

Empreendimentos de geração distribuída fotovoltaica *On Grid*: desafios e oportunidades¹

Distributed generation *On Grid* photovoltaicsolar: challenges and oportunites

DOI:10.34117/bjdv8n12-095

Recebimento dos originais: 04/11/2022

Aceitação para publicação: 08/12/2022

Luana Tavares Abrão Lima

Pós-graduação Lato Sensu em Sistemas Fotovoltaicos Isolados e Conectados á Rede Elétrica

Instituição: Universidade São Judas Tadeu (USJT)

Endereço: Av. Jabaquara, 1870 - Vila da Saúde, São Paulo - SP, CEP: 04046-300

E-mail: luanaabrao@gmail.com

Gustavo Cicero Silva

Técnico em Eletroeletrônica

Instituição: Universidade São Judas Tadeu (USJT)

Endereço: Av. Jabaquara, 1870, Vila da Saúde, São Paulo - SP, CEP: 04046-300

E-mail: gustavosilva.4167@aluno.saojudas.br

André Luiz de Oliveira

Doutorado em Engenharia Elétrica, Área de Sistemas de Potência na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP)

Instituição: Universidade São Judas Tadeu (USJT)

Endereço: Rua Taquari, 546, Mooca, São Paulo - SP, Brasil

E-mail: andrelo@alumni.usp.br

RESUMO

O desenvolvimento do setor de geração distribuída no Brasil começou em 2012 e teve um crescimento considerável, especialmente desde 2017. Isso ajuda a ampliar a proporção de fontes renováveis de energia com baixo impacto ambiental na matriz elétrica e permite que os consumidores sejam protagonistas e gestores ativos de uma verdadeira revolução energética. O presente trabalho discute as bases científicas e evoluções tecnológicas que permitiram e sustentaram essa revolução, apresenta pesquisas sobre microgeração distribuída para destacar as oportunidades que esse novo campo de atuação profissional apresenta aos engenheiros eletricitistas e conclui pontuando os principais desafios ainda por serem enfrentados para a solidificação do seguimento de geração distribuída no setor elétrico brasileiro.

Palavras-chave: geração distribuída, fontes renováveis, matriz energética.

ABSTRACT

The development of the electricity distributed generation segment in Brazil, which started in 2012, has had considerable growth, especially since 2017. This has contributed to the

¹ Artigo do Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Elétrica, São Paulo, 2022.

expansion of the proportion of renewable sources with low environmental impact in the electric matrix, as well as allowing consumers to be protagonists and active managers of a true energy revolution. This research project discusses the scientific bases and the technological evolution that allowed and has sustained this revolution, presents a study of distributed microgeneration, in order to highlight the opportunities that this new segment of professional activity has brought to electrical engineers, and, finally, points out the main challenges still to be faced for the solidification of the segment of distributed generation in the Brazilian electric sector.

Keywords: distributed generation, renewable sources, electric matrix.

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia por meio de fontes renováveis de baixo impacto ambiental tem tido crescente importância, na medida da maior conscientização das pessoas quanto a importância do desenvolvimento sustentável e da preservação ambiental. Isso tem sido traduzido por meio da assunção de compromissos governamentais protocolados e firmados.

No Brasil, a energia solar fotovoltaica tem se destacado no seguimento de geração distribuída, pois é impulsionada pelos excelentes índices de radiação solar em maior parte do território. Segundo estatística da ABSOLAR (2022), a geração fotovoltaica no Brasil que já possui 15,3 GW de capacidade instalada, tem enorme potencial e, portanto, perspectivas de crescimento acentuado na próxima década.

É notável a expansão do seguimento de geração distribuída, isso pode ser observado a partir do relatório de origem da REN21, publicado em 2020. O REN21 é a uma comunidade global de atores em energia renovável da ciência, academia, governos, ONGs e indústria em todas as áreas de energias renováveis que fornece fatos, números e análises atualizadas, desenvolvimentos globais em tecnologia, políticas e mercados aos tomadores de decisão. Em 2004, a energia solar tinha capacidade mundial instalada de 2 GW, enquanto no ano de 2019, a capacidade instalada já era de 627 GW (REN21, 2020).

A geração própria de energia por fontes renováveis contribui para a redução dos impactos ambientais e dos problemas enfrentados no setor de energia brasileiro, como problemas de abastecimento de energia aos consumidores. Entre 2014 e 2016, por exemplo, o Brasil enfrentou uma crise hídrica que resulta em consequências até os dias atuais para geração de energia elétrica (BRITO, 2016).

Uma das vantagens para utilização de sistemas fotovoltaicos está relacionada aos ganhos econômicos em que o consumidor de energia elétrica tem a partir da redução de custos. Os consumidores tiveram um acréscimo de gastos com a eletricidade em 70% quando comparado ao ano de 2011 (ANEEL, 2021a), o que motiva o uso de geração distribuída fotovoltaica e, conseqüentemente, descontos na conta de luz. Além disso, a energia por fonte fotovoltaica contribui para a redução nos índices de demandas, nos custos na geração, transmissão e distribuição, e nas perdas e falhas no sistema (NARUTO, 2017).

Este tipo de sistema vem sendo mais acessível e eficiente com o passar dos anos, isso devido a constante evolução tecnológica que resulta em uma eficiência e custo-benefício para a inclusão de mais sistemas fotovoltaicos. No período em que se iniciou a viabilização da instalação de sistemas fotovoltaicos, os módulos ainda possuíam elevados custos com média de US\$76,00 por Watt instalado, quando comparado ao valor médio de 2020 com US\$0,30 por Watt instalado (NARUTO, 2017).

A diversificação de fontes primárias na composição da matriz elétrica brasileira é fundamental para garantir a sustentabilidade socioambiental e segurança energética, fatores indispensáveis ao desenvolvimento econômico do país. Nesse contexto, este trabalho traça uma análise da inserção de sistemas fotovoltaicos por meio de um estudo de caso e simulação computacional de um microssistema de geração solar fotovoltaica, avaliando as perspectivas para a evolução das tecnologias e apresentando desafios relacionados a prosperidade da geração distribuída.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O termo conhecido como energia solar é de referência a energia proveniente da radiação eletromagnética do Sol, sendo esta a maior fonte de energia disponível direta ou indireta para geração de energia elétrica. A energia do sol é considerada como uma fonte inesgotável e limpa, podendo ser aproveitada a partir das tecnologias atuais de células fotovoltaicas em aquecedores solares, usinas heliotérmicas e a própria geração de eletricidade (PORTAL SOLAR, 2021).

O impacto solar mostra-se na importância elétrica nos processos para geração de energia elétrica de fontes que não são provenientes do Sol, mas que tem dependência, estes são citados como o Sol responsável indiretamente. Como são os casos de usinas hidrelétricas, que tem como fonte a água, mas que são dependentes pela evaporação da água à formação de nuvens para chuvas e a energia eólica pela formação de ventos. Ao

utilizarmos petróleo, gás natural e carvão, estamos utilizando o Sol também devido a decomposição da vida animal e vegetal (DIENSTMANN, 2009).

Os valores da radiação solar estão atrelados aos conceitos astronômicos, sendo uma radiação constante independente das interferências pela rotação do planeta em volta do Sol. Conhecido como constante solar, a irradiância solar média no nível da atmosfera é igual a 1.367 W/m^2 (PINHO E GALDINO, 2014). Mas ao decorrer do ano este valor tende a variar devido ao posicionamento do planeta Terra na órbita em torno do Sol, o que varia o ângulo da inclinação em relação ao plano normal à elipse. No Brasil, o solstício de inverno ocorre em julho onde o ângulo registrado é de $+23,45^\circ$ e no solstício de verão em dezembro, o ângulo é de $-23,45^\circ$. Esta variação resulta na mudança da duração dos dias, onde durante o solstício de verão têm dias registrados mais longos pela presença do sol por mais horas e enquanto no de inverno ocorre o inverso, dias mais curtos (PINHO E GALDINO, 2014). Pensando no valor de irradiação solar, este ângulo de inclinação da trajetória da Terra também será afetado pela época do ano em que o hemisfério se encontra, o valor mínimo de irradiância será na época do inverno com valor registrado de 1.322 W/m^2 e o valor máximo sendo em dezembro, o início do período de verão, de aproximadamente de 1.412 W/m^2 (PINHO E GALDINO, 2014). A partir deste valor há uma divisão não igual das perdas na radiação incidente, sendo dividido pela reflexão por nuvens, a absorção atmosférica e uma terceira parte sendo absorvida pela superfície da Terra (PINHO E GALDINO, 2014).

