

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DIEGO AMBRÓSIO NÓBREGA
MARIANA RABELO RIBEIRO

**INSTALAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA NA REGIÃO DE Balsa
NOVA/PR**

CURITIBA

2021

DIEGO AMBRÓSIO NÓBREGA
MARIANA RABELO RIBEIRO

INSTALAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA NA REGIÃO DE Balsa Nova/PR

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

No cenário brasileiro vemos cada vez mais instalações de produção descentralizada de energia que vem se mostrando cada vez mais vantajoso, tendo em vista as recentes alterações climáticas e racionamentos de água e energia. O presente trabalho consiste na avaliação da instalação de uma pequena usina fotovoltaica ligada à rede elétrica (*on-grid*) instalada na região de Balsa Nova – PR, apresentando projeto, tipo de instalação e avaliação da energia gerada. Avaliando-se também a perda de eficiência pelo calor no entorno das placas através de modelagem matemática e software de cálculo

Palavras-chave: Fotovoltaica. Solar. Energia. Eficiência. Renovável.

ABSTRACT

In the Brazilian scenario, more decentralized energy production facilities has been built, which have been proving to be advantageous, in view of recent climate changes and water and energy restrictions. The present work consists in the evaluation of the installation, project and mathematic modeling of a small on grid photovoltaic plant, installed in Balsa Nova – PR, also evaluating the loss of efficiency by heat around the plates.

Keywords: Photovoltaic. Solar. Energy. Efficiency. Renewable.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1-1 – Crescimento da geração distribuída.....	7
FIGURA 2-1 – Arranjo Fotovoltaico	Erro! Indicador não definido.
FIGURA 2-2 - Corte transversal da célula.....	8
FIGURA 2-3 – Curvas características do módulo	9
FIGURA 2-4 – Características elétricas do módulo.....	10
FIGURA 3-1 – Ponto de Operação com e sem MPPT	12
FIGURA4-1 – Organização dos painéis solares.....	14
FIGURA4-2 – Strings do Inversor de 5kW	15
FIGURA4-3 – Strings do Inversor de 7,5kW	15
FIGURA4-4 – Diagrama Unifilar geral	16
FIGURA4-5 – Entrada do ramal da COPEL	17
FIGURA4-6 – Diagrama multifilar CC	1Erro! Indicador não definido.
FIGURA4-7 – Diagrama multifilar CA	1Erro! Indicador não definido.
FIGURA5-1 – Interface do atlas de energia solar do local estudado	20
FIGURA5-2 – Informações de temperatura de operação e eficiência do painel solar	21
FIGURA5-3 – Modelo de troca de calor de uma placa solar	22
FIGURA5-4 – Retorno de cálculos realizados pelo EES.....	24
FIGURA6-1 – Gráficos de produção de energia mensal fornecidos pelo proprietário	26
FIGURA6-2 – Painel do aplicativo com dados de geração.....	27

LISTA DE TABELAS

TABELA 3-1 – Dados técnicos dos inversores.....	13
TABELA 4-1 – Strings por inversor	15
TABELA 5-1 – Tabela com dados da pousada	23
TABELA 5-2 – Valores de irradiação média diária por mês	23

CONTEÚDO

1. INTRODUÇÃO	6
2. ARRANJO FOTOVOLTAICO.....	8
3. INVERSOR DE POTÊNCIA.....	11
4. SITUAÇÃO DE INSTALAÇÃO.....	14
5. EFICIÊNCIA DA INSTALAÇÃO	19
6. EFICIÊNCIA DA INSTALAÇÃO	25
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	27

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo analisar a instalação de uma central geradora fotovoltaica com potência instalada de 12,5kW em Balsa Nova/PR. Serão executados os projetos de instalação do sistema incluindo o diagrama unifilar e multifilar e os detalhes de conexão com a rede de distribuição da COPEL. Além disso, será apresentada a análise de eficiência energética dos painéis.

A instalação do sistema se mostrou necessária devido ao alto consumo de energia elétrica da propriedade, que no momento da instalação contava com uma pousada em funcionamento além de uma laticínio de pequeno porte, com equipamentos automatizados para extração de leite de vacas e seus acessórios, além dos equipamentos elétricos utilizados na manutenção do local, muitos deles de alto consumo como bombas de vácuo para alimentar os equipamentos e lavadoras de alta pressão.

O Brasil tem em sua matriz energética uma imensa fatia dependente da geração hidrelétrica e das inúmeras quedas d'água que o terreno sinuoso de nosso país nos proporciona. Obviamente, o volume de água tem um peso extremamente importante nessa equação que acaba se tornando extremamente inconstante e sazonal. É bem verdade que nosso sistema elétrico interligado, e a extensão do nosso país, sendo em grande parte latitudinal nos permite o aproveitamento completo das épocas de maior volúpia hídrica e, portanto, maior geração elétrica nas diferentes regiões do Brasil. Entretanto, nos últimos anos, observa-se que, os aumentos das tarifas têm sido mais constantes assim como a utilização da bandeira tarifária vermelha, que gera maior custo para o consumidor.

Neste contexto, a utilização de energia solar fotovoltaica tem se tornado cada vez mais atrativa e a constante queda nos preços permite que cada vez mais os consumidores de energia se tornem, também, geradores. No que diz respeito ao consumidor residencial de energia, a microgeração é uma alternativa a ser considerada uma vez que esta não é suscetível aos reajustes tarifários determinados pela distribuidora de energia elétrica.

No Brasil, a micro e minigeração tem papel muito importante devido à expansão demográfica e econômica que tem gerado um aumento constante no consumo. Por esta razão, e com o objetivo de reduzir as dificuldades fiscais, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) aprovou a Resolução Normativa nº 482/2012, junto a seção 3.7 do Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no

Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) que estabelece os procedimentos para acesso de micro e minigeração ao sistema de distribuição. De acordo com as novas regras publicadas em 1º de março de 2016, esse tipo de geração deve ser feito, estritamente, por fontes renováveis, além da cogeração qualificada, sendo a microgeração inferior ou igual a 75kW e a minigeração inferior ou igual a 5MW. A resolução possibilita que o fluxo de energia seja bidirecional, ou seja, o consumidor que gerar mais o que consumir naquele período, receberá créditos em energia para serem consumidos em um período de até 60 meses. Esses créditos também podem ser utilizados para abater o consumo de outras propriedades do mesmo titular, desde que sejam na mesma área de concessão da unidade geradora [1].

É interessante perceber a evolução deste tipo de instalação, apenas considerando como fonte geradora a radiação solar, o Brasil já ultrapassou os 5,6GW de potência instalada. É possível perceber que a adoção é crescente e que, somente em 2020, cresceu mais de 69% em relação ao período anterior [2].

