

VIABILIDADE DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA CONECTADO À REDE

Cristian Borchardt¹, Nicolli Durães¹, Yuri Moura da Silva Amaro¹, João Marcos dos Santos Souza², Vladimir Cypreste Romanelli² e Gabriel de Andrade Vieira.²

1 - Acadêmicos do curso de Engenharia Elétrica

2 – Orientadores - Professores Multivix

RESUMO

A geração de energia elétrica por fonte solar é interessante por ser renovável e ecologicamente limpa. Para instalação de um sistema fotovoltaico, analisar o fator econômico é primordial. O objeto deste trabalho foi realizar um estudo para uma residência localizada no interior do Espírito Santo, a qual possui uma microgeração de energia fotovoltaica conectada à rede elétrica. Buscou-se analisar uma futura expansão devido ao aumento de consumo, apresentando também um estudo de viabilidade para ampliação. Os resultados obtidos foram interessantes, pois obteve-se um curto tempo de retorno financeiro para o investimento na ampliação a ser realizada.

Palavras-chave: sistema fotovoltaico, microgeração de energia fotovoltaica conectada à rede, viabilidade econômica.

INTRODUÇÃO

Grande parte da matriz elétrica do Brasil é composta principalmente por usinas hidrelétricas com 65,2% e termelétricas com 20,5% (EPE, 2021), apesar disso, o uso e a expansão da hidroeletricidade tende a encontrar barreiras ambientais que envolvem as construções das usinas e a escassez hídrica em que o país é acometida desde 2014. Para suprir a demanda energética no Brasil, tem-se aumentado o uso das termoelétricas, que no ponto de vista ambiental é desvantajosa, devido uma grande emissão de Gases de Efeito Estufa. Isso

acontece devido a queima de combustíveis fósseis e, do ponto de vista econômico, também é desvantajosa porque o custo do quilowatt hora é alto, quando comparado às demais fontes geradoras de energia elétrica. Então, é interessante a busca por outras fontes que possam ser inseridas na matriz elétrica brasileira que possam contribuir com a geração de energia elétrica e que não sejam poluentes. Uma possibilidade é a energia solar que pode ser utilizada para a geração de energia elétrica através dos módulos fotovoltaicos.

A energia solar fotovoltaica tem sido utilizada em diversos países e é promissora no Brasil devido a uma grande incidência de radiação solar na extensão territorial o que viabiliza este uso em diversas regiões do país (EPE, 2020). Em 2012, foi publicada a resolução 482/2012 que apresenta as condições para conexão dos sistemas de micro e minigeração distribuída à rede da concessionária (ANEEL, 2012). Em 2012 havia apenas 7 instalações cuja potência instalada de 444 kW. Já em 2019, com aprimoramento e diminuição das barreiras para a utilização da tecnologia, a potência instalada passou para 1.340.094 kW com mais de 100 mil instalações com geração fotovoltaica. Um dos motivos que colaboraram para esse aumento foi a redução de 43% do preço dos painéis fotovoltaicos entre os anos 2014 e 2019. Outra contribuição foi a queda do tempo de retorno do investimento na geração distribuída (GD) de 7 anos em 2015 para 4,5 anos em 2019 (ANEEL, 2019).

A GD tem como vantagens a redução de 2,7 milhões de tonelada de CO₂ lançados na atmosfera desde 2012, além de trazer R\$ 24 bilhões em investimentos acumulados com mais de 150 mil empregos gerados nesse período (ABSOLAR, 2021). O encorajamento à adesão desse sistema é justificado pelos benefícios para o sistema elétrico. Segundo ANEEL (2018) entre eles “estão o adiamento de investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição, o baixo impacto ambiental, a redução no carregamento das redes, a minimização das perdas e a diversificação da matriz energética”.

Portanto, este trabalho tem como objetivo verificar a implementação de um sistema fotovoltaico para geração de energia elétrica em uma residência no interior do Espírito Santo, Nova Venécia, realizando estudos de viabilidade de

expansão do sistema já existente como também os aspectos econômicos e ambientais.

ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica é aquela gerada por meio da conversão da incidência solar em eletricidade por intermédio das células fotovoltaicas que operam mediante o efeito fotovoltaico (GUIMARÃES, et. al., 2019). Este efeito fotovoltaico (FV) foi visto primeiramente pelo físico Edmond Becquerel em 1839, que observou a capacidade de alguns materiais semicondutores transformarem em eletricidade mediante absorção de energia dos fótons quando incididos de radiação luminosa (GALHARDO, et. al., 2012).

Em 1883, o inventor Charles Fritts, a partir de um experimento onde um semicondutor de selênio foi revestido de uma camada fina de ouro, criou a primeira célula solar, que por meio dessa junção foi possível atingir 1% de eficiência, que por não ser tão expressiva, não foi muito útil como fonte de geração de energia para essa época (CARVALHO, 2010). Já em 1954, cientistas da Bell Labs desenvolveram a primeira célula de silício, cuja eficiência era de aproximadamente 6%. Posteriormente em 1959, o aproveitamento da energia solar como fonte alternativa de energia elétrica começou nos Estados Unidos com o objetivo inicial de utiliza-la como geradora de energia elétrica para satélite (MARQUES, 2009).

Nos próximos tópicos será descrito como ocorre a conversão solar em eletricidade, assim como os elementos que compõem um sistema fotovoltaico e os aspectos econômicos de sua instalação.

