de importâncias de critérios que influenciam a tomada de decisão quanto a localização de usinas fotovoltaicas. Com isso, realizou-se a seleção dos sete principais critérios fundamentais que englobam aspectos Econômicos, Ambientais, Climatológicos e Geomorfológicos. A ponderação dos níveis de importância foi realizada com especialistas da área de energia fotovoltaica por meio do Método Multicritério de Apoio a Decisão: Análise Hierárquica de Processos (AHP). Os resultados mostram que os fatores econômicos são os mais relevantes, obtendo ponderação de 38%. Mas ressalta-se que o atendimento dos demais fatores implica nos restantes 62% de peso na escolha do local ideal. A ponderação apresentada neste trabalho serve como base de dados para futuras aplicações de métodos de escolha de locais para instalação de usinas fotovoltaicas.*

Palavras-chave: *Energia Solar Fotovoltaica, AHP, Geração centralizada*

1. INTRODUÇÃO

A transição para um sistema de energia misto com abastecimento por fontes renováveis mais intensas está em andamento, apoiado pelos avanços tecnológicos e projeções de demanda (De Laurentis e Pearson, 2021). A integração de diferentes fontes de geração de energia é vista como uma estratégia fundamental para alcançar os objetivos de sustentabilidade, mesmo com a existência de consideráveis desafios técnicos, logísticos e econômicos para garantir o alcance de uma elevada porcentagem de integração. O consumo de energia elétrica no Brasil tende a triplicar até 2050 (EPE, 2017) e a necessidade de expansão da produção de energia através da fonte hídrica associada à grande dependência climatológica depara-se constantemente com variações no regime de chuvas. Este fato implicou, no início da década de 2000, na necessidade de diversificação da matriz elétrica nacional e na introdução de novas fontes de geração. Com isso, fontes alternativas de energia elétrica ganharam destaque com a implementação de programas de incentivo do governo que favorece a inserção de tecnologias de geração renovável de baixo impacto ambiental.

Nesse sentido, apresenta-se a geração de energia elétrica através da fonte solar por meio da tecnologia fotovoltaica, a qual tem-se mostrado promissora no mercado energético nacional. O Brasil possui uma extensa área territorial, com altos níveis de irradiação solar, o que viabiliza a implantação dos sistemas de geração de energia fotovoltaica (Pereira et al., 2012). Dentre os principais fatores motivacionais para inserção desta fonte encontram-se a queda nos preços dos equipamentos que compõem um sistema fotovoltaico e o gradativo aumento das tarifas de energia elétrica, que influencia o investimento em usinas fotovoltaicas. A capacidade mundial de geração da energia solar disparou de 40GW em 2010 para 219GW em 2015, quando representaram cerca de 20% de todas as novas capacidades de geração de energia instalada (IRENA, 2018). Além disso, o custo nivelado de eletricidade gerada pode cair mais da metade entre 2015 e 2025 (IRENA, 2018). No Brasil, o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) estima que a capacidade instalada de geração solar chegue a 8.300MW em 2024, sendo 7.000MW de geração centralizada e 1.300MW de geração distribuída (Portal Solar, 2017). A geração centralizada de energia, que consiste na geração através de grandes usinas, é responsável por 84% da geração do país e a sua contratação ocorre por intermédio da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em Leilões do Ambiente de Contratação Regulada (ACR). Sendo assim, a motivação para investimentos em novas usinas solares está assente fundamentalmente em dois pontos: na sua importância enquanto instrumento de combate às alterações climáticas (IRENA, 2018; Teske, 2010); e no contributo positivo desta tecnologia, aumentando a diversificação com outras fontes renováveis de energia para atender a demanda e garantir uma maior segurança ao sistema elétrico brasileiro (Teske, 2010).

Diante disto, ressalta-se para empreendedores e investidores que ao iniciar o processo de construção dos projetos de usinas fotovoltaicas, embora as condições de mercado tenham se tornado mais favoráveis, alguns pontos devem ser observados, e um deles é a escolha do local ideal para implementação da usina. A seleção de um local apropriado para a construção de uma usina solar eficiente requer algumas condições que aumentem seu potencial de lucro (Rediske et al., 2020). Existem parâmetros que devem ser considerados no momento da identificação das áreas aptas para instalação (Aly et al., 2017). Identificar áreas geograficamente adequadas para a construção de plantas solares de grande escala é um problema que exige uma tomada de decisão complexa (Garni e Awasthi, 2017), que não está apenas ligado a quantidade de irradiação solar que o local recebe (Vafaeipour et al., 2014). Há muitos outros aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais que devem ser considerados (Aly et al., 2017). A escolha do local destas usinas deve estar associada a critérios fundamentais que garantam o sucesso do projeto como, por exemplo, um local que prevê uma boa irradiação solar, possíveis conexões à rede (de preferência poucos quilômetros de distância da subestação de conexão e no menor nível de tensão possível) e o aval ambiental para a instalação na área (Greener, 2017).

