

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

HENRIQUE SAMUEL HERBERT HERTEL MODRO

**DIMENSIONAMENTO APLICADO A INSTALAÇÕES ELÉTRICAS
COM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM BAIXA TENSÃO PARA
RESIDENCIAL UNIFAMILIAR**

CURITIBA

2021

HENRIQUE SAMUEL HERBERT HERTEL MODRO

**DIMENSIONAMENTO APLICADO A INSTALAÇÕES ELÉTRICAS COM
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM BAIXA TENSÃO PARA RESIDENCIAL
UNIFAMILIAR**

Projeto apresentado ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis e Eficiência Energética.

Orientador: Prof. Dr. Christian Scapulatempo Strobel.

CURITIBA

2021

RESUMO

O presente trabalho tange o atual cenário energético de energia solar do estado de Santa Catarina, onde por sua vez, visa-se um aprofundamento de pesquisa e desenvolvimento nesta fonte de energia renovável, pois as atuais estruturas socioeconômicas procuram por soluções e tecnologias limpas que não agridam diretamente o meio ambiente, desta maneira, este documento tem como principal objetivo dimensionar, analisar e verificar a viabilidade financeira para implantação de um sistema de microgeração de energia solar conectado à rede elétrica, que idealizar-se-á para atingir o consumo máximo da residência como objeto de estudo. Fundamenta-se este artigo através de contextualizações e normas mandatórias condicionado ao mercado de transmissão e distribuição de energia, análise de fatura de consumo de energia em diferentes horários e bandeiras tarifárias. Como considerações finais, descreve-se a comparação dos resultados obtidos através da simulação de diferentes topologias de sistemas.

Palavras-chave: Energia solar. Viabilidade energética. Consumo de energia sustentável.

ABSTRACT

The present work covers the current energy scenario of solar energy in the state of Santa Catarina, it aims at a deepening of research and development in this renewable energy source, because the current socioeconomic structures seek solutions and clean technologies that do not directly harm the environment, thus, this document has as its main objective to measure, analyze and verify the financial feasibility of implementing a system of micro generation of solar energy connected to the grid, which will be idealized to achieve the maximum consumption of the residence as the object of study. This article is based on contextualization and mandatory norms conditioned to the energy transmission and distribution market, analysis of energy consumption bills at different times of the day, and tariff flags. As final considerations, a comparison of the results obtained through the simulation of different system topologies is described.

Keywords: Solar energy. Energy viability. Sustainable energy consumption.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Irradiação solar diária média mensal em Jaraguá do Sul – SC	7
Figura 2: Especificação SIW300H - M020.	10
Figura 3: Curva de eficiência versus carga SIW300H - M020.	11
Figura 4: fatura de energia elétrica com aplicação do sistema fotovoltaico e sem o mesmo.	18
Figura 5: fluxo de caixa acumulado.	18
Figura 6: acompanhamento mensal e anual da economia financeira.....	19

CONTEÚDO

1.1. PROJETO DE DETALHAMENTO	6
1.1.1. Desenho e modelamento.....	7
2. RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
3. CONCLUSÕES	19

1.1. PROJETO DE DETALHAMENTO

O presente estudo está localizado no município de Jaraguá do Sul, situado a rua João Doubrawa, número 167, bairro Czerniewicz. Sendo sua localização em coordenadas cartesianas a 26°47'64.798" Sul e 49°8'19.33" Oeste. Conforme informações da fatura do cliente, contidas na **Tabela 1**, o mesmo é atendido com rede monofásica de baixa tensão, 220V, pela distribuidora CELESC, sendo seu disjuntor de entrada de 50A.

O proprietário possui, conforme sua fatura os seguintes consumos mensais:

Tabela 1: Descrição do consumo mensal, em quilowatt hora.

Mês	Consumo Mensal (kWh/mês)
Maio /2019	338
Junho /2019	261
Julho /2019	265
Agosto /2019	308
Setembro /2019	275
Outubro /2019	299
Novembro /2019	291
Dezembro /2019	298
Janeiro / 2020	340
Fevereiro / 2020	360
Março / 2020	335
Abril / 2020	398
Maio / 2020	303
Média	313,46

Fonte: o autor.