A Figura 1 demonstra o imenso potencial físico que a energia solar pode oferecer a partir de sua radiação em torno do globo, considerando o raio médio do planeta Terra sendo 6.371 km com a irradiância solar observada, a potência do Sol disponibilizada é de aproximadamente 174 mil TW (PINHO E GALDINO, 2014).

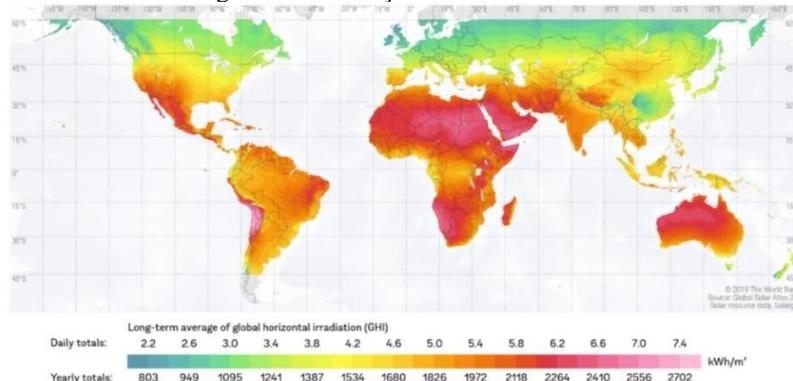
Figura 1 – Potencial Físico das energias renováveis.



Fonte: EPIA (2009), com base nas informações de NITSCH F. “Technologische und energiewirtschaftliche Perspektiven Erneuerbarer Energien, Deutsches Zentrum für Luft – und Raumfahrt (DLR)”, 2007.

O posicionamento geográfico do Brasil é muito favorável a radiação solar, como ilustrado na Figura 2, um dos fatores principais decorre do fato de posicionar-se próximo a linha do Equador, sendo um dos países com um dos maiores potenciais energéticos no mercado solar, quando comparado a Europa (LIMA, 2020). Devido aos processos das nuvens e outros fatores naturais, é de normalidade que a irradiação solar alcance a superfície da Terra com valor máximo aproximado de 1000 W/m² em seu horário do pico solar, porém já se foi observado em territórios brasileiros que o pico de irradiação solar global horizontal chegou ao valor medido de 1822 W/m² (RÜTHER et al., 2017).

Figura 2 – Irradiação Global Horizontal



Fonte: Global Solar Atlas (2020).

O território brasileiro tem incidência solar capaz de gerar 50 mil vezes o consumo nacional elétrico, com potencial de energia de 15 trilhões de megawatts-hora (ABSOLAR, 2020). Na publicação do INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, junto a diversos autores do Atlas Brasileiro de Energia Solar, em segunda edição no ano de 2020. Este documento apresenta estudos da disponibilidade solar ao território brasileiro junto a suas sazonalidades à cada região do Brasil, partiu da premissa de uma taxa de desempenho médio anual fixo para todas as regiões de 80%. A observação de

dados a respeito da irradiação brasileira é um dado importante a projeção de um sistema fotovoltaico a região, onde exigem uma irradiação mínima de 3 a 4 kWh/ (m². dia). É de ressaltar a baixa variabilidade da irradiação solar do país, onde o menor valor medido foi na região sul com irradiação global horizontal de 4,53 kWh/ (m². dia) quando comparado ao maior valor na região nordeste com irradiação global horizontal de 5,49 kWh/ (m². dia).

2.1 CÉLULA E MÓDULO FOTOVOLTAICO

A tecnologia fundamental para a conversão da energia solar em energia elétrica é a célula fotovoltaica. Em 1839, o físico francês Alexandre Edmond Becquerel foi o primeiro a registrar observações sobre o efeito fotovoltaico, que tornaria possível gerar eletricidade pela luz do sol, sendo que a primeira célula fotovoltaica só foi desenvolvida de fato em 1883, pelo cientista Charles Fritts. Após diversas contribuições neste ramo de outros cientistas para o desenvolvimento destas células, foram utilizados dispositivos a base de selênio que poderia possibilitar uma eficiência de 1% (FADIGAS, 2019).

O desenvolvimento destas células é de suma importância para o estado do módulo, pois a célula é o dispositivo responsável por converter a energia luminosa em energia elétrica. Assim, o conjunto de células fotovoltaicas encapsuladas formam como conhecido os módulos fotovoltaicos ou ainda denominado também de placas ou painéis solares (FADIGAS, 2019).

Apenas em 1954 tal sistema começou a ser viabilizado para utilização, Russel Ohl e Calvin Fuller anunciaram novas técnicas a serem feitas no módulo fotovoltaico, o que deu início ao marco de revolução da energia solar. Russel foi o primeiro a desenvolver placas fotovoltaicas a partir do material de silício, material-base na qual é utilizado até os dias atuais para a fabricação de módulos fotovoltaicos, sendo que em 1941 registrou a patente de funcionamento do sistema fotovoltaico, assim como é conhecido atualmente. Enquanto o Fuller, a partir do desenvolvimento dos módulos desenvolvidos por Russel, compartilhou seus experimentos com o processo de dopagem do silício para a fabricação dos módulos fotovoltaico, o que permitiu uma eficiência de 6% ao sistema, sendo um marco ao avanço desta tecnologia.

Até acontecer o avanço tecnológico por parte do Fuller, o mercado para geração elétrica não era muito movimentado devido aos elevados custos na fabricação dos módulos e inviabilizava a execução dos projetos para a geração elétrica, além das características de confiabilidade baixas (FADIGAS, 2019).

2.1.1 Efeito Fotovoltaico

De acordo com Fadigas (2019), o efeito fotovoltaico foi observado pelo Alexandre Edmond Becquerel aos seus 19 anos, em 1839, posteriormente tornando posse do cargo de físico, dedicando seus estudos sobre os efeitos da emissão da luz. Foi observado na época que, ao refletir uma luz em uma solução ácida surgia uma diferença de potencial entre os eletrodos nesta solução, o que causou confusão com o efeito fotoelétrico e curiosidade sobre este efeito com o que poderia resultar. Tanto, que este foi o estudo preliminar para que C. Fritts desenvolvesse os primeiros dispositivos conhecidos como células fotovoltaicas em 1883.

Tal efeito consiste no movimento de elétrons de forma ordenada, que potencializa a criação de uma banda de energia em um material semicondutor, quando exposto a luz.

Materiais semicondutores são utilizados em equipamentos eletrônicos devido a sua característica atômica, que podem mudar sua condição de isolante para um material condutor devido ao estímulo conduzido (FADIGAS, 2019). Porém, uma particularidade dos materiais semicondutores que possuem três bandas de energia, isto possibilita a condução de elétrons resultando em uma diferença de potencial a partir de uma quantidade mínima de energia para que mude de uma camada para outra, conhecidas como banda de valência, banda de condução e *gap* (PINHO E GALDINO, 2014).

A definição para se tenha uma energia suficiente para a mudança de banda dos elétrons é conhecido como *gap* (E_g), expressada em elétron-volt (eV). Por conceitos da teoria quântica da matéria, foi possível chegar a uma conclusão matemática visto na Equação 1. A absorção de fótons incidentes no material com energia superior ao E_g possibilita a dissipação de calor excedente.

$$E_g = hf \quad (1)$$

Sendo que:

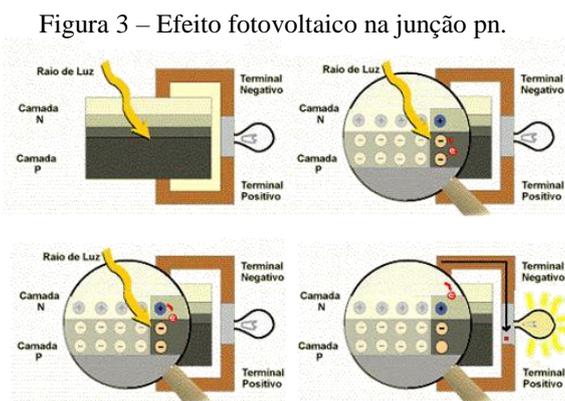
h : Corresponde a constante de Plank;

f : Corresponde a frequência da radiação que incide no material;

Diante disto, para a geração de eletricidade pelo efeito fotovoltaico o material mais comum na utilização para módulos fotovoltaicos é o Silício, na qual possui quatro elétrons em sua camada de valência que compartilham com os átomos ao seu redor, que

estão combinados com outros tipos de materiais dopados, como são os casos de Fósforo e Boro que contêm cinco e três elétrons em seus átomos, respectivamente (PORTAL SOLAR, 2021).

