

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA



ARNALDO BIANCO NETO

Panorama de Expansão de Geração de Energia Através de Painéis Fotovoltaicos

Orientador: Prof. Dr. Andrei Aparecido de Albuquerque

Docente: Prof. Dr. Fernando M. Araújo Moreira

São Carlos

2021

ARNALDO BIANCO NETO

Panorama de Expansão de Geração de Energia Através de Painéis Fotovoltaicos

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Física da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Física.

Orientador: Prof. Dr. Andrei Aparecido de Albuquerque

São Carlos

2021

ARNALDO BIANCO NETO

**PANORAMA DE EXPANSÃO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS
DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Física da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Física.

São Carlos, ____ de _____ de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Andrei Aparecido de Albuquerque - Orientador
UFSCar

Nota

Dedico este trabalho a todos que me incentivaram a persistir a despeito de todas as dificuldades.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família por sempre me apoiarem nos estudos, aos professores que compartilharam seu conhecimento durante esse importante período e ao meu orientador pela oportunidade.

RESUMO

NETO, A. B. **Panorama de expansão de geração de energia através de painéis fotovoltaicos.** 49f. Monografia (Graduação em Engenharia Física) Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

Partindo de uma sucinta explicação sobre a excitação dos elétrons da banda de valência para a banda de condução quando iluminada a junção pn de um semicondutor de silício cristalino com impurezas, cujo funcionamento sob polarização inversa é próximo ao conhecido para um diodo, formulou-se a teoria que permite a utilização dos módulos solares para criação de uma tensão e corrente, bem como o regime de funcionamento em potência máxima. Seguindo de maneira técnica e objetiva, traçou-se um pequeno projeto de instalação residencial sob premissas simples e que fosse capaz de suprir o consumo residencial médio de qualquer região geográfica do país afim de permitir delinear onde haveria o maior e menor impacto da instalação de uma unidade geradora descentralizada independente do porte. Através de dados oficiais dos ministérios governamentais, foram extraídas as informações para uma esperança de valores futuros, tanto de preço da energia elétrica, quanto consumo. Isto permitiu testar e confirmar a validade do projeto para prover energia elétrica com sobra para o consumo residencial média apesar da variabilidade de irradiação solar no território. As regiões Norte e Nordeste tiveram o maior e menor aumento relativo no preço das tarifas (antes de impostos) até a referência sugerida no ano de 2028. Com os alvos para a análise completa definidos, foram observados indicadores de viabilidade econômica do projeto para essas duas, como taxa interna de retorno e tempo de payback descontado para uma taxa mínima de atratividade baseada na revisão de um projeto eólico (Macedo, Albuquerque e Morales, 2015). O Norte atingiu uma taxa interna de retorno de 12,83% com um tempo de payback descontado de 9 anos 8 meses para uma energia produzida suficiente para suprir cerca de duas residências médias da região. Em contrapartida, no Nordeste a taxa de retorno foi de 7,01% e tempo para pagamento do capital investido foi de 13 anos e 1 mês, porém com energia produzida capaz de alimentar três residências dentro do consumo médio traçado. Por fim, o ambiente é propício para a manutenção do crescimento visto na revisão bibliográfica por razões que não são propriamente uma decisão econômica estratégica e este clima poderia ser favorecido por políticas destacadas neste e outros trabalhos sobre o cenário da matriz energética brasileira.

ABSTRACT

NETO, A. B. **Panorama de expansão de geração de energia através de painéis fotovoltaicos.** 49f. Monografia (Graduação em Engenharia Física) Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

Starting with a brief explanation about the excitation of electrons in valence and conduction band when a pn junction of a silicon crystal semiconductor with impurities is enlightened, which its working state in reverse bias is similar to the one of a diode, the theory that allows the usage of solar modules to create tension and current was developed, as well as the maximum power point under work. Following in an technical and objective manner, a small sized installation project for households was designed under few simple premises and that were able to supply the average residential consumption for any of the country's geographic areas so that it allows to determine where would happen the minor and major impacts of such installation of a decentralized generating power unit regardless of its proportions. Through official government ministry's data, future value expectancy information was extracted, from both electrical bills and consumption. It let testing and project's validation that it was capable of providing sufficient electrical power to the average residential consumption even though there is variability in the solar radiation on the territory. North and Northeast regions had the highest and lowest relative raises in the bills' prices (before taxes) until the suggested mark at the year of 2028. With the targets for a full analysis completely defined, economic viability indicators for both were observed, such as internal return rate and discounted payback time for a minimum attractive rate of return based on the review of a wind project (Macedo, Albuquerque e Moralles, 2015). The North hit an internal rate of return of 12,83% with a discounted payback time of 9 years and 8 months for an amount of produced energy able to supply for over two average households in the region. However, in the Northeast, the internal rate of return was 7,01% and the time it took to pay the invested capital was 13 years and 1 month, nonetheless it was capable to supply around three houses with an average consumption that was found. Lastly, the environment is conducive to sustain the growth rate seen in the literature review by many reasons that aren't all related to an strategical economical decision and this mood could be backed up by certain political choices highlighted in this and other researches on the Brazilian energy matrix.

LISTA DE IMAGENS

Figura 1 - As 14 classificações de Redes de Bravais.	12
Figura 2 - A estrutura cristalina do diamante.	13
Figura 3 - Esquema simplificado da difratometria de raios-x.	13
Figura 4 – Padrão espectroscopia para materiais com diferentes impurezas.	14
Figura 5 - Padrão de espectroscopia para temperaturas diferentes.....	14
Figura 6 - Representação das bandas de energia em átomos, moléculas e sólidos cristalinos.	15
Figura 7 - Representação esquemática das bandas de valência e condução e gap de energia.	16
Figura 8 - Diferença de comportamento em relação a condutividade para isolantes, semicondutores e condutores.....	17
Figura 9 - Semicondutor de silício dopado do tipo p e do tipo n unidos formando a região de depleção.	20
Figura 10 - Curvas da equação característica do diodo com e sem iluminação da junção pn.	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aceptores (Família 3A) e doadores (Família 5A) para um retículo cristalino de silício.	19
Tabela 2 - Lista de materiais e serviços para instalação de placas solares ligadas à rede.	29
Tabela 3 - Variação dos preços tarifários no período de 9 anos.	30
Tabela 4 - Variação no consumo residencial no intervalo analisado.	32
Tabela 5 - Variação na quantidade de consumidores residenciais no período de 9 anos.	33
Tabela 6 - Perspectiva de crescimento do consumo residencial per capita para os próximos anos.	35
Tabela 7 - Projeção de despesa anual média per capita considerando impostos.	36
Tabela 8 - Taxa anual média de inflação para os últimos 10 anos.	36
Tabela 9 - Inflação estimada por dois métodos distintos no intervalo de interesse.	37
Tabela 10 - Análise completa do fluxo de caixa e energia gerada para a região Norte.	39
Tabela 11 - Análise completa do fluxo de caixa para a região Nordeste.	41
Tabela 12 - Resultado dos métodos de análise de investimento.	42

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Aumento de portadores de carga em função do aumento de temperatura.	16
Gráfico 2 - Silício a temperatura constante (300K) com diferentes níveis de concentração de dopantes.....	19
Gráfico 3 - Curva I-V característica de uma célula solar.	25
Gráfico 4 - Projeções de tarifa entre 2020 e 2028 para todas as regiões brasileiras.....	31
Gráfico 5 - Relação entre tarifas projetadas de 2028 e 2020.....	31
Gráfico 6 - Projeções de consumo anual entre 2020 e 2028 para todas as regiões brasileiras.	33
Gráfico 7 - Projeções de quantidade de consumidores entre 2020 e 2028 para todas as regiões brasileiras.....	34
Gráfico 8 - Peso atribuído a impostos sobre o preço médio do MW distribuído no Brasil.....	35
Gráfico 9 - Amostra gráfica da validação do modelo CAGR e declínio rápido por regressão linear.	38

SUMÁRIO

1	OBJETIVOS	11
2	INTRODUÇÃO TEÓRICA	12
3	MATERIAIS E MÉTODOS	26
4	RESULTADOS OBTIDOS	30
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	43
6	CONCLUSÕES	45
	REFERÊNCIAS	46

1 OBJETIVOS

O escopo deste trabalho é construir argumentos para embasar o horizonte de uso de geração de energia descentralizada, em específico o alvo é a transformação da irradiação solar em energia elétrica local e que possa ser compartilhada com a rede de distribuição, como alternativa para o aumento das tarifas elétricas residenciais e avaliar se há viabilidade econômica.

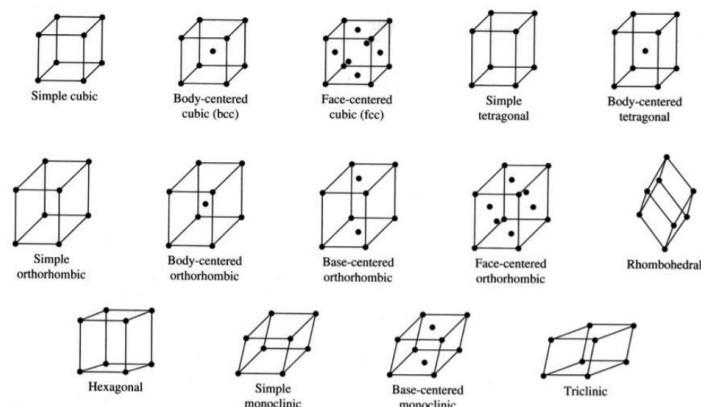
2 INTRODUÇÃO TEÓRICA

O objeto de estudo deste trabalho é a geração de energia descentralizada por painéis fotovoltaicos. A princípio, contudo, é preciso entender o funcionamento físico das células usadas para transformar a energia solar em energia elétrica que poderá ser tanto consumida in situ, quanto enviada a rede para conceder crédito, como será discutido no capítulo 6.

A matéria constituída por átomos é encontrada cotidianamente em três estados físicos: sólido, líquido ou gasoso. O estado observado depende da energia e pressão do sistema em que se encontra. Para os sólidos, pode-se classificá-los segundo a organização de sua estrutura: cristalino, policristalino (quando há várias orientações espaciais para os grãos ou cristais) e amorfo. A origem da organização depende do processo de formação do sólido, aqui olharemos apenas para sólidos cristalinos ideais visando interpretar matematicamente aspectos físicos observados neste tipo de material.

O cristal tem a característica de manter uma estrutura matemática regular, chamada de rede de Bravais, que se repetem no espaço tridimensional com periodicidade. Existem 14 possíveis redes de Bravais para os sólidos cristalinos (ESTRUTURA, 2005), como apresentado na Figura 1.

Figura 1 - As 14 classificações de Redes de Bravais.

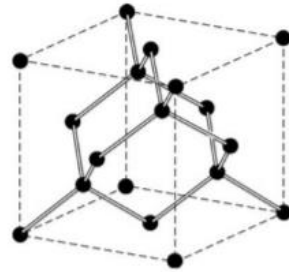


Fonte: ESTRUTURA (2005).

Apesar dessa variedade de retículos permitidos, como a maioria dos semicondutores se cristalizam formando a rede cúbica de face centrada (FCC), essa será uma das principais notadas no estudo que segue como a rede de diamante, formada por duas redes FCC que se interpõe uma em relação a outra de um quarto da diagonal do cubo. Além do diamante, cuja

rede deriva o nome, esta estrutura está presente nos semicondutores de silício, germânio e outros compostos semicondutores binários (KITTEL, 2013).

Figura 2 - A estrutura cristalina do diamante.

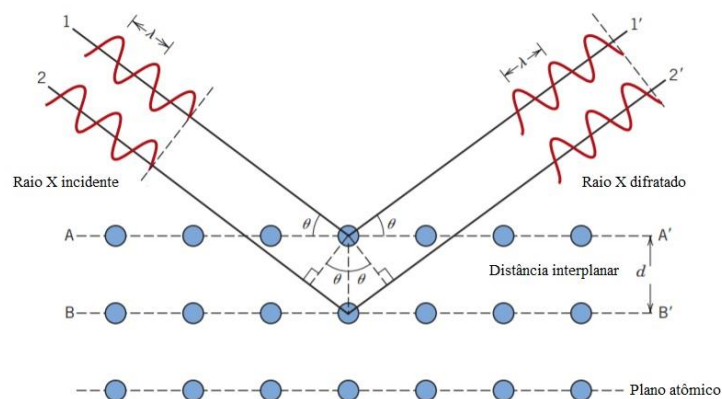


Fonte: KITTEL (2013, p. 15).