A fatura também informa que o cliente paga até 150kWh a taxa de R\$ 0,5518 por kWh consumido, e após este patamar, passa a pagar a taxa de R\$ 0,651307 por kWh. Vale ressaltar que para consumidores atendidos em rede trifásica, a taxa mínima de cobrança é de 100kWh, o que representa R\$ 56,00 já para consumidores monofásicos, a taxa mínima é 30kWh, ou seja, representa na fatura a importância de R\$ 16,55.

Com estes dados é possível verificar o consumo médio por mês do cliente, conforme cálculo abaixo:

$$P_{medconsu} = \frac{\sum_1^n P_{consu}(n)}{n}$$

$P_{medconsu} = \text{Potência média consumida por mês}$

$P_{consu}(n) = \text{Potência consumida no mês "n"}$

$n = \text{número de meses}$

Verifica-se assim que o um consumo médio mensal nos últimos treze meses de 313 kWh, resultando em um faturamento médio mensal de R\$ 189,23 e o consumo médio anual correspondente ao montante de 3.762 kWh, sendo que o valor mencionado desconsidera as bandeiras tarifárias e impostos aplicados às faturas.

1.1.1. Desenho e modelamento

A irradiação solar diária média mensal foi obtida no site do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito tomando como base os índices da cidade de Jaraguá do Sul – SC. Os índices de radiação são mostrados na **Figura 1**.

Figura 1: Irradiação solar diária média mensal em Jaraguá do Sul – SC

Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Jaraguá do Sul
Município: Jaraguá do Sul, SC - BRASIL
Latitude: 26,5° S
Longitude: 49,049° O
Distância do ponto de ref. (26,476473° S; 49,080193° O): 4,1 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	5,26	5,05	4,43	3,63	2,99	2,48	2,59	3,28	3,32	3,84	4,92	5,30	3,92	2,82
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	26° N	4,75	4,83	4,60	4,17	3,78	3,27	3,32	3,91	3,52	3,76	4,52	4,72	4,09	1,56
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	21° N	4,90	4,92	4,62	4,11	3,67	3,15	3,22	3,83	3,52	3,81	4,64	4,87	4,11	1,77
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	37° N	4,36	4,54	4,47	4,21	3,95	3,45	3,49	4,01	3,46	3,57	4,18	4,30	4,00	1,09

Fonte: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito

Como o sistema será conectado à rede de distribuição, foi optado por seguir o estudo com o ângulo de inclinação da placa de 21° para obter o maior aproveitamento da mesma, pois possui a maior média diária anual de 4,11 kWh/m².

Tendo em vista as informações já coletadas do cliente se faz necessário calcular o gerador fotovoltaico necessário para sua característica. A potência pode ser calculada através da equação abaixo:

$$P_{placas} = \frac{E * G_{STC}}{H_{TOT} * h}$$

$P_{placas} = \text{Potência total (kWp)};$

(1)

$E =$ Consumo médio mensal (kWh);

$G_{STC} =$ Irradiância na STC $\left(\frac{kW}{m^2}\right)$;

$H_{TOT} =$ Irradiação total $\left(\frac{kWh}{m^2}\right)$;

$h =$ Rendimento do sistema.

Para a utilização da equação acima, é necessário a determinação das variáveis existentes.

O consumo médio de energia mensal foi definido anteriormente.

O valor da irradiância na STC (Standard Test Conditions – Condição de Teste Padrão) é 1000 W/m². Esta é a irradiação considerada em condições de testes nas placas solares segundo normas.

Para o fator de rendimento, utilizou-se o fator de 75%. Caso as placas funcionassem sem perdas, então seria 100%, mas em consideração as perdas no inversor, na própria placa e nos cabos e contando com a variação da irradiação, decidiu-se por manter um fator mais conservador para efeito do cálculo da potência total.