Funcionamento de conversão de energia solar em energia elétrica

O princípio de funcionamento do processo de conversão da energia solar em elétrica consiste na quebra das ligações químicas nas moléculas dos materiais semicondutores quando a energia é absorvida da luz, fazendo com que sejam liberadas cargas elétricas. A corrente elétrica só é possível por meio de uma junção criada no semicondutor o qual permite gerar um campo elétrico em seu interior. Todo o processo inicia-se na dopagem de um material semicondutor,

processo ao qual são adicionadas impurezas químicas no elemento ainda puro, compondo assim a ele a propriedade de semicondução. Após a dopagem, o elemento passa a possuir uma junção do tipo p-n que naturalmente leva a um fluxo de elétrons pelo processo de migração dos elétrons do tipo n para o do tipo p, que cessa após a formação de uma barreira chamada de zona de depleção. Nessa barreira é formada uma diferença de potencial que é rompida quando o material recebe radiação solar. Logo, esse movimento de elétrons na junção é captado por condutores, gerando uma corrente elétrica, ou ainda, fotocorrente (GALHARDO, et. al., 2012).

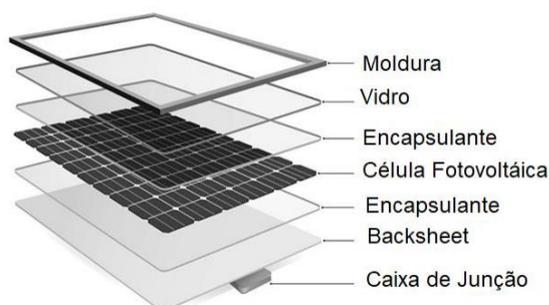
Componentes e tipos de um sistema FV

Cada sistema FV tem uma característica dependendo dos fatores do ambiente e necessidade do local. Balfour, Shaw e Nash (2019) descrevem as partes que compõem um sistema, sendo o primeiro recurso a fonte de energia primária o sol. As células FV são os elementos principais do módulo e os modelos comerciais são baseados em silício cristalino (c-Si), subdivididas em monocristalinas e policristalinas por sua estrutura, e seus principais tipos de células são as laminadas, de filmes finos, de multijunção e concentração fotovoltaica (TOLMASQUIM, 2016). A junção de várias células por sua vez, formam os módulos e estes, ligados em paralelo ou em série, formam os painéis. Por fim, uma matriz que usualmente é presa a uma estrutura, consiste em vários painéis ligados em série, paralelo ou série-paralelo o que influencia diretamente na potência do sistema (BALFOUR, SHAW E NASH, 2019).

Detalhando mais a construção do módulo apresentado na Figura 1, além das células, ele é revestido de vidro temperado ou resina de forma a torná-lo mais resistente à fatores externos como a, poeira, salinidade, neve, tempestade e granizo (MARQUES, 2013). O encapsulante trata-se de um filme de material especial que protege as células do desgaste causado pelos raios UV, temperatura e umidade. Por trás do módulo, é colocado um filme plástico branco, o *backsheet*, cuja função é preservar os componentes internos além de isolamento elétrico. Uma moldura de alumínio anodizado é inserida ao redor para sustentar o módulo, protegendo e garantindo a integridade na hora da instalação

e, por último, há a caixa de junção onde é realizada a conexão elétrica dos módulos (PORTAL SOLAR, 2021).

Figura 1: Característica construtiva de um módulo fotovoltaico



Fonte: Portal Solar, 2021

Outro componente de um sistema FV são os inversores que são equipamentos capazes de converter uma fonte de energia de corrente contínua (CC) em alternada (CA). Com a evolução das tecnologias, os inversores modernos são desenvolvidos utilizando chaves eletrônicas de estado sólido desenvolvidos a partir de técnicas complexas para cada aplicação, permitindo assim aos inversores alcançarem quase 99% de eficiência. Seu dimensionado é realizado de acordo com a potência e características elétricas do sistema FV, tipo de topologia que foi escolhida pela instalação, que pode ser por exemplo, inversor central, descentralizado, micro inversor, interna etc. O fator de dimensionamento de inversores (FDI) também deve ser considerado de modo que ele não fique sobrecarregado ou trabalhe em potências abaixo da nominal por muito tempo. A tensão de entrada, as faixas de tensão de operação do seguimento do ponto de potência máxima e corrente máxima CC também são pontos importantes para melhor otimização de operação do inversor (PINHO; GALDINO, 2014).

Há também todo o cabeamento elétrico que interliga os componentes do sistema FV, a estrutura de suporte e ainda os dispositivos de proteção para o sistema em si e também às pessoas, contendo fusíveis, chaves seccionadoras, disjuntores e dispositivos de proteção contra surtos (WAENGA; PINTO, 2016).

Caso não haja a disponibilidade de rede elétrica da concessionária para suprir a demanda de energia da instalação, torna-se necessário o uso de baterias

e controladores de carga. Este tipo de instalação é conhecido como sistema FV autônomo/isolado, ou ainda *off-grid*, que estende aplicações à iluminação pública, carregamento de baterias de veículos elétricos, pequenos aparelhos eletrônicos portáteis e substituir geradores a diesel, além do fornecimento de eletricidade em instalações afastadas. Como nesses casos a geração não é constante, a tensão de saída nos módulos é instável, logo, a presença de baterias ou bancos de baterias é necessária para estabilizar a tensão fornecidas aos equipamentos ou inversor (VILLALVA, 2012). Os controladores de carga regulam, carregam e protegem a bateria ou o banco de baterias, e são indispensáveis em sistemas que utilizam baterias, pois são os que controlam o carregamento e a desconexão das baterias quando atingem a carga plena ou realiza o desvio da energia quando atinge um nível mínimo de segurança (PINHO; GALDINO, 2014).