Para analisar a estrutura de um cristal, usa-se a difratometria de raios-x, na qual as ondas incidentes são refletidas pelos planos paralelos de átomos, análogo ao processo observado pela luz visível ao ser refletida por um espelho. Com isso, W. L. Bragg apresentou uma forma de relacionar a distância interplanar e o ângulo de incidência em que as ondas refletidas sofrem interferência construtiva, resultando na Lei de Bragg (KITTEL, 2013):

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (1)$$

Figura 3 - Esquema simplificado da difratometria de raios-x.

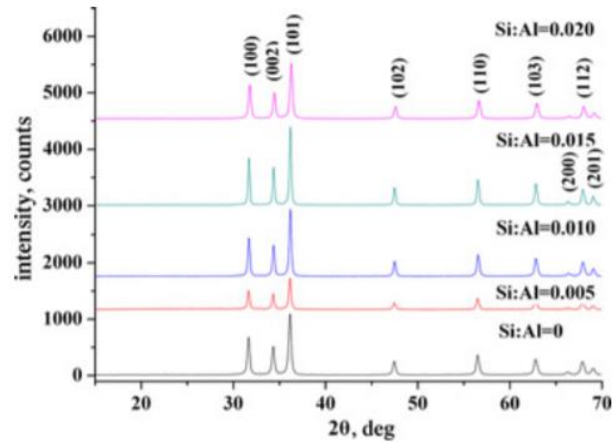


Fonte: Adaptado de CALLISTER e RETHWISCH (2007, p. 68).

A diferença de percurso dos planos causa uma interferência construtiva, cuja representação no espectro de difração de raio-x é um pico. Deste ponto, é importante ressaltar a influência das impurezas, daqui em diante chamadas de dopantes, no espectro de difração,

alterando propriedades importantes na produção de uma célula solar (CALLISTER e RETHWISCH, 2007).

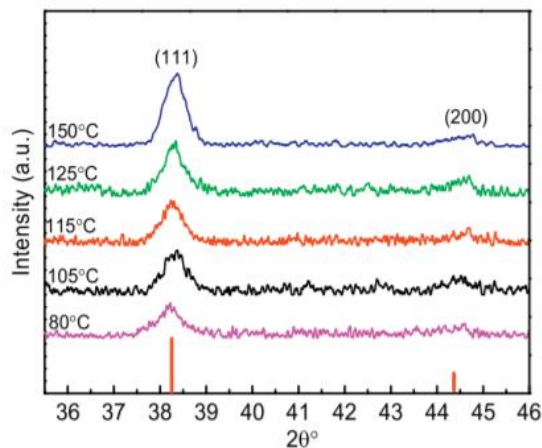
Figura 4 – Padrão espectroscopia para materiais com diferentes impurezas.



Fonte: HE e GUO (2011).

Além disso, o tratamento térmico do semiconductor, como citado inicialmente sobre a influência da temperatura nos sólidos cristalinos ou amorfos, pode ser reparado pelo fenômeno descrito pela Lei de Bragg, como fica evidente pela Figura 5.

Figura 5 - Padrão de espectroscopia para temperaturas diferentes.



Fonte: GOLROKHI et al (2017).

No sólido amorfo, não há pico observado e dependendo do tratamento em função da temperatura, o crescimento dos planos pode variar para o mesmo composto.

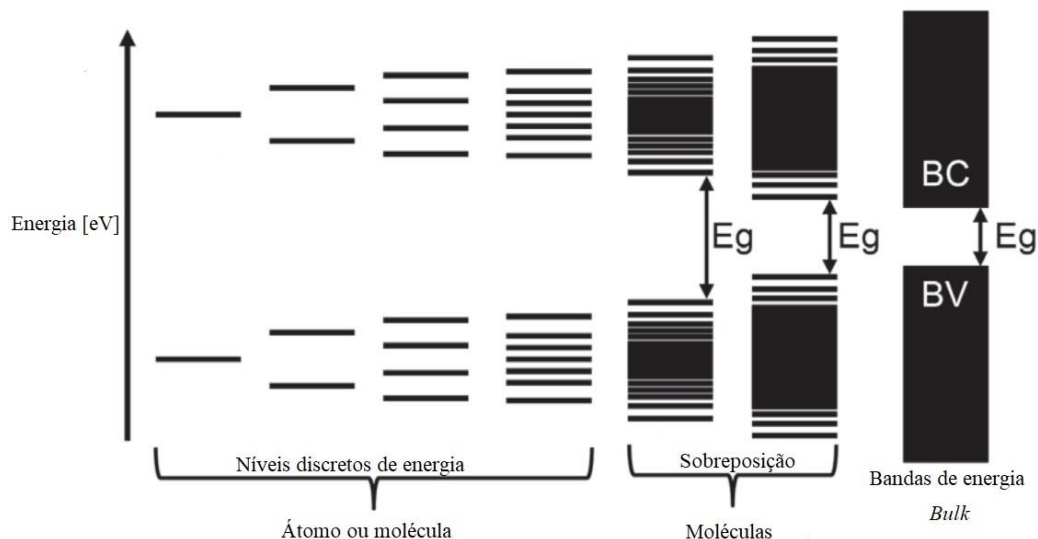
Até agora falamos sobre a estrutura cristalina do sólido, para o modelo do semiconductor como material principal da célula solar, temos que entender como funciona a estrutura

eletrônico dentro dos retículos cristalinos. O comportamento dinâmico do elétron independente do tempo pode ser descrito pela solução da equação de Schrödinger (Ashcroft e Mermin, 1976):

$$\nabla^2\psi + \frac{2m}{\hbar} [E - U(\vec{r})]\psi = 0 \quad (2)$$

Nesse caso não precisamos resolver a equação, apenas perceber suas implicações com a relação à energia do elétron. Para um átomo, os níveis de energia permitidos em que elétron pode ser encontrado são discretos e em moléculas e sólidos, esses níveis podem se sobrepor formando as bandas de energia:

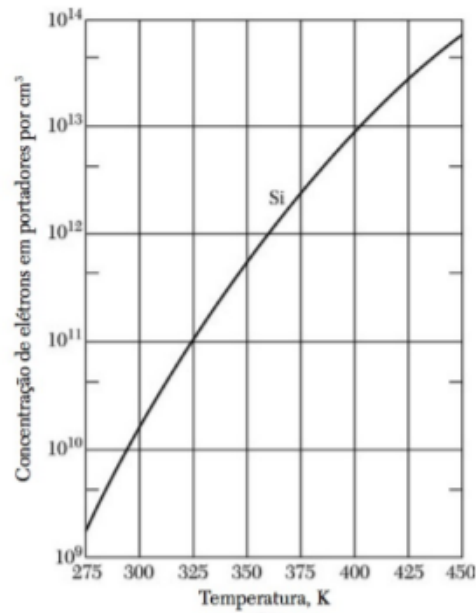
Figura 6 - Representação das bandas de energia em átomos, moléculas e sólidos cristalinos.



Fonte: Adaptado de BACCARO e GUTZ (2018).

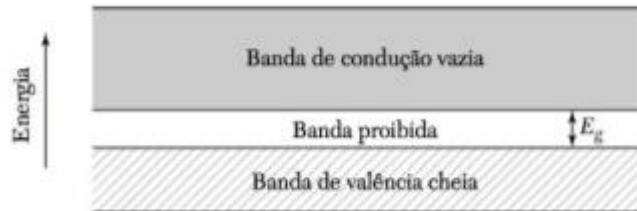
Na imagem representando de forma simplificada os níveis de energia, pode-se notar as regiões proibidas com um intervalo de energia qualquer. A 0K, os elétrons preenchem completamente a banda de valência e a banda de condução (primeiro nível de energia acima da banda de valência) encontra-se vazia, conforme a temperatura aumenta, elétrons da banda de valência passam para banda de condução deixando na rede cristalina um buraco, este fenômeno cria o par elétron-buraco e permite que o semiconductor aumente sua condutividade de em função do aumento de temperatura.

Gráfico 1 - Aumento de portadores de carga em função do aumento de temperatura.



Fonte: KITTEL (2013, p. 162)

Figura 7 - Representação esquemática das bandas de valência e condução e gap de energia.



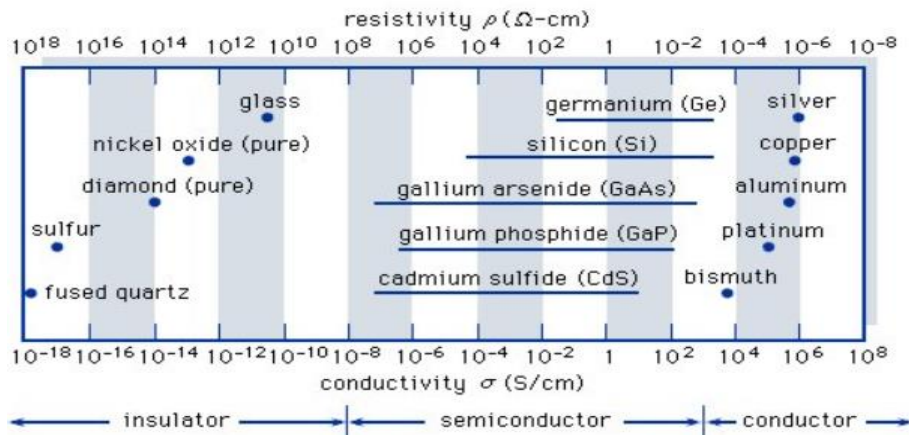
Fonte: KITTEL (2013, p. 161).

O elétron da banda de valência, no caso da célula solar, absorve um fóton com energia igual ao gap para atravessar a banda proibida, ou seja, se:

$$\text{Energia do fóton} = \omega_g \hbar = E_{gap} \quad (3)$$

É criado o par elétron-buraco no caso de uma absorção direta, onde o mínimo da banda condução está alinhado com o máximo da banda de valência, dessa forma o elétron não precisa mudar seu momento para passar ao nível de energia superior. Vale ressaltar que o tamanho do gap de energia entre a banda de valência e a banda de condução é justamente o que dá a característica isolante, semicondutora ou condutora do material.

Figura 8 - Diferença de comportamento em relação a condutividade para isolantes, semicondutores e condutores.



Fonte: BRITANNICA (2021).

Agora que entendemos a implicação da equação de Schrödinger para condutividade dos semicondutores com a absorção de energia na forma de fótons ou térmica, analisaremos os portadores de carga diretamente, nesse caso os elétrons da banda de condução e os buracos deixados no retículo cristalino na banda de valência.

Luque e Hegedus (2011) fornecem a função de Fermi fornece a distribuição dos elétrons nas bandas em função da temperatura através da relação:

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/kT}} \quad (4)$$

Onde E_F é a energia de Fermi, k é a constante de Boltzmann e T , a temperatura em Kelvin. Da relação tiramos duas conclusões diretas, a primeira citada anteriormente é de que em $T = 0\text{K}$ todos os elétrons ocupam a banda de valência e o semicondutor é um isolante, outra consequência é a relação exponencial com a temperatura, explicando o aumento da mobilidade eletrônica com o aumento da temperatura.

O semicondutor considerado até o momento é um material puro, em que cada elétron que salte para um nível energético acima, deixa um buraco em sua ligação covalente quebrada, ou seja uma relação 1:1 e o número de elétrons-buracos por cm^3 disponíveis nesse semicondutor puro, mais comumente chamado de semicondutor intrínseco é dado por:

$$n_o = \int_{E_c}^{\infty} g_c(E) f(E) dE \quad (5)$$

Onde g_c é a densidade de estados na banda de condução e f é a função de Fermi, ou

$$n_o = \frac{2N_C}{\sqrt{\pi}} F_{\frac{1}{2}}\left(\frac{E_F - E_C}{kT}\right) \quad (6)$$

Analogamente para os buracos, temos:

$$p_o = \frac{2N_V}{\sqrt{\pi}} F_{\frac{1}{2}}\left(\frac{E_V - E_C}{kT}\right) \quad (7)$$

Onde $F_{1/2}(\xi)$ é a integral de Fermi-Dirac de ordem $1/2$.

