



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira

Departamento de Engenharia Elétrica - DEE
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

ANDRÉ AKIRA SUGUIMOTO KANEKO

**ANÁLISE DE USINAS FOTOVOLTAICAS E SEU FUNCIONAMENTO EM
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

Trabalho de Graduação apresentado à
Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha
Solteira – UNESP, como parte dos requisitos
para obtenção do grau de Engenheiro
Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Dionízio Paschoareli Júnior

ILHA SOLTEIRA

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

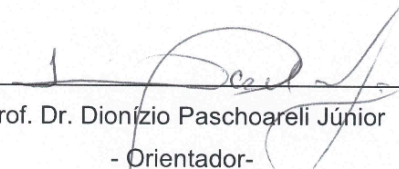
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

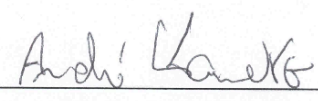
- K16a Kaneko, André Akira Suguimoto.
Análise de usinas fotovoltaicas e seu funcionamento em geração distribuída / André Akira Suguimoto Kaneko Kaneko. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
49 f. : il.
- Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,
2025
- Orientador: Dionízio Paschoareli Júnior
- Inclui bibliografia
1. Energia solar. 2. Energias renováveis. 3. Topologia de sistemas
fotovoltaicos.

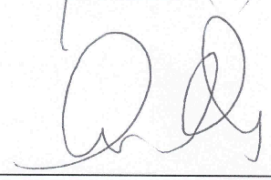
Sandra Montibeller - CRB-8/060

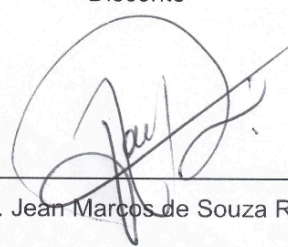
ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos treze dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e cinco, o discente **André Akira Suguimoto Kaneko**, matriculado sob o nº171051581, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. Dionízio Paschoareli Júnior, o Prof. Dr. Carlos Antonio Alves e o Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado **"ANÁLISE DE USINAS FOTOVOLTAICAS E SEU FUNCIONAMENTO EM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA"** obtendo a nota 8,0 (OITO) e conceito APROVADO.


Prof. Dr. Dionízio Paschoareli Júnior
- Orientador -


André Akira Suguimoto Kaneko
- Discente -


Prof. Dr. Carlos Antonio Alves
- Membro da Banca -


Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro
- Membro da Banca -

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos que de alguma forma me apoiaram nesta jornada tão importante da minha vida.

Agradecimentos

Este trabalho representa todo um conjunto de fatores, estes que me guiam e me impulsionam, a chegar ainda mais longe. Sem sombras de dúvidas, não seria possível chegar até aqui sem o apoio incondicional dos meus pais e familiares, que sempre me guiam e dão suporte em todos os aspectos. À eles, deixo aqui registrado com todo amor e carinho, minha gratidão!

Agradeço aos meus amigos que estiveram sempre presentes, tanto nos momentos bons, de descontração, comemoração, quanto nos momentos difíceis. Com estes amigos, a jornada se tornou possível e muito mais agradável, e sei que mesmo distantes, ou com rotinas distintas, estas amizades e parcerias continuarão vivas.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a cada um dos professores que fizeram parte desta jornada, professores estes que dedicam toda sua vida ao ensino e pesquisa, almejando transformar nossa sociedade como um todo, em especial ao meu professor orientador Dionízio Paschoarelli Júnior, que me deu todo suporte e aconselhamento para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Neste trabalho são apresentados componentes que compõem uma UFV (Usina Fotovoltaica), sua topologia e seu modo de operação, definição de GD (Geração Distribuída), geração remota, bem como o impacto dessa aplicação na matriz energética no Brasil e no mercado de energia. Neste é analisada uma UFV de 2,7 MWp e seu desempenho em determinado período, bem como os fatores que influenciam na geração, como irradiância, sujidade, umidade, temperatura ambiente, temperatura dos módulos. Por fim, este estudo tem como objetivo detalhar toda a operação de uma UFV, todos seus equipamentos, e sua operação em geração distribuída no Brasil.

Palavras-chave: Energia Solar; Energias Renováveis; Topologia de Sistemas fotovoltaicos.

ABSTRACT

This work presents components that make up a PVU (Photovoltaic Plant), its topology and mode of operation, definition of DG (Distributed Generation), remote generation, as well as the impact of this application on the energy matrix in Brazil and on the energy market. A 2.7 MWp PVU will be analyzed to see how it performs over a given period, as well as the factors that influence generation, such as irradiance, dirt, humidity, ambient temperature and module temperature. Finally, this study aims to detail the entire operation of a PUV, all its equipment and its operation in distributed generation in Brazil.

Keywords: Solar Energy; Renewable Energies; Topology of Photovoltaic Systems.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	10
1.1. Geração Distribuída.....	10
1.2 Sistemas de comunicação.....	11
1.3. MODBUS e RS-485.....	12
1.4 Sistemas Supervisórios.....	13
CAPÍTULO 2 - GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL.....	14
2.1 História de Net Metering.....	14
2.2 Regras da Geração Distribuída.....	15
Tabela 1 - Instalações de GD em seus respectivos anos e a Potência Instalada.....	15
2.3. Proposta de alteração da Tarifa pela ANEEL.....	16
Tabela 2 - Exemplo da aplicação das alternativas propostas para realização de AIR.....	17
CAPÍTULO 3 - USINA FOTOVOLTAICA.....	18
3.1 Componentes de uma Usina Fotovoltaica.....	18
3.2 Fatores que afetam a geração de uma Usina Fotovoltaica.....	20
CAPÍTULO 4 - OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA.....	22
4.1 Estudo de disponibilidade Solar.....	22
4.2 Indicadores chave de desempenho fotovoltaicos: Indicador de Desempenho e Indicador de Desempenho Energético.....	25
4.3 Procedimentos de Manutenção.....	27
CAPÍTULO 5 - ESTUDO DE CASO: Usina Fotovoltaica Operando em Geração Distribuída.....	30
5.1 Topologia dos Equipamentos da Usina Fotovoltaica.....	30
5.1.1 Parte em Corrente Contínua da Usina Fotovoltaica.....	31
5.1.2 Parte em Corrente Alternada da Usina Fotovoltaica.....	34
5.2 Operação da Usina Fotovoltaica.....	39
5.2.1 Curva de potência dos inversores.....	41
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 : Arquitetura RS-485 e relação das tensões Vob e Voa.....	12
Figura 2 - Bloco gerador de um SFV.....	19
Figura 3 - Bloco de condicionamento de um SFV.....	19
Figura 4 - Simulação de operação de uma UFV para análise de viabilidade e predição de geração do SFV.....	23
Figura 5 - Simulação de operação de uma UFV para análise de viabilidade e predição de geração do SFV.....	24
Figura 7 - Fluxograma de procedimentos para limpeza dos módulos.....	28
Figura 8 - Dano em módulo causado por hotspot.....	29
Figura 9 - Fluxograma de procedimentos para inspeção termográfica.....	29
Figura 10 - Fluxograma de conexão dos componentes da UFV.....	31
Figura 11 - Especificações técnicas do módulo SS-550-72MDH.....	32
Figura 12 - Especificações técnicas do módulo JKM525M-72HL4-TV.....	33
Figura 13 - Especificações técnicas módulo DHM72L9-440 DAH SOLAR.....	34
Figura 14 - Especificações técnicas do inversor Sun2000-330KTL-H1.....	35
Figura 15 - Especificações técnicas do inversor Huawei Sun2000-40KTL-M3.....	36
Figura 17 - Transformador a seco 1250 KVA.....	37
Figura 18 - Especificações técnicas transformador a seco 1250 KVA.....	37
Figura 19 - Transformador a seco de 75 kVA.....	38
Figura 20 - Especificações técnicas do transformador auxiliar de 75 kVA.....	38
Figura 21 - Proteções da cabine.....	39
Figura 22 - Gráfico de geração de energia e orçamento diário de geração de uma UFV.....	40
Figura 24 - Gráfico de geração de energia (kWh) x Irradiância (W/m ²).....	41
Figura 25 - Curva de potência dos inversores de 330 kW com módulos de 550 W...42	
Figura 26 - Curva de potência de um inversor de 330 kW com módulos de 440 W e 550 W.....	43
Figura 27 - Curva de potência de um inversor 40 kW e módulos de 550 W.....	43
Figura 28 - Curva de potência e energia de um inversor de 12 kW com módulos de 550 W.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Instalações de GD em seus respectivos anos e a Potência Instalada.....	15
Tabela 2 - Exemplo da aplicação das alternativas propostas para realização de AIR.....	17

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A busca por descarbonização no mundo foi fomentada em conjunto à busca por fontes de energias renováveis e limpas. Visto que no mundo ainda faz-se o uso primordialmente de energias advindas de fósseis, há uma busca por alternativas às fontes de energia tradicionais. Algumas das fontes renováveis de energia são os rios, que, por meio das UHE (Usinas Hidrelétricas) e PCH (Pequena Central Hidrelétrica) convertem energia mecânica em energia elétrica.

O vento é uma segunda fonte de energia, que gera energia elétrica a partir da movimentação de pás das torres dos parques eólicos, também transformando energia mecânica em energia elétrica. Por outro lado tem-se o biogás, que é gerado a partir de resíduos orgânicos e, assim, utilizado em turbinas a gás, gera energia elétrica. E tem-se também o Sol, que é responsável pela maior parte de energia da Terra. De modo indireto, o Sol também é responsável por outras fontes de energia, pois quando aquece os rios e causa evaporação que é responsável pelas chuvas e possibilita o despacho das hidrelétricas, bem como induz a circulação atmosférica, que gera os ventos. Os recursos não-renováveis como petróleo, carvão e gás natural são provenientes de resíduos animais e vegetais que também utilizaram da energia do Sol para se desenvolver (PINHO, 2014).

De certa forma, todas essas fontes de energia foram muito discutidas em Geração Centralizada, que ainda é o modelo de geração mais utilizado no Brasil. Neste modelo, existe uma conexão com uma rede de alta tensão, que transporta a energia até centros de distribuição e posteriormente até os consumidores finais (AVELINO, 2020).

1.1. Geração Distribuída

Geração distribuída (GD) tem um amplo conceito, pode-se considerar recurso de produção de energia elétrica conectado diretamente à rede da distribuidora ou diretamente nas instalações do consumidor, depois do medidor (ACKERMANN, 2001).

Há ainda o conceito de que geração distribuída trata-se de geração de energia, majoritariamente utilizando fontes renováveis de energia e que o consumo da mesma energia seja feito próximo ao local de geração (HATZIARGYRIOU, 2007). Neste trabalho, será analisado um SFV (Sistema Fotovoltaico) que opera em GD, a topologia de UFVs - Usinas Fotovoltaicas, e detalhes de operação e manutenção de UFVs.

1.2 Sistemas de comunicação

Para abordar comunicação em sistemas fotovoltaicos é necessário falar do conhecimento de redes e protocolos de comunicação. Tais conceitos são essenciais para compreensão de como é feita a comunicação de dispositivos, também chamada de M2M (*Machine-to-Machine*). Quando se trata de comunicação de dados necessita-se que uma mensagem seja entregue, com confiabilidade, ou seja, que os dados entregues sejam íntegros e sem tempo de atraso significativo, pois a aplicação pode ser prejudicada caso o dado não seja entregue em tempo projetado. Os principais conceitos de comunicação são:

- (1) - Mensagem: Dado que será transmitido;
- (2) - Transmissor: Dispositivo o qual enviará a mensagem para o dispositivo receptor.
- (3) - Receptor: Dispositivo que recebe do transmissor uma mensagem.
- (4) - Meio Físico: Caminho pelo qual a mensagem será transmitida fisicamente, como cabo de rede, cabo elétrico, ondas eletromagnéticas.
- (5) Protocolos de Comunicação: Conjunto de regras para garantir comunicação entre dispositivos de modo que os dados sejam entregues, confiáveis e sem atrasos significativos.

