USINAS FOTOVOLTAICAS DE MINIGERAÇÃO ON-GRID EM ÁREAS RURAIS: CONCEITOS E ESPECIFICAÇÕES

André Costa da Silva[1], Pedro Henrique Aquino Barra[1], Fabiana Florian[1]

[1]*Universidade de Araraquara, Araraquara, Brasil (andrecdsilva@uniara.edu.br)*

Resumo: Este artigo tem por objetivo apresentar informações conceituais e de especificação associadas à implantação de sistemas fotovoltaicos *on-grid* em áreas rurais. Dessa forma, aspectos relevantes são elucidados desde a escolha dos módulos fotovoltaicos (FV), configurações de inversores, até a conexão com a rede da concessionária, sempre com vistas às normas regulamentadoras vigentes e limites de segurança. As informações apresentadas neste artigo podem ser úteis para estudos futuros nesta área.

Palavras-chave: energias renováveis; geração de energia; sistemas fotovoltaicos; sistemas on-grid; usinas fotovoltaicas.

INTRODUÇÃO

Diante da necessidade de minimizar impactos prejudiciais ao meio ambiente e também de diversificar as fontes de geração de energia, a geração fotovoltaica (FV) tem ganhando grande espaço nos últimos anos. A FV produz energia elétrica de uma forma bem natural, sem emissão de resíduos ou gases poluentes, e possibilita a geração da energia nos próprios pontos de consumo, quer sejam esses pontos residenciais, comerciais, industriais, ou mesmo em áreas rurais (WEG, 2019).

Em abril de 2012 ocorreu um grande avanço no setor de geração de energia elétrica no Brasil por intermédio da Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que permitiu ao consumidor brasileiro gerar sua própria energia elétrica através de fontes renováveis ou cogerações qualificadas. Com essas diretrizes, foi e é possível fornecer o excedente de produção diretamente para a rede de distribuição de sua localidade. Estes conceitos são definidos como microgeração e minigeração distribuída de energia elétrica, amplamente abordados na Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL.

A partir da resolução normativa supracitada, a geração de energia por meio de sistemas FVs teve um aumento considerável nos anos subsequentes, impulsionadas por programas de incentivo e por ações regulatórias, tal como a que estabelece a possibilidade de compensação de energia excedente produzida por sistemas de pequeno porte. De modo a consubstanciar esta informação, pode-se citar o Balanço Energético Nacional do ano de 2020, cujo ano base foi de 2019, onde um destaque é dado para a evolução da potência instalada da energia solar, que de 1798 MW em 2018 passou a ser 2473 MW em 2019 (EPE, 2020).

Existem diversos meios de geração de energia elétrica (solar, eólica, gás natural, térmica e nuclear), mas alguns meios se destacam por seu custo benefício (ABDALA, 2019), e dentre eles se destacam os sistemas FVs, sobremaneira para áreas rurais. Nesses locais, existe um gradativo aumento no consumo de energia elétrica por parte de maquinários, irrigações, bem como o próprio crescimento natural do agronegócio. Esses fatores têm impulsionado os proprietários deste segmento a investirem em sistemas FVs para suprir seu alto consumo de energia elétrica e baratear os custos de produção de seus produtos (PLANT PROJECT, 2019).

Além dos benéficos do sistema FV em relação ao meio ambiente e ao bom retorno dos investimentos que caminha em paralelo com a baixa manutenção segundo o (ABDALA, 2019) alguns benefícios também podem ser citados sob a perspectiva das concessionárias, tais como o adiamento de investimentos em sistemas de transmissão e distribuição, redução no carregamento das redes e a minimização das perdas. Complementarmente, tem-se como resultado uma maior diversificação da matriz energética do país abordados na Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL.

Diante do contexto apresentado, este artigo tem por objetivo estudar os meios utilizados para a

implementação de um sistema fotovoltaico em áreas rurais e mostrar benefícios dos investimentos em usinas fotovoltaicas de minigeração própria, compreendendo a conexão e uso, ao sistema de distribuição, definindo critérios técnicos e operacionais de acordo com a ANEEL Resolução Normativa nº 724/2016. Para tanto, apresenta-se um estudo de caso de implantação uma usina FV de 570,24 kWp conectada à média tensão, recentemente implantada em uma área rural.