Substituindo os valores na equação, têm-se o valor da potência instalada:

$$P_{total} = \frac{313 \times 1}{123,3 \times 0,75} = 3,38 \text{ kWp}$$

Tabela 2: Resumo das informações para dimensionamento do sistema fotovoltaico aplicado a residência monofásica em baixa tensão.

Descrição	Unidade
Irradiação média diária (kWh/m ² /dia):	4,1100
Irradiação média mensal (kWh/m ² /mês):	123,30
Tarifa básica consumo (R\$/kWh):	R\$ 0,551800
Tarifa excedente consumo (R\$/kWh):	R\$ 0,651307
Consumo mínimo (kWh):	30
Faturamento mensal mínimo consumo (R\$)	R\$ 16,55
Faturamento médio consumo básico mensal (kWh):	150
Faturamento médio consumo excedente mensal (kWh):	163

Consumo médio mensal (kWh):	313
Faturamento mensal médio consumo (R\$):	R\$ 189,23
Consumo médio anual (kWh):	3.762
Taxa de desempenho (Performance Ratio) (%):	75%
Potência fotovoltaica necessária (kWp):	3,4

Fonte: o autor.

A placa solar selecionada para o projeto foi a placa padrão da Trina Solar TSM-PE15H. Os dados da placa para condição de teste com irradiação de 1000W/m² e temperatura celular de 25°C são apresentados na **Tabela 3**:

Tabela 3: Folha de dados do painel fotovoltaico Trina Solar TSM-PE15H

ELECTRICAL DATA (STC)

Peak Power Watts-P _{MAX} (Wp)*	340	345	350	355
Power Output Tolerance-P _{MAX} (W)	0 ~ +5			
Maximum Power Voltage-V _{MPP} (V)	37.5	37.7	37.9	38.1
Maximum Power Current-I _{MPP} (A)	9.06	9.15	9.23	9.32
Open Circuit Voltage-V _{OC} (V)	46.2	46.4	46.7	47.0
Short Circuit Current-I _{SC} (A)	9.53	9.62	9.71	9.81
Module Efficiency η_m (%)	16.7	17.0	17.2	17.5

STC: Irradiance 1000W/m², Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5.
*Measuring tolerance: ±3%.

Fonte: Trina Solar

Para obter a quantidade de módulos necessários é seguir a equação abaixo:

$$N_{mod} = \frac{P_{tot}}{P_{mod}}$$

(2)

N_{mod} = Número de módulos;

P_{mod} = Potência do módulo;

Substituídos os valores dentro da equação, obtêm-se o número de módulos necessários para alimentação da unidade consumidora:

$$N_{mod} = \frac{3,38 \text{ kWp}}{0,345 \text{ kWp}} \cong 9,79 \cong 10 \text{ painéis}$$

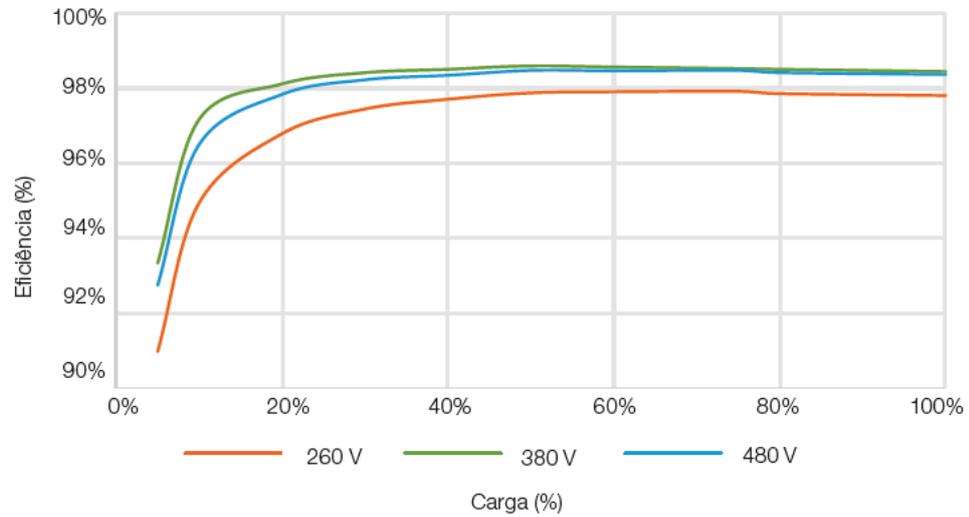
Verificou-se que a potência instalada para o presente estudo possui conformidade com o inversor de frequência monofásico SIW300H - M020.