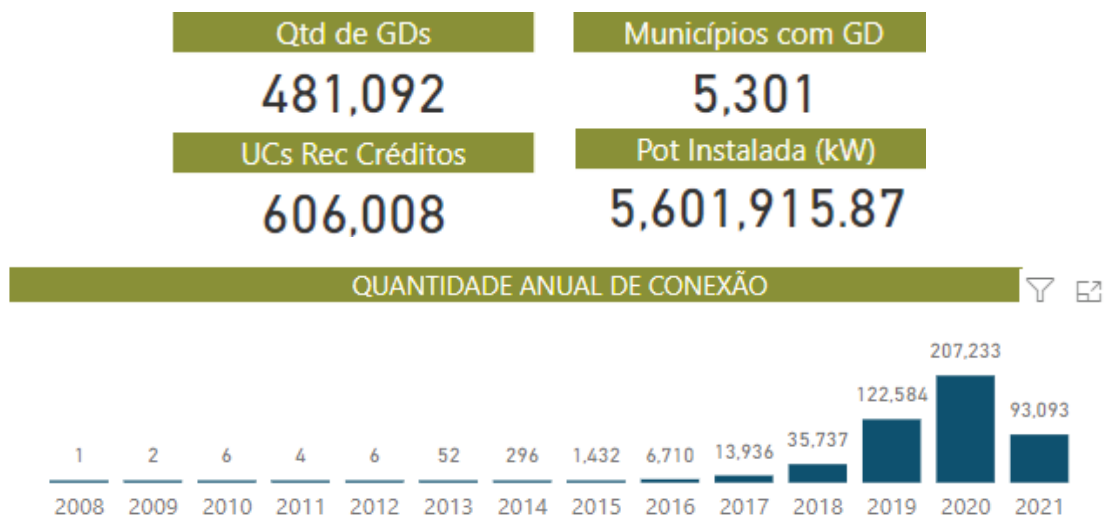


Figure 1-1 - Crescimento da geração distribuída

Neste contexto, este trabalho está alinhado com a tendência nacional de adoção da energia solar como fonte alternativa de energia.

2. ARRANJO FOTOVOLTAICO

Arranjos fotovoltaicos são compostos por painéis fotovoltaicos, que por sua vez são constituídos de módulos e células fotovoltaicas, como pode ser visto na Figura 2.1. As células fotovoltaicas são responsáveis pela conversão de radiação eletromagnética em energia elétrica. Essas células são compostas por materiais semicondutores, geralmente sendo Silício (Si), que é um metal abundante no Brasil.

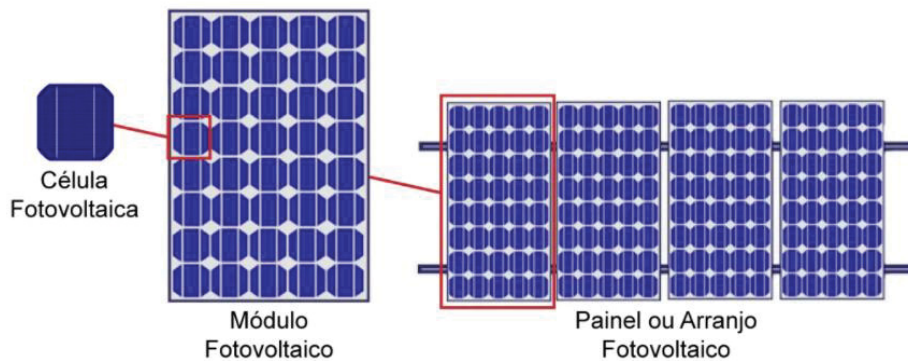


Figure 2-1 - Arranjo Fotovoltaico [3].

O corte transversal de uma célula fotovoltaica é apresentado na Figura 2.2. O processo de conversão de energia começa com os fótons (presentes na radiação solar) atingindo o revestimento (vidro, adesivo transparente e antirreflexo) e ao cortar a célula, os elétrons presentes nos semicondutores são liberados. Os semicondutores do tipo n compõem a região com excesso de elétrons, enquanto os semicondutores do tipo p fazem parte da região com poucos elétrons. Essa diferença de elétrons em cada camada produz um fluxo da camada n para a p, o que resulta em corrente elétrica.

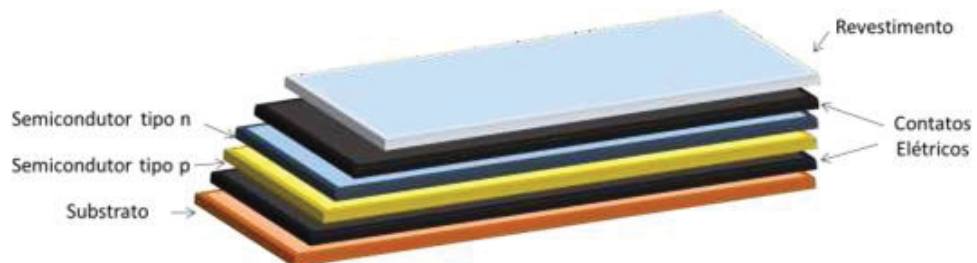


Figure 2-2 - Corte transversal da célula.

A aplicação de sistemas fotovoltaicos possui várias vantagens, tais como, utilização de espaços ociosos, tamanho ajustável, matéria prima ilimitada, nenhuma emissão de CO₂ (desconsiderando aquela emitida na produção do painel), silencioso, pouca manutenção requerida, etc.

Este projeto foi elaborado com os painéis solares *Risen RSM72-6-335P*. De acordo com o *datasheet* do fabricante, as curvas características de corrente e tensão do módulo são apresentadas na Figura 2.4.

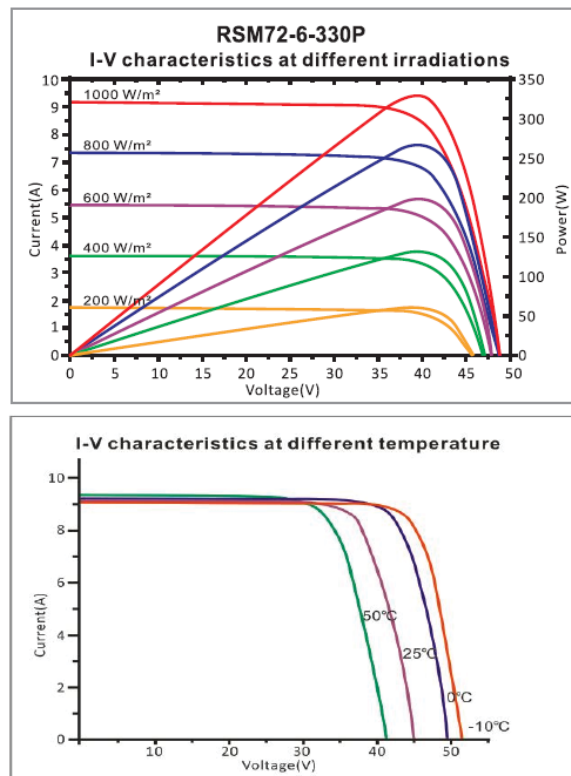


Figure 2-3 - Curvas características do módulo

O gráfico inferior da Figura 2.4 apresenta as curvas de corrente e tensão para diferentes temperaturas e radiação constante de 800 W/m^2 . Por outro lado, a curva de cima mostra a relação entre a corrente e a tensão considerando temperatura constante de 20°C e diferentes níveis de radiação. O fabricante também fornece os valores de pontos específicos nas condições convencionais de teste (800 W/m^2 e 20°C) como pode ser visto na Figura 2.5. Estes pontos específicos são aqueles que fornecem a máxima potência de saída (V_{mp} , I_{mp}), a corrente de curto-circuito (0 , I_{cc}) e a tensão de circuito aberto (V_{ca} , 0). A corrente de curto-circuito é aquela que circula pelo módulo quando este tem os seus terminais curto-circuitados e a tensão de circuito aberto é aquela medida entre os terminais quando estão em aberto.