Decorre das equações anteriores que a energia de Fermi para semicondutores intrínsecos fica muito próximo ao meio do nível de energia das bandas de valência e condução e a densidade de portadores de energia é baixa. Para alterar essa configuração dentro da rede cristalina, é feita a dopagem do semicondutor.

O processo de dopagem é a inserção de impurezas na rede cristalina que agirão como doadores e aceptores de elétrons aumentando a condutividade do sólido. Tratando do Silício em particular por ser um dos principais materiais usados na construção de células solares, trata-se de um elemento químico da família IV-A na tabela periódica, para aumentar a disponibilidade de portadores de carga, são introduzidos elementos vizinhos da família III-A para a agirem como aceptores ou buracos na camada p e elementos da família V-A para agirem como doadores ou elétrons livres na camada n (ASHCROFT E MERMIN, 1976):

Tabela 1 - Aceptores (Família 3A) e doadores (Família 5A) para um retículo cristalino de silício.

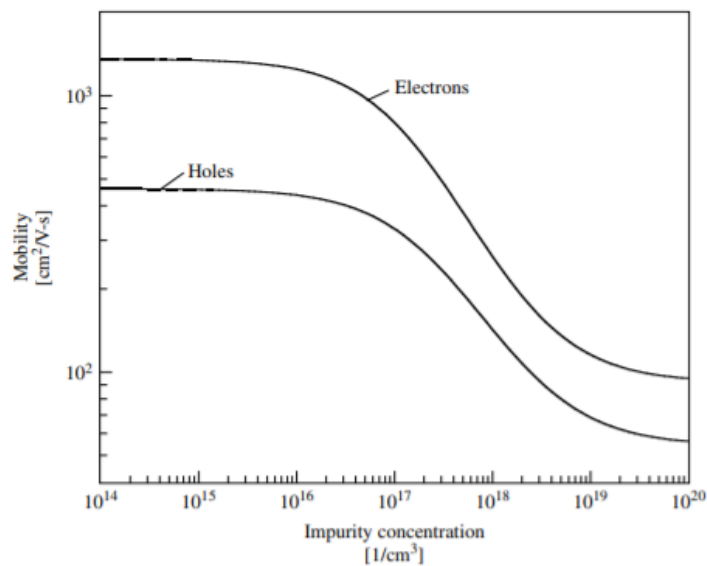
Níveis de Impureza da Família 5A (doadores) e 3A (acceptores) em silício

Família 3A Aceptores ($Energia = E_{aceptor} - E_{valência}$)					
	B	Al	Ga	In	Tl
Si	0,046 eV	0,057 eV	0,065 eV	0,016 eV	0,026 eV
Família 5A Doadores ($Energia = E_{condução} - E_{doador}$)					
	P	As	Sb	Bi	
Si	0,044 eV	0,049 eV	0,039 eV	0,069 eV	
Gap de energia à temperatura ambiente					
Si	1,12 eV				

Fonte: Adaptado de ASHCROFT e MERMIN (1976, p. 570).

Conforme a concentração de impurezas aumenta, a natureza da condutividade do semiconductor modifica-se, deixando de ser baseada na rede cristalina intrínseca para ser baseada nos elementos doadores e aceptores ionizados que substituem o Silício, como pode ser notado no Gráfico 2:

Gráfico 2 - Silício a temperatura constante (300K) com diferentes níveis de concentração de dopantes.



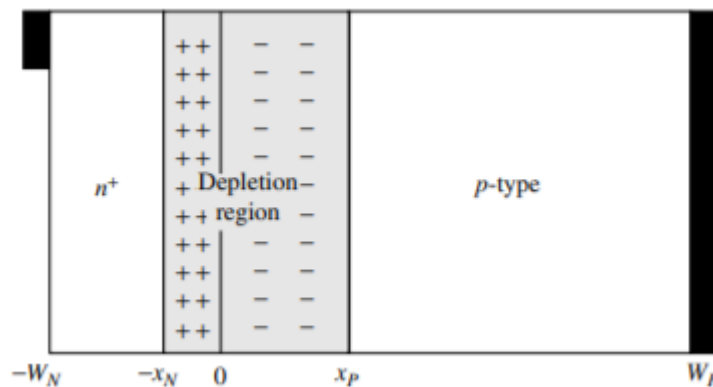
Fonte: LUQUE e HEGEDUS (2003, p. 80).

Para dar visibilidade do funcionamento da célula solar de maneira sucinta, os efeitos presentes nos semicondutores como os mecanismos de recombinação de radiativa, de Auger ou

Shockley-Read-Hall, causadores de perda de eficiência, bem como os efeitos dos dopantes nas correntes de deriva e difusão não serão investigados a fundo porque, como será discorrido adiante, esses efeitos, por vezes, são desprezados na análise da potência produzida pela célula.

O semiconductor dopado do tipo p e do tipo n, dependendo da impureza na rede, são depositados em um substrato e tem um ponto de contato entre essas interfaces chamado de junção pn. Em uma célula solar real, existe a região p espessa de $300\mu\text{m}$ de espessura aproximadamente e é moderadamente dopada, com cerca de $n_A = 10^{15}$ até 10^{16} cm^{-3} aceptores, essa camada é coberta por uma fina camada altamente dopada do tipo n com espessura de $1 \mu\text{m}$, esta última recoberta por outra camada do tipo fina e altamente dopada, formando uma camada p (espessa) – n (fina) – p (fina), conforme Würfel e Würfel (2016).

Figura 9 - Semiconductor de silício dopado do tipo p e do tipo n unidos formando a região de depleção.



Fonte: LUQUE e HEGEDUS (2003, p. 84).

No primeiro momento de contato, em equilíbrio térmico, os elétrons da região dopado tipo n, doadora, migram para o lado oposto onde há buracos e os buracos e elétrons aniquilam-se, deixando para trás as cargas fixas, ou seja, a movimentação dos portadores, forma duas regiões eletrostaticamente carregadas e, conseqüentemente, surge um campo elétrico interno nesse espaço conhecido como região de depleção e com o campo elétrico formado, os portadores mais distantes não se movimentam gerando os limites medidos na figura por $(-x_N ; x_P)$ e $-W_N$ e W_P correspondem à largura do deposito de semiconductor dopado.

O potencial eletrostático na região de depleção pode ser calculado resolvendo a equação de Poisson:

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{q}{\varepsilon} N_D, \quad \text{se } -x_N < x < 0 \quad (8)$$

E

$$\nabla^2 \varphi = \frac{q}{\varepsilon} N_A, \quad \text{se } 0 < x < x_P \quad (9)$$

Usando as condições de contorno:

$$\varphi(x) \begin{cases} V_{interno}, x \leq -x_N \\ V_{interno} - \frac{qN_D}{2\varepsilon} (x + x_N)^2, -x_N < x \leq 0 \\ \frac{qN_A}{2\varepsilon} (x + x_P)^2, 0 \leq x < x_P \\ 0, x \geq x_P \end{cases} \quad (10)$$

Resolvendo a equação para estas condições temos:

$$V_{interno} - \frac{qN_D}{2\varepsilon} x_N^2 = \frac{qN_A}{2\varepsilon} x_P^2 \quad (11)$$

Na interface ideal, o campo elétrico é constante na junção, ou seja

$$x_N N_D = x_P N_A \quad (12)$$

Da geometria da figura 12, W_D é a largura da região de depleção, então:

$$W_D = x_N + x_P = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) V_{interno}} \quad (13)$$

Decorre da última equação que a largura da região quando tirada do equilíbrio é dependente da tensão aplicada:

$$W_D(V) = x_N + x_P = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) (V_{interno} - V)} \quad (14)$$

Nota-se que dependendo da polarização externa aplicada, a região de depleção muda de largura, isso faz com que a barreira de potencial das bandas de condução e valência também se alterem, aplicando uma polarização direta, a barreira diminui e na polarização inversa, ela aumenta. As consequências do tipo de polarização serão discutidas adiante.

O potencial eletrostático interno pode ser calculado unidirecionalmente usando a relação de Einstein para o campo elétrico.

$$\begin{cases} \vec{E} = \frac{kT}{q} \frac{1}{p_0} \frac{dp_0}{dx} \\ \int_{-x_N}^{x_P} \vec{E} dx = V_{interno} \end{cases} \Rightarrow V_{interno} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2} \quad (15)$$

Desse modo descrevemos fisicamente a região de depleção, falta analisar a região neutra do semiconductor dopado tipo p e tipo n. Como sabemos a célula solar funciona como uma bateria, desse modo, os polos são o inverso do potencial eletrostático estabelecido na região de depleção, ou seja, polarização inversa para o uso desejado. Neste modo de uso, a corrente é predominantemente de difusão dentro do semiconductor.

Em outras palavras e resumindo as deduções matemáticas até este ponto: a junção pn em equilíbrio tem as correntes de deriva e difusão igual a zero quando é estabelecido o equilíbrio térmico, o equilíbrio é quebrado pela iluminação do semiconductor de Silício dopado e então o salto dos elétrons da banda de valência para banda de condução é origina as correntes de difusão e deriva, porém, dada a polariza inversão, o fenômeno que rege a corrente é a de difusão no regime permanente de funcionamento que nos interessa.

Para analisarmos o comportamento da célula sobre iluminação, temos que conhecer a Taxa de Geração $G(x)$ de pares elétron-buraco:

$$G(x) = (1 - s) \int (1 - r(\lambda)) f(\lambda) \alpha(\lambda) e^{-\alpha x} d\lambda \quad (16)$$

Onde $r(\lambda)$ é a refletância, $\alpha(\lambda)$ é a absorção e $f(\lambda)$ o fluxo de fótons incidente e s o fator de sombreamento sobre a célula.

A geração dos pares nas regiões p e n induz as correntes de difusão a seguir, cuja demonstração é extensa e foge do objetivo da apresentação:

$$\vec{J}_N = qD_N \frac{d\Delta N_P}{dx} \quad (17)$$

E

$$\vec{J}_P = -qD_P \frac{d\Delta P_N}{dx} \quad (18)$$

Onde ΔN_P é a condição de contorno sobre a região p e ΔP_N é a condição de contorno sobre a região n. O fóton gera um par caso seu comprimento de onda seja:

$$\lambda \geq \frac{hc}{E_G} \quad (19)$$

Integrando uma das duas equações com os limites certos podemos obter a corrente pela geração de par elétron-buraco na região de depleção pela absorção de fótons obtemos a corrente subtraído da parcela devido a recombinação nessa região.

$$I_{CC} = A[J_N(x_P) + J_P(-x_N) + J_D - q \frac{W_D n_i}{\tau_D} (e^{\frac{qV}{2kT}} - 1)] \quad (20)$$

Onde

$$J_D = q(1 - s) \int [1 - r(\lambda)] f(\lambda) (e^{-\alpha(W_N - x_N)} - e^{-\alpha(W_N + x_P)}) d\lambda \quad (21)$$

A partir das correntes parciais de cada região podemos encontrar a corrente total do díodo trabalhando como célula solar sob iluminação:

$$I = I_{CC} - I_{o1} - I_{o2} \quad (22)$$

As correntes I_{o1} e I_{o2} são as correntes de recombinação no escuro para as fases externas e interna respectivamente à região de depleção, basicamente perdas da configuração do sistema com importância na análise física, porém, como veremos a seguir, essa parcela é ignorada na

análise das figuras de mérito de uma célula solar, por esse motivo não foram apresentadas a teoria e expressão das recombinações radiativas, não-radiativa Shockley-Read-Hall e não-radiativa de Auger.