Além dos sistemas isolados como já citado, têm-se o sistema fotovoltaicos conectado à rede (SFCR) que possuem um ponto de conexão na rede da concessionária e toda a energia gerada por esse sistema é consumida pela carga ou o excedente é injetado na rede de distribuição. Dentre os modelos existentes, há os sistemas fotovoltaicos integrados a edificações (SFIE), que são aplicados em telhados e fachadas, sendo esta uma das suas vantagens, pois caso definido na fase de projeto arquitetônico, pode ser substituído o telhado convencional pelos próprios painéis diminuindo os custos finais da obra. Outra vantagem é que a energia gerada diminui as perdas com transmissão, distribuição e o consumo da rede da concessionária o que têm ligação direta com a redução dos níveis de CO₂ (PINHO; GALDINO, 2014).

Classificando o SFCR pela potência, na resolução normativa nº 482 têm-se que para centrais geradoras, cuja potência instalada de valor igual ou menor a 75 kW é especificado como microgeradora. Já as centrais com potência maior que 75 kW e menor que 5 MW são intituladas minigeradoras (ANEEL, 2012, p.1).

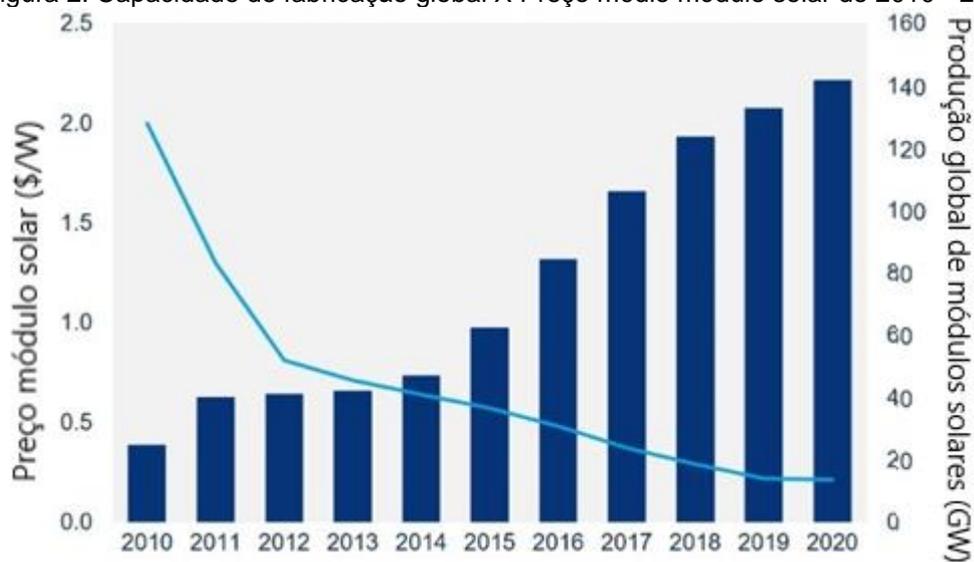
Em 2015 foi publicada a REN nº 687/2015, após revisão da REN nº 482/2012, para reduzir custos e tempo para implantação do sistema FV além de melhorar o sistema de compensação de energia elétrica. Como em um sistema de GD, tem como metodologia durante o dia a injeção de ativo excedente na

rede e à noite é devolvida para a unidade consumidora, caso esta energia injetada seja maior que a consumida, entra-se no processo de crédito de energia, o qual não é revertido em dinheiro para o consumidor, mas pode ser utilizado para compensar o consumo em outras instalações, além da que possui o sistema de geração, desde que seja na mesma concessionária (ANEEL, 2018).

Aspectos Econômicos

Uma das preocupações relacionada à energia FV é seu alto custo inicial que pode ficar ainda mais oneroso caso deseje-se armazenar energia elétrica nas baterias para suprir o consumo durante a noite ou em dias nublados (BALFOUR, SHAW E NASH, 2019). A evolução da tecnologia na área dos semicondutores associado ao aumento na fabricação de células fotovoltaicas reduziram os preços dos sistemas FV e fez com que houve um crescimento neste mercado (DANTAS, POMPERMAYER, 2018). Na Figura 2 é possível analisar a evolução dos preços dos módulos fotovoltaicos em paralelo com a capacidade de fabricação global.

Figura 2: Capacidade de fabricação global X Preço médio módulo solar de 2010 - 2020



Fonte: Portal Energia, 2020 (editada).

Mesmo que o Brasil tenha bastante diversidade nos tipos de clima, isso não afeta na irradiação solar, o que faz com que haja boa uniformidade por toda extensão territorial, permitindo implementar projeto de geração de energia

elétrica fotovoltaica em várias regiões. Mesmo tendo essa disponibilidade solar, o dimensionamento da quantidade de módulos e a potência do inversor deve ser realizada e a soma do valor dos módulos e do inversor corresponde a quase 77% do custo total de instalação de um sistema FV (DANTAS, POMPERMAYER, 2018). Na Tabela 1 é apresentada uma simulação de preços em função da quantidade de módulos fotovoltaicos utilizados.

