

SOBRE MÉTODOS PARA SELEÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS VOLTADOS PARA HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL NO BRASIL

Christiane Barbosa Eluan Uchôa – chriseluan@yahoo.com.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental

Daniel Ramos Louzada

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Metrologia

4. Conversão fotovoltaica

Resumo. *Esse trabalho se propõe a elaborar análise exploratória sobre os diferentes módulos fotovoltaicos disponibilizados para comercialização, de modo a compreender se há formação de clusters que possam ser úteis no processo de escolha de tais dispositivos para uso em habitações de interesse social no Brasil. Foi utilizada a análise de clusters. Os resultados demonstraram a formação de três clusters de módulos; massa como o atributo que promove a diferenciação entre clusters. Também demonstraram que o processo de seleção de módulos pode ser realizado com combinação de várias técnicas de análise de modo a auxiliar o processo de escolha de dispositivos face a enorme diversidade ofertada no mercado.*

Palavras-chave: Módulo fotovoltaico, Método de seleção, Análise de *clusters*.

1. INTRODUÇÃO

No atual contexto de mudanças climáticas e alternativas de desenvolvimento baseadas na perspectiva da sustentabilidade, o consumo de energia desempenha papel importante.

O exame dos dados¹ do consumo por classe (residencial, industrial, comercial, rural, poder público, serviço público e iluminação pública) demonstra a manutenção da trajetória ascendente do setor residencial observada por Cohen, Uchôa (2012). Por outro lado, o consumo de energia por tal setor não reflete apenas opções tecnológicas de uso racional da energia, mas também reflete o estilo de vida das pessoas, suas escolhas de consumo e classes de renda.

Considerando a relação entre consumo de energia e classes de renda observada por Cohen (2002), Cohen, Uchôa (2012) elaboraram estudos sobre consumo de energia nos domicílios mais pobres do Brasil. Através da análise da dinâmica de tal consumo, as autoras observaram que, em um cenário de aumento de renda, há (i) uma tendência de aumento do consumo de energia; (ii) e que o acesso à energia elétrica se traduz em melhorias nas condições de vida em diferentes aspectos, os quais envolvem a dinâmica de funcionamento da residência, alimentação e alocação do tempo das mulheres². Além disso, destacaram a importância de se pensar em alternativas para garantir a oferta de energia elétrica aos domicílios mais pobres que não seja pela rede geral³, mas baseadas em fonte renovável (Cohen, Uchôa, 2013).

Por outro lado, sob a perspectiva da sustentabilidade, apenas tratar da oferta de energia elétrica não dá conta das questões energéticas preconizadas na contemporaneidade, a saber, geração de energia limpa por fontes renováveis e geração descentralizada (GD), para citar algumas. Além disso, também é preciso considerar a demanda de energia, através do seu consumo, examinando não somente a quantidade de energia consumida, mas também o seu padrão nas residências.

No trabalho realizado por Cohen, Uchôa (2012), as autoras consideraram o consumo total de energia, que inclui tanto o consumo de energia direta como indireta. Para examinar o consumo de energia indireta, utilizaram *proxies* que envolvem elementos arquitetônicos dos domicílios do país (Brasil), tais como: tipo de paredes, tipo de telhados e quantidades de cômodos. A análise de tais *proxies* indicou uma relação proporcional entre o uso desses elementos arquitetônicos e o consumo de energia indireta, de modo que quanto maior a presença de tais elementos no domicílio, maior o consumo de energia total nas unidades residenciais mais pobres do país.

Considerando a relação entre aspectos arquitetônicos e consumo de energia, Uchôa, Calili, Louzada (2022) elaboraram trabalho sobre contribuições da arquitetura para redução do consumo de energia em habitações de interesse

¹ EPE (2022)

² Cohen, Uchôa (2013), ressaltaram que diante do crescimento da quantidade de domicílios que possuíam geladeiras, possivelmente haveria interferência na alocação do tempo das mulheres dedicado ao preparo dos alimentos. A percepção de que poderia haver alteração na alocação do tempo das mulheres foi corroborada por Barbosa (2018), através de trabalho no qual são examinadas as tendências da alocação do tempo entre trabalho e lazer no Brasil e cujos resultados demonstraram que a ampliação da quantidade de horas dedicadas ao lazer pelas mulheres é consequência da diminuição da quantidade de horas dedicadas aos afazeres domésticos.

³ Uma das categorias da variável 0219 do dicionário de variáveis de domicílios da PNAD (Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios)/IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), que trata da forma de iluminação dos domicílios no Brasil.

social na cidade de Niterói-RJ. A análise da apropriação de alguns aspectos arquitetônicos permitiu identificar a possibilidade de se elaborar projetos para tal tipologia que proporcionem conforto térmico e com baixo consumo de energia. Esses autores também ressaltaram a necessidade de complementar projetos arquitetônicos com baixo consumo de energia com o uso de fontes energéticas renováveis.

Uchôa, Calili, Louzada (2022), de modo a complementar a análise realizada, recomendaram o desenvolvimento de estudos voltados para a elaboração de sistema de microgeração fotovoltaica para habitações sociais.

A proposição do uso da geração fotovoltaica se torna atraente, visto que dentre as diferentes alternativas de fontes energéticas no Brasil, a energia solar demonstra grande disponibilidade (o Brasil é um país com grande insolação em boa parte do seu território). Além disso, segundo Green (2019), a eficiência dos módulos aumentou e seu custo de implementação tem apresentado redução ao longo das duas últimas décadas.

Já Coelho, Arouca (2013) abordam as diferentes características tecnológicas do uso da energia solar. Para tanto, apresentam três categorias de tecnologias para utilização de tal energia, que são: tecnologia para aquecimento de água, tecnologia para outros usos e tecnologia fotovoltaica para conversão direta em energia elétrica. No presente trabalho será examinada a tecnologia fotovoltaica para conversão em energia elétrica. A escolha de tal tecnologia se ampara em dois aspectos, que são: (i) a fonte de energia que alimenta a maioria dos domicílios do país é a energia elétrica; (ii) e a necessidade de se pensar fontes energéticas alternativas que possam ser utilizadas para fornecer energia aos domicílios mais pobres do Brasil.