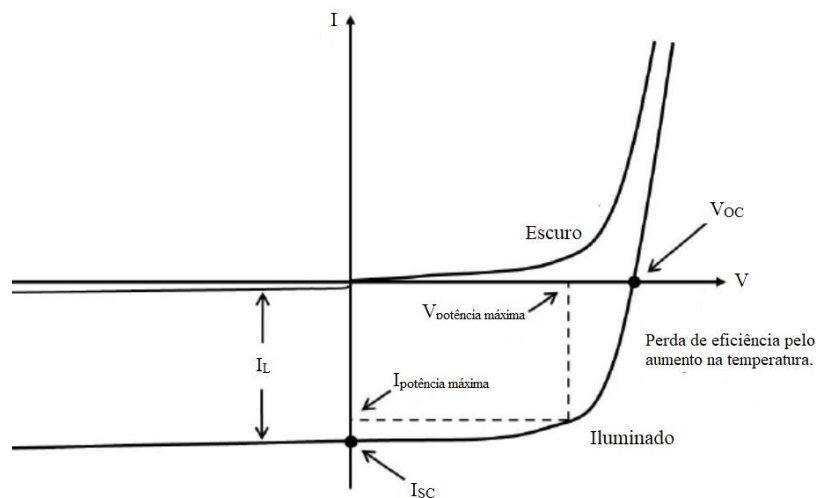
De maneira super simplificada, podemos resumir a célula solar como uma translação da curva característica de um diodo, operando em sentido inverso ao de um LED (light emitting diode), a equação do diodo é:

$$I = I_o \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) \quad (23)$$

Introduzindo a iluminação da junção pn:

$$I = I_o \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) - I_L \quad (24)$$

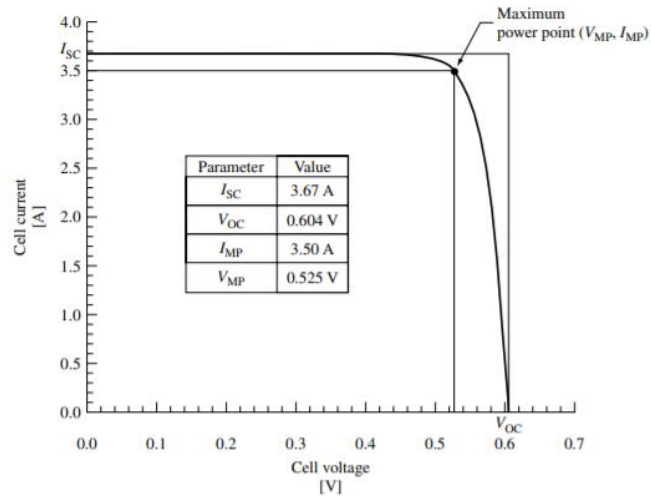
Figura 10 - Curvas da equação característica do diodo com e sem iluminação da junção pn.



Fonte: Adaptado de PRIAMBODO, POESPAWATI e HARTANTO (2011).

Para análise dos parâmetros da célula solar de silício, rebatemos o quarto quadrante deste gráfico para o primeiro, tornando-se no Gráfico 3:

Gráfico 3 - Curva I-V característica de uma célula solar.



Fonte: LUQUE e HEGEDUS (2003, p. 93).

O ponto de máxima potência (obtido de $\frac{dP(V)}{dV} = 0$) é importante para estabelecer os horários em que o funcionamento atinge seu desempenho máximo e será utilizado na análise do projeto. Segundo Luque e Hegedus (2003), a temperatura ótima para as células construídas com silício é cerca de 30 graus Celsius, para temperaturas muito mais altas, há perdas grandes de tensão. A iluminação, fator s de $G(x)$, taxa de geração de elétrons-buracos tem grande influência sobre a corrente produzida.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliar o potencial crescimento da energia solar em um país continental como o Brasil, sem muitas especificidades de características da localidade que seria instalado o projeto de painéis fotovoltaicos ligados à rede capazes de servir como uma unidade geradora descentralizada, o ponto focal foi analisar se há viabilidade econômica para o consumidor interessado em adquirir algo similar.

A proposta para conceber uma perspectiva do possível aumento na geração distribuída de energia é apresentar um projeto que quando instalado forneça energia suficiente para suprir qualquer uma das 5 mesorregiões do país baseado no consumo residencial per capita, aumento de preço das tarifas frente a inflação e irradiação solar média obtidos a partir de fontes oficiais que fornecem esses dados.

As premissas do projeto são que a instalação feita valeria a partir de janeiro de 2020, isso porque a referência para número de consumidores e preço tarifário vem do Anuário Estatístico de Energia, cuja publicação para 2020 ainda não feita, dessa forma, para manter a simetria entre dados reais observados do passado e projeção futura, a data “presente” do estudo para viabilidade econômica será essa visando garantir uma qualidade melhor dos resultados.

Isto posto, examinamos os dados passados por 9 anos (originalmente seria analisada a década anterior e futura, mas a falta dos dados do Anuários Estatísticos fez com que esse intervalo fosse escolhido) para 3 parâmetros: preço da tarifa, consumo e quantidade de consumidores, todos por região a fim de encontrar duas regiões observáveis. A projeção desses dados para o futuro foi feita pelo método de regressão linear e foram investigadas em detalhe as regiões que terão maior e menor aumento relativo no preço da tarifa. Com este contorno estressamos o cenário para cumprir os requisitos de não ser superdimensionado ou subdimensionado, dessa forma sendo aplicável a qualquer região do Brasil.

Outra condição tida foi a disponibilidade integral de capital para o projeto, não foram analisadas formas alternativas de pagamento com empréstimos tanto por simplificação quanto pela falta de uma linha de crédito destinada a este tipo de projeto, acarretando taxas muito altas, da ordem 2% ao mês, que por si só inviabilizariam o projeto. Inclusive este fato é discutido a fundo em Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira, colocando em pauta a criação de uma linha exclusiva para essa fonte energética financiada pelo Bando Nacional de Desenvolvimento até que se atinja 3% da matriz vinda dessa forma pelo gerador de pequeno porte, uma distinção com base na quantidade produzida, mais ampla do que a discutida nesse trabalho.

Para as duas regiões exploradas a fundo, utilizou-se os principais métodos de análise de investimento: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Payback Descontado e a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) ao longo de 25 anos, prazo médio assumido como vida útil das placas solares, baseado em uma taxa de degradação média de 0,8% ao ano e, apesar de não haver um consenso, é considerada-se necessária a troca dos painéis caso eles atinjam eficiência abaixo de 80% (JORDAN e KURTZ, 2012). Entretanto, conforme especificação do fabricante OSDA Solar, há garantia até 30 anos de produção, ou seja, nossa medida de viabilidade deste projeto será conservadora, além disso, no mesmo trabalho os autores Jordan e Kurtz (2012) demonstram que houve menos de 0,01% de falhas nos sistemas observados, resguardando o risco de falhas mecânicas no projeto e validando observar apenas o aspecto econômico.

O ponto de partida foi estabelecer uma TMA, que segundo Assaf (2014) é a remuneração mínima exigida pelos proprietários do capital diante do risco assumido, Dassi (2015) em seu estudo de Análise da viabilidade econômico-financeira da energia solar fotovoltaica em uma Instituição de Ensino Superior do Sul do Brasil supõe uma TMA de 10% para embasar o seu estudo e Macedo, Albuquerque e Moralles (2017) ao analisar a viabilidade de um projeto eólico usam parâmetros baseados em economias desenvolvidas e de maior refinamento para chegar em uma taxa de atratividade de 13,12%, com uma das premissas retorno ligados a taxas de juros que a época era 14,25% frente aos 3,5% atuais, porém, apesar dessa diferença na taxa básica de juros, considerar a mesma taxa mínima de atratividade calculada por Macedo, Albuquerque e Moralles (2017) trará uma análise com viés mais conservador, por se tratar de um estudo considerando a gestão de risco do capital é sempre desejado.

A taxa interna de retorno representa o custo explícito de uma dívida, ou a rentabilidade efetiva de uma aplicação (ASSAF, 2014), desse modo, no horizonte de 25 anos temos que ter uma TIR acima da TMA para que fosse recomendável a aplicação do capital.

Por último, os fluxos de caixa descontado de ambas as regiões foram analisados para estabelecer o tempo de payback descontado do projeto. O período de payback descontado traz todos os fluxos de caixa ao mesmo momento de tempo (a valor presente), incorporando o conceito do valor do dinheiro no tempo (ASSAF, 2014).

Além disso, foram analisados dois parâmetros técnicos da instalação, o fator de capacidade e a energia o potencial de energia produzido. O primeiro mede a relação entre energia média produzida num intervalo de tempo e a capacidade nominal do sistema, segundo Perlotti et al. (2012) com a relação:

$$FC = \frac{(Irradia\~{c}o\ solar\ m\acute{e}dia) \cdot (\acute{a}rea) \cdot (dias\ no\ ano)}{(horas\ no\ ano) \cdot (pot\^{\e}ncia\ instalada)} \times efici\^{\e}ncia \quad (25)$$

Note que \acute{a}rea e pot\^{\e}ncia instalada s\~{a}o fun\~{c}o\~{e}s do n\~{u}mero de pain\^{\e}is e a efici\^{\e}ncia \acute{e} descrita nas caracter\xedsticas de fabrica\~{c}o\~{e}, ent\~{a}o teremos:

$$FC = irradiac\~{a}o \frac{8 \times 2,1 \times 365}{8760 \times 3,2} \times 0,1748$$

$$\Rightarrow FC = irradiac\~{a}o \cdot 0,0382375 \quad (26)$$

A irradiac\~{a}o solar anual m\acute{e}dia da regi\~{a}o medida em kWh/m² devolver\~{a} o fator de capacidade do sistema.

Macedo, Albuquerque e Moralles (2017) descrevem o potencial de gera\~{c}o\~{e} de energia do projeto e\~{o}lico como:

$$E = (pot\^{\e}ncia\ instalada) \times 8760 \times FC \quad (27)$$

Nakabayashi (2014) considera tamb\^{\e}m o fator de degrada\~{c}o\~{e} anual das placas, dessa forma:

$$E = P \times 8760 \times FC \times (1 - d)^n; \quad 0,05 \leq d \leq 0,10 \quad (28)$$

Como discutido anteriormente, o fato de degrada\~{c}o\~{e} costuma ficar entre 0,05 e 0,10, sendo o mais comum a ser utilizado, para um per\xedodo de n = 25 anos, d = 0,08. Neste ponto as placas chegam a, aproximadamente, 80% de sua efici\^{\e}ncia e \acute{e} indicada sua substitui\~{c}o\~{e}.

O projeto foi dimensionado para prover energia anual acima do maior consumo per capita com margem, inclusive para a proje\~{c}o\~{e} futura. Todos os materiais t\^{\e}m como base pre\~{c}os anunciados na internet. O acompanhamento e assinatura do projeto por um engenheiro qualificado \acute{e} exigido pela Ag\^{\e}ncia Nacional de Energia El\^{\e}trica (Resolu\~{c}o\~{e} Normativa n\~{o} 687/2015) para haver homologa\~{c}o\~{e} da instala\~{c}o\~{e} junto \`{a} distribuidora regional. Esse custo \acute{e} vari\~{a}vel e de baixa disponibilidade p\~{u}blica, com isso a aproxima\~{c}o\~{e} feita \acute{e} de dois s\~{a}l\~{a}rios-m\xednimos para o acompanhamento de toda instala\~{c}o\~{e}, dado o porte o residencial. Todos os materiais com marca e modelo est\~{a}o descritos na Tabela 2:

Tabela 2 - Lista de materiais e serviços para instalação de placas solares ligadas à rede.

Material/Marca/Modelo	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
Painel Solar Fotovoltaico 400W - OSDA - ODA400-36-M	8	R\$ 919,00	R\$ 7.352,00
Inversor Fronius Centrium Energy 4210063 Primo	1	R\$ 7.746,00	R\$ 7.746,00
Kit de montagem NeoSolar para telha cerâmica	2	R\$ 1.280,00	R\$ 2.560,00
Quadro, cabos e etc.	1	R\$ 1.000,00	R\$ 1.000,00
Projeto/Acompanhamento por Engenheiro Civil	1	R\$ 2.200,00	R\$ 2.200,00
			R\$ 20.858,00

Fonte: NEOSOLAR (2021) e PORTALSOLAR (2021).

4 RESULTADOS OBTIDOS

Inicialmente precisamos dos preços de tarifas praticados nos últimos anos para fazer uma estimativa de valores futuros que serão usados para referência. A tabela abaixo apresenta dados oficiais conforme o Anuário Estatístico de Energia.