Conforme pode ser observado na Figura 3, com a energia recebida a partir do fóton de luz e a rede cristalina formada, ao integrar Silício junto ao Fósforo, um elétron ficará disposto a sair de sua orbital por ter elétrons em excesso que não podem fazer parte a ligação do átomo, conseqüentemente o átomo disposto a banda de condução para se conectar em um átomo disposto a receber. Assim, denomina-se que o fósforo é um dopante doador de tipo semiconductor *n*. Enquanto, a ligação entre Boro e Silício haverá a falta de um elétron para que a camada de valência fique completa com oito átomos, sendo suscetível que um elétron vizinho tome esta lacuna até então, denominando Boro como um dopante aceitador de tipo semiconductor *p* (CRESEB, 2014).



Fonte: CRESEB (2014).

Mas devido a agitação térmica causada pelo efeito dos raios solares no material, ocasiona que os elétrons do tipo *n* busquem o lado do semiconductor tipo *p* para que possa completar a camada de valência necessária. Porém, com as cargas dos elétrons referentes a cada lado do semiconductor, sendo elas positivas ou negativas, são chamadas em zona de depleção referente a região de encontro entre os polos *pn*, sendo que o acúmulo de íons nessa região resulta em um campo elétrico capaz de gerar décimos de tensão.

Para os fótons alcançarem a zona de depleção *pn*, o campo elétrico direciona o elétron doador para o terminal negativo e o aceitador para o terminal positivo. Assim, muitos elétrons realizando este efeito constituem em uma corrente fotovoltaica ou ainda conhecido como fotocorrente (PINHO E GALDINO, 2014).

A resultante do diferencial de potencial entre as bandas p e n quando os materiais entram em contato, o nível de equilíbrio é atingido. Pode ser calculada esta tensão a partir da apresentação na Equação 2:

$$V_o(T) \cong \frac{k \times t}{q} \times \ln\left(\frac{N_d \times N_a}{n_i^2}\right) \quad (2)$$

Sendo que:

$V_o(T)$ – Diferença de potencial na junção;

k – Constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$); t – Temperatura absoluta (K);

q – Carga de elétron ($1,6 \times 10^{-19}$);

N_d – Concentração dopante tipo n ;

N_a – Concentração dopante tipo p ;

n_i – Concentração de portadores intrínsecos no material.

Se o material semiconductor que tenha a dopagem de outros átomos do tipo p e n , quando exposto a radiação solar com uma energia maior do que a E_g , observa-se o efeito fotovoltaico. Caso a energia de gap seja maior que a energia incidente dos fótons, isto é considerado como um fator limitante em relação a eficiência da placa fotovoltaica para a conversão de energia elétrica (FADIGAS, 2019).

2.1.2 Características Elétricas

Para a produção de módulos fotovoltaicos são considerada as normas que definem valores para ensaio em condição padrão, considerando a irradiância solar de 1.000 W/m^2 , temperatura da célula de 25°C e a distribuição espectral para massa de ar sendo AM 1,5. Sendo assim, o comportamento elétrico dos painéis fotovoltaicos apresenta as mesmas características elétricas em forma geral. A produção destes se vêm a partir da conexão em série de células fotovoltaicas a fim que seja capaz da geração mínima necessária para produção de tensão e corrente ao sistema de energia elétrica (ALVARENGA, 2014). Atualmente, o material mais utilizado para as células é o Silício com a capacidade individual de tensão entre $0,5$ e $0,8\text{V}$, onde geralmente são produzidos módulos com 36, 60 ou 72 células, isso corresponde que suas tensões nominais serão aproximadamente 18, 30 ou 36V. Porém estes valores de tensões não são fixos, dependentes da corrente elétrica (ALVARENGA, 2014).

Os parâmetros conhecidos como tensão e corrente de máxima potência (V_{MP} , I_{MP}) resultará, a partir da Lei de Joule pelo produto dos dois valores, em máxima potência (P_{MP}). Além de, em seu funcionamento com a absorção da irradiação solar, a partir de um multímetro com funções de voltímetro e amperímetro com o módulo desconectado, pode ser observado os valores de tensão de circuito aberto (V_{oc}) e a corrente de curto-circuito (I_{sc}).

O funcionamento de um painel fotovoltaico pode ser observado com a relação da tensão pela corrente, na qual é possível observar o comportamento elétrico dos parâmetros citados anteriormente. Sendo o comportamento da curva similar para a célula e módulo (FADIGAS, 2019).

A definição da corrente elétrica em uma célula é definida pela somatória da corrente da junção pn . Definida pelo cientista William Bradford Shockley, na qual a Equação 3 leva o seu sobrenome como Equação de Shockley, a equação da corrente em função da tensão do dispositivo, denominada como equação da curva característica ou ainda curva $I-V$. Na célula fotovoltaica há resistências em série e em paralelo devido a junção metal-semicondutor, malhas metálicas, regiões dopadas, pontos de curto-circuito na junção pn etc (FADIGAS, 2019).

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V+IR_S)}{mKT}\right) - 1 \right] - \frac{V+IR_S}{R_p} \quad (3)$$

Sendo que:

I_L – Corrente fotogerada (A);

I_0 – Corrente da saturação reversa do diodo

(A); q – Carga de elétron ($1,6 \times 10^{-19}$ C);

m – Fator de idealidade do diodo, definido como número adimensional entre 1 e 2, sendo obtido através de ajustes de dados pela medição experimental;

k – Constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K);

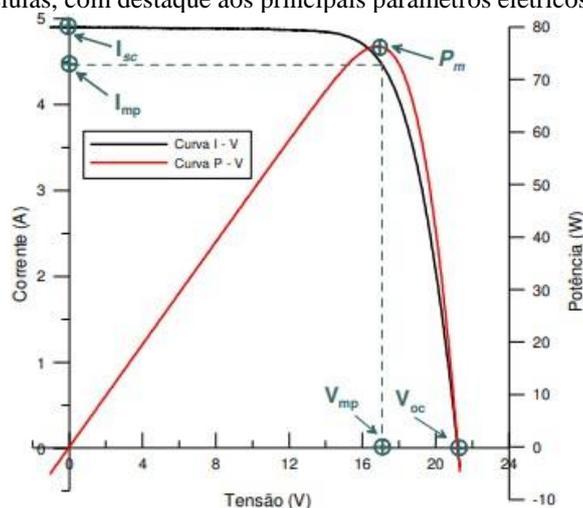
T – Temperatura absoluta (K);

R_S – Resistência em série;

R_P – Resistência em paralelo;

A partir da curva $I-V$ pode se determinar a potência gerada a cada ponto naquela condição, sendo a Figura 4 representada pela curva $I-V$, em seu formato não real onde está refletida ao primeiroquadrante, junto a curva PV e podendo ser observado os parâmetros elétricos.

Figura 4 – Curva característica IV medida e curva de potência fotovoltaica para um módulo com 36 células, com destaque aos principais parâmetros elétricos.



Fonte: GASPARIN (2019).

2.2 GERAÇÃO DISTRIBUIDA

Para os sistemas fotovoltaicos há duas principais classificações, sistemas isolados (*off grid*) ou sistemas conectados à rede (*on grid ou grid tie*). Sendo composto por equipamentos com a finalidade de aproveitar a energia solar e a partir do efeito fotovoltaico, converter em energia elétrica. A geração realizada depende da disponibilidade dos recursos energéticos, neste caso sobre a irradiância solar. Independente do sistema utilizado, isolado ou conectado à rede, há necessidade de conexão a um acumulador de carga para o armazenamento, em sistemas fotovoltaicos conectados à rede é utilizado a rede elétrica da distribuidora como a carga, onde o gerador será uma fonte de energia elétrica e injetará na rede. Enquanto um sistema isolado terá componentes a mais no seu sistema para que faça o armazenamento através de bancos de baterias, realizando o consumo posteriormente (NARUTO, 2017).

A oportunidade para utilização de sistemas fotovoltaicos no Brasil se veio apenas em 2012 pela ANEEL com a Resolução Normativa nº 482/2012, esta proposta permitiu a criação de sistemas de Geração Distribuída local. Por conceito, segundo o Instituto Nacional de Eficiência Energética, o termo de Geração Distribuída (GD) é usado para conceituar a geração de energia elétrica localizada próxima à unidade consumidora

independente da potência, tecnologia e fonte de energia, sendo não necessário linhas de transmissão em altas tensões aos centros consumidores.