MATERIAL E MÉTODOS

Neste estudo, o sistema FV foi dimensionado para uma geração média de 68.112 kWh/mês. Ressalta-se que com esta média de geração, torna-se possível suprir totalmente os gastos de irrigação e maquinários desta área rural.

A área de estudo fica localizada na região de Dobrada – SP, cidade do interior que conta com aproximadamente 9.010 habitantes segundo os dados do IBGE (2020). O clima desta região é subtropical e apresenta uma média de irradiação solar de 5,30 kWh/m² dia, em conformidade com a Figura 1 (CRESESB, 2020). A área utilizada para instalação do sistema FV é de 10.000 m², e pode ser vista na Figura 2, que também já apresenta o sistema FV em sua fase final.

Utilizando os dados coletados da área disponível, é possível realizar a instalação de um sistema FV de 570,24 kWp de potência, utilizando 1.584 módulos de 360W de potência nominal. De modo a melhor distribuir os arranjos deste sistema, é previsto a utilização de 4 unidades de inversores solar FV de 120 kW de potência nominal, com capacidade de sobrecarga de 22,3% de potência, contando também com 6 MPPTs (Maximum Power Point Tracking) e 4 arranjos por MPPT.

Os inversores solares FV são componentes que dependem tanto da corrente contínua (CC) fornecida pelos módulos FV tanto da corrente alternada (CA) fornecida pela rede da concessionaria de energia. Basicamente, são responsáveis pela conversão da energia produzida pelos módulos FV em CC para CA, possibilitando o uso da energia gerada. Para a fixação dos módulos fotovoltaicos é utilizado uma estrutura do tipo solo feita em aço galvanizado a fogo com regulagem de inclinações, neste caso de 20 graus.

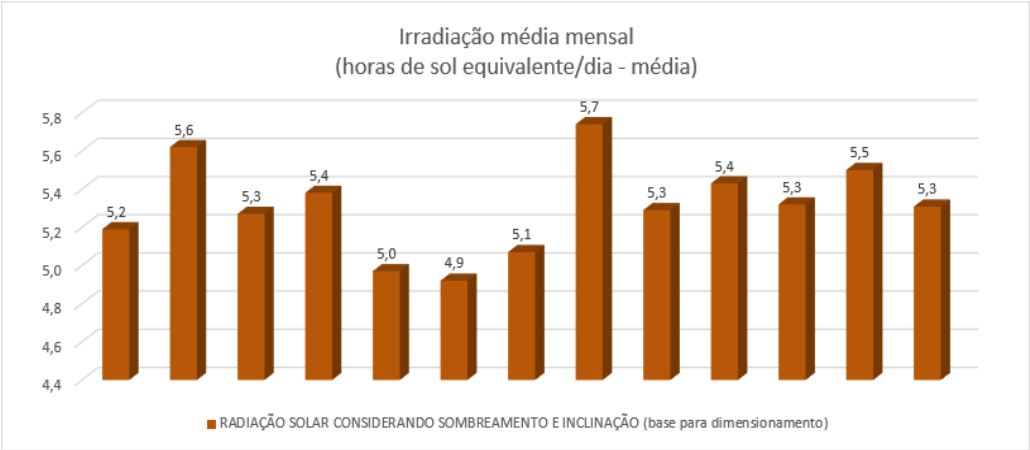

Figura 1. Gráfico de irradiação solar para a área analisada. Fonte: CRESESB.