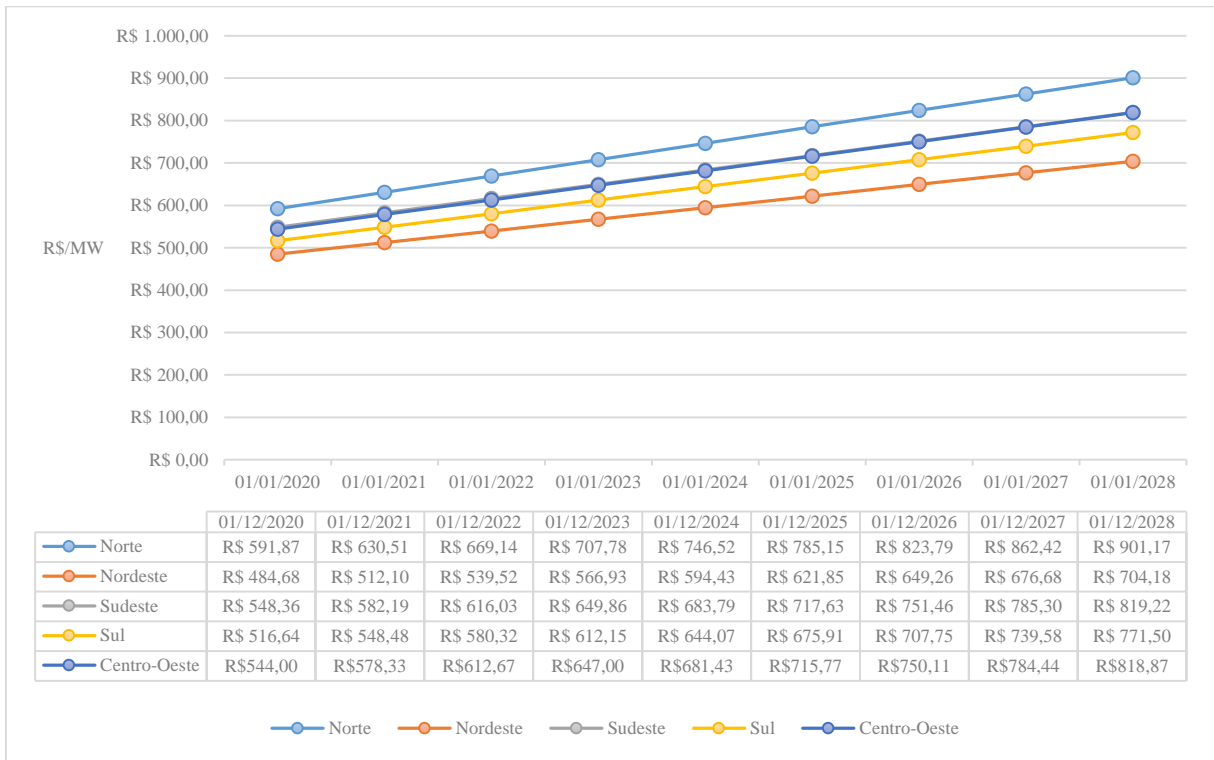
Tabela 3 - Variação dos preços tarifários no período de 9 anos.

Região	Preço Tarifa 2011	Preço Tarifa 2012	Preço Tarifa 2013	Preço Tarifa 2014	Preço Tarifa 2015	Preço Tarifa 2016	Preço Tarifa 2017	Unidade	R\$/MWh
								Preço Tarifa 2018	Preço Tarifa 2019
Norte	R\$294,96	R\$321,17	R\$276,68	R\$303,77	R\$373,04	R\$419,76	R\$477,74	R\$533,41	R\$586,16
Nordeste	R\$278,79	R\$297,09	R\$250,52	R\$269,22	R\$340,06	R\$367,44	R\$394,89	R\$450,99	R\$478,17
Sudeste	R\$281,90	R\$294,78	R\$260,24	R\$282,21	R\$413,05	R\$441,67	R\$431,77	R\$481,66	R\$523,97
Sul	R\$266,68	R\$277,23	R\$235,15	R\$264,06	R\$409,41	R\$415,39	R\$403,28	R\$456,43	R\$488,24
Centro- Oeste	R\$274,37	R\$290,41	R\$257,74	R\$273,63	R\$398,08	R\$419,38	R\$426,95	R\$489,37	R\$519,49

Fonte: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (2015 e 2020).

Usando a ferramenta de análise de dados do MS Excel, foi possível calcular para os anos seguintes valores aproximados por regressão linear. É relevante destacar que tanto os dados passados quanto projeções não consideram as possíveis tributações sobre o consumo.

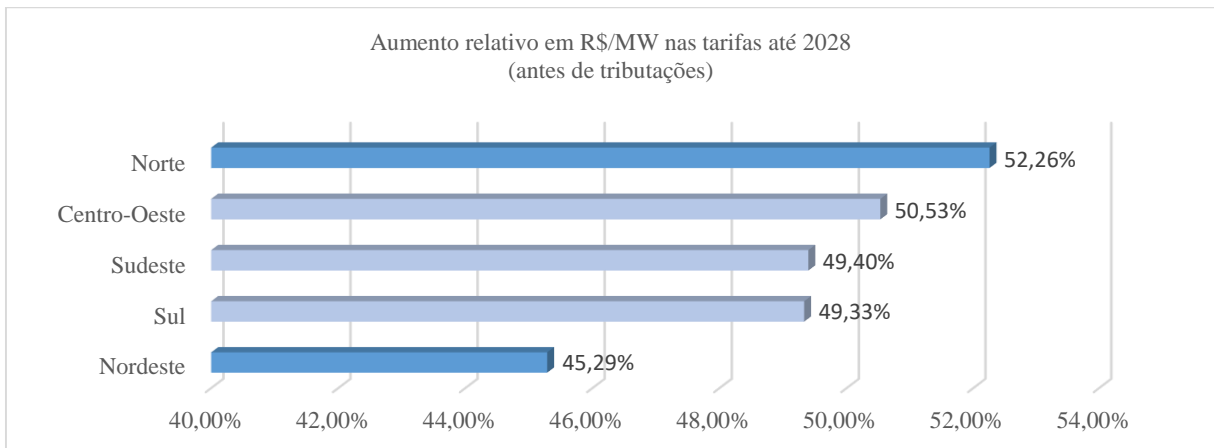
Gráfico 4 - Projeções de tarifa entre 2020 e 2028 para todas as regiões brasileiras.



Fonte: Elaboração própria.

Com auxílio da projeção para os próximos 9 anos, o passo seguinte foi calcular os aumentos relativos nesse intervalo para todas as regiões. A principal relevância de observar a relação de aumento é nortear a análise para as regiões contempladas pelas premissas do Capítulo 3, em outras palavras, os delimitadores buscados são o maior e menor aumento relativo presentes no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Relação entre tarifas projetadas de 2028 e 2020.



Fonte: Elaboração própria.

O próximo dado necessário para a construção do gasto que as residências têm com a energia elétrica é a mudança no consumo desse segmento através do tempo examinado.

Tabela 4 - Variação no consumo residencial no intervalo analisado.

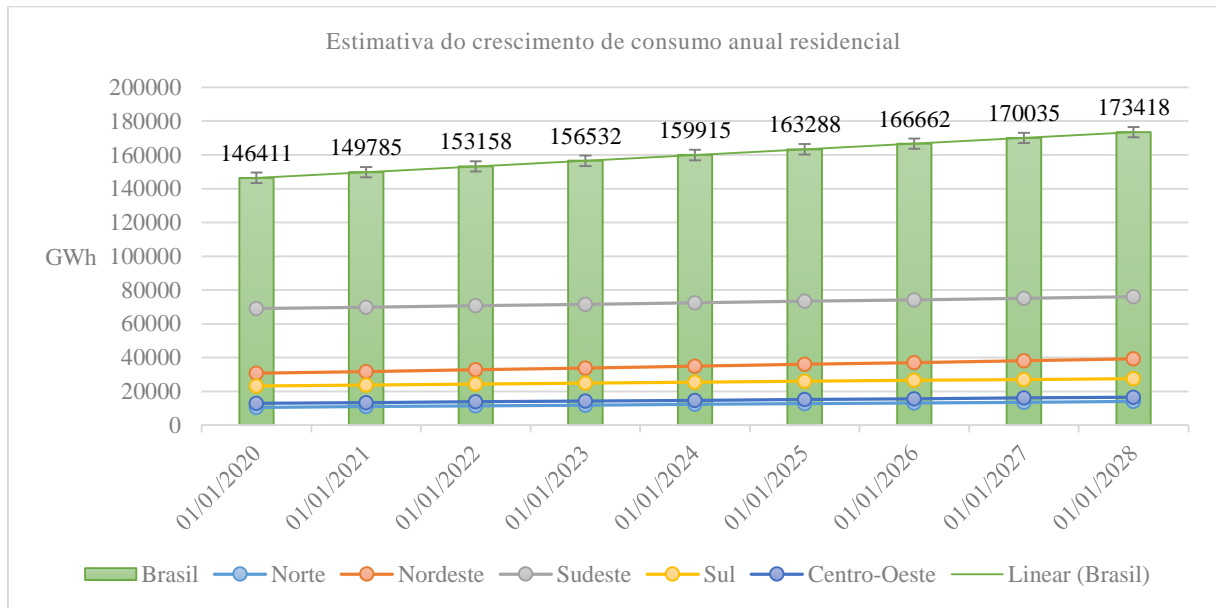
Região	Consumo 2011	Consumo 2012	Consumo 2013	Consumo 2014	Consumo 2015	Consumo 2016	Consumo 2017	Unidade	GWh
								Consumo 2018	Consumo 2019
Norte	6194	6764	7425	8474	9074	9476	9497	9369	9452
Nordeste	20163	21395	23964	25496	26114	26910	27059	27756	29461
Sudeste	59349	61595	63946	66458	64785	64796	65255	66774	68366
Sul	17740	18690	19671	21278	20353	20714	21247	21904	22884
Centro- Oeste	8525	9202	9902	10692	10865	10976	11311	11812	12618

Fonte: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (2015 e 2020).

Novamente, de posse da informação, pode-se estabelecer uma relação linear entre o consumo e as datas futuras com:

$$\text{Consumo (ano)} = a * \text{ano} + b \quad (29)$$

Desse modo, chegou-se aos resultados apresentados no gráfico abaixo.

Gráfico 6 - Projeções de consumo anual entre 2020 e 2028 para todas as regiões brasileiras.

Fonte: Elaboração própria.

Neste momento, objetivamos encontrar o gasto anual de cada consumidor residencial com energia elétrica. Para isso, basta dividir a quantidade de consumidores pelo consumo regional. Sobre a alteração na quantidade de consumidores, foram obtidos os dados seguintes.

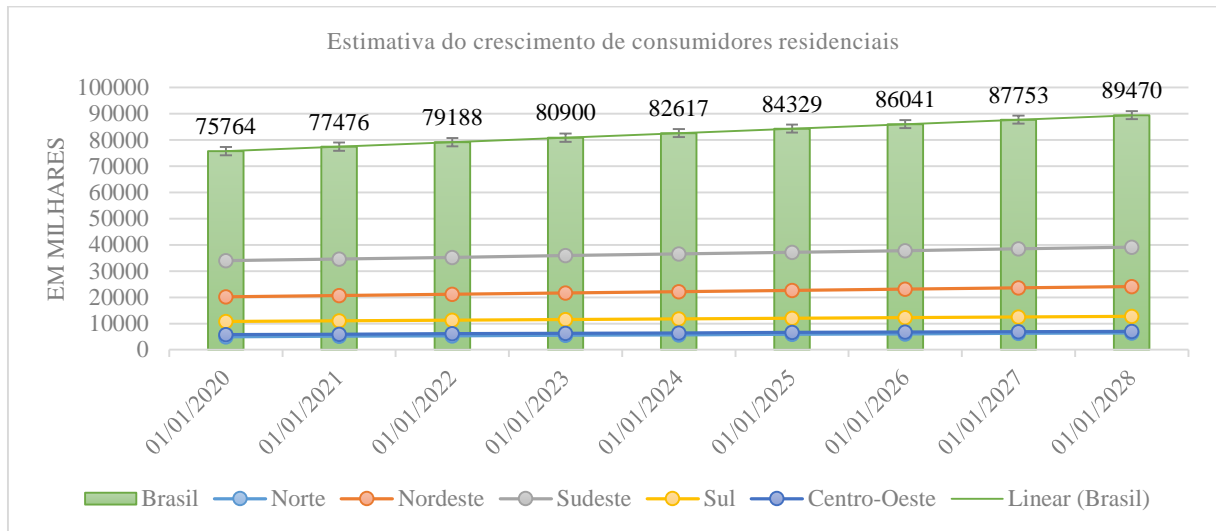
Tabela 5 - Variação na quantidade de consumidores residenciais no período de 9 anos.