Tabela 1: Preço final dos sistemas FV simulados

Quantidade de módulos fotovoltaicos	Preços dos equipamentos (R\$)	Instalação (R\$)	Total (R\$)
6	10.048	1.500	11.548
10	14.467	2.500	16.967
18	22.958	4.500	27.458

Fonte: Dantas e Pompermayer, 2018

A respeito do retorno de investimento, considerando a resolução vigente, quando o sistema é interligado na rede de baixa tensão, o consumidor que possui a geração distribuída (GD) se isenta de pagar todas as componentes da tarifa de fornecimento em cima da energia consumida, pois é compensada pela injetada na rede da concessionária e os custos de encargos, perdas e transporte de energia são rateados pelos consumidores que não tem GD. Na fatura para unidade consumidora do grupo B que possui GD o custo de disponibilidade da energia, a taxa de iluminação pública assim como os as tarifas e impostos são cobrados, mesmo que no mês a unidade tenha injetado mais que o consumido gerando créditos de energia (ANEEL, 2019).

Desde 2019 há uma proposta em debate prevê mudanças no sistema de faturamento, porém para quem já tem GD, o sistema de faturamento permanecerá o mesmo até 2030. Para as novas unidades geradoras, é proposta uma cobrança, além das informadas anteriormente, dos custos referentes ao uso da rede de distribuição e os encargos. Entretanto, mesmo que haja alteração nas regras de compensação, ainda assim o investimento em GD permanecerá viável. Os estudos realizados pela ANEEL mostraram que caso o consumidor decida

optar pelo sistema autônomo, o investimento em baterias pode chegar a um valor nove vezes maior que um SFCR (ANEEL, 2019).

METODOLOGIA

A pesquisa bibliográfica é elaborada por meio de um conteúdo já existente, normalmente baseado em artigos e livros científicos (GIL, 2008). Assim foi fundamentado este trabalho de conclusão de curso em uma pesquisa bibliográfica aplicada qualitativa devido a necessidade de embasamento teórico para perfeito entendimento do tema e possibilidade de conclusões fundamentadas. Toda a proposta foi amparada por meio de recursos, como: biblioteca digital disponibilizada pela faculdade Multivix, Periódico Capes e recursos próprios. A pesquisa foi realizada por meio de artigos e teses com tema sobre módulos fotovoltaicos, avanços da GD FV e inovações do setor, além de consultas em sites de órgãos públicos para obtenção de dados e fundamentações normativas para o estudo proposto.

Uma das características do estudo de caso é dado por um estudo profundo sob a área desejada permitindo o retorno de um conhecimento amplo e satisfatório a respeito, tarefa impossível em comparação a outros estudos (GIL, 2008). Na pesquisa foi realizado um estudo de caso para ampliação um sistema de geração distribuída fotovoltaico existente em uma residência no interior do Espírito Santo. A proposta é analisar os detalhes construtivos e também o potencial de geração, assim como apresentar os benefícios econômicos fornecidos à residência. Pretende-se ainda, apresentar o estudo da viabilidade de expansão da GD prevendo um aumento de carga da residência e suas vantagens e desvantagens em aspectos econômicos.

RESULTADO E DISCUSSÃO

No memorial de cálculo demonstrado a seguir, foi considerada uma residência na cidade de Nova Venécia no interior do Espírito Santo o qual já possui um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica da concessionária. Este sistema já possui 10 módulos instalados no telhado conforme a Figura 3.

Figura 3 – Módulos solares em uma residência de Nova Venécia



Fonte: Autores

Devido a construção de uma nova edificação no mesmo terreno, este estudo tem como objetivo a obtenção do cálculo do retorno investido para a ampliação da geração de energia elétrica para alimentar essa nova edificação.

Dados de consumo da residência e levantamento de carga adicional

A residência possui uma instalação bifásica, grupo B e tensão nominal de 220V/127V. Para obter a média de consumo da residência foram observados os valores mensais dos últimos 12 meses apresentados na conta de energia elétrica. Foi obtido uma média de consumo mensal de 198 kWh. Na Tabela 2 é apresentado o histórico de consumo mensal da residência.

Tabela 2 - Histórico de consumo kWh da residência

Mês	Consumo mês / kWh
set/20	133
out/20	219
nov/20	153
dez/20	289
jan/21	336
fev/21	269
mar/21	285
abr/21	277
mai/21	176
jun/21	172
jul/21	160
ago/21	130

Fonte: Autores

Para o levantamento da carga adicional, foram selecionados os aparelhos de maior consumo que irão ser instalados na nova edificação a ser construída, bem como um ar-condicionado que será instalado em uma edificação já existente no mesmo terreno. Os valores de consumo foram obtidos a partir da tabela fornecida pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL, que apresenta o consumo médio mensal avaliando a potência média dos aparelhos. A média de uso é obtida pelo produto entre a quantidade de dias vezes a quantidade de horas por dia de utilização do aparelho. Na Tabela 3 é apresentado o consumo médio dos aparelhos a serem instalados na nova edificação.

Tabela 3 – Consumo médio dos aparelhos eletrônicos

Aparelhos Eletrônicos	Dias Estimados Uso/Mês	Média utilização/dia	Consumo médio mensal (kWh)
Ar-condicionado 9.000 BTU/h	30	8 h	128,8
Chuveiro elétrico - 4500 W	30	32 min	72
Ferro elétrico automático a seco - 1050 W	12	1 h	2,4
Geladeira 1 porta frost free	30	24 h	39,6
Lâmpada fluorescente compacta - 15 W (x 3)	30	5 h	6,75
Somatório			249,55

Fonte: Procel, 2006.