Por outro lado, mesmo que a energia fotovoltaica se mostre uma alternativa promissora para o Brasil e que o país disponha de escala de produção de dispositivos de tecnologia fotovoltaica para conversão em energia elétrica, uma questão que se coloca é se o uso de tal energia é viável em habitações de interesse social no país.

Dado que a premissa de que o uso da energia fotovoltaica é viável em habitações sociais e considerando a diversidade de dispositivos disponíveis no mercado, outras questões se colocam, tais como: como selecionar um dispositivo dentre tantos ofertados? Há método ou métodos que melhor orientem essa escolha? Quais critérios devem ser considerados para tal seleção?

Assim, o presente trabalho se propõe a elaborar uma análise exploratória sobre diferentes módulos de geração fotovoltaica disponibilizados para comercialização no país, de modo a identificar dentre as suas características (potência, eficiência, área e massa) a formação de agrupamentos (*clusters*) que possam ser úteis no processo de escolha de tais dispositivos para uso em habitações de interesse social. Esse trabalho está organizado em quatro seções, além desta introdução. Na seção 2 serão abordados elementos que envolvem a motivação para a escolha de diferentes aspectos que permeiam o desenvolvimento desse trabalho, tais como: tecnologia de utilização da energia solar e viabilidade do uso em habitações de interesse social no Brasil. Na seção 3 serão abordadas a metodologia e base de dados utilizadas nesse tipo de estudo e possíveis combinações de técnicas de análise que podem contribuir para a elaboração do estudo em questão. A seção 4 será dedicada à apresentação e análise dos resultados. Finalmente, na seção 5 serão elaboradas algumas considerações finais.

2. ENERGIA SOLAR

Conforme mencionado, nessa seção serão analisados diversos aspectos que contribuem para o entendimento da problemática que orienta esse trabalho. Inicialmente será examinada a tecnologia de utilização adotada, de modo que se tenha noção sobre as possibilidades de uso da energia solar, não sendo objeto deste trabalho explorar exaustivamente gerações de células fotovoltaicas e respectivos materiais. Posteriormente será analisada a viabilidade do uso de tal tecnologia em habitações sociais.

2.1 Tecnologias de utilização

Entre as diferentes fontes de energia renovável, a energia solar é uma das fontes que melhor se adequa as características físicas do território brasileiro, considerando que grandes áreas do país sofrem radiação solar em quantidade e frequência que permitem o bom funcionamento dos sistemas solares. Segundo Coelho, Arouca (2013), o funcionamento de tais sistemas considera importantes variáveis, tais como: ângulos de incidência da radiação, ângulo azimutal, elevação e radiação.

O trabalho elaborado por Moreira Junior, Souza (2020) destaca como vantagem do Brasil em relação a Alemanha, entre outras, a irradiação média anual entre 1.200 e 2.400 Kw/m²/ano, cujos valores estão bem acima da média europeia e que demonstram o potencial do país no tocante a tal fonte alternativa. Por outro lado, estes autores mencionam que a irradiação solar captada de forma inclinada em todas as capitais brasileiras apresenta valores que variam entre 4,9 Kw/m²/dia e 6 Kw/m²/ano, o que segundo Moreira Junior, Souza (2020, p. 380) “representa uma alta uniformidade de irradiação solar no território nacional”.

Deste modo, os aspectos mencionados por Coelho, Arouca (2013); Moreira Junior, Souza (2020) podem tornar a energia fotovoltaica uma importante alternativa para diversificação da matriz energética do Brasil.

Coelho, Arouca (2013) sistematizam três categorias de tecnologias para utilização da energia solar, que são: tecnologia para aquecimento de água, tecnologia para outros usos e tecnologia fotovoltaica para conversão direta em energia elétrica. Nesse trabalho será examinada a tecnologia fotovoltaica, cuja motivação, conforme mencionado, se

ampara em dois aspectos: a maioria dos domicílios do país utilizam energia elétrica como fonte de energia; necessidade de se pensar em alternativas de fontes energéticas que possam ser utilizadas pelos domicílios mais pobres do Brasil.

Dado que a maioria dos domicílios do país tem na energia elétrica sua fonte energética, que o inventários de bens da POF 2016-2017 (Pesquisa de Orçamentos Familiares / Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) do país demonstra que a grande maioria de tais equipamentos utiliza energia elétrica, então se torna relevante examinar a tecnologia fotovoltaica para conversão direta em energia elétrica, uma vez que tal tecnologia pode permitir o pleno funcionamento dos domicílios do país em suas diferentes configurações (moradia, lazer, trabalho), melhorar as condições de vida, manutenção da renda e o bem-estar dos domicílios que romperam a linha da pobreza.

De acordo com Lima *et al.* (2020), as células fotovoltaicas podem ser classificadas por gerações e cujas categorias seguem critérios baseados em materiais utilizados, métodos de processamento empregados e estágio de maturidade comercial. Entre tais células é possível identificar dispositivos fabricados com silício, telureto de cádmio, entre outros.

A primeira geração de células fotovoltaicas engloba aquelas baseadas em *wafers* de silício. Podem ser seccionadas em dois grupos, monocristalinos e policristalinos. Mesmo sendo as mais antigas, ainda são mais populares e as mais comercializadas.

A segunda geração é também denominada filmes finos. Trata-se de painéis fabricados no formato de filmes finos utilizando materiais como silício amorfo, telureto de cádmio e composição de elementos como cobre, gálios entre outros. Oferece vantagens como flexibilidade, facilidade de instalação, tempo de vida médio de 25 anos e baixo custo de processamento. Mas como desvantagem apresenta eficiência mais baixa se comparada com a primeira geração.

A terceira geração abrange novas tecnologias, as quais, possivelmente, não estão disponíveis em escala industrial. Podem ser fabricadas com nanocristais, polímeros, corantes. Como ainda estão em fase de desenvolvimento, são comparativamente menos eficientes em relação as gerações anteriores. Mas podem oferecer vantagens como flexibilidade mecânica, baixo custo e facilidade de processamento.

A eficiência das diversas tecnologias disponíveis no mercado brasileiro⁴ é um atributo a ser considerado na decisão de aquisição desses equipamentos. Na Tab. 1 é possível observar a eficiência entre as diversas tecnologias de células fotovoltaicas e de cada uma respectivamente.

