

# FERRAMENTA DE ANÁLISE GEOREFERENCIADA DA ATRATIVIDADE DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS E DE BATERIAS CONECTADOS À REDE DE DISTRIBUIÇÃO NO BRASIL

Bruno Marciano Lopes – [brunomarcianolopes@gmail.com.br](mailto:brunomarcianolopes@gmail.com.br)

Davi Faúla dos Santos – [davi.faula2@gmail.com](mailto:davi.faula2@gmail.com)

Wadaed Uturbey – [wadaed@cpdee.ufmg.br](mailto:wadaed@cpdee.ufmg.br)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais  
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil

**Resumo.** Fontes renováveis variáveis são fundamentais para a redução da emissão de gases de efeito estufa, mas seu uso em larga escala altera significativamente a estrutura do setor elétrico, e demanda novas ferramentas de análise e planejamento. Dentre as tecnologias de geração, a fotovoltaica tem se destacado pela drástica redução de custos vivenciada nos últimos anos e pela modularidade, dentre outras vantagens. Sistemas de armazenamento a baterias serão fundamentais para a continuidade da expansão fotovoltaica. Este artigo apresenta uma metodologia, e sua correspondente ferramenta computacional, cujo objetivo é suportar a análise georreferenciada da atratividade de sistemas fotovoltaicos e de baterias conectados à rede de distribuição no Brasil. Ela se baseia em técnicas de Tomada de Decisão Multicritério e, nesta linha, é concebido um indicador denominado Índice de Favorabilidade que pondera variáveis consideradas determinantes para a atratividade de adoção das tecnologias. As variáveis utilizadas e seus pesos são definidos de forma flexível pelo analista. Neste artigo, a metodologia é utilizada para identificar locais mais promissores em alguns contextos mapeados: aplicação “atrás do medidor” para consumidores Residencial Tarifa Branca e Industrial Tarifa A4 Verde; e um contexto que considera aspectos de confiabilidade da rede elétrica. Como principal resultado, é apresentado um mapa do Índice de Favorabilidade para consumidores residenciais, assim como a classificação dos estados e DF para todos os contextos. Também são apresentados mapas de relacionados à atratividade das tecnologias. São determinados indicadores para algumas cidades e distribuidoras notáveis. O trabalho evidencia contrastes interessantes, tanto entre unidades federativas, quanto entre municípios de um mesmo estado, em algumas situações. Ainda, mostrou que a perspectiva das distribuidoras pode ser bastante distinta da visão dos clientes. A ferramenta auxilia na prospecção dos locais mais favoráveis para instalação dos sistemas considerados e é complementar às técnicas tradicionais de planejamento energético e de análise de viabilidade econômica.

**Palavras-chave:** Geração fotovoltaica, Armazenamento de energia, Planejamento energético

## 1. INTRODUÇÃO

O setor elétrico tem vivenciado alterações estruturais sem precedentes, impulsionadas principalmente pelo uso, em larga escala, de fontes renováveis, especialmente eólica e solar. Tais mudanças não são meras incorporações de novas tecnologias, uma vez que essas fontes, em especial a geração fotovoltaica (FV), são altamente modulares, e se conectam não apenas em linhas de transmissão, mas também na baixa tensão de redes de distribuição. Como consequência, alteram-se os modelos de negócio, a regulamentação e a relação entre os agentes do setor e desses com o consumidor (IEA, 2014). No Brasil, este fenômeno global é também impulsionado pela menor disponibilidade de potencial hidráulico competitivo, provocando uma rápida transição de um sistema hidrotérmico, com elevada capacidade de armazenamento hídrico, para uma matriz mais diversificada e complexa. De acordo com a Aneel (ANEEL/SIGA, 2021), entre os sistemas em operação, a geração fotovoltaica centralizada corresponde a 2,5 % da potência outorgada (5,5 GW) e a eólica a 11,0% (19,9 GW). A esses recursos se somam 8,6% de termelétricas alimentadas por biomassa e 3,1 % de PCHs. As hidroelétricas têm a participação reduzida a 56,7%. A geração FV distribuída já atinge 7,3 GW (ANEEL, 2021). Projeções da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) apontam que a geração FV centralizada alcance, em 2050, de 27 GW a 90 GW em termos de capacidade instalada, correspondendo de 5% a 16% da capacidade total o país (EPE & MME, 2020). Já a Geração Distribuída (GD) fotovoltaica atingirá entre 24 GW e 43 GW, o que representará um valor entre 3% e 5% da carga total de energia elétrica do país.

A variabilidade da geração FV faz com que o sistema elétrico precise de recursos de flexibilidade, que são os equipamentos, sistemas e procedimentos de operação que permitem a maior penetração das fontes renováveis variáveis. São exemplos o gerenciamento da demanda, fontes flexíveis e sistemas de armazenamento. Sobre os últimos, destacam-se os sistemas a baterias, que terão impacto efetivo no setor de distribuição de energia elétrica, por terem dinâmica rápida, flexibilidade de operação, portabilidade e escalabilidade. Tais atributos tornam possível que estes sistemas sejam instalados em praticamente qualquer ponto da rede, inclusive no interior da instalação do consumidor (EPE & MME,

2020), em configuração conhecida como atrás do medidor (*behind-the-meter*), à semelhança dos sistemas de GD regulamentados pela RN-482 (Resolução Normativa Nº 482, de 17 de Abril de 2012, 2012).

Um sistema de baterias pode oferecer diversos serviços à rede elétrica. Particularmente no nível de distribuição, são exemplos a melhoria da qualidade da energia (Ferreira et al., 2013), correção do fator de potência (Behera et al., 2016), regulação de tensão (Yang Ye et al., 2013), redução de perdas elétricas, arbitragem, redução da demanda máxima e redução da injeção de geração FV na rede. É um grande desafio analisar as possibilidades de inserção dessa tecnologia, dado que existem estes inúmeros serviços, sob a perspectiva de diversos agentes, e considerando que não existe viabilidade econômica plena ou mesmo mecanismos regulatórios adequados ainda. Para este novo paradigma, são necessárias novas ferramentas de planejamento e operação do setor elétrico (EPE, 2017). Nesta direção, no presente artigo é proposta uma ferramenta de suporte à análise e tomada de decisão, que permita ao analista capturar tendências para a inserção das tecnologias FV e de baterias. A ferramenta auxilia na identificação de fatores que, para além da viabilidade econômica, motivam ou possibilitam ao consumidor a adesão às tecnologias e fornece suporte à prospecção do potencial de mercado das tecnologias. Ainda, permite a incorporação de fatores sociais e ambientais relevantes na análise, ajuda a mapear restrições e vantagens comparativas entre localidades e na captura dos benefícios econômicos em múltiplos contextos, sob a perspectiva de diversos atores. São desafios que motivam o desenvolvimento da ferramenta a ausência de mercado mínimo, no presente, para sistemas de armazenamento, o desconhecimento parcial ou ausência de dados sobre os fatores determinantes e sobre suas interrelações.