Por fim, sabe-se que diferentes fatores estão associados a escolha do local adequado para a instalação de usinas fotovoltaicas, mas é necessário também ter conhecimento quanto ao impacto que cada um desses fatores que circundam esse investimento pode ter em um projeto de implementação de sistema fotovoltaico de larga escala. Por isso, foi identificada a necessidade de um estudo que auxilie os investidores na tomada de decisão da escolha de um local ótimo para a instalação de uma usina solar de grande escala. Com o intuito de suprir essa necessidade, este estudo objetiva calcular o nível de importância de critérios na tomada de decisão quanto a localização de usinas fotovoltaicas. As principais contribuições são a seleção dos fatores e a ponderação dos mesmos através do contato com especialistas da área. Assim, os resultados servem como base para futuras análises e cálculos de identificação de locais ótimos para usinas fotovoltaicas.

2. LEILÕES DE ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL

A contratação da geração centralizada ocorre por intermédio da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) por meio de Leilões do Ambiente de Contratação Regulada (ACR). Os ACR possuem como objetivo contratar energia pelo menor preço possível (modicidade tarifária), atrair investidores para construção de novas usinas com vistas à diversificação da matriz elétrica nacional. A promoção de leilões é considerada decisiva na opção de escolha do Brasil dentre as alternativas de alocação de plantas e investimentos para geração de energia, reforçando a posição privilegiada do Brasil no ranking de consumo e produção de energia limpa. Espera-se com os leilões reforçar a competitividade ao atrair empresas capazes de produzir energia ao menor custo, com benefício direto à promoção da cadeia produtiva local e ao consumidor brasileiro (ABINEE, 2012).

No ano de 2013, o Ministério de Minas e Energia incluiu a fonte solar nos leilões de energia A-3/2013 e A-5/2013, através das Portarias nº 226/2013 e nº300/2013, abrindo a possibilidade de ela competir igualmente com outras fontes, como eólica e térmicas, na modalidade “por disponibilidade”. Porém, mesmo com grande interesse na participação do leilão, nenhum projeto fotovoltaico foi aprovado por apresentarem custos elevados (EPE, 2014). Já no ano de 2014, mais precisamente no dia 31 de outubro de 2014, foi realizado o Leilão de Energia de Reserva (LER). Neste certame, os projetos fotovoltaicos competiram apenas entre si e não com outras fontes. Assim, houve um recorde de projetos cadastrados (400), os quais totalizaram mais de 10 GWp (EPE, 2014). Dos projetos cadastrados, foram contratados 31 empreendimentos com capacidade de 889,66 MW de potência e 202,3 MW médios de garantia física. O preço médio de contratação foi de R\$ 215,12/MWh, representando um deságio de 17,9% frente ao preço máximo fixado (R\$ 262,00/MWh).

Em agosto de 2015 foi realizado um novo leilão com produto específico para fonte solar (7º LER – Leilão nº 008/2015). O leilão resultou na contratação de 231,5 MW médios, agregando 833,8 MW de capacidade instalada ao SIN. O preço médio para o certame foi de R\$ 301,79/MWh, representando um deságio de 15,6% em relação ao preço máximo fixado (R\$ 349,00/MWh). Em novembro de 2015, foi realizado o 8º LER (Leilão nº 009/2015), que resultou na contratação de 33 empreendimentos de fonte solar, com capacidade de 929,34 MW de capacidade e 262 MW médio de garantia física. O preço médio de contratação foi de R\$ 297,74/MWh, um deságio de 21,8% em relação ao preço máximo fixado (R\$ 349,00/MWh). Já no ano de 2016 foram cancelados os dois Leilões de Energia de Reserva previstos para aquele ano, não havendo a contratação de novos projetos de fonte solar, cancelamento motivado pela redução da atividade econômica e a consequente queda da previsão de consumo de energia.

Em 18 de dezembro de 2017 foi realizado o leilão A-4, que resultou na contratação 25 novos projetos de geração, com 674,5 MW de capacidade e 228,7 MW médios de garantia física. O preço médio da contratação foi de R\$ 145MWh, com deságio de 55,7%. No dia 04 de abril de 2018 aconteceu o 27º leilão de Energia Nova A-4. Foram negociados Contratos de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado na modalidade por Quantidade (Hidrelétricas - suprimento de 30 anos) e por Disponibilidade (Eólicas, Solares e Biomassa - suprimento de 20 anos). O destaque foi a fonte solar fotovoltaica a qual arrematou 76% dos lotes comercializados, onde foram contratados 29 empreendimentos, totalizando 806,6 MW de potência em corrente alternada (saída dos inversores) e 1.032,5 MW em corrente contínua (saída dos módulos fotovoltaicos). No total a fonte solar vendeu 228,5 MWm de lotes, dos 240,5 MWm de garantia física disponível (95%). Os projetos que foram contratados deverão iniciar o fornecimento de energia elétrica a partir de 1º de janeiro de 2022.