Região	Qntd. Cons. 2011	Qntd. Cons. 2012	Qntd. Cons. 2013	Qntd. Cons. 2014	Qntd. Cons. 2015	Qntd. Cons. 2016	Qntd. Cons. 2017	Unidade	Em milhares
								Qntd. Cons. 2018	Qntd. Cons. 2019
Norte	3306	3513	3702	3938	4120	4312	4518	4612	4699
Nordeste	15768	16366	16949	17555	18012	18482	1864	19198	19609
Sudeste	27970	28547	29431	30246	30933	31514	32180	32584	32957
Sul	8415	8727	9028	9319	9562	9746	10002	10226	10503
Centro-Oeste	4334	4545	4750	4951	5119	5223	5342	5461	5612

Fonte: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (2015 e 2020).

E, pela última vez, foi realizado o cálculo pelo modelo de regressão linear para projetar, a partir de dados passados, como pode ser o aumento no volume de consumidores para os próximos anos.

Gráfico 7 - Projeções de quantidade de consumidores entre 2020 e 2028 para todas as regiões brasileiras.



Fonte: Elaboração própria.

Com todas as projeções feitas, pode-se estimar o consumo anual e individual de cada consumidor que representa uma casa, no sentido amplo, podendo se tratar de edificação, casa, chácara...

Conforme os gráficos 6 e 7 será:

$$\text{Consumo} \left[\frac{kWh}{\text{ano}} \right] = \frac{\text{Consumo} \left[\frac{GWh}{\text{ano}} \right]}{\text{Quantidade de Consumidores} [\text{milhares}]} * 10^{-3} \quad (30)$$

A Tabela 6 consolida essa previsão a partir da equação (30):

Tabela 6 - Perspectiva de crescimento do consumo residencial per capita para os próximos anos.

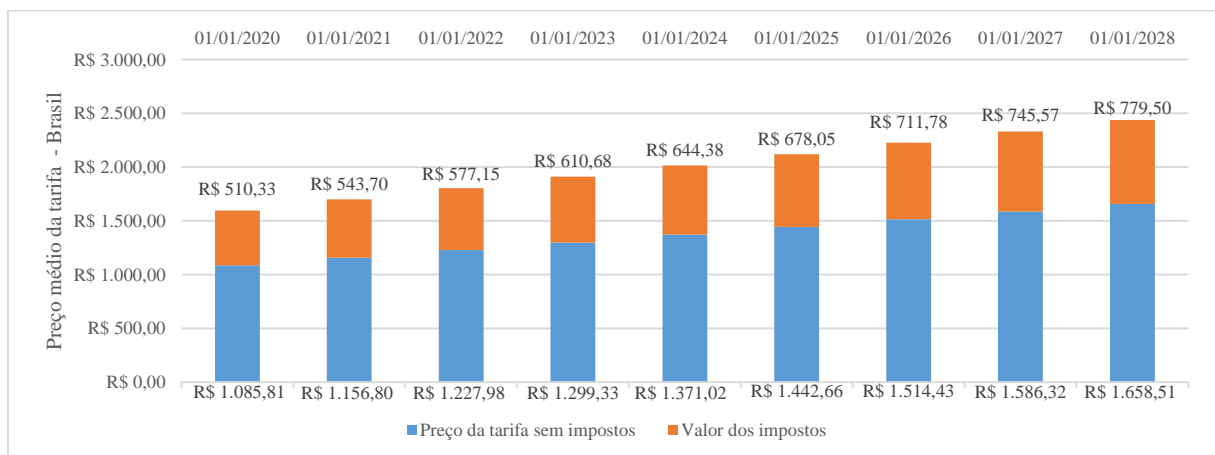
Região	Consumo 2020	Consumo 2021	Consumo 2022	Consumo 2023	Consumo 2024	Consumo 2025	Consumo 2026	Unidade kWh/ano	
								Consumo 2027	Consumo 2028
Norte	2121	2131	2140	2148	2155	2163	2169	2176	2182
Nordeste	1515	1532	1548	1563	1577	1591	1605	1617	1630
Sudeste	2023	2019	2007	1995	1983	1972	1962	1952	1942
Sul	2156	2156	2156	2156	2156	2156	2156	2156	2156
Centro-Oeste	2224	2242	2260	2276	2292	2307	2321	2335	2348

Fonte: Dados da pesquisa.

Para dar maior visibilidade a esses números importantes, eles foram tabelados. Nota-se que Sul e Sudeste são *outliers*, com o Sul mantendo a estabilidade do consumo e o Sudeste tem um declínio.

A constituição do preço repassado ao usuário das linhas fornecidas pela concessionária conta com ICMS, IPI, COFINS, além da possibilidade das bandeiras tarifárias devido a períodos de estiagem prolongada ou média de chuva abaixo da média prevista. Apesar desses tributos variarem localmente por estado, município e concessionária, não se pode desconsiderá-los dado seu grande peso na formação dos preços, como pode ser observado no gráfico 8.

Gráfico 8 - Peso atribuído a impostos sobre o preço médio do MW distribuído no Brasil.



Fonte: MAIA (2019).

Em linha com a reportagem “Encargos e tributos são quase metade da conta de luz, aponta estudo” (MAIA, 2019), a taxa atribuída aos encargos de maneira simplificado foi de 47%. Agora, unificando os valores projetados a partir do gráfico 4 e a tributação, pode-se estabelecer uma previsão fundamentada do desembolso anual realizado pelos clientes.

Tabela 7 - Projeção de despesa anual média per capita considerando impostos.

Região	Despesa 2020	Despesa 2021	Despesa 2022	Despesa 2023	Despesa 2024	Despesa 2025	Despesa 2026	Unidade	R\$/ano
								Despesa 2027	Despesa 2028
Norte	1.846,12	1.975,35	2.105,02	2.235,08	2.365,87	2.496,62	2.627,67	2.759,00	2.890,93
Nordeste	1.080,00	1.153,57	1.227,88	1.302,89	1.378,75	1.455,02	1.531,87	1.609,25	1.687,36
Sudeste	1.637,97	1.728,19	1.817,56	1.906,14	1.994,21	2.081,32	2.167,76	2.253,56	2.338,97
Sul	1.637,95	1.738,85	1.839,75	1.940,64	2.041,81	2.142,69	2.243,58	2.344,47	2.444,63
Centro-Oeste	1.778,68	1.906,56	2.035,46	2.165,30	2.296,30	2.427,89	2.560,17	2.693,15	2.827,16

Fonte: Dados da pesquisa.

Com a expectativa de despesas para os próximos feitas, a ferramenta subsequente utilizada para análise requer uma outra estimativa, a da inflação. O principal indicador para a inflação é o Índice de Preços ao Consumidor Amplo disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2021). Em contraste ao Anuário Estatístico de Energia, foi possível consultar dados para o 2020 para estimar os valores futuros conforme a Tabela 8.

Tabela 8 - Taxa anual média de inflação para os últimos 10 anos.

Data	IPCA (base anual)
30/12/2011	6,50%
30/12/2012	5,84%
30/12/2013	5,91%
30/12/2014	6,41%
30/12/2015	10,67%
30/12/2016	6,29%
30/12/2017	2,95%
30/12/2018	3,75%
30/12/2019	4,31%
30/12/2020	4,52%

Fonte: INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2021).

Dois modelos diferentes foram usados para conjecturar valores para o IPCA até 2028: a regressão linear, como anteriormente e a média geométrica (usualmente chamada de compound anual growth rate, na análise de investimentos) e a diferença nos resultados está disposto na Tabela 9.

Tabela 9 - Inflação estimada por dois métodos distintos no intervalo de interesse.

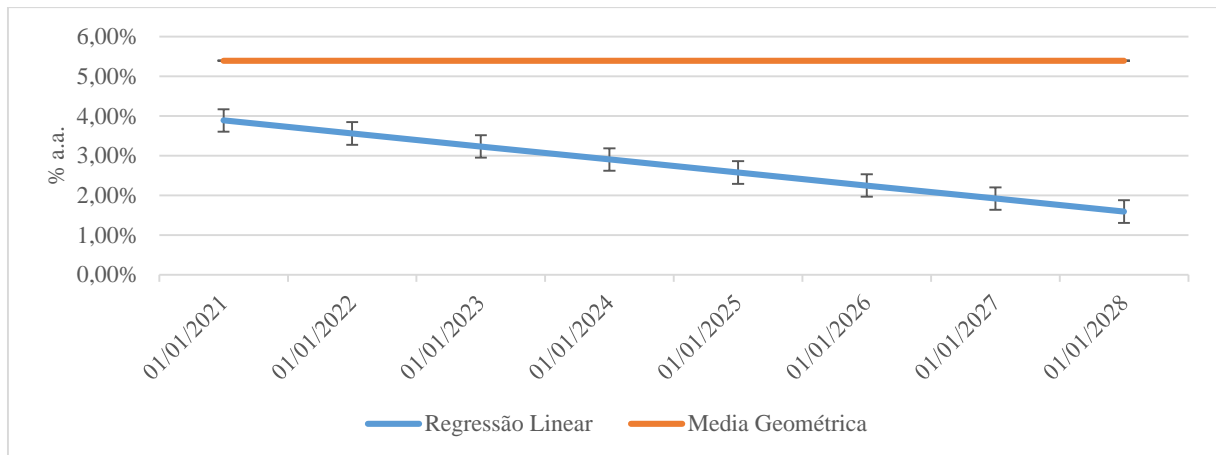
Data	Regressão linear	Média Geométrica
	IPCA estimado	IPCA estimado
30/12/2021	3,89%	5,39%
30/12/2022	3,56%	5,39%
30/12/2023	3,23%	5,39%
30/12/2024	2,90%	5,39%
30/12/2025	2,57%	5,39%
30/12/2026	2,25%	5,39%
30/12/2027	1,92%	5,39%
30/12/2028	1,59%	5,39%

Fonte: Elaboração própria.

A regressão linear apresenta uma fragilidade em relação a alta volatilidade do indicador, apesar do intercepto ter um valor razoável, a angulação da reta não consegue simular bem a volatilidade, projetando uma reta fortemente declinada, cenário racionalmente improvável. No entanto, a CAGR, apesar de ser estática no tempo, mantém um valor mais plausível. Torres (2012) usa uma projeção de valor próximo, de 5%, e o mesmo modelo por média geométrica com valor de 5,59%, usando dados do banco central, foi incorporado por Nakabayashi (2014) ambos em trabalhos sobre energia solar.

Intuitivamente é perceptível a falha no modelo por regressão linear para estimar esse parâmetro e a distinção nas duas análises feitas através dos valores plotados no Gráfico 9.

Gráfico 9 - Amostra gráfica da validação do modelo CAGR e declínio rápido por regressão linear.



Fonte: Elaboração própria.

A inflação é insumo para aplicar a desvalorização do dinheiro no tempo ou, neste caso, trazer a economia com a despesa anual com energia elétrica para o tempo presente. Assim, pode-se construir os fluxos de caixa descontados para ambas as regiões que seguem as premissas estabelecidas no capítulo 4: analisar as regiões com maior e menor aumento relativo no preço das tarifas, com isso avaliaremos o contorno de viabilidade para todas as outras (estarão inclusas nos limites de maior e menor aumento relativo) com a menor amostra possível.

Tabela 10 - Análise completa do fluxo de caixa e energia gerada para a região Norte.