Por meio da Resolução nº 482/2012 com as revisões posteriormente em 2015 e 2017, ficou adotado as definições:

- **Microgeração distribuída:** “Central gerador de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW [...]” (ANEEL, 2012, p.1)
- **Minigeração distribuída:** “Central gerador de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor igual a 5 MW [...]” (ANEEL, 2012, p.2)

2.2.1 Sistemas On Grid

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) dispensam do uso de armazenadores de energia, devido a geração de energia elétrica poder ser consumida de forma imediata pelo consumidor, ou injetando esta energia excedente à rede de distribuição e terá o seu consumo imediato por outros consumidores que estão conectados a esta rede (PINHO E GALDINO, 2014). Para que isso seja possível e para que seja registrado a quantidade de consumo pela rede convencional *versus* a quantidade de energia injetada na rede, há a necessidade da utilização do medidor bidirecional. Ou ainda, pode ser adotado dois medidores unidirecional para que realize as medições de maneira precisa sobre o consumo e geração.

Para a cobrança energética pelas distribuidoras de energia elétrica, são conhecidos dois sistemas: compensação *net-metering* e a *feed-in tariff*. São modelos adotados para acelerar o investimento na geração distribuída, onde a depender de particularidades de cada país tem se adotado uma opção (PORTALSOLAR, 2017).

2.2.1.1 Sistema de Compensação

No Brasil, o modelo adotado para tarifação em microgeração distribuída é conhecido como sistema de compensação *net-metering*. Por definição na Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, o sistema de compensação tem a definição de:

Sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa. (ANEEL, 2012, p. 2)

Sendo assim, a energia elétrica gerada através de uma GD irá ser usada para compensar o consumo de energia elétrica do local. Quando ocorre de a unidade consumidora ter um excedente de energia, na qual foi injetada na rede, será definido como um crédito em energia ativa a ser consumida e que poderá ser utilizada com validade de sessenta meses.

Como em período de solstício marcando o início do inverno, a geração elétrica por fonte solar será menor quando comparado ao período de verão. Assim, podendo ser necessário o uso dos créditos anteriormente cedidos (ALVES, 2017).

A aplicação da maneira que será compensado a unidade consumidora é denominada a partir das políticas públicas locais. Como comparativo, na Califórnia os créditos são válidos por doze meses ao consumo de energia elétrica, porém ao final deste período os consumidores com energia excedente podem receber um pagamento, conhecido como compensação do excedente líquido (*net surplus compensation – NSC*) consistindo na média móvel dos meses requerentes (DANTAS, 2018).

O modelo de política denominado *feed-in tariff* é um mecanismo para incentivar e acelerar o mercado de energia renovável através de contratos de longo prazo para os produtores desta energia alternativa, sendo estabelecido com base no preço do custo da geração. Acontece que, o valor a ser pago pela energia injetada a rede é maior quando comparado ao valor da energia proveniente da distribuidora. Normalmente, este modelo ocorre ajustes ao longo do tempo e que mantenha o incentivo a energia renovável (DANTAS, 2018).

Exemplos de países que inicialmente adotaram a política de incentivo baseada na *feed-in tariff* são Alemanha e França. Na França, os contratos iniciais foram concedidos com duração de 20 anos ao produtor em que terá o recebimento a partir da distribuidora por injetar energia. Este valor do *feed-in tariff* vai diminuindo progressivamente a partir da concessão, onde cada vez em que o limite da capacidade é alcançado terá o decréscimo no valor de 2,6 % ao próximo trimestre (DANTAS, 2018).

3 METODOLOGIA

Este trabalho apresenta uma análise do mercado de geração distribuída juntamente a um estudo de caso de um sistema fotovoltaico *on-grid* em uma residência no município de São Paulo, estado de São Paulo, a partir de simulações computacionais no *software* PVSol, com o objetivo de analisar a viabilidade econômica deste estudo de caso. Também, a realização deste estudo de caso traz a prática do que é visto na seção da

revisão da literatura e a visão do cenário atual no que se diz respeito sobre geração distribuída.

O início do projeto aborda alguns desafios e oportunidades que um engenheiro eletricitista encontra no mercado de geração distribuída, especificamente da energia solar. Os desafios e oportunidades que estão presentes no cotidiano do engenheiro, foram fundamentados a partir de pesquisas bibliográficas da Revista Econômica do Nordeste e Naruto.

Em seguida, relacionado ao tópico dos desafios e oportunidades, a próxima etapa traz em pauta a discussão regulatória no mercado de energia solar. Nela, são destacados pontos importantes sobre o futuro deste mercado que está em desenvolvimento baseando-se no arcabouço legal vigente, com destaque nas disposições da Lei Federal nº 14.300/2022 e REN ANEEL nº 1000/2021.

A partir da fundamentação teórica, na próxima etapa são apresentados os dados do sistema fotovoltaico que foi realizado estudo. Nesta seção, são apresentadas as informações preliminares relacionadas a simulação, equipamentos escolhidos e premissas financeiras. Em continuação ao estudo de caso, são apresentados os dados do funcionamento do sistema e a simulação financeira do projeto, a fim do retorno do valor investido inicialmente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

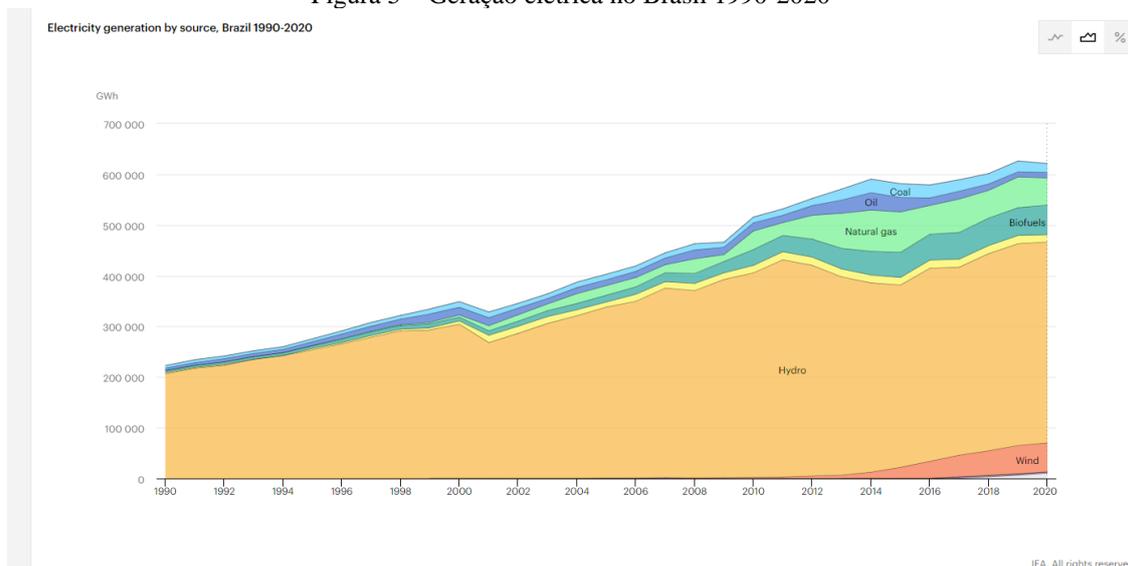
4.1 DESAFIOS E OPORTUNIDADES DO MERCADO FOTOVOLTAICO

O Brasil é considerado um dos países com maiores potencial para a geração de energia fotovoltaica devido ao tamanho em área do país e pelo valor da irradiância solar média durante o ano. É de ressaltar a baixa variabilidade da irradiação solar do país, onde o menor valor medido foi na região sul com irradiação global horizontal de 4,53 kWh/ (m². dia) quando comparado ao maior valor na região nordeste com irradiação global horizontal de 5,49 kWh/ (m². dia) (PEREIRA *et al*, 2017), sendo que o recomendado para um sistema tenha uma irradiação mínima de 3 a 4 kWh/ (m². dia), visto na publicação do INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, junto a diversos autores ao Atlas Brasileiro de Energia Solar, em segunda edição no ano de 2020.

Além disto, a transição energética de fontes fósseis para fontes renováveis para a geração de energia elétrica, e a importância da diversificação e ampliação da matriz elétrica brasileira por fontes renováveis mostra a oportunidade para crescimento da fonte solar fotovoltaica, o que promove importante auxílio à segurança energética. Onde

ainda, a geração de energia elétrica é muito dependente por fontes da hidráulica, 65,2%, e a geração elétrica a partir de fontes não renováveis representam 15,8%, enquanto a solar representa apenas 1,66% da oferta interna (Empresa de Pesquisa Energética, 2021). De acordo com o IEA – International Energy Agency (2022) o balanço de geração de energia no país na ausência de recursos hídricos disponíveis é fortemente compensado pelo uso de usinas térmicas predominantemente de combustíveis fósseis (diesel, carvão e álcool) como é demonstrado no Figura 5 abaixo.

Figura 5 – Geração elétrica no Brasil 1990-2020



Fonte: IEA (2022).