Tabela 1 – Valores de eficiência das diversas tecnologias fotovoltaicas

Tecnologia		Eficiência da célula em laboratório	Eficiência dos módulos comerciais
Cristalino	Silício monocristalino	25,0%	14 - 21%
	Silício policristalino	21,3%	14 - 16,5%
Filmes finos	Silício amorfo	13,6%	6 - 9%
	Silício microamorfo	12,0%	7 - 9%
	CIGS	18,8%	8 - 14%
	Telureto de cádmio	16,4%	9 - 12%

Fonte: Moreira Junior, Souza (2020)

Considerando a eficiência entre tecnologias, examinando a Tab. 1, a de silício monocristalino é a que apresenta maior percentual de eficiência, seguida pela de silício policristalino, sendo observado um $\Delta\%$ de 17,37. Dado o limite inferior e superior da eficiência dos módulos comerciais, o limite superior da eficiência dos módulos comerciais também é maior no silício monocristalino. Por outro lado, comparando a eficiência em laboratório com a eficiência do módulo comercial, o $\Delta\%$ do silício monocristalino é de -16,00 enquanto o de policristalino é de -22,50.

Uma vez examinados alguns aspectos da tecnologia de utilização adotada, então o próximo passo é examinar a viabilidade do uso da tecnologia fotovoltaica em habitações de interesse social e a motivação para o uso de tal tipologia habitacional.

2.2 Viabilidade de uso em habitação de interesse social no Brasil

Dado a importância de se pensar em fontes alternativas para geração de energia elétrica para domicílios de baixo poder aquisitivo (ou baixa renda) por diferentes motivações já mencionadas, esse trabalho prossegue abordando a viabilidade da geração fotovoltaica nessas unidades residenciais. Para tanto serão examinados trabalhos desenvolvidos tanto para comunidades (ou aglomerados subnormais, categoria utilizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) quanto para projetos habitacionais voltados para tal segmento de renda, denominadas de habitações de interesse social.

Cohen, Weiss, Martins (2015), considerando a necessidade de inserção energética de domicílios com baixo poder aquisitivo, elaboraram estudo sobre projeto de microgeração distribuída fotovoltaica para a comunidade da Mangueira no município do Rio de Janeiro. Tal estudo, através de análise de custo de oportunidade, mostrou a viabilidade técnica,

⁴ O Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) homologa três tipos de tecnologias, sendo estas: silício monocristalino, silício policristalino e filmes finos.

econômica e social de tal projeto. Por outro lado, Cohen, Weiss, Martins (2015) mencionaram alguns fatores que poderiam prejudicar a viabilidade de tal projeto, tais como: área disponível do telhado pequena, alta incidência de sombras e más condições arquitetônicas.

Chaves (2020) desenvolveu estudo sobre o uso de energia solar em favelas, onde conclui que tal uso é possível, mas com ação em rede de parcerias entre organizações de todos os setores envolvidos. Os resultados demonstram que o uso de energia limpa em comunidades também promove a educação dos moradores e gera empregos. São mencionados elementos como a singularidade de cada favela para implementação de tais projetos, corroborando os fatores anteriormente mencionados por Cohen, Weiss, Martins (2015) que poderiam comprometer a viabilidade desses projetos.

Os resultados obtidos na implementação de projetos de geração fotovoltaica nos condomínios Morada do Rodeadouro e Praia do Salitre, ambos do Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV), em Juazeiro – Ba⁵, são interessantes por diversos aspectos. Entre estes, a tipologia habitacional utilizada - habitação social. Ou seja, o uso desse tipo de habitação contorna os fatores mencionados pelos trabalhos anteriores que podem interferir na viabilidade de projetos de geração fotovoltaica, uma vez que possuem projeto arquitetônico, padrão de urbanização e ocupação regulares. Por outro lado, também são abordados aspectos que envolvem viabilidade técnico-econômica, melhoria nas condições de vida da população e sustentabilidade, entre outros.

O trabalho elaborado por Cunha, Torres, Silva (2017), demonstra que os projetos implantados em Juazeiro (Ba) mobilizaram a sociedade civil, o poder público e as empresas a atuarem conjuntamente em favor do meio ambiente. Por outro lado, esses projetos também funcionaram como elemento de redução das desigualdades regionais e sociais, gerando renda, desenvolvendo a consciência ambiental e proporcionando empoderamento das comunidades.

Melo *et al.* (2018) também realizaram estudo sobre os projetos implementados em Juazeiro – Ba, cujos resultados demonstram o envolvimento da comunidade nos projetos, a organização da população, melhoria na qualidade de vida dos moradores e a validação de modelos de negócios sob a perspectiva técnico-econômica e social.

Vale *et al.* (2017) elaboraram análise econômica de dois projetos do PMCMV sobre geração distribuída de energia fotovoltaica, sendo um deles no estado de São Paulo e o outro no Piauí. Os resultados demonstram que, pelo impacto da isenção do ICMS, é mais vantajoso investir em São Paulo que no Piauí.

Os resultados apresentados pelos diferentes trabalhos examinados demonstram tanto a viabilidade técnico-econômica de projetos de geração fotovoltaica em habitações sociais quanto possibilidades de melhorias de condição de vida das populações, geração de emprego e renda.

3. ABORDAGEM METODOLÓGICA E BASE DE DADOS

Considerando que a problematização que envolve esse trabalho, o objetivo dessa seção é tratar do modo como será conduzido o estudo sobre métodos para escolha dos módulos fotovoltaicos.

Será organizada da seguinte forma: inicialmente, serão examinadas algumas alternativas para seleção de módulos, de modo que se tenha a dimensão dos diferentes atributos que orientam tais escolhas, em seguida serão efetuadas algumas reflexões sobre o método e técnicas de análise do objeto em questão, de modo que seja definida técnica de análise. Posteriormente, será abordada a base de dados utilizada.

3.1 Método e técnicas de análise – análise exploratória

Através do exame da literatura⁶ foi possível observar que o processo de escolha de tais dispositivos é realizado através do uso de técnicas de multicritério envolvendo diferentes atributos, tais como custos, potência, corrente elétrica, eficiência, temperatura, degradação, entre outros.