Figura 2. Área de instalação na região rural do sistema FV de 570,24 kWp. Fonte: Autor.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando módulos FV de 360 W de potência nominal e os dados obtidos pelo CRESESB (2020) ilustrados na Figura 1, torna-se possível estimar a energia gerada por cada módulo. Este cálculo é apresentado na Equação (1), onde a energia gerada pelo módulo depende da irradiação média, potência do módulo e sua eficiência.

$$E_M = P_M \times I_{rr} \times \eta_M \quad (1)$$

Em que: E_M é a energia gerada pelo módulo, P_M é a potência do módulo, I_{rr} é a irradiação média, e η_M é a eficiência do módulo. Para o presente estudo de caso, considerando os valores apresentados na seção anterior e o período de um mês (30 dias), a energia gerada por cada módulo pode ser estimada da seguinte maneira:

$$E_m = 30 \times [360 \times 5{,}3 \times 0{,}75] = 43 kWh/mês \quad (2)$$

Logo, torna-se possível estimar a energia mensal gerada para uma quantidade de módulos FV utilizados:

$$E_t = n_{módulos} \times E_M \quad (3)$$

Em que: E_t é a energia total gerada e $n_{módulos}$ é a quantidade total de módulos FV utilizados. Para o presente projeto, conforme destacado na seção anterior, foram utilizados 1.584 módulos. Dessa forma, a energia total gerada pelo sistema FV é:

$$E_t = 1584 \times 43 = 68.112\ kWh/mês \quad (3)$$

Portanto, trata-se de um sistema FV que possui a capacidade de geração de 68.112 kWh/mês a partir de uma potência instalada de 570,25 kWp. Torna-se então necessário obter informações associadas aos dispositivos deste sistema FV, descritos na sequência.

A Tabela 1 apresenta as principais especificações obtidas no *datasheet* do inversor solar FV escolhido para o projeto. Trata-se do inversor solar FV PVS – 120 – TL – SX2. Nesta tabela é possível verificar informações como a tensão CC de entrada, número de MPPTs independentes, correntes máximas e tensão de saída CA.

Tabela 1. Dados técnicos do inversor solar FV.

Fonte: ABB (2021).

PVS – 120 - TL	
Entrada lateral	
Tensão de entrada CC (V de partida)	1.000V
Intervalo de tensão de entrada CC operacional (Vccmin...Vccmax)	1.000V
Número de MPPTs independentes	6
Número de pares de entrada CC para cada MPPT	4
Corrente máxima de entrada CC para cada MPPT (Iccmax)	36A
Corrente máxima de curto-circuito (Iscmax) na entrada para cada MPPT	50A
Saída lateral	
Tensão da rede CA nominal (Vac,r)	480V
Corrente máxima de saída CA (Ica, max)	145A
Frequência nominal de saída (fr)	60Hz

Na Tabela 2 é possível verificar as principais informações dos módulos FV escolhidos, da AMERISOLAR / AS-6M 360. Além da potência nominal, outros parâmetros elétricos intrínsecos ao módulo FV são apresentados.

Tabela 2. Dados técnicos do módulo FV.

Fonte: Amerisolar (2021).

AMERISOLAR / AS-6M 360	
Potência Nominal (W)	360
Tensão de Circuito Aberto – Voc (V)	47,6
Corrente de Curto Circuito – Isc (A)	9,71
Tensão Máxima Potência – Vmp (V)	39
Corrente de Máxima Potência (A)	9,24
Coeficiente de Temperatura – Voc (V / °C)	-0,14
Coeficiente de Temperatura – Isc (mA / °C)	5,05

A partir das informações técnicas dos módulos FV e dos inversores, torna-se possível escolher à configuração de MPPTs e *strings*. Para tanto, a ferramenta "Fimer Stringsizer" foi empregada. Por limitações de espaço, o resultado gerado pelo *software* referido é apresentação na seção de Anexo.

De acordo com a primeira lei de Kirchhoff, no circuito em série, a corrente que passa pelo condutor será a mesma em qualquer ponto. Disso, tem-se que a

ligação dos módulos FV nas *strings* deve ser realizada em série. Com vistas à segunda lei de Kirchhoff, apenas a tensão é somada, seguindo a lógica mencionada. Desse modo, ao conectar as *strings* nas MPPTs do inversor solar FV, se torna necessário seguir ambas as leis de Kirchhoff, onde a ligação desta vez é em paralelo internamente no equipamento, visando manter o mesmo valor de tensão e realizar a somatória das correntes (PINHO e GALDINO, 2014, p.123). Uma ilustração visual acerca da ligação dos arranjos é apresentada na Figura 3.