Esta compensação e acionamento do uso dos combustíveis fósseis acarreta no impacto das bandeiras tarifárias e o aumento dos gastos com energia elétrica. De acordo com a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE (2022) o cálculo da bandeira tarifária utiliza os dados de geração hidrelétrica, MRE (Mecanismo de Realocação de Energia) aplicado à geração hidrelétrica e a garantia física das usinas. Ou seja, a baixa produção hidrelétrica e compensação com fontes não renováveis impactam na cor da bandeira aplicada no mês subsequente.

Em uma matriz elétrica onde há possibilidades de reduzir a participação de fontes não renováveis, isto pode promover a redução da emissão de gases do efeito estufa durante a geração de energia (Revista Econômica do Nordeste, 2021). Com isto, junto ao grande potencial que o país possui e as crises hídricas que o Brasil sofre há anos, há oportunidade de crescimento da oferta de energia elétrica por fonte solar, podendo ser uma das principais fontes de fornecimento de energia elétrica do Brasil.

Desde 2012, o crescimento deste mercado já atraiu mais de R\$82 bilhões de reais em novos investimentos, também resultando em mais de 459 mil novos empregos gerados neste segmento (ABSOLAR, 2022). Estes números tendem a acompanhar o crescimento da capacidade instalada de energia por fonte solar devido à alta atratividade para a instalação de sistemas fotovoltaicos. As oportunidades de ingressar no mercado são diversas, como as áreas de desenvolvimento de projetos, implantação, manutenção, fabricação de componentes etc.

Neste período, é notório a evolução tecnológica de todos os componentes que compõem o sistema fotovoltaico, principalmente em relação a eficiência. Apesar disto, estes sistemas ainda possuem diversas perdas devido as características técnicas dos seus componentes, temperatura e condições climáticas. Componentes que atendam todos os possíveis problemas são desafiadores para evolução tecnológica.

Porém, um dos maiores desafios sobre os componentes solares está relacionado a finalidade dos componentes de um sistema fotovoltaico, estes que possuem uma estimativa de vida útil de 25 anos de produção de energia. Após este período, é necessário o descomissionamento e o descarte correto dos materiais, soluções que ainda são escassas no Brasil, visto que no ano da primeira resolução normativa, em 2012, só havia 7 sistemas conectados (ABSOLAR, 2022).

Ainda, a infraestrutura por parte das distribuidoras de energia também precisa acompanhar a evolução tecnológica conforme o crescimento do mercado. A necessidade de uma boa infraestrutura por meio da adequação das subestações elétricas, linhas de rede, transformadores etc. são essenciais à conexão de novos sistemas. Em sistemas de geração distribuída na modalidade de autoconsumo remoto² encontra-se dificuldades para encontrar as localizações para a construção das usinas, pois muitas subestações não estão adequadas para atender a conexão da potência, o que impedem o desenvolvimento da usina naquela região.

A competição de componentes de um sistema fotovoltaico no mercado mundial é um desafio, visto que a China predomina este mercado. No Brasil, temos apenas 30 fabricantes de componentes solar cadastradas no FINAME (Agência Especial de Financiamento Industrial) do BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) (ABSOLAR, 2022). A criação de incentivos à pesquisa e inovação tecnológica

² Modalidade de sistema que o consumidor pode instalar uma microgeradora ou minigeradora em um local diferente do consumo de energia e utilizar os créditos gerados para compensar seu consumo, desde que esteja na mesma área de concessão da distribuidora

e o desenvolvimento de indústrias para o setor de energia solar fotovoltaica, são decisões do poder público que podem criar competições nacionais dos componentessolares, o que pode viabilizar mais projetos (Revista Econômica do Nordeste, 2021).

Além da criação de políticas públicas que possam estimular o setor, através da contratação de energia por leilões de energia nova, acesso a melhores condições de financiamentos e com leis que tragam mais segurança jurídica ao setor, como é o caso da Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022, que instituiu o marco legal da geração distribuída.

Ocorre atualizações constantes no setor a partir de Resoluções Normativas, alterando atos normativos anteriores à adequação do mercado brasileiro o que impacta nos projetos dos sistemas fotovoltaicos. Por isto, há necessidade de o profissional da área estar em constante acompanhamento destas resoluções e Leis.

4.2 MARCO LEGAL DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Desde o ano de 2012, por meio da Resolução Normativa Nº 482/2012 da ANEEL, permitiu ao consumidor brasileiro a geração elétrica própria por fontes renováveis, sendo possível reduzir a fatura mensal do consumo elétrico pelo sistema de compensação, que é o empréstimo da energia elétrica da unidade geradora à distribuidora local, sendo convertido em crédito relacionado ao uso da energia elétrica diretamente (VELOSO *et al*, 2021).

Com a Resolução Normativa Nº 687/2015, obteve-se alterações importantes no setor e que muitas destas ainda são válidas, como foi a criação das modalidades de autoconsumo remoto e geração compartilhada, alteração no prazo dos créditos de energia, aumento da potência para usinas de minigeração e entre outras alterações (VELOSO *et al*, 2021). Apesar da abertura do mercado em 2012, essas alterações atenderam pedidos do mercado solar e trouxe muitos investimentos a partir do ano desta publicação.

Em 2017 houve uma nova revisão, com a Resolução Normativa Nº 724/2016, onde detalha as etapas com critérios e requisitos técnicos para solicitação de acesso³ de micro e minigeração distribuída aos consumidores (VELOSO *et al*, 2021). A princípio,

³ Processo obrigatório pelo consumidor junto a distribuidora de energia local a fim de que possa produzir e conectar sua fonte geradora de energia elétrica na rede da distribuidora, seguindo os procedimentos e requisitos técnicos da ANEEL e distribuidora local.

foram legislações e incentivos com base no mercado exterior, mas ao passar dos anos foram sofrendo alterações para se adaptar ao mercado brasileiro.

A AIR (Análise de Impacto Regulatório) em 2018, AIR Nº 0004/2018, fazia parte de um processo de revisão da Resolução Normativa 482/2012 pela ANEEL sobre o modelo do sistema de compensação que estava vigente desde o início. Inicialmente, as alternativas propostas pela ANEEL impactariam na redução de economia aos consumidores, pois em cada alternativa haveria uma dedução de algum componente da tarifa energética ao consumidor com a geração distribuída e que hoje não existem para quem produz sua própria energia, o que traz impacto econômico por ter um maior tempo do retorno do investimento, *payback*.

Figura 6: Alternativas para o novo sistema de compensação de energia elétrica para sistemas de geração distribuída, propostas pela ANEEL. (é compensado pela geração; X – deixa de ser compensado)

ALTERNATIVA	TE		TUSD			
	Energia	Encargos	Tranf. Fio A	Transf. Fio B	Perdas	Encargos
1	✓	✓	✓	X	✓	✓
2	✓	✓	X	X	✓	✓
3	✓	✓	X	X	X	✓
4	✓	✓	X	X	X	X
5	✓	X	X	X	X	X

Fonte: VEIGA *et al* (2020)

Como pode ser visto na Figura 6 acima e a partir desta proposta, o setor de geração fotovoltaico por meio de associações como ABSOLAR, surgiu a necessidade de entendimento em busca de um marco legal para que haja maior segurança política ao uso da geração solar. Neste contexto, em novembro de 2019 o deputado federal Silas Câmara apresentou o veículo como projeto de lei de Nº 5829/2019, que tramitou no legislativo até o ano de 2021. Sendo sancionada pelo presidente da República a Lei Nº 14.300, em 6 de janeiro de 2022, essa lei ficou conhecida como o Marco Legal da Geração Distribuída.

Este Marco Legal trouxe diversas mudanças ao setor de geração distribuída, sendo algumas dessas mudanças em vigência com diferentes prazos, sendo o prazo limite após a publicação da Lei de 180 dias para a regulação da ANEEL e de 180 dias para as distribuidoras se adequarem, além do período de vacância.

Aos consumidores que já possuem sistemas para geração própria de energia ou aqueles que protocolarem sua solicitação de acesso até 12 meses após a publicação da lei, ou seja 06/01/2023, ficam mantidas as condições do sistema de compensação de energia

previstos na publicação da REN N° 482/2012 até 31/12/2045 para estes consumidores, ação conhecida como direito adquirido. Que seria a compensação de todas as componentes tarifárias das Tarifas de Energia (TE) e Tarifas de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD). A TUSD possui duas componentes principais sendo elas, a componente “Fio B” que está relacionada a todos os custos da utilização da infraestrutura da rede de distribuição da concessionária local até a entrega de energia em residências, comércios e etc. Esta é calculada anualmente pela concessionária e revisado pela ANEEL, já a componente “Fio A” está relacionada aos custos vinculados à manutenção e operação das linhas de transmissão. Cada um desses valores possui uma parcela diferente da tarifa de energia: cerca de 6% para o Fio A e 28% para o Fio B, que são médias nacionais pois cada distribuidora tem participações diferentes de cada componente da tarifa (MARQUES, 2022).