Em 28 de junho de 2019 foi realizado o leilão A-4, que resultou na contratação de seis novos projetos de geração através da fonte solar, ao total foram contratados 81,1 MW médios, proveniente de 15 empreendimentos de fonte solar, eólica, Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) e biomassa. Os empreendimentos contratados precisam entrar em operação a partir de janeiro de 2023. Os contratos são de 20 e 30 anos. Pode-se visualizar de forma resumida os leilões de energia dos últimos anos na Tabela 1.

Tabela 1 – Leilões de Energia Solar

Leilão	Capacidade (MW)	Garantia Física (MW médio)	Preço Médio R\$/MWh
A-3 2014	889,7	202,3	R\$ 215,5
A-2 2015	833,8	214	R\$ 301,6
A-3 2015	929,3	262	R\$ 297,8
A-4 2017	574,0	170,2	R\$ 145,7
A-4 2018	806,6	228,5	R\$ 118,1
A-6 2019	203,7	62	R\$ 66,5
A-6 2019	530,0	163	R\$ 84,4

No ano de 2020 estavam previstos dois leilões que englobariam a fonte solar, Leilão de Energia Nova A-4 em abril de 2020 e o Leilão de Energia Nova A-6 que ocorreria em setembro de 2020, porém os agentes do setor elétrico, assim como de todos os demais setores da economia no Brasil e no mundo, foram surpreendidos pela excepcional mudança de hábitos de consumo da sociedade, na busca pelo enfrentamento ao contágio pelo coronavírus (Covid- 19), classificado como pandemia pela Organização Mundial de Saúde. Com este cenário reflexivo que vem exigindo a adoção de medidas extraordinárias, pela sociedade, pelos agentes econômicos e, inclusive, pelo Governo, que decretou o estado de calamidade pública, o Ministério de Minas e Energia e a ANEEL anunciam a postergação dos leilões a serem realizados em 2020, destinados a atender as necessidades futuras de energia das distribuidoras, no Sistema Interligado Nacional e nos Sistemas Isolados. Os preços altamente competitivos consolidaram a fotovoltaica como a fonte de energia renovável no Brasil de maior potencial. Atualmente, existem 15,3 GW de projetos solares já contratados em construção ou com obras não iniciadas. Destes, 4,77 GW são provenientes dos Leilões ACR.

3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho perpassou por duas etapas. A primeira etapa constituiu na seleção e discussão dos critérios importantes para análise do local adequado para instalação de usinas fotovoltaicas, embasando-se no estudo de Rediske et al. (2018). A segunda foi a aplicação da metodologia para cálculo do nível de importância. Diante dos fatores, percebe-se que muitas variáveis influenciam a escolha do local para a instalação de uma planta fotovoltaica evidenciam a complexidade na decisão sobre um local e, portanto, é necessário recorrer para ferramentas de suporte à tomada decisão, por isso, fez-se uso de um Métodos Multicritérios de Apoio à Decisão (MCDA), o método Análise Hierárquica de Processos (AHP). A lógica para construção quantitativa do grau de importância dos critérios é especificada na Tabela 2, de acordo com as etapas do método AHP.

Tabela 2 – Processos e Formulário da AHP

Continua

Processo		Descrição e Julgamento	Fórmulas
1	Construir a matriz de Julgamentos A	Os elementos diagonais da matriz são sempre 1. O critério da linha i é melhor que o critério da coluna j se o valor do elemento a_{ij} for maior que 1 e a_{ji} é o elemento recíproco. O número de critérios é igual a n .	$A = \begin{bmatrix} 1 & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & 1 \\ a_{1n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$
2	Multiplicar os elementos de cada linha	Após o julgamento da matriz A, é necessário multiplicar os n elementos da linha i .	$a_i = \prod_{i=1}^n a_{in}$
3	Calcular a raiz n -ésima	Após determinar o termo a_i , toma-se a raiz n -ésima do termo resultante de cada linha. Isso resultará em uma matriz de peso W_i .	$W_i = \sqrt[n]{a_i}$
4	Normalizar a matriz de pesos	Depois de calcular a matriz coluna dos pesos W_i é necessário normalizar os elementos.	$w'_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$

Processo		Descrição e Julgamento	Fórmulas
5	Apresentar a matriz dos pesos de cada critério	Com a normalização dos pesos, tem-se a matriz dos pesos dos critérios.	$W' = \begin{bmatrix} w'_1 \\ \vdots \\ w'_n \end{bmatrix}$
6	Verificar a consistência da Matriz A: calcular b_i	A consistência da matriz é avaliada através de seu autovalor máximo, que deve ser aproximadamente igual a n. Para isso, calcula-se o parâmetro b_i .	$b_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \times w'_j$
7	Verificar a consistência da Matriz A: calcular c_i	Dividir os resultados de b_i pelos valores da Matriz normalizada, W' .	$c_i = \frac{b_i}{w'_i}$
8	Verificar a consistência da Matriz A: calcular o autovalor máximo	O autovetor mostra a ordem de prioridade e o autovalor é a medida de consistência do julgamento.	$\lambda_{max} = \frac{\sum_{j=1}^n c_i}{n}$
9	Verificar a consistência da Matriz A: calcular o índice de consistência	Índice de consistência do julgamento (IC), onde n é a ordem da matriz dos pesos.	$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$
10	Verificar a consistência da Matriz A: calcular a relação de consistência	A relação de consistência (RC) é a razão entre o IC e um índice Randômico (IR) médio tabelado. A RC com 0,10 ou menos é aceitável.	$RC = \frac{IC}{IR}$