Por outro lado, algumas questões se colocam, tais como: como se dá o processo de seleção dos dispositivos que irão compor a análise baseada em multicritérios? Essa escolha se baseia em aspectos previamente definidos pelo tomador de decisões? De que forma essas escolhas podem afetar o resultado do processo de escolha?

Diante de tais questões, é recomendável o uso de alguma técnica exploratória que possibilite identificar a existência de algum relacionamento entre tais atributos, que resultem em agrupamentos e que possam ser utilizados no processo de decisão mencionado.

Considerando o uso de diferentes atributos, de antemão há a compreensão de que o método de análise a ser utilizado deverá contemplar tal realidade, ou seja, terá que tornar possível o uso de diversos atributos ao mesmo tempo.

Por outro lado, um aspecto interessante dessa situação é a possibilidade de combinação de métodos e técnicas de análise⁷. Assim, em um primeiro estágio do trabalho poderá ser realizada uma análise exploratória de modo a examinar se há algum tipo de relação entre os dispositivos analisados. Posteriormente, os resultados encontrados em tal exploração podem ser utilizados na composição do processo de escolha do dispositivo. Ou seja, o uso de uma técnica de análise de dados exploratória não exclui a análise baseada em multicritérios. Pode ser usada como uma técnica complementar de modo a auxiliar a seleção de atributos que irão compor tal processo sem nenhuma definição prévia realizada pelo tomador de decisão, mas amparada em uma classificação taxonômica, baseada em método numérico.

⁵ Silva, Ferreira, Nascimento (2016)

⁶ Baloa, Sagbansuab (2016)

⁷ Hair *et al.* (2009); Lattin *et al.* (2011); Loesch, Hoeltgebaum (2012)

A análise exploratória pode ser realizada através de diversas técnicas multivariadas. Dado a diversidade de dispositivos e atributos, alguns aspectos devem ser considerados tais como: natureza dos atributos (quantitativa ou qualitativa), tipo de relação que se estabelece entre os atributos (dependência ou interdependência). Isso porque tais aspectos funcionam como sinalizadores do tipo de técnica de exploração que pode utilizada.

Examinando os dispositivos, é possível observar que os atributos são quantitativos, ou seja, fornecem unidades de medida para cada um deles; que são interdependentes, ou seja, o dispositivo não é compreendido por um único atributo, mas por todos simultaneamente.

Considerando a natureza dos atributos e a relação de interdependência, a análise exploratória será realizada através da análise de *clusters* ou de conglomerados. Essa técnica de análise se mostra interessante no desenvolvimento desse trabalho na medida em que trata de grupo de objetos (diferente da análise fatorial, que trata apenas de grupo de variáveis), que nenhuma definição prévia sobre quantidades de grupos é estabelecida (diferente da análise discriminante, que está ligada a um número conhecido de grupos), permite identificar se há alguma relação de semelhança entre os atributos e se é possível estabelecer algum tipo de agrupamento.

O estabelecimento de algum tipo de agrupamento se revela interessante na medida em que pode racionalizar o método de escolha. Isso porque a análise de *clusters*, entre diversos usos⁸, também pode ser utilizada quando se deseja reduzir o número de linhas em uma matriz de observações de objetos ou variáveis. E tal redução se baseia em métodos numéricos.

Essa técnica é uma técnica de análise multivariada que tem como objetivo reunir ou agrupar objetos, tendo como base as características destes. Assim, os objetos são agrupados (classificados), através de algoritmos de agrupamento⁹, de acordo com aquilo que cada elemento tem de semelhante em relação aos outros pertencentes a determinado grupo. Os agrupamentos resultantes de tal classificação deverão apresentar alto grau de homogeneidade interna e alta heterogeneidade externa.

Para realizar a análise de agrupamento, entre outros aspectos, é necessário definir medida de semelhança entre os objetos e forma de classificação. O ponto de partida de tal análise é uma matriz de dados.

Para medir a distância ou a semelhança entre os objetos são utilizadas diversas formas de medidas. Em caso de variáveis quantitativas, são utilizadas medidas de distância¹⁰. As mais usadas são a distância euclidiana, distância euclidiana ao quadrado, distância absoluta e distância percentual. Quando se trata de variáveis binárias, são usadas medidas de similaridade, tais como distância euclidiana, distância euclidiana ao quadrado, coeficiente de Jaccard.

Há diversas formas de agrupar os objetos, entre estas os algoritmos hierárquicos. Tais algoritmos se diferenciam através da forma como se define a proximidade entre dois agrupamentos (ligação entre os *clusters*). As mais usadas são o vizinho mais afastado e entre os grupos. Na primeira forma, o critério de agrupamento é baseado na distância máxima entre indivíduos em cada grupo, representando a menor esfera que pode englobar todos os objetos de ambos os grupos. (Corry *et al.*, 2007, p. 347). Já na segunda forma, O critério de agrupamento é a distância entre todos os indivíduos de um grupo em relação a todos de outro. (Corry *et al.*, 2007, p. 347).

3.2 Base de dados

Conforme mencionado, o ponto de partida da análise de agrupamento é uma matriz. Neste caso, tal matriz terá linhas compostas por módulos fotovoltaicos e colunas por diferentes atributos das placas.

Os atributos que compõem as colunas desta matriz foram observados em diferentes trabalhos. Porém o trabalho elaborado por Baloa, Şağbanşuab (2016) apresenta uma sistematização interessante para tais critérios, uma vez que possibilita o uso de diversas alternativas dentre aquelas disponíveis nas especificações técnicas de cada fornecedor dos dispositivos em questão. Em tal sistematização, são utilizadas cinco categorias para os critérios, tais como: elétricos, mecânicos, financeiros, cliente, ambientais.

Muito embora a sistematização proposta por tais autores seja interessante, é necessário conciliar a sistematização dos critérios com a base de dados disponível. Para o desenvolvimento desse trabalho foi utilizada a relação de módulos fotovoltaicos do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), de 25/08/2021. Conciliando a base de dados com a sistematização de critérios mencionada, foram utilizadas duas categorias com seus respectivos critérios e unidades de referência:

Elétricos. Potência máxima (W), Eficiência (%)

Ambientais. Área (m²), Peso (Kg)

Desse modo, tal compatibilização resultou em uma matriz cujas linhas são compostas por diversos módulos fotovoltaicos e as colunas por critérios como potência, eficiência, área e massa.