Ano	Fluxo de Caixa Descontado	Fluxo de Caixa Descontado Acumulado	Energia Produzida [kWh/ano]
0	-R\$ 19.987,95	-R\$ 19.987,95	4931
1	R\$ 1.964,76	-R\$ 18.023,19	4906
2	R\$ 2.082,51	-R\$ 5.940,68	4881
3	R\$ 2.199,33	-R\$ 13.741,35	4857
4	R\$ 2.315,54	-R\$ 11.425,81	4833
5	R\$ 2.430,41	-R\$ 8.995,40	4809
6	R\$ 2.544,27	-R\$ 6.451,13	4785
7	R\$ 2.657,11	-R\$ 3.794,02	4761
8	R\$ 2.769,24	-R\$ 1.024,77	4737
9	R\$ 2.879,98	R\$ 1.855,20	4713
10	R\$ 2.989,64	R\$ 4.844,84	4690
11	R\$ 3.098,23	R\$ 7.943,07	4666
12	R\$ 3.206,07	R\$ 11.149,14	4643
13	R\$ 3.312,49	R\$ 14.461,64	4620
14	R\$ 3.417,82	R\$ 17.879,45	4596
15	R\$ 3.522,05	R\$ 21.401,50	4573
16	R\$ 3.625,53	R\$ 25.027,03	4551
17	R\$ 3.727,57	R\$ 28.754,60	4528
18	R\$ 3.828,52	R\$ 32.583,13	4505
19	R\$ 3.928,38	R\$ 36.511,51	4483
20	R\$ 4.027,48	R\$ 40.539,00	4460
21	R\$ 4.125,17	R\$ 44.664,17	4438
22	R\$ 4.221,77	R\$ 48.885,93	4416
23	R\$ 4.317,29	R\$ 53.203,22	4394
24	R\$ 4.412,05	R\$ 57.615,27	4372
25	R\$ 4.505,42	R\$ 62.120,70	4350

Fonte: Elaboração própria.

Vale ressaltar mais uma vez que o desembolso inicial desconta a primeira quantia poupada relativa ao ano de 2020, por isso o valor no período 0 difere ligeiramente do valor total apresentado na tabela 2 com os custos do projeto.

O tempo de *payback* descontado para esse fluxo de caixa é de 9 anos e 8 meses, portanto, o investimento só começaria a retornar capital próximo ao primeiro intervalo observado para o cálculo de todas as projeções.

Além do ganho de capital, verificou-se a quantidade de energia fornecida durante os 25 anos de funcionamento dos painéis à luz da taxa de degradação provisionadas por Laukamp (2002) e Jordan e Kurtz (2012), considerando também que não haverá manutenção dado que as falhas são cobertas pela garantia estendida do produto (NEOSOLAR, 2021).

Para o cálculo da energia produzida, o Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et al, 2017) fornece o dado de irradiação necessário para estimar esse parâmetro.

Pereira et al (p. 46, 2017) traz em formato de gráfico *box plot* a variabilidade interanual média da irradiação solar para as cinco divisões do país. As regiões Norte e Sul são as menos favorecidas pela irradiação com médias anuais próximas a 4,6 kWh/m² e a Nordeste a mais privilegiada para o desempenho do sistema. Dessa forma, mais uma ratificação da escolha das duas regiões (considerando a pequena diferença de valores entre Norte e Sul) como amostra para uma abrangência nacional do trabalho apresentado porque as médias consideradas na análise compreendem os limites inferiores, representado pela região Norte e superiores, representado pela região Nordeste, de irradiação solar anual média.

A equação (27) mostra que a energia produzida é função do fator de capacidade do sistema, para calcular o FC da região Norte foi considerada uma irradiação anual média de 4,6 kWh/m², resultando em um $FC_{\text{Norte}} = 0,1759$. Analogamente, a irradiação adotada para o Nordeste foi de 5,4 kWh/m² atingindo um $FC_{\text{Nordeste}} = 0,2065$.

Segundo Torres (2012), a FC para a cidade de São Carlos/SP é da ordem de 0,1667, ou seja, possui uma irradiação anual média próxima a utilizada como parâmetro amplo para toda região Norte. Para a região Nordeste, consideravelmente menor em área, o que aprimora a estatística de irradiação solar, Torres (2012) encontrou um valor de $FC = 0,1930$ para a cidade de Petrolina em Pernambuco, corroborando os valores encontrados.

Arrematando a viabilidade econômica para o Norte, chegou-se a uma $TIR = 12,83\%$, muito próxima a taxa mínima de atratividade previamente estabelecida.

Com todos os indicadores postos, seguiu-se com o mesmo procedimento para o fluxo de caixa do Nordeste.

Tabela 11 - Análise completa do fluxo de caixa para a região Nordeste.

Ano	Fluxo de Caixa Descontado	Fluxo de Caixa Descontado Acumulado	Energia Produzida [kWh/ano]
0	-R\$ 19.987,95	-R\$ 19.987,95	5788
1	R\$ 1.147,38	-R\$ 18.840,56	5759
2	R\$ 1.214,75	-R\$ 17.625,81	5730
3	R\$ 1.282,04	-R\$ 16.343,77	5702
4	R\$ 1.349,42	-R\$ 14.994,35	5673
5	R\$ 1.416,44	-R\$ 13.577,91	5645
6	R\$ 1.483,25	-R\$ 12.094,66	5617
7	R\$ 1.549,82	-R\$ 10.544,84	5589
8	R\$ 1.616,33	-R\$ 8.928,50	5561
9	R\$ 1.682,33	-R\$ 7.246,17	5533
10	R\$ 1.748,01	-R\$ 5.498,17	5505
11	R\$ 1.813,33	-R\$ 3.684,84	5478
12	R\$ 1.878,48	-R\$ 1.806,36	5450
13	R\$ 1.943,03	R\$ 136,67	5423
14	R\$ 2.007,17	R\$ 2.143,84	5396
15	R\$ 2.070,88	R\$ 4.214,72	5369
16	R\$ 2.134,35	R\$ 6.349,07	5342
17	R\$ 2.197,16	R\$ 8.546,23	5315
18	R\$ 2.259,50	R\$ 10.805,72	5289
19	R\$ 2.321,35	R\$ 13.127,07	5262
20	R\$ 2.382,92	R\$ 15.509,99	5236
21	R\$ 2.443,79	R\$ 17.953,78	5210
22	R\$ 2.504,14	R\$ 20.457,92	5184
23	R\$ 2.563,99	R\$ 23.021,91	5158
24	R\$ 2.623,51	R\$ 25.645,42	5132
25	R\$ 2.682,30	R\$ 28.327,72	5106

Fonte: Dados da pesquisa.

Como esperado, o fato de FC_{Nordeste} ser maior que o FC_{Norte} implica em produção maior de energia ao longo do período. Entretanto, também como era previsto, o tempo de payback descontado para a região é consideravelmente maior dado o menor aumento relativo nos preços. O tempo para retornar o capital investido é de 13 anos e 1 mês.

Ao longo de todo o período a taxa interna de retorno ficou em 7,01% muito aquém da TMA estabelecida como condicionante anteriormente de 13,12%, porém acima da inflação estimada para todo o período. Contudo, com os contornos colocados, isso revela que nenhuma das cinco regiões teria uma taxa de retorno superior a taxa de atratividade.

Resgatando a condição apresentada no Capítulo 3, as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste tiveram uma variação de gasto anual com energia elétrica superior a Nordeste e inferior a Norte, este contorno faz com que os métodos de análise de investimento adotados no projeto

sejam delimitados pelo intervalo que compreende o Nordeste sendo o menos rentável e Norte, o mais rentável para aplicação de energia solar, para fins de perspectiva no âmbito nacional, não é preciso expandir para todas as regiões para inferir a perspectiva de aumento.

Além do mais, a própria irradiação solar média é inferior a documentada na região Nordeste e superior a região Norte (exceção a algumas áreas da região Sul), reforçando o fato das regiões não analisadas intensivamente estarem dentro do intervalo compreendido por ambas e resumido na Tabela 12 com todos indicativos relevantes para análise econômica.

Tabela 12 - Resultado dos métodos de análise de investimento.

Região	Valor Presente Líquido do projeto	Taxa Interna de Retorno	Tempo de <i>Payback</i> Descontado
Norte	R\$ 62.120,70	12,83%	9 anos e 8 meses
Nordeste	R\$ 28.327,72	7,01%	13 anos e 1 mês
TMA = 13,12%		Inflação = 5,39%	

Fonte: Dados da pesquisa.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os dados permitiram apurar todos os parâmetros propostos para examinar se o projeto é viável ou não economicamente. Para Pereira (2019), que avaliou a mudança de paradigma entre geração centralizada e distribuída, há potencial para o crescimento devido ao cenário incipiente. Em seu trabalho, Pereira (2019) destaca a utilidade deste modelo de geração para a região Norte dada características geográficas, como proteção ambiental, baixa densidade populacional e, em contraposição, cita as altas temperaturas, causadoras de perda de eficiência no Nordeste como desvantagem à implantação na região.

Assim, apesar da taxa interna de retorno da região Norte ser muito próxima a taxa mínima de atratividade, haveria vantagens implícitas para o uso da geração através de painéis fotovoltaicos para região para além da econômica. No entanto, como premissa havia sido adotado que todo o capital para investir no projeto estaria à disposição no momento inicial, esta restrição é notável para grande parte dos consumidores considerados, o que traz outra questão para a discussão, De La Tour (2013) mostra em seu trabalho como a curva de preço dos materiais para módulos fotovoltaicos vem declinando com o passar do tempo, indicando um prospecto positivo à utilização de painéis baseados em silício, Junior (2018) elabora a discussão acerca do crescimento de 2008 até o ano de 2017 e demonstra que está em ritmo constante de crescimento.

Desde 17 de Abril de 2012, quando a Agência Nacional de Energia Elétrica aprovou Resolução Normativa nº482 com condições gerais para a instalação desse tipo de unidade geradora, houve incentivo para adoção do modelo pelos consumidores (TORRES, 2012). Este marco possibilita que a geração excedente seja enviada a linha em que o sistema está conectado e seja trocado por créditos, além disso, após aprovação técnica do projeto pela concessionária, qualquer alteração sistêmica para adaptar a conexão a transmissão será custeada pela concessionária (COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ, 2021).

É evidente que apesar da proposta não ter sido construir um projeto baseado em um local específico, havendo um grande espaço para otimizações de custo e utilização. Por exemplo, no Nordeste a energia produzida pelas 8 placas de 400W de potência nominal cada seria capaz servir a três residências pela média estimada através das projeções. Assim, uma alternativa explorada em materiais como o Guia de acesso ao sistema de microgeração (COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ, 2021) é o crédito estar atrelado à Pessoa Física, dessa forma o crédito excedente é abatível de outra fonte de consumo, como comércios a partir da unidade residencial.

Atualmente ocorre tributação tanto da energia consumida, quanto da energia gerada, ou seja, é uma “perda” dos créditos gerados e o consumidor ainda mantém a conexão à linha da concessionária pagando uma taxa mínima ainda que produza excedente suficiente para suprir todo seu consumo.

No entanto, existe espaço para ampliação de políticas públicas sobre o tema em duas frentes distintas: concessão de crédito barato incentivando o aporte inicial supracitado e desburocratização da energia gerada.

Retornando ao custo inicial, nota-se que há interesse e algumas medidas públicas, além da diminuição do preço do material, mas o fomento com taxas de financiamento que beneficiem quem não pode arcar com o alto desembolso é ponto focal da discussão de políticas fora do escopo puramente econômico ao redor do tema.

Ainda em linha com a validação dos resultados obtidos e na discussão de incentivos, Perlotti et al (2012) apresentam em seus resultados uma usina com fator de capacidade de 18,5% e custos por kW variando entre R\$4.000 e R\$6.000. O projeto desenhado aqui tem potência nominal de 3,2 kWp com custo de R\$ 20.858,00, totalizando R\$6.518,25 por kW. Tendo em vista que Perlotti trouxe valores de 2012 e temos uma inflação anual média para o período de 5,63% (conforme dados da Tabela 8), a valor presente houve uma diminuição significativa da construção de uma unidade similar. Ele também apresenta uma TIR de 10% para estes valores de kW gerado, compatível com o contorno alcançado de (7,01%; 12,83%).

Analicamente os resultados atingidos são consonantes com os referenciais, porém alguns valores são discrepantes do esperado, como a “estabilidade” no consumo da região Sudeste, isso porque o modelo de regressão “linearizou” a volatilidade de decréscimo devido à crise econômico de 2016 e subsequente crescimento como estabilidade (CAMPOS, 2016).

Isso impactou na escolha dos parâmetros, ou seja, as duas regiões destacadas cuja intenção é formar um limite inferior de viabilidade, no elemento da região Nordeste, onde há abundância de insolação para maior eficiência das placas, como demonstrado pelo FC_{Nordeste}, e cenário de menor aumento dos preços pelos próximos 25 anos. No outro extremo, a região Norte é desfavorecida pela irradiação e tem os aumentos mais relevantes na taxa, fechando o limite superior de viabilidade.

Dessa forma, pelas taxas internas de retorno que foram encontradas fica como opção estratégica do consumidor com tópicos que escapam do escopo puramente econômico para tomar sua decisão de investir, uma vez que nenhuma área do país apresentou TIR superior à taxa mínima de atratividade de 13,12%.

6 CONCLUSÕES

Embora exista um investimento inicial alto partindo do consumidor e este talvez seja o elo mais fraco na estrutura do projeto apresentado: a disponibilidade de um alto capital de investimento inicial, ainda assim há uma tendência se consolidando de aumento de geração descentralizada através dos módulos solares.

Pelos resultados dispostos através do projeto elaborado sob as premissas de fornecer energia acima da média de consumo residencial anual para o Brasil, estar conectado à rede da concessionária de energia elétrica para transformar o excedente produzido em crédito (conforme resolução normativa nº482 da Agência Nacional de Energia Elétrica de 2012) e, por fim, analisar a viabilidade econômica através de métodos de análise de investimento para as regiões com maior e menor variação no gasto (antes de considerar impostos) com energia elétrica anualmente para os próximos 9 anos, é concludente que o retorno de capital e energia produzida tornam a geração de energia solar por painéis fotovoltaicos é um investimento racional.

O Nordeste teve a menor taxa interna de retorno, com 7,01% e, conseqüentemente, o Norte, com 12,83% foi a maior. Ainda que abaixo da taxa mínima de atratividade imposta de 13,12%, em ambos os casos a remuneração supera a inflação projetada, incentivando o consumo de energia solar. O tempo de *payback* de 13 anos para a regiões Nordeste é longo, porém, representa aproximadamente 50% da vida útil esperada das placas solares, proporcionando, sob a óptica oposta, no mínimo 12 anos isenção quase total de gastos com energia elétrica.

Portanto, o crescimento deve se manter no ritmo atual, haja visto que não há um apelo de viabilidade econômica encontrado pelos métodos de análise de investimento que justifique uma aceleração na escolha da energia fotovoltaica como primeira opção, porque existirão outros investimentos mais rentáveis, representados pela taxa mínima de atratividade de 13,12%.

Dessa forma, a perspectiva da geração solar através de painéis fotovoltaicos seguirá como alternativa e possibilidade de investimento com retorno superior a inflação a longo prazo amparado pela segurança da aplicação e simplicidade do projeto.

Em um estudo futuro, aplicando os mesmos métodos de análise de investimento, seria possível validar a acurácia do tratamento feito aqui, com abrangência nacional, em comparação a uma área menor, reduzindo a amplitude e escalonando apropriadamente o projeto às necessidades específicas da localidade, dessa maneira, examinando o contraste do apetite nacional e local no panorama de expansão dos módulos solares como gerador de energia.

REFERÊNCIAS

- ASSAF NETO, A.; LIMA, F. G. **Curso de Administração Financeira**. 3. ed São Paulo: Atlas, 2014. 877 p.
- ASHCROFT, N. W. MERMIN, N. D. **Solid State Physics**. 1st. ed. [S. l.]: Harcourt, 1976. 848 p.
- BACCARO; A. L. B.; GUTZ, I. G. R. Fotoeletrocatalise em semicondutores: dos princípios básicos até sua conformação à nanoescala. **Química Nova**, v. 41, n. 3, p. 326-339, 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170174>>. Acesso em: 19 jun. 2021.
- BUENO, E. F. **Comparação entre o custo de capital aplicado pela ANEEL nas revisões tarifárias e o custo de capital das distribuidoras de energia elétrica para o período de 2015 a 2017**. 2018. 149 f. Dissertação (Mestrado em Gestão de Organizações e Sistemas Públicos) – Programa de Pós-Graduação em Gestão de Organizações e Sistemas Públicos, Universidade Federal de São Carlos, 2018. Disponível em: < <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/10559>>. Acesso em: 30 mai. 2021.
- BRITANNICA, E. **Semiconductor**, 5 mar. 2021. Disponível em: < <https://www.britannica.com/science/semiconductor>>. Acesso em: 30 mai. 2021.
- CALLISTER; W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering**. 7th ed Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2007, 975 p.
- CAMPOS, A. C. ONS: crise faz consumo de energia em 2016 se manter no nível de 2015. **Agência Brasil**, Rio de Janeiro, 12 dez. 2016. Disponível em: < <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2016-12/ons-crise-faz-consumo-de-energia-em-2016-se-manter-no-mesmo-nivel-de-2015>>. Acesso em: 30 mai. 2021.
- COMPANHIA Paulista de Força e Luz. **Guia de acesso ao sistema de micro e minigeração no Grupo CPFL**. 2021. Disponível em: < https://servicosonline.cpfl.com.br/agencia-webapp/assets/files/guia-pratico-geracao-distribuicao/Cartilha_Geracao_Distr.pdf>. Acesso em: 30 mai. 2021.
- DASSI, J. A.; ZANIN, A.; BAGATINI, F. M.; TIBOLA, A.; BARICHELLO, R.; MOURA, G. D. de. **Análise da viabilidade econômico-financeira da energia solar fotovoltaica em uma Instituição de Ensino Superior do Sul do Brasil**. In: Congresso Brasileiro de Custos, XXII, 2015, Foz do Iguaçu, PR. **Anais CBC**. Disponível em: < <https://anaiscbc.emnuvens.com.br/anais/article/view/3924/3925>>. Acesso em: 30 mai. 2021.
- DE LA TOUR; A.; GLACHANT, M.; MÉNIÈRE, Y. Predicting the costs of photovoltaic solar modules in 2020 using experience curve models. **Energy**, v. 62, p. 341-348, 2013. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.037>>. Acesso em: 30 mai. 2021.

ESTRUTURA dos sólidos. **Introdução à Ciência dos Materiais para Engenharia**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2005. Disponível em: < http://sites.poli.usp.br/d/pmt2100/Aula02_2005%201p.pdf>. Acesso em: 30 mai. 2021.

GLENK, G.; MEIER, R.; REICHELSTEIN, S; Clean energy technologies: Dynamics of cost and price. **SSRN**, [S. l.], 30 abr. 2021. Disponível em: < <https://ssrn.com/abstract=3839968>>. Acesso em: 30 mai. 2021.

GOLROKHI, Z.; MASRSHELL, P. A.; ROMANI, S.; RUSHWORTH, S.; CHALKER, P. R.; POTTER, R. J. The influence of tertiary butyl hydrazine as a co-reactant on the atomic layer deposition of silver. **Applied Surface Science**, v. 399, p. 123-131, 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.11.192>>. Acesso em: 19 jun. 2021.

HE, H. Y.; GUO, J. Enhancement in the optical transmittance of ZnO: Al powders by Si co-doping. **Micro & Nano Letters**, v. 6, n. 8, p. 725-727, 2011. Disponível em: < <https://doi.org/10.1049/mnl.2011.0363>>. Acesso em: 19 jun. 2021.

HONSBURG, C. B.; BOWDEN, S. G. **Photovoltaics Education Website**. [S. l.], 2019. Disponível em: < <https://www.pveducation.org/>>. Acesso em: 30 mai. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo – IPCA**. Séries históricas. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9256-indice-nacional-de-precos-ao-consumidor-amplo.html?=&t=series-historicas>>. Acesso em: 30 mai. 2021.

JORDAN, D. C.; KURTZ, S. R. Photovoltaic degradation rates – an analytical review. **Progress in photovoltaics: Research and Applications**, v. 21, n. 1, p. 12-29, 2013. Disponível em: < <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/51664.pdf>>. Acesso em: 30 mai. 2021.

JUNIOR, L. G. de O. **Razões que levaram os consumidores de energia elétrica a se transformarem em geradores: uma análise da geração fotovoltaica na cidade de Vitória-ES**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, Universidade Federal do Espírito Santo, 2018. Disponível em: < http://repositorio.ufes.br/bitstream/10/10910/1/tese_12774_2018.OLIVEIRA%2c%20L.%20G.%20%281%29.pdf>. Acesso em: 30 mai. 2021.

KITTEL, C. **Introdução à Física do Estado Sólido**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 604 p.

LAUKAMP, H. **Realibility Study of Grid Connected PV Systems**. Freiburg: Agência Internacional de Energia, 2002. 39 p. Disponível em: < https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/rep7_08.pdf>. Acesso em: 30 mai. 2021.

LUQUE, A; HEGEDUS, S. **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**. Chichester: John Wiley & Sons, 2003. 1179 p.

MACEDO, C. A. A.; ALBUQUERQUE, A. A. de; MORALLES, H. F. **Análise de viabilidade econômico-financeira de um projeto eólico com simulação Monte Carlo e avaliação de risco.** *Gestão & Produção*. 2017, v. 24, n. 4, p. 731-744. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0104-530X3439-16>>. Acesso em: 30 mai. 2021.

MAIA, C. Encargos e tributos são quase metade da conta de luz, aponta estudo. **Valor Econômico**, São Paulo, 10 jan. 2019. Disponível em: <<https://valor.globo.com/brasil/noticia/2019/01/10/encargos-e-tributos-sao-quase-metade-da-conta-de-luz-aponta-estudo.ghtml>>. Acesso em: 30 mai. 2021.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2015.** Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>>. [S. l.]: Empresa de Pesquisa Energética, 2015. 232 p. Acesso em: 30 mai. 2021.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020.** Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>>. [S. l.]: Empresa de Pesquisa Energética, 2015. 256 p. Acesso em: 30 mai. 2021.

NAKABAYASHI, R. **Microgeração Fotovoltaica no Brasil: viabilidade econômica.** 2015. 58 f. Nota Técnica (Mestrado em Ciências) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, 2015. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/mifoto.pdf>>. Acesso em: 30 mai. 2021.

NEOSOLAR. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-400w-osda-oda400-36-m.html?gclid=Cj0KCQjwp86EBhD7ARIsAFkgakiYik_M3JoqiIUhCOVwJKwLpVsQsiJ8BL3YvPko74L3ONSzTjyKiDoaAmyuEALw_wcB>. 2021. Acesso em: 30 mai. 2021.

PEREIRA, N. X. **Desafios e perspectivas da energia solar fotovoltaica no Brasil: geração distribuída vs geração centralizada.** 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/181288>>. Acesso em: 30 mai. 2021.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** Disponível em: <<http://doi.org/10.34024/978851700089>> 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80 p. Acesso em: 30 mai. 2021.

PERLOTTI, E.; CAMARGO, F.; GRANVILLE, A.; CUNHA, G. R. de A.; PEREIRA, M. V. F.; KELMAN, R. **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira.** [S. l.]: Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica, 2012. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/noticias/com133.htm>>. Acesso em: 30 mai. de 2021.

PORTALSOLAR. **Portal de Energia solar.** 2021. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/painel-solar-precos-custos-de-instalacao.html>>. Acesso em: 30 mai. 2021.

PORTALSOLAR. **Portal de Energia solar.** 2021. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/o-inversor-solar.html>>. Acesso em: 30 mai. 2021.

PRIAMBODO, P. S.; POESPAWATI, N. R.; HARTANTO, D. **Solar Cell.** *In: Solar Cells – Silicon Wafer-Based Technologies.* Editor Leonid A. Kosyachenko. [S. l.]: Intech Open, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.5772/19935>>. Acesso em: 19 jun. 2021.

SOUZA, R. di. **Projeto de Energia Solar Residencial:** Como Reduzir a Conta de Luz com seu Painel Solar Residencial. Blue Sol. [S. l.] 2019. Disponível em: <<https://blog.bluesol.com.br/projeto-de-energia-solar-residencial/>>. Acesso em: 30 mai. 2021.

TEIXEIRA, T. S. de S. **Projeto de uma usina solar no telhado da biblioteca da Universidade Federal de Uberlândia, Campus Santa Mônica: capacidade de geração e vantagens.** 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Uberlândia, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/31038/1/ProjetoUsinaSolar.pdf>>. Acesso em: 30 mai. 2021.

TORRES, R. C. **Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais.** 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/31038>>. Acesso em: 30 mai. 2021.

WURFEL, P.; WURFEL, U. **Physics of Solar Cells:** From Basic Principles to Advanced Concepts. 3rd. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2016. 289 p.