Onde:

A = Matriz de julgamentos de i linhas e j colunas ($\forall i, j = \{1, 2, \dots, n\}$);

w_i = Peso da linha i não normalizada;

W' = Matriz de pesos normalizada;

λ_{max} = Autovalor máximo da matriz de julgamentos;

IC = Índice de consistência da matriz de julgamentos;

IR = índice Randômico; e

RC = Relação de consistência da matriz de julgamentos.

Com base no procedimento exposto acima, nas etapas de 1 a 5 se estabelece o peso de cada um dos critérios selecionados e julgados pelos especialistas. Na sequência, os passos 6 a 10 investigam a consistência dos julgamentos dos critérios. De um modo geral, o método AHP ajuda os tomadores de decisão a organizar os aspectos críticos de um problema complexo em uma estrutura hierárquica, dividindo o problema em suas partes constituintes. Conquanto, uma vez determinados os pesos dos critérios, a avaliação dos locais alternativos para instalação de uma usina solar de grande porte pode ser conseguida com a ajuda de outro método analítico, a fim de melhorar as forças e eliminar as desvantagens das técnicas clássicas de MCDA de um único método. No entanto, o escopo deste estudo limita-se a ponderação dos critérios a fim de estabelecer a importância relativa entre os mesmos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo é dividido em duas seções. Primeira seção apresenta a definição dos critérios para escolha de locais e a sua descrição. A segunda seção apresenta a ponderação desses fatores.

4.1 Definição dos Critérios

Para a determinação da localização da instalação de um empreendimento solar de grande porte faz-se necessária a identificação de critérios que sejam relevantes para definir o melhor local para instalação da usina. A seleção destes critérios foi baseada na literatura, em seguida pelo conhecimento adquirido na área, acordado com especialistas em energia solar fotovoltaica. Com o objetivo de identificar os critérios determinantes na escolha do melhor local para projetos de instalações de geração de energia fotovoltaica de larga escala, os autores deste estudo, Rediske et al. (Rediske et al., 2018), realizaram uma revisão sistemática para identificar estes critérios. No estudo foram identificados 28 fatores que podem ser levados em consideração no momento de escolha do melhor local, sendo que destes, 6 foram considerados como determinantes na tomada de decisão. Constata-se com esses resultados que no momento de realizar um projeto fotovoltaico, na etapa de escolha do local, torna-se decisivo para tomada de decisão ótima que sejam avaliados os fatores locais de irradiação solar, distância das linhas de transmissão, declive, distância das estradas, distância das áreas urbanas e uso do solo. Rediske et al.(2018) destacam que esse resultado não significa que os demais fatores não tenham importância, que cabe ao agente responsável pela análise identificar junto aos fatores elencados os que lhe são mais importantes para respectiva tomada de decisão. Usar ou não um fator para análise da escolha do local pode ser relacionado as peculiaridades de cada país ou região. Contudo é indicado usar os fatores determinantes, podendo adicionar demais

fatores conforme a necessidade local, em função da cultura socioambiental, clima, orografia, política e economia diferentes.

Sendo assim, neste estudo foram usados os critérios determinantes elencados por Rediske et al. (2018) sendo substituído o fator distância das linhas de transmissão por distância das subestações, tendo em vista que se objetiva encontrar potenciais locais para implantação de projetos solares de larga escala, e, para isso é necessária a conexão a uma subestação, não podendo ser ligada diretamente nas linhas. Como o Brasil possui amplas áreas agrícola, além dos fatores determinantes foi estabelecido a utilização do fator capacidade agrológica. Em suma, neste estudo foram utilizados sete fatores classificados em quatro categorias: Ambiental (A), Localização (B), Clima (C), Geomorfológico (D), conforme pode-se observar na Figura 1. Os fatores são explicados na sequência.