Portanto, considerando a média de consumo da residência e o valor previsto para expansão do consumo de carga, considerado carga total, o consumo final será de 447,55 kWh/mês.

Cálculo da energia produzida pelos módulos fotovoltaicos

Para se obter o quanto de energia será produzida por um módulo fotovoltaico diariamente, foi utilizado o cálculo pelo método da insolação, que conforme Villalva (2012) é o mais adequado quando se trata de um sistema conectado à rede devido a possibilidade de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT).

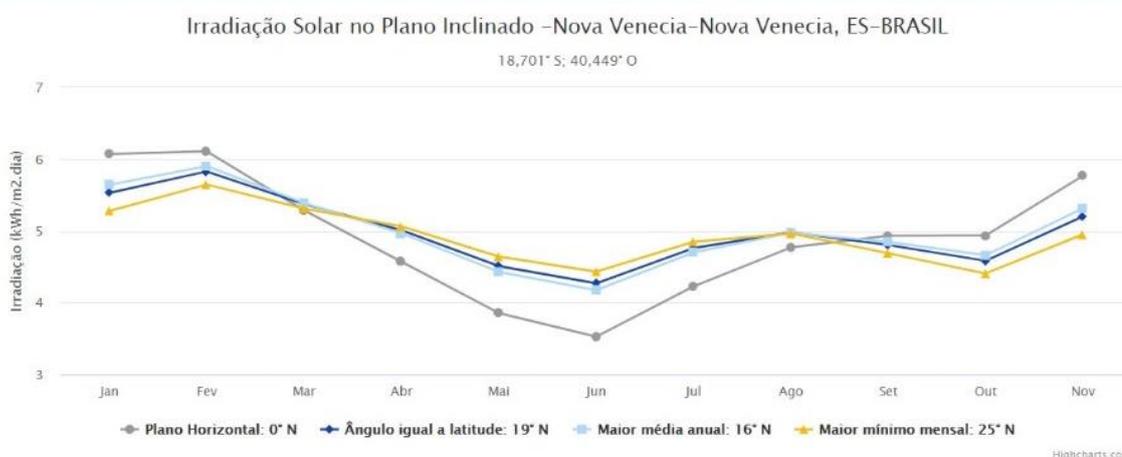
Inicialmente foi verificada a irradiação solar diária média mensal na cidade de Nova Venécia, inserindo as coordenadas geográficas da residência no site do Centro de Referência para as energias Solar e Eólica Sergio de S. Brito –

CRESESB. Na Figura 4 são apresentados os gráficos e valores de irradiação obtidos. O valor obtido foi de 4,93 kWh/m². dia.

Figura 4 – Irradiação solar diária média mensal de Nova Venécia (ES)

Estação: Nova Venécia
Município: Nova Venécia, ES - BRASIL
Latitude: 18,701° S
Longitude: 40,449° O
Distância do ponto de ref. (18,715687° S; 40,405254° O): 4,9 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
<input checked="" type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	6,07	6,11	5,29	4,57	3,85	3,53	3,62	4,23	4,77	4,93	4,94	5,77	4,81	2,58
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	19° N	5,53	5,83	5,37	5,01	4,51	4,27	4,31	4,76	4,98	4,80	4,58	5,20	4,93	1,56
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	16° N	5,64	5,90	5,39	4,97	4,43	4,17	4,23	4,70	4,97	4,85	4,68	5,31	4,93	1,73
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	25° N	5,28	5,64	5,31	5,06	4,64	4,43	4,46	4,85	4,96	4,69	4,41	4,95	4,89	1,24



Fonte: CRESESB, 2021.

Foi escolhido para o dimensionamento o módulo fotovoltaico da fabricante Neosolar, cujo modelo é o RS6E-155M. Na Tabela 4 são apresentados os dados utilizados nos cálculos obtidos no *datasheet*.

Tabela 4 – Dados do módulo fotovoltaico

Dados do modelo RS6E – 155M	Valores
Potência nominal	155 W
Altura	1,270 m
Largura	0,676 m
Área (largura*altura)	0,85852 m ²
Tensão de Circuito aberto (Voc)	24,46V
Coefficiente de temperatura (Voc)	-0,28%/°C
Eficiência do módulo	18,05%

Fonte: *Datasheet* módulo RS6E-155M Neosolar, 2021

A energia produzida (E_p) por um módulo fotovoltaico é obtido conforme a Equação 1 (VILLALVA, 2012):

$$E_p = E_s * AM * E_f \text{ (Wh/dia)} \quad (1)$$

Onde: E_s = Insolação diária (Wh/m².dia), AM = área da superfície do módulo (m²), E_f = Eficiência do módulo.

Portanto, para os valores médio de irradiação solar, considerando a inclinação de 16°N apresentado na Figura 4, que apresenta a maior média anual, foi obtido o valor de 763,9669 Wh/dia de energia produzida.