Ainda neste período de 12 meses após a publicação da lei, conhecido como período de vacância, a potência máxima dos projetos será mantida assim como descrito na REN 687/2015, que enquadram como projetos de microgeração com potência até 75kW e como projetos de minigeração com potência até 5MW. Com o Marco Legal, os projetos solicitados como minigeração após o período de vacância terão sua potência máxima alterada, para fonte solar fotovoltaica de até 3MW enquanto fontes despacháveis continuará como 5MW.

O Marco Legal prevê o encontro de contas no prazo de 18 meses após a publicação da Lei, em que a ANEEL junto com o Conselho Nacional de Política de Energética terão que apresentar todos os custos e benefícios da geração distribuída. A partir disto, originará a nova regra definitiva aos projetos em que houve a solicitação de acesso após o período de 12 meses da publicação da Lei, que entrará em vigor a partir de 2029 para alguns consumidores.

Para os projetos homologados após este período de vacância, inicia-se a cobrança de alguns componentes tarifárias, mas com regras de transição diferentes entre as modalidades de geração. Para as modalidades de geração junto a carga, geração compartilhada, autoconsumo remoto com potência até 500kW e fontes despacháveis terão a cobrança de forma escalonada entre os anos 2023 e 2028 referente a tarifa da TUSD fio B, tarifa do uso da rede elétrica da distribuidora, e a partir do ano de 2029 inicia-se a nova regra fruto do encontro de contas, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1: Modelo de valoração de créditos com pagamento da TUSD fio B para sistemas de modalidades de geração junto a carga, geração compartilhada, autoconsumo até 500kW e fontes despacháveis.

2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
15%	30%	45%	60%	75%	90%	Nova Regra

Fonte: BRASIL (2022).

Às modalidades de autoconsumo remoto com potência maior que 500kW e geração compartilhada quando uma unidade consumidora (UC) receber mais de 25% dos créditos, terão regradiferente em relação a cobrança de uso da rede. Com a cobrança integral da TUSD fio B, mais a cobrança de 40% referente ao uso da rede elétrica de transmissão, TUSD fio A, mais taxas de Tarifade Fiscalização do Setor Elétrico (TFSSE) e encargos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D).

Tabela 2: Modelo de valoração de créditos para sistemas de modalidades de autoconsumo remoto maioresque 500kW e geração compartilhada quando uma UC tiver mais que 25% dos créditos alocados.

2023 a 2028	2029
100% da TUSD fio B + 40% da TUSD fio A + TFSEE + P&D	Nova Regra

Fonte: BRASIL (2022).

Mas aos consumidores que realizarem a solicitação de acesso entre o 13º e 18º mês após a publicação da Lei, sofrerão do benefício da cobrança da nova regra ser realizada a partir de 2031, pois estes ainda não conhecerão o resultado do encontro de contas. Aos consumidores que apresentarem o projeto a partir do 19º mês, terão uma transição mais curta e será válido a aplicação da nova regra definitiva a partir de 2029, isto porque já conhecerá o resultado do encontro de contas.

Uma das mudanças que afeta os créditos dos consumidores é em relação a cobrança do custode disponibilidade, cobrança que impedia a fatura nula de energia elétrica pois o consumidor é obrigado a pagar uma tarifa mínima sob o valor proporcional de acordo com o tipo de fornecimento de energia elétrica. Para consumidores atendidos na rede monofásica, bifásica ou trifásica, possuem um custo de disponibilidade equivalente a 30kWh, 50kWh e 100kWh, respectivamente. Diante disto, um consumidor atendido na rede bifásica que já possui homologado o sistema até o 12º mês, deixaráde realizar o pagamento em duplicidade do custo de disponibilidade, injeção de 50kWh na rede e o pagamento no valor proporcional a isto, podendo então acumular

mais créditos ao seu futuro consumo. Estes créditos que podem vir a ser comprados pelas distribuidoras no futuro, mas que este assunto ainda depende da regulação da ANEEL.

A fim de ter mais segurança no mercado de energia fotovoltaica, obrigara-se o pagamento de 2,5% ou 5% do valor do projeto para potências maiores de 500kW e 1MW, respectivamente, exceção para geração compartilhada em cooperativa e consórcio, mas que também ainda necessita deregulação da ANEEL. Este ato de pagamento evitará a prática de vendas de Pareceres de Acesso, documento emitido do processo da solicitação de acesso. Pois também, só será possível a troca da titularidade após a construção e vistoria do empreendimento por parte da distribuidora.

Além desta Lei, a ANEEL publicou uma nova Resolução Normativa no dia 07 de dezembro de 2021, REN N° 1.000/2021, que define as responsabilidades dos agentes e os procedimentos para serem seguidos pelos consumidores para o acesso ao serviço. Consolidando diversas normas que estavam no âmbito da ANEEL, simplificando-as e adequando os procedimentos para a prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica. Está resolução também em função da Lei N° 14.195/2021, que trata da Modernização do Ambiente de Negócios no Brasil e contém um capítulo sobre obtenção da eletricidade (PORTAL SOLAR, 2022).

Como é o caso de algumas alterações diante ao protocolo solicitação de acesso. Os prazos para sistemas de microgeração continuam sendo de até 30 dias, enquanto para sistemas de minigeração foram reduzidos para até 45 dias, antes de até 60 dias. Além dessa alteração que envolve diretamente sobre GD, ocorreu diversas alterações aos consumidores cativos, mas que foram estabelecidos prazos para adaptação das novas regras pelas distribuidoras.

4.3 ESTUDO DE CASO

Esta seção tem como finalidade a apresentação dos dados gerados pelo *software* PVSol. O objeto do estudo de caso considera a moradia fictícia de três adultos em uma residência na cidade de São Paulo/SP, com bons índices de irradiação e tal residência possui um consumo médio de 284 kWh/mês, projetado um sistema fotovoltaico *on-grid* com potência instalada de 2kWac/2,73kWp.

Para este projeto foram considerados a utilização de 6 módulos monocristalinos com a potência de 455Wp, RSM156-6-430M-455M, sendo produzidos pela Risen Solar Technology e possuem uma eficiência máxima de 21%. Estes módulos foram projetados para serem instalados paralelo ao telhado na orientação Norte, com uma inclinação de

20° e ocupariam uma área no telhadode aproximadamente 13m², pois possuem dimensões de 2,178 x 0,996 m. Foi utilizado no projeto uminversor do modelo SUN2000-2KTL-1, produzido pela Huawei com potência de 2 kW e máxima eficiência de 98,2%, com máxima potência DC recomendada de 3kWp e possuindo diversas proteçõeselétricas AC/DC que são fundamentais à segurança do sistema. Para o melhor rendimento do sistemafoi considerado a conexão de duas séries de módulos fotovoltaicos ao inversor, denominadas em inglês de *strings*, sendo que em cada *string* possuem três módulos conectados em série.

Os dados climáticos da região foram obtidos a partir do *software* PVSol. Após inserir as informações de localização do projeto, o *software* utiliza os dados presentes em seu banco de dados.Assim, consideram-se as informações climáticas de São Paulo entre os anos de 1996 e 2015, sendo a fonte destes valores são de Meteonorm 8.1. O Meteonorm é uma combinação de fontes de dados e ferramentas de cálculo. Essa base de dados possibilita acesso a anos típicos e séries temporais históricas de dados climatológicos. Também, foi desconsiderado obstáculos que possam obstruir os módulos fotovoltaicos e realizar sombreamento. A partir destas premissas, resultaram as informações da eficiência do sistema fotovoltaico projetado.

Com isto, a partir dos dados resultantes do *software*, a previsão de rendimento anual para estesistema seria de 1.288 kWh/kWp e em um sistema com desempenho de 81,67%, sendo a energia gerada de 3.527 kWh/Ano. A energia gerada pelo consumidor a partir deste sistema fotovoltaico trazbenefícios ambientais, econômicos e autonomia em relação ao consumo da energia elétrica.

Com a geração de 3.527 kWh/ano, evita-se que este valor de energia venha a ser gerado porfontes não renováveis e que com isto realizem a emissão de dióxido de carbono na atmosfera. Este sistema fotovoltaico, evita a emissão de 1.653 kg de CO₂ por ano com está produção de energia elétrica.