ELECTRICAL DATA(NOCT)					
Model Number	RSM72-6-320P	RSM72-6-325P	RSM72-6-330P	RSM72-6-335P	RSM72-6-340P
Maximum Power-Pmax (Wp)	234.7	238.4	245.9	249.6	253.3
Open Circuit Voltage-Voc (V)	42.2	42.5	43.0	43.3	43.6
Short Circuit Current-Isc (A)	7.36	7.40	7.49	7.53	7.57
Maximum Power Voltage-Vmpp (V)	33.8	34.0	34.5	34.7	34.9
Maximum Power Current-Impp (A)	6.95	7.01	7.13	7.19	7.26

NOCT: Irradiance at 800 W/m², Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1 m/s.

Figure 2-4 - Características elétricas do módulo

A partir dos gráficos da Figura 2.4 é fácil perceber que a eficiência do painel é altamente influenciada pelas condições climáticas e pela carga conectada. Por esse motivo se faz necessário a conexão de circuitos auxiliares que sejam capazes de maximizar a potência elétrica gerada; esses circuitos são chamados de Rastreadores de Máxima Potência (MPPT – Maximum Power Point Tracker).

3. INVERSOR DE POTÊNCIA

Redes de geração fotovoltaica podem ser divididas, basicamente, em dois grandes grupos: Sistemas Isolados ou autônomos (off-grid) e Sistemas Conectados à Rede (grid-tie). Os sistemas isolados são constituídos, em geral, por módulos fotovoltaicos, acumuladores (baterias), controladores de carga e um inversor (caso a carga seja em corrente alternada (CA)). Os sistemas conectados à rede, foco deste trabalho, não se utilizam de baterias e de controladores de carga. Faz-se uso de um conversor, a fim de elevar a tensão de saída do painel à um nível compatível com a inversão para o nível CA da rede. O inversor solar (*grid-tie*), além de executar a função conversão para CA, também é o responsável por garantir que a geração sempre ocorra no ponto de máxima potência.

Pode-se afirmar que uma central geradora fotovoltaica sofre grandes variações de potência elétrica como resultado das constantes mudanças de carga, radiação incidentes e temperatura no módulo fotovoltaico ao longo do dia. Se observarmos a curva de tensão e corrente para uma determinada radiação e temperatura, nota-se que existe um ponto na curva onde a potência é máxima. Porém, o ponto de operação é dado exclusivamente pela carga conectada ao sistema. Ou seja, a potência elétrica gerada dependerá apenas da carga a ser alimentada o que não garante que este será o ponto de máxima potência. Sendo assim, para diferentes valores de carga, apenas um único valor coincidirá com o ponto de máxima potência. Além disso, é preciso considerar que, na prática, as condições climáticas não serão constantes e, portanto, para que a potência seja maximizada, muitos fatores deverão acontecer ao mesmo tempo o que é pouco provável sem que haja um dispositivo que modifique o ponto de operação para aquele cuja potência é máxima.

O efeito da aplicação de uma técnica de rastreamento de máxima potência pode ser visualizado na Figura 2.6. Essa figura mostra a diferença entre sistemas com e sem a aplicação de uma técnica de rastreamento de máxima potência. A parte hachurada em verde mostra a quantidade de potência a mais que os sistemas com MPPT conseguem obter.

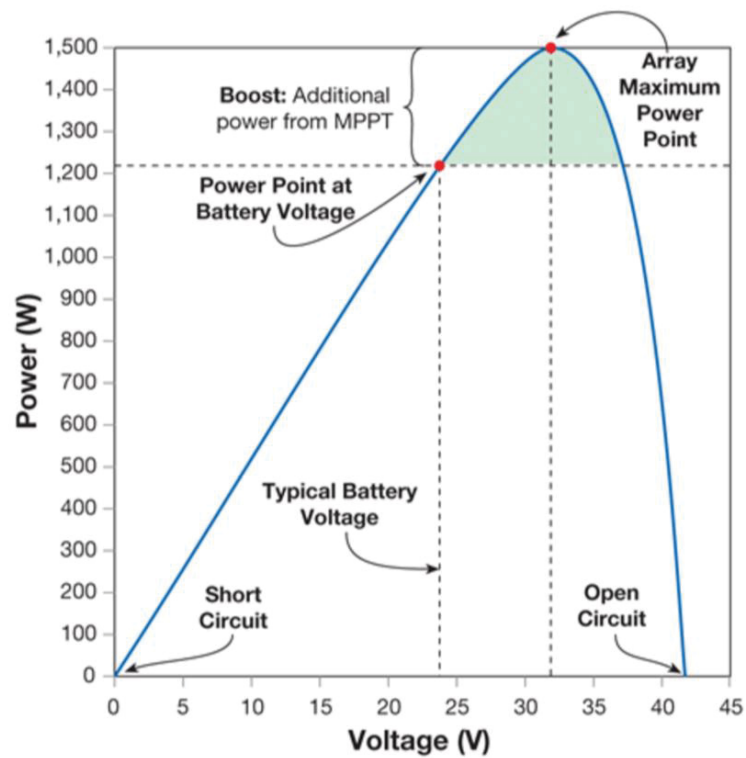


Figure 3-1 - Ponto de Operação com e sem MPPT

A modificação do ponto de operação do sistema é feita aplicando as técnicas de MPPT no controle dos inversores, através da alteração do ciclo de trabalho. Neste projeto foram utilizados dois inversores: SOFAR 7,5kTLM e SOFAR 5kTLM-G2. Na Tabela 3.1 estão apresentadas as informações técnicas de ambos os inversores.