Figura 2: Especificação SIW300H - M020.

Especificações técnicas	SIW300H - M020
Eficiência	
Eficiência máxima	98,4%
Eficiência europeia	97,0%
Entrada	
Tensão de entrada máxima	500 V
Faixa de tensão de operação ¹	90 V ~ 600 V
Tensão de partida	120 V
Faixa de tensão MPPT em máxima potência	120 V ~ 480 V
Tensão de entrada nominal	380 V
Corrente de entrada máxima por MPPT	11 A
Corrente de curto-circuito máxima	15 A
Número de MPPTs	2
Número máximo de entradas por MPPT	1
Saída	
Conexão à rede	Monofásica
Potência nominal de saída	2.000 W
Potência aparente máxima	2.200 VA
Tensão de saída nominal	220 V / 230 V / 240 V
Frequência de rede CA nominal	50 Hz / 60 Hz
Corrente de saída máxima	10 A
Fator de potência ajustável	0,8 adiantado ... 0,8 atrasado
Distorção harmônica total máxima	≤3%

Fonte: WEG

Figura 3: Curva de eficiência versus carga SIW300H - M020.



Fonte: WEG

Após definido o inversor a ser utilizado, deve-se decidir a quantidade de módulos que serão conectados em série para a alimentação do inversor. Para isso, deve-se calcular a tensão gerada pelos módulos para diferentes tipos de funcionamento do mesmo, e devido os mesmos estarem conectados em série a soma destas tensões deve estar à faixa de tensão de entrada do inversor, apresentada na figura 04 (120-500 V), onde nesta faixa de tensão o inversor apresenta a característica de potência máxima.

Nesta etapa, o valor da tensão das placas solares é determinado partindo dos seguintes princípios: durante o inverno, verificam-se temperaturas mais baixas e a tensão nos terminais da placa solar atinge seus valores mais elevados, já no verão, as temperaturas são mais elevadas e a tensão registrada nos terminais das placas possuem valores mais baixos. Assim, devem-se determinar as seguintes informações nas condições de temperatura apresentadas:

- Tensão correspondente ao ponto de potência máxima do módulo;
- Tensão de circuito aberto;

Para o cálculo da tensão máxima e mínima gerada pela placa solar para a condição de potência máxima, segue-se a equação 03 abaixo:

$$V_{mpp} = V_{mppref} * \left(1 + k_{temp} * (T_{amb} - T_{ref})\right) \quad (3)$$

V_{mpp} = Tensão gerada nas condições de potência máxima (V);

V_{mppref} = Tensão gerada nas condições de norma (V);

k_{temp} = Coeficiente de temperatura para o ponto de potência máxima(%/°C);

T_{amb} = Temperatura ambiente (°C);

T_{ref} = Temperatura de referência normalizada (°C);

Para a utilização da equação 03, é necessária a determinação das variáveis existentes.

Tabela 4: Folha de dados do painel fotovoltaico Trina Solar TSM-PE15H

TEMPERATURE RATINGS		MAXIMUM RATINGS	
NMOT (Nominal Module Operating Temperature)	41°C (±3°C)	Operational Temperature	-40~+85°C
Temperature Coefficient of P _{MAX}	- 0.38%/°C	Maximum System Voltage	1500V DC (IEC)
Temperature Coefficient of V _{OC}	- 0.31%/°C		1500V DC (UL)
Temperature Coefficient of I _{SC}	0.05%/°C	Max Series Fuse Rating	20A

(Do not connect Fuse in Combiner Box with two or more strings in parallel connection)

Fonte: Trina Solar

A variável V_{mppref} , é um dado do fabricante da placa solar, esta é a tensão gerada pela placa nas condições de testes a 25°C. Para a placa selecionada este valor é de 37,7 V.