Dimensionamento do número de módulos

A partir da obtenção dos valores de consumo médio final da residência e da energia produzida diariamente pelo módulo escolhido para Nova Venécia, é possível determinar o número de módulos (N_p) necessários para a instalação elétrica existente, bem como para a ampliação de consumo devido a instalação das cargas mencionadas anteriormente, conforme a Equação 2 (VILLALVA, 2012):

$$N_p = \frac{E_{sistema}}{E_p \text{ mensal}} \quad (2)$$

Sendo, $E_{sistema}$: energia a ser produzida pelo sistema, sendo o necessário para residência 447,55 kWh/mês; E_p mensal: energia produzida pelo módulo mensalmente 30 vezes o valor diário de 763,9669 Wh.

Foi obtido a necessidade de 19,5 módulos. Como, atualmente, já existem 10 módulos instalados, serão necessários a aquisição de 10 novos módulos fotovoltaicos.

Dimensionamento dos inversores

Villalva (2012) destaca dois critérios para dimensionamento de inversores. O primeiro deles é a tensão máxima permitida no inversor que deve ser maior que a tensão de circuito aberto. O inversor deve também ser dimensionado de modo que sua potência seja maior ou igual a de pico do sistema.

Para dimensionamento do inversor que será conectado com 20 módulos ligados em série e uma tensão de circuito aberto de 24,46V, tem-se que a tensão total de circuito aberto ($V_{ocstring}$) na saída do sistema será obtida conforme a Equação 3, encontrando um valor de 489,2V (VILLALVA, 2012).

$$V_{ocstring} = N_p * V_{oc} \quad (3)$$

Onde: N_p é o número de módulos fotovoltaicos conectados em série e V_{oc} é a tensão de circuito aberto de cada módulo fotovoltaico.

Para obter a tensão de circuito aberto ($V_{ocstring}$ empírico) foi aplicado o fator de segurança empírico adotado de 1,1 e a tensão total do circuito aberto calculada de 489,2V, e conforme a Equação 4, obtém-se 538,12V (VILLALVA, 2012).

$$V_{ocstring} (empírico) = V_{ocstring} * 1,1 \quad (4)$$

A verificação da tensão de saída foi realizada considerando variação de temperatura baseada no coeficiente de temperatura do módulo escolhido. Para cada grau de redução na temperatura é aumentado 0,28% na tensão de saída. Tendo como base o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2021) a menor temperatura registrada em Nova Venécia foi 10 °C, portanto para cálculo será considerado que a temperatura nunca será menor que 5°C.

Conforme verificado *site* Climatempo, o qual apresenta as médias climatológicas a partir da média de temperaturas em 30 anos, para temperatura ambiente em Nova Venécia foi considerado 24,4°C, logo serão obtidos a variação percentual de tensão de 5,4% e a variação de tensão será de 26,42V, pelas Equações 5 e 6 respectivamente (VILLALVA, 2012).

$$Variação\ percentual\ de\ tensão = (T - Mtr) * Autemp \quad (5)$$

Onde: T é a temperatura, Mtr é o menor registro de temperatura e Autemp é o aumento de temperatura.

$$Variação\ de\ tensão = V_{pt} * V_{ocstring} \quad (6)$$

Onde: V_{pt} é a variação percentual de tensão.

A tensão total na temperatura de 5°C, será de 515,62V obtida conforme a Equação 7 (VILLALVA, 2012):

$$V_{ocstring} = V_{ocstring} + V_t \quad (7)$$

Onde: V_t é a variação de tensão.

Por fim, para definição do inversor, é necessário calcular a potência máxima utilizando o número de módulos e a potência de cada modulo conforme a Equação 8 (VILLALVA, 2012).

$$P_{máxima} = N_p * P_m \quad (8)$$

Onde: N_p é o número de módulos e P_m é a potência de cada um dos módulos.

Com base no inversor *on grid* da marca Renovigi existente na residência, foi verificado no *datasheet* (RENOVIGI ENERGIA SOLAR, 2019) a tensão máxima por entrada CC verificada na placa é de 550V, portanto, considerando o resultado da equação 7, é possível ligar os 20 módulos em série mesmo no pior caso que acontece quando a temperatura no local da instalação é a mais baixa o possível. A potência máxima indicada na placa do inversor é de 3600W, e como valor obtido na Equação 8, com a expansão torna-se necessário um inversor com potência acima de 3100W, logo não é necessário trocar o inversor.

Payback

O valor total já investido na implantação do sistema fotovoltaico na residência incluindo módulos, inversor, condutores, dispositivos de proteção e mão de obra foi R\$ 14200,00. Abaixo é apresentada a Tabela 5 onde são informando os valores totais do investimento acrescentando o valor dos 10 módulos a serem instalados verificado no *site* da Neosolar. É importante salientar que para os cálculos de custo não foram incluídos os valores para os novos condutores e nem a troca dos dispositivos de proteção necessários devido a ampliação do sistema de geração fotovoltaico.

Tabela 5 – Total do Investimento acrescentando os novos módulos

Componentes	Quantidade adicionada	Custo unitário	Custo total
Módulo monocristalino RS6E-155M	10	R\$ 399,00	R\$ 3.990,00
Valor já investido	-	-	R\$ 14.200,00
			R\$ 18.190,00

Fonte: Autores

A concessionária de energia em Nova Venécia atualmente é a Energia de Portugal – EDP. Consultando os valores do kWh de um consumidor residencial grupo B, a tarifa é R\$ 0,33125 bandeira verde. Devem também ser considerados os tributos verificados na conta de energia apresentados na Tabela 6:

Tabela 6 – Tributos descontados na conta de energia

Valor do kWh EDP	0,33125
ICMS	25%
COFINS	2,61%
PIS	0,57%

Fonte: EDP

Logo, foi possível obter a tarifa incluindo os tributos conforme apresentado na Equação 9, resultando em R\$ 0,461 por kWh (ANEEL, 2013).

$$Valor\ kWh = \frac{Valor\ do\ kWh}{1 - (PIS + CONFINS + ICMS)} \quad (9)$$

Portanto, com o consumo médio mensal de 447,55 kWh/mês o valor médio mensal obtido foi de R\$ 206,32/mês.