Table 3-1 - Dados técnicos dos inversores

DATASHEET SOFAR	5KTLM-G2	7.5KTLM
Input DC		
Recommended Max. PV input power	6650Wp	9980Wp
Max DC power for single MPPT	3500W	2*2750W/ 2750W
Number of MPP trackers	2	2
Number of DC inputs	1/1	2/1
Max. Input voltage	600V	600V
Start-up voltage	120V	120V
Rated input voltage	360V	360V
MPPT operating voltage range	90-580V	90-580V
Full power MPPT voltage range	230V- 520V	230V-520V
Max. Input current per MPPT	11A/11A	22A/11A
Maximun DC input short circuit current per MPPT	13.2A	26.4/13.2A
Output AC		
Max. AC power	5000W	7500W
Max. Output current	5000VA	7500VA
Nominal grid voltage	22.8A	32.6A
Grid voltage range	L/N/PE, 220Vac, 230Vac, 240Vac	
Nominal frequency	180Vac-276Vac (According to local standard)	
Grid frequency range	50Hz/60Hz	
Active power adjustable range	45Hz-55Hz/54Hz-66Hz (According to local standard)	
Rated power	0~100%	
THDi	<3%	
Power factor	1default (adjustable+/-0.8)	
Power limit export	Zero export or adjustable power limit export	

4. SITUAÇÃO DE INSTALAÇÃO

Para o projeto em referência foram utilizados 42 painéis *Risen RSM72-6-335P*, totalizando uma potência instalada de 12,07kWp. Conforme apresentado na Tabela 1, ambos os inversores possuem dois rastreadores MPPT com duas entradas cada um, sendo que o inversor de 5kW permite uma string por entrada e o de 7kW, duas strings em uma das entradas e uma string na outra. A quantidade máxima de painéis por string, por segurança, foi calculada com base na tensão de circuito aberto dos painéis (tensão máxima) e na tensão máxima para operação no ponto de máxima potência do inversor. Tendo-se:

$$N^{\circ} \text{ máximo de painéis por string} = \frac{V_{inv_{mppt}}}{V_{painel_{oc}}} = \frac{520}{46,5} = 11,16$$

Com isso, em cada string, o número máximo de painéis solares é 11. A organização das strings será feita considerando a área disponível para instalação dos painéis solares, considerando duas águas do telhado da pousada Cristal do Horizonte em Balsa Nova/PR. A Figura 4.1 mostra o telhado com a instalação já concluída.



Figure 4-1 - Organização dos painéis solares

A Figura 4.2 mostra as duas strings do Inversor de 5kW, cada uma com 8 painéis, respeitando o limite calculado para cada circuito. A Figura 4.3 apresenta as 3 strings do inversor de 7,5kW. Neste inversor, duas strings ficaram com 9 painéis e uma com 8. A Tabela 4.1 resume as strings por inversor. Observa-se que os painéis pertencentes a uma mesma string estão virados para uma mesma direção, garantindo que estarão recebendo radiação da maneira mais uniforme possível.

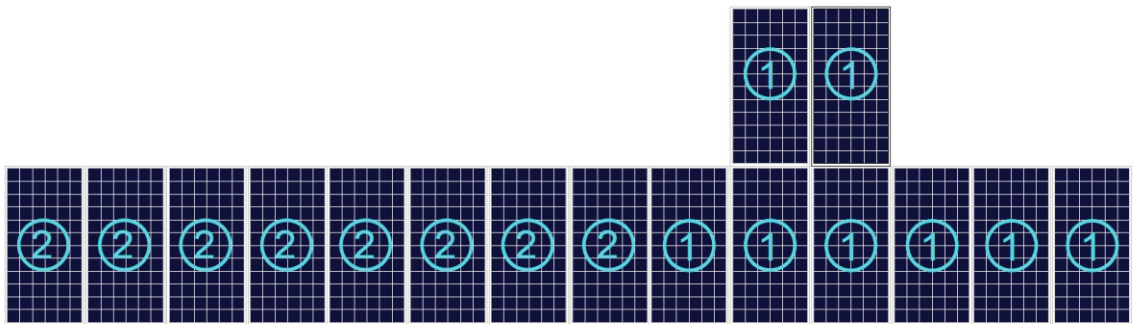


Figure 4-2 - Strings do Inversor de 5kW

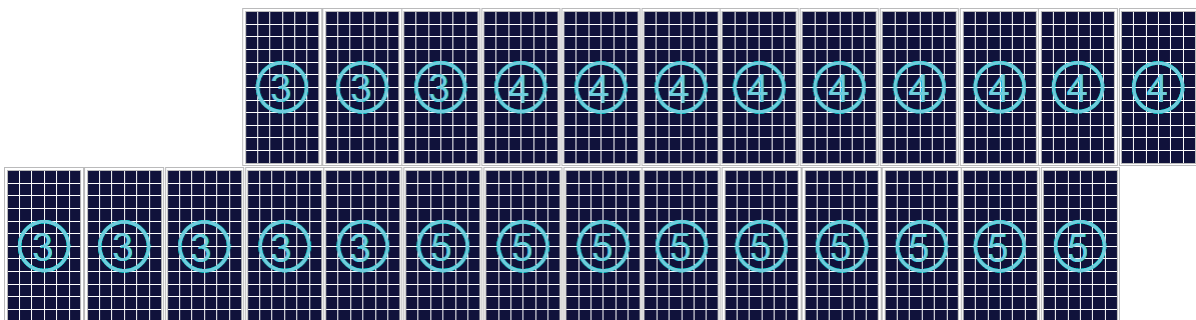


Figure 4-3 - Strings do Inversor de 7.5kW

Tabela 4-1 - Strings por inversor

Nº String	Quantidade de Painéis	Inversor
1	8	5KTLM-G2
2	8	5KTLM-G2
3	8	7.5KTLM
4	9	7.5KTLM
5	9	7.5KTLM

O diagrama unifilar geral elaborado para este estudo está apresentado na Figura 4.2. Destaca-se a presença da string box antes de ambos os inversores. A string box é o componente de proteção contra sobretensão e sobrecorrente do circuito CC e faz a conexão entre os cabos provenientes dos painéis ao inversor. É a string box que permite o seccionamento do circuito CC conforme será apresentado com mais detalhes no diagrama multifilar da Figura 4.6. Essa é uma das exigências de segurança que deve ser garantida para conexão com a rede da COPEL.