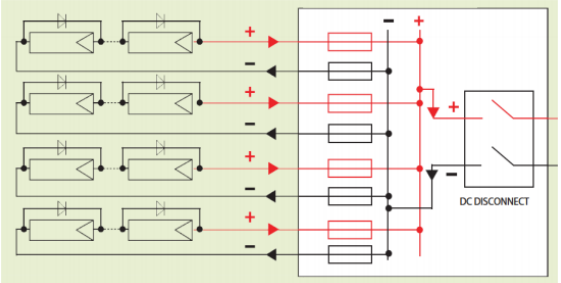

Figura 3. Exemplo de Ligação.

Fonte: Cooper-Bussmann (2021).

Note então que de acordo com as leis de Kirchhoff, em caso de ligações em série, as tensões e correntes comportam-se como indicado nas Equações (4) e (5).

$$V = V_1 + V_2 + \cdots + V_n \quad (4)$$

$$I = I_1 = I_2 \ldots = I_n \quad (5)$$

Em que: V e I são as tensões e correntes nos arranjos. Por fim, observe que em caso de ligações em paralelo, este comportamento se inverte e as tensões e correntes passam a se comportar em consonância com as Equações (6) e (7).

$$V = V_1 = V_2 \ldots = V_n \quad (6)$$

$$I = I_1 + I_2 + \cdots + I_n \quad (7)$$

Com as configurações e conexões da parte CC finalizadas, é possível realizar os procedimentos da parte CA dos sistemas FV, onde um quadro geral é dimensionado para realizar a proteção da parte CA. Vale destacar que a parte CC não necessita da proteção com *strings box*, pois o próprio inversor solar conta com chaves seccionadoras e componentes de proteção para a parte CC.

De acordo com o projeto da concessionária de energia, algumas medidas para o acesso devem ser tomadas. Ressalta-se que cada distribuidora pode possuir procedimentos diferentes para este fim, e que no caso apresentado a concessionária foi a CPFL. Para realizar a conexão com a rede de energia elétrica é necessário ter uma proteção em média tensão (classe de 15kV), onde é seguido o memorial descritivo com os requisitos mínimos exigidos pela norma técnica da CPFL GED nº 15303, Conexão de Micro e Minigeração Distribuída sob Sistema de Compensação de Energia Elétrica e com base na ANEEL Resolução Normativa nº 724/2016, e devem atender os procedimentos de distribuição (PRODIST), Módulo 3.

O sistema de proteção, conforme diagrama funcional descrito pela concessionaria de energia deve apresentar:

- Transformador de Potencial (TP): Sensor de tensão, uso interno classe 15 KV, de relação 13,8 kV/220 V – 500 VA (x3).
- No-break p/ alimentação auxiliar do relé PEXTRON – URP 6000 (entradas A1 e A2).
- Transformador de Corrente (TC): Sensor de corrente, uso interno classe 15 kV – Ip/Is = 150/5, classe de exatidão 10B/100.
- Relé de proteção microprocessado: URP 6000 Multifunção com sincronismo, salto vetorial, oscilografia e perfil de carga - recomendado para geração distribuída.
- Disjuntor geral de entrada: Tripolar, 630 A – 17,5 kV, capacidade mínima de interrupção simétrica 250 MVA – 16 kA - NBI 95 kV, frequência 60 Hz e sem religamento automático.

Seguindo o memorial descritivo, torna-se necessário ainda o emprego de um transformador de potência trifásico a seco de 750 kVA com tensão primária de 13,8 kV e secundária com 480 V (tensão nominal dos inversores FV), considerando ainda que a demanda de ponta e fora ponta contratada é de 480kW. A partir das informações apresentadas, torna-se possível especificar os elementos do quadro geral de proteção.

Para a parte de alimentação foi utilizado para a proteção um disjuntor de 630 A, tornando possível utilizar dois condutores de 185 mm² por fase (Figura 4). Para a parte de proteção dos inversores solar FV, foram utilizadas quatro unidades de disjuntores de 150 A, utilizando dois condutores de 95 mm² por fase (Figura 5).

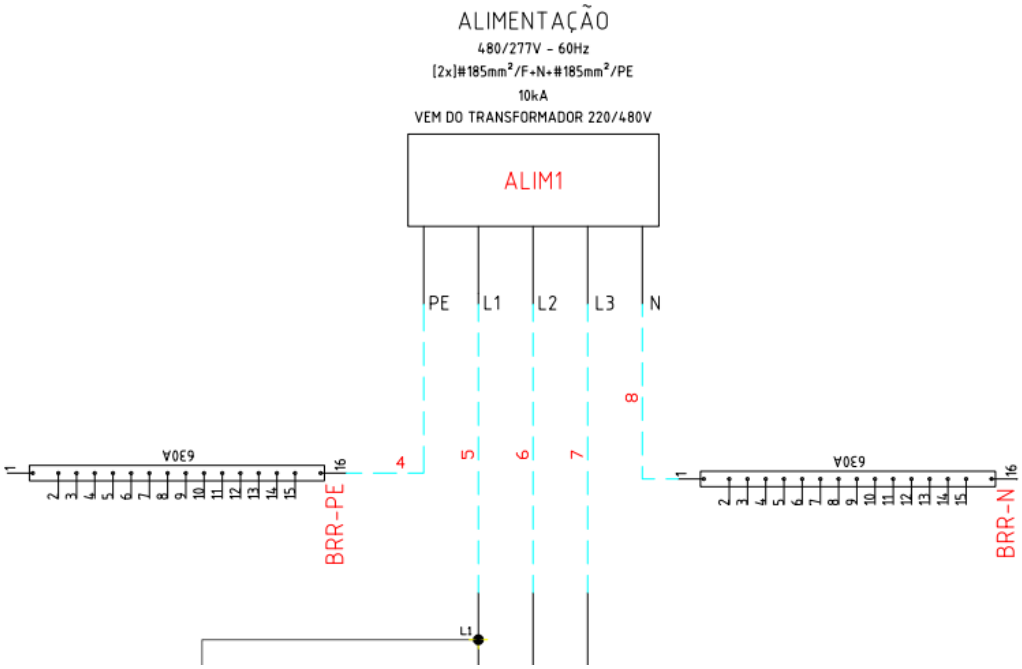

Figura 4. Diagrama unifilar do quadro geral parte 1. Fonte: Autor.