O coeficiente k_{temp} é outro dado do fabricante da placa solar, este representa a variação de tensão gerada nos terminais da placa devido à variação de temperatura, para esta placa específica este valor é de -0,38%/°C

A variável T_{amb} , representa a temperatura ambiente. Para este caso, como o objetivo é descobrir a tensão mínima gerada na placa, foi determinado à temperatura máxima como 45 °C e a mínima de 5°C devido à característica de temperatura da região onde serão instaladas as placas.

A variável T_{ref} , representa a temperatura de referência de 25°C, devido a todas as informações do catálogo do fabricante estar referenciados a esta temperatura.

Substituindo os valores na equação 03 para a condição de 45 °C, têm-se:

$$V_{mpp} = 37,7 * (1 + (-0,0038) * (45 - 25)) = 34,83 V$$

Substituindo os valores na equação 03 para a condição de 5 °C, têm-se:

$$V_{mpp} = 37,7 * (1 + (-0,0038) * (5 - 25)) = 40,56 V$$

Para o cálculo da tensão de circuito aberto máxima e mínima gerada pela placa solar para a condição de potência máxima, segue-se a equação 04 abaixo:

$$V_{ca} = V_{caref} * (1 + k_{temp} * (T_{amb} - T_{ref})) \quad (4)$$

V_{ca} = Tensão gerada na condição de circuito aberto (V);

V_{caref} = Tensão gerada nas condições de norma (V);

k_{temp} = Coeficiente de temperatura na condição de circuito aberto (%/°C);

T_{amb} = Temperatura ambiente (°C);

T_{ref} = Temperatura de referência normalizada (°C);

Para a utilização da equação 04, é necessária a determinação das variáveis existentes.

A variável V_{ca} , é um dado do fabricante da placa solar, esta é a tensão gerada pela placa nas condições de testes a 25°C. Para a placa selecionada este valor é de 46,4 V.

O coeficiente k_{temp} é outro dado do fabricante da placa solar, este representa a variação de tensão gerada nos terminais da placa devido à variação de temperatura, para esta placa específica este valor é de -0,31%/°C

A variável T_{amb} , representa a temperatura ambiente. Para este caso, como o objetivo é descobrir a tensão mínima gerada na placa, foi determinado à temperatura máxima como 45 °C e a mínima de 5°C devido à característica de temperatura da região onde serão instaladas as placas.

A variável T_{ref} , representa a temperatura de referência de 25°C, devido a todas as informações do catálogo do fabricante estar referenciados a esta temperatura.

Substituindo os valores na equação 04 para a condição de 45 °C, têm-se:

$$V_{ca} = 46,4 * (1 + (-0,0031) * (45 - 25)) = 43,52 V$$

Substituindo os valores na equação 03 para a condição de 5 °C, têm-se:

$$V_{ca} = 46,4 * (1 + (-0,0031) * (5 - 25)) = 49,27 V$$

Obtido os dados da tensão correspondente ao ponto de potência máxima do módulo e da tensão de circuito aberto para as temperaturas máximas e mínimas, foi possível gerar a **Tabela 3**

Tabela 5: Resumo das informações para dimensionamento do sistema fotovoltaico aplicado a residência monofásica em baixa tensão.

Descrição	Temperatura Máxima (45°C)	Temperatura Mínima (5°C)
V_{mpp}	34,83 V	40,56 V
V_{ca}	43,52 V	49,27 V

Fonte: o autor.