Outros conceitos importantes são de Ethernet, TCP/IP e endereço de IP. Abaixo tem-se a descrição de tais conceitos:

- (1) - Ethernet: Tecnologia que permite a conexão de dispositivos via cabeamento, seja fibra óptica ou cobre de par trançado.
- (2) TCP/IP: A sigla significa *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* ou seja, Protocolo de Transmissão de Controle/Protocolo de Internet. Tal protocolo entrega informações em pacotes de dados utilizando o IP como endereçamento, de modo que somente o endereço fornecido receba a informação desejada
- (3) Endereço de IP: Por se tratar de endereço, tem-se um conceito de localização do dispositivo, logo em uma analogia, o endereço de IP seria como o CEP de uma rua, que indica que aquela rua é de determinado local, pois mesmo que se tenha várias ruas com o mesmo nome, o CEP é exclusivo de um determinado local. Dessa forma o endereço de IP diz respeito a cada dispositivo conectado a uma rede Ethernet. Tal endereço pode ter 2 formatos distintos como o IPV4 (IP Version 4) ou IPV6 (IP Version 6). No caso, o IPV4 utiliza 32 bits para criar um único e exclusivo número de endereço. Já o IPV6

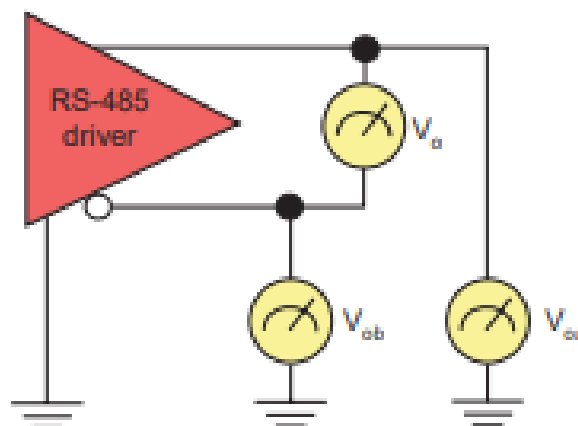
utiliza 128 bits para criar um único e exclusivo número de endereço expresso em 8 grupos.

1.3. MODBUS e RS-485

MODBUS é um protocolo de comunicação o qual contém suas particularidades, ambos são muito utilizados em aplicações industriais e tem função de comunicação de dispositivos por meio de dados. O protocolo MODBUS é um dos mais antigos e ainda utilizado em aplicações industriais, foi projetado pela Modicon (atualmente controlada pela *Schneider Electric*). Seu modo de operação é do tipo mestre-escravo, ou seja, o dispositivo mestre controla o que o escravo fará, de forma que o mestre envia algum comando e o escravo só pode executar o comando exigido pelo mestre, no instante correto, sem atrasos significativos, trazendo à tona o que se quer dizer com confiabilidade e integridade dos dados.

O RS-485 se trata de um padrão de cabeamento que segue a norma TIA/EIA 485, o qual tem sua arquitetura com um amplificador diferencial dos sinais V_{ob} e V_{oa} , tem-se então um par trançado de cabos para comunicação, devida a essa característica múltiplos transmissores e receptores podem estar na mesma linha. Com o padrão RS-485 pode-se associar um protocolo de comunicação para estabelecer comunicação dos dispositivos. Na Figura 1 tem-se a arquitetura do padrão RS-485. (ANJOS, 2020)

Figura 1 : Arquitetura RS-485 e relação das tensões V_{ob} e V_{oa} .



Fonte: (ANJOS, 2020)

1.4 Sistemas Supervisórios

SCADA significa *Supervisory, Control and Data Acquisition* ou seja, Supervisório, Controle e Aquisição de Dados. Tais sistemas são utilizados em aplicações industriais para acompanhar a operação de plantas, sistemas,

componentes específicos, de modo que possa monitorar alarmes, falhas, anomalias e gerar relatórios por meio de dados para considerações futuras, como manutenção ou substituição de determinados dispositivos. O SCADA tem uma interface a qual utiliza-se das medições dos sensores comunicadas via protocolos de comunicação (muitas vezes utiliza-se MODBUS RS485 ou RTU) e torna possível o monitoramento de diversas variáveis do sistema em questão.

CAPÍTULO 2 - GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL

De acordo com a Lei nº 14300, que institui o Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída, sistemas de geração de energia elétrica diretamente conectados à rede de distribuição, no local ou próximo ao ponto de consumo, e que tenham potência instalada de geração de no máximo 5 MW, podendo injetar o excedente na rede pelo sistema de compensação de créditos de energia.

Esse conceito trata-se da Microgeração e da Minigeração Distribuídas de Energia Elétrica (MMGD) e do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE). As modalidades para participação do SCEE são:

- Autoconsumo local - quando a energia é gerada e compensada no mesmo local onde está instalada a MMGD (Micro e Minigeração Distribuída);
- Autoconsumo remoto - quando a energia pode ser gerada em um local e compensada em outro, desde que em unidades consumidoras do mesmo titular e mesma concessionária distribuidora de energia;
- Geração distribuída em empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras - a energia gerada pode ser repartida entre os condôminos em porcentagens ou ordem de prioridade definidas pelos próprios consumidores; e
- Geração compartilhada - diversos interessados podem se unir por meio de consórcio, cooperativa, condomínio civil voluntário ou edifício ou qualquer outra forma de associação civil, instituída para esse fim para instalar uma ou mais centrais de MMGD e utilizar a energia gerada para compensação do consumo de todos os participantes.

2.1 História de *Net Metering*

Em 2009 sob coordenação do MME (Ministério de Minas e Energia) foi apresentado o Relatório do GT - GDSF (Grupo de Trabalho em Sistemas Fotovoltaicos) que indicava o uso de usinas solares de pequeno porte. (BEREJUK, 2023).

Tal grupo analisou casos de geração solar na Europa e recomendaram um projeto-piloto de pesquisa e desenvolvimento para que fossem aplicadas usinas solares de pequenas potências a fim de analisar a viabilidade de inserção da geração distribuída solar fotovoltaica no âmbito do PRODIST (Procedimentos de Distribuição). Em 2010 houveram sucessivas demandas para a criação de um regulamento o qual pudesse fomentar a entrada de recursos que viabilizassem a implementação de UFVs no Brasil, dentre eles o IDEAL (Instituto para o

Desenvolvimento das Energias Alternativas na América Latina), o qual solicitou um modelo de regulação para instalação de painéis fotovoltaicos em estádios de futebol utilizados para os jogos da Copa do Mundo de 2014 (BEREJUK, 2023). Dessa maneira o conceito de *Net Metering* foi implementado, com as seguintes características:

- Sistema de compensação de Energia, conhecido como *Net Metering* mede o fluxo de energia em uma UC (Unidade Consumidora) dotada de pequena geração, por meio de medidores bidirecionais;
- O medidor bidirecional mede quanto foi consumido e gerado de energia em um mesmo ponto de conexão.

2.2 Regras da Geração Distribuída

Em 2012 foi publicada a Resolução Normativa nº 482/2012, a qual deu início ao processo de difusão de micro e minigeradores distribuídos no Brasil. Alguns dados do histórico de implementação de sistemas de GD estão na Tabela 1.

Tabela 1 - Instalações de GD em seus respectivos anos e a Potência Instalada

Ano	Quant. GDs instaladas/Ano	Potência Instalada/Ano (MW)	Potência Acumulado (MW)
2012	12	0,66	0,66
2013	213	3,52	4,18
2014	300	3,01	7,19
2015	1.346	15,73	22,92
2016	6.465	63,45	86,37
2017	13.469	156,11	242,48
2018	36.093	440,91	683,40
2019	123.007	1.618,72	2.302,12
2020	226.036	2.996,40	5.298,52
2021	455.635	4.720,22	10.018,74
2022	801.765	8.182,30	18.201,03
2023	686.838	8.457,99	26.659,02
2024	852.102	9.510,62	36.169,64

Fonte: (EPE, 2025)

Pode-se observar que de 2015 adiante o número de instalações em GD cresceu em escala muito maior que dos anos anteriores, tal fato se deve a reforma do SCEE que aconteceu em 2015 graças a Resolução Normativa nº 687/2015, a qual incentivou a instalação de usinas operando em GD. Houve um seminário em

2014 realizado pela ANEEL sendo este o Seminário de Micro e Minigeração Distribuída - Impactos da Resolução Normativa n° 482/2012. Devido a esse seminário e posteriores discussões a respeito da autogeração remota e geração compartilhada, a ANEEL entendeu que nesse período fazia sentido isentar os consumidores das Tarifa de Energia - TE (R\$/MWh) e Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição - TUSD (R\$/MWh). Dessa forma ficou decidido, pela nova Resolução Normativa que unidades de minigeração distribuída poderiam ter centrais geradores com até 5 MW de capacidade instalada, o que pela norma original admitia usinas de até 1 MW.

2.3. Proposta de alteração da Tarifa pela ANEEL

Em 2019 a ANEEL apresentou uma proposta de revisão da REN (Resolução Normativa) n° 482, a fim de alterar a tarifação da geração distribuída. Tais alterações previam alterar como eram cobradas as tarifas daqueles que utilizavam da geração distribuída, seja autogeração, geração remota. Foram apresentadas 6 alternativas, sendo elas as seguintes:

- Alternativa 0 - Cenário atual: Não altera a compensação das tarifas TE e TUSD.
- Alternativa 1 - Incide Fio B: O componente Transporte Fio B seria aplicado em toda energia consumida da rede. As demais componentes seriam iguais da alternativa 0.
- Alternativa 2 - Incide Fio A e Fio B: Análogo a alternativa 1 porém com a inserção do componente Fio A.
- Alternativa 3 - Alternativa Fio A, Fio B e Encargos: Análogo a alternativa 2, porém com a inserção dos encargos da TUSD.
- Alternativa 4 - Incide toda a TUSD: Somente a TE seria compensada.
- Alternativa 5 - Incide toda a TUSD e os Encargos e demais componentes da TE: Análogo a alternativa 4 porém com os encargos e demais componentes da TE.

Um exemplo de como seria o sistema de compensação está na Tabela 2, com a Análise de Impacto Regulatório, (AIR).

Tabela 2 - Exemplo da aplicação das alternativas propostas para realização de AIR.

Alter-nativa	Forma de faturamento	Valor da fatura	Economia pela GD	Variação da economia em relação ao cenário base
0 (cenário base)	$(300 - 200) \times (\text{TUSD} + \text{TE})$	R\$ 50,00	R\$ 100,00	-
1	$(300 - 200) \times (\text{TUSD} - \text{Transporte Fio B} + \text{TE}) + (300) \times (\text{Transporte Fio B})$	R\$ 78,00	R\$ 72,00	-28%
2	$(300 - 200) \times (\text{TUSD} - \text{Transporte Fio A} - \text{Transporte Fio B} + \text{TE}) + (300) \times (\text{Transporte Fio A} + \text{Transporte Fio B})$	R\$ 84,00	R\$ 66,00	-34%
3	$(300 - 200) \times (\text{TUSD} - \text{Transporte Fio A} - \text{Transporte Fio B} - \text{Encargos} + \text{TE}) + (300) \times (\text{Transporte Fio A} + \text{Transporte Fio B} + \text{Encargos})$	R\$ 92,00	R\$ 58,00	-42%
4	$(300 - 200) \times (\text{TE}) + (300) \times (\text{TUSD})$	R\$ 100,00	R\$ 50,00	-50%
5	$(300 - 200) \times (\text{Energia}) + (300) \times (\text{TUSD} + \text{TE} - \text{TE Energia})$	R\$ 112,00	R\$ 38,00	-62%

Fonte: (ANEEL, 2018)

Tal proposta foi vista de forma muito negativa para os participantes diretos e indiretos do mercado solar, bem como aos consumidores, foi quando surgiu a apresentação do projeto de Lei nº 5829/19 propondo a criação de um marco legal da micro e minigeração distribuída.

2.4 Alterações com a Lei nº 14.300/2022

Em 2022, foi aprovada a Lei nº 14.300/2022, esta que ficou conhecida como Marco Legal da Geração Distribuída. Com esta, definiu-se que a o sistema de compensação de créditos de energia com a distribuidora, deixaria de ser 1 para 1, e definiu datas para esta transição, sendo assim:

- Sistemas conectados até janeiro de 2023 continuariam com as regras antigas, e compensação de 1 para 1, por 25 anos;
- Sistemas conectados de fevereiro de 2023 em diante, pagam gradualmente encargos pelo TUSD;

Esta, que ainda vigora em 2025, pode ser atrelada à queda de instalações de usinas fotovoltaicas enquadradas em GD, no ano de 2023, apresentada na Tabela 1, no entanto este número voltou a crescer em 2024.

CAPÍTULO 3 - USINA FOTOVOLTAICA

UFV (Usina Fotovoltaicas) são usinas que utilizam da fonte de energia advinda da irradiação solar para gerar energia elétrica. O conceito de geração fotovoltaica foi descoberto em 1839 ao ver que em uma célula de material semicondutor uma queda de tensão era gerada ao ser exposta a luz do sol; esse fenômeno era conhecido como efeito fotovoltaico (OLIVATI, 2001). Com a descoberta dos materiais semicondutores foi possível a criação de módulos fotovoltaicos, que são compostos de várias células fotovoltaicas. Esses módulos associados, em série ou paralelo, resultam em grandes fileiras de módulos, chamadas *strings*, que são conectadas aos inversores, dispositivos responsáveis por converter a energia gerada em CC (corrente contínua) para CA (corrente alternada).

3.1 Componentes de uma Usina Fotovoltaica

Uma Ufv é composta de diversos equipamentos, que pode ser subdividida em três blocos, bloco gerador, bloco de condicionamento de potência e bloco de armazenamento, esse último bloco é opcional. O bloco gerador é composto de arranjos fotovoltaicos os quais contém módulos fotovoltaicos associados em série ou paralelo, cabeamento elétrico e estrutura de suporte, como consta na Figura 2.

No bloco de condicionamento de potência estão situados os inversores, controladores de carga (caso haja baterias) e dispositivos de proteção, supervisão e controle. Na figura 3 pode-se ver os componentes deste bloco. E por fim, o bloco de armazenamento, composto por bancos de baterias em série e em paralelo para condicionar energia para utilização posterior, fora de horário de geração, ou em horário com geração reduzida.

Figura 2 - Bloco gerador de um SFV.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3 - Bloco de condicionamento de um SFV.



Fonte: Elaborado pelo autor

Outro componente importante de uma UFV, embora não obrigatório, mas altamente ligada ao cálculo de indicadores de eficiência, é a estação meteorológica

e solarimétrica. Por meio dessa estação tem-se dados reais de grandezas como velocidade e direção do vento, irradiância, quantidade de chuva, temperatura ambiente, temperatura dos módulos e umidade. Tais dados são medidos por meio de diferentes tipos de sensores, sendo esses:

- (1) Anemômetro: Utilizado para medir velocidade e direção do vento. Este sensor possui vários tipos, no entanto os mais utilizados são os tipo concha, sônico e hélice.
- (2) Piranômetro: Utilizado para medir irradiância, ou seja, o fluxo de energia radiante instantâneo em uma superfície. Possuem classificação de acordo com a norma IEC 61724-1:2021, divididos em Espectralmente Plano Classe A, B ou C. Utilizam-se das normas ASTM G167 e ASTM E824 para calibração de piranômetros padrão secundário e primário, respectivamente. Para as medições de irradiação os piranômetros podem estar posicionados na horizontal ou no plano do módulo, para cálculo da irradiação GHI (Irradiância Global Horizontal) ou POA (Irradiância no Plano do Arranjo), respectivamente.
- (3) Pluviômetro: São sensores que medem a quantidade de chuva de um local.
- (4) Termoresistências: Também chamadas de RTD (*Resistance Temperature Detector*). Estes são responsáveis pela medição da temperatura de operação dos módulos no decorrer dos dias.
- (5) TermoHigrômetro: Utilizado para medir a temperatura e umidade do ar ambiente.

3.2 Fatores que afetam a geração de uma Usina Fotovoltaica

Uma UFV majoritariamente depende do Sol para atingir seu pico de potência, no entanto, alguns outros fatores influenciam a geração de um SFV. Sendo esses:

- (1) Irradiação: Como dito anteriormente, o que mais afeta a geração de um SFV é a taxa de radiação disponível para ser convertida em energia elétrica.
- (2) Sombreamento: Há a necessidade de analisar a área onde será instalada às UFV, pois o sombreamento que é causado constantemente pode causar danos nos módulos, pois causam pontos quentes e podem gerar correntes reversas, o que danifica os módulos e pode causar incêndios.
- (3) Sujidade: Um módulo sujo prejudica a sua geração, de modo que seja necessário fazer manutenções periódicas.
- (4) Temperatura: Os módulos fotovoltaicos são dispositivos semicondutores os quais tem forte influência da temperatura em aspectos de tensão e corrente.

- (5) Umidade: A umidade do ambiente ocasiona em refração da luz de modo que pode-se prejudicar.
- (6) Inclinação dos módulos: Devido a posição do Sol os módulos devem ser posicionados estrategicamente para que possam ter maior rendimento. Há uso de dispositivos como *trackers* que variam sua inclinação de acordo com a posição do Sol.
- (7) Especificações técnicas dos dispositivos: Dependendo da qualidade dos dispositivos a geração pode não atingir todo o desempenho disponível.

CAPÍTULO 4 - OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA

As atividades de operação e manutenção são comumente chamadas O&M; no caso de uma UFV existem diversos procedimentos para que a equipe de operação tenha o melhor desempenho de geração dadas as condições locais. Considerando que há diversos fatores que afetam a geração de uma UFV, faz-se necessário desenvolver estudos de disponibilidade solar de uma UFV em determinado local, bem como garantir que os componentes tenham sido instalados de maneira correta e garantir por meio de manutenções preditivas, preventivas e corretivas que a operação do sistema terá seu desempenho conforme o estudo de viabilidade indica. Para mensurar o desempenho de uma UFV utiliza-se KPI - *Key Performance Indicators* ou Indicadores chave de performance. Alguns KPIs de Engenharia utilizados em UFVs são PR - *Performance Ratio* ou taxa de desempenho, EPI - *Energy Performance Index* ou Indicador de performance de Energia (SILVA; 2022).

4.1 Estudo de disponibilidade Solar

Para identificar o potencial de geração de uma UFV utiliza-se de *softwares* como o *PVSyst* ou *PVSol* para simular o comportamento do SFV. São inseridos dados das coordenadas geográficas do local de instalação, modelo de módulos fotovoltaicos e inversores que serão utilizados na UFV, e as quantidades de cada componente. Os *softwares* fazem simulações utilizando bases de dados que contenham um grande volume de dados referentes às condições climáticas do local, em um período de tempo em anos, de forma que possa criar uma predição de geração de energia baseada na disponibilidade solar (BARROS, 2023).

Nas Figuras 4, 5 e 6 tem-se uma simulação feita pelo *PVSyst* de uma UFV para análise do comportamento da operação desta.

Figura 4 - Simulação de operação de uma UFV para análise de viabilidade e predição de geração do SFV.

Project summary					
Geographical Situation		Situation		Project settings	
Taubaté		Latitude		Albedo	
Brazil		Longitude		0.20	
		Altitude			
		Time zone			
Meteo data					
Taubaté					
Meteonorm 8.0 (2010-2014), Sat=100% - Synthetic					

System summary					
Grid-Connected System		Sheds system			
Simulation for year no 1					
PV Field Orientation		Near Shadings		User's needs	
Fixed plane		According to strings		Unlimited load (grid)	
Tilt/Azimuth		Electrical effect			
20 / 0 °		100 %			
System information					
PV Array		Inverters			
Nb. of modules		Nb. of units		5 units	
Pnom total		Pnom total		952 kWac	
2484 units		Pnom ratio		1.435	
1366 kWp					

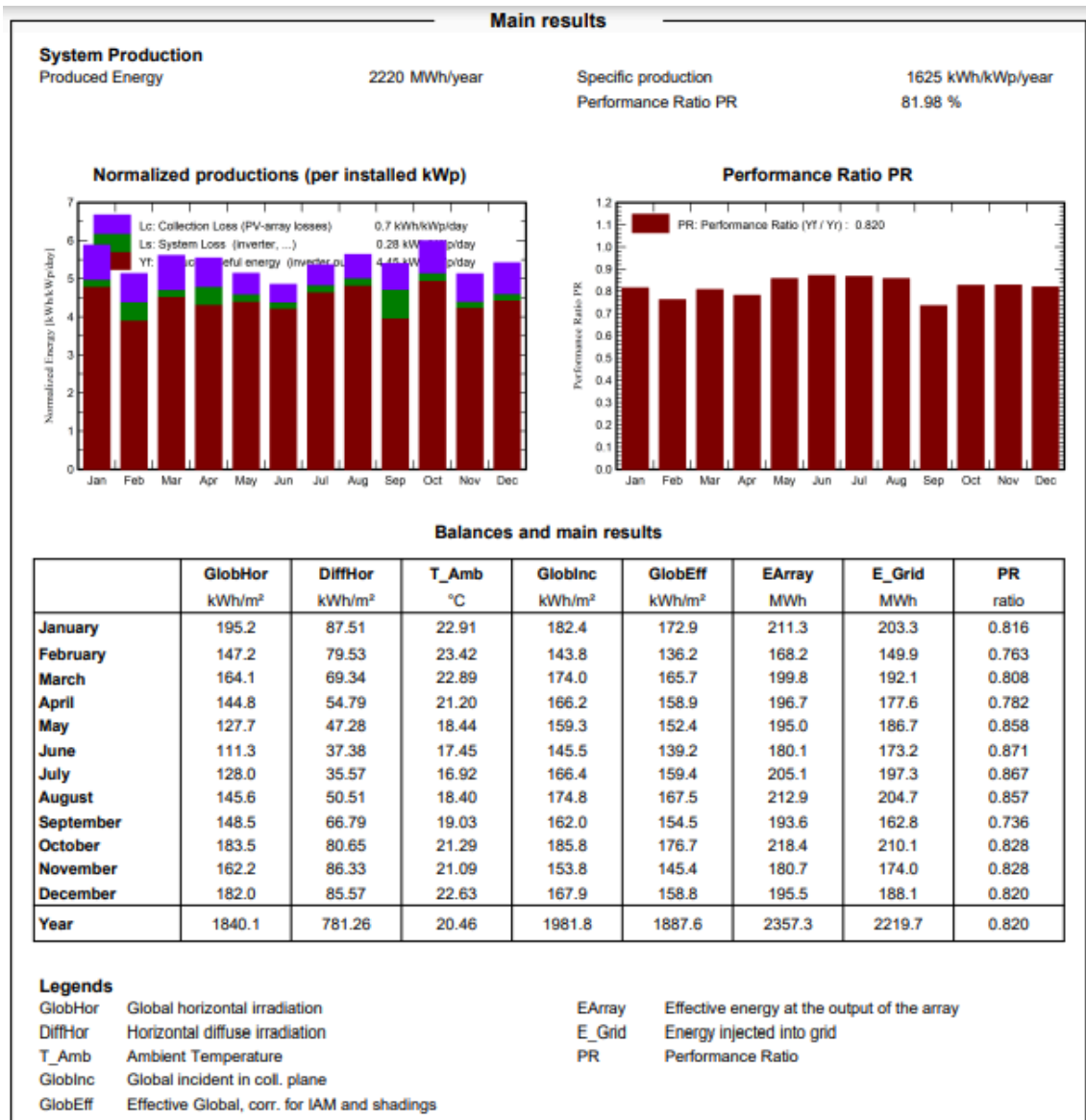
Results summary					
Produced Energy	2220 MWh/year	Specific production	1625 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR	81.98 %

Table of contents	
Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Near shading definition - Iso-shadings diagram	7
Main results	8
Loss diagram	9
Special graphs	10

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como pode-se observar foi informado o local da UFV, sua latitude, longitude, altitude, taxa de albedo, plano de inclinação dos módulos, quantidade de módulos, potência nominal, nesse caso 1366 kWp, número de inversores, potência nominal total, neste caso 952 kWac, quantidade de energia produzida no ano, nesse caso 2220 MWh/ano, *Yield* de 1625 kWh/kWp/ano e PR de 81,89 %.