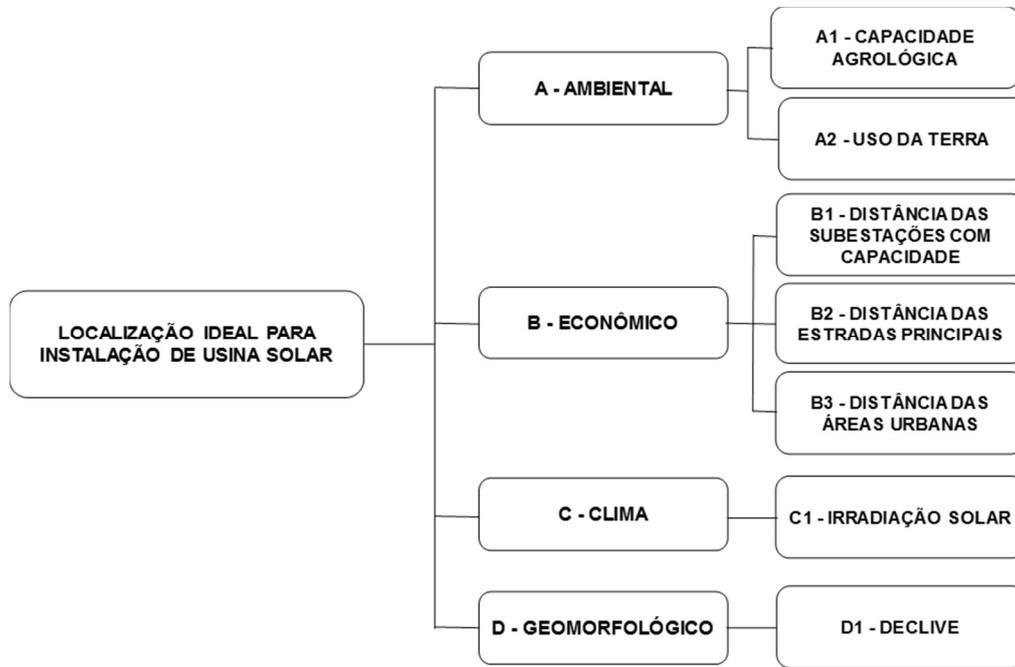


Figura 1 – Critérios e Subcritérios

Ambiental (A): As plantas de energia fotovoltaica podem ser consideradas desejáveis, porém em algum momento elas podem produzir efeitos adversos para a sociedade ou o meio ambiente (Sánchez-Lozano et al., 2013). Sabendo que uma usina solar ocupa grandes áreas, as condições da terra devem ser ponderadas no momento da escolha (Wu et al., 2014). Portanto o subcritério Capacidade Produtiva (A1) que reflete a produtividade da terra é considerado neste estudo, sob a interpretação de que quanto melhor a capacidade da terra, pior será considerado o local para a instalação. Outra condição importante é o Uso da Terra (A2), que para Uyan (Uyan, 2017) é um dos fatores mais importantes para seleção do local de instalação.

Econômico (B): É muito importante fazer uma avaliação correta do local da instalação, pois isso influenciará fortemente a viabilidade ou não do investimento (Rezaei et al., 2018; Uyan, 2017). O aspecto econômico da instalação fotovoltaica em um determinado local depende de vários critérios, como um bom acesso a usina, rede elétrica de alta tensão na vizinhança, subestações, mão de obra para construção e manutenção, entre outros subcritérios deste fator econômico. A localização adequada é dada por uma boa acessibilidade avaliada pela Distância das Subestações (B1). Sendo um fator econômico importante juntamente com a capacidade das subestações, pois se necessário a construção de novas Subestações elevará o custo do investimento. Do mesmo modo é desejável que as usinas de energia solar estejam próximas às estradas para reduzir os custos de transporte (Sánchez-Lozano et al., 2013; Uyan, 2017). Acesso de veículos à planta solar é crucial para fins de construção e manutenção (Aly et al., 2017). O subcritério Distância das Estradas Principais (B2) demonstra se a área apresenta boa estrutura, quanto mais próximo das estradas for a instalação da usina, melhor. Evitando assim o custo adicional da construção rodoviária e seus danos associados ao meio ambiente. Outro fator que necessita ser considerado é a Distância das Áreas Urbanas (B3). A proximidade com áreas mais populosas aumenta a mão de obra disponível para trabalhar no processo de construção e manutenção das usinas (Sindhu et al., 2017). Outro aspecto favorável é que a eletricidade gerada perto de grandes cidades (Aly et al., 2017), reduz o congestionamento na rede de transmissão, reduz perdas de energia e minimiza o custo de transmissão através da necessidade de longas e dispendiosas linhas de transmissão.

Clima (C): Considerando que a energia solar é de natureza intermitente, estudar o clima do local é muito importante para conhecer suas características ao longo do ano, pois influenciam diretamente o benefício da operação do sistema (Wu et al., 2014). Para que as instalações de energia solar em larga escala sejam economicamente viáveis, elas devem ser

construídas em áreas que recebem irradiação solar significativa (Aly et al., 2017). A Irradiação Solar (C1) corresponde a quantidade de energia solar que uma superfície do solo recebe ao longo de um período de tempo (dia).

Geomorfológico (D): O último critério selecionado define as características geomorfológicas da localização. A morfologia da terra pode limitar a capacidade do hospedeiro, de modo que áreas com inclinação alta devem ser evitadas (Sánchez-Lozano et al., 2013). A inclinação é um dos fatores altamente relevantes na seleção do local a ser instalado a usina de energia solar. O terreno plano é essencial para fazendas fotovoltaicas de grande escala (Garni e Awasthi, 2017). Sendo assim será considerado o subcritério Declive (D1).