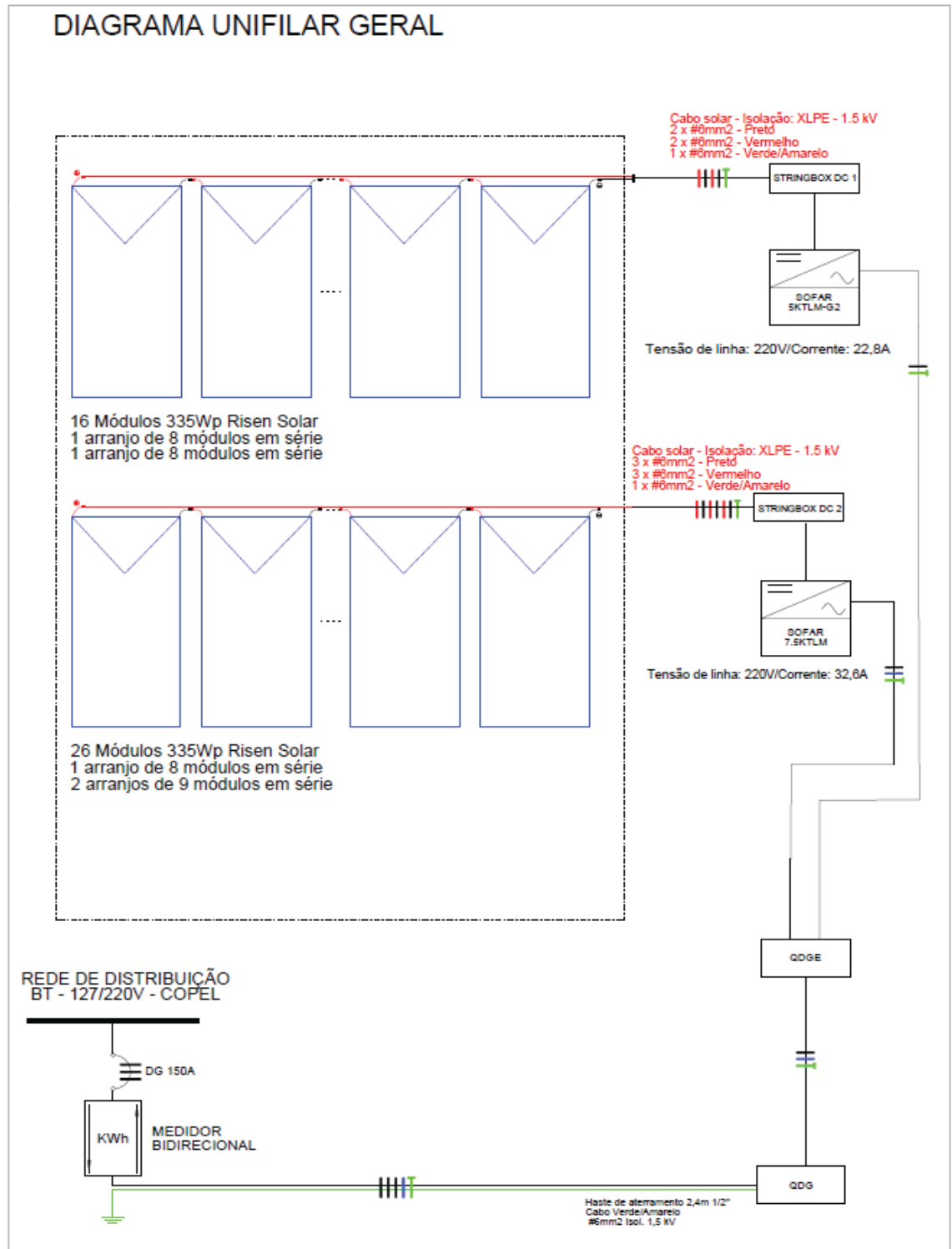


Figure 4-4- Diagrama Unifilar geral

A Figura 4.5 detalha a conexão do ramal de entrada da COPEL com a caixa geral de entrada da pousada. A placa de sinalização indicando a conexão de geração distribuída também é uma exigência de segurança estabelecida pela concessionária.

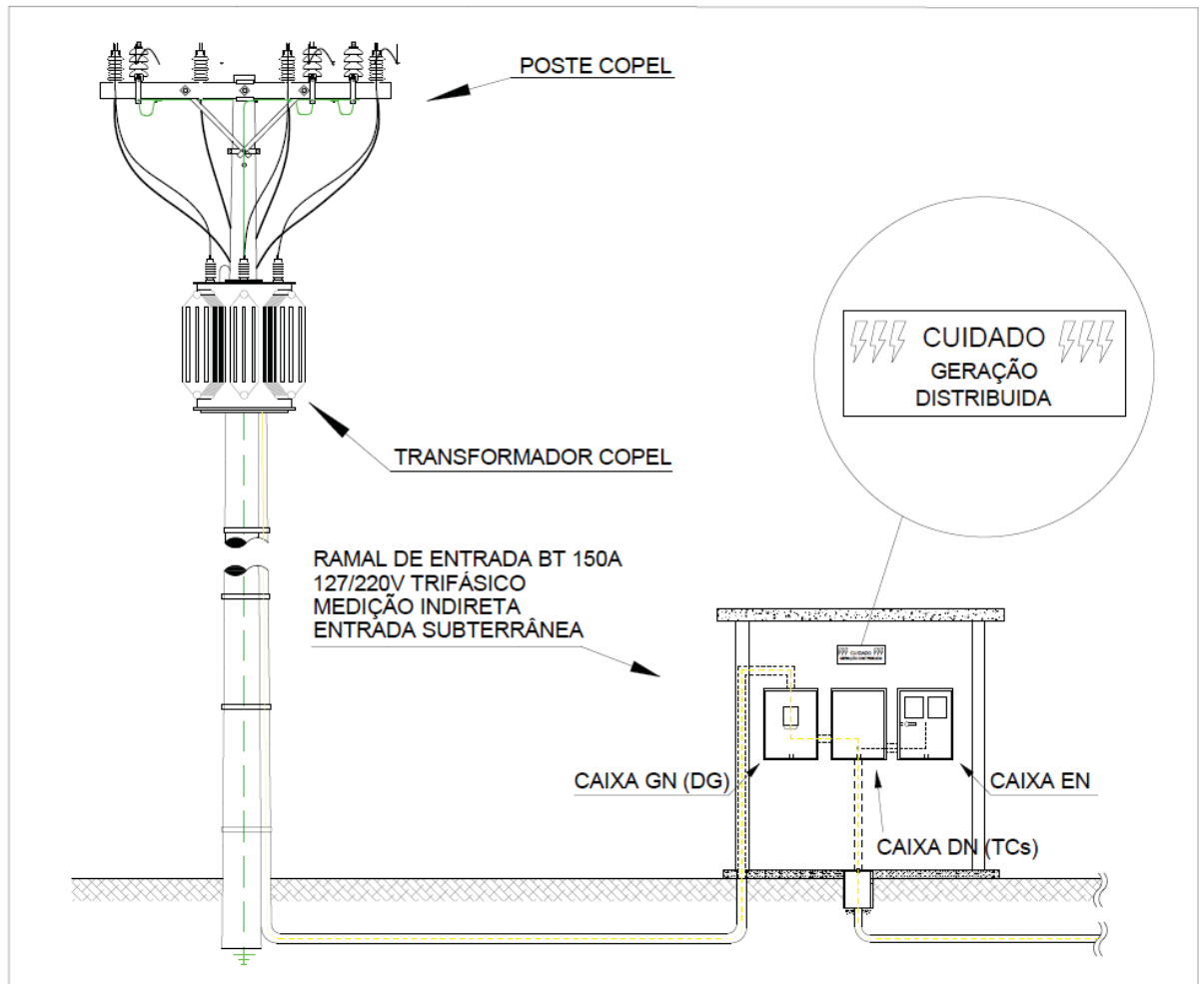


Figure 4-5 - Entrada do ramal da COPEL

As Figuras 4.5 e 4.6 detalham, respectivamente, os diagramas multifilares CC e CA. No diagrama do circuito CC, pode-se observar a presença dos elementos de proteção e separação da rede (DPS e chave seccionara). Observar-se, ainda, que as strings conectadas em cada MPPT estão identificadas pela mesma numeração da Tabela 4.1. Os disjuntores de proteção CA foram escolhidos com base nos valores de mercado para as correntes nominais de saída de cada inversor conforme Tabela 3.1.