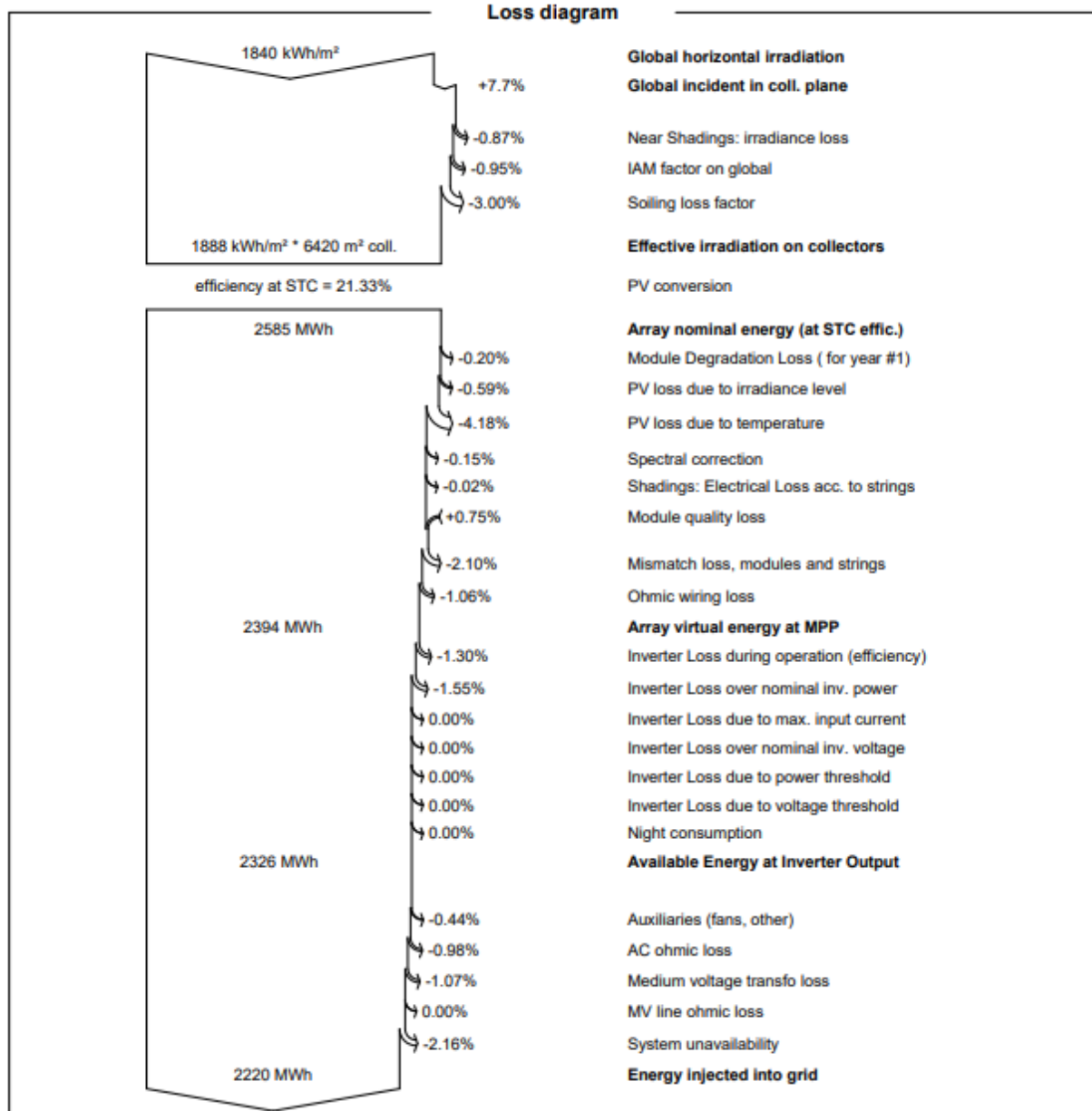
Figura 5 - Simulação de operação de uma UFV para análise de viabilidade e predição de geração do SFV



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na figura 5 pode-se ver dados de irradiação direta e difusa em kWh/m², bem como temperatura ambiente, energia gerada antes do inversor, energia injetada na rede e *PR*, segmentado nos meses do ano.

Figura 6 - Diagrama de perdas simulado para uma UFV



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 6 tem-se o diagrama de perdas, o qual mostra a energia gerada dada às condições de disponibilidade de Sol naquele local e perdas sucessivas por motivos diversos, como perdas elétricas por cabeamento, degradação dos módulos, perdas por temperatura do ambiente, perdas devido a eficiência do inversor e perdas nos transformadores.

4.2 Indicadores chave de desempenho fotovoltaicos: Indicador de Desempenho e Indicador de Desempenho Energético

Indicadores chave de desempenho, ou *Key Performance Index*, KPIs, são indicadores utilizados para mensurar desempenho em determinado processo ou operação. O uso de KPIs para avaliação de desempenho permite identificar se a

operação do sistema está conforme esperado e onde há necessidade de melhorias, além de permitir ações sobre as causas geradoras de desempenho futuro (ROSA, 2019).

Uma forma de mensurar como está o desempenho da usina é com o uso do *Performance Ratio*, PR, este pode ser calculado de diferentes maneiras, mas seu conceito é o de rendimento do sistema, ou seja, quanto de energia elétrica foi gerada realmente e qual era seu potencial de geração teórico. As equações (1), (2) e (3) mostram os métodos de cálculos do PR simples, corrigido pela irradiação, e corrigido pela temperatura.

$$PR_{\text{simples}} = \frac{\text{Energia}_{\text{gerada}} [\text{kWh}]}{\text{Energia}_{\text{esperada}} [\text{kWh}]} \quad (1)$$

$$PR_{\text{irradiação}} = \frac{\text{Energia}_{\text{gerada}}}{\text{Energia}_{\text{esperada}} * \frac{\text{Irrad}_{\text{local}}}{\text{Irrad}_{\text{STC}}}} \quad (2)$$

Sendo:

$\text{Irrad}_{\text{local}}$ é a irradiação onde está inserida a UFV;

$\text{Irrad}_{\text{STC}}$ é a irradiação em condições de teste padrão no qual a temperatura é 25 °C, massa de ar A.M 1,5, velocidade do vento 1 m/s e a irradiação é 1000 W/m²;

$$PR_{\text{irradiação}} = \frac{\text{Energia}_{\text{gerada}}}{\text{Energia}_{\text{esperada}} * \frac{\text{Irrad}_{\text{local}}}{\text{Irrad}_{\text{STC}}} * [1 - (\frac{\beta}{100}) * (\text{Temp}_{\text{modulote}} - \text{Temp}_{\text{modulo}})]} \quad (3)$$

Sendo:

β é um coeficiente que indica variação de tensão em circuito aberto, que é atrelado a variação de tensão conforme a temperatura;

$\text{Temp}_{\text{modulote}}$ a temperatura do módulo de acordo com simulações;

$\text{Temp}_{\text{modulo}}$ a temperatura real do módulo.

Outro indicador importante é o *Energy Performance Indicator*, EPI, que pode ser descrito na equação (4)

$$EPI = \frac{PR * HSP}{\text{Energia}_{\text{gerada}}} \quad (4)$$

Sendo:

PR o *Performance Ratio*;

HSP Horas de Sol Pico, que é um conceito que representa quantas horas do dia tem-se a potência de pico do sistema, ou seja, se HSP é 4 h, significa que das 12 h de Sol disponíveis por dia, o sistema atinge sua potência de pico por apenas 4h. Este valor é disponibilizado pelo CRESEB de vários pontos do Brasil.

E a energia Gerada em kWh.

Esse indicador deve ficar o mais próximo de 1, caso seu valor seja maior que 1 pode significar um PR inadequado, ou um HSP mal dimensionado, caso seja menor que 1 pode-se indicar que a operação da usina está sendo afetada de alguma forma, como módulos antigos, sujeira, clima atípico em determinada época do ano.

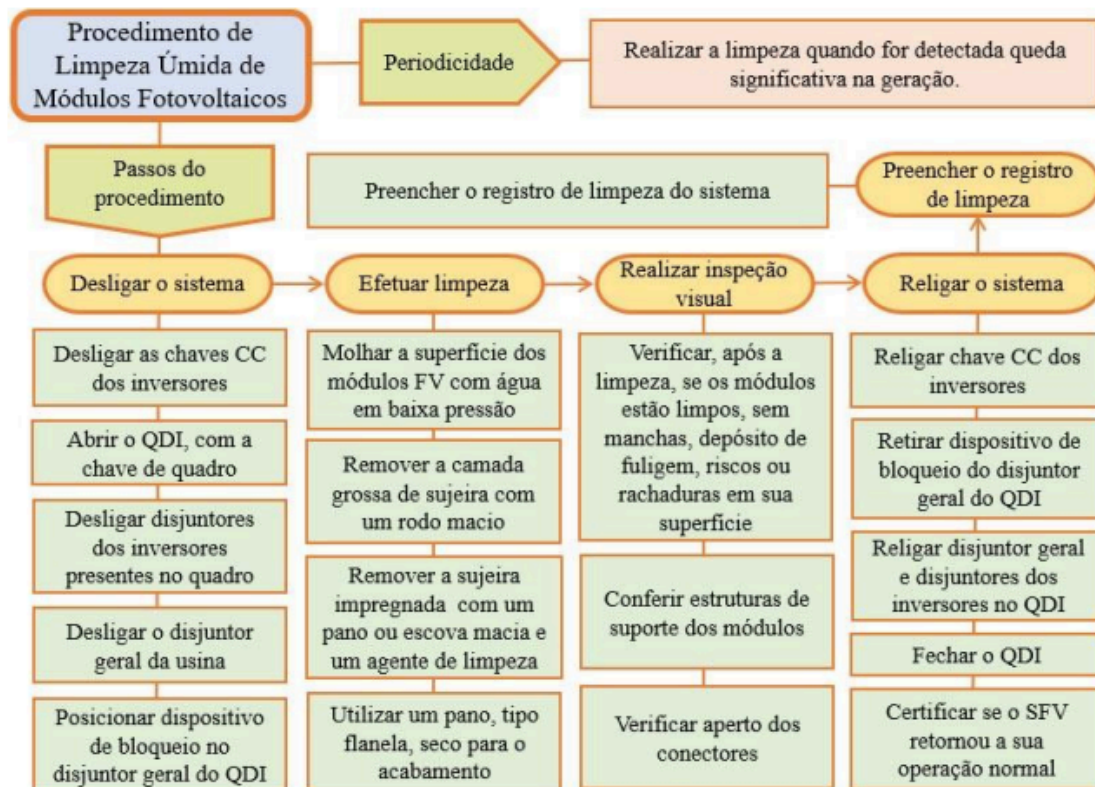
4.3 Procedimentos de Manutenção

Existem diversos problemas que surgem em uma UFV. Na literatura encontra-se diversos problemas de envelhecimento de módulos fotovoltaicos, como descoloração, delaminação, degradação do revestimento antirreflexo, corrosão, rachaduras nas células, interconexão quebrada, poeira e sujeira, degradação induzida por potencial, defeitos da caixa de junção e dos diodos de desvio, fenômenos de aquecimento localizados ou pontos quentes (*hot spot*) e desprendimento da estrutura (COSTA, 2021).

Há ainda problemas nos conectores MC4 das *strings* dos módulos, problemas de baixa isolamento de cabeamento, bem como outros tratamentos necessários para outros componentes da UFV, como limpeza dos inversores. Dessa forma deve-se ter procedimentos para que possam ser realizadas tais manutenções em determinados períodos considerados ideais.

Um dos fatores que mais prejudicam a geração é a sujeira dos módulos, o percentual de perdas pode variar muito conforme o índice de sujeira, porém, foi constatado perdas de 4 % em um mês e 10 % em sete meses em um SFV da USP na cidade de São Paulo (REZENDE, 2018). Na Figura 7 tem-se um fluxograma dos procedimentos de limpeza de módulos fotovoltaicos.

Figura 7 - Fluxograma de procedimentos para limpeza dos módulos.