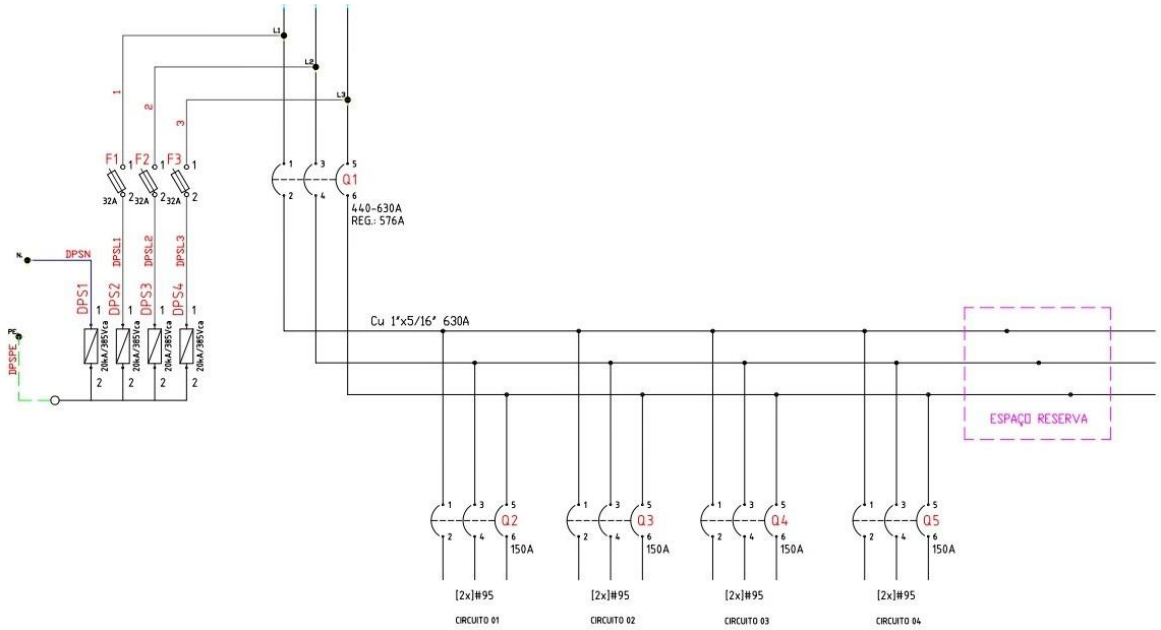

Figura 5. Diagrama unifilar do quadro geral parte 2. Fonte: Autor.

Vale destacar que a especificação do disjuntor de 630 A considerou-se a potência total dos quatro inversores (4 inversores de 120 kW). Logo, a corrente nominal do disjuntor deveria ser maior que:

$$I_n = \frac{480 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 480} = 578\ A \qquad (8)$$

Alternativamente, para a especificação dos disjuntores que fazem a proteção de cada circuito de inversor, a corrente nominal do disjuntor que foi escolhida como sendo 150 A deveria ser maior que:

$$I_n = \frac{120 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 480} = 144{,}57\ A \qquad (9)$$

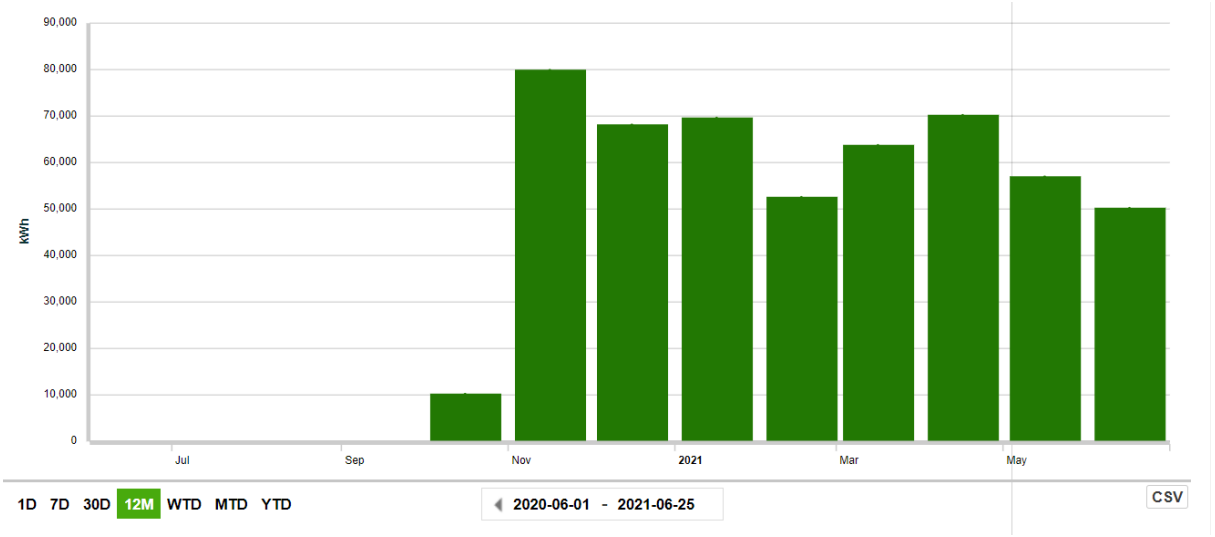

Figura 6. Gráfico de produção anual. Fonte: Aurora Vision.

Para fins de monitoramento/acompanhamento do sistema FV implantado, o site de monitoramento Aurora Vision é empregado, onde é possível obter gráficos de produção diários, mensais e anuais. Na Figura 6 é possível visualizar os dados de geração do sistema.