DIAGRAMA MULTIFILAR DO CIRCUITO CC

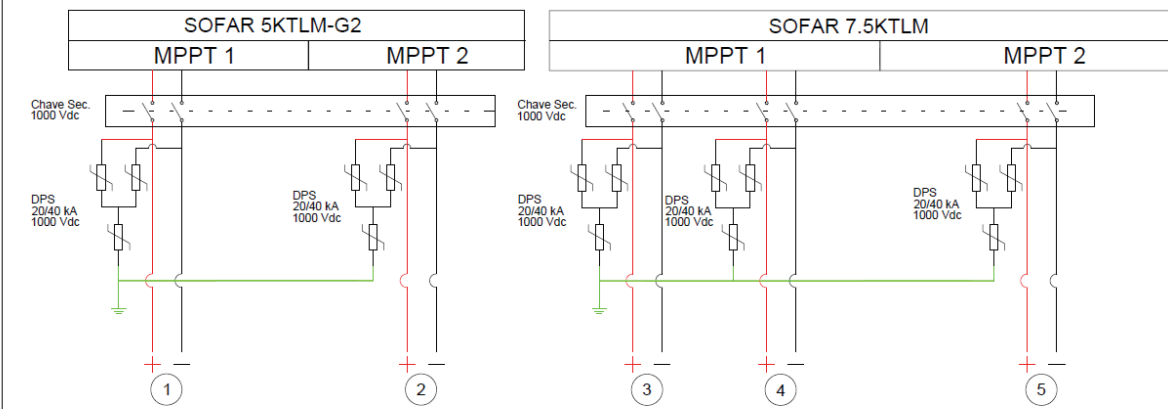


Figure 4-6 - Diagrama multifilar CC

DIAGRAMA MULTIFILAR CA

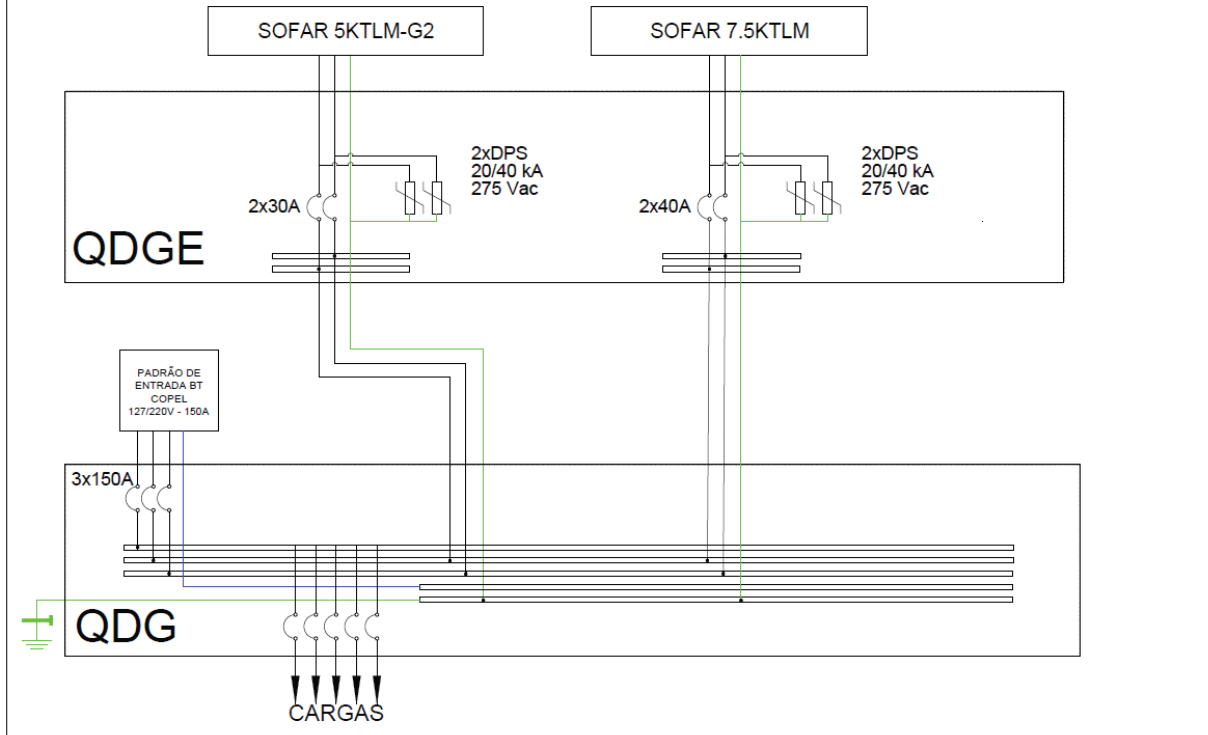


Figure 4-7 - Diagrama multifilar CA

5. EFICIÊNCIA DA INSTALAÇÃO

Sabemos que um painel fotovoltaico sofre ao longo do tempo com diversos fatores do ambiente que afetam sua eficiência podendo estes ser acúmulo de sujeira, riscos, impurezas no vidro, deterioração das células fotovoltaicas pela ação da radiação solar e a temperatura ao redor da placa são os principais “ladrões” de eficiência na transformação da radiação solar em energia elétrica. Para se avaliar a perda de eficiência nesta instalação utilizando-se os dados do *datasheet* e dados de incidência de luz solar, irradiação e temperatura do local aproximado da instalação fornecidos pelo CRESESB e pelo atlas de energia solar do paraná, Ferramenta Interativa Web que foi desenvolvida através de um projeto de P&D proveniente da parceria entre a Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Curitiba (UTFPR-CT), a Itaipu Binacional (Financiadora), o Parque Tecnológico Itaipu (PTI) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).



Figura 5-1 Interface do atlas de energia solar do local estudado

O atlas solar mostra de maneira interativa a região pesquisada e apresenta os dados de irradia o solar ao longo do ano e aplicando em equa es de transferência de calor e massa podemos estimar a perda de eficiência da placa solar ao longo do dia com o seu aquecimento e fluxo de calor.

Abaixo temos os dados elétricos do painel, obtido do *datasheet*, os dados de potência e eficiência de produção de energia elétrica da placa, porém estes dados são obtidos em condições controladas padrão em laboratório, regidas por normas. Porém nas instalações em campo iremos obter dados diferentes de produção de energia, potência e eficiência pelos diversos fatores do ambiente.

ELECTRICAL DATA(STC)					
Model Number	RSM72-6-320P	RSM72-6-325P	RSM72-6-330P	RSM72-6-335P	RSM72-6-340P
Rated Power in Watts-Pmax(Wp)	320	325	330	335	340
Open Circuit Voltage-Voc(V)	45.7	46.0	46.3	46.5	46.8
Short Circuit Current-Isc(A)	9.15	9.20	9.25	9.30	9.35
Maximum Power Voltage-Vmpp(V)	37.3	37.7	38.1	38.4	38.6
Maximum Power Current-Impp(A)	8.60	8.65	8.70	8.75	8.80
Module Efficiency (%)	16.5	16.8	17.1	17.3	17.5

STC: Irradiance 1000 W/m², Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5 according to EN 60904-3.