Fonte: (COSTA; HIRASHIMA; FERREIRA, 2018)

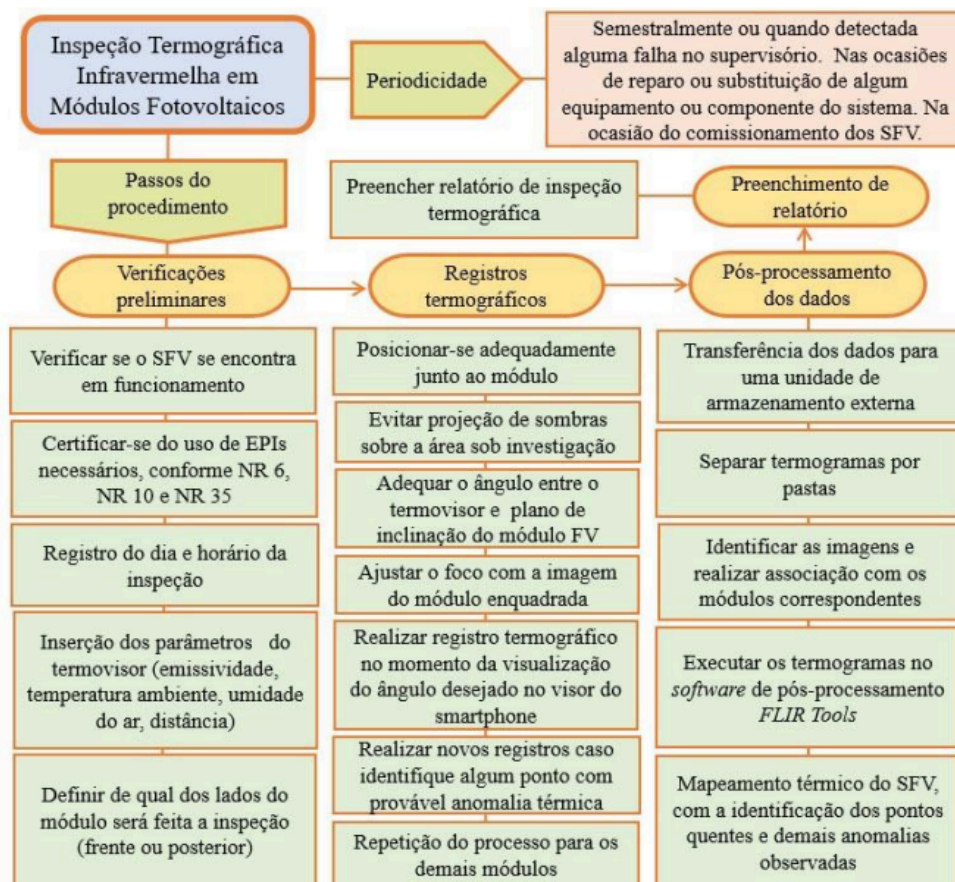
Outro problema muito relevante na operação de SFV são os *hotspots* ou pontos quentes, que são causados por sombreamento parcial ou constante, microfissuras nas células dos módulos fotovoltaicos, incompatibilidade celular, dano celular, conexão de diferentes tipos de módulos em série, sujeira e acabam gerando corrente reversa nos módulos, de modo que possam haver danos nos módulos, inclusive incêndios em UFV. Para análise de pontos quentes utilizam-se câmeras termográficas e faz-se inspeções com determinada frequência. Na Figura 8 e na Figura 9 tem-se o fluxograma de procedimentos para inspeções termográficas

Figura 8 - Dano em módulo causado por *hotspot*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 9 - Fluxograma de procedimentos para inspeção termográfica.



Fonte: (COSTA, 2018)

CAPÍTULO 5 - ESTUDO DE CASO: Usina Fotovoltaica Operando em Geração Distribuída

Em primeiro momento detalha-se a topologia da UFV com seus componentes,

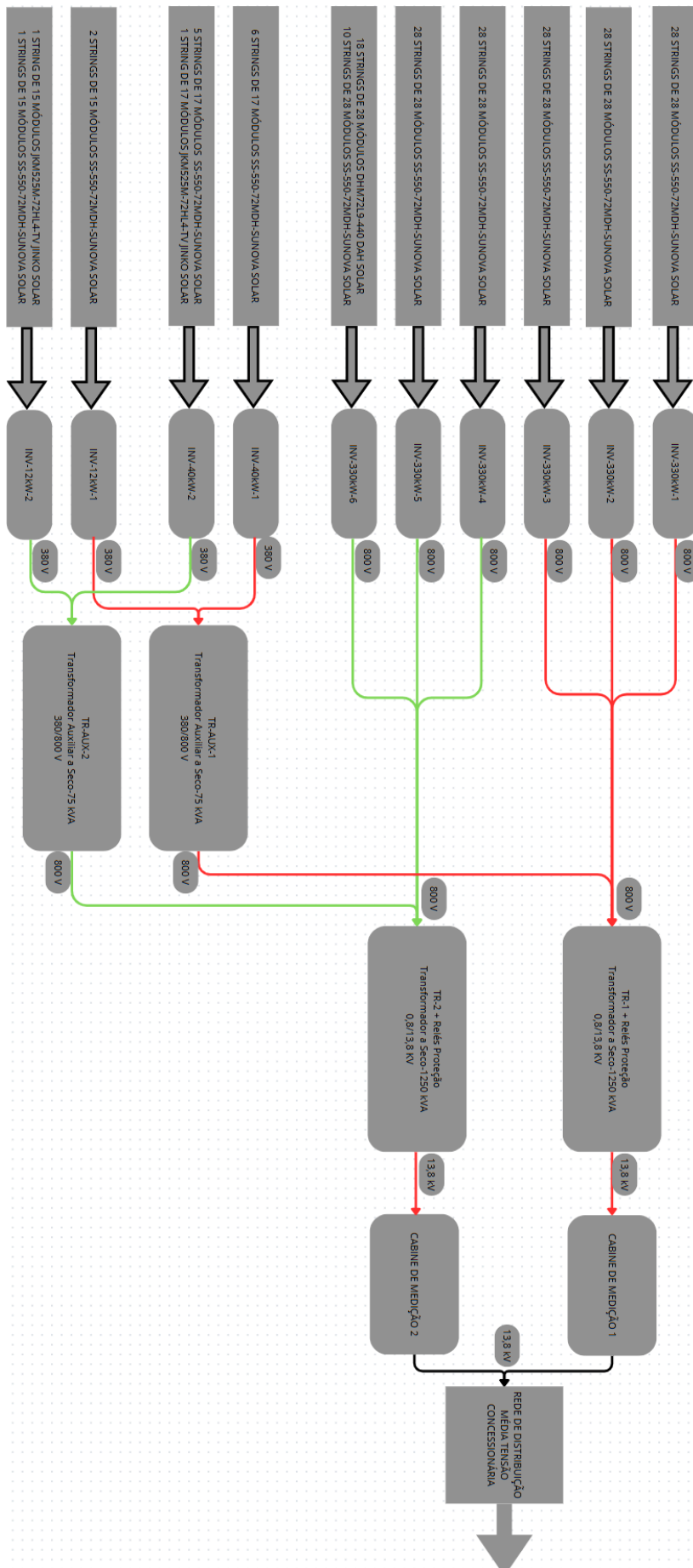
- 6 Inversores Huawei Sun2000-330KTL-H1, sendo que 5 destes estão conectados com 784 módulos SS-550-72MDH-SUNOVA SOLAR por cada inversor, e 1 inversor utiliza 280 módulos SS-550-72MDH-SUNOVA SOLAR, mais 504 módulos DHM72L9-440 DAH SOLAR;
- 2 Inversores Huawei Sun2000-40KTL-M3, sendo 1 deles conectado a 85 módulos SS-550-72MDH-SUNOVA SOLAR e 1 conectado a 17 módulos JKM525M-72HL4-TV JINKO SOLAR, mais 102 módulos SS-550-72MDH-SUNOVA SOLAR;
- 2 Inversores Huawei Sun2000-12KTL-M2 sendo 1 deles conectado a 15 módulos SS-550-72MDH-SUNOVA SOLAR e 15 JKM525M-72HL4-TV JINKO SOLAR, enquanto o outro está conectado a 30 módulos SS-550-72MDH-SUNOVA SOLAR;
- 4432 Módulos SS-550-72MDH-SUNOVA SOLAR, 550 W;
- 32 Módulos JKM525M-72HL4-TV JINKO SOLAR, 525 W;
- 504 Módulos DHM72L9-440 DAH SOLAR, 440 W;
- 2 Transformadores a seco 1250 kVA;
- 2 Transformadores auxiliar a seco 75 kVA;
- 6 Relés de proteção PEXTRON URP 6000;
- 1 estação Solarimétrica Romiotto padrão EPE, sendo 1 dos piranômetros posicionados no plano do módulo;

É importante ressaltar que um inversor pode utilizar variedade de módulos, desde que estes sejam utilizados em strings diferentes, ou seja, não devem ser associados módulos diferentes pois pode causar *mismatch*, ou descasamento entre módulos de diferentes potências. As consequências geralmente são geração de pontos quentes, correntes reversas.

5.1 Topologia dos Equipamentos da Usina Fotovoltaica

A configuração do SFV de estudo se apresenta conforme o fluxograma da Figura 10 de modo que cada componente será apresentado em sequência, com suas características técnicas e estruturais.

Figura 10 - Fluxograma de conexão dos componentes da UFV.



Fonte: Elaborada pelo autor

Seguindo a leitura do fluxograma tem-se em primeiro momento o conjunto gerador, o qual está na parte CC do sistema, ao passar pelos inversores a energia elétrica passa a operar em corrente alternada, como há 3 tipos de inversores, os inversores de menor potência necessitam de um transformador auxiliar e disjuntores antes do transformador. Em seguida tem-se outros disjuntores e o transformador a seco para elevar a tensão até 13,8 kV, após essa etapa tem-se os cubículos de proteção e medição e por fim a energia é exportada para a rede.

5.1.1 Parte em Corrente Contínua da Usina Fotovoltaica

Os módulos SS-550-72MDH tem potência nominal de 550 W e suas características técnicas estão na Figura 11. Os JKM525M-72HL4-TV 525 W além de serem bifaciais, ou seja, tem duas faces que absorvem energia solar, sendo que a face traseira absorve energia solar por meio do albedo, luz do sol refletida pelo solo e demais superfícies. Na Figura 12 tem-se as especificações técnicas deste módulo. Por fim tem-se o módulo DHM72L9-440 DAH SOLAR, o qual tem potência nominal de 440 W e suas especificações técnicas estão na Figura 13.

Figura 11 - Especificações técnicas do módulo SS-550-72MDH

SS-550-72MDH 144 cells

ELECTRIC CHARACTERISTICS

Model of modules	SS-520-72MDH		SS-530-72MDH		SS-540-72MDH		SS-550-72MDH	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum power — P_{mp} (W)	520	387	530	394	540	402	550	410
Open-circuit voltage — V_{oc} (V)	49.10	46.34	49.26	46.50	49.42	46.65	49.60	46.82
Short-circuit current — I_{sc} (A)	13.57	10.96	13.71	11.07	13.85	11.19	14.04	11.35
Maximum power voltage — V_{mp} (V)	40.44	37.54	40.54	37.86	40.71	38.11	40.83	38.25
Maximum power current — I_{mp} (A)	12.86	10.32	13.08	10.41	13.27	10.56	13.48	10.73
Module efficiency — η_m (%)	20.12%		20.51%		20.89%		21.28%	
Power tolerance (W)	(0,+5)							
Maximum system voltage (V)	1500V							
Maximum rated fuse current (A)	25							
Current operating temperature (°C)	-40~+85 °C							

STC (Standard Testing Conditions): Irradiance 1000W/m², Cell Temperature 25 °C , Spectra at AM1.5

NOCT (Nominal Operating Cell Temperature): Irradiance 800W/m², Ambient Temperature 20°C , Spectra at AM1.5, Wind at 1m/s

STRUCTURAL CHARACTERISTICS

Module dimensions (L*W*H)	2279×1134×35mm
Weight	28.9 kg
Number of cells	144 cells
Cell	PERC Monocrystalline 182x91mm
Glass	Tempered, 3.2mm AR, High transmittance, Low iron
Frame	Anodized aluminum alloy
Junction box	IP68
Output wire	4.0 mm ² , wire length: 1400mm
Connector	MC4 Compatible
Mechanical load	5400 Pa

TEMPERFORMANCE RATINGS

Temperature coefficient (P_{max})	-0.35 %/°C
Temperature coefficient (V_{oc})	-0.28 %/°C
Temperature coefficient (I_{sc})	+0.048 %/°C
Nomial operating cell temperature	45±2 °C

PACKAGING CONFIGURATION

Container	40HQ
Quantity/pallet	31
Pallets/container	20
Quantity/container	620

Fonte: (SUNOVA SOLAR, 2022)

Pode-se visualizar alguns dados de bastante interesse em se tratando de análise de topologia dos módulos, como potência máxima de operação, tensão de circuito aberto V_{oc} , corrente de curto-circuito I_{sc} , eficiência do módulo, todas essas grandezas em condições STC e NOCT. Também pode-se ver o valor de β , o coeficiente de temperatura que é utilizado no cálculo do PR. Pode-se observar também características estruturais, como dimensões, peso, número de células fotovoltaicas e compatibilidade com conector MC4.