CONCLUSÃO

Este artigo apresentou aspectos associados à especificação de sistemas FV para áreas rurais conectados em média tensão. Informações relevantes foram mostradas desde a parte dos módulos FV até a parte de conexão com a rede CA de concessionária e monitoramento da produção de energia. Vale destacar que diferentemente de muitos artigos existentes, onde se tem como foco a especificação de sistemas FV para unidades consumidoras residenciais, este artigo teve como foco um sistema FV para áreas rurais com uma potência mais elevada e conexão em média tensão. Diante da escassez de trabalhos com esta vertente, acredita-se que o conteúdo apresentado pode ser de grande importância para a área, que apresenta constante desenvolvimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus por ter me orientado em todos os momentos da minha vida, me mantendo sempre na trilha correta.

Sou grato pela minha família que sempre me tem dado apoio nos momentos mais difíceis.

Agradeço a minha namorada que sempre esteve ao meu lado durante meu percurso acadêmico.

Sou grato pelas orientações e confianças depositada na minha proposta de projeto pelo meu professor, Pedro Henrique Aquino Barra, orientador do meu trabalho. Obrigado por me manter sempre motivado durante todo o processo.

REFERÊNCIAS

ABDALA, Paulo Jayme Pereira Abdala. “Energia Solar e Eólica 2”. (Paulo Jayme Pereira Abdala). Atena Editora, Ponta Grossa, 2019.

ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA). Resolução Normativa nº 482, de abril de 2012, 2012.

ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA). Resolução Normativa nº 724/2016 de Maio de 2016, 2016.

ABB (Asea Brown Boveri). “Inversores de linha ABB PVS-100/120-TL”. Disponível em: <https://new.abb.com/products/6AGC069647/3p909901000a>. Acesso em: 24/06/2021.

Amerisolar. “AS-6M Module Monocrystalline Specification”. Disponível em: http://www.weamerisolar.com/d/file/english/product/pro1/2021/06-25/60683129ce405016d1bb6af37b845120.pdf. Aceso em: 24/06/2021.

Bussmann series fuses photovoltaic application guide.” Complete and reliable solar fusible circuit protection”. Disponível em: <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/electrical-circuit-protection/bussmann-iec-high-speed-semi-conductors-fuses/bussmann-iec-photovoltaic-high-speed-fuses/eaton-bussmann-series-photovoltaic-fuses-catalogue-ca135004en.pdf >. Acesso em: 27/06/219.

CPFL (COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ). Norma Técnica GED-15303 de ezembro de 2020, 2020.

EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA). “Balanço Energético Nacional”, ano base 2019, 2020.

Evanildo da Silveira. “Cada Fazenda é Uma Usina”. Plant Project, edição 17, 2019. Disponível em: <http://plantproject.com.br/novo/2019/11/agribusiness-17-energia-cada-fazenda-e-uma-usina/>. Acesso em: 14 de abril de 2021.

Museu Weg de Ciência e Tecnologia. “Benefícios da Energia Solar”. (Museu WEG), 2019. Disponível em: <https://museuweg.net/blog/os-beneficios-da-energia-solar/>. Acesso em: 15/06/2021

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. “Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos”. (PINHO, J. T.; GALDINO, M. A). CEPEL – CRESESB, Rio de Janeiro, 2014

FIMER

Fimer Stringsizer™ - Relatório de Configuração

Localização		Temperatura (°C)	Amb	Célula	Método de Montagem
CONTINENTE South America		**Mínimo**	9°C	9°C	Montatem sobre estrutura
PAÍS Brazil		**Média**	25°C	55°C	
LOCALIZAÇÃO São Paulo		**Máximo**	40°C	70°C	

Modelo do Inversor: PVS-120-TL -SX2	
Potência AC Nominal [kW]/ Tensão AC Nominal [V]	120000 / 480
Configuração do MPPT	MPPT INDEPENDENTE (Número de MPPT independentes.: 6)
Número total de módulos PV	396
Potência DC instalada (STC) [kW]	142560
Notas	Certifique-se de que o tamanho dos fusíveis, instalados em série com cada um dos conectores de entrada seja compatível com Isc Máx e não exceda a corrente máx nominal especificada pelo fabricante do painel