4.2 Ponderação dos critérios

Na análise AHP os sete critérios foram comparados par-a-par, para que a importância pudesse ser calculada em relação aos demais critérios. Para comparar sete fatores entre si, uma matriz foi construída contendo os julgamentos de especialistas frente as comparações pareadas, resultando em 21 comparações (variáveis a_{ij}), da matriz de julgamentos A de ordem $n = 7$.

Na situação de o especialista julgar que os fatores são equivalentes a variável a_{ij} assume o valor 1 e o quando o especialista julgar que um fator é extremamente superior a outro, a variável a_{ij} assume o valor 9. Os valores alteram-se conforme a escala de Saaty. Esses julgamentos foram determinados por sete especialistas em geração de energia fotovoltaica (Doutores, empresários e pesquisadores da área), de diferentes regiões do Brasil. Os resultados são apresentados na Tabela 1, na qual cada número corresponde a um respondente.

Tabela 3 – Resultados da ponderação pelos especialistas

Subcritério	Especialista						
	1	2	3	4	5	6	7
A1	45%	44%	3%	3%	5%	5%	4%
A2	21%	21%	6%	21%	14%	5%	7%
B1	14%	15%	29%	45%	39%	24%	25%
B2	3%	4%	8%	10%	5%	12%	5%
B3	6%	4%	6%	4%	4%	3%	3%
C1	8%	10%	27%	5%	24%	43%	42%
D1	3%	2%	20%	13%	10%	9%	14%

Para garantir a consistência da decisão, o método AHP dispõe do recurso que calcula as Razões de Consistência (RC). Neste caso, a RC resultou em 0,23, considerada adequada para o julgamento de 21 variáveis por especialistas. O preenchimento da matriz de comparação por pares ocorreu individualmente a partir das respostas de cada especialista. No término do preenchimento da matriz foram calculados os pesos de cada especialista separadamente, e em seguida foi calculado a média destes pesos para utilização na análise das áreas. Os pesos resultantes da ponderação AHP podem se visualizadas na Figura 2.

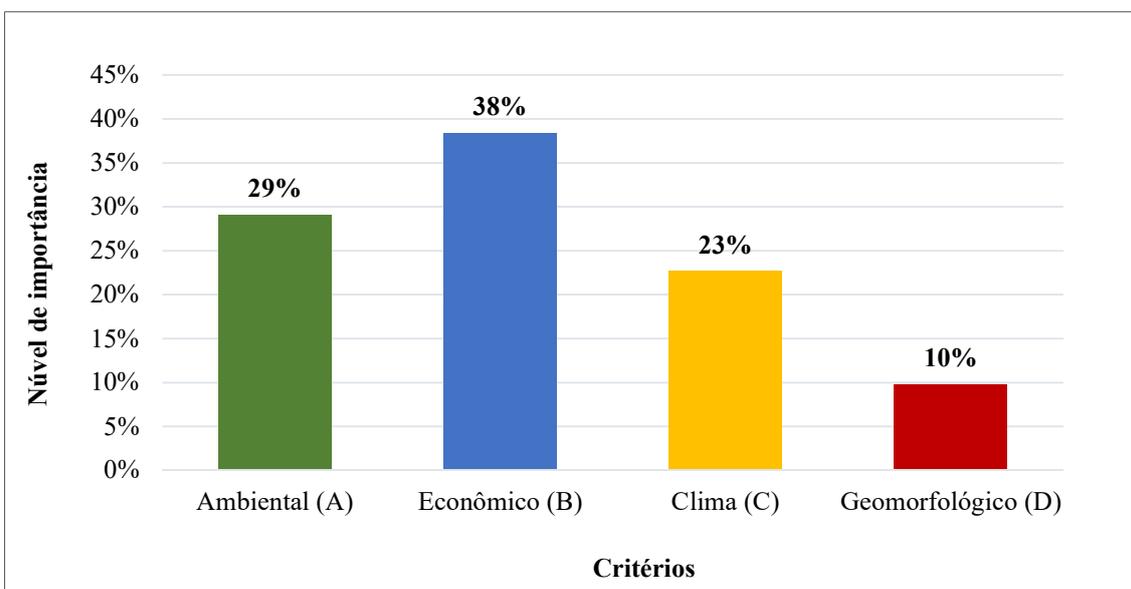


Figura 2 – Peso dos Critérios

Os resultados mostram que os fatores econômicos são os mais relevantes, obtendo ponderação de 38%. Mas ressalta-se que o atendimento dos demais fatores implica nos restantes 62% de peso na escolha do local ideal. O fator Distância das subestações, é considerado um fator extremamente importante para redução dos custos na construção de linhas até o acesso a subestação. Na Figura 3 é possível visualizar mais claramente a importância de cada um dos fatores em relação aos demais.