A obtenção do tempo de retorno para o investimento será realizada conforme Equação 10. Esta permite definir a quantidade retornada em um período, n , conforme o valor mensal médio que será poupada, R , com uma determinada taxa de juros, i , que será considera a taxa da poupança (KASSAI, et al, 2011).

$$Preto = R \left\{ \frac{1 - \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right]}{i} \right\} \quad (10)$$

Sendo o rendimento da poupança 70% da taxa Selic, que tendo base o mês de setembro de 2021, está em 6,25% aa., a taxa i considera para cálculo será de 4,375% aa (BCB, 2021). Para o valor de período n , foi adotado o tempo de vida útil do módulo visto no *datasheet*, de 30 anos considerando uma depreciação anual de 0,5%.

Portanto, em 30 anos o valor da quantia economizada esperada será de R\$ 56589,497. Conforme apresentado na Equação 11 o valor atual VA para verificação do investimento, obteve-se o valor de R\$ 38399,496. Por ter sido obtido um valor positivo, pode-se concluir que é rentável KASSAI (2011).

$$VA = \text{Retorno} - \text{Valor investido} \quad (11)$$

Utilizando a Equação 11 apresentada anteriormente e utilizando esses cálculos para gerar um gráfico utilizando o Excel, foi possível estimar o tempo de retorno do investimento, conforme demonstrado abaixo na Figura 5, aproximadamente 9 anos para começar o retorno do investimento.

Figura 5: Representação tempo de retorno do investimento



Fonte: Autores

É importante considerar que o inversor tem uma vida útil de 10 anos, dependendo das condições ambientais e da ocorrência de descargas atmosféricas, pode ser prolongado por 15 anos (SOLEN, 2019). Portanto, o mesmo deverá ser substituído, no mínimo 2 vezes, considerando a duração de

30 anos para os módulos solares. Apesar disto, e de ter sido encontrado um valor de aproximadamente 9 anos de *payback*, ressalta-se que já existe um retorno de 12 meses se considerarmos o tempo que o sistema está em pleno funcionamento gerando e injetando ativo na rede da concessionária. Portanto, mesmo que alto, o investimento é viável do ponto de vista econômico, visto que as tarifas sofrem reajustes anuais, e também inserção de nova bandeira tarifária mais cara inserida devida crise hídrica.

CONCLUSÕES

A escassez hídrica está impactando diretamente no valor final da fatura dos consumidores, tendo em vista que novas bandeiras tarifárias estão sendo criadas para períodos de seca. Logo, a procura em novas fontes de energias alternativas é necessária para diminuir a dependência às fontes convencionais. O Brasil, por ser um país que possui alto índice de radiação solar por toda sua extensão territorial, torna o investimento na energia solar fotovoltaica uma alternativa atrativa, o que corrobora com o aumento exponencial de instalações com geração fotovoltaica.

Sendo uma forma de geração que não depende de tamanha complexidade e espaço para sua instalação quando comparada à outras fontes, para um consumidor residencial aderir à microgeração fotovoltaica é preciso que o mesmo disponha de um telhado e/ou fachada que tenha espaço suficiente para instalação dos módulos e em local aberto para receber a maior incidência solar possível. Outro aspecto a ser considerado é seu alto investimento inicial, que mesmo com avanços na área de fabricação de células diminuindo consideravelmente nos últimos anos o valor final dos módulos, ainda assim este tipo de sistema não tão acessível.

Os estudos realizados para a ampliação de um sistema fotovoltaico já existente em uma residência na cidade de Nova Venécia, foi constatado um tempo de *payback* de nove anos. Ainda que seja um pouco extenso, é satisfatório levando em conta que os módulos atuais possuem vida útil de mais de 25 anos, o que corresponde a apenas 36% de duração do sistema. Há ainda outra vantagem, pois a residência possui espaço físico para implementação de mais

módulos, e mesmo que nos cálculos não tenha sido necessária a troca do inversor existente, o consumidor pode considerar a troca por um de maior potência quando houver a necessidade, e ainda sim o investimento é justificado visto os aumentos anuais das tarifas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Geração Distribuída: Micro e Minigeração Distribuídas**. 2018. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>>. Acesso em: 03 de jun. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa Nº 482**. 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 31 de mai. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **ANEEL: Entenda melhor o que a ANEEL está propondo para o futuro da GD**, 2019. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/saladeimprensaexibicao2//asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/entendamelhoroqueaaneelestapropondoparaofuturodagd/656877?inheritRedirect=false&redirect=https://www.aneel.gov.br/saladeimprensaexibicao2%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_zXQREz8EVIZ6%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn2%26p_p_col_pos%3D1%26p_p_col_count%3D3>. Acesso em: 03 de jun. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **ANEEL: Revisão das regras de geração distribuída entra em consulta pública**, 2019. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/saladeimprensaexibicao//asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/revisao-das-regras-de-geracao-distribuida-entra-em-consulta-publica/656877>. Acesso em: 31 de mai. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Escelsa por dentro da conta de luz**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Cartilha%20Escelsa.pdf>>. Acesso em: 03 out. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). **Energia solar: mais empregos e sustentabilidade para o Brasil.** Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/artigos/energia-solar-mais-empregos-e-sustentabilidade-para-o-brasil/>>. Acesso em: 04 de jun. 2021.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN).