Figura 12 - Especificações técnicas do módulo JKM525M-72HL4-TV

SPECIFICATIONS										
Module Type	JKM525M-72HL4-TV		JKM530M-72HL4-TV		JKM535M-72HL4-TV		JKM540M-72HL4-TV		JKM545M-72HL4-TV	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	525Wp	391Wp	530Wp	394Wp	535Wp	398Wp	540Wp	402Wp	545Wp	405Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	40.61V	37.74V	40.71V	37.88V	40.81V	37.98V	40.91V	38.08V	41.07V	38.18V
Maximum Power Current (Imp)	12.93A	10.35A	13.02A	10.41A	13.11A	10.48A	13.20A	10.55A	13.27A	10.62A
Open-circuit Voltage (Voc)	49.27V	46.50V	49.35V	46.58V	49.42V	46.65V	49.49V	46.71V	49.65V	46.86V
Short-circuit Current (Isc)	13.64A	11.02A	13.71A	11.07A	13.79A	11.14A	13.87A	11.20A	13.94A	11.26A
Module Efficiency STC (%)	20.36%		20.55%		20.75%		20.94%		21.13%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	30A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.35%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.28%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.048%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									
Refer. Bifacial Factor	70±5%									

BIFACIAL OUTPUT-REARSIDE POWER GAIN						
5%	Maximum Power (Pmax)	551Wp	557Wp	562Wp	567Wp	572Wp
	Module Efficiency STC (%)	21.38%	21.58%	21.78%	21.99%	22.19%
15%	Maximum Power (Pmax)	604Wp	610Wp	615Wp	621Wp	623Wp
	Module Efficiency STC (%)	23.41%	23.64%	23.86%	24.08%	24.30%
25%	Maximum Power (Pmax)	656Wp	663Wp	669Wp	675Wp	681Wp
	Module Efficiency STC (%)	25.45%	25.69%	25.93%	26.18%	26.42%

Fonte: (JINKO SOLAR, 2022)

Do módulo JKM525M-72HL4-TV pode-se observar que além de especificações de operação, tem-se especificações da parte traseira do módulo, esta que recebe a luz solar indiretamente por meio dos reflexos do solo, ou outras superfícies presentes no terreno. Como pode-se visualizar, a potência máxima de operação e eficiência em condições STC é diferente da potência de operação da parte dianteira do módulo. Também tem-se que a parte traseira tem 70±5 % da produção de energia elétrica em relação à parte frontal.

Figura 13 - Especificações técnicas módulo DHM72L9-440 DAH SOLAR

ELECTRICAL CHARACTERISTICS(STC)

MODULE TYPE	DHM-72L9				
Maximum Power (Pmax)	440W	445W	450W	455W	460W
Open-circuit Voltage (Voc)	49.00V	49.15V	49.30V	49.45V	49.60V
Maximum Power Voltage (Vmp)	41.81V	41.96V	42.11V	42.26V	42.41V
Short-circuit Current (Isc)	11.29A	11.32A	11.35A	11.38A	11.41A
Maximum Power Current (Imp)	10.52A	10.61A	10.69A	10.77A	10.85A
Module Efficiency (%)	19.8%	20.0%	20.2%	20.5%	20.7%
Power Tolerance			0~+5W		
Temperature Coefficient of Isc			0.05%/°C		
Temperature Coefficient of Voc			-0.31%/°C		
Temperature Coefficient of Pmax			-0.35%/°C		

Standard Test Environment : Irradiance 1000W/m², Cell temperature 25°C, Spectrum AM1.5

ELECTRICAL CHARACTERISTICS(NOCT)

MODULE TYPE	DHM-72L9				
Maximum Power (Pmax)	331W	334W	338W	342W	346W
Open-circuit Voltage (Voc)	46.37V	46.51V	46.66V	46.80V	46.94V
Maximum Power Voltage (Vmp)	39.57V	39.71V	39.85V	39.99V	40.14V
Short-circuit Current (Isc)	9.11A	9.13A	9.16A	9.18A	9.21A
Maximum Power Current (Imp)	8.36A	8.42A	8.49A	8.55A	8.61A

Standard Test Environment : Irradiance 800W/m², Ambient temperature 20°C, Spectrum AM1.5, Wind speed 1m/s

Fonte: (DAH SOLAR, 2023)

5.1.2 Parte em Corrente Alternada da Usina Fotovoltaica

Os inversores possuem topologias distintas, sendo os Sun2000-330KTL-H1 inversores de potência nominal de 300 kW e potência máxima 330 kW. Tal inversor possui 28 strings e 28 módulos por string e rendimento máximo de 99,03 %. Já os inversores Sun2000-40KTL-M3 operam com potência nominal de 40 kW com 6 strings e 17 módulos por string e 98,75 % de rendimento máximo. Por fim, os inversores Sun2000-12KTL-M2 tem potencial nominal de 12 kW, 2 strings e 15 módulos por string e rendimento máximo de 98,5 %. Nas Figuras 14, 15 e 16 consta dados retirados do datasheet dos inversores.

Figura 14 - Especificações técnicas do inversor Sun2000-330KTL-H1

Technical Specifications

Efficiency	
Max. Efficiency	≥ 99.03%
European Efficiency	≥ 98.8%
Input	
Max. Input Voltage	1,500 V
Number of MPPT	6
Max. Current per MPPT	65 A
Max. Short Circuit Current per MPPT	115 A
Max. PV Inputs per MPPT	4/5/5/4/5/5
Start Voltage	550 V
MPPT Operating Voltage Range	500 V ~ 1,500 V
Nominal Input Voltage	1,080 V
Output	
Nominal AC Active Power	300,000 W
Max. AC Apparent Power	330,000 VA
Max. AC Active Power (cosφ=1)	330,000 W
Nominal Output Voltage	800 V, 3W + PE
Rated AC Grid Frequency	50 Hz / 60 Hz
Nominal Output Current	216.6 A
Max. Output Current	238.2 A
Adjustable Power Factor Range	0.8 LG ... 0.8 LD
Total Harmonic Distortion	THD _i < 1% (Rated)

Fonte: (Huawei, 2022)

A Figura 14 são apresentadas informações de eficiência máxima sendo essa de 99,03 %, tensão de entrada máxima de 1500 V, número de MPPT igual a 6, potência nominal de operação de 300 kW, e máxima potência ativa e aparente sendo estas 330 kW e 330 kVA, respectivamente, bem como a frequência da rede, que pode ser 50 ou 60 Hz.

Figura 15 - Especificações técnicas do inversor Huawei Sun2000-40KTL-M3

Technical Specification	SUN2000-30KTL-M3	SUN2000-36KTL-M3	SUN2000-40KTL-M3
Efficiency			
Max. Efficiency	98.7%		
European Efficiency	98.4%		
Input			
Max. Input Voltage ¹	1,100 V		
Max. Current per MPPT	26 A		
Max. Short Circuit Current per MPPT	40 A		
Start Voltage	200 V		
MPPT Operating Voltage Range ²	200 V ~ 1000 V		
Rated Input Voltage	600 V		
Number of Inputs	8		
Number of MPP Trackers	4		
Output			
Rated AC Active Power	30,000 W	36,000 W	40,000 W
Max. AC Apparent Power	33,000 VA ³	40,000 VA	44,000 VA
Rated Output Voltage	230 Vac / 400 Vac / 480 Vac, 3W/N+PE		
Rated AC Grid Frequency	50 Hz / 60 Hz		
Rated Output Current	43.3 A	52.0 A	57.8 A
Max. Output Current	47.9 A	58.0 A	63.8 A
Adjustable Power Factor Range	0.8 LG ... 0.8 LD		
Max. Total Harmonic Distortion	< 3%		

Fonte: (Huawei, 2022)

As informações da Figura 15 contém as mesmas informações da Figura 14, porém com os valores do inversor de 40 kW, com eficiência máxima sendo essa de 98,7 %, tensão de entrada máxima de 1100 V, número de MPPT igual a 8, potência nominal ativa e potência aparente sendo estas 40 kW e 44 kVA, respectivamente, bem como a frequência da rede, que pode ser 50 ou 60 Hz.

Figura 16 - Especificações técnicas do inversor Huawei Sun2000-12KTL-M2

Technical Specification	SUN2000-8KTL-M2	SUN2000-10KTL-M2	SUN2000-12KTL-M2	SUN2000-15KTL-M2	SUN2000-17KTL-M2	SUN2000-20KTL-M2
Efficiency						
Max. efficiency	98.50%	98.50%	98.50%	98.65%	98.65%	98.65%
European weighted efficiency	97.80%	98.00%	98.00%	98.30%	98.30%	98.30%
Input						
Recommended max. PV power ¹	12,000 Wp	15,000 Wp	18,000 Wp	22,500 Wp	25,500 Wp	30,000 Wp
Max. input voltage ²	1,080 V					
Operating voltage range ³	160 V ~ 950 V					
Start-up voltage	200 V					
Rated input voltage	600 V					
Max. input current per MPPT	27 A ⁴					
Max. short-circuit current	39 A					
Number of MPP trackers	2					
Max. number of inputs	4					
Output						
Grid connection	Three phase					
Rated output power	8,000 W	10,000 W	12,000 W	15,000 W	17,000 W	20,000 W
Rated AC Apparent power	8,000 VA	10,000 VA	12,000 VA	15,000 VA	17,000 VA	20,000 VA
Max. apparent power	8,800 VA	11,000 VA	13,200 VA	16,500 VA	18,700 VA	22,000 VA
Rated output voltage	230 Vac / 400 Vac, 3W + N + PE					
Rated AC grid frequency	50 Hz / 60 Hz					
Max. output current	13.4 A	17 A	20 A	25.2 A	28.5 A	33.5 A
Adjustable power factor	0.8 leading ... 0.8 lagging					
Max. total harmonic distortion	≤3 %					

Fonte: (Huawei, 2022)

E por fim, na Figura 16, para os inversores de 12 kW tem-se também as informações técnicas de operação do inversor.

Seguindo o fluxograma da Figura 10 tem-se os transformadores sendo esses 2 transformadores a seco, de potência 1250 kVA Δ -Y 800/13,8 kV. Na Figura 17 tem-se o modelo de transformador e na Figura 18 suas especificações técnicas.

Figura 17 - Transformador a seco 1250 KVA



Fonte: (TRANSFORMADORES UNIÃO, 2024)

Figura 18 - Especificações técnicas transformador a seco 1250 KVA



UNIÃO

TRANSFORMADORES

FOLHA DE DADOS

ESPECIFICAÇÕES GERAIS

Ciente / Identificação da FD / OF	8670 / FD-DP-01250K01-15-0800-001R0		2304023
Especificação Técnica / CÓDIGO			
Quantidade	1		
Instalação	Abrigada		
Temperatura ambiente máxima	40°C		
Altitude máxima da instalação	< 1000 m		
1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS			
1.1 Potência nominal / VF (kVA)	1250		
1.2 Tipo de resfriamento	AN		
1.3 Regime de Serviço	Contínuo		
1.4 Fator K	1		
1.5 Número de fases	3		
1.6 Frequência nominal	60		
1.7 Meio Isolante	Seco - Encapsulado em Epoxi		
1.8 Elevação de temperatura	AT/BT	CLASSE F -100°C / 100°C	
1.9 Tensões Suportáveis	AT/BT	34KV / 3KV	
1.10 Classe do Material Isolante	AT/BT	CLASSE F -155°C / 155°C	
1.11 Enrolamento tensão superior (AT)	Material : Alumínio		
Tensões (V)	13800 / 13200 / 12600 / 12000 / 11400		
Ligação	Delta		
Nível de impulso (kV)	95		
1.12 Enrolamento tensão inferior (BT)	Material : Alumínio		
Tensões (V)	800 / 462		
Ligação	Estrela c/ Neutro		
Nível de impulso (kV)	-		
1.13 Grupo de ligações	Dyn1 (30°)		

Fonte: (TRANSFORMADORES UNIÃO, 2024)

Tem-se, na Figura 18 especificações técnicas do transformador o qual sua potência nominal é de 1250 kVA, fator K igual a 1, que indica que a carga é linear e

não apresenta harmônicas, tem-se que o modelo é trifásico, frequência nominal de 60 Hz, meio isolante a seco, logo não usam óleo como isolante e sim o ar, tem tensões suportáveis de 34 kV no primário e 3 kV no secundário. Sua relação de transformação é de 800/462 V no primário para 13,8 kV no secundário, com ligação Δ -Y.

O outro transformador utilizado são 2 transformadores a seco auxiliar, de 75 kVA utilizado para elevar a tensão da saída dos inversores, de 12 kW e 40 kW, de 380 V para 800 V. Na Figura 19 tem-se um transformador a seco, de 75 kVA e na Figura 20 tem-se as especificações técnicas do transformador em questão.