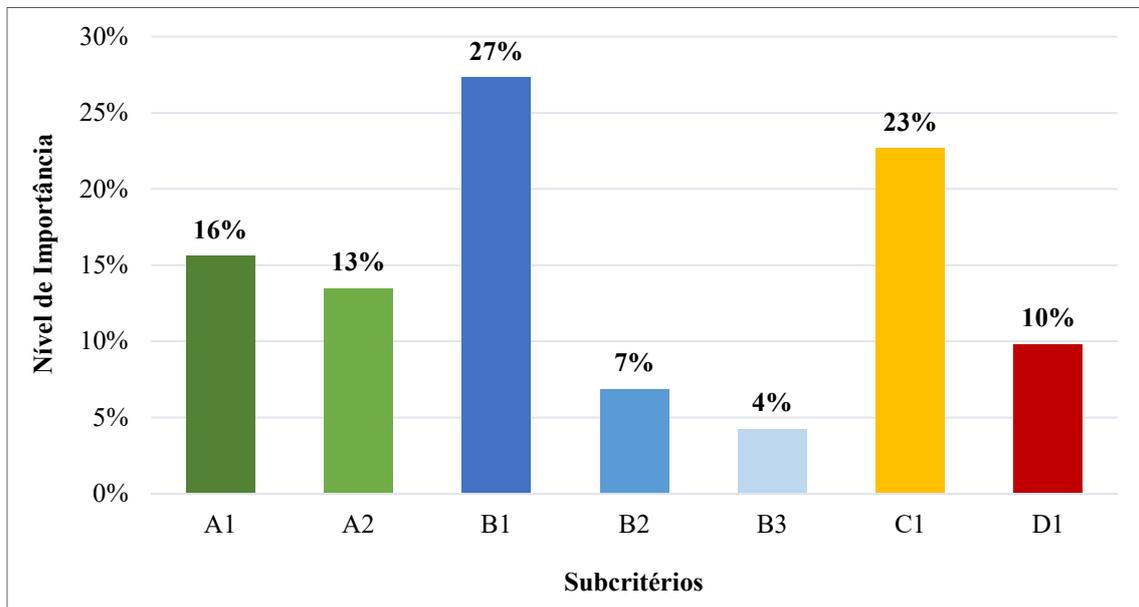


Figura 3 – Peso dos Subcritérios

O fator Distância das Subestações apresentou maior importância (B1 = 27%). Seguido do fator Irradiação Solar (C1 = 23%), fator que determina a capacidade de geração do local. Em ordem subsequente de importância aparecem os fatores Capacidade Agrológica (A1 = 16%) e Uso da Terra (A2 = 13%), por ser uma região com predominância agrícola, são terras com valores elevados, sua capacidade de produção e o seu uso interferem diretamente no custo do terreno. Em seguida aparece o fator Declive (D1 = 10%), pois inclinações leves são importantes para evitar gastos com preparação do terreno. Seguindo a ordem de importância, os fatores Distância das Estradas (B2 = 7%) e Distância das Áreas Urbanas (B3 = 4%), são os responsáveis por representar a infraestrutura e disponibilidade de mão de obra do local.

5. CONCLUSÃO

A geração de energia a partir da fonte solar pode contribuir para a obtenção de um futuro sustentável, seguro e com baixas emissões de carbono. Esta pesquisa apresentou uma abordagem que elenca os principais critérios que devem ser considerados no momento de escolha do local para instalação da usina solar e a ponderação destes critérios utilizando a metodologia AHP. Como etapa inicial da instalação de usinas de energia fotovoltaica, a identificação de locais adequados pode resultar em uma economia considerável de tempo e dinheiro. A utilização de critérios relevantes associados ao processo de tomada de decisão, e a correta ponderação dos mesmos, oferece resultados consistentes. Com uma seleção adequada do local pode ser fundamental para a competitividade da usina fotovoltaica perante outras fontes em leilões de energia

A geração de energia a partir de fontes renováveis segue sendo uma tendência para muitos países, principalmente no Brasil que apresenta características expressivas a favor da fonte solar. A elaboração de projetos de usinas solares de larga escala envolve um elevado investimento inicial, por isso a identificação de um local apropriado para a instalação é considerada um dos passos mais importantes no desenvolvimento deste setor. Vários critérios técnico-econômicos devem ser usados para identificar os locais mais adequados para hospedar instalações de energia solar. Aparentemente, com base em uma revisão bibliográfica, existem evidências de que este seja o primeiro estudo a elencar e ponderar os critérios de adequação do local para instalações de energia solar em grande escala usando a abordagem MCDA no Brasil. A ponderação apresentada neste trabalho serve como base de dados para futuras aplicações de métodos de escolha de locais, por serem a opinião de especialistas na área.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do INCTGD e dos órgãos financiadores (CNPq processo 465640/2014-1, CAPES processo no. 23038.000776/2017-54 e FAPERGS 17/2551-0000517-1).