Portanto, o objetivo desse artigo é apresentar a metodologia e a ferramenta de análise georreferenciada da atratividade de sistemas fotovoltaicos e de baterias conectados à rede de distribuição no Brasil, bem como utilizá-la para identificar locais mais promissores para a expansão das tecnologias no Brasil, nos principais contextos mapeados. A metodologia se baseia em técnicas de Tomada de Decisão Multicritério (do inglês Multiple Criteria Decision Making - MCDM). Tais técnicas lidam com questões com alto grau de incerteza (Köksalan et al., 2013) e têm sido amplamente utilizadas em áreas tão distintas quanto medicina (Wahlster et al., 2015), arquitetura (Nesticò & Somma, 2019), transportes (Sinha & Labi, 2007), análises de impactos socioambientais (Acar et al., 2019; Pascoe et al., 2016) e política e planejamento energéticos (Kaya et al., 2018; Sinha & Labi, 2007). Neste trabalho, a aplicação dessas técnicas é utilizada no contexto da inserção de novas tecnologias no setor elétrico brasileiro e os resultados apontam localidades mais favoráveis para sistemas de baterias com ou sem sistemas fotovoltaicos associados.

Detalhes metodológicos são apresentados na seção 2. O índice de favorabilidade, conceito chave da metodologia proposta, é formalmente definido. Trata-se de um indicador da atratividade para instalação de sistemas FV e de baterias, adaptável para cada contexto de interesse. Informações sociodemográficas e do setor elétrico potencialmente determinantes para a atratividade ou para o potencial da inserção das tecnologias são levantadas, obtidas, tratadas e disponibilizadas. São definidos contextos de aplicação das tecnologias, tanto na perspectiva dos consumidores de baixa e média tensão (aplicação atrás do medidor) quanto das distribuidoras. Como mencionado, a metodologia é consolidada em um aplicativo, denominado FV<sup>2</sup>BT.

Os resultados estão na seção 3, onde são apresentados mapas de todas as variáveis utilizadas nos contextos. Também são apresentados e analisados mapas do índice de favorabilidade em cada contexto e tabela comparativa dos estados e distrito federal. Os dados são complementados com informações de alguns municípios notáveis. Na seção 4 são apresentadas as considerações finais do trabalho, trazendo ressalvas e oportunidades de aplicação.

## 2. METODOLOGIA

O aplicativo FV<sup>2</sup>BT tem por objetivo suportar a identificação de localidades promissoras no Brasil para instalação de sistemas fotovoltaicos e sistemas de armazenamento de energia, com foco nas conexões em baixa e média tensão. Naturalmente, a atratividade de uma localidade depende da viabilidade econômica que, por sua vez, é dependente dos custos das tecnologias, tarifas de energia elétrica e disponibilidade do recurso solar. No entanto, outros fatores influenciam, tais como a capacidade de investimento, nível de consumo e infraestrutura elétrica. Por um lado, trata-se da identificação de diferenças entre localidades e, por esta razão, buscam-se dados georreferenciados e a incorporação de mapas temáticos na metodologia. Por outro lado, são múltiplos fatores que não compartilham das mesmas métricas e não se sabe precisamente o quanto influenciam na favorabilidade. Estas características remetem ao uso de técnicas de análise de decisão multicritério. Dentre elas, foi escolhido o Método de Valoração Direta Multicritério (*Direct Rating*), devido principalmente à sua simplicidade e facilidade de interpretação.

### 2.3 Índice de Favorabilidade

Baseado no Método de Valoração Direta Multicritério foi concebido o Índice de Favorabilidade (IF), definido como a média das variáveis que influenciam na atratividade para instalação de sistemas FV e de baterias, ponderadas entre si por grau de importância, conforme escolha do usuário, e previamente normalizados.

$$\text{ÍndiceFv} = \frac{\sum_{i=1}^N p_n x'_n}{\sum_{i=1}^N p_n} \quad (1)$$

Onde  $p$  é o peso de cada variável, de 1 a 10,  $n$  é o índice da variável e  $x'$  é o valor normalizado da variável, de 0 a 1. Quanto mais próximo de 1, mais favorável é a localidade.

Variáveis ponderadas:

$$x'_n = \begin{cases} (x_n - x'_{n(\min)}) / (x'_{n(\max)} - x'_{n(\min)}) & \text{paracorrelações positivas} \\ (x_n - x'_{n(\max)}) / (x'_{n(\min)} - x'_{n(\max)}) & \text{paracorrelações negativas} \end{cases} \quad (2)$$

Os valores máximos e mínimos são previamente ajustados para reduzir o impacto de valores extremos, utilizando o Método da Amplitude Interquartil (do inglês, IQR Method):

$$x'_{n(\min)} = \max(x_{n(\min)}, Q1 - 1,5 * IQR) \quad (3)$$

$$x'_{n(\max)} = \min(x_{n(\max)}, Q3 + 1,5 * IQR) \quad (4)$$

$$IQR = Q3 - Q1 \quad (5)$$

Q1 e Q3 são o primeiro e o terceiro quartis dos dados; IQR é o intervalo interquartil.

## 2.4 Dados

Foram identificados e tratados dados disponíveis e potencialmente relevantes para se definir o potencial e a atratividade de sistemas de geração FV e de armazenamento distribuídos, relacionados a três categorias:

- **Benefício Econômico:** Potencial de geração FV; Tarifas de energia; Retorno econômico da geração FV (= Potencial de Geração x Tarifa); Diferenças de valores de tarifas P e FP (arbitragem); Tarifas de demanda (redução do pico de demanda); DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Consumidor) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Consumidor).
- **Capacidade de Investimento:** PIB; PIB per Capita; IDH
- **Infraestrutura e Consumo de Energia Elétrica:** População; Densidade Populacional; Consumo de Energia Elétrica (E. E.), Consumo per Capita e Densidade Energética.