Ainda sobre a base de dados utilizada, alguns aspectos devem ser considerados, tais como padronização da base de dados. Isso porque, através da padronização dos dados é possível tornar comparáveis descritores medidos em unidades

⁸ Corry *et al.* (2007, p. 327)

⁹ Os algoritmos podem ser classificados em duas categorias, hierárquicos e não-hierárquicos.

¹⁰ Medidas que indicam a similaridade entre os objetos examinados. Salientam a grandeza dos valores e representam como similares aqueles que estão mais próximos.

diferentes. Nesse caso, as colunas da matriz são compostas por diferentes atributos com suas respectivas medidas. Para que possam ser submetidos à técnica exploratória mencionada, devem ser padronizados. Esse é um requisito necessário antes da realização da análise dos dados. A padronização será efetuada de acordo com a Eq. (1):

$$y'_i = \frac{y_i - \bar{y}}{S_y} \quad (1)$$

Onde:

Y_i corresponde a cada termo da matriz

\bar{y} corresponde à média dos valores de cada atributo

S_y corresponde ao desvio padrão dos valores de cada atributo.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para desenvolver análise exploratória sobre diferentes módulos de geração fotovoltaica disponibilizados para comercialização no país, foi realizada a análise de *clusters*.

Tal técnica tem como ponto de partida uma matriz, cujas linhas são compostas por diferentes módulos fotovoltaicos e as colunas pelos respectivos atributos: potência, eficiência, área e massa. Para medida de distância foi utilizada a distância euclidiana quadrática¹¹, como método de aglomeração foi utilizado algoritmo hierárquico, com procedimento de ligação dos clusters “vizinho mais distante”.

Para validação da proposta de agrupamento foram realizados alguns testes, tais como uso de outros métodos e critérios de medidas de distância.

Em seguida, foi realizada uma sequência de dois agrupamentos. Para cada agrupamento foi realizada uma análise ANOVA, onde são avaliados os níveis de significância das variáveis, sendo ser excluídas de cada análise aquelas cujo nível de significância é superior a 0,05.

Os resultados obtidos no primeiro agrupamento demonstraram a necessidade de eliminação de módulo que apresente características muito diferente dos demais (*outlier*) que interferia nos limites de definição dos agrupamentos.

Os resultados obtidos no segundo agrupamento podem ser considerados satisfatórios, visto que todas as variáveis usadas nesta aglomeração se mostraram significativas ao nível de 5 % e que não havia presença de *outliers*.

A solução com três agrupamentos também se mostrou a melhor em todas as aglomerações, tendo como referência regra de parada que consiste em observar a distância entre os grupos. Quando for observado um grande incremento, deve ser selecionada a solução anterior considerando a lógica de que a última combinação gerou um substancial decréscimo na similaridade.

Considerando a potência como atributo de aglomeração, foram identificados três clusters, os quais são apresentados na Tab. 2.

Tabela 2 – Agrupamentos resultantes da análise exploratória

Agrupamento	Potência (w)	Número de elementos
<i>Cluster 1</i>	95 a 200	22
<i>Cluster 2</i>	240 a 455	243
<i>Cluster 3</i>	330 a 335	4

Fonte: elaboração própria

Na Fig. 1 são apresentados os agrupamentos, considerando os atributos potência e área. Ao examinar a Fig. 1, é possível observar que, quanto maior a metragem da placa, maior a potência; que o *cluster 1* está disperso entre a região que vai de 0,6 a 1,3 m². Já o *cluster 2* encontra-se concentrado em duas regiões, que se localizam em 1,6 m²; 2,0 m² e em suas vizinhanças. Nesse *cluster*, a potência apresenta-se concentrada entre 250W e 300W e entre 330W e 400W. Corroborando a Tab. 1, há uma sobreposição do *cluster 3* em relação ao *cluster 2*.

¹¹ $d(x,y) = \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2$

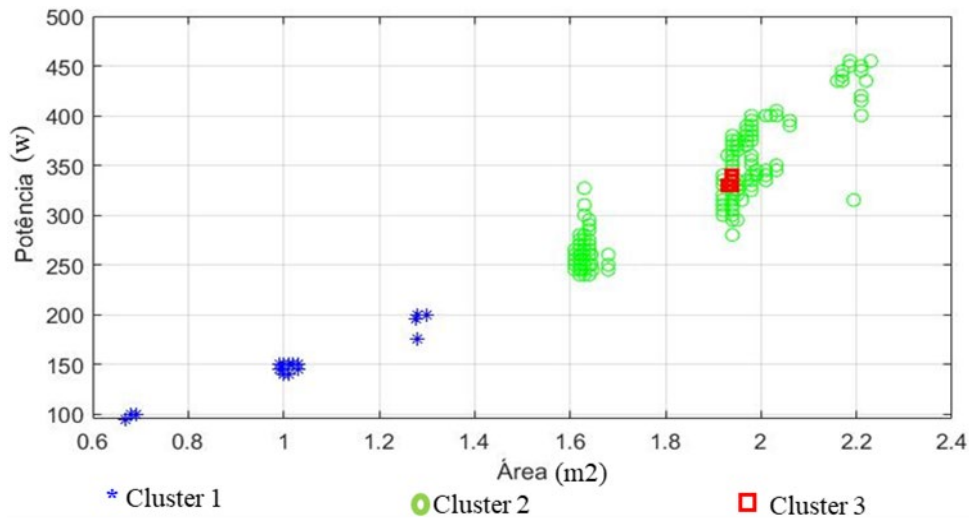


Figura 1- Agrupamentos por atributos: potência (w) x Área (m²)

Na Fig. 2 são apresentados os agrupamentos, considerando os atributos eficiência e área. Ao analisar a Fig. 2, é possível observar que, quanto maior a metragem da placa, maior a eficiência; que os *clusters* estão concentrados nas mesmas regiões de área da Fig. 1. Mas no *cluster 2*, a eficiência apresenta-se dispersa entre 15% e 21%. Também há sobreposição do *cluster 3* sobre o *cluster 2*.