Para que o inversor opere com a tensão adequada, é necessário que a tensão de entrada esteja entre 120 e 500 V, ou seja, sabendo os valores máximos e mínimos que cada placa gera é possível calcular a quantidade máxima e mínima de placas necessárias para que o inversor opere dentro de seu ponto ótimo. Observando a tabela 01, é possível obter a pior condição de geração neste ambiente que é o menor valor de tensão da tabela, neste caso 28,27 V, assim é possível calcular a quantidade de placas mínimas para a operação do inversor através da equação 05:

$$N_{sériemin} = \frac{V_{invmin}}{V_{placamin}} \quad (5)$$

$N_{sériemin}$ = Número de placas mínimas em série;

V_{invmin} = Tensão de operação mínima do inversor (V);

$V_{placamin}$ = Tensão de geração mínima da placa (V);

Substituindo os valores na equação 05, obtém-se a quantidade mínima de placas em série:

$$N_{sériemin} = \frac{120V}{34,83V} = 3,44 \text{ placas}$$

Observando a **Tabela 3**, é possível obter a melhor condição de geração neste ambiente que é o maior valor de tensão da tabela, neste caso 49,28 V, assim é possível calcular a quantidade de placas mínimas para a operação do inversor através da equação 05:

$$N_{sériemáx} = \frac{V_{invmáx}}{V_{placamáx}} \quad (6)$$

$N_{sériemáx}$ = Número de placas máximas em série;

$V_{inváxx}$ = Tensão de operação máxima do inversor (V);

$V_{placamáx}$ = Tensão de geração máxima da placa (V);

Substituindo os valores na equação 06, obtém-se a quantidade máxima de placas em série:

$$N_{sériemáx} = \frac{500 V}{49,28 V} = 10,15 \text{ placas}$$

Comparando estes resultados com o número de placas encontradas pela equação 02, observa-se que é possível utilizar as 10 placas calculadas anteriormente, para estas condições, e obter o ponto máximo do inversor.

Voltando a equação 01, é possível calcular a energia real gerada, verificado que a mesma atende o consumo mensal realizado:

$$E_{gerada} = \frac{(10 * 0,345) * 30 * 4,11 * 0,75}{1} = 319,84 \frac{kW}{h} \text{ (mensal)}$$

Tabela 6: Simulações de verificação para escolha do arranjo fotovoltaico:

Descrição	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
Número de módulos por string	05	10	08
Número de strings por inversor	02	01	01
Temperatura Máxima (°C)	45	45	45
Temperatura Mínima (°C)	5	5	5
Máxima tensão Vmpp (V)	202,826	405,652	324,5216
Mínima tensão Vmpp (V)	174,174	348,348	278,6784
Máxima tensão Voc (V)	246,384	492,768	394,2144
Mínima tensão Voc (V)	217,616	435,232	348,1856
Energia Gerada (kWh/Mês)	319	319	255

Fonte: o autor.

2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme calculado, é apresentado abaixo uma simulação para geração de energia com 09 módulos fotovoltaicos com a variação da incidência solar por mês:

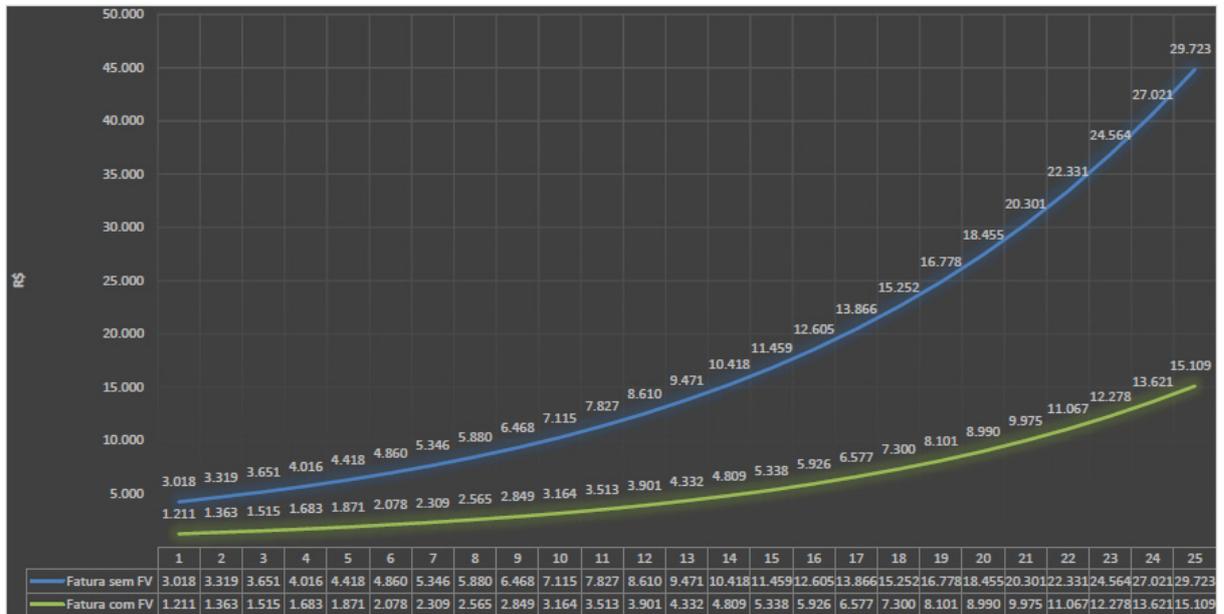
Tabela 7: Previsão de consumo, geração e economia, em kWh.

Mês	Energia consumida da concessionária (kWh)	Energia gerada pelo SFV (kWh)	Crédito (kWh)	Energia faturada (kWh)	Economia de energia (kWh)
Janeiro	275	232	0	43	232
Fevereiro	308	210	0	97	211
Março	265	218	0	46	219
Abril	261	187	0	72	189
Maiο	338	172	0	164	174
Junho	398	143	0	253	145
Julho	339	150	0	186	153
Agosto	360	179	0	178	182
Setembro	340	159	0	178	162
Outubro	298	175	0	120	178
Novembro	291	208	0	78	213
Dezembro	299	225	0	68	231
TOTAL	3772	2258	0	1484	2288

Fonte: o autor.

Em relação a **Tabela 7**, é possível visualizar graficamente a fatura de energia elétrica com o sistema fotovoltaico e sem o mesmo.

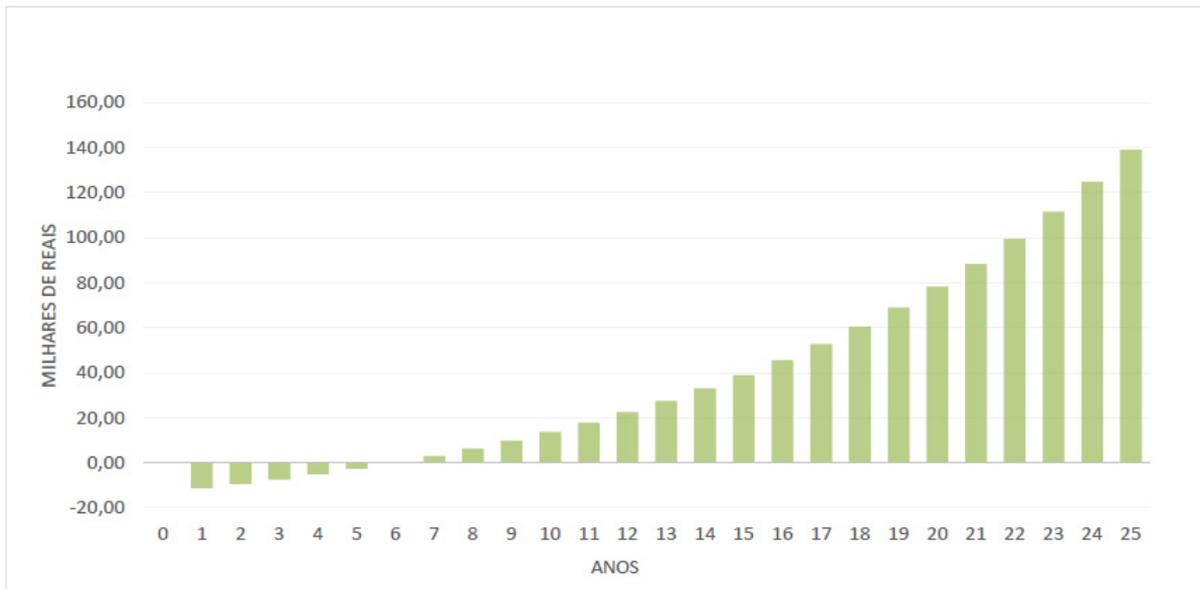
Figura 4: fatura de energia elétrica com aplicação do sistema fotovoltaico e sem o mesmo.