**Potencial de Geração FV.** O potencial de geração solar fotovoltaica do Brasil é obtido por meio de metodologia própria, apresentada em da Costa et al. (2018). Foi calculada, para todo o território nacional, a geração mensal média de um sistema FV típico, fixo, com ângulo de inclinação igual à latitude. A unidade adotada foi o kWh/kWp. Inicialmente utilizou-se a mesma resolução do Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira et al., 2017), de 0,1° x 0,1° (aproximadamente 10 km x 10 km), devido à informação de radiação solar constante no Atlas ser a principal fonte de dados para o cálculo do Potencial de Geração FV. Para obter valores nível municipal foi adotada a média dos elementos total ou parcialmente dentro das fronteiras do município. Quanto maior a energia produzida, para cada unidade de capacidade instalada, mais viáveis tendem a ser os sistemas FV e, por consequência, maior a favorabilidade para sistemas de baterias.

**Tarifas de energia.** São compiladas as tarifas de energia de todas as concessionárias e permissionárias do país. Os valores foram obtidos das Resoluções Homologatórias de Reajuste Tarifário Anual da Aneel, em julho de 2020. Aos seus valores foram acrescidas alíquotas de ICMS, COFINS e PIS, conforme legislações e regulamentações fiscais estaduais e federal. Foram consideradas tarifas Convencional e Branca, para clientes Residenciais e Comerciais e tarifa Verde, para clientes Industriais. Sobre a tarifa convencional e tarifas FP (Fora de Ponta), quanto maior seu valor, maior a atratividade para sistemas FV. Quanto a sistemas de bateria, a atratividade está relacionada à arbitragem e, portanto, quanto maior a Diferença entre Tarifas P (Ponta) e FP, maior a favorabilidade. No caso da Tarifa Verde, também foi considerada a tarifa de demanda, relacionada ao uso de baterias para gerenciamento da demanda de ponta (*peak shaving*) (Oudalov et al., 2007).

**Benefício Econômico da Geração FV.** Trata-se do benefício econômico mensal médio obtido por um quilowatt de sistema fotovoltaico, por meio de consumo evitado da concessionária. Portanto, pode ser definido como o produto do Potencial de Geração FV pela tarifa de energia, em R\$/kWp.

**DEC e FEC.** Os indicadores coletivos de continuidade do serviço de distribuição de energia elétrica DEC e FEC são definidos no Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST). O DEC mostra o intervalo de tempo que cada consumidor, em média, ficou sem energia elétrica, considerando interrupções iguais ou superiores a três minutos. Para este trabalho, foi concebido o DEC Relativo, que é o resultado da média ponderada (pelo número de unidades consumidoras do município) da razão entre o DEC medido e o DEC limite dos conjuntos elétricos presentes em cada município. Quanto mais próximo de zero é o DEC Relativo, melhor tende a ser a qualidade de energia daquela localidade (considerando critérios regulatórios). Um valor de DEC maior que a unidade reflete violação do limite e a distribuidora está sujeita a multa. Existem diversas causas para as interrupções de energia, em alguns casos arranjos envolvendo sistemas de baterias podem mitigar ou atenuar os efeitos da interrupção, tanto na perspectiva do consumidor, quanto da concessionária. Portanto, quanto maior o DEC, maior tende a ser a favorabilidade para a instalação de sistemas a bateria. Já o FEC apresenta o número de interrupções que cada consumidor, em média, sofreu, considerando interrupções iguais ou superiores a três minutos. O FEC Relativo também foi calculado e todas as ponderações já feitas sobre o DEC se aplicam ao FEC.

**Dados Sociodemográficos.** População, Densidade Populacional, PIB, PIB per Capita e IDH foram obtidos em (PNUD et al., 2020) e são úteis para, indiretamente, refletir a capacidade de investimento de cada município e o tamanho de mercado das tecnologias. Os arquivos vetoriais dos mapas e as informações de código, nome, latitude, longitude, área, unidade da federação e concessionária de energia de cada município foram obtidas no Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico (ANEEL, 2016).

**Consumo de E. E., Consumo per Capita e Densidade Energética.** Não foram localizados dados de consumo de energia elétrica por município. Para contornar esta questão, consideram-se dados de consumo dos estados do ano 2019 (EPE, 2020) e o consumo per capita de cada município foi estimado por meio da correlação dessa grandeza com o IDH, conforme proposto em (SILVA & GUIMARÃES, 2012). Então, o rateio do consumo do estado entre os municípios foi feito pelo consumo per capita estimado multiplicado pela população total. Por fim, todos os resultados municipais são multiplicados pela razão entre o valor de referência estadual e a somatória dos municípios, assegurando que a nova somatória, resultante, seja igual à referência. Observa-se que o consumo total de cada município permite estimar a sua capacidade de absorver uma determinada tecnologia. Finalmente, o indicador escolhido para refletir o adensamento da infraestrutura elétrica é a Densidade Energética, definida como o consumo total do município dividido pela sua área.

## 2.5 Contextos

Uma vez obtidas e tratadas as variáveis potencialmente determinantes da atratividade de sistemas FV e de baterias, elas podem ser associadas por meio do Índice de Favorabilidade, definindo-se quais variáveis devem ser utilizadas e quais os seus pesos relativos para cada contexto de análise. Os contextos podem abordar, por exemplo, a atratividade de sistemas na visão do consumidor residencial ou na perspectiva das distribuidoras.

Uma vez que a metodologia apresentada é uma ferramenta de suporte à análise ou tomada de decisão, os dados, pesos e contextos são escolhas do analista. Neste artigo são criados alguns contextos que, em linhas gerais, se baseiam em poucos indicadores para refletir os benefícios econômicos das tecnologias. Ainda, alguns indicadores se relacionam com mais de um aspecto do mercado. Por exemplo, o indicador Densidade Energética reflete simultaneamente a capacidade de investimento e o mercado potencial. Para todos os contextos, foram atribuídas duas composições de pesos entre os indicadores de Benefício Econômico e a Densidade Energética: 75%/25% e 50%/50%. Destacamos que tecnologias em estágio inicial de adoção tem sua expansão pouco influenciada por restrições da demanda e, neste caso, o indicador Benefício Econômico tende a ter mais peso na favorabilidade. Para tecnologias mais disseminadas, a Densidade Energética reflete melhor o seu tamanho. Os contextos definidos no artigo são descritos a seguir.