TEMPERATURE & MAXIMUM RATINGS	
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	45°C±2°C
Temperature Coefficient of Voc	-0.32%/°C
Temperature Coefficient of Isc	0.05%/°C
Temperature Coefficient of Pmax	-0.39%/°C
Operational Temperature	-40~+85°C
Maximum System Voltage	1000VDC
Max Series Fuse Rating	15A
Limiting Reverse Current	15A

Figura 5-2- Informações de temperatura de operação e eficiência do painel solar

Segundo o *datasheet* da *Risen RSM72-6-335P*, o valor de eficiência do painel varia de acordo com a temperatura de operação, na ordem de redução de 0,39% para cada 1 °C de temperatura acima da temperatura de 25°C na célula, controlada em laboratório.

Abaixo temos um diagrama que representa como ocorrem as trocas de calor tanto na parte superior da placa solar, quanto na parte inferior, entender como ocorre essa transferência de calor é essencial para se calcular a temperatura da célula.

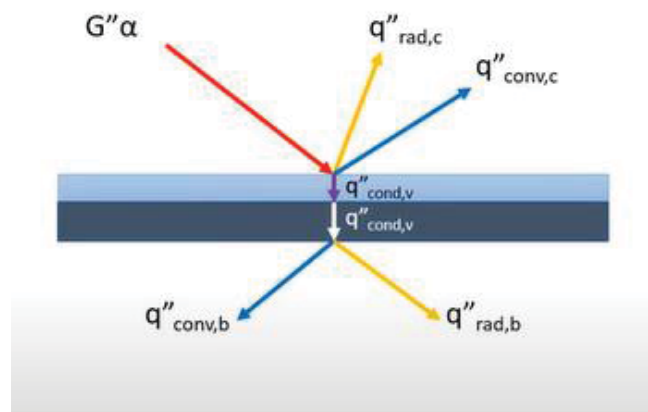


Figura 5-3 Modelo de troca de calor de uma placa solar

Na imagem acima temos a representação da placa solar, sendo composta por uma camada de vidro, representado pela parte azul claro e uma camada com as células fotovoltaicas, representado pelo cinza escuro. Na representação, no vidro chega a radiação solar, representado pela seta vermelha, calor de radiação e convecção saem da placa de vidro, representado pelas setas amarela e azul, entre o vidro e as células fotovoltaicas ocorre a troca de calor através de condução, representada pela seta cinza e pela seta branca através das células fotovoltaicas, e destas pela parte de baixo da placa ocorre a troca de calor com o ambiente através de convecção e radiação, podemos assim modelar as equações de troca de calor necessárias para se obter os valores de temperatura nas células. Para este equacionamento teremos as seguintes equações de balanço de energia nas superfícies 1, interface ar-vidro, superfície 2, interface vidro-placa e superfície 3 interface células-ar. Como mostrados nas equações a seguir

$$G''\alpha + \varepsilon_c \sigma (T_{viz,c}^4 - T_1^4) + h_c (T_\infty - T_1) + \frac{k_v (T_2 - T_1)}{\Delta x_v} = 0$$

$$\frac{k_v (T_1 - T_2)}{\Delta x_v} + \frac{k_v (T_3 - T_2)}{\Delta x_p} = 0$$

$$\frac{k_v (T_2 - T_3)}{\Delta x_p} + \varepsilon_b \sigma (T_{viz,b}^4 - T_3^4) + h_b (T_\infty - T_3) = 0$$

Inicialmente, utilizando-se as coordenadas da pousada, obteve-se os dados de irradiação média diária no local, e apresentados na tabela abaixo:

Localização Geográfica	
Latitude	- 25.527375446627047°
Longitude	- 49.77462152684479°
Município	Balsa Nova
Mesorregião	METROPOLITANA DE CURITIBA

Tabela 5-1 Tabela com dados da pousada

Aplicando-se esses dados no site do atlas solar do paraná, iremos obter os dados de irradiação média diária, divididas por mês, conforme tabela abaixo:

Irradiação Global Horizontal (kWh/m². dia)	
Janeiro	5.45
Fevereiro	5.22
Março	4.64
Abril	3.84
Mai	3.08
Junho	2.78
Julho	2.97
Agosto	3.96
Setembro	3.98
Outubro	4.60
Novembro	5.38
Dezembro	5.70
Média Anual	4,30

Tabela 5-2 Valores de irradiação média diária por mês

Assim podemos obter dados suficientes para aplicar nas equações de transferência de calor para obtermos dados de eficiência da placa, utilizando-se

também o datasheet dos painéis, podemos ter uma maior fidelidade na quantificação da produção de energia desta instalação através do programa criado em EES, *Engineering Equation Solver*, podendo-se estimar assim a quantidade de energia gerada ao longo do tempo de maneira mais precisa, evitando falsas expectativas na instalação e um melhor cálculo de custo/benefício e tempo de *payback* da instalação em questão.

Abaixo podemos observar os resultados do cálculo de eficiência média diária, potência média gerada diária, quantidade de placas necessárias para suprir o consumo da pousada baseados na temperatura no painel (T_2)

Unit Settings: SI K kPa J mass deg

$\alpha = 0,86$ [-]	$\alpha_v = 0,035$ [-]	aret = 90 [deg]
$\beta_c = 0,00327$ [1/K]	Consumo _{dia} = 55,37 [kW-h]	Consumo _{mes} = 1661 [kW-h]
Dias _{mes} = 30 [-]	$\varepsilon = 0,9$ [-]	$\varepsilon_v = 0,3$ [-]
$G'' = 358,3$ [W/m ²]	$G_{dprime,l} = 1000$ [W/m ²]	$h_b = 1,533$ [W/m ² -K]
$k_v = 1,4$ [W/m-K]	lat = 25 [deg]	LC = -0,08021 [-]
$v_{ar} = 0,00001688$ [m ² /s]	$n_p = 41,79$ [-]	P = 5,896 [m]
$Ra_c = 3,129E+07$ [-]	RC = 0,9198 [-]	$\rho_{ar} = 1,081$ [kg/m ³]
$TC_2 = 45,57$ [C]	$TC_3 = 44,66$ [C]	tempo = 12 [h]
$T_3 = 317,8$ [K]	$T_{calc} = 20,57$ [K]	$T_\infty = 293,2$ [K]
$\dot{W}_{nom} = 335$ [W]	$W_p = 0,992$ [m]	
$A_s = 1,94$ [m ²]	$A_{total} = 81,08$ [m ²]	$\beta_b = 0,003274$ [1/K]
$C_{Temp} = -0,0039$ [1/K]	$\Delta x_p = 0,04$ [m]	$\Delta x_v = 0,004$ [m]
$\eta = 0,1588$ [-]	$g = 9,807$ [m/s ²]	Geracao _{1p} = 1,325 [kW-h]
$h_c = 2,407$ [W/m ² -K]	$k_{ar} = 0,02514$ [W/m-K]	$k_p = 8$ [W/m-K]
$L_c = 0,3291$ [m]	$L_p = 1,956$ [m]	$\mu_{ar} = 0,00001825$ [Pa-s]
$Pr_{ar} = 0,7293$ [-]	$p_{atm} = 91$ [kPa]	$Ra_b = 3,053E+07$ [-]
$\sigma = 5,670E-08$ [W/m ² -K ⁴]	$\tau_v = 0,9$ [-]	$TC_1 = 45,29$ [C]
$\theta = 65$ [deg]	$T_1 = 318,4$ [K]	$T_2 = 318,7$ [K]
$T_{ref} = 298,2$ [K]	$T_{viz} = 293,2$ [K]	$\dot{W} = 110,4$ [W]