Figura 19 - Transformador a seco de 75 kVA



Fonte: (TRANSFORMADORES UNIÃO, 2024)

Figura 20 - Especificações técnicas do transformador auxiliar de 75 kVA

1	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	TRAFO TIPO BT
1.1	Potência nominal / VF (kVA)	75
1.2	Tipo de resfriamento	AN
1.3	Regime de Serviço	100 % Contínuo
1.4	Fator K	1
1.5	Número de fases	3
1.6	Frequência nominal	60
1.7	Meio Isolante	Seco - Impregnado
1.8	Elevação de temperatura	100 °C
1.9	Classe de Isolação / TAD	1,1 kV / 3 kV
1.10	Classe do Material Isolante	F-155
1.11	Enrolamento Primário	Material : Alumínio
	Tensões (V)	800 V
	Ligação	Delta
	Nível de impulso (kV)	-
1.12	Enrolamento Secundário	Material : Alumínio
	Tensões (V)	380 / 220 V
	Ligação	Estrela
	Nível de impulso (kV)	-
1.13	Grupo de ligações	DY n1

Fonte: (TRANSFORMADORES UNIÃO, 2024)

Tem-se então na Figura 20 especificações técnicas do transformador o qual sua potência nominal é de 75 kVA, fator K igual a 1, que indica que a carga é linear e não apresenta harmônicas, tem-se que o modelo é trifásico, frequência nominal de

60 Hz, meio isolante a seco, logo não usam óleo como isolante e sim o ar. Sua relação de transformação é de 800 V no primário para 380 V no secundário, com ligação Δ -Y.

Por fim tem-se duas cabines de proteção e duas cabines de medição com relés Pextron URP 6000 e dois medidores de fronteira da concessionária, as proteções contempladas pelo sistema constam na figura 21, com seus respectivos códigos ANSI.

Figura 21 - Proteções da cabine.

Para a presente central geradora serão previstas as seguintes funções de proteção ao acessante:

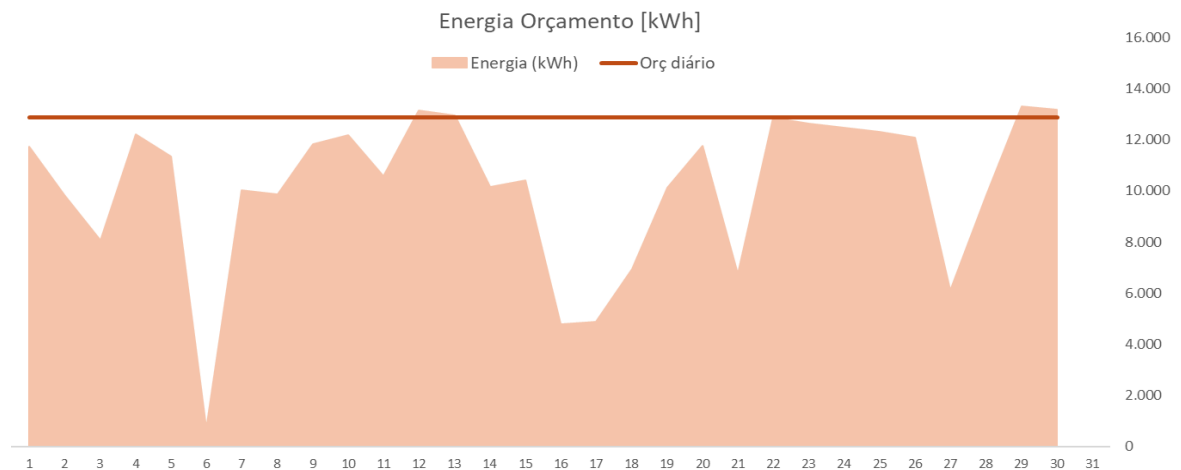
- Função (67) – Sobrecorrente Direcional de Fase;
- Função (67N) – Sobrecorrente Direcional de neutro;
- Função (50/51) – Unidade de Sobrecorrente Instantânea e Temporizada;
- Função (50N/51N) – Unidade de Sobrecorrente Instantânea e Temporizada de neutro;
- Função (25) – Sincronismo;
- Função (32) – Relé direcional de potência;
- Função (59) – Sobretensão;
- Função (59N) – Sobretensão de neutro;
- Função (27) – Subtensão;
- Função (81 O/U) – Sobrefrequência e Subfrequência;
- Função (81df/dt) – Relé derivada de frequência;
- Função (51V) – Sobrecorrente com Restrição de Tensão;
- Função (46) – Reversão ou Desbalanceamento de Corrente;
- Função (47) – Reversão ou Desbalanceamento de Tensão;
- Função (78) – Perda de Sincronismo;
- Anti-Ihamento;
- Função (98) – Oscilografia;

Fonte:(PEXTRON, 2022)

5.2 Operação da Usina Fotovoltaica

Nesse momento avalia-se a operação da UFV e sua geração, as curvas diárias de potência dos inversores e também as curvas de gerações mensal. Na Figura 22 tem-se o gráfico da geração do SFV operando no mês de setembro de 2024.

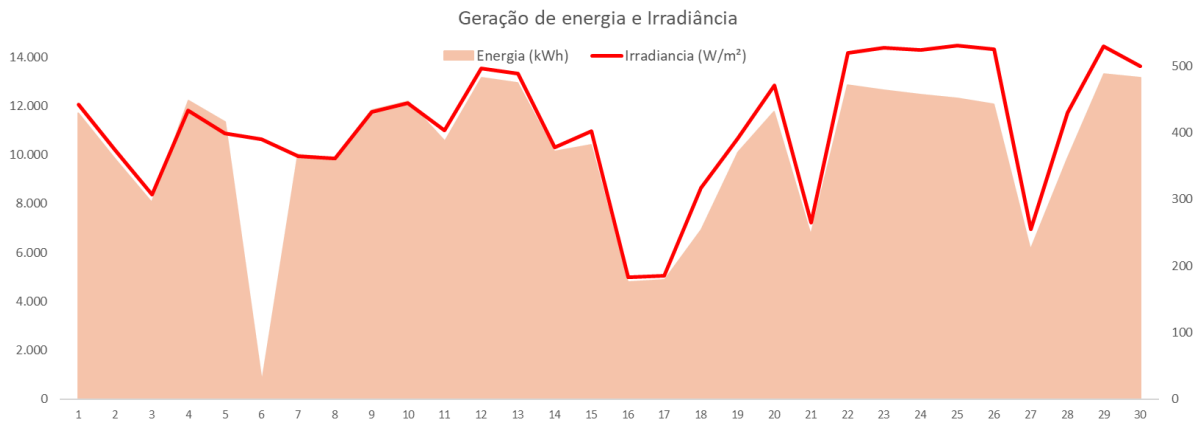
Figura 22 - Gráfico de geração de energia e orçamento diário de geração de uma UFV



Fonte: Elaborada pelo autor.

O gráfico da Figura 23 possui 2 curvas, sendo uma delas uma área a qual representa a geração de energia no decorrer dos dias, enquanto a outra seria um orçamento de geração por dia, ou seja, a geração esperada, baseado em simulações feitas pelo PVsyst. Pode-se ver que raramente obteve-se uma performance de acordo com a simulação do PVsyst, algumas considerações podem ser feitas a respeito disso. A primeira é que o PVsyst utiliza uma base de dados climáticos que considera que o comportamento do sol em determinada região é sempre o mesmo, baseado em uma média histórica, mas ainda pode gerar erros em sua predição. O segundo ponto a se observar é como foi a curva de irradiância dos mesmos períodos, para que se possa observar tal comportamento, utiliza-se os sensores de irradiância da estação solarimétrica, os piranômetros que coletam os dados e registram por meio de dataloggers, dispositivos de armazenamento e comunicação. Na Figura 24 tem-se um gráfico com curvas de geração e irradiância do mesmo período.

Figura 24 - Gráfico de geração de energia (kWh) x Irradiância (W/m²)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Neste gráfico onde consta-se as duas curvas, tem-se algumas boas informações, como a do dia 6 o qual a taxa de irradiância foi próxima de 400 W/m², porém a geração foi praticamente nula, indicando que houve problema na operação da UFV. Outro ponto é o comportamento da curva de irradiância em relação a de geração, que apresenta uma correlação nas subidas e descidas das curvas. Um outro ponto para ser observado é que dos dias 22 ao 26 a curva de irradiância tinha valores próximos de 500 W/m², porém sua geração estava abaixo do esperado, se comparado a dias com a mesma irradiação, e de acordo com o *Dattalogger*, nestes dias um dos inversores de 12kW estava apresentando falhas intermitentes, fazendo com que este entrasse e saísse de operação ao longo do dia, devido à sobreaquecimento do mesmo, no dia 27 o inversor foi substituído por um novo. Tais informações são úteis para gerar indicadores para as equipes de O&M. Alguns procedimentos que podem ser executados são as análises das curvas de potência dos inversores em diferentes dias com valores de irradiância diferentes. Como o sistema possui 3 tipos diferentes de inversores e ainda 3 tipos de módulos diferentes, deve-se buscar fazer análises daqueles que têm as mesmas configurações de topologia.

5.2.1 Curva de potência dos inversores

Para o estudo de operação da UFV em questão, analisa-se também a curva característica de potência dos inversores. Sendo esse um sistema que contém diferentes tipos de inversores, com diferentes potências de operação e que, utilizam diferentes módulos, pode-se observar comportamentos diferentes. Na Figura 25 tem-se um inversor Huawei Sun2000-330KTL-H1 o qual utiliza módulos SS-550-72MDH-SUNOVA SOLAR. Na Figura 26 tem-se um inversor igual ao da Figura 26, que utiliza módulos DHM72L9-440. Na Figura 27 tem-se um inversor

Sun2000-40KTL-M3 e módulos SS-550-72MDH-SUNOVA e JKM525M-72HL4-TV JINKO SOLAR. Por fim, na Figura 28 tem-se um inversor Sun2000-12KTL-M2 e módulos SS-550-72MDH-SUNOVA e JKM525M-72HL4-TV JINKO SOLAR.

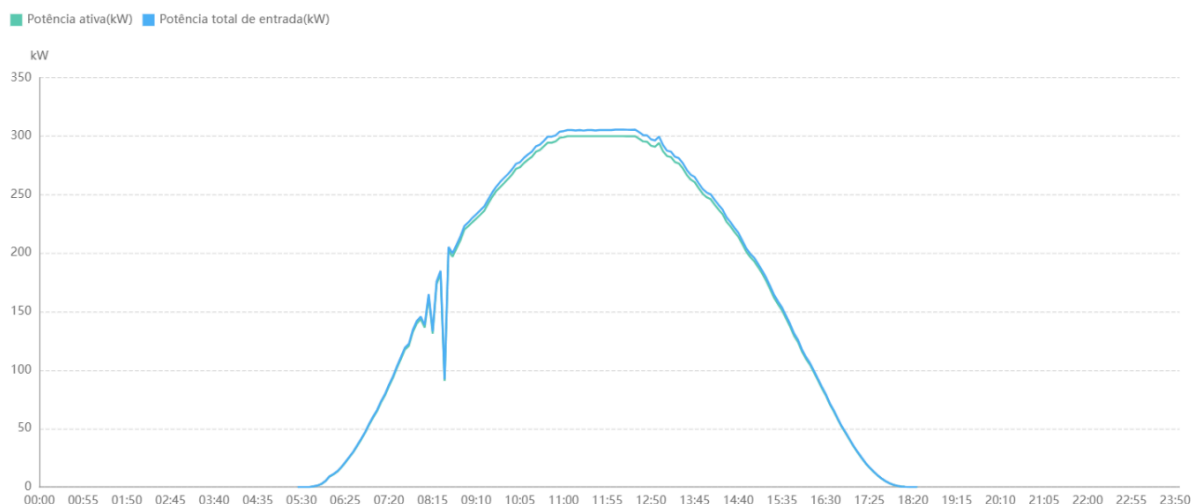
Figura 25 - Curva de potência dos inversores de 330 kW com módulos de 550 W.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nessa curva pode-se observar um fenômeno chamado de *clipping* que significa corte, pois a curva de um inversor deveria ser uma curva de Gauss e nesse caso é cortada. Esse fenômeno ocorre pois os geradores, no caso os módulos fotovoltaicos, estão com mais potência do que a suportada pelo inversor, então o inversor limita a geração e mantém a potência em sua potência nominal de operação. Dessa forma, em algumas usinas são utilizados mais módulos do que o suportado por inversor, essa estratégia é chamada de *oversizing*. Isso faz com que o inversor fique mais tempo operando em sua potência de pico.

Figura 26 - Curva de potência de um inversor de 330 kW com módulos de 440 W e 550 W.



Fonte: Elaborada pelo autor;

Na Figura 26 pode-se ver o comportamento da potência de um inversor Huawei Sun2000-330KTL-H1 conectado a módulos de 440 W. Nota-se uma diferença, em relação à curva de potência, da Figura 25, pois o fenômeno de *clipping* começa mais tarde, ou seja, atinge sua potência de pico mais tarde e mantém o inversor operando em menor tempo na sua potência máxima, logo a geração de energia é menor, cerca de 12 %.