BALFOUR, J.; SHAW, M.; NASH, N. **Introdução ao projeto de sistemas fotovoltaicos.** 1 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019. 241 p.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Remuneração dos Depósitos de Poupança.** Disponível em: <<https://www4.bcb.gov.br/pec/poupanca/poupanca.asp?frame=1> >. Acesso em: 03 out. 2021.

CARVALHO, E. F. A; CALVETE, M. J. F. **Energia Solar: um passado, um presente... um futuro auspicioso.** Rev. Virtual Quim. v. 2, n. 3, p. 192 -203, 2010.

CLIMATEMPO. **Climatologia e histórico de previsão do tempo em Nova Venécia.** Disponível em: <<https://www.climatempo.com.br/climatologia/77/novavenecia-es>> Acesso em: 19 de setembro. 2021.

CRESESB. **Potencia Solar: Sun Data v. 3.0.** Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>> Acesso em: 19 de setembro. 2021.

DANTAS, S. G.; POMPERMAYER, F. M.; Viabilidade econômica de Sistemas Fotovoltaicos no Brasil e possíveis efeito no setor elétrico. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA.** Rio de Janeiro, 2018. Disponível

em: <http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/8400/1/TD_2388.pdf>.

Acesso em: 13 de jun. 2021.

EDP. **Tarifas:** Clientes atendidos em baixa tensão (grupo B). Disponível em: <<https://www.edp.com.br/distribuicao-es/saiba-mais/informativos/tabela-de-fornecimento-de-baixa-tensao>> Acesso em: 21 de agosto. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional.** 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>>. Acesso em: 19 de out. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Nacional de Energia Solar**, 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sitespt/publicacoesdadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao227/topico523/05.03%20Energia%20Solar.pdf#search=solar>>. Acesso em: 04 de jun. 2021.

GALHARDO, M. A. B. et. al. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.** São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 248 p.

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** 6. Ed. Editora Atlas SA, 2008.

GUIMARÃES, K.C. et. al. **Uso da energia solar fotovoltaica como alternativa de economia e sustentabilidade:** estudo 12 de caso em residência em Palmas - TO. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia (CONTECC). Palmas, 2019.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia:** Dados históricos anuais. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>> Acesso em: 02 de outubro. 2021.

JESUS, Fernando. Preços dos painéis solares descem 90% desde 2010. **Portal de Energia**, 2020. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/precos-paineis-solares-148225/>>. Acesso em: 21 de out. 2021.

KASSAI, José Roberto; CASANOVA, Silvia Pereira de Castro; SANTOS, Arioaldo dos; ASSAF-NETO, Alexandre. **Retorno do investimento, abordagem matemática e contábil do lucro empresarial**. São Paulo: Atlas, 2011. 280p.

MARQUES, L. A. A.; FERNANDES, I. C. S.; COSTA, J. A. **Energia solar fotovoltaica em unidades residenciais: estudo de caso**. In: Congresso de Iniciação Científica do IFRN (IX CONGIC), Tecnologia e Inovação para o Semiárido. Currais Novos, 2013.

MARQUES, R. C. **Energia solar fotovoltaica e perspectivas de autonomia**. Rev. Tecnol. Fortaleza, v. 30, n. 2, p. 153-162, 2009.

NEOSOLAR. **Painel Solar Fotovoltaico 155W: Resun RS6E-155M**. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-155w-resun-rs6e-155p.html>> Acesso em: 19 de setembro. 2021.

PINHO, João Tavares e GALDINO, Marco Antonio. **Manual de engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL-CRESESB, 2014. 530 p.

PORTAL SOLAR. **Passo a Passo da Fabricação do Painel Solar**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/passo-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>>. Acesso em: 19 de out. 2021.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (PROCEL). **Centro Brasileiro de Informação de Eficiência**

Energética PROCEL INFO: Dicas de Economia de Energia. 2006. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View={E6BC2A5F-E787-48AF-B485-439862B17000}>>. Acesso em: 28 de set. 2021.

RENOVIGI ENERGIA SOLAR. **Inversor Solar Fotovoltaico - Conectado à Rede Elétrica:** Manual do Usuário. 2019. Disponível em: <https://solar.guianet.com.br/wp-content/uploads/2019/03/Manual_Inversor_3kW_-_5kW_-_KTN_-_Portugues.pdf> Acesso em: 12 de nov. 2021.

SOLENE. **Qual a durabilidade do kit energia Solar?**. Disponível em: <<https://www.soleneenergia.com.br/blog/durabilidade-do-kit-energia-solar/>>. Acesso em: 09 de out. 2021.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. **Energia Renovável:** Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. 1. ed. Rio de Janeiro: EPE, 2016. 452 p.

VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia solar fotovoltaica conceitos e aplicações:** Sistemas isolados e conectados à rede. São Paulo: Érica, 2012. 224p.

WAENGA, A; PINTO, D. **Impactos da Geração Distribuída Fotovoltaica no sistema de Distribuição de Energia Elétrica.** 2016. 105f. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.