Fonte: o autor.

Nota-se uma diferença acentuada entre as curvas, que são detalhadas na imagem abaixo com a comprovação do *payback* financeiro

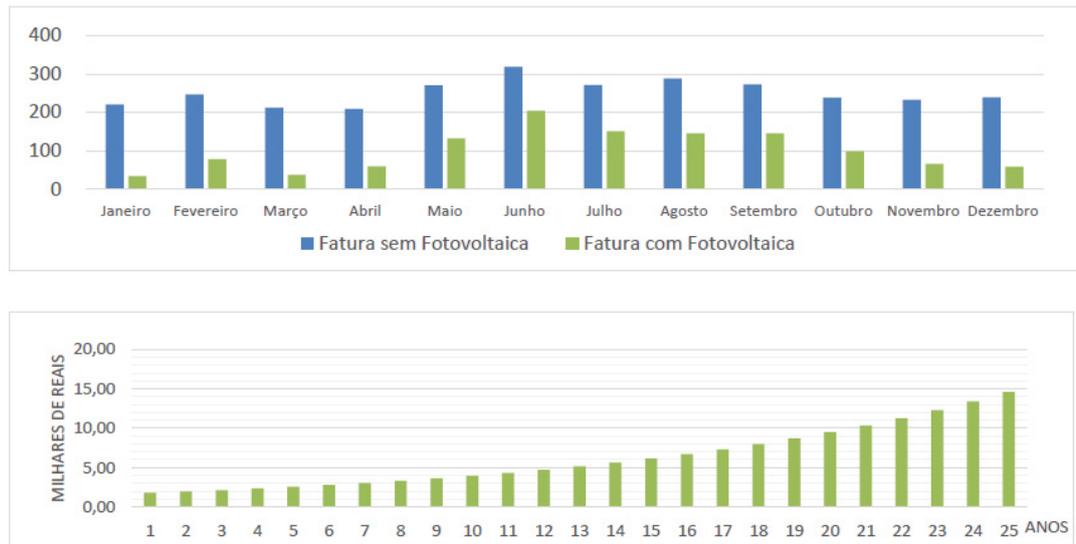
Figura 5: fluxo de caixa acumulado.



Fonte: o autor.

Nota-se, portanto, que o payback está em torno de 6 anos com um investimento total de R\$ 13.689,47, considerando compra dos equipamentos, instalações e comissionamento dos módulos fotovoltaicos.

Figura 6: acompanhamento mensal e anual da economia financeira.



Fonte: o autor.

3. CONCLUSÕES

Os assuntos e repercussões ambientais sobre as fontes de energias renováveis estão cada vez mais pauta, e assim, existe a necessidade de análises de implantação de fontes alternativas de energia limpa. O governo do estado de Santa Catarina aprovou em 2018 o abatimento da tarifação do ICMS para microgerações distribuídas, o que incentivou os consumidores a pensarem neste novo sistema para gerar sua própria energia e economizar a médio e longo prazo os gastos com esse tipo de despesa.

Este trabalho abordou a implantação do sistema fotovoltaico dimensionado para suprir o consumo de energia de uma residência unifamiliar onde apresentou-se viável em na simulação para geração de energia com nove módulos fotovoltaicos com a variação da incidência solar apresentada nos resultados.

Apesar do retorno sobre o capital investido estimado ser de seis anos, deve-se considerar a vida útil do sistema fotovoltaico de vinte e cinco anos.