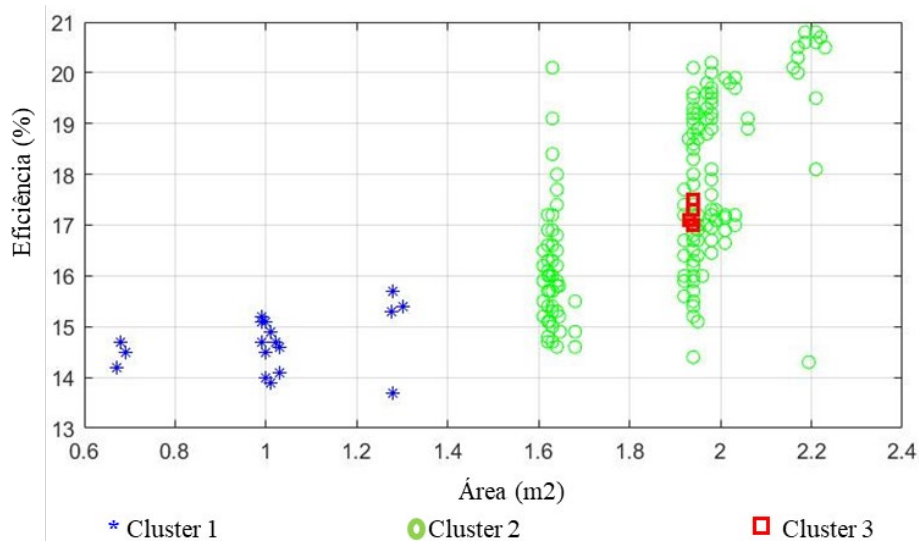


Figura 2 – Agrupamentos por atributos: eficiência (%) x área (m²)

Na Fig. 3 são apresentados os agrupamentos, considerando os atributos eficiência e potência. Assim como na Fig. 1 e Fig.2, observa-se a mesma relação entre tais atributos. Ou seja, quanto maior a potência, maior a eficiência. O *cluster 1* localiza-se nas regiões de menor potência e menor eficiência. Por outro lado, o *cluster 2* localiza-se nas regiões de maior potência e, conseqüentemente, maior eficiência. Também há sobreposição do *cluster 3* em relação ao *cluster 2*.

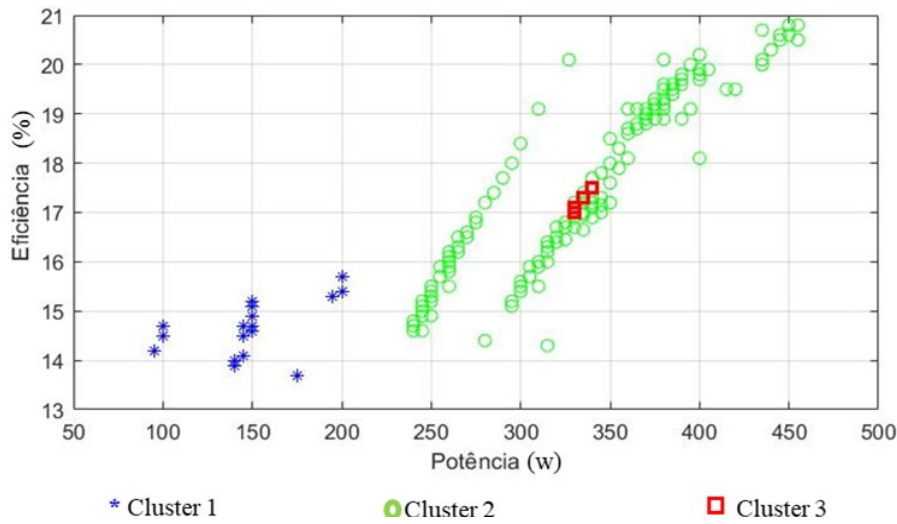


Figura 3 – Agrupamento por atributos: eficiência (%) x potência (w)

Na Fig. 4 são apresentados os agrupamentos considerando os atributos potência e massa. É possível observar que, quanto maior a potência, maior a massa. O *cluster 1* localiza-se nas regiões de menor potência e menor massa. O *cluster 2* está posicionado nas regiões de maior potência e maior massa. Diferente das Fig.1, Fig.2 e Fig.3, o *cluster 3* não se apresenta sobreposto ao *cluster 2*. Na Fig. 4 é possível identificar que a massa é o atributo que quebra a relação de homogeneidade entre esses dois *clusters*, promovendo a separação do *cluster 3* e do *cluster 2*. Assim, mesmo que os elementos do *cluster 3* possuam a mesma potência que os elementos do *cluster 2*, apresentam maior massa.

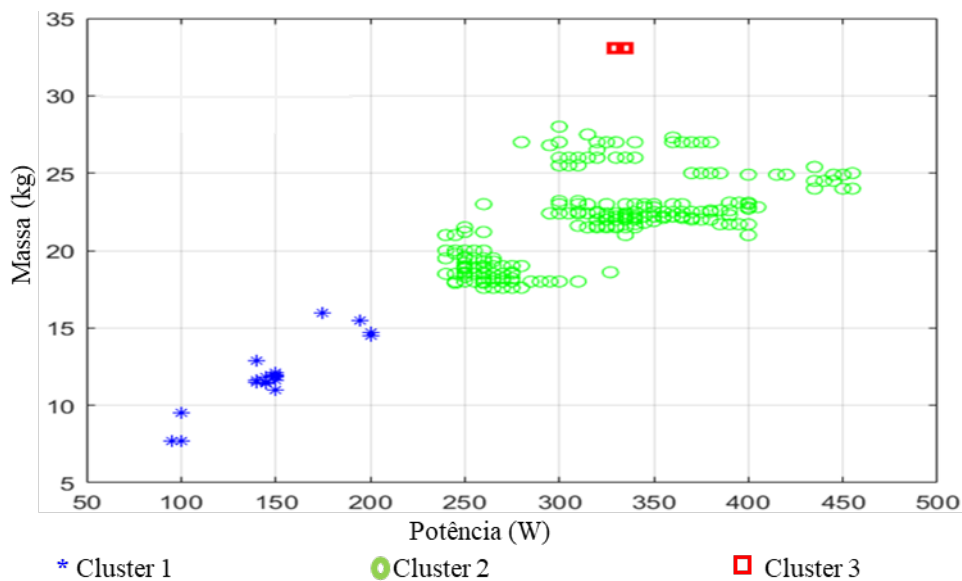


Figura 4 – Agrupamento por atributos: potência (%) x massa (kg)

Por fim, na Fig. 5 são apresentados os agrupamentos considerando os atributos área e massa. Na qual observa-se que quanto maior a metragem da placa, maior a massa. Assim como nas Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3 e Fig. 4, o *cluster 1* localiza-se na região de menor área e menor massa; o *cluster 2* está na região com maior metragem e massa. O *cluster 3* também não se sobrepõe ao *cluster 2*.