Painel FV (Fabricante / Modelo) Amerisolar / AS-6M 360	
Tecnologia	
Potência Nominal[W]	360
Tensão de Circuito Aberto - Voc [V]	47.6
Corrente de Curto Circuito - Isc [A]	9.71
Tensão de Máxima Potência - Vmp [V]	39
Corrente de Máxima Potência - Imp [A]	9.24
Coeficiente de Temperatura - Voc [V/°C]	-0.14
Coeficiente de Temperatura - Isc [mA/°C]	5.05



	MPPT1	MPPT2	MPPT3	MPPT4	MPPT5	MPPT6
Painel PV/String	18	18	18	18	18	18
Número de Strings em Paralelo	4	4	4	4	3	3
Número total de módulos FV	72	72	72	72	54	54
Notas	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	2, 3	2, 3
Potênvia DC Instalada (STC) [kW]	25.92	25.92	25.92	25.92	19.44	19.44
Potência Máxima/MPPT [kW]	20.50	20.50	20.50	20.50	20.50	20.50
$P_{PV(INST),MPPTi}/P_{MPPTMAX}$	126.4%	126.4%	126.4%	126.4%	94.8%	94.8%
$P_{PV(inst)}/P_{ACR}$	118.8%					
$P_{PV(inst)}/P_{ACMAX}$	118.8%					
Máxima Tensão do Sistema de Paineis FV [Vdc]	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Máxima Tensão de Entrada do Inversor [Vdc]	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Voc max @9°C [Vdc]	897.1	897.1	897.1	897.1	897.1	897.1
Voc min @70°C [Vdc]	743.4	743.4	743.4	743.4	743.4	743.4
Tensão de Ativação do Inversor (default) [Vdc]	420	420	420	420	420	420
Tensão de Ativação Recomendada do Inversor [Vdc]	Default (420)	Default (420)	Default (420)	Default (420)	Default (420)	Default (420)
Vmp max @9°C [Vdc]	735.0	735.0	735.0	735.0	735.0	735.0
Vmp typ @55°C [Vdc]	640.1	640.1	640.1	640.1	640.1	640.1
Vmp min @70°C [Vdc]	609.1	609.1	609.1	609.1	609.1	609.1
Faixa de Operação do MPPT* [Vdc]	294 - 1000	294 - 1000	294 - 1000	294 - 1000	294 - 1000	294 - 1000
Corrente Máxima de Curto Circuito do Gerador FV @70°C [Adc]	39.7	39.7	39.7	39.7	29.8	29.8
Corrente Máxima de Curto Circuito do Inversor/MPPT [Adc]	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
Corrente do MPP do gerador FV @70°C [Adc]	37.9	37.9	37.9	37.9	28.4	28.4
Corrente máxima na entrada do MPPT do Inversor[Adc]	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0
Notas Explicativas	*) Faixa para o MPPT operar considerando a tensão de ativação predefinina:; 1)- Nota: Possibilidade de limitação da potência de saída.; 2)Número de strings em paralelo compatíveis com número de entradas no inversor; 3)- Número de strings em paralelo maior do que 2. Verifique a necessidade de instalar fusíveis para proteção de corrente reversa.					

Termos e Condições de Uso: Ao usar essa ferramenta de projetos você concorda que as configurações estimadas dos strings serão usadas apenas com inversores Fimer. A Fimer não garante exatidão na previsão e desempenho do seu sistema FV ou do inversor ou conformidades com códigos e normas em vigor na localização do seu projeto.
Todas as configurações devem ser verificadas por um engenheiro qualificado para o cumprimento dos parâmetros operacionais e normas em vigor no local de instalação. Ao usar essa ferramenta o usuário é responsavel por sua utilização e a Fimer. não se responsabiliza por quaisquer danos advindos de sua utilização.

FIMER

Figura 7. Configuração de MPPTs e Strings. Fonte: *Software* Fimer Stringsizer.