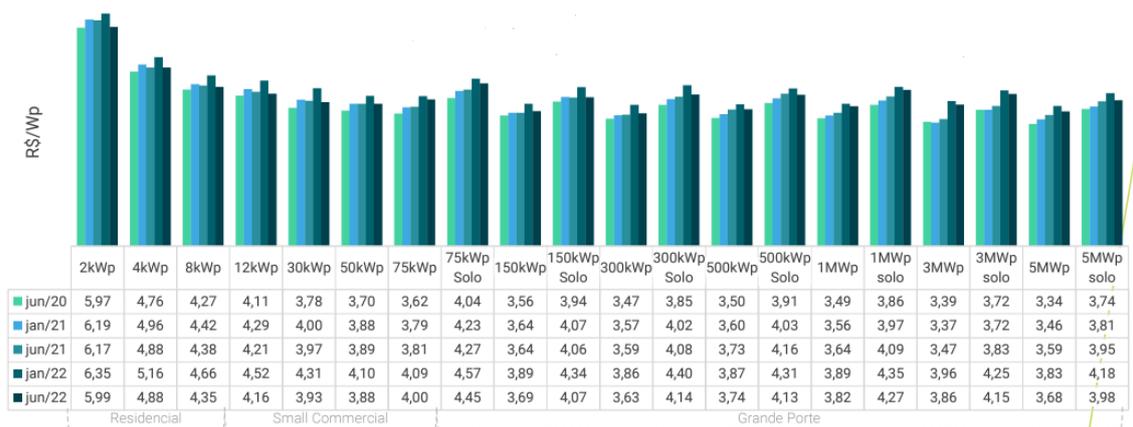
A autonomia do consumo elétrico pode ser considerada durante o horário de sol pleno na região, os sistemas fotovoltaicos possuem em média 10 horas de funcionamento por dia. Durante esteperíodo, a energia que está sendo gerada pelo sistema fotovoltaico pode ser consumida instantaneamente pela unidade consumidora, porém caso a energia gerada seja excedente ao consumo, será injetada na rede da distribuidora e, portanto, será compensada por créditos de acordo com a Resolução Normativa N° 482/2012. De acordo com a simulação realizada, este sistema conectado resultaria emum nível de 39,4% de autonomia para a UC.

4.3.1 Econômico

Para as análises econômicas do projeto, foram considerados as seguintes premissas em relação as finanças: investimento de capital sem juros por não ser proveniente de financiamento e inflação de 10% ao ano da tarifa de energia. Para o cálculo da tarifa da energia, foi considerada a tarifa Convencional B1 Residencial Monofásica da distribuidora ENEL-SP do mês de maio de 2022, no valor de R\$ 0,9445, sendo desconsiderado o acréscimo de possíveis bandeiras tarifárias que impactam na conta do consumidor.

Para o cálculo de investimento ao sistema fotovoltaico, foi considerado o estudo realizado pela Greener (2022) que apresenta tabela comparativa de preços de sistemas fotovoltaicos para o consumidor final, conforme pode ser visto na Figura 7 abaixo.

Figura 7: Preços sistemas FV



Fonte: Adaptado de GREENER (2022).

O valor base de 5,44 R\$/ kWp, foi calculado considerando uma média entre os preços do custos de projetos de 2kWp e 4 kWp apresentados pela Greener (2022) a ser realizado pela empresa integradora. O total de R\$ 14.851,20 representa o montante que deve ser investido para montagem dos serviços eletromecânicos, fornecimento e logística de todos os equipamentos solares e a realização dos projetos para homologação junto a distribuidora. Desconsiderando obras de melhoria no sistema elétrico e reforço estrutural para sustentação dos módulos no telhado.

Foi considerado que a implantação do projeto irá ocorrer até o 12º mês da publicação da Lei do Marco Legal, para que assim a UC tenha o direito adquirido do sistema de compensação. Sendo este o melhor cenário econômico ao consumidor com

geração distribuída. Na Tabela 3 é possível visualizar o fluxo de caixa durante 25 anos do projeto, acumulando um total de R\$ 250.034,34, período considerado devido a vida útil do módulo. Observa-se que no 5º ano o fluxo de caixa torna-se positivo pois o *payback* do projeto resultou em 4,1 anos. O fluxo de caixa foi calculado de acordo com a equação abaixo.

$$\text{FluxoTotal} = (\text{Investimento} - \text{Economia de Energia}) + \text{Fluxo do Ano Anterior} \quad (4)$$

Tabela 3: Fluxo de caixa do sistema fotovoltaico durante o período de 25 anos.

	Investimentos	Economia de Energia	Fluxo de Caixa
ANO 1	-R\$ 14.851,20	R\$ 2.991,24	-R\$ 11.859,96
ANO 2	R\$ 0,00	R\$ 3.270,55	-R\$ 8.589,41
ANO 3	R\$ 0,00	R\$ 3.575,82	-R\$ 5.013,59
ANO 4	R\$ 0,00	R\$ 3.909,43	-R\$ 1.104,16
ANO 5	R\$ 0,00	R\$ 4.274,02	R\$ 3.169,86
ANO 6	R\$ 0,00	R\$ 4.672,42	R\$ 7.842,28
ANO 7	R\$ 0,00	R\$ 5.107,76	R\$ 12.950,04
ANO 8	R\$ 0,00	R\$ 5.583,45	R\$ 18.533,49
ANO 9	R\$ 0,00	R\$ 6.103,19	R\$ 24.636,68
ANO 10	R\$ 0,00	R\$ 6.671,06	R\$ 31.307,74
ANO 11	R\$ 0,00	R\$ 7.291,46	R\$ 38.599,20
ANO 12	R\$ 0,00	R\$ 7.969,23	R\$ 46.568,43
ANO 13	R\$ 0,00	R\$ 8.709,64	R\$ 55.278,07
ANO 14	R\$ 0,00	R\$ 9.518,44	R\$ 64.796,51
ANO 15	R\$ 0,00	R\$ 10.401,91	R\$ 75.198,42
ANO 16	R\$ 0,00	R\$ 11.366,88	R\$ 86.565,30
ANO 17	R\$ 0,00	R\$ 12.420,83	R\$ 98.986,13
ANO 18	R\$ 0,00	R\$ 13.571,90	R\$ 112.558,03
ANO 19	R\$ 0,00	R\$ 14.828,98	R\$ 127.387,01
ANO 20	R\$ 0,00	R\$ 16.201,75	R\$ 143.588,76
ANO 21	R\$ 0,00	R\$ 17.700,79	R\$ 161.289,55
ANO 22	R\$ 0,00	R\$ 19.337,62	R\$ 180.627,17
ANO 23	R\$ 0,00	R\$ 21.124,81	R\$ 201.751,98
ANO 24	R\$ 0,00	R\$ 23.076,05	R\$ 224.828,03
ANO 25	R\$ 0,00	R\$ 25.206,31	R\$ 250.034,34

Fonte: Autoria própria, 2022.

Aos consumidores que obterem a instalação do sistema fotovoltaico no 13º mês da publicação da Lei, realizarão o pagamento gradativo da tarifa da TUSD fio B. Para esta classificação da unidade consumidora e distribuidora de energia, o valor total da TUSD fio B representa 28,5% da tarifa total sem impostos (ANEEL, 2021b).

Considerando que essa tarifa mantenha a proporção do valor da tarifa sem impostos até o ano de 2028, último ano da transição segundo modelo de valoração de créditos, é possível observar na Tabela 4 uma estimativa de custo ao consumidor ao longo dos anos, comparado ao valor integral da fatura de energia elétrica antes de adquirir o sistema fotovoltaico *on grid*.

Tabela 4: Custo ao consumidor que homologar seu projeto fotovoltaico no 13º mês, comparado ao valor integral do consumo elétrico antes da implantação do sistema fotovoltaico.

2023	2024	2025	2026	2027	2028
4,3%	8,6%	12,8%	17,1%	21,4%	25,7%

Fonte: ANEEL (2021b).

Caso seja considerado a implantação deste mesmo projeto no 13º da publicação da Lei, terá o seu *payback* alterado para 4,7 anos devido ao custo da tarifa TUSD fio B. É possível observar na Tabela 5 o fluxo de caixa até o 6º ano, pois a partir do 7º ano entrará em vigor a nova lei que ainda é desconhecida, com o valor de R\$ 4.848,04.

Tabela 5: Fluxo de caixa do sistema fotovoltaico implantado no 13º mês, durante o período de 6 anos.