**Residencial Tarifa Branca.** Trata-se da favorabilidade dos sistemas FV e baterias na perspectiva do consumidor residencial. A atratividade dos primeiros é apurada pelo Benefício Econômico da Geração FV, considerando Tarifa Branca FP. Já o benefício dos sistemas de baterias é estimado pela Diferença de Tarifa P e FP. Esta diferença captura simultaneamente os objetivos de deslocar o consumo para o horário de ponta e a geração FV para a ponta. São analisados sistemas exclusivamente FV, exclusivamente de baterias e híbridos. Para tanto, basta variar o peso relativo dos indicadores entre 100%/0% e 0%/100%, conforme apresentado na Fig. 4 da Seção 3.

**Industrial A4 Tarifa Verde - arbitragem.** Favorabilidade da perspectiva de um consumidor industrial com abordagem equivalente àquela para o contexto Residencial Tarifa Branca.

**Industrial A4 Tarifa Verde – arbitragem e gerenciamento de demanda.** A Tarifa Verde é binômica e, portanto, possui uma parcela de demanda que pode ser gerenciada, além da função de arbitragem. Então, além do Benefício Econômico da Geração FV e da Diferença de Tarifa, é acrescida a variável Tarifa de Demanda.

**Perspectiva de Confiabilidade (DEC e FEC).** As variáveis DEC Relativo e FEC Relativo são utilizadas para retratar a situação das redes elétricas das concessionárias e permissionárias de distribuição. Indicadores DEC e FEC elevados sinalizam situações favoráveis à implantação de sistemas com baterias.

## 2.6 Ferramenta FV<sup>2</sup>BT

A metodologia desenvolvida foi materializada no aplicativo FV<sup>2</sup>BT – Favorabilidade para Sistemas FV e Baterias Conectadas à Rede de Distribuição no Brasil. A implementação foi em linguagem R, utilizando o pacote de interface de usuário *Shiny* e a biblioteca de mapas interativos *Leaflet*. A Fig. 1 apresenta a tela principal da ferramenta. O FV<sup>2</sup>BT é composto pelos diversos mapas de temas relacionados à viabilidade dos sistemas FV e de baterias, conforme descritos na Seção 2.2. Para cada variável/indicador, é apresentado um mapa, um histograma, a referência e uma explicação sobre como pode influenciar na atratividade das tecnologias. Os dados no mapa são apresentados por município, mas é facultado ao usuário visualizar as fronteiras das unidades da federação ou das áreas de concessões das distribuidoras. O usuário pode também selecionar um único município e obter todas as informações disponíveis sobre ele.

Ao escolher o índice de favorabilidade como informação de interesse, surge uma janela de atribuição de pesos para cada variável disponível e um menu de escolha de contextos pré-configurados, tal como apresentados na Seção 2.3. Na

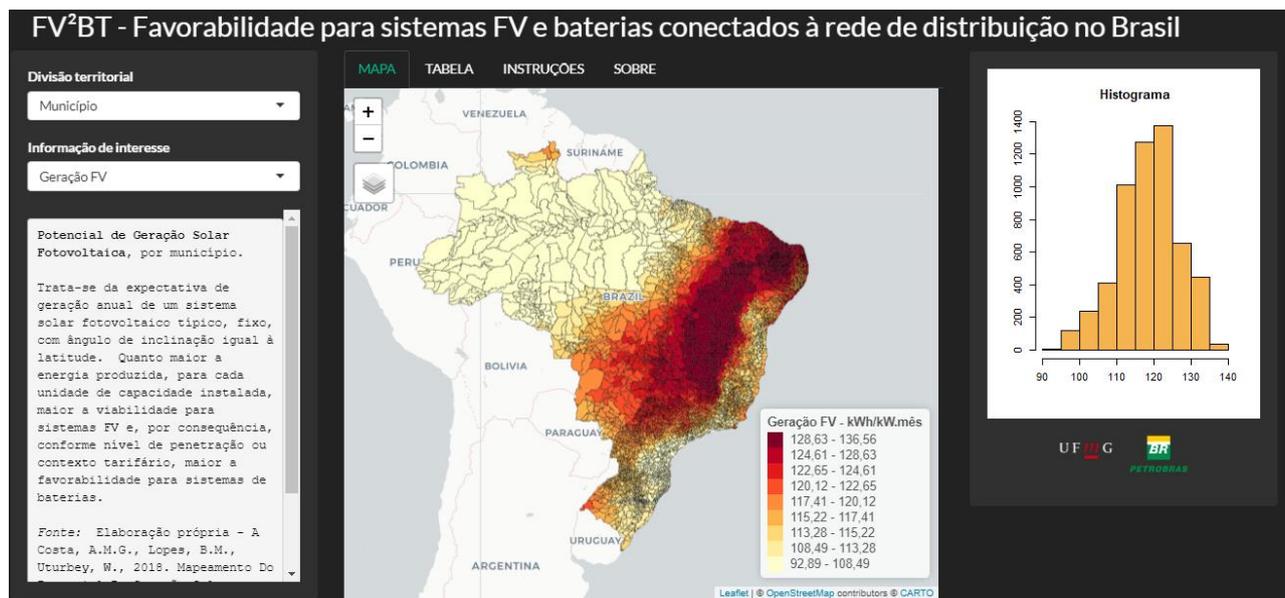


Figura 1 - Tela ilustrativa da ferramenta FV²BT. Neste exemplo, é apresentado o potencial de geração FV

aba “TABELA”, o usuário pode ler e copiar os resultados de uma variável específica, inclusive o IF, por município, por unidade da federação ou por distribuidora.

Todos os dados utilizados pelo aplicativo estão em arquivos do tipo CSV e podem ser atualizados pelo usuário. Da mesma forma, novas variáveis e contextos podem ser incorporadas por aqueles que tenham domínio intermediário da linguagem R.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 2 apresenta os dados escolhidos para os contextos concebidos. Há uma tendência de que os locais com maior índice Benefício Econômico da Geração FV sejam aqueles com maior recurso solar (ex.: porção central do país e oeste da região Sul), mas também é evidente o peso das tarifas mais elevadas, tais como em Minas Gerais e no Rio de Janeiro. Sobre a diferença entre as tarifas P e FP, relacionadas à viabilidade dos sistemas de baterias, percebe-se que nem sempre coincidem com as localidades mais promissoras para FV. Por exemplo, o estado da Bahia possui menor atratividade para FV devido ao baixo valor da tarifa fora de ponta, mas tem maior apelo para baterias, devido à elevada diferença entre tarifas. O oposto ocorre com o oeste do Rio Grande do Sul. Já com relação aos indicadores de continuidade (DEC e FEC), Goiás e Rondônia, que não se destacam na perspectiva do consumidor, possuem valores elevados. Portanto, há um contraste entre a perspectiva da confiabilidade e a dos consumidores, ao menos conforme os contextos concebidos.