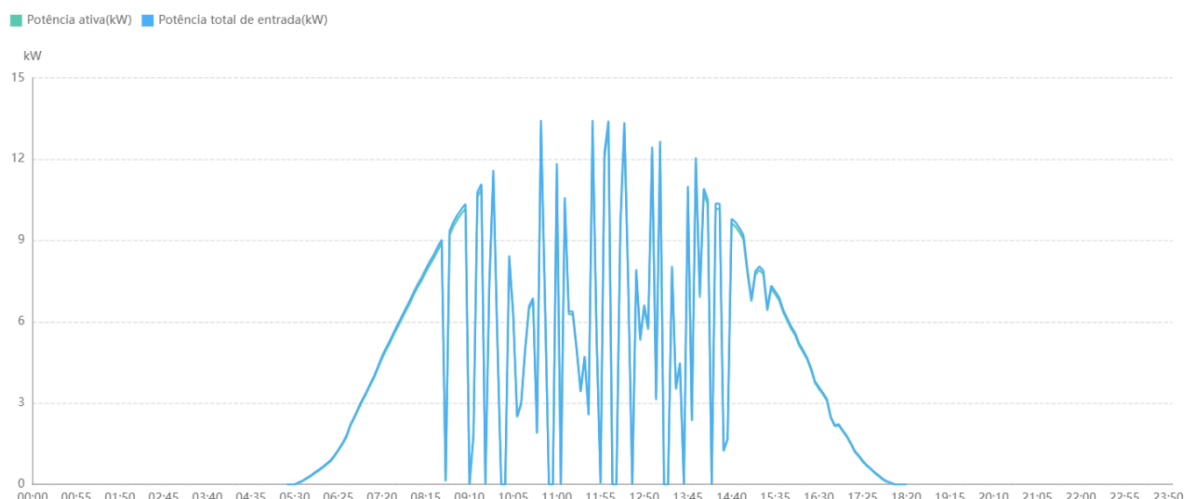
Figura 27 - Curva de potência de um inversor 40 kW e módulos de 550 W.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 27 tem-se um inversor de 40 kW operando com módulos de 550 W, pode-se notar que sua curva não é também uma curva de Gauss, pois ocorre o *clipping*, mas com oscilações tal fato pode ser sombreamento nos módulos o que evita que o inversor consiga operar com sua potência nominal de 40 kW, no entanto esse inversor, estrategicamente, deveria “*clippar*” pois também está operando em *oversizing*.

Figura 28 - Curva de potência e energia de um inversor de 12 kW com módulos de 550 W.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Por fim tem-se a curva do inversor de 12 kW e módulos de 550 W, seu comportamento tem muitas baixas na potência. De acordo com os registros apontados pelo *datalogger* do inversor, houveram muitas falhas de sobretensão, subtensão e corrente reversa. Como procedimento de atuação, foram feitas verificações nas *strings*, não encontrando anomalias, e em seguida substituído o inversor por um novo, e este com defeitos enviado ao fabricante em devolução em garantia.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao analisar a operação de uma UFV em GD, pode-se observar algumas considerações a respeito desse sistema. Em primeiro momento, vê-se que a GD tem papel importante na diversificação energética e contribui para suprir a demanda crescente de energia elétrica, pois pode ser utilizada não só pelo próprio gerador, mas também por um grupo de pessoas por meio do sistema de cooperativas. Outro ponto sobre GD é que é constituída majoritariamente por SFV, de modo que faz-se necessária uma análise mais significativa para esse tipo de sistema. Em segundo momento, pode-se observar que uma UFV pode ter topologias bem distintas, pois além de diferentes equipamentos disponíveis no mercado, possuem diferentes especificações técnicas e também diferentes tipos de materiais.

Em relação a sua operação pode-se notar a diferença da geração real com aquela proposta em simulação pelo PVSyst. O PVSyst utiliza dados climáticos de muitos anos e considera que o comportamento climático segue um padrão, no entanto tem-se observado mudanças climáticas e comportamentos diferentes de irradiação e outras variáveis dependentes do clima de acordo com o que está nos bancos de dados utilizado pelo PVSyst, logo tem-se previsões não tão fidedignas.

Outro ponto importante, é que a operação de uma UFV depende muito de uma boa manutenção, pois há fatores que influenciam na geração de energia elétrica, como sujidade, umidade e, principalmente, irradiância, assim é importante o uso de sensores e KPIs para monitorar o desempenho das UFVs e agir nos problemas os quais prejudicam a geração. Desta forma, um recurso que poderia ser melhor utilizado e detalhado em trabalhos futuros é o uso de sistemas de monitoramento SCADA, esses que conseguem apresentar falhas em pontos específicos, ou seja, em determinado inversor, em determinada string, e posteriormente historiar esses dados em um banco para que possam ser estudadas as causa de determinadas falhas e orientar a equipe de O&M.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. Distributed generation: a definition. *Electric Power Systems Research*, v. 57, n. 3, p. 195–204, 2001

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Nota Técnica nº 0062/2018-SRD/SCG/SRM/SGT/SRG/SMA, de 25 de maio de 2018. Abertura de Consulta Pública para o recebimento de contribuições visando o aprimoramento das regras aplicáveis à micro e minigeração distribuída. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/>. Acesso em: 21 jan. 2025.

ANJOS, Gustavo Henrique Antoneli dos; CESTARI, Yan Alves. Controle de irrigação usando inversor de frequência em Rede Modbus. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Disponível em: <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/261>. Acesso em: 23 jun. 2025.

AVELINO, Lara Pugliesi. Energia Solar Fotovoltaica Centralizada e Distribuída: o Caso do Brasil. 2020. Dissertação (Mestrado em Economia) – Universidade do Porto. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10216/129418>. Acesso em: 23 jun. 2025.

BARROS, Rodrigo Alex Silva. Análise comparativa entre os Softwares Pvsyst e Pvsol. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Alagoas. Disponível em: <http://www.repositorio.ufal.br/handle/123456789/13930>. Acesso em: 23 jun. 2025.

BEMEISEL, E. A realização da Planta Fotovoltaica de 511 kWp, de Silício Amorfo, da Usina Solar Tanquinho. Apresentação no EnerGen LatAm 2013. Rio de Janeiro - RJ. 28 e 29 de janeiro de 2013

BEREJUK, Guilherme Massignan. Avaliação das condições concorrenciais da geração distribuída fotovoltaica no Brasil. 2023. 235 f. Dissertação (Mestrado em

Ciências) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/L14300.htm. Acesso em: 21 jan. 2025.

COSTA, André Luis Crispim; HIRASHIMA, Simone Queiroz da Silveira; FERREIRA, Reginaldo Vagner. Operação e manutenção de sistemas fotovoltaicos conectados à rede: inspeção termográfica e limpeza de módulos FV. Ambiente Construído, v. 21, n. 4, p. 201-220, 2021.

DAH SOLAR. Ficha técnica do módulo fotovoltaico DHM-72L9-440W. [S.l.]: DAH Solar, [2023?]. Disponível em: [https://www.dahsolarpv.com/uploadfile/downloads/英文-166-DHM72L9-430~460W\(2094×1038×35mm\).pdf](https://www.dahsolarpv.com/uploadfile/downloads/英文-166-DHM72L9-430~460W(2094×1038×35mm).pdf). Acesso em: 23 jan. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Painel de Dados de Micro e Minigeração Distribuída – PDGD. Disponível em: <https://dashboard.epe.gov.br/apps/pdgd/>. Acesso em: 21 jan. 2025.

FAERMAN, Henrique. Custo de implantação de baterias diminui para R\$2 milhões o MW. 2024. Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53292127/custo-de-implantacao-de-baterias-diminui-para-r-2-milhoes-o-mw>. Acesso em: 10 out, 2024.

FRANCO, José Rafael. Análise comparativa entre medidas meteorológicas da estação convencional e automática da Fazenda Lageado no município de Botucatu-São Paulo-Brasil. 2021. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – UNESP. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstreams/f69a0c73-e722-4df8-8d5f-ad4058c38b69/download>. Acesso em: 23 jan. 2025.

HATZIARGYRIOU, N.; Asano, H.; Iravani, R.; Marnay, C. (2007). Microgrids. IEEE Power and Energy Magazine, v. 5, p. 78–94. DOI: 10.1109/MPAE.2007.376583

HUAWEI. Ficha técnica do inversor SUN2000-330KTL-H1. [S.l.]: Huawei Technologies Co., Ltd., [2024?]. Disponível em: https://solar.huawei.com/en-GB/download?p=%2f-%2fmedia%2fSolar%2fattachment%2fpdf%2feu%2fdatasheet%2fSUN2000-330KTL-H1_Datasheet.pdf. Acesso em: 23 jan. 2025.

HUAWEI. Ficha técnica do inversor SUN2000-40KTL-M3. [S.l.]: Huawei Technologies Co., Ltd., [2024?]. Disponível em: <https://solar.huawei.com/-/media/Solar/attachment/pdf/mea/datasheet/SUN2000-30-40KTL-M3.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2025.

HUAWEI. Ficha técnica do inversor SUN2000-40KTL-M3. [S.l.]: Huawei Technologies Co., Ltd., [2024?]. Disponível em: <https://solar.huawei.com/-/media/Solar/attachment/pdf/mea/datasheet/SUN2000-30-40KTL-M3.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2025.

JINKO SOLAR. Ficha técnica do módulo fotovoltaico Tiger Pro 72HC-TV (525–545 W). [S.l.]: Jinko Solar, [2022]. Disponível em: <https://www.jinkosolar.com/uploads/JKM525-545M-72HL4-TV-F1-EN.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2025.

MEYWIRTH, Phillip. Sistemas solares com layout centralizado e conceito de inversores descentralizados. 2021. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/sistemas-solares-com-layout-centralizado-e-conceito-de-inversores-descentralizados/>> Acesso em: 15 out, 2024

OLIVATI, Clarissa de Almeida. Efeito fotovoltaico e fotocondutividade em dispositivos poliméricos. 2001. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PÉREZ-LÓPEZ, Esteban. Los sistemas SCADA en la automatización industrial. Revista Tecnología en Marcha, v. 28, n. 4, p. ág. 3-14, 2015.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio. Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos, 2º edição, Rio de Janeiro - RJ, CEPEL/CRESESB, 2014.

PONTES, Wyara Maria Carlos Souza.

Implantação de Estação Solarimétrica e de Sistema Supervisório com Scadabr e Plataforma IoT em usina fotovoltaica na UNILAB-CE. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará.

Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/58064>. Acesso em: 23 jun. 2025.

REZENDE, Vinícius Gouveia Scartezini de. Análise das perdas de produtividade em geradores fotovoltaicos por efeito de sujidade. 2018. 140 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Energia) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde-11032019-185511/>. Acesso em: 23 jan. 2025.

ROSA, Carmen Brum. Gestão organizacional da geração distribuída em concessionárias de energia elétrica no Brasil. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Maria.

Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/20740>. Acesso em: 23 jun. 2025.

PEXTRON. Relé de proteção URP 6000 – Ficha técnica. [S.l.]: Pextron, [2023]. Disponível em: <https://pextron.com.br>. Acesso em: 23 jan. 2025.

SILVA, Raquel Xavier et al. Análise de desempenho de usina solar fotovoltaica utilizando simulações com dados de entrada medidos. 2022. Disponível em: https://oasisbr.ibict.br/vufind/Record/IFPE_aa333aec0252987d6a3c22d5df45dc79. Acesso em: 23 jun. 2025.

SUNOVA SOLAR. Ficha técnica do módulo fotovoltaico SS-550-72MDH. [S.l.]: Sunova Solar, [2022?]. Disponível em: https://www.sunova-solar.com/attached/file/en/certificates/PID_IEC_TS_62804__single_glass_Perc_-_Zosma_modules_compressed.pdf. Acesso em: 23 jan. 2025.

TRANSFORMADORES UNIÃO. Transformador a seco 1250 kVA – Série Dry Plus. [S.l.]: Transformadores União, [2024?]. Disponível em: <https://transformadoresuniao.com.br/transformador-media-tensao-seco-dry-plus-ip00/>. Acesso em: 23 jun. 2025.

TRANSFORMADORES UNIÃO. Transformador a seco 75 kVA – Especificações técnicas. [S.l.]: Transformadores União, [2024]. Disponível em: <https://transformadoresuniao.com.br/>. Acesso em: 23 jun. 2025.