	Investimentos	Economia de Energia	Fluxo de Caixa
ANO 1	-R\$ 14.851,20	R\$ 2.863,27	-R\$ 11.987,93
ANO 2	R\$ 0,00	R\$ 2.990,71	-R\$ 8.997,22
ANO 3	R\$ 0,00	R\$ 3.116,87	-R\$ 5.880,35
ANO 4	R\$ 0,00	R\$ 3.240,41	-R\$ 2.639,94
ANO 5	R\$ 0,00	R\$ 3.359,75	R\$ 719,81
ANO 6	R\$ 0,00	R\$ 3.473,03	R\$ 4.192,84

Fonte: Autoria própria, 2022.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista a expansão da matriz elétrica brasileira e considerando ações sustentáveis e viáveis financeiramente, a implantação de sistemas fotovoltaicos torna-se muito interessante aos consumidores. Este artigo, portanto, apresentou um panorama do mercado atual e uma estimativa de retorno financeiro comparando o cenário atual com o definido pela Lei nº 14.300, de 2022.

Pode ser concluído que há muitas oportunidades para o crescimento deste mercado, a geração de empregos e a garantia da segurança energética. Como desafios, pode-se destacar o desenvolvimento da indústria de componentes fotovoltaicos no Brasil, o descomissionamento e descarte correto dos módulos e equipamentos, criação de

políticas públicas de incentivo, a infraestrutura para atendimento por parte das distribuidoras e a busca pelo constante aumento da eficiência.

O estudo de caso de microgeração distribuída fotovoltaica se mostrou viável, confirmando a assertividade do regulamento baseado no sistema de compensação *net-metering*. A elevada demanda de equipamentos e cenários de crises econômicas pós-período de pandemia da COVID-19 têm concorrido contrariamente à queda dos preços dos equipamentos. Certamente, impactará na viabilidade da implementação de novos sistemas, podendo ser prejudicial para todo o país à diminuição do despacho termelétrico de fontes energéticas fósseis.

Ainda, considerada-se que o Marco Legal trouxe mudanças benéficas ao setor, com mais segurança jurídica. Apesar do tempo de retorno do investimento dos projetos aumentarem devido às futuras cobranças no uso da rede, isto não inviabilizará os projetos em nenhuma modalidade, pois considera-se que a vida útil destes sistemas fotovoltaicos é de 25 anos. Mas o Marco Legal não é definitivo ao setor, por depender da regulação de alguns quesitos e da publicação do encontro de contas pela ANEEL. O acompanhamento destes temas é importante ao mercado, principalmente, para futuros estudos e projetos.

No campo de políticas públicas, constatou-se fragilidade nas disposições da Lei Nº 14.300/2022, no que diz a respeito aos prazos para a redução de isenção no pagamento pela parcela de uso do fio, que são referidos à data da vigência da Lei e não às datas dos regulamentos ainda por serem promovidos pela ANEEL.

Como proposição de novos estudos, destaca-se os aspectos relacionados à segurança operacional tais como o AFCI (*Arc Fault Circuit Interrupt*), sistemas de armazenamento com baterias íon-lítio, tecnologia das células fotovoltaicas e o emprego do grafeno na concepção dos módulos fotovoltaicos.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR (São Paulo) (org.). **Energia solar: a energia do futuro**. 2020. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/energia-solar-a-energia-do-futuro/>. Acesso em: 21 abr. 2022.

ABSOLAR (org.). **Panorama da Solar Fotovoltaica no Brasil e no Mundo**. 2022. Elaborada por ABSOLAR. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 06 jun. 2022.

ALVARENGA, Carlos Alberto (org.). **O Módulo Fotovoltaico para Gerador Solar de Eletricidade**. 2014. Disponível em: <https://www.solenerg.com.br/files/modulo-fotovoltaico-para-gerador-solar-de-eletricidade-solenerg-out14.pdf>. Acesso em: maio de 2022.

ALVES, Marliana de Oliveira Lage. **Energia solar [manuscrito]: estudo da geração de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica., Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2019.**

ANEEL (org.)., **Resolução Normativa nº 482**, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/atren2012482.pdf>. Acesso em: abril de 2022.

ANEEL (org.). **Tarifa Residencial**. 2021a. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/relatorio-evolucao-tarifas-residenciais>. Acesso em: 24 mai. 2022.

ANEEL (org.). **Processos Tarifários**. 2021b. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/calendario-de-atividades/processos-tarifarios/>. Acesso em: 20 maio 2022.

BRASIL. ANEEL. **Resolução Normativa nº 1000**, de 7 de dezembro de 2021. Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf>. Acesso em 23 abr. 2022

BRASIL. **Lei Nº 14.300 de 6 janeiro de 2022**. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS). Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/L14300.htm. Acesso em: 11 fev. 2022.

BRITO, João Luis Grizinsky de. **Sistema para monitoramento de consumo de energia elétrica particular, em tempo real e não invasivo utilizando a tecnologia Arduino**. 2016. 106 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica., Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2016.

CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **Metodologia de Acionamento das Bandeiras Tarifárias.** Disponível em: https://www.ccee.org.br/documents/80415/919464/55%20-%20InfoBandeira%20Tarif%C3%A1ria_2022_11.pdf/c6892b7b-ca61-db45-b0c6-b86c661ecc6c. Acesso em: 06 nov. 2022.

DANTAS, Nivalde de Castro e Guilherme (org.). **Experiências Internacionais em Geração Distribuída: motivações, impactos e ajustes.** Rio de Janeiro: Publitt Soluções Editoriais, 2018. 445 p. Disponível em: https://www.ie.ufrj.br/images/IE/livros/livro_experiencias_internacionais_em_gd.pdf. Acesso em: 22 mai. 2022.

DIENSTMANN, Gustavo. **Energia Solar: uma comparação de tecnologias.** 2009. 92 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

Empresa de Pesquisa Energética (org.). **Balço Energético Nacional 2021: ano base 2020.** Rio de Janeiro: EPE, 2021. 268 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>. Acesso em: 16mar. 2022.

FADIGAS, Eliane Aparecida Faria Amaral. **Energia Solar Fotovoltaica : Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica.** 2019. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/56337/mod_resource/content/2/Apostila_solar.pdf. Acesso em: 03 mai. 2022.

Greener (org.), **Estudo Estratégico Mercado Fotovoltaico de Geração Distribuída.** 2022. Disponível em: https://www.greener.com.br/wp-content/uploads/2022/08/Estudo-Estrategico-de-Geracao-Distribuida-2022-2709221.pdf?utm_campaign=estudo_gd_1s2022_fluxo&utm_medium=email&utm_source=RD+Station. Acesso em: 06 nov. 2022.

IEA (org.), **Total Energy Supply for Source.** 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/countries/brazil>. Acesso em: 06 nov. 2022.

LIMA, Luana Tavares Abrão. **#DEVEN 1 | Desenvolvimento do Mercado de Energia Solar Fotovoltaica.** 2020. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/deven-1-desenvolvimento-do-mercado-de-energia-solar-luana/?originalSubdomain=pt>. Acesso em: 16mar. 2022.

MARQUES, Ricardo. **Entendendo a Tarifação do Fio B previsto na Lei 14.300.** 2022. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/tarifacao-do-fio-b-previsto-na-lei-14-300>. Acesso em: 06 nov. 2022.

NARUTO, Denise Tieko. **Vantagens e Desvantagens da Geração Distribuída e Estudo de Caso de um Sistema Solar Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica.** 2017. 97 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

OPORTUNIDADES E DESAFIOS DO SETOR DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

NO BRASIL. Fortaleza: Revista Econômica do Nordeste, v. 52, n. 4, 11 maio 2021. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/revista/index.php/ren/article/view/1199>. Acesso em: 03 maio 2022.

PORTALSOLAR (org.). **O que é energia solar? Tudo o que você precisa saber.** 2021. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/o-que-e-energia-solar.html>. Acesso em: 21 abr. 2022.

PORTALSOLAR (org.). **Conceito de Net Metering: Geração Própria de Energia e Banco de Créditos.** 2017. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/incentivos-a-energia-solar/conceito-de-net-metering-geracao-propria-de-energia-e-banco-de-creditos.html>. Acesso em: 21 abr. 2022.

PEREIRA, Enio Bueno *et al.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** 2. ed. São José dos Campos: Inpe, 2017. 80 p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>. Acesso em: 15 abr. 2022.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio (Org.). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: Cepel, 2014.

REN21 - RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY (org.).

Renewables 2020: global status report. Paris: Lisa Mastny, 2020. 367 p. Disponível em: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf. Acesso em: 26 maio 2022.

RÜTHER, R., NASCIMENTO, L. R., CAMPOS, R. A. **Extreme overirradiance events in Brazil: consequences on PV power plant output performance,** submitted to Solar Energy, 2017

VELOSO, Caroline Karen Peixoto Rodrigues; TEIXEIRA, Wesley Carminati; JÚNIOR, Dalmo Cardoso da Silva. **ENERGIA FOTOVOLTAICA:** legislação e incentivos pelo mundo e como impactam o brasil. 2021. 31 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro Universitário Academia, Juiz de Fora, 2021.