A Fig. 4 mostra o IF para o contexto de tarifa branca residencial. As colunas representam proporções diferentes entre Benefício Econômico (representado por Benefício FV e Diferenças de Tarifas) e potencial de mercado (para o qual a Densidade Energética é a variável *proxi*). Nas linhas, são alteradas as proporções entre Benefício FV e Diferença de Tarifa. De cima para baixo: apenas Benefício FV, representando situações em que apenas estes sistemas são instalados; 50% Benefício FV e 50% Diferença de Tarifa, representando o uso conjunto das tecnologias; e, por fim, 100% diferença entre tarifas, representando sistemas de baterias apenas. Verifica-se, no contexto de uso conjunto, a maior favorabilidade no estado do Rio de Janeiro, seguido de Minas Gerais, Tocantins e Maranhão. No caso de sistemas exclusivamente de baterias, Minas Gerais perde atratividade, se comparado aos demais citados.

A Tab. 1 apresenta o IF médio (ponderado pelo tamanho da população de cada município) de todas as unidades federativas, para todos os contextos propostos. Em todos os casos as proporções são 75% de Benefício Econômico e 25% de Densidade Energética. O Benefício Econômico é dividido igualmente entre as variáveis escolhidas. Por exemplo, para Tarifa Branca Residencial, pondera-se 50% Benefício FV e 50% Diferença de Tarifa. O estado do Rio de Janeiro liderou a favorabilidade para todos os contextos sob perspectiva do consumidor, tendo também se destacado Minas Gerais (particularmente para baixa tensão), Tocantins, Pará, Mato Grosso do Sul e Bahia. Verifica-se que em todas as regiões do país, existem significativos contrastes entre estados.

Sob a perspectiva da confiabilidade (DEC e FEC), os estados em destaque são distintos daqueles obtidos na visão dos consumidores: Alagoas, Distrito Federal, Goiás, Piauí e Rio Grande do Sul. Esta discrepância em relação aos resultados anteriores ilustram a complexidade do tema e a necessidade de estudos aprofundados.

Retomando às Figs. 2 e 3 é possível observar que alguns estados têm perfil bastante heterogêneo em relação a algumas variáveis; portanto, nem sempre a média estadual é um bom indicador. Isso é especialmente válido para estados com grande número de concessionárias e permissionárias, tais como Santa Catarina (26 empresas), Rio Grande do Sul (20), São Paulo (19), Paraná e Rio de Janeiro (7 cada). Dessa forma, também foram realizadas análises por distribuidora e por município. Elas revelam que existem casos pontuais, em pequenas concessões, em que a favorabilidade é muito superior

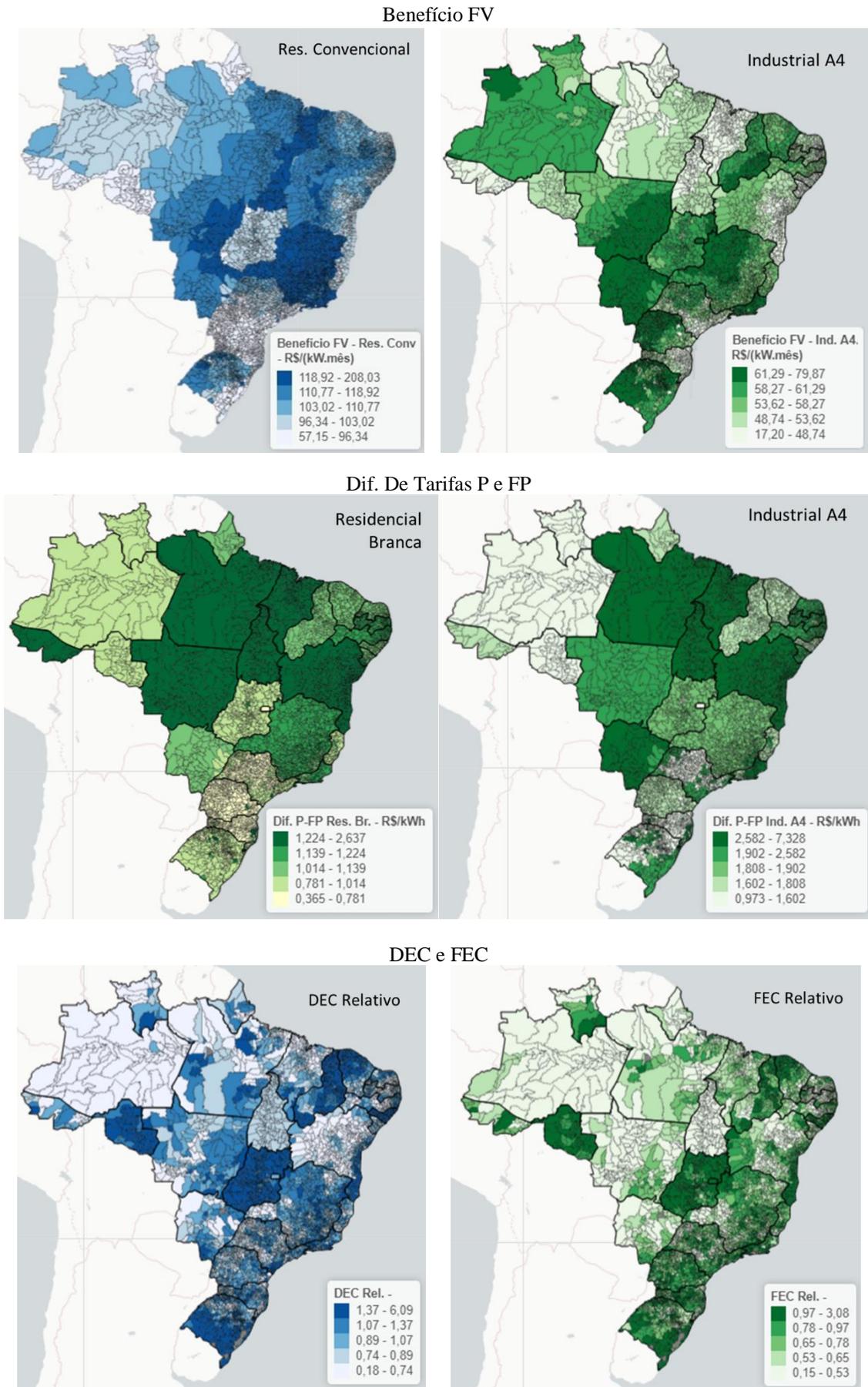


Figura 2 - Dados utilizados para os contextos de atratividade e potencial de inserção de tecnologias FV e de sistemas de baterias