REFERÊNCIAS

- ABINEE, A.B. da I.E. e E.-, 2012. Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira.
- Aly, A., Jensen, S.S., Pedersen, A.B., 2017. Solar power potential of Tanzania: Identifying CSP and PV hot spots through a GIS multicriteria decision making analysis. *Renew. Energy* 113, 159–175. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.077>
- De Laurentis, C., Pearson, P.J.G., 2021. Policy-relevant insights for regional renewable energy deployment. *Energy. Sustain. Soc.* 11, 19. <https://doi.org/10.1186/s13705-021-00295-4>
- EPE, 2017. Plano Decenal de Expansão de Energia 2026.
- EPE, 2014. Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos. Rio de Janeiro.
- Garni, H.Z. Al, Awasthi, A., 2017. Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. *Appl. Energy* 206, 1225–1240. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.024>
- Greener, 2017. Como as usinas fotovoltaicas estão se desenvolvendo no Brasil? [WWW Document]. *Tecnol. Sustentaveis*. URL <http://www.greener.com.br/como-usinas-fotovoltaicas-estao-se-desenvolvendo-no-brasil>
- IRENA - International Renewable Energy Agency, 2018. International Renewable Power Generation Costs in 2017.
- IRENA (International Renewable Energy Agency), 2018. International Renewable Power Generation Costs in 2017.
- Pereira, M.G., Camacho, C.F., Freitas, M.A.V., da Silva, N.F., 2012. The renewable energy market in Brazil: Current status and potential. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 3786–3802. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.024>
- Portal Solar, 2017. Produção de energia solar fotovoltaica pode dobrar em 2018.
- Rediske, G., Siluk, J.C.M., Gastaldo, N.G., Rigo, P.D., Rosa, C.B., [s.d.]. Determinant factors in site selection for photovoltaic projects: A systematic review. *Int. J. Energy Res.* 0. <https://doi.org/10.1002/er.4321>
- Rediske, G., Siluk, J.C.M., Michels, L., Rigo, P.D., Rosa, C.B., Cugler, G., 2020. Multi-criteria decision-making model for assessment of large photovoltaic farms in Brazil. *Energy* 197. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117167>
- Rezaei, M., Mostafaeipour, A., Qolipour, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., 2018. Investigation of the optimal location design of a hybrid wind-solar plant: A case study. *Int. J. Hydrogen Energy* 43, 100–114. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.147>
- Sánchez-Lozano, J.M., Teruel-Solano, J., Soto-Elvira, P.L., García-Cascales, M.S., 2013. Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 24, 544–556. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.019>
- Sindhu, S., Nehra, V., Luthra, S., 2017. Investigation of feasibility study of solar farms deployment using hybrid AHP-TOPSIS analysis: Case study of India. *Renew. Sustain. ENERGY Rev.* 73, 496–511. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.135>
- Teske, S., 2010. *Revolução Energética: A caminho do desenvolvimento limpo*.
- Uyan, M., 2017. Optimal site selection for solar power plants using multi-criteria evaluation: A case study from the Ayranci region in Karaman, Turkey. *Clean Technol. Environ. Policy* 19, 2231–2244. <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1405-2>
- Vafaipour, M., Zolfani, S.H., Varzandeh, M.H.M., Derakhti, A., Eshkalag, M.K., 2014. Assessment of regions priority for implementation of solar projects in Iran: New application of a hybrid multi-criteria decision making approach. *Energy Convers. Manag.* 86, 653–663. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.083>
- Wu, Y., Geng, S., Zhang, H., Gao, M., 2014. Decision framework of solar thermal power plant site selection based on linguistic Choquet operator. *Appl. Energy* 136, 303–311. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.032>

IMPORTANT LEVEL IN CRITERIA OF DECISION-MAKING OF PHOTOVOLTAIC PLANTS

Abstract. *Photovoltaic solar energy has been important in the evolution of the participation of alternative sources in the global energy matrix. Although photovoltaic energy has several advantages, being an opportunity to add more scale to the projects, the feasibility and attractiveness of the project depend directly on the defined site for the installation of the plant. For this reason, choosing the location for the installation of a solar photovoltaic park is a complex decision making due to the necessary precautions that must be taken into consideration, such as climatic aspects, proximity of facilities and the presence of protected environmental areas. Therefore, the objective of this work is to identify the importance levels of criteria that influence the decision making regarding the location of photovoltaic plants. Thus, the seven main fundamental criteria that encompass Economic, Environmental, Climatological and Geomorphological aspects were selected. The weighting of the levels of importance was performed with photovoltaic energy specialists through the Multicriteria Decision Support Method: Hierarchical Process Analysis (AHP). The results show that economic factors are the most relevant, with a weighting of 38%. But it is noteworthy that meeting the other factors implies the remaining 62% weight in choosing the ideal location. The weighting presented in this paper serves as a database for future applications of site selection methods, as they are the opinion of experts in the field.*

Key words: *Photovoltaic Solar Energy, AHP, Centralized Generation.*