Figura 5-4 - Retorno de cálculos realizados pelo EES

Através do programa criado no software EES e adaptado para o caso estudado, obteve-se a modelagem para se calcular a temperatura da célula fotovoltaica do painel através de equações termodinâmicas e modelagem de troca de calor no painel, tanto com o ambiente quanto entre os componentes da própria placa. A temperatura $T_2 =$

318,7K é a temperatura média da placa ao longo do dia, ou seja durante a produção de energia, é uma temperatura significativamente mais alta que a temperatura de referência $T_{ref} = 298,2K$, ou temperatura na qual as células fotovoltaicas se encontram nos testes de laboratório, que ao se aplicar à relação de redução de eficiência da placa, que é de $C_{temp} = -0,39\%$ para cada 1°C, pode-se encontrar a eficiência média da instalação, que para o caso dos painéis *Risen RSM72-6-335P* instalados nessa pousada, a eficiência da placa anunciada é de 17,3%, quando na realidade sua eficiência média encontrada através dos cálculos é de $\eta = 15,3\%$.

Através do programa, também foi calculada a geração diária de um painel $Geração_{1p} = 1,325 kWh$ e com isso a quantidade de placas necessárias para suprir a demanda energética da pousada, com dados de produção, dados de radiação solar no local e cálculos de eficiência e troca de calor, sendo assim, obteve-se a quantia de aproximadamente $n_p = 42$ painéis, mostrando que a instalação acima está adequada para atender às demandas energéticas da propriedade.

6. EFICIÊNCIA DA INSTALAÇÃO

Os inversores atuais vem dotados de conexão à internet, realizam as medições de produção de energia e potência gerada em tempo real além permitirem a transmissão destes dados em tempo real para os proprietários e equipe de manutenção dos equipamentos, permitindo assim um maior controle de produção, possibilitando ajustes em tempo real e solução de problemas de maneira rápida e com o mínimo de prejuízo possível.

Através de acesso aos aplicativos de gestão da produção desta instalação, diretamente ligados ao inversor, como podemos ver nas imagens abaixo podemos comparar as medições realizadas a partir do mês de fevereiro de 2020, quando foi iniciado as medições, até o momento e podemos comparar a produção entre os meses de março, abril, e junho de 2020 com os mesmos meses de 2021.

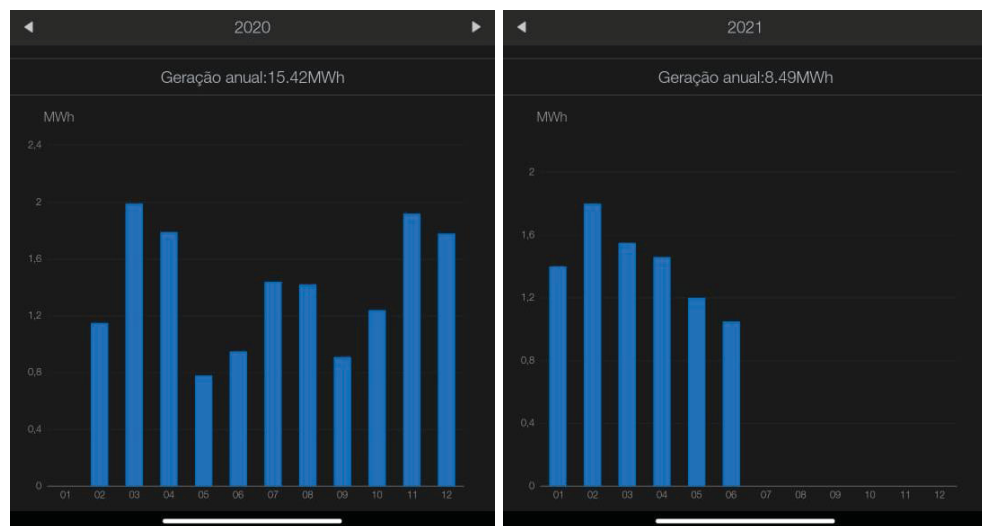


Figura 6-1 Gráficos de produção de energia mensal fornecidos pelo proprietário

Pelos dados apresentados acima temos que para o ano de 2020 teve-se alguns problemas de medição e produção vê-se claramente pelo formato do gráfico de produção que houve algumas irregularidades, diferentemente do gráfico de 2021 que apresenta o formato de produção condizente com a realidade da irradiação solar na região.



Figura 6-2 - Painel do aplicativo com dados de geração

Segundo o aplicativo a geração média diária da planta está em 62,26 kWh e segundo os cálculos realizados através do programa em EES o valor médio diário de produção é de 55,65 kWh, essa divergência é grande devido a falta de ciclos anuais de registro de produção de energia, não permitindo fazermos uma análise completa comparando a produção real com a esperada pelos cálculos.

Apesar da falta de precisão para compararmos os dados de produção real com a produção esperada, podemos verificar que os dados não estão tão distantes do esperado além de atenderem as demandas da fazenda.

Sabemos que um painel fotovoltaico sofre ao longo do tempo com diversos fatores do ambiente que afetam sua eficiência podendo estes ser acúmulo de sujeira, riscos, impurezas no vidro, deterioração das células fotovoltaicas pela ação da radiação solar e a temperatura ao redor da placa são os principais “ladrões” de eficiência na transformação da radiação solar em energia elétrica. Para se avaliar a perda de eficiência nesta instalação utilizando-se os dados do *datasheet* e dados de incidência de luz solar, irradiação e temperatura

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Site Aneel – Geração distribuída. Disponível em:
<<https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>>. Acesso em: 15/06/2021
- [2] Mapa Interativo do atlas solar do paran a
<<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiazJiM4NjM0OWYtN2lwZS00YjViLTlIMjltN2E5MzBkN2ZiMzVklwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>>. Acesso em 15/06/2021
- [3] Blog Eletr nica de Potência – Célula fotovoltaica
<<https://eletronicadepotencia.com/celula-fotovoltaica/>>. Acesso 15/06/2021
- [4] <https://www.researchgate.net/figure/MPPT-vs-Non-MPPT-Homepowercom-2017_fig2_319999125>. Acesso 15/06/2021
- [5] Atlas Solar do Paran a <<https://atlassolarparana.com/map>>. Acesso 18/06/2021
- [6] Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito / CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica <<http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acesso 16/06/2021
- [7] Aula do Prof. Christian Scapulatempo Strobel, Ph.D.
<https://www.youtube.com/watch?v=JuTTYA2ZsrA>> .Acesso 21/06/2021