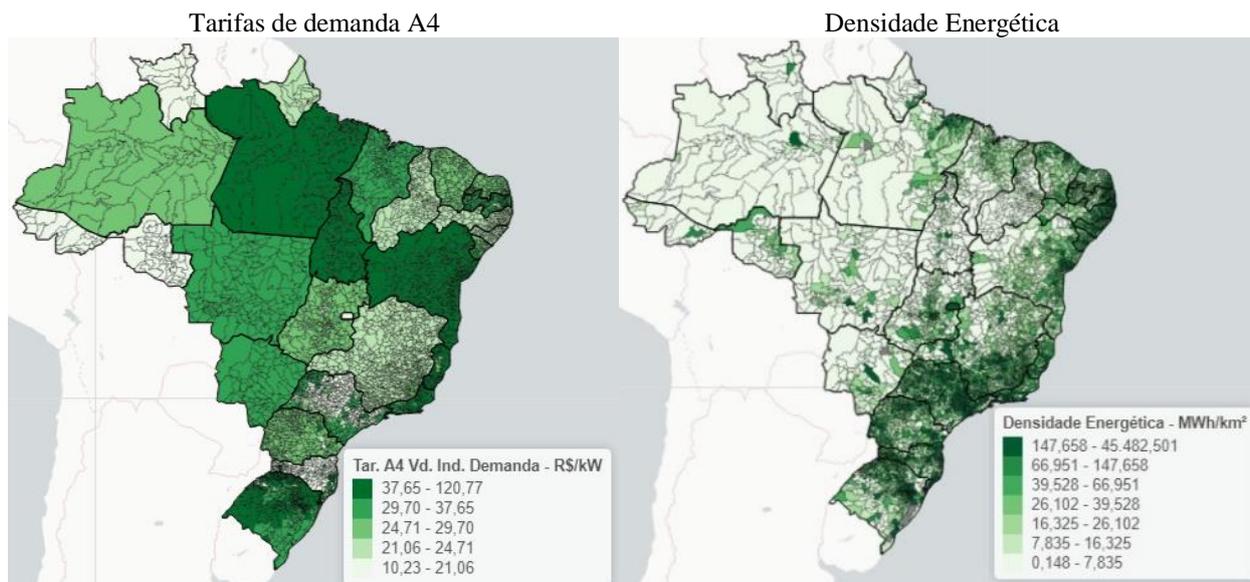


Figura 3 - Dados utilizados para os contextos de atratividade e potencial de inserção de tecnologias FV e de sistemas de baterias (continuação)

ou inferior à média. Por exemplo, enquanto a média do IF para clientes Residenciais Tarifa Branca do estado do Rio de Janeiro é de 0,76, a de Araruama é de 1, cerca de 30% acima. O IF na perspectiva da confiabilidade da cidade de Holambra, SP, é de 1, sendo quase o dobro da média do estado, de 0,53. Entre as concessionárias que atendem a população acima de 1 milhão de habitantes, a ENEL RJ lidera todos os indicadores na perspectiva dos consumidores (Residencial Branca: 0,76; Industrial A4: 0,93; Industrial A4 – arbitragem + demanda: 0,92), seguida da Light-RJ (0,74, 0,74 e 0,71, respectivamente). A terceira posição é ocupada pela Cemig, para clientes residenciais (0,69), pela EMS – MS para o contexto Industrial A4 (0,65) e pela CELPA, no contexto que considera a tarifa de demanda (0,66).

Tabela 1: Índice de Favorabilidade das unidades federativas para os contextos analisados

Unidade Federativa	População		Res. Tarifa Branca		Ind. A4 Verde		Ind. A4 Verde + Demanda		Confiabilidade	
	(x mil)	(%)	I.F. (%)	Pos.	I.F. (%)	Pos.	I.F. (%)	Pos.	I.F. (%)	Pos.
SP	41.231	21,61	0,45	19	0,37	24	0,37	21	0,53	11
MG	19.589	10,27	0,68	2	0,51	8	0,45	15	0,47	14
RJ	15.990	8,38	0,76	1	0,82	1	0,80	1	0,57	7
BA	14.017	7,35	0,52	12	0,58	4	0,63	3	0,42	17
RS	10.697	5,61	0,49	17	0,47	14	0,54	7	0,62	5
PR	10.445	5,47	0,36	24	0,48	10	0,46	13	0,50	12
PE	8.794	4,61	0,59	6	0,52	5	0,48	10	0,49	13
CE	8.452	4,43	0,51	13	0,48	12	0,45	16	0,56	8
PA	7.613	3,99	0,60	5	0,63	3	0,66	2	0,37	20
MA	6.575	3,45	0,61	4	0,45	16	0,47	12	0,34	22
SC	6.269	3,29	0,31	25	0,38	21	0,39	19	0,55	9
GO	6.004	3,15	0,38	21	0,50	9	0,48	11	0,67	3
PB	3.767	1,97	0,56	8	0,52	7	0,51	8	0,37	19
ES	3.515	1,84	0,45	18	0,47	13	0,55	6	0,47	15
AM	3.484	1,83	0,44	20	0,38	22	0,39	20	0,30	25
RN	3.168	1,66	0,50	16	0,45	17	0,45	17	0,40	18
AL	3.120	1,64	0,53	10	0,37	23	0,36	22	0,83	1
PI	3.118	1,63	0,53	11	0,39	19	0,34	23	0,64	4
MT	3.035	1,59	0,57	7	0,52	6	0,50	9	0,31	24
DF	2.570	1,35	0,50	15	0,48	11	0,40	18	0,68	2
MS	2.454	1,29	0,51	14	0,64	2	0,61	5	0,35	21
SE	2.068	1,08	0,54	9	0,43	18	0,46	14	0,42	16
RO	1.562	0,82	0,24	27	0,17	25	0,12	27	0,60	6
TO	1.383	0,73	0,62	3	0,47	15	0,62	4	0,29	26
AC	734	0,38	0,37	23	0,16	27	0,15	26	0,22	27
AP	670	0,35	0,30	26	0,16	26	0,19	25	0,31	23
RR	450	0,24	0,37	22	0,39	20	0,33	24	0,55	10

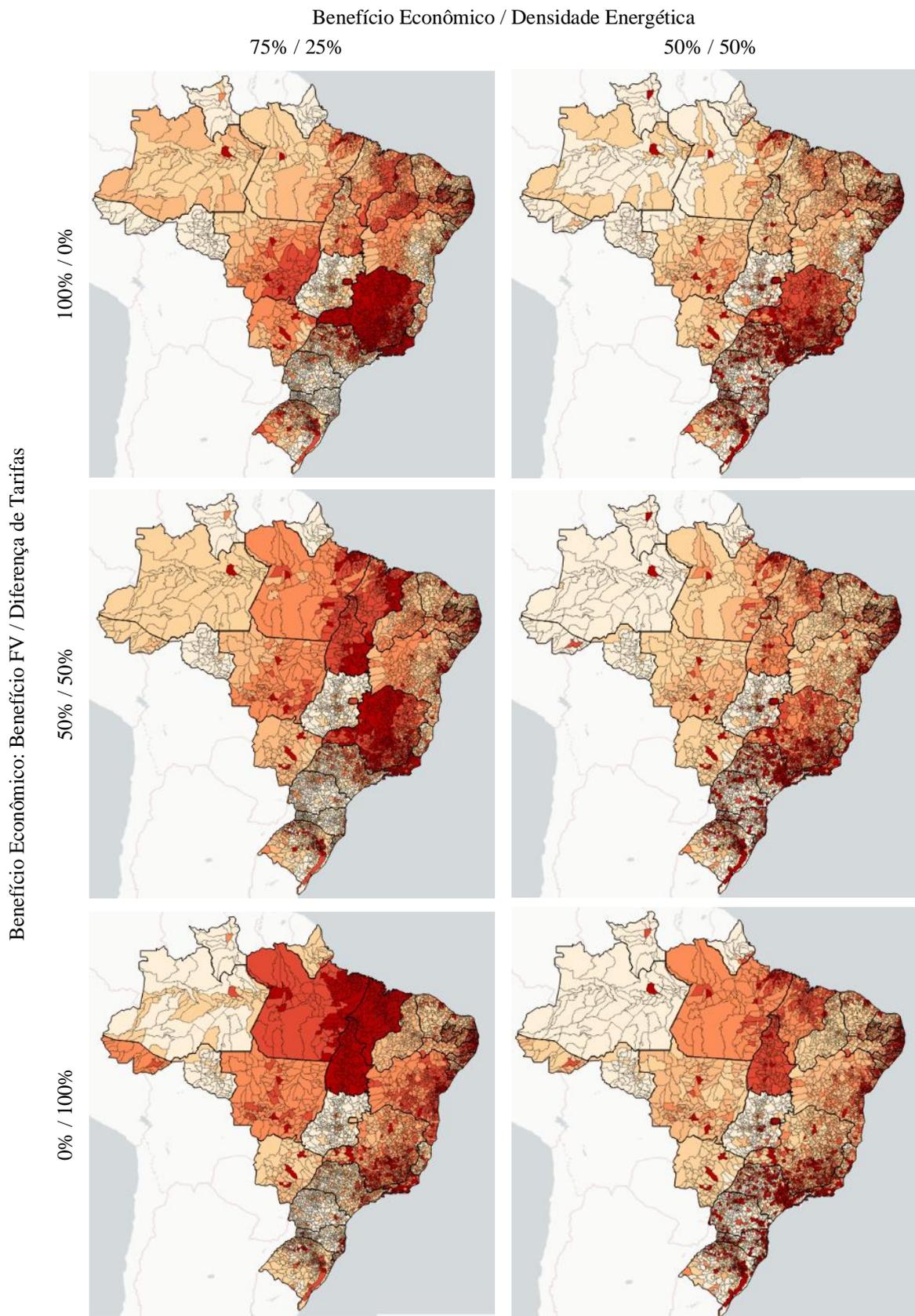


Figura 4 - Índice de Favorabilidade para o contexto Residencial Tarifa Branca

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente artigo apresentou uma ferramenta simples de análise e suporte à decisão sobre a atratividade das tecnologias de geração FV e de baterias. Particularmente sobre as baterias, no qual não existem projeções precisas dos custos da tecnologia e nem conhecimento sobre quais formas de captura de valor se concretizarão, o uso do aplicativo é interessante pois utiliza técnicas criadas justamente para problemas simultaneamente complexos e permeados de incertezas. Uma aplicação prática, imediata, é suportar a escolha de localidades para instalação de plantas piloto de sistemas de armazenamento que sejam capazes de se pagar parcial ou integralmente. Permite também que especialistas e outros interessados assimilem panoramas gerais, contribuindo para o aprimoramento do senso crítico. Pode também ser utilizado para modelar rapidamente novos contextos e o efeito de outras variáveis potencialmente determinantes para a atratividade das tecnologias.

A ferramenta não é capaz, por outro lado, de suportar a análise de viabilidade econômica das tecnologias em questão. Para este caso, existem programas capazes de simular desempenho técnico e econômico das tecnologias, mas que dependem de um número muito maior de informações, nem sempre disponíveis. Um exemplo é o System Advisor Model (SAM), do NREL. Esta abordagem, por outro lado, não traria visão sistêmica, com informações de potencial de mercado, por exemplo. Para estudos de planejamento energético mais detalhados, existem sofisticados modelos de simulação, tais como OSeMOSYS, MESSAGE, IAM, LEAP, etc.

O desafio atual é tornar este tipo de ferramenta mais adequada à nova realidade do setor elétrico, em que a alta penetração das fontes renováveis variáveis impõe estudos no qual aspectos geográficos são cada vez mais relevantes, e são necessárias simulações em escala de tempo intradiária. O uso dessas ferramentas e a construção dos estudos de planejamento dependem de equipe multidisciplinar e participação multisetorial. Ferramentas como a FV<sup>2</sup>BT são úteis, se usadas de forma complementar, pois, conforme mencionado, colabora com a visão sistêmica, com a verificação da razoabilidade de resultados e com a interação entre atores.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Petrobras no âmbito do projeto ANEEL P&D 00553-0046-2016 “Desenvolvimento de sistema Smart Battery e planta piloto de armazenamento de energia associado à geração distribuída de energia elétrica”.

#### REFERÊNCIAS

- Acar, C., Beskese, A., & Temur, G. T. (2019). A novel multicriteria sustainability investigation of energy storage systems. *International Journal of Energy Research*, 43(12), 6419–6441. <https://doi.org/10.1002/er.4459>
- ANEEL/SIGA. (2021). *SIGA – Sistema de Informação de Geração da ANEEL*. <https://www.aneel.gov.br/siga>
- Resolução Normativa N° 482, de 17 de Abril de 2012, Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL 1 (2012). <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>
- ANEEL. (2016). *Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico*. Aneel. <http://sigel.aneel.gov.br/sigel.html>
- ANEEL. (2021). *Geração Distribuída*. [http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD\\_Fonte.asp](http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp)
- Behera, M. P., Ray, P. K., & Beng, G. H. (2016). Three-phase shunt connected Photovoltaic generator for harmonic and reactive power compensation with battery energy storage device. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2408–2413. <https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7793427>
- da Costa, A. M. G., Lopes, B. M., & Uturbey, W. (2018). Mapeamento Do Potencial De Geração Solar Fotovoltaica No Brasil – Uma Abordagem Preliminar. In ABENS (Ed.), *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar: Vol. IX* (p. 10). <http://anaiscbens.emnuvens.com.br>
- EPE. (2017). *Plano de Decenal de Expansão de Energia (PDE)*. Pde 2026. <https://doi.org/10.15713/ins.mmj.3>
- EPE. (2020). *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020*. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>
- EPE, & MME. (2020). *Plano Nacional de Energia PNE 2050*. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>
- Ferreira, H. L., Garde, R., Fulli, G., Kling, W., & Lopes, J. P. (2013). Characterisation of electrical energy storage technologies. *Energy*, 53, 288–298. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.037>
- IEA. (2014). *The power of transformation. Wind, Sun and the Economics of Flexible Power Systems* (First, Vol. 10, Issue 2). International Energy Agency. <https://doi.org/10.1007/BF01532548>
- Kaya, İ., Çolak, M., & Terzi, F. (2018). Use of MCDM techniques for energy policy and decision-making problems: A review. *International Journal of Energy Research*, 42(7), 2344–2372. <https://doi.org/10.1002/er.4016>
- Köksalan, M., Wallenius, J., & Zionts, S. (2013). An Early History of Multiple Criteria Decision Making. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 20(1–2), 87–94. <https://doi.org/10.1002/mcda.1481>
- Nesticò, A., & Somma, P. (2019). Comparative analysis of multi-criteria methods for the enhancement of historical

- buildings. *Sustainability (Switzerland)*, *11*(17). <https://doi.org/10.3390/su11174526>
- Oudalov, A., Cherkaoui, R., & Beguin, A. (2007). Sizing and optimal operation of battery energy storage system for peak shaving application. *2007 IEEE Lausanne POWERTECH, Proceedings*, 621–625. <https://doi.org/10.1109/PCT.2007.4538388>
- Pascoe, S., Tobin, R., Windle, J., Cannard, T., Marshall, N., Kabir, Z., & Flint, N. (2016). Developing a Social, Cultural and Economic Report Card for a Regional Industrial Harbour. *PLoS ONE*, *11*(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0148271>
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Abreu, S. L., & Ruther, R. (2017). *Atlas brasileiro de energia solar* (INPE (ed.); Segunda). INPE. [http://sonda.ccst.inpe.br/publicacoes/atlas\\_solar.html](http://sonda.ccst.inpe.br/publicacoes/atlas_solar.html)
- PNUD, Fundação João Pinheiro, & IPEA. (2020). *Atlas Brasil*. <http://www.atlasbrasil.org.br/ranking>
- SILVA, M. G. DA, & GUIMARÃES, L. D. S. (2012). Uso do Índice de Desenvolvimento Humano como Instrumento de Projeção de Demanda de Energia Elétrica. *Economia e Energia*, *86*, 36. <http://www.ecen.com/eee86/eee86p/eee86.pdf>
- Sinha, K. C., & Labi, S. (2007). Transportation Decision Making: Principles of Project Evaluation and Programming. In *Transportation Decision Making: Principles of Project Evaluation and Programming*. <https://doi.org/10.1002/9780470168073>
- Wahlster, P., Goetghebeur, M., Kriza, C., Niederländer, C., & Kolominsky-Rabas, P. (2015). Balancing costs and benefits at different stages of medical innovation: A systematic review of Multi-criteria decision analysis (MCDA). *BMC Health Services Research*, *15*(1). <https://doi.org/10.1186/s12913-015-0930-0>
- Yang Ye, Li Hui, Aichhorn Andreas, Zheng Jianping, & Greenleaf Michael. (2013). Sizing strategy of distributed battery storage system with high penetration of photovoltaic for voltage regulation and peak load shaving. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *5*(2), 982–991.

#### **A TOOL FOR GEOREFERENCED ANALYSIS OF THE ATTRACTIVENESS OF GRID-CONNECTED DISTRIBUTED PHOTOVOLTAIC AND BATTERY SYSTEMS IN BRAZIL**

**Abstract.** Variable renewable sources are fundamental for the reduction of greenhouse gas emissions. However, in large-scale, they significantly impact operations planning of the electricity sector, and demand new analysis and planning tools. Among the generation technologies, photovoltaics (PV) has stood out for the drastic cost reduction experienced in recent years and for its modularity, among other advantages. Battery storage systems will be fundamental for further PV generation expansion. This paper presents a methodology, based on Multicriteria Decision Making techniques, and its corresponding computational tool, whose objective is to support the georeferenced analysis of the attractiveness of grid-connected PV and battery systems in Brazil. An indicator called Favorability Index (~~HF~~)(FI) is proposed, which weights the most important variables for the attractiveness of technology adoption. The variables used and their weights are flexibly defined by the analyst. In this paper, the methodology is used to identify promising locations in some contexts: behind-the-meter systems for Residential White Tariff and Industrial Green A4 Tariff consumers, and a context that considers grid reliability aspects. The main results are a map of the index FI for residential consumers and the ranking of states under all contexts. Moreover, maps related to the attractiveness of the technologies are presented and indicators for some notable cities and utilities are determined. The study shows interesting contrasts, both between states and between municipalities of the same state, in some situations. It also shows that distributors' perspective can be quite different from customers' perspective. The tool assists in prospecting the most favorable locations for PV plus batteries and complements traditional energy planning techniques and economic feasibility analysis.

**Key words:** Photovoltaic generation, Energy storage, Energy planning