A identificação da massa como o atributo que promove a diferenciação entre o *cluster 2* e o *cluster 3* é de grande importância para o processo de escolha da placa sob diversos aspectos. Quando o sistema fotovoltaico será posicionado no teto das construções, selecionar equipamentos com menor massa é importante. Isso porque maior massa implica em maior esforço sobre as estruturas, que possivelmente sofrerão mais desgaste em menor tempo e conseqüentemente, demandarão mais esforço de manutenção.

Outro aspecto a ser considerado é o custo de transporte de tais equipamentos. Isso porque o peso é componente muito importante no cálculo do frete. Ou seja, quanto maior o peso, maior o custo para transportar tais equipamentos, o que pode interferir no custo total de aquisição.

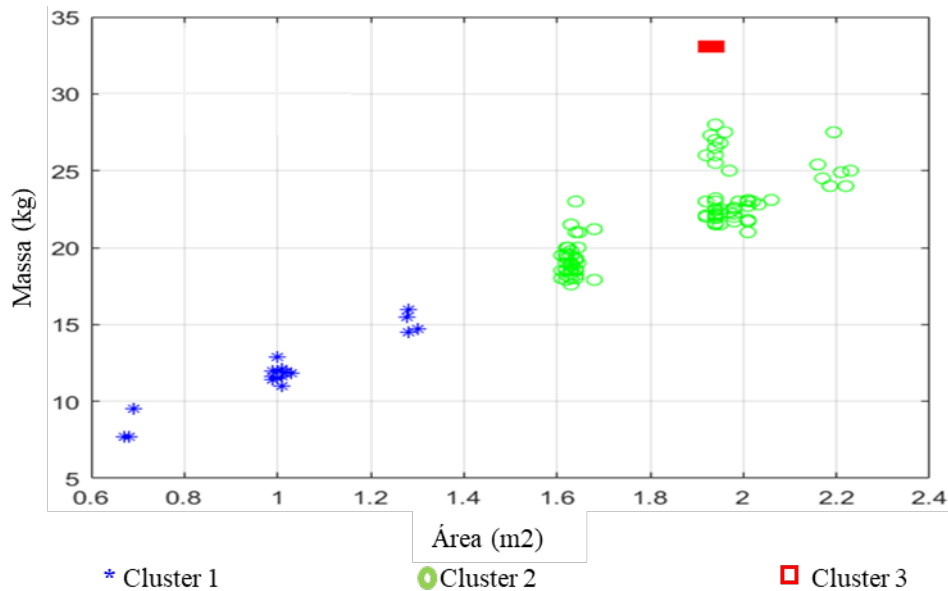


Figura 5 – Agrupamento por atributos: área (m²) x massa (kg)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme mencionado no início deste trabalho, no debate contemporâneo sobre mudanças ambientais globais o consumo de energia tem desempenhado papel importante.

Dentre os diferentes setores da sociedade que demandam energia, o residencial tem mantido uma trajetória ascendente na quantidade demandada. E na dinâmica de funcionamento dos domicílios, o acesso à energia elétrica proporciona melhorias na qualidade de vida da população, principalmente dos estratos com menor renda. Então diante da importância da energia elétrica na melhoria das condições de vida dos menos favorecidos e da necessidade de preservação dos recursos naturais, é preciso pensar em fontes energéticas alternativas para garantir a oferta de energia elétrica aos domicílios mais pobres.

Dado que as características físicas do território brasileiro tornam a energia solar uma alternativa muito interessante, considerando que o uso da energia fotovoltaica seja viável em habitações sociais e diante da diversidade de dispositivos disponíveis no mercado, questões se colocam, tais como: como selecionar um dispositivo dentre tantos ofertados? Há método ou métodos que melhor orientem essa escolha? Quais critérios devem ser considerados para tal seleção?

Diante de tais questões, esse trabalho foi desenvolvido elaborando análise exploratória sobre os diferentes módulos fotovoltaicos disponibilizados para comercialização no país de modo a compreender se há formação de *clusters* que possam ser úteis no processo de escolha de tais dispositivos para uso em habitações de interesse social.

Os dados examinados demonstram que ocorre formação de agrupamentos entre os módulos fotovoltaicos considerando atributos como potência, eficiência, área e massa. A solução com três agrupamentos mostrou-se a melhor em todas as aglomerações, tendo como referência uma regra de parada que consiste em observar a distância entre os grupos. Nos resultados é possível observar a existência de três agrupamentos, sendo o primeiro (*cluster 1*) composto por módulos com potência de 95 a 200w; o segundo (*cluster 2*) composto por módulos com potência de 240 a 455 w e o terceiro (*cluster 3*) composto por módulos com potência de 330 a 335 w. Também foi possível identificar massa como o atributo que promove a diferenciação entre o cluster 2 e o cluster 3, o que é de grande importância para o processo de escolha da placa sob diversos aspectos.

Deste modo, a confirmação dos agrupamentos permite a redução da quantidade de módulos fotovoltaicos utilizada no processo de seleção. Como consequência de tal redução, será possível otimizar a quantidade de elementos a serem utilizados em modelos de análise hierárquica, melhorando a operacionalização da modelagem e diminuindo o tempo de execução.

Por outro lado, diante do achado dos atributos que promovem a heterogeneidade entre os *clusters* e a homogeneidade em cada *cluster*, é possível realizar escolhas de equipamentos que mais se adequem ao sistema construtivo utilizado no projeto arquitetônico e do tipo de sistema que se pretende desenvolver. Isso porque a identificação da massa como um atributo de diferenciação pode ser um importante aspecto quando os equipamentos são posicionados sobre as construções dado o desgaste das estruturas e o esforço de manutenção destas.

Além das questões que envolvem o uso e manutenção das estruturas das construções, o custo de aquisição de tais equipamentos diante do componente frete também é um importante aspecto a ser considerado no processo decisório em questão.

Por fim, muito embora nesse trabalho a solução com três agrupamentos tenha se mostrado a melhor em todas as aglomerações, diante da variedade de equipamentos que podem surgir no mercado, é recomendável realizar tal análise exploratória sempre que novas relações de fornecedores venham a ser divulgadas.

REFERÊNCIAS

- Barbosa, A.L.N.H., 2018. Tendências na alocação do tempo no Brasil: trabalho e lazer. R. Bras. Est. Pop., Belo Horizonte.
- Balao, F.; Şağbanşuab, L., 2016. The selection of the best solar panel for the photovoltaic system design by using AHP. Energy Procedia, 100, pp. 50 – 53.
- Chaves, N.R.C., 2020. Energia Solar nas Favelas do Município do Rio de Janeiro: Iniciativas Exitosas? Nações Unidas/CEPAL. Disponível em <https://biblioguias.cepal.org/bigpushparaasustentabilidade>.
- Coelho, D.M. e Arouca, M.C., 2013. Características físicas e tecnológicas do uso da energia solar. In Santos, M.A. (Org.). Fontes de energia nova e renovável. Ed. LTC, Rio de Janeiro.
- Cohen, C. ; Uchôa, C., 2012. Consumo de Energia em um contexto de crescimento do produto interno bruto (PIB) acompanhado de redução da pobreza - Brasil 2003 a 2009, XIV CBE - XIV Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro.
- Cohen, C. ; Uchôa, C., 2013. Análise das fontes de energia elétrica dos domicílios, planejamento da oferta e impactos sobre o bem-estar – Brasil – 2008 – 2009, XV CBE - XV Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro.
- Cohen, C; Martins, V.; Weiss, M., 2015. Introdução da Geração Distribuída no Programa de Eficiência Energética da Light: Uma Simulação de Microgeração Solar na Comunidade da Mangueira. In: XVI Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro.
- Cohen, C., 2002. Padrões de consumo: Desenvolvimento, Meio Ambiente e Energia no Brasil. Tese de Doutorado, COPPE, UFRJ. Rio de Janeiro.
- Corrar, L. J., Paulo, E., Filho, J. M. D. (Coords.), 2007. Análise Multivariada para os Cursos de Administração, Ciências Contábeis e Economia. FIEP/CAPI, Editora Atlas, São Paulo.
- Cunha, F. B.F.; Torres M.Z.; Silva, M.S., 2017. Geração de renda e energia em Juazeiro (BA): contribuições da Resolução Aneel nº 4.385/2013 para inserção da energia solar na matriz elétrica . Bahia Análise de Dados, Salvador, v. 27, n.1,p.70-98.
- EPE, 2022. Empresa de Pesquisa Energética. Atlas da Eficiência Energética Brasil 2022. Disponível em <<http://www.epe.gov.br>>.
- Green, M. A., 2019. Photovoltaic technology and visions for the future. Progress in Energy, v. 1, n. 1, pp. 01-13.
- Hair, J. F. et al. Análise multivariada de dados. Porto Alegre: Bookman, 2009.
- Lattin, J.M.; Carroll, J.D.; Green, P.E., 2011. Análise de dados multivariados. São Paulo, Cengage Learning.
- Lima, A.A., Menezes, N.P., Santos, S., Amorim, B., Thomazi, F., Zanella, F., Heilmann, A., Burkarter, E., Dartora, C.A., 2020. Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia. Revista Brasileira de Ensino de Física, V.42, São Paulo.
- Loesch, C.; Hoeltgebaum, M., 2012. Métodos estatísticos multivariados. São Paulo, Saraiva.
- Melo, L.S.; Medeiros, M.V.B.; Brito, N.S.D.; Simões, M.C.S.; Souza, L.L.; Diniz, D.S., 2018. Impactos Sociais da geração distribuída fotovoltaica no programa Minha Casa Minha Vida em Juazeiro/Ba, VII CBENS – VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado.
- Moreira Junior, O; Souza, C.C., 2020. Aproveitamento fotovoltaico, análise comparativa entre Brasil e Alemanha. Interações, Campo Grande, MS, v. 21, n.2, p. 379-387.
- PROCEL, 2021. Módulos Fotovoltaicos. Disponível em www.procelinfo.com.br
- Silva, C.A.; Ferreira, J.L.; Nascimento, E.P., 2016. Resiliência pela inserção socioprodutiva de famílias de baixa renda: barreiras e viabilização de projetos de energia solar fotovoltaica, XVIII Encontro da Rede de Estudos Ambientais dos Países de Língua Portuguesa, Maputo, Moçambique.
- Uchôa, C.; Calili, R; Louzada, D., 2022. Contribuições da arquitetura para redução do consumo de energia em habitações de interesse social: Condomínio Refazenda – Niterói – RJ, IX CBENS - IX Congresso Brasileiro de Energia Solar. Florianópolis.
- Vale, A.M.; Felix, D.G.; Fortes, M.Z.; Borba, B.S.M.C.; Dias, B.H.; Santelli, B.S., 2017. Analysis of the economic viability of a photovoltaic generation Project applied to the Brazilian housing program “Minha Casa Minha Vida”. Energy Policy, n 108, pp. 292–298.

ABOUT METHODS FOR SELECTING PHOTOVOLTAIC MODULES FOR SOCIAL HOUSING IN BRAZIL

Abstract. *This work aims to develop an exploratory analysis of the different photovoltaic modules available for sale, to understand whether there is the formation of clusters that could be useful in the process of choosing such devices for use in social housing in Brazil. Cluster analysis was used. The results demonstrated the formation of three clusters of modules. They also demonstrated that the module selection process can be conducted with a combination of several analysis techniques to assist the device selection process given the enormous diversity offered on the market.*

Key words: *Photovoltaic module, Selection method, Cluster analysis*