

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS –
CÂMPUS GOIÂNIA

DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS IV
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DESENVOLVIMENTO DE ROTEIROS DIDÁTICOS PARA LABORATÓRIOS DE
ENERGIA SOLAR DO IFG *CÂMPUS* GOIÂNIA E DA EMC/UFG

HUESDRA NOGUEIRA DE CAMPOS

ORIENTADOR: PROF. ME. PAULO SÉRGIO ZANIN JÚNIOR

GOIÂNIA

2023



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

II

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: HUESDRA NOGUEIRA DE CAMPOS

Matrícula: 20171011060152

Título do Trabalho: DESENVOLVIMENTO DE ROTEIROS DIDÁTICOS PARA
LABORATÓRIOS DE ENERGIA SOLAR DO IFG CÂMPUS GOIÂNIA E DA EMC/UFG

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

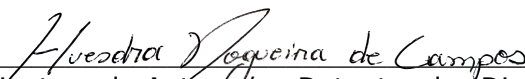
- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 28/06/2023.



Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

HUESDRA NOGUEIRA DE CAMPOS

ROTEIROS DIDÁTICOS PARA LABORATÓRIOS DE ENERGIA SOLAR DO IFG
CÂMPUS GOIÂNIA E DA EMC/UFG

TCC-2 apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Departamento de Áreas Acadêmicas IV do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – *Câmpus* Goiânia como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica. Orientador Prof. Me. Paulo Sérgio Zanin Júnior e coorientador Prof. Me. Fábio Silva Marques.

C198d Campos, Huesdra Nogueira de.

Desenvolvimento de roteiros didáticos para laboratórios de energia solar do IFG Câmpus Goiânia e da EMC/UFG / Huesdra Nogueira de Campos. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, 2023.
170 f.: il.

Orientador: Prof. Me. Paulo Sérgio Zanin Júnior.
Coorientador: Prof. Me. Fábio Silva Marques.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Bacharelado em Engenharia Elétrica,
Departamento de Áreas Acadêmicas IV, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

1. Energia solar - sistemas fotovoltaicos. 2. Energia solar – laboratórios – IFG Câmpus Goiânia – EMC/UFG. I. Zanin Junior, Paulo Sérgio (orientador). II. Marques, Fábio Silva (coorientador). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia. IV. Título.

CDD 621.47

Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Alisson de Sousa Belthodo Santos CRB1/ 2.266
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

HUESDRA NOGUEIRA DE CAMPOS

**DESENVOLVIMENTO DE ROTEIROS PARA LABORTATÓRIOS
DE ENERGIA SOLAR DO IFG CÂMPUS GOIÂNIA E DA EMC/UFG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, como parte das exigências para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista.

Goiânia, 14 de junho de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Paulo Sérgio Zanin Júnior
Orientador - IFG/Câmpus Goiânia

Prof. Me. Fábio da Silva Marques
Coorientador - IFG/Câmpus Goiânia

Prof. Me Ubaldo Eleutério da Silva
Membro da Banca Examinadora - IFG/Câmpus Goiânia

Documento assinado eletronicamente por:

- **Fabio da Silva Marques**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 20/06/2023 11:03:04.
- **Ubaldo Eleuterio da Silva**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 20/06/2023 10:41:04.
- **Paulo Sergio Zanin Junior**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 20/06/2023 10:27:01.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 20/06/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 421075
Código de Autenticação: ef4310dff4



AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS, autor e consumidor de todas as coisas, a Tua misericórdia me alcançou por meio do Senhor Jesus e permitiu que eu chegasse até aqui. Obrigado Senhor!

Agradeço à Dona Elzina, minha querida mãe a quem devo a vida e tudo que sou. Ao meu Pai (in memoriam) que desde cedo me incentivou a estudar e principalmente a entrar na ETFG (Escola Técnica Federal de Goiás). Aos meus filhos, irmãos e esposa pela paciência e ajuda nos momentos difíceis da vida. Aos amigos, colegas, e tantos outros que de alguma forma contribuíram para que eu chegasse até aqui.

Agradecimento especial ao IFG *Câmpus* Goiânia, onde fiz o curso técnico em Telecomunicações em 1994 (ETFG) que abriu inúmeras oportunidades ao longo da minha vida, o IFG permitiu que eu realizasse o sonho de um dia ser Engenheiro Eletricista. Aos meus orientadores Professores Paulo Zanin e Fábio Marques pela paciência, apoio e persistência do início ao fim.

Meus sinceros agradecimentos a Todos!

Huesdra Nogueira de Campos

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, em especial ao meu pai Antônio (in memorian) que muito se alegraria com essa conquista, à minha querida mãe Elzina que sempre acreditou em mim, aos meus filhos, Geovana, Endrew e Henryque e àqueles que sempre estiveram por perto nos momentos de alegria ou tristeza.

EPÍGRAFE

*“Porque o Senhor dá a sabedoria, e da sua boca
vem a inteligência e o entendimento.”*

Provérbios 2:6

RESUMO

Criado por meio da Resolução CONSUP/IFG nº 43, de 13/11/2012. O curso de Engenharia Elétrica do IFG *Câmpus* Goiânia forma profissionais capacitados para atuar nas diversas áreas da engenharia elétrica, preparando os estudantes para lidar com desafios e demandas do mercado de trabalho, por meio de sólida formação em conhecimentos teóricos e práticos (IFG, 2016). Já a EMC/UFG desde 1964 contribui para a formação de engenheiros eletricitas no estado de Goiás. O Engenheiro Eletricista é o profissional responsável por projetar, executar e acompanhar os projetos de sistemas elétricos, dentre eles os sistemas fotovoltaicos. Dessa maneira, na formação acadêmica, o engenheiro eletricista necessita adquirir base teórica e prática a respeito do funcionamento de sistemas fotovoltaicos, realizando práticas nos equipamentos que compõem esses sistemas, tais como: módulos fotovoltaicos, inversores, controladores de carga.

O objetivo do trabalho é propor experimentos didáticos para bancada móvel ESF do IFG *Câmpus* Goiânia e para primeira etapa do Fóton Lab na Universidade Federal de Goiás (UFG) propondo atividades de prática laboratorial, agregando conhecimentos à formação dos futuros engenheiros eletricitas formados no IFG e na EMC/UFG. Dentre os resultados desse trabalho estão a disponibilização de roteiros para experimentos em atividades de ensino, pesquisa e extensão envolvendo sistemas *on-grid* (bancada móvel ESF IFG) e *off-grid* (FótonLab UFG).

Palavras-chave: Bancada didática fotovoltaica; roteiro experimental; Fóton Lab.

ABSTRACT

Created by means of the CONSUP/IFG Resolution nº 43, from 11/13/2012. The Electrical Engineering course at the IFG *Câmpus* Goiânia trains professionals able to work in various areas of electrical engineering, preparing students to deal with challenges and demands of the labor world, through solid training in theoretical and practical knowledge (IFG, 2016). Since 1964, EMC/UFG has contributed to the education of electrical engineers in the state of Goiás. The Electrical Engineer is the professional responsible for designing, executing, and monitoring the projects of electrical systems, among them the photovoltaic systems. Thus, in the academic formation, the electrical engineer needs to acquire theoretical and practical basis regarding the operation of photovoltaic systems, performing practices on the equipment that compose these systems, such as: photovoltaic modules, inverters, and load controllers.

The goal of the work is to propose didactic experiments for IFG *Câmpus* Goiânia's ESF mobile bench and for the first stage of the Photon Lab at the Federal University of Goiás (UFG), proposing laboratory practice activities, adding knowledge to the education of future electrical engineers trained at IFG and EMC/UFG. Among the results of this work are the availability of scripts for experiments in teaching, research and extension activities involving, on-grid (mobile bench IFG) and off-grid (Fóton Lab UFG) systems.

Keywords: Photovoltaic bench; experimental script; Fóton Lab.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz elétrica brasileira.....	17
Figura 2 - OIE por fonte.....	18
Figura 3 - Potência instalada fotovoltaica.....	18
Figura 4 - Ângulos Geometria Terra – Sol.....	23
Figura 5 - Geometria Terra/Sol (ângulos).....	24
Figura 6 - Geometria Terra/Sol (ângulos).....	25
Figura 7 - Tipos de conversões de energia.....	25
Figura 8 - Sistema <i>off-grid</i> em carga CC.....	27
Figura 9 - Sistema fotovoltaico com conexão <i>off-grid</i> em carga CA.....	27
Figura 10 - Sistema fotovoltaico com conexão <i>on-grid</i>	28
Figura 11 - Nível de Energia entre os materiais.....	29
Figura 12 - Efeito fotovoltaico.....	30
Figura 13 - Curvas I-V módulo fotovoltaico vs. Irradiância.....	31
Figura 14 - Curvas I-V módulo fotovoltaico vs. Temperatura.....	32
Figura 15 - Módulo fotovoltaico sujo.....	33
Figura 16 - Curva I-V efeitos do sombreamento.....	33
Figura 17 - Funcionamento normal do Módulo Fotovoltaico.....	34
Figura 18 - Funcionamento do Módulo Fotovoltaico com sombreamento.....	34
Figura 19 - Exemplo de conexão controlador de carga.....	35
Figura 20 - Conexões inversor bancada móvel.....	36
Figura 21 - Exemplo de conexão utilizando um inversor interativo.....	37
Figura 22 - Curva característica I-V e P-V módulo.....	37
Figura 23 - Bancada móvel IFG.....	42
Figura 24 - Montagem dos equipamentos no FótonLab.....	44
Figura 25 - Local de instalação do sistema <i>off-grid</i> do FótonLab/UFG.....	45
Figura 26 - Realização de experimentos com a bancada móvel.....	47
Figura 27 - Atividade prática.....	50
Figura 28 - Imagem termográfica.....	54
Figura 29 - Avaliação funcionalidade da bancada móvel.....	55
Figura 30 - Avaliação dos experimentos pelos alunos.....	56
Figura 31 - Sistema fotovoltaico <i>off-grid</i>	64

Figura 32 - Sistema fotovoltaico <i>on-grid</i>	65
Figura 33 - Módulos ESF Bancada Móvel IFG Goiânia.....	66
Figura 34 - Inversor Bancada Móvel ESF IFG Goiânia.....	66
Figura 35 - MPPT Fóton Lab.....	67
Figura 36 - Bateria Fóton Lab.....	67
Figura 37 - Visão geral dos componentes da Bancada Móvel ESF.....	67
Figura 38 - Diagrama Unifilar da Bancada Móvel ESF IFG Goiânia.....	68
Figura 39 - Formação arco-voltaico nos conectores mc-04 dos módulos fotovoltaicos.....	69
Figura 40 - Nível de energia entre os materiais.....	71
Figura 41 - O efeito fotovoltaico na junção pn.....	71
Figura 42 - Etapa 1 efeito fotovoltaico.....	72
Figura 43 - Etapa 2 módulos sem obstrução.....	72
Figura 44 - Funcionamento normal do módulo fotovoltaico.....	74
Figura 45 - Funcionamento do módulo fotovoltaico com sombreamento.....	75
Figura 46 - Influência da radiação solar na operação do módulo ESF.....	78
Figura 47 - Curvas I-V módulo de ESF em função da temperatura.....	79
Figura 48 - Módulo fotovoltaico sujo.....	79
Figura 49 - Bancada móvel etapas experimeto-4.....	80
Figura 50 - Componentes da radiação solar.....	84
Figura 51 - Diagrama de sombreamento (Pvsyst).....	85
Figura 52 - Bancada móvel com tilt 0°.....	86
Figura 53 - Bancada móvel com tilt 15°.....	87
Figura 54 - Bancada móvel com tilt 30°.....	87
Figura 55 - Bancada móvel com tilt 45°.....	88
Figura 56 - Irradiação prevista para Goiânia (23/05/2023).....	88
Figura 57 - Ábaco potencial de irradiação solar em Goiânia.....	89
Figura 58 - Conexões inversor bancada móvel.....	91
Figura 59 - Forma de onda senoidal pura, modificada e quadrada.....	91
Figura 60 - Curva I-V pontos notáveis.....	93
Figura 61 - Posicionamento ideal para análise termográfica.....	95
Figura 62 - Padrão de falhas identificadas em módulos fotovoltaicos.....	97
Figura 63 - Conector MC-04 com mal contato.....	97
Figura 64 - Simulação de sombreamento sobre o módulo.....	98

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AC	Corrente Alternada
ANEE	Agência Nacional de Energia Elétrica
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar
AM	Massa atmosférica
CONFEA	Conselho Federal de Engenharia e Arquitetura
CONSUP	Conselho Superior do IFG
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
DC	Corrente Contínua
DDP	Diferença de Potencial Elétrico
EMC	Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da UFG
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ESF	Energia Solar Fotovoltaica
Fóton Lab	Laboratório de Energia Fotovoltaica da UFG
GD	Geração Distribuída
IFG	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
TUSD Fio B	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
UFG	Universidade Federal de Goiás
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
NDE	Núcleo Docente Estruturante
NOTC	<i>Nominal Operating Cell Temperature</i>
PMP	Ponto de Máxima Potência
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Identificação de parâmetros do módulo fotovoltaico.....	65
Tabela 2 - Identificação de parâmetros do inversor.....	66
Tabela 3 - Valores medidos após ligar a bancada.....	72
Tabela 4 - Valores medidos após ligar a bancada (sem carga).....	73
Tabela 5 - Medidas (sem sombreamento).....	75
Tabela 6 - Medidas (parcialmente sombreado).....	75
Tabela 7 - Medidas (totalmente sombreado).....	76
Tabela 8 - Etapa 1 experimento 4.....	80
Tabela 9 - Irradiância estimada sem e com obstrução.....	81
Tabela 10 - Efeitos da temperatura/sujidade na geração.....	82
Tabela 11 - Experimento ângulo de incidência tilt 0°.....	86
Tabela 12 - Experimento ângulo de incidência tilt 15°.....	87
Tabela 13 - Experimento ângulo de incidência tilt 30°.....	87
Tabela 14 - Experimento ângulo de incidência tilt 45°.....	88
Tabela 15 - Valores entrada CC e saída CA.....	92
Tabela 16 - Valores potência de entrada e saída.....	92
Tabela 17 - Eficiência do inversor.....	93

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Objetivos.....	19
1.1.1 Objetivo Geral.....	19
1.1.2 Objetivos Específicos.....	19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1 Conceitos.....	21
2.2 Histórico Energia Solar.....	22
2.3 A Geometria Terra – Sol.....	22
2.3.1. Ângulos de interesse em Energia Solar.....	23
2.4 Sistemas fotovoltaicos.....	25
2.4.1 Sistema isolado (<i>off-grid</i>).....	26
2.4.2 Sistema conectado à rede (<i>grid-tie</i>).....	27
2.4.3 Efeito Fotovoltaico.....	28
2.4.4 Os Efeitos da irradiância, temperatura e sujidade.....	30
2.4.5 Sombreamento e seu impacto na geração fotovoltaica.....	33
2.4.6 O Controlador de carga.....	35
2.4.7 O Inversor de frequência.....	36
2.5 Marco Legal no Brasil.....	38
2.5.1 Resoluções 482/2012 e 687/2015.....	38
2.5.2 Lei nº 14.300/2022.....	39
2.6 Papel do engenheiro eletricista de sistemas fotovoltaicos.....	39
2.7 A Prática Laboratorial.....	40
3. METODOLOGIA.....	41
3.1 Método da Abordagem.....	41
3.2 Método Científico.....	41
3.3 Método de procedimento.....	42
3.4 Bancada Móvel ESF IFG <i>Câmpus</i> Goiânia.....	42
3.5 O Fóton Lab UFG.....	43
3.5.1 Histórico do Fóton Lab na EMC/UFG.....	44
3.6 Mudanças no PPC dos cursos de engenharia elétrica do IFG e UFG.....	45
4. MODELOS DE LABORATÓRIOS DIDÁTICOS.....	47

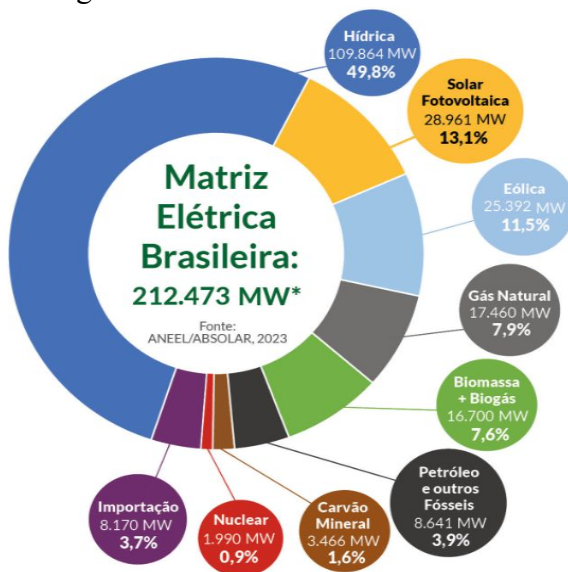
4.1 Laboratório de Demonstrações.....	47
4.2 Laboratório de Projetos.....	48
4.3 Laboratório Tradicional.....	48
4.4 Laboratório didático tipo <i>Fading</i>	49
5. EXPERIMENTOS SUGERIDOS.....	50
5.1 Conhecendo a bancada móvel ESF e seus componentes.....	50
5.2 Estudo do efeito fotovoltaico.....	51
5.3 Sombreamento.....	51
5.4 Irradiância, temperatura e sujidade.....	52
5.5 Os Efeitos da inclinação e direção dos módulos ESF na irradiância absorvida.....	52
5.6 Estudo do comportamento dos equipamentos alimentado cargas.....	53
5.7 Uso de imagens termográficas no diagnóstico de falhas em módulos ESF.....	53
6. RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	55
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
APÊNDICE A – ROTEIROS DE EXPERIMENTOS E PRÁTICAS LABORATORIAIS.....	62
Experimento 1 – Conhecendo a bancada móvel ESF e seus componentes.....	63
Experimento 2 – Estudo do efeito fotovoltaico.....	70
Experimento 3 – Sombreamento.....	74
Experimento 4 – Irradiância, temperatura e sujidade.....	77
Experimento 5 – Inclinação e direção dos módulos ESF.....	84
Experimento 6 – Alimentando cargas CA.....	90
Experimento 7 – Uso de imagens termográficas no diagnóstico de falhas.....	95
APÊNDICE B – SIMULAÇÃO DA BANCADA MÓVEL NO <i>PVSYST</i>	99
APÊNDICE C – SIMULAÇÃO DO FÓTON LAB NO <i>PVSYST</i>	115
ANEXO A – <i>DATASHEET</i> INVERSOR PHB780XS 780W.....	124
ANEXO B – <i>DATASHEET</i> MÓDULO ESF <i>EAGLE</i> 72P 320-340 W JINKO.....	127
ANEXO C – <i>DATASHEET</i> MÓDULO ESF <i>CHEETAH</i> HC 72M 390-410W JINKO.....	130
ANEXO D – <i>DATASHEET</i> MÓDULO FOTOVOLTAICO <i>CANADIAN SOLAR</i> 330W.....	133
ANEXO E – <i>DATASHEET</i> INVERSOR <i>PHOENIX</i> 24V/375A.....	136
ANEXO F – <i>DATASHEET</i> <i>MPPT BLUESOLAR</i> 75V 15A 12V/24V.....	139
ANEXO G – ROTEIROS DE EXPERIMENTOS VERSÃO PARA IMPRESSÃO.....	141

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, no mundo todo cresce a demanda por energia elétrica, pois ela é necessária para mover as economias, sendo um dos principais pilares para o crescimento da indústria e setor de serviços de um país: motores elétricos na indústria, iluminação das cidades, eletroeletrônicos, veículos elétricos, telecomunicações dentre tantas outras possibilidades de seu uso. O aumento da demanda por energia cresce na medida que o consumo aumenta nas cidades e na indústria. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética haverá um crescimento de 3,4% ao ano entre 2022 e 2026 na carga instalada no Brasil (EPE, 2022).

Com o aumento da demanda por consumo de energia e os crescentes gargalos para geração de energia de fonte hídrica, devido aos altos investimentos, aos impactos ambientais e às constantes estiagens que afetam o volume de água dos reservatórios fica latente a necessidade de diversificação da matriz elétrica brasileira, a qual pode ser vista na Figura 1.

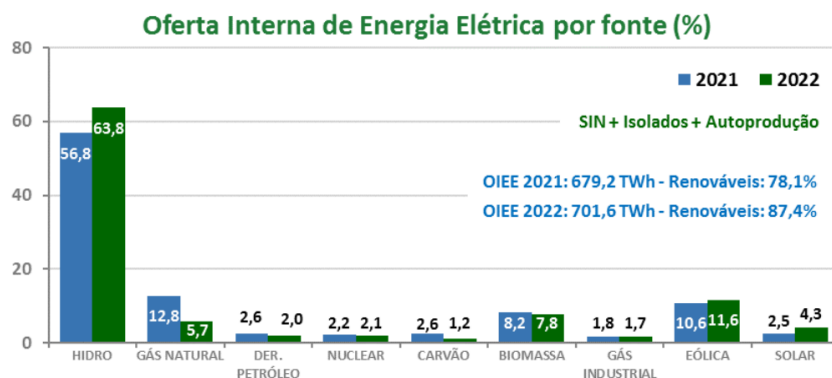
Figura 1 - Matriz elétrica brasileira



Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2023

Nesse sentido, o Ministério de Minas e Energias (MME, 2023), em relatório de dezembro de 2022 aponta um crescimento de demanda por eletricidade em todos os setores econômicos: comercial em 6,3%, residencial em 1,4% e industrial 0,8%, no acumulado do ano, quando comparado a 2021. Diante do crescimento da demanda e considerando as dificuldades para oferta de combustíveis fósseis, o aumento da oferta por meio de fontes alternativas faz-se necessária, conforme visto na Figura 2.

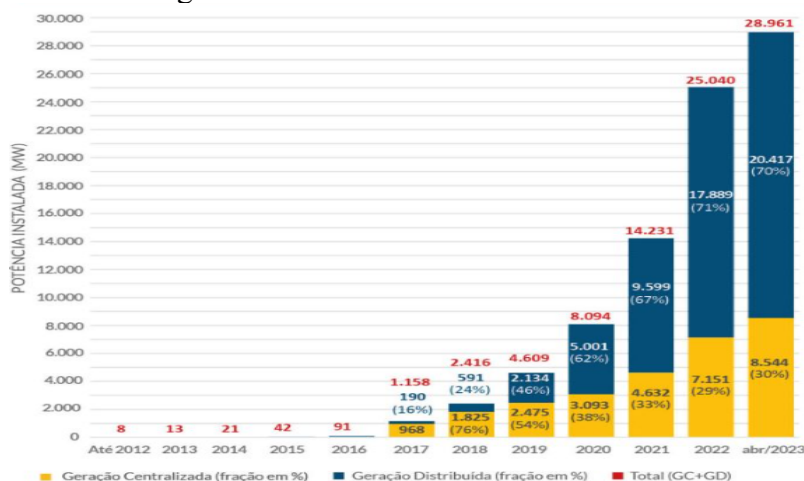
Figura 2 - OIE por fonte



Fonte: MME, 2023

Nesse contexto, a geração de energia solar fotovoltaica, surge como alternativa de – energia renovável e limpa – cuja capacidade instalada de GD, que é a geração elétrica realizada por consumidores cativos, não independentes, e que tem participação do sistema de compensação, cresceu 90% em 2022 em relação à 2021 (MME, 2023). Nos últimos 10 anos a potência instalada saltou de 8 MW para mais de 28 GW, conforme vemos na Figura 3. Para 2023 é previsto superar 24 GW instalados, assim a matriz solar será a segunda principal fonte de energia elétrica no país. Contextualizando no âmbito regional, Goiás está em 7º em GD, com 695,5 MW de potência instalada, sendo Goiânia a 8ª cidade com a maior potência instalada, com 116,9 MW. (ANEEL/ABSOLAR, 2023).

Figura 3 - Potência instalada fotovoltaica



Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2023

O IFG *Câmpus* Goiânia atento ao cenário atual promoveu mudança no PPC do curso de Engenharia Elétrica, em 2022, ofertando disciplinas que abordam sistemas fotovoltaicos, com destaque para Fontes Alternativas de Energia e Eficiência Energética. Bem como na pós-

graduação, por meio do Mestrado Profissional em Tecnologia, Gestão e Sustentabilidade com linha de pesquisa em Energias Renováveis (IFG PPC, 2022). Também a UFG por meio da EMC – Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação realizou em 2019 a terceira alteração no PPC do curso de Engenharia Elétrica, alicerçada no tripé do ensino, pesquisa e extensão, objetivando ofertar novas disciplinas que reflitam as necessidades do mercado de trabalho. A UFG é a maior instituição pública de ensino superior do Estado de Goiás, sendo a EMC responsável pela oferta de 3 cursos de graduação, 5 especializações, 2 mestrados e 1 doutorado, com 1094 alunos matriculados nos cursos de graduação (UFG, 2016), tendo a responsabilidade de acompanhar as mudanças tecnológicas capacitando seus alunos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é propor experimentos e práticas laboratoriais para que haja transferência de conhecimento por meio da capacitação de profissionais para o mercado de trabalho, com foco em novas tendências da área de sistemas de energia solar fotovoltaicos.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos a serem alcançados são:

- experimentos e práticas laboratoriais para bancada móvel de energia solar fotovoltaica (ESF) do IFG (*on-grid*) e Foton Lab UFG (*off-grid*);
- ações na graduação em engenharia elétrica e nos cursos técnicos integrados ofertados no IFG em relação à formação prática profissional e
- montar um sistema de geração *off-grid* para o laboratório de Energia Solar Fotovoltaica Fóton Lab/UFG.

1.1.3 Justificativa

No Brasil, desde 2012 já foram investidos mais de R\$ 143,4 bilhões em sistemas fotovoltaicos, gerando mais 868,8 mil empregos diretos e indiretos, com mais de R\$ 42,7 bilhões arrecadados em tributos, além de evitar que 36,7 milhões de toneladas de CO₂ fossem emitidas na atmosfera (ANEEL/ABSOLAR, 2023). Diante da importância e relevância justifica-se a urgente oferta de disciplinas que abordem sistemas fotovoltaicos no currículo do curso de engenharia elétrica do IFG e da UFG.

O perfil do engenheiro eletricista requer, para sua formação acadêmica, adquirir conhecimentos teóricos sobre os sistemas fotovoltaicos e saber aplicá-los na prática, aprendendo a projetar, montar, operar e fazer medições nos equipamentos que compõem esses sistemas, sendo este trabalho uma proposta objetiva que propõem experimentos e práticas laboratoriais para bancada móvel ESF do IFG e para o Fóton Lab/UFG.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Conceitos

A Energia Elétrica é hoje indispensável para a sociedade atual. Sendo necessária para mover as cidades, a indústria e as atividades agropecuárias. A Matriz Energética, que pode ser definida como conjunto de meios disponíveis para a geração de energia é composta por fontes renováveis ou não renováveis. Atualmente há diversas pesquisas para diversificar a matriz energética, seja no Brasil ou no mundo, tendo por foco as tecnologias que privilegiem recursos renováveis, já que os recursos naturais são escassos e finitos. Assim, a Energia Solar por ser de uma fonte renovável, desponta como ativo atraente para o mercado econômico e se faz necessário seu conhecimento no ambiente acadêmico. (PINHO, 2014)

Os sistemas fotovoltaicos são baseados na obtenção de energia elétrica por meio da conversão de energia oriunda da irradiância solar sobre as fotocélulas dos módulos ESF, sendo a energia solar uma matriz renovável e limpa. Os sistemas fotovoltaicos compreendem, basicamente, um conjunto de módulos fotovoltaicos, inversor, fotocélulas, controlador de carga e baterias, em sistemas *off-grid*. Já os sistemas *on-grid* estão conectados à rede injetando o excedente da produção, sem necessidade de armazená-lo em baterias, os quais são abordados nesse trabalho, sendo seu conhecimento muito importante para a formação acadêmica do futuro engenheiro eletricitista, já que possibilita ao mesmo que aprenda fundamentos inerentes à energia, e suas diversas fontes e transformações. (PINHO, 2014)

A Geração de energia a partir da luz do Sol pode ser entendida como geração por meio da conversão direta de radiação solar em eletricidade, através de um componente chamado célula fotovoltaica, com o surgimento de uma tensão caracterizando o efeito fotovoltaico. O físico francês Edmund Becquerel observou esse fenômeno em 1839, obtendo uma tensão entre os eletrodos imersos em uma solução condutora, quando submetida à luz solar.

A conversão direta da energia solar em eletricidade é um processo de geração de energia fotovoltaica que é considerado forma de obtenção de energia limpa, já que não produz resíduos diretos e nem libera calor residual, não alterando dessa forma o meio ambiente. Isso a torna uma fonte energética renovável e viável economicamente, sendo, portanto, uma tecnologia energética promissora em crescimento e bastante pesquisada no Brasil e no Mundo. (PINHO, 2014). No entanto, não se pode deixar de mencionar que o descarte de

certos componentes do sistema gera resíduos, dentre eles os módulos fotovoltaicos e as baterias, ambos sendo nocivos ao meio ambiente.

2.2 Histórico Energia Solar

Em 1839 o físico francês Edmund Becquerel observou o processo de conversão da energia solar em elétrica pela primeira vez, ele obteve uma diferença de potencial elétrico (ddp) entre eletrodos metálicos imersos em substância química formada de oxigênio líquido. Tal evento veio a ser confirmado novamente em 1887, dessa vez pelo físico alemão Heinrich Hertz.

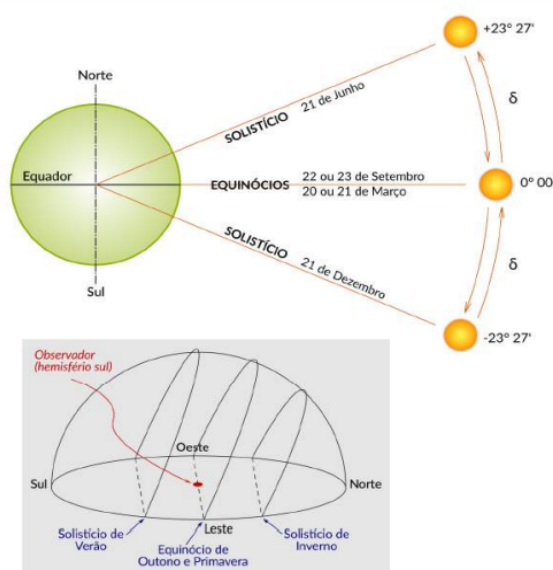
O fenômeno fotoelétrico foi constatado pelo engenheiro eletricista inglês Smith Willoughby num semiconductor de cristais selênio, quando pesquisava sobre fotossensores e fotocélulas. Mas foi o físico alemão Albert Einstein quem modelou matematicamente o efeito fotoelétrico em 1921, por meio da física quântica. Outras descobertas se sucederam, notadamente o uso CdSe (seleneto de cádmio) em 1932. Mas foram os trabalhos do químico Calvin Fuller dos laboratórios Bell e do cientista Russel Shoemaker em 1954 que resultaram na criação da célula solar como tem-se hoje. Em 1958 tem-se o início do uso de painéis solares e desde então a capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos tem crescido no mundo todo.

2.3 A Geometria Terra – Sol

A variação da incidência solar na superfície terrestre é determinada por 2 movimentos da Terra: a translação e a rotação. Na translação, durante 365 dias a Terra descreve uma trajetória elíptica ao redor do sol, sendo que as estações do ano são determinadas pela obliquidade da eclíptica, que representa $23,45^\circ$ na variação do eixo da Terra em relação à reta normal do plano dessa trajetória. No movimento de rotação, durante 24 horas ela gira em torno do seu eixo, determinando a formação dia e noite. (LABREN, 2017)

O ângulo de vértice no centro da Terra, também chamado de declinação solar é formado por semirretas que são definidas pela direção do sol em relação ao plano do equador. Nas primaveras e nos outonos, observamos que dia e noite possuem a mesma duração, devido o posicionamento do sol está exatamente sobre a linha do equador, esse posicionamento, chamamos de Equinócios tais períodos, portanto o ângulo de declinação solar (δ) é zero, conforme pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 - Ângulos Geometria Terra – Sol



Fonte: CCST/INPE, 2017

No inverno e no verão, dia e noite possuem durações diferentes, devido ao posicionamento do sol não estará exatamente sobre a linha do equador, têm-se assim os solstícios, nesse período o ângulo de declinação solar (δ) é $23,45^\circ$.

Podemos deduzir que a incidência da radiação solar é intermitente, não estando disponível a qualquer tempo, pois depende do posicionamento do sistema de captação e de variações meteorológicas, período do dia e estação do ano. Na maior parte do Brasil, assim como em todo hemisfério sul, os raios solares têm direção norte/sul quase o ano todo, sendo aconselhável nas instalações fotovoltaicas o direcionamento dos painéis solares para o norte para melhor incidência da radiação solar. (LABREN, 2017)

2.3.1. Ângulos de interesse em Energia Solar

Os ângulos de interesse para energia solar são determinados entre a Terra e o Sol, sendo alguns de importante destaque na análise da geometria Terra – Sol. Esses ângulos são importantes para determinar a melhor orientação e inclinação dos painéis solares, garantindo uma captação eficiente da radiação solar e maximizando a geração de energia elétrica. Estão ilustrados nas Figuras 5 e 6, sendo eles:

- Ângulo Zenital (θ_z): É o ângulo formado pelos raios solares e a linha vertical (zênite). Varia ao longo do dia e das estações do ano, afetando a intensidade da radiação solar recebida;

- Ângulo Elevação Solar (α): É o ângulo entre os raios solares e a projeção desses raios sobre o plano horizontal. Representa a altura do sol acima do horizonte;

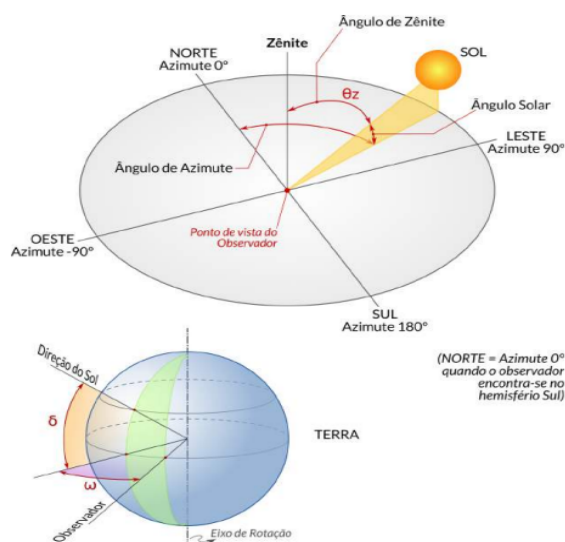
- Ângulo Azimutal Solar (γ_s): É o ângulo entre a projeção dos raios solares sobre o plano horizontal e a direção norte-sul. Determina a posição angular do sol em relação ao norte, por convenção, é positivo caso a projeção se encontre à direita da direção norte-sul e negativo caso contrário;

- Ângulo Azimutal da Superfície – Azimute (γ): É o ângulo entre a projeção da normal à superfície dos painéis solares sobre o plano horizontal e a direção norte-sul. Indica a orientação angular dos painéis solares em relação ao norte.

- Inclinação da Superfície (β): É o ângulo entre o plano da superfície dos painéis solares e o plano horizontal. Determina a inclinação dos painéis em relação à horizontalidade do terreno.

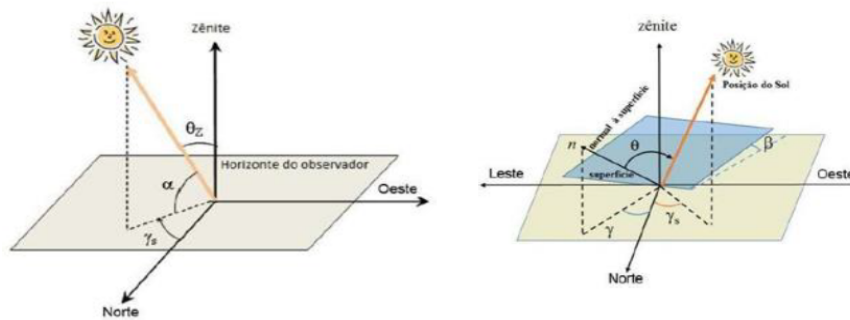
- Ângulo de Incidência (θ): É o ângulo entre os raios solares e a normal à superfície dos painéis solares. Indica a inclinação da radiação solar incidente em relação à superfície dos painéis.

Figura 5 - Geometria Terra/Sol (ângulos)



Fonte: CCST/INPE, 2017

Figura 6 - Geometria Terra/Sol (ângulos)

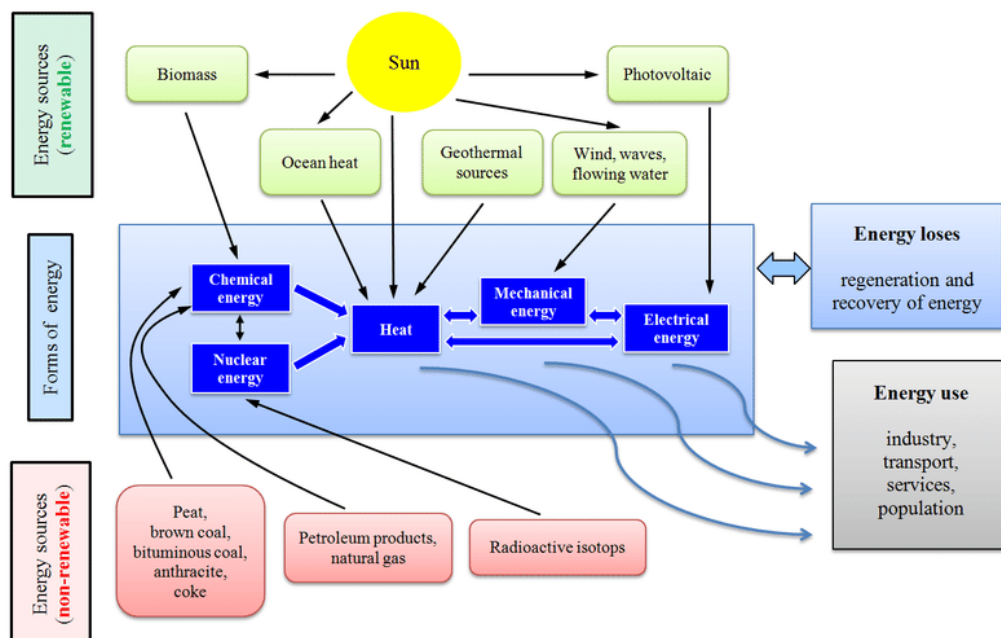


Fonte: CCST/INPE, 2017

2.4 Sistemas fotovoltaicos

A possibilidade de aferir formas diferentes de energia permite estudar fenômenos elétricos, discorrer sobre suas transformações por meio de conversão por meio de diferentes processos, viabilizando que um sistema de uma matriz energética possa alimentar um outro sistema baseado em outro tipo de matriz energética, como visto na Figura 7.

Figura 7 - Tipos de conversões de energia



Fonte: Legemza, 2023

Neste trabalho, aborda-se a forma como a captação da radiação solar e sua respectiva conversão em energia elétrica por meio da célula fotovoltaica pode alimentar dispositivos que operam com energia elétrica.

Podemos classificar os Sistemas Fotovoltaicos em 2 categorias principais: sistemas isolados (*off-grid*) e sistemas conectados à rede (*grid-tie*). Segundo Pinho e Galdino:

[...] Os Sistemas Fotovoltaicos (SFV) podem ser classificados em duas categorias principais: isolados e conectados à rede. Em ambos os casos, podem operar a partir apenas da fonte fotovoltaica ou combinados com uma ou mais fontes de energia, quando são chamados de híbridos. A utilização de cada uma dessas opções depende da aplicação e/ou da disponibilidade dos recursos energéticos. (PINHO; GALDINO, 2014, P.255)

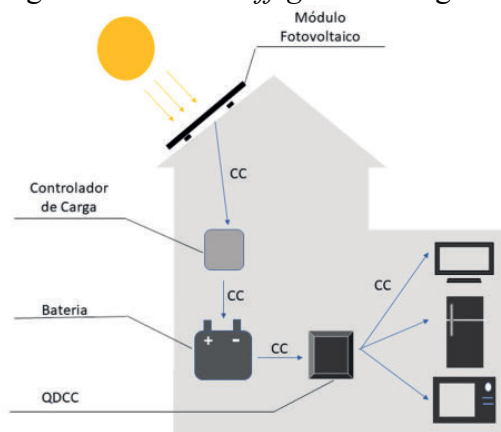
2.4.1 Sistema isolado (*off-grid*)

Do inglês *off-grid* ou fora da rede, também chamado sistema autônomo, esse sistema foi concebido como solução mais econômica e confiável para obter energia elétrica. Apresenta como principal característica o fato de não estar conectado à rede elétrica.

Os sistemas fotovoltaicos são compostos pela fotocélula, controlador de carga, inversor e baterias, quando *off-grid*. Sendo a célula fotovoltaica um dispositivo de material semicondutor ela é o elemento fundamental do processo de conversão de energia solar em energia elétrica. Já o inversor desempenha papel importante no sistema pois é responsável por converter a energia elétrica em corrente contínua (DC) em energia elétrica em corrente alternada (AC). O controlador de carga é responsável por controlar os efeitos da sobrecarga e descarga nas baterias do sistema. As baterias são responsáveis pelo armazenamento da energia DC fruto da conversão da energia solar convertida nas fotocélulas.

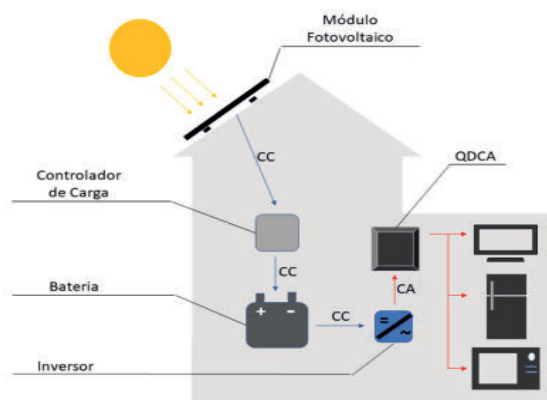
As instalações residenciais com geração fotovoltaica, representam um exemplo, do consumo de energia sendo suprido apenas pela geração fotovoltaica, principalmente em áreas rurais. Nessas instalações, nos horários com pouca incidência de radiação solar ou mesmo na sua ausência, o suprimento é fornecido pelas baterias que estão conectados em paralelo ao sistema, ou seja, com incidência solar o suprimento é fornecido pelo gerador fotovoltaico, na ausência da luz solar o suprimento é mantido pela energia armazenada nas baterias. Uma possível configuração é mostrada na Figura 8 em cargas CC e Figura 9 em cargas CA.

Figura 8 - Sistema *off-grid* em carga CC



Fonte: *International Copper Association Brazil*. 2023

Figura 9 - Sistema fotovoltaico com conexão *off-grid* em carga CA



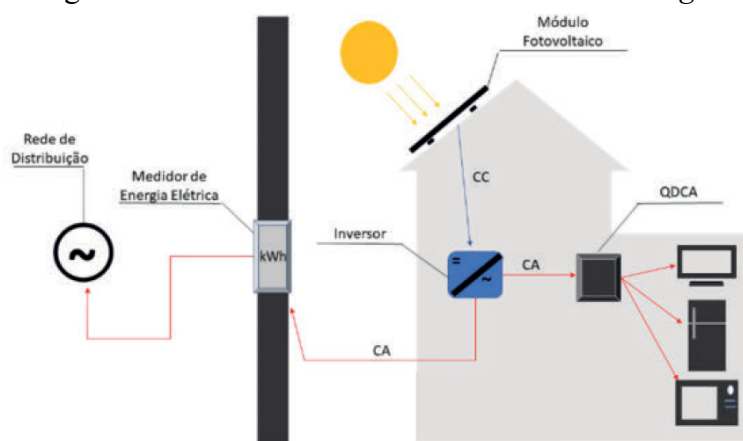
Fonte: *International Copper Association Brazil*. 2023

2.4.2 Sistema conectado à rede (*grid-tie*)

Novas tecnologias em inversores e *smart meter* – medidores inteligentes de energia –, permitiram conceber uma configuração de ligação dos sistemas fotovoltaicos denominada *on-grid* (*grid-tie*). Nesta configuração, os sistemas fotovoltaicos são conectados à rede da concessionária de energia elétrica. Dessa forma, quando há excedente na geração fotovoltaica, tal excedente é inserido na rede de distribuição da concessionária, retornando como descontos na fatura do consumidor e/ou microgerador/minigerador. No caso do prosumidor, consumidor que produz energia, se a geração local não consiga suprir a demanda interna, a rede elétrica da concessionária mantém a potência na carga.

Nas instalações que usam a arquitetura *grid-tie* o medidor de energia deve ser do tipo *smart meter* (medidor inteligente) ou do tipo bidirecional, que meça e armazene os dados lidos, tanto na entrada de rede como na saída do gerador do sistema fotovoltaico. Comparado ao sistema *off-grid*, o *grid-tie* é eficiente, na medida que garante que toda geração será usada localmente ou disponibilizada na rede de distribuição da concessionária de energia. Na Figura 10 a ilustração de um sistema *grid-tie* (PINHO, 2014). Existem também os sistemas fotovoltaicos híbridos que reúnem características dos inversores *off-grid* e *on-grid*, também chamados de sistema fotovoltaico com bateria conectado à rede, mas esses não serão abordados no presente trabalho (PORTAL SOLAR, 2021). O objetivo é produzir experimentos que possam ser praticados na bancada móvel de ESF do IFG (*on-grid*) bom como no Fóton Lab UFG (*off-grid*).

Figura 10 - Sistema fotovoltaico com conexão *on-grid*



Fonte: *International Copper Association Brazil*. 2023

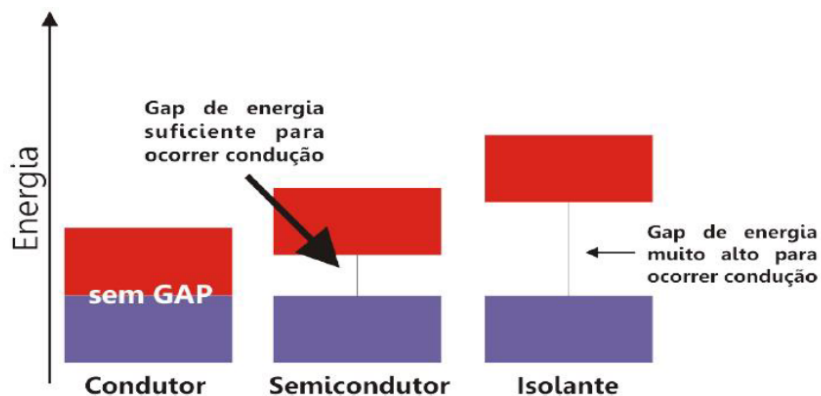
2.4.3 Efeito Fotovoltaico

Quando um material semicondutor fica exposto à luz, sendo esta luz de qualquer fonte, os elétrons se movimentam através das bandas de energia. Os materiais semicondutores são usados na produção das células fotovoltaicas, o que possibilita a geração de corrente elétrica, dessa forma, convertendo diretamente a energia solar para elétrica.

Os semicondutores são materiais que apresentam dois comportamentos distintos: podem se comportar como materiais condutores ou materiais isolantes a depender dos fatores aos quais estão submetidos, tais como: temperatura, radiação incidente, pressão, dentre outros. Os semicondutores apresentam um “*Gap de Energia*” entre as bandas de condução e valência,

podendo ser entendido como um intervalo entre as bandas, sendo suficiente para passagem de elétrons e assim estabelecer uma corrente, conforme Figura 11.

Figura 11 - Nível de Energia entre os materiais

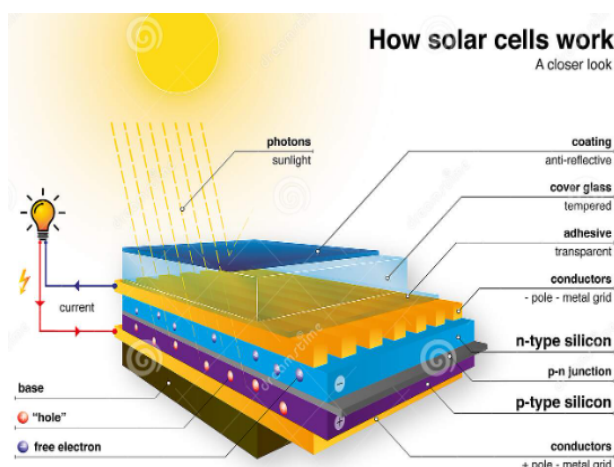


Fonte: CADERNO DIDÁTICO/UFSC, 2015

Normalmente a banda de valência dos materiais semicondutores está completa, e a banda de condução vazia. Nestas condições os elétrons da camada de valência obtêm energia cinética, conseguem quebrar ligações alcançando seu estado livre. Tal fenômeno acontece quando eles recebem fótons de radiação eletromagnética, dentro do espectro visível, ou seja, os elétrons da camada de valência podem saltar para a camada de condução, gerando dentro estrutura cristalina do semicondutor uma corrente elétrica.

Atualmente os semicondutores mais indicados para conversão fotovoltaica são: o silício amorfo hidrogenado (a-Si:H) e o silício cristalino (c-Si), bastante utilizados. O silício cristalino é o material dominante em tecnologias fotovoltaicas. Tem-se uma diferença estrutural e também uma distinção na viabilidade econômica entre eles, no entanto, há várias pesquisas, empenhadas no desenvolvimento de tecnologias que visam otimizar custos e eficiência dessas células ESF. A Figura 12 ilustra o efeito fotovoltaico na junção PN.

Figura 12 - Efeito fotovoltaico



Fonte: www.nucleoats.ind.br/

2.4.4 Os Efeitos da irradiância, temperatura e sujidade

A célula fotovoltaica converte a energia que chega na forma de luz solar em energia elétrica. A taxa na qual essa energia na forma luminosa chega à célula por unidade de área (ou densidade superficial de potência) é chamada de irradiância, que é simbolizada pela letra *G* maiúscula e medida em Watt por metro quadrado.

$$Irradiância = G \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad [1]$$

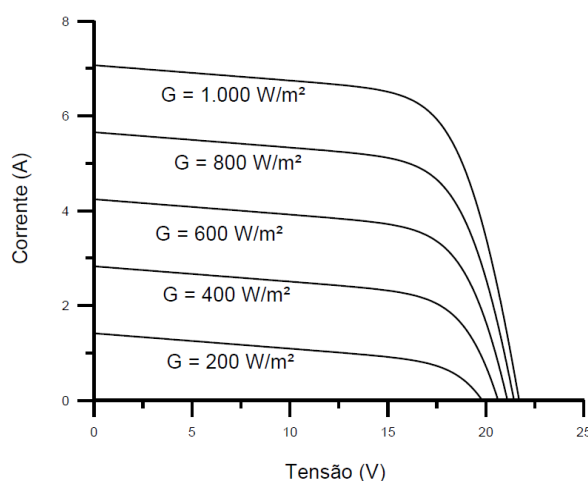
A irradiância varia durante o dia, conforme o horário e a disponibilidade da incidência dos raios solares além da massa atmosférica (AM). Ou seja, as condições climáticas influenciam diretamente na irradiância. Em laboratório são realizados ensaios padronizados, chamados de STC (*standard test conditions*), que estabelecem padrões, onde os valores encontrados referenciam os parâmetros de entrada, inclusive a irradiância (PINHO, 2014).

$$GSTC = 1000 \left[\frac{W}{m^2} \right] = 1 \text{ sol pleno} \quad [2]$$

Os valores padronizados servem como comparativo entre módulos ESF de diferentes fabricantes. Outros dados relevantes disponibilizados no STC são: temperatura da célula a 25° C, incidência normal e espectro solar AM 1.5.

A limpeza da superfície do módulo fotovoltaico é uma condição importante a ser considerada, pois sujeira na superfície dos módulos fotovoltaicos compromete a incidência dos raios solares sobre a célula fotovoltaica. A corrente elétrica que o módulo de ESF pode fornecer depende diretamente da intensidade da radiação solar que incide sobre as células fotovoltaicas. Com 1 sol pleno, ou seja, 1000 W/m^2 de irradiância, o módulo é capaz de fornecer a corrente máxima especificada no datasheet (25°C). Essa corrente máxima fornecida pelo módulo é diretamente proporcional à irradiância (PINHO, 2014). Na situação de pouca incidência luminosa a capacidade de geração de energia fica comprometida, como visto na Figura 13, que mostra o efeito causado pela variação da irradiância solar sobre a curva I-V para um módulo fotovoltaico de 36 células de silício cristalino (c-Si) 25°C .

Figura 13 - Curvas I-V módulo fotovoltaico vs. Irradiância



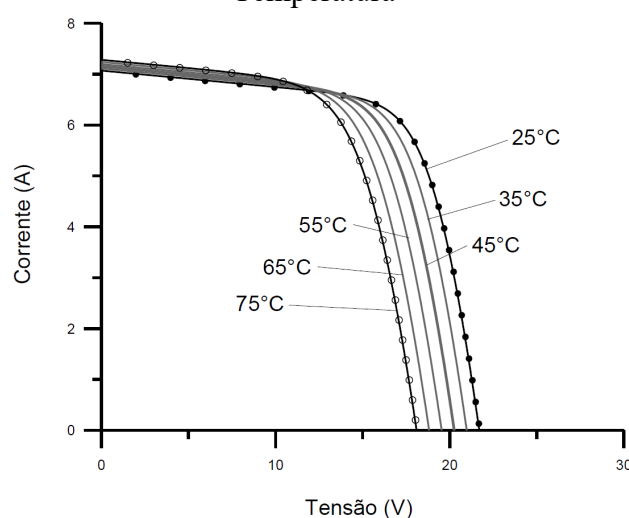
Fonte: PINHO, 2014

Já a temperatura tem influência significativa na tensão e corrente dos módulos fotovoltaicos. A tensão do módulo diminui à medida que a temperatura aumenta, pois, a taxa de recombinação de portadores de carga (elétrons e lacunas) dentro das células solares aumenta, o que leva a uma diminuição da tensão de saída. A corrente do módulo também é afetada pela temperatura, mas de forma diferente da tensão, à medida que a temperatura sobe, a corrente de saída tende a aumentar, porque o aumento da temperatura fornece mais energia térmica aos portadores de carga, aumentando sua mobilidade e, consequentemente, a corrente elétrica.

A potência de saída do módulo, geralmente diminui à medida que a temperatura aumenta, devido à queda na tensão. No entanto, o aumento na corrente parcialmente

compensa essa diminuição, resultando em queda na eficiência do módulo em condições de alta temperatura. O aumento da temperatura pode levar a perdas adicionais de eficiência nos módulos, devido à resistência interna mais alta, maior degradação das células solares e degradação de materiais em condições ambientais adversas. Tais perdas adicionais resultam em menor rendimento do sistema fotovoltaico. As curvas I-V em função da temperatura são ilustradas na Figura 14 (PINHO, 2014).

Figura 14 - Curvas I-V módulo fotovoltaico vs. Temperatura



Fonte: PINHO, 2014

A sujidade na superfície do módulo fotovoltaico é um fator importante a ser considerado, como dito anteriormente. Partículas de sujeira podem bloquear a luz que deve alcançar as células, reduzindo a energia disponível para gerar corrente elétrica. Isso resulta em uma diminuição da eficiência do módulo, pois a potência fornecida é reduzida para uma mesma quantidade de energia irradiante. Estudos demonstraram que a sujidade pode diminuir a eficiência dos módulos em até 3,2% em períodos de 45 dias e até 18% em sujidades acumuladas ao longo de 3,5 anos (ALVES, 2018). Na Figura 15, é possível observar a aparência opaca da superfície de um módulo exposto à poeira. Portanto, é essencial realizar a limpeza regular dos módulos fotovoltaicos para manter sua eficiência e garantir a máxima geração de energia.

Figura 15 - Módulo fotovoltaico sujo

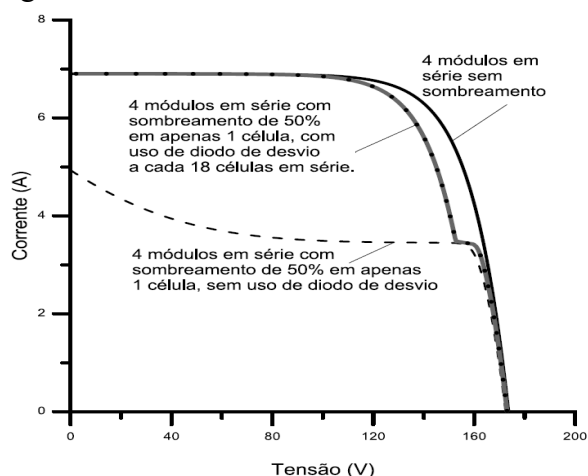


Fonte: <https://mecatronsolar.com.br>

2.4.5 Sombreamento e seu impacto na geração fotovoltaica

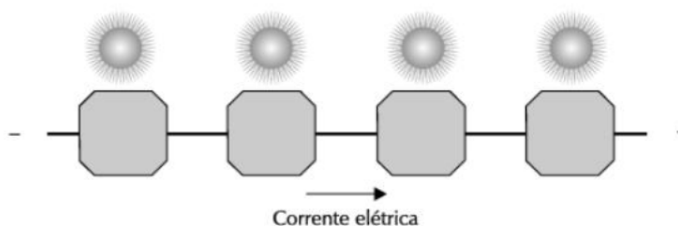
O sombreamento é um problema muito significativo na produção de energia dos módulos fotovoltaicos. Quando uma área do módulo fica sombreada, há diminuição na irradiância absorvida pelo módulo e consequente queda na geração de energia, conforme Figura 16, na qual tem-se a curva I-V para 4 módulos em série com e sem sombreamento nas células. Nas Figuras 17 e 18 vê-se o funcionamento normal e com sombreamento das células. Qualquer obstáculo aos raios solares causará sombreamento no módulo, fazendo a corrente diminuir e essa redução se propaga para as demais células devido à conexão em série das células fotovoltaicas. (PINHO, 2014).

Figura 16 - Curva I-V efeitos do sombreamento



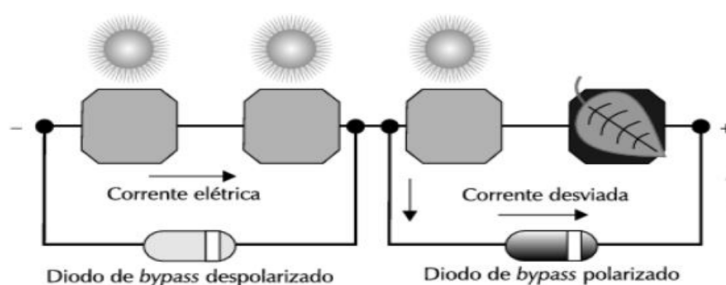
Fonte: PINHO, 2014

Figura 17 - Funcionamento normal do Módulo Fotovoltaico



Fonte: PINHO, 2014

Figura 18 - Funcionamento do Módulo Fotovoltaico com sombreamento



Fonte: PINHO, 2014

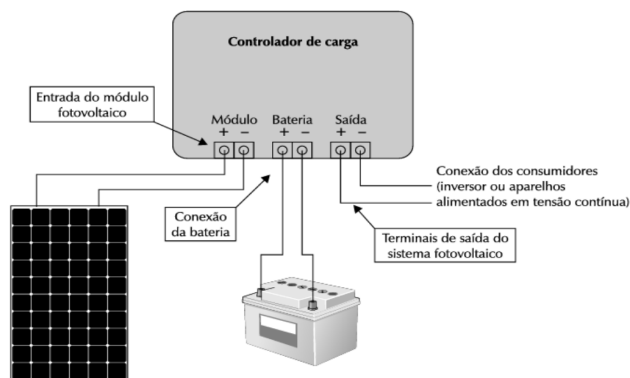
O sombreamento pode levar ao efeito de Ponto Quente (*Hot-Spot*) nos módulos fotovoltaicos. Isso ocorre quando há transferência de energia em excesso das células não sombreadas para a célula sombreada, o que pode resultar em um aumento significativo de temperatura e até mesmo na ruptura do vidro da célula afetada. Para evitar esse problema, são utilizados diodos de desvio (*bypass*) que são conectados em paralelo, oferecendo um caminho alternativo para a corrente elétrica da célula sombreada. Essa configuração ajuda a isolar a célula sombreada e evita o acúmulo de energia indesejada, protegendo o módulo fotovoltaico. (PINHO, 2014)

Portanto, é essencial evitar ou minimizar o sombreamento nos módulos fotovoltaicos para maximizar a produção de energia. Isso pode ser feito por meio do correto posicionamento dos painéis solares, evitando obstáculos que possam causar sombreamento, como árvores, edifícios ou estruturas próximas, e utilizando técnicas de design adequadas para minimizar os efeitos do sombreamento em um sistema fotovoltaico.

2.4.6 O Controlador de carga

O controlador de carga é um equipamento que faz a conexão do módulo fotovoltaico com o sistema de armazenamento (bateria). Ele exerce função de supervisor, rastreando continuamente o ponto de máxima potência dos painéis solares, ajustando a tensão de operação mantendo a bateria em flutuação constante evitando sobrecarga de tensão ou descarga total. Nos sistemas *off-grid* o controlador de carga contém o MPPT (*maximum power point tracking*) que é quem rastreia o ponto de máxima potência, pois evita danos à bateria prolongando dessa forma sua vida útil. Na Figura 19 tem-se um exemplo de suas conexões. (VILLALVA, 2012)

Figura 19 - Exemplo de conexão controlador de carga



Fonte: VILLALVA, 2012

Na configuração típica, o controlador de carga é conectado aos módulos fotovoltaicos através de suas entradas, onde recebe a corrente CC gerada pela luz solar. Em seguida, o controlador é conectado à bateria para carregá-la. Ele monitora constantemente o estado de carga da bateria, ajustando a corrente e a tensão. É importante ressaltar que diferentes sistemas fotovoltaicos podem ter configurações variadas, dependendo dos componentes utilizados, mas o controlador de carga desempenha um papel fundamental no controle do fluxo de energia entre os módulos, a bateria e as cargas, visando a maximização do desempenho energético. (VILLALVA, 2012)

2.4.7 O Inversor de frequência

O inversor é responsável por converter a corrente CC dos módulos fotovoltaicos em corrente CA para as cargas, otimizar o desempenho do sistema, sincronizar com a rede elétrica, proteger o sistema e permitir a integração com sistemas de armazenamento de energia. Ele desempenha um papel crucial na viabilização do uso da energia solar em aplicações práticas. O inversor *on-grid* possui recursos avançados, como o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), ele monitora a tensão e a corrente de entrada dos módulos e ajusta a operação para maximizar a eficiência do sistema, garantindo que o máximo de energia possível seja extraído dos módulos, na Figura 20 tem-se as conexões da bancada móvel do IFG, onde vemos os cabos que vem dos módulos e entram no inversor e as conexões AC que vão passar pelas proteções e vão para o medidor bidirecional ou *smart meter*.

Figura 20 - Conexões inversor bancada móvel



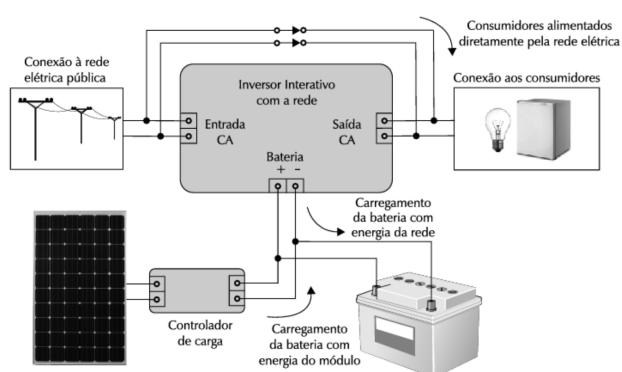
Fonte: Autor

Um inversor típico emprega a modulação por largura de pulsos (PWM, *Pulse Width Modulation*) para converter o sinal de corrente contínua em um sinal de corrente alternada. O PWM alterna rapidamente o estado dos dispositivos semicondutores, geralmente transistores MOSFETs ou IGBTs, para criar um sinal de tensão alternada aproximado. Esse sinal é inicialmente quadrado, mas pode ser filtrado para se obter uma forma de onda senoidal pura. A modulação PWM consiste em variar a largura dos pulsos de corrente contínua aplicado aos dispositivos semicondutores em alta frequência. A largura dos pulsos é controlada para reproduzir uma forma de onda senoidal na saída do inversor. O controle da largura dos pulsos é realizado por meio de algoritmos de controle que ajustam continuamente a largura dos

pulsos com base nas condições de operação, como a demanda de carga e as características dos módulos fotovoltaicos. (RAMPINELLI, 2013)

Na Figura 21 tem-se um inversor interativo usado em sistemas fotovoltaicos (*off-grid/tie-grid*) que funcionam conectados à rede e ainda possuem armazenamento em baterias. São inversores empregados em sistemas de alimentação de emergência para aplicações autônomas. Por suas características elevam bastante os custos implementação do sistema.

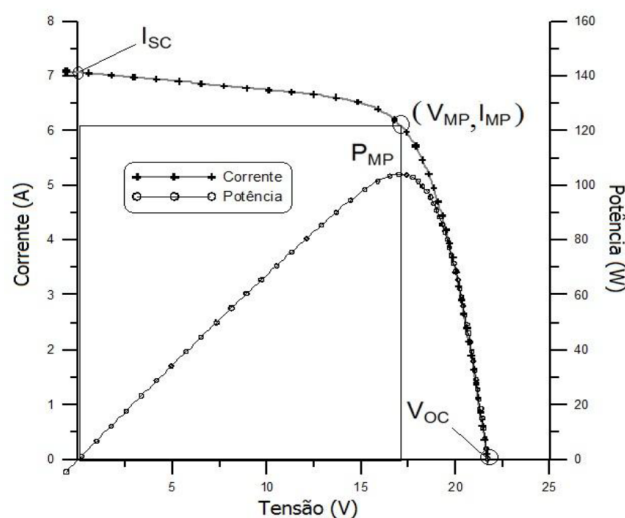
Figura 21 - Exemplo de conexão utilizando um inversor interativo



Fonte: VILLALVA, 2012

Na Figura 22 tem-se a curva I-V característica de um módulo e curva de potência P-V para um módulo com potência nominal de $100W_p$.

Figura 22 - Curva característica I-V e P-V módulo



Fonte: PINHO, 2014

A curva I-V representa a relação entre a corrente elétrica gerada pelo módulo fotovoltaico e a tensão aplicada a ele. Normalmente, a curva I-V mostra uma relação linear em uma determinada região de operação, conhecida como região ativa. A curva P-V, por sua vez, ilustra a potência elétrica gerada pelo módulo em relação à tensão aplicada. A potência é calculada multiplicando a corrente pela tensão. A curva P-V permite identificar o ponto de máxima potência (PMP), no qual a potência gerada é a mais alta para uma determinada tensão. Essas curvas são úteis para entender o desempenho e a eficiência de um módulo fotovoltaico. Elas são utilizadas para dimensionar sistemas fotovoltaicos, avaliar o desempenho dos módulos e otimizar a operação do sistema. (PINHO, 2014)

É importante observar que as características de curva I-V e P-V podem variar entre diferentes módulos fotovoltaicos, dependendo das especificações técnicas e do projeto do módulo em questão, sendo o inversor de frequência o responsável pelo controle desses parâmetros.

2.5 Marco Legal no Brasil

2.5.1 Resoluções 482/2012 e 687/2015

No Brasil, em termos legais, tem-se o início do Marco Regulatório brasileiro para o setor de fontes energéticas de matrizes renováveis com a publicação pela ANEEL da Resolução Normativa 482/2012. Com sua publicação, a geração de energia em sistemas baseados em fontes renováveis, como os sistemas fotovoltaicos, matriz eólica, matriz hídrica e sistemas de biomassa, poderiam injetar energia no sistema nacional, por meio de paralelismo com a rede elétrica das concessionárias de distribuição de energia do país.

A Resolução Normativa 482/2012 foi substituída pela Resolução Normativa 687/2015 da ANEEL, como aprimoramento a nova resolução trouxe que geradores fotovoltaicos com até 75 kW passam a ser considerados como microgeração, já geração com potência maior que 75 kW e igual ou menor a 5 MW passam a ser considerados como minigeração. A partir Resolução Normativa 687/2015 da ANEEL, têm-se novas modalidades para a geração distribuída de energia, sendo elas: geração compartilhada, autoconsumo remoto e instalações com múltiplas unidades consumidoras condomínios. (ANEEL, 2023)

2.5.2 Lei nº 14.300/2022

A lei nº 14.300/22, chamada de Marco legal da geração distribuída, instituiu o marco legal da geração própria de energia, microgeração e minigeração distribuída. O novo marco trouxe mudanças a serem implementadas gradualmente nas regras para a geração distribuída. Na lei nº 14.300/22, os consumidores com sistemas de energia solar fotovoltaica podem, a partir de um modelo de transição gradual, a pagar uma tarifa pelo uso da rede de distribuição da concessionária, tarifa denominada TUSD Fio B (Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição). A nova lei traz segurança jurídica para os proprietários de usinas de microgeração e minigeração, na medida que sistemas instalados antes ou durante o período de transição da nova norma legal, obtiveram direito adquirido por 25 anos nas regras atuais. (ANEEL, 2023)

A lei traz diversas mudanças que são aplicadas durante o período de transição no ano de 2022, como mudanças na compensação dos créditos que são injetados na rede de concessionárias pelos prosumidores, há também mudanças na capacidade máxima de minigeração, reduzindo de 5 MW para 3 MW. Todas essas mudanças entraram em vigor após todas as concessionárias de energia elétrica, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) estabeleceram diretrizes para valoração dos custos e dos benefícios da microgeração e minigeração adequarem todo o sistema para as novas mudanças. No dia 07/02, a Aneel publicou a Resolução Normativa 1059/2023 que regulamenta a lei 14.300/2022. Ela versa sobre direitos dos consumidores, procedimentos para conseguir o acesso com geração distribuída e faturamento da geração distribuída pelas distribuidoras de energia. (ANEEL, 2023)

2.6 Papel do engenheiro eletricista de sistemas fotovoltaicos

Como atribuição profissional ao Engenheiro Eletricista compete projetar e executar as instalações de sistemas de geração fotovoltaicos, acompanhando seu funcionamento na geração, transmissão e distribuição. Segundo o CONFEA, desde 2015, a ART compete apenas ao Engenheiro Eletricista em projetos envolvendo sistemas de micro e minigeração fotovoltaicos. Garantido o atendimento de requisitos de qualidade e segurança das instalações e distribuição. (CREA-PR, 2022)

Do profissional é exigido conhecimento sobre os equipamentos para que possa além de projetar também executar instalações em sistemas de geração fotovoltaica. Manuseando e

conectando os equipamentos do sistema fotovoltaico de forma segura e eficiente, sendo necessária uma formação sólida que abranja teoria e prática, inserindo-se atividades de prática laboratorial. Para isso, são necessários investimentos em laboratórios que possam reproduzir em ambiente acadêmico os cenários que serão encontrados no dia a dia do futuro profissional. (CREA-PR, 2022)

2.7 A Prática Laboratorial

O objetivo imediato da educação é aprimorar o pensar, dentre outros, e não somente transmitir ou produzir novos conhecimentos, sendo a prática laboratorial, nesse contexto, uma estratégia responsável para alcançar esse objetivo. Na prática laboratorial, de forma empírica o aluno é capaz de solidificar os conhecimentos apreendidos na teoria. Compreender e aplicar o conhecimento não é apenas resultado da realização de experimentos práticos ou da manipulação de materiais disponíveis. Envolve também o engajamento e o compromisso em buscar respostas, estabelecendo uma conexão entre a teoria fundamentada e a prática experimental. A efetivação do conhecimento acontece quando há uma integração entre os aspectos teóricos e práticos, permitindo uma compreensão mais abrangente e a aplicação dos conceitos aprendidos.

De acordo com a Lei de Diretrizes e Bases da Educação, no seu Artigo 35, Inciso IV, diz:

É essencial a compreensão dos fundamentos científico-tecnológicos dos processos produtivos, relacionando a teoria com a prática, no ensino de cada disciplina.
(MEC/LDB,1996)

Dessa forma, a prática laboratorial incrementa as atividades de ensino, pesquisa e extensão, o aluno percorre de forma empírica, na tentativa e erro, a busca pelo conhecimento, mediante orientação do professor, com apoio da instituição e da teoria, sejam alcançados os objetivos experimentais.

3. METODOLOGIA

3.1 Método da Abordagem

Utiliza-se a metodologia do método hipotético-dedutivo. Trata-se de um método que se inicia pela percepção de uma lacuna nos conhecimentos, acerca da qual formula hipóteses e, pelo processo de inferência dedutiva, testa a predição da ocorrência de fenômenos abrangidos pela hipótese. O uso do método hipotético-dedutivo em experimentos de laboratório em sistemas fotovoltaicos oferece vantagens, como a formulação de hipóteses claras e testáveis, o controle de variáveis, a avaliação do desempenho e eficiência dos sistemas, a repetibilidade e reprodutibilidade dos experimentos, e o refinamento das hipóteses e teorias. Isso contribui para a formação do futuro engenheiro eletricista que atuará com sistemas fotovoltaicos (GIULIANO/SOLANGE, 2021). No entanto, não se pode afirmar que o método da abordagem é melhor do que outros métodos para experimentos fotovoltaicos, pois a escolha do método depende do objetivo da pesquisa, da natureza do fenômeno em estudo e das características do sistema fotovoltaico em questão (LAKATOS, 2003). Nesse sentido, fez-se uso do método científico e do método da abordagem (experimental), a fim de colaborar para obtenção dos resultados esperados.

3.2 Método Científico

O conhecimento científico obtido através de processos metodológicos, objetiva principalmente discutir e explicar fenômenos baseados em observações de hipóteses. Nesse sentido, definiu-se que o método científico é dividido em quatro etapas, sendo elas: a observação, a experimentação, a interpretação e a conclusão.

O método científico, envolve a observação de um fenômeno, a formulação de hipóteses para explicá-lo, a realização de experimentos para testar as hipóteses, a interpretação dos resultados e a conclusão com base nas evidências obtidas. Em síntese o método busca compreender o comportamento e a eficiência dos sistemas fotovoltaicos por meio de uma abordagem sistemática e rigorosa, contribuindo para o avanço do conhecimento nessa área. Assim, para realização de experimentos, o roteiro deve valer-se do método científico objetivando resultados satisfatórios. (ARONSON, 2007)

3.3 Método de procedimento

Para o desenvolvimento dos roteiros e práticas laboratoriais para a bancada móvel ESF do IFG e Fóton Lab/UFG partiu-se da simplicidade, porém robusta abordagem dos conceitos fundamentais envolvidos em sistemas fotovoltaicos, por meio de resumo teórico, etapas a serem cumpridas e questionários, levando o aluno à reflexão sobre o tema de cada experimento.

3.4 Bancada Móvel ESF IFG *Câmpus* Goiânia

A Bancada Móvel ESF do IFG-*Câmpus* Goiânia é resultado do trabalho de conclusão de curso em Engenharia Elétrica dos alunos Higor e Paloma, sendo doada ao Departamento de áreas acadêmicas IV, para fins didáticos, conforme Figura 23. Com a bancada a partir de 2023 é possível realizar vários experimentos com ESF, dentre eles: estudo da variação de potência, corrente e tensão de acordo com a orientação e inclinação dos módulos fotovoltaicos.

Figura 23 - Bancada móvel IFG



Fonte: Autor

A construção da bancada foi realizada de maneira que possa ser deslocada com facilidade uma vez que para melhor performance dos equipamentos os módulos devem ter o máximo de irradiação solar possível, outra vantagem dessa composição é a prontidão na preparação de diversos cenários, sendo possível explorar combinações e situações muito comuns no dia a dia dos profissionais das áreas.

Com a bancada ainda é possível contextualizar os resultados dos experimentos com os fundamentos teóricos, analisar circuitos em associações série e paralelo, tanto CC como em CA, estudar a influência de uma carga consumidora do tipo resistiva em um sistema de

energia solar fotovoltaica. Para complementar as atividades foi disponibilizado no Apêndice – A simulação no *software* Pvsyst realizada a partir do pátio do IFG *Câmpus* Goiânia, onde tem-se um ambiente com diversas obstruções, onde seus efeitos podem ser analisados nas práticas. A bancada é composta por:

- 1 inversor PHB780-XS de 780W (Anexo – A);
- 1 módulo *Eagle 72P* Jinko 320-340W (Anexo – B);
- 1 módulo *Cheetah HC 72M* 390-410W (Anexo – C);
- Módulo de monitoramento *Wi-Fi*;
- Disjuntores, proteções, cabos e conectores MC-04.

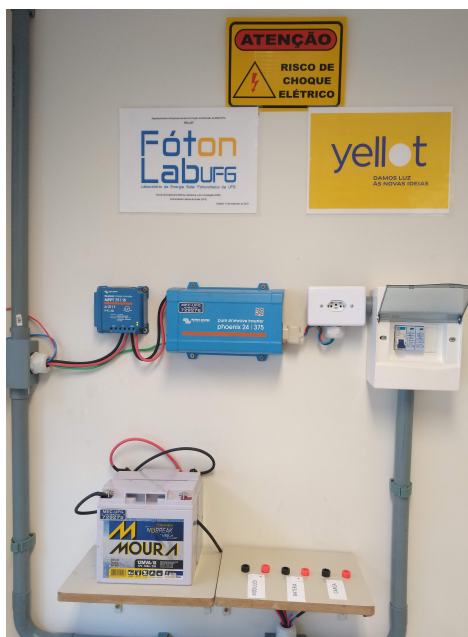
3.5 O Fóton Lab UFG

Concebido a partir do Grupo de Trabalho pertencente ao Projeto de Extensão da EMC/UFG: Transferência de conhecimentos e criação do Laboratório de Energia Solar Fotovoltaica da UFG. Nesta primeira etapa de implantação o laboratório conta com os equipamentos doados pela empresa DUSOL Energia Sustentável, compõem o kit experimental:

- 1 módulo fotovoltaico *Canadian Solar* 330W (Anexo – D);
- 1 inversor *Phoenix* 24 V 375A (Anexo – E);
- 1 MPPT BLUESOLAR MPPT 75V 15A 12/24V (Anexo – F);
- 2 baterias estacionárias 12MVA-18;
- Disjuntores, quadros e fiação.

Localizado no Bloco-E, sala E-8 da quadra das engenharias a montagem dos equipamentos foi realizada por meio de fixação dos equipamentos na parede deixando expostas as conexões para acesso e manuseio de cada experimento, conforme Figura 24. O FótonLab ainda disponibiliza aos estudantes: voltímetros CC e CA; amperímetros CC e CA; multímetro *TrueRMS*; osciloscópio; lâmpadas CC e CA; década resistiva; soprador térmico e componentes diversos.

Figura 24 - Montagem dos equipamentos no FótonLab



Fonte: Autor

3.5.1 Histórico do Fóton Lab na EMC/UFG

O Laboratório de Energia Solar Fotovoltaica Fóton Lab/UFG, criado em 13 de fevereiro de 2020, por meio do Grupo de Trabalho pertencente ao Projeto de Extensão da EMC/UFG: Transferência de conhecimentos e criação do Laboratório de Energia Solar Fotovoltaica da UFG, como estratégias na implementação das Novas Diretrizes Curriculares dos Cursos de Engenharia.

A instalação do sistema *off-grid* do Fóton Lab/UFG foi realizada no bloco-E da quadra das engenharias, conforme Figura 25. O local foi definido pela coordenação do projeto, sendo a primeira etapa do laboratório, que futuramente compreenderá outros espaços.

No entanto, em 2022 o local das instalações do sistema *off-grid* do Fóton Lab recebeu algumas salas de professores da EMC, devido problemas estruturais no bloco-G, sendo necessário sua transferência. Também houve mudança na coordenação do projeto o que levou a busca de um novo ambiente para instalação não apenas do sistema *off-grid*, como outros sistemas correlatos.

A fim de não prejudicar o andamento do trabalho, optou-se por realizar parte dos experimentos propostos na Bancada Móvel ESF do IFG, observando também a melhor

maneira de apresentação dos equipamentos de modo a aproximar ao máximo de um ambiente real de trabalho.

Figura 25 - Local de instalação do sistema *off-grid* do FótonLab/UFG



Fonte : Autor

Os itens considerados, foram: a possibilidade de práticas relevantes e conhecimentos relacionados a outras áreas; se as instalações serão em ambiente controlado em relação a incidência solar e se os dispositivos vão ser montados no formato modular, assim como é encontrado no mercado. Na sequência, utilizando-se ferramentas de simulação computacional, foi obtida a primeira proposta do projeto, no levantamento do local e das melhores condições para instalação foi usado o *software* PVsyst versão 7.3 Education, conforme simulações da incidência solar Apêndice – C. Foram elaborados roteiros de prática laboratorial que se assemelhem a uma instalação real encontrada em campo, com participação dos docentes e coordenadores do projeto de extensão do Fóton Lab da EMC.

3.6 Mudanças no PPC dos cursos de engenharia elétrica do IFG e UFG

Em 2019 iniciaram-se os trabalhos da terceira atualização do Projeto Pedagógico do curso de Engenharia Elétrica da UFG, onde o NDE (Núcleo Docente Estruturante), após ampla discussão chegou a uma proposta coletiva, que contemplasse os mais diversos desafios encontrados para aprimorar o ensino, pesquisa e extensão do curso.

A articulação eficiente entre teoria e prática é crucial na formação do profissional de Engenharia Elétrica. Na Escola de Engenharia Elétrica e de Computação da UFG, as atividades práticas vão além dos espaços internos, permitindo aos estudantes aplicar os

conhecimentos teóricos tanto dentro quanto fora da instituição. Internamente, são oferecidas disciplinas exclusivas que incluem simulações computacionais e práticas em laboratórios didáticos, proporcionando experiências relevantes aos alunos. (UFG/EMC, 2021)

A atualização do PPC do curso de bacharelado em Engenharia Elétrica da UFG deu especial atenção às novas tecnologias, dentre elas, as que abordam sistemas fotovoltaicos, bem como a implementação de atividades laboratoriais relacionadas. Nesse contexto, o Fóton Lab surge como agente ativo da nova estruturação do curso. Na medida que não apenas terá os recursos necessários para atividades práticas bem como na produção de documentação para experimentos. (UFG/EMC, 2021)

O IFG atento ao cenário atual promoveu mudança no PPC do curso de Engenharia Elétrica, em 2022. Ofertando disciplinas que abordam sistemas fotovoltaicos, com destaque para: Fontes Alternativas de Energia e Eficiência Energética, bem como na pós-graduação, por meio do Mestrado Profissional em Tecnologia, Gestão e Sustentabilidade com linha de pesquisa em Energias Renováveis. (IFG, 2022)

4. MODELOS DE LABORATÓRIOS DIDÁTICOS

Considerando que o objetivo é disponibilizar para o IFG *Câmpus* Goiânia e para o Fóton Lab/UFG roteiros de experimentos e práticas laboratoriais, além de um sistema de geração fotovoltaica *off-grid* para a EMC, faz-se necessário explicar os conceitos de laboratórios didáticos e seus diversos tipos. A literatura descreve vários tipos de laboratórios didáticos diferenciando-se entre si tanto pelos conteúdos, procedimentos, fenômenos e experimentos realizados. São apresentados 4 tipos de laboratório acadêmicos que mais se assemelham ao que será proposto no FótonLab e na bancada móvel ESF do IFG – *Câmpus* Goiânia, sendo eles: laboratório de Demonstrações, laboratório de Tradicional, laboratório de Projetos e laboratório de *Fading*. (PINHO, 2014), sendo o modelo de laboratório tradicional o mais assertivo para roteiros de experimentos de ESF, na Figura 26 tem-se a realização de um experimento com alunos dos cursos técnicos do IFG.

Figura 26 - Realização de experimentos com a bancada móvel



Fonte: Autor

4.1 Laboratório de Demonstrações

O laboratório de demonstrações é o tipo mais implementado entre os laboratórios acadêmicos, no qual o professor desempenha o papel de experimentador devido à limitação de recursos e à complexidade dos equipamentos. O professor é responsável por realizar as montagens experimentais e executar as medições, enquanto os alunos assumem uma posição

de espectadores, acompanhando passivamente as práticas experimentais. As demonstrações têm diversas finalidades, como iniciar um novo conteúdo para despertar o interesse dos alunos, ilustrar fenômenos específicos ou facilitar a compreensão de conceitos complexos, estimulando a observação e reflexão dos estudantes. Por meio das demonstrações, os alunos podem ter uma experiência concreta dos princípios teóricos discutidos em sala de aula, o que contribui para a assimilação do conhecimento (FILHO, 2000).

É importante ressaltar que o Laboratório de Demonstrações deve ser complementado por outras atividades práticas e interativas, nas quais os alunos tenham a oportunidade de assumir um papel mais ativo na realização dos experimentos. Dessa forma, é possível proporcionar uma abordagem mais abrangente e participativa no processo de aprendizagem.

4.2 Laboratório de Projetos

O laboratório didático de Projetos é voltado para o treinamento profissional, oferecendo aos estudantes liberdade de ação. No entanto, é necessário contar com uma boa infraestrutura e recursos financeiros. É recomendado que os alunos tenham experiência em outros tipos de laboratórios, como o Tradicional. Nesse tipo de laboratório, o aluno desempenha um papel central, sendo responsável por propor, planejar, executar, observar e relatar o projeto, seguindo o método científico. O professor atua como orientador, auxiliando nos procedimentos e revisando o relatório final (FILHO, 2000).

O laboratório permite aos estudantes aplicar o conhecimento teórico de forma prática e contextualizada, além disso, estimula a criatividade, a colaboração em equipe, o pensamento crítico e a resolução de problemas, preparando os alunos para os desafios do mundo profissional.

4.3 Laboratório Tradicional

No laboratório tradicional, os alunos têm a oportunidade de vivenciar práticas experimentais, trabalhando em equipe e utilizando instrumentos de medição. O roteiro experimental fornece um guia para as atividades, permitindo que os alunos apliquem os conceitos teóricos aprendidos em sala. O professor desempenha um papel de orientador, esclarecendo dúvidas, instruindo e supervisionando o andamento dos experimentos. Esse tipo de laboratório é especialmente útil para o desenvolvimento das habilidades práticas dos alunos, como o manuseio de equipamentos, a realização de medições e a interpretação de

resultados experimentais. Além disso, promove a interação entre os estudantes, incentivando a troca de ideias e o trabalho em equipe (FILHO, 2000).

No entanto, é importante ressaltar que o Laboratório Tradicional tem limitações em termos de criatividade e autonomia dos alunos, pois as atividades são geralmente pré-determinadas. Os estudantes seguem um caminho definido e têm menos oportunidades de explorar diferentes abordagens ou realizar experimentos mais personalizados. Apesar dessas limitações, o Laboratório Tradicional continua sendo uma importante ferramenta no ensino de ciências e engenharia, proporcionando uma base sólida de conhecimento prático e preparando os alunos para futuras atividades profissionais ou pesquisas científicas.

4.4 Laboratório didático tipo *Fading*

Nessa proposta, o roteiro experimental é organizado, sequencial e evolutivo, fornecendo informações gradativas aos alunos. No entanto, ao contrário de seguir estritamente o roteiro, os alunos são incentivados a propor seus próprios experimentos, incorporando assim o aspecto de autonomia e criatividade do laboratório de projetos. Essa abordagem visa promover o processo de ensino-aprendizagem do método experimental, estimulando os alunos a desenvolverem habilidades de observação, formulação de perguntas, levantamento de hipóteses, elaboração de procedimentos experimentais, análise de resultados e conclusões sobre a validação das hipóteses levantadas. Essa integração entre os dois modelos de laboratório busca proporcionar uma experiência mais abrangente e enriquecedora, permitindo que os alunos aprimorem tanto suas habilidades técnicas quanto suas capacidades de investigação e pensamento crítico (TEIXEIRA, 2021).

5. EXPERIMENTOS SUGERIDOS

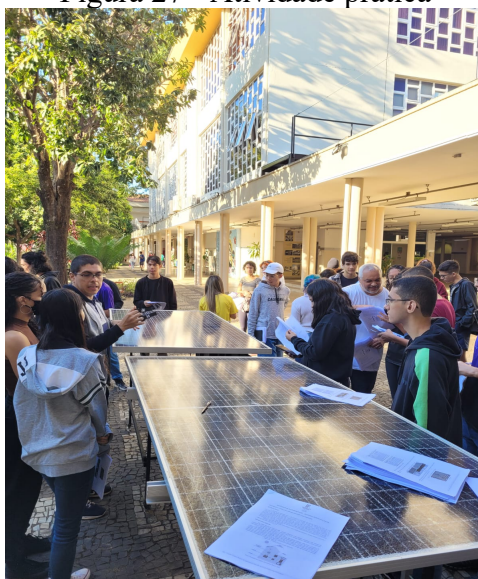
Os experimentos sugeridos foram propostos de forma que possam ser executados tanto na Bancada Móvel ESF do IFG como no sistema *off-grid* do Fóton Lab, com adaptações. Os experimentos inicialmente propostos são:

5.1 Conhecendo a bancada móvel ESF e seus componentes

Objetivo do aprendizado é identificar os equipamentos que compõem a bancada móvel ESF do IFG e do Fóton Lab da UFG, sendo necessário identificar e compreender o funcionamento de cada componente. A partir do diagrama unifilar da bancada identifica-se os pontos de interconexão dos equipamentos, sendo possível o uso de instrumentos de medição para aferir as grandezas de interesse, além de compreender aspectos de segurança necessários em laboratório de sistemas fotovoltaicos.

Neste experimento, o aluno conhece o módulo fotovoltaico, os tipos de inversores e suas aplicações, o controlador de carga, também chamado de MPPT, bateria estacionária nos sistemas *off-grid* e híbridos, além do uso e manuseio da bancada móvel. Também manusear o multímetro, alicate amperímetro e realizando leituras de grandezas elétricas no inversor, fazendo as anotações necessárias para posteriormente responder perguntas formuladas pelo professor, conforme Figura 27. Também são apresentadas as principais ferramentas computacionais de apoio ao projeto de sistemas fotovoltaicos.

Figura 27 - Atividade prática



Fonte: Autor

5.2 Estudo do efeito fotovoltaico

O experimento tem como objetivo estudar o efeito fotovoltaico, que é o processo pelo qual a luz solar é convertida em energia elétrica pelos módulos fotovoltaicos. O experimento visa entender o funcionamento básico desses módulos, identificar as fontes de variação da tensão de saída e compreender como a quantidade de luz solar incidente, também conhecida como irradiância, afeta a geração de energia fotovoltaica. Durante o experimento, os participantes têm a oportunidade de analisar o comportamento dos módulos em diferentes condições de iluminação. Eles podem observar como a variação da irradiância afeta a quantidade de energia elétrica produzida pelos módulos. Além disso, são introduzidos aos conceitos de corrente e tensão nos módulos fotovoltaicos, assim como a influência de fatores externos, como temperatura e orientação dos painéis solares. (CUNHA, 2015)

Esse experimento permite aos participantes compreenderem a relação entre a irradiância solar e a geração de energia fotovoltaica, assim como identificar as principais variáveis que afetam o desempenho dos módulos, contribuindo para um melhor entendimento dos sistemas de geração fotovoltaica e servindo de base para futuros estudos e aplicações nessa área.

5.3 Sombreamento

Objetivo do experimento é compreender o efeito do sombreamento no desempenho do módulo fotovoltaico, entendendo o efeito provocado na corrente de saída do módulo, devido ao sombreamento, realizar as medições de corrente de curto-circuito quando a célula é sombreada, relacionando com dados obtidos no software Pvsyst. O experimento busca compreender como o sombreamento afeta a resposta elétrica do módulo, especificamente a corrente de saída. (CERQUEIRA, 2019)

Ao submeter o módulo a diferentes níveis de sombreamento e realizar as medições correspondentes, é possível determinar a redução na corrente de saída devido à presença de sombras. Em suma, o experimento busca aprofundar a compreensão dos efeitos do sombreamento na corrente de saída do módulo, ao mesmo tempo em que verifica a validade e a confiabilidade das ferramentas de simulação como o PVsyst para o estudo de sistemas fotovoltaicos em condições de sombreamento. Essas informações são cruciais para otimizar o projeto e a operação de sistemas fotovoltaicos, minimizando as perdas devido ao sombreamento. (CERQUEIRA, 2019)

5.4 Irradiância, temperatura e sujidade

O objetivo do experimento é explorar os efeitos da irradiância, temperatura e sujidade nos módulos fotovoltaicos. Durante o experimento, o aluno mede e registra esses parâmetros em diferentes condições e observar como eles afetam a saída do sistema fotovoltaico, como a corrente e a tensão. Além disso, será utilizada a ferramenta de software PVsyst para auxiliar na análise dos dados obtidos experimentalmente. Os participantes poderão comparar os resultados medidos com as previsões do software e entender como as variações nos parâmetros de entrada influenciam a geração de energia elétrica. O experimento também aborda os efeitos que as mudanças na temperatura e a sujidade dos módulos podem causar. Os participantes podem observar como a temperatura afeta a eficiência dos módulos fotovoltaicos e como a sujidade pode reduzir a geração de energia. (PINHO, 2014)

Ao final do experimento, os participantes adquirem conhecimentos sobre os parâmetros de entrada e saída do sistema fotovoltaico, compreendem a importância da irradiância na geração de energia elétrica, exploram os efeitos da temperatura e sujidade nos módulos e relacionam essas informações com os dados obtidos no software PVsyst. Essas aprendizagens contribuem para uma melhor compreensão do desempenho e das características dos sistemas fotovoltaicos.

5.5 Os Efeitos da inclinação e direção dos módulos ESF na irradiância absorvida

O objetivo do experimento é a análise do desempenho sob diferentes ângulos de inclinação, investigando como o ângulo de inclinação dos módulos afeta a geração de energia e determinar a posição mais eficiente para maximizar a produção de energia. O experimento pode ser conduzido ajustando-se o ângulo de inclinação dos painéis solares na bancada móvel em intervalos predefinidos, como por exemplo, variando de 0° (plano horizontal) a 90° (plano vertical). A cada ajuste de ângulo, são registradas as medições de corrente e tensão de saída dos painéis solares. Com base nos dados coletados, é possível realizar uma análise comparativa e observar como a geração de energia varia em diferentes ângulos de inclinação. (SANTAREM/QUIXABEIRA, 2022)

Ao analisar os resultados, é possível identificar a posição mais eficiente dos painéis solares em relação ao ângulo de inclinação. Essa posição pode variar dependendo da localização geográfica, estação do ano e outros fatores climáticos. Com base nos resultados, é

possível determinar o ângulo de inclinação que maximiza a geração de energia e otimiza o desempenho do sistema fotovoltaico. Essa análise é importante para orientar o projeto e a instalação de sistemas fotovoltaicos, permitindo a escolha adequada do ângulo de inclinação para maximizar a produção de energia ao longo do ano. Além disso, o conhecimento adquirido sobre a importância do ângulo de inclinação na geração de energia pode ser aplicado em outras aplicações fotovoltaicas, como em instalações fixas ou ajustáveis de painéis solares.

5.6 Estudo do comportamento dos equipamentos alimentado cargas

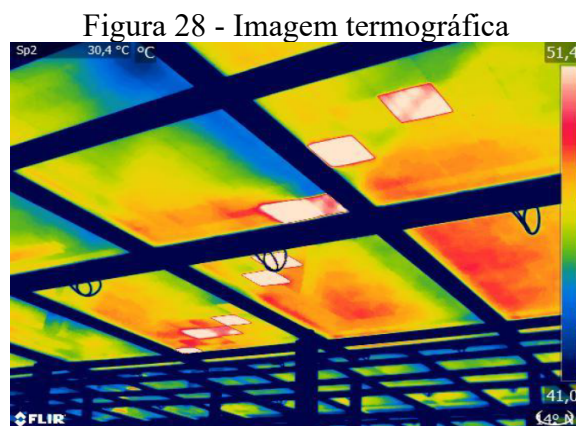
Objetivo do experimento é entender a função do inversor no sistema fotovoltaico, conhecendo os tipos e suas aplicações, identificando os pontos de ligação de entrada e saída, medir as grandezas elétricas envolvidas, compreendendo o processo de conversão CC/CA, verificar a eficiência de um inversor a partir das potências de entrada e saída. Isso é feito por meio da análise das potências de entrada, geradas pelos módulos fotovoltaicos, e de saída, fornecidas à carga. A eficiência do inversor é determinada pela relação entre essas potências, considerando as perdas associadas à conversão de energia. Através desse experimento, é possível obter um entendimento mais aprofundado da função do inversor em um sistema fotovoltaico, bem como avaliar a sua eficiência na conversão de energia. Essas informações são cruciais para o dimensionamento adequado do sistema e para otimizar a sua operação, visando à máxima eficiência energética e desempenho. (VILLALVA, 2012)

5.7 Uso de imagens termográficas no diagnóstico de falhas em módulos ESF

O objetivo desse experimento é entender o comportamento térmico dos painéis solares em uma bancada móvel fotovoltaica e sua influência no desempenho do sistema. Ao analisar a distribuição de temperatura nos módulos, é possível identificar áreas de aquecimento excessivo, como *hotspots*, que podem indicar falhas ou problemas nas células solares. Além disso, o estudo permite avaliar fatores como sombreamento, orientação solar e fluxo de ar afetam a temperatura dos painéis e, conseqüentemente, a eficiência da geração de energia. (MORAIS/PONTES, 2022)

Com base nas informações obtidas por meio da câmera termográfica, é possível fazer recomendações para otimizar o sistema fotovoltaico. Isso pode incluir ajustes no posicionamento dos módulos, limpeza regular, implementação de medidas de resfriamento ou

a identificação de áreas que precisam de manutenção. Ao obter dados térmicos detalhados, os projetistas, instaladores e operadores de sistemas fotovoltaicos podem tomar decisões para otimizar o desempenho e a vida útil do sistema, além de identificar potenciais problemas de forma antecipada, na Figura 28 tem-se um exemplo de imagem termográfica de módulos fotovoltaicos, instalados em solo. (NASCIMENTO, 2022)



Fonte: UFSC, 2022

6. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os objetivos deste trabalho foram alcançados, na medida que, foram propostos experimentos e práticas laboratoriais para Bancada Móvel ESF do IFG *Câmpus* Goiânia e o Sistema de Geração *off-grid* para o Laboratório de Energia Solar Fotovoltaica Fóton Lab/UFG já está instalado. A validade dos roteiros foi realizada mediante execução prática dos experimentos direcionados para um sistema *on-grid*, com 51 participantes entre alunos dos cursos técnicos do IFG e docentes.

O roteiro dos experimentos propostos também conta com os dados das simulações realizadas no software Pvsyst, tanto para bancada móvel, Apêndice B, como para o Fóton Lab da UFG, Apêndice C, fornecendo dados que podem ser comparados com os obtidos na execução das práticas. A simulação fornece informação de irradiância, sombreamento, orientação (*azimuth/tilt*) dos módulos fotovoltaicos, eficiência dos módulos, inversor e geração do sistema por hora, mês e ano.

Os alunos executaram os experimentos, com referencial teórico introdutório seguido de etapas, os resultados foram anotados em tabelas e analisados com auxílio do professor. Após a execução das práticas todos os alunos responderam um questionário on-line no qual puderam avaliar os experimentos sugeridos quanto à didática, funcionalidade e contribuições para formação do técnico e/ou engenheiro de sistemas fotovoltaicos. Os resultados confirmaram que as práticas propostas são relevantes para formação do futuro profissional. Segundo a pesquisa 100% dos alunos acreditam que o método teórico-prático como metodologia de ensino contribua efetivamente para o aprendizado e 98% dos alunos acharam bancada funcional, conforme Figura 29.

Figura 29 - Avaliação funcionalidade da bancada móvel



Fonte: Autor

Quanto à didática 90,2% dos alunos disseram que conseguiram compreender o funcionamento e a necessidade de utilização de cada equipamento dos experimentos e 98% disseram que os experimentos sugeridos contribuem para formação técnica em sistemas fotovoltaicos. É importante destacar que 86,3% dos alunos responderam que os experimentos sugeridos despertaram o interesse em aprofundar seus conhecimentos em sistemas fotovoltaicos, conforme podemos ver na Figura 30.

Figura 30 - Avaliação dos experimentos pelos alunos



Fonte: Autor

Mediante os resultados obtidos e consoante com a nova revisão do PPC da Engenharia Elétrica do IFG *Câmpus* Goiânia e da UFG percebe-se que foi assertiva a atualização dos PPC's, na medida que o ensino de Fontes de Energia Renováveis é latente, notadamente a de matriz fotovoltaica. Assim, espera-se que tanto a bancada móvel como o Fóton Lab possam dar apoio às atividades ensino, pesquisa e extensão no IFG e na UFG formando técnicos e engenheiros capacitados em sistemas fotovoltaicos.

Como sugestão para novos trabalhos fica indicação de estudos dos efeitos das resistências parasitas nos módulos fotovoltaicos em associações série e paralelo, análise termográfica dos componentes dos sistemas fotovoltaicos por meio de processamento digital de imagens e estudo da eficiência dos módulos fotovoltaicos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15287: Informação e documentação: projeto de pesquisa: apresentação. Rio de Janeiro, 2011.

ABSOLAR. Associação Brasileira de Energia Solar. Fotovoltaica. Infográfico. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/> . Acesso em: 22 mar. 2023

FILHO, J. P. A. Atividades Experimentais: Do Método À Prática Construtivista. 2000. 302 f. Tese (Doutorado em Educação) – Departamento de Centro de Ciências da Educação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução 482/2012. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf> . Acesso em: 22 mar. 2022.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução 687/2015. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf> . Acesso em: 22 mar. 2022.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução 1059/2023. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.html> . Acesso em: 22 abr. 2023.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Lei 14.300. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/aneel-regulamenta-marco-legal-da-micro-e-minigeracao-distribuida> . Acesso em: 22 abr. 2023.

ARANSON, D. R. Análise Técnica Baseada em Evidências: Aplicação do Método Científico e Inferência Estatística aos Sinais de Negociação. 1. ed. São Paulo: *Wiley Tradind*, 2022.

CADERNO DIDÁTICO ENERGIA SOLAR. Experimentação remota móvel para educação básica: Conversão de Energia Solar em Energia. RexLab/UFSC. Disponível em: http://relle.ufsc.br/moodle/pluginfile.php/3152/mod_resource/content/2/caderno%20didatico.pdf . Acesso em: 10 mar. 2023.

CANADIAN SOLAR. Datasheet: Módulo Policristalino CS6U-330P. Disponível em: <https://www.solaris-shop.com/content/CS6U-330P%20Specifications.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2022.

CERQUEIRA, M.A. Desenvolvimento de atividades experimentais e de um kit de experimentos sobre geração fotovoltaica. Trabalho de conclusão de curso (Licenciatura em Física). CEFET Celso Suckow da Fonseca. Petrópolis. RJ, 2019.

CREA-PR. Conselho Regional de Engenharia e Agronomia. ART Sistemas Fotovoltaicos. Disponível em: <<https://www.crea-pr.org.br/ws/energia-solar-fotovoltaica-e-trabalho-de-engenheiro-eletricista>> . Acesso em: 10 mar. 2023.

CUNHA, A.F.V., SILVA, M.J.F.M.S., SILVA, M.K.A., SILVA, T.S. Projeto e aplicação de um conjunto didático sobre energia solar fotovoltaica. V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife, PE. p. 2129, 2015.

EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Publicações Sistema Elétrico Brasileiro. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes>> . Acesso em 30 de abr. 2023.

EMC. Escola de Engenharia, Elétrica, Mecânica e de Computação da UFG. Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia Elétrica. Disponível em: <https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/440/o/PPCengELETRICA_%28sem_efeito_legal%29_%281%29.pdf> . Acesso em: 28 fev. 2023.

GIULIANO, A. R., SOLANGE, M. Manual de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída: teoria e prática – 1.ed. - Curitiba. *Brazil Publishing*. 2021.

JINKO SOLAR. *Datasheet PV module Eagle 72P 320-340 Watt*. Disponível em: <<https://www.jinkosolar.com/en/site/dwparametern/>>. Acesso em: 01 abr. 2023.

JINKO SOLAR. *Datasheet PV module Cheetah HC 72M 390-410 Watt*. Disponível em: <<https://www.jinkosolar.com/en/site/dwparametern/>>. Acesso em: 01 abr. 2023.

JUNIOR, L.A.P., KRENZINGUER, A. Desenvolvimento de bancada para monitoramento de módulos fotovoltaicos em ensaio de light-soaking. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado, RS. p. 349, 2018.

LABREN. Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia, INPE. Atlas Brasileiro de Energia Solar. Disponível em: <http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html> . Acesso em 30 de abr. 2023.

LAKATOS, E.M.; MARCONI, M.A. Fundamentos de metodologia científica. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

LEGEMZA, J., FINDORAK, R., FROHLICHOVÁ, M. *Biomass and Carbon Fuels in Metallurgy*. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Energy-sources-and-forms-of-energy-conversion-modified-by-authors-according-to-14-15_fig1_338881099 . Acesso em: 17 mai. 2023.

INTERNATIONAL COPPER ASSOCIATION BRAZIL. Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: Conceitos, Aplicações e Estudos de Caso. Disponível em: <https://abccobre.org.br/livro-energia-solar-fotovoltaica-no-brasil/>. Acesso em 29 abr. 2023.

IFG. Departamento de áreas acadêmicas IV. Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia Elétrica. Disponível em: <<http://cursos.ifg.edu.br/info/bach/eng-eletrica/CP-GOIANIA>> . Acesso em: 28 fev. 2023.

MARIANO, J.D. Energia Solar Fotovoltaica: Princípios fundamentais. 1 ed. Ponta Grossa – PR: Atena, 2022.

MEC. Lei de Diretrizes e Bases da Educação. Lei Nº 9.394 de 20 de dezembro de 1996. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19394.htm> . Acesso em: 16 mar. 2023.

MME. Ministério de Minas e Energia. Boletim Mensal de Energia. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/spe/publicacoes/boletins-mensais-de-energia/2023-1/portugues>> Acesso em 30 de abr. 2023.

MORAIS, C. V. S., PONTES, I. C. C. Boas práticas de operação e manutenção em usinas fotovoltaicas para uma maior eficiência e confiabilidade. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica). PUC-RJ. Rio de Janeiro. RJ, 2022.

NASCIMENTO, L. IX CBENS: Apresentação Comissionamento de Sistemas Fotovoltaicos e Análise de Desempenho. RexLab/UFSC. UFSC 2022.

PINHO, J.T., GALDINO, M.A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB. 2014.

PHB SOLAR. *Datasheet* inversor PHB780-XS. Disponível em: <<https://www.energiasolarphb.com.br/produto/inversor-phb780-xs-2/>>. Acesso em: 01 abr. 2023.

PORTAL SOLAR. Tipos de sistemas fotovoltaicos. São Paulo, 2021. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-sistemas-fotovoltaicos>> . Acesso em: 30 de abr. 2023.

PORTAL SOLAR. Mercado de Energia Solar no Brasil. São Paulo, 2021. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/mercado-de-energia-solar-no-brasil.html>> . Acesso em: 30 de abr. 2023.

RAMPINELLI, G. A.; Krenzinger, A. E Romero, F. C. Descrição e Análise de Inversores Utilizados em Sistemas Fotovoltaicos. Revista Ciências Exatas e Naturais, Vol.15, nº 1, Jan/Jun 2013.

TEIXEIRA, J. G. M., SOUSA, P. C. Roteiros de experimento para prática laboratorial no Fóton Lab. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica). UFG. Goiânia. GO, 2021.

SANTOS, I.P. Desenvolvimento de ferramenta de apoio à decisão em projetos de integração solar fotovoltaica à arquitetura. 2013. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2013.

SANTAREM, H.M.M., QUIXABEIRA, P.L.C. Desenvolvimento de bancada didática para sistema de energia solar fotovoltaica. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica). IFG *Câmpus* Goiânia. Goiânia. GO, 2022.

UFG. Universidade Federal de Goiás. Dados Abertos. Disponível em: <<https://dados.ufg.br/#:~:text=O%20portal%20de%20dados%20abertos,dado%20no%20%C3%A2mbito%20da%20UFG>>. Acesso em: 28 fev. 2023.

VICTRON ENERGY BLUE POWER. Manual: controlador de carga MPPT BlueSolar. Disponível em: <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Manual-BlueSolar-charge-controller-MPPT-75-10,-75-15,-100-15,-100-20,-100-20-48V-EN-NL-FR-DE-ES-SE-.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2022.

VICTRON ENERGY BLUE POWER. Manual: inversor Phoenix VE.Direct. Disponível em: <https://wcdn.net.com.br/wp-content/uploads/2020/12/Manual-Phoenix-Inverter-VE.Direct-250VA-1200VA-PT.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2022.

VILLALVA, M. G., GAZOLI, J.R. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. 1 ed. São Paulo: Érica. 2012.

APÊNDICE A – ROTEIROS DE EXPERIMENTOS E PRÁTICAS LABORATORIAIS

ROTEIROS DE EXPERIMENTOS – SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Experimento 1 – Conhecendo a bancada móvel ESF e seus componentes

Objetivos

Ao concluir às atividades propostas, o aluno deverá ser capaz:

- Identificar os equipamentos que compõem o sistema ESF;
- Entender o funcionamento básico de cada elemento;
- Conhecer os pontos de interconexão;
- Realizar leitura das grandezas no inversor e pelos instrumentos;
- Compreender os aspectos de segurança dos equipamentos;

Materiais: Bancada Móvel ESF e instrumentos.

Introdução teórica

A captação da radiação solar e sua respectiva conversão em energia elétrica por meio da célula fotovoltaica pode alimentar dispositivos que operam com energia elétrica. Os sistemas fotovoltaicos são compostos por: painel solar, inversor, controlador de carga, e baterias (*off-grid*). A célula fotovoltaica é o elemento fundamental do processo de conversão de energia solar em energia elétrica, sendo construída de material semicondutor. Já o inversor desempenha papel importante num sistema fotovoltaico, pois é responsável por converter a corrente contínua vinda dos módulos ESF em corrente alternada. O controlador de carga é responsável por controlar os efeitos da sobrecarga e descarga nas baterias do sistema, por meio do MPPT – *Maximum Power Point Tracking*. As baterias são responsáveis pelo armazenamento da energia DC da conversão da energia solar convertida nas fotocélulas.

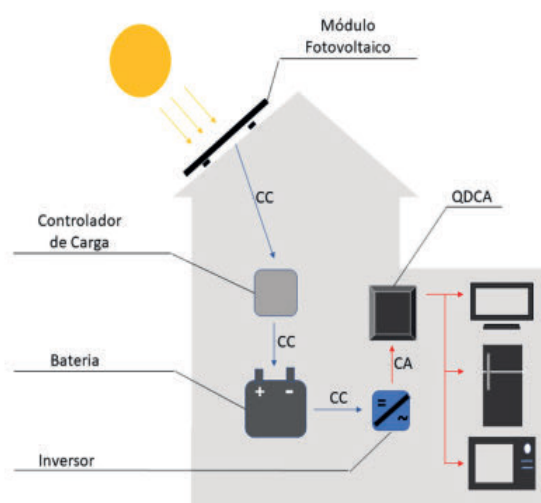
Podemos classificar os Sistemas Fotovoltaicos em 2 categorias principais: sistema isolado (*off-grid*) e sistema conectado à rede (*grid-tie*).

Sistema isolado (*off-grid*)

Do inglês *off-grid* ou fora da rede, também chamado como sistema autônomo, esse sistema foi concebido como solução mais econômica e confiável para obter energia elétrica. Apresenta como principal característica o fato de não estar conectado à rede elétrica.

As instalações residenciais com geração fotovoltaica, representam exemplo, onde tem-se o consumo de energia sendo suprido apenas pela geração fotovoltaica, principalmente em áreas rurais. Nessas instalações nos horários com pouca incidência de radiação solar ou mesmo na sua ausência, o suprimento é fornecido pelas baterias que estão conectados em paralelo ao sistema, ou seja, com incidência solar o suprimento é fornecido pelo gerador fotovoltaico, na ausência da luz solar o suprimento é mantido pela energia armazenada nas baterias. Uma possível configuração é mostrada na Figura 31.

Figura 31 - Sistema fotovoltaico *off-grid*



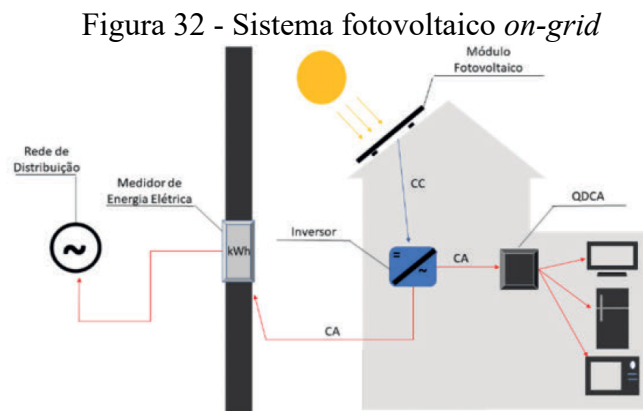
Fonte: *International Copper Association Brazil*, 2022

Sistema conectado à rede (*grid-tie*)

Novas tecnologias de inversores e medidores inteligentes, chamados de *smart meter*, permitiram conceber uma configuração de ligação dos sistemas fotovoltaicos denominada *on-grid (grid-tie)*. Nesta configuração, os sistemas fotovoltaicos são conectados à rede da concessionária de energia elétrica. Dessa forma, quando há excedente na geração fotovoltaica, tal excedente é inserido na rede de distribuição da concessionária, retornando como descontos na fatura do consumidor e/ou microgerador/minigerador. No caso do prosumidor, consumidor que produz energia, se a geração local não consiga suprir a demanda interna, a rede elétrica da concessionária mantém a potência na carga.

Nas instalações que usam a arquitetura *grid-tie* o medidor de energia deve ser do tipo *smart meter* ou do tipo bidirecional, que meça e armazene os dados lidos, tanto na entrada da

rede como na saída do gerador do sistema fotovoltaico. Comparado ao sistema *off-grid*, o *grid-tie* é eficiente, na medida que garante que toda geração será usada localmente ou disponibilizada na rede de distribuição da concessionária de energia. Na Figura 32 tem-se a ilustração de um sistema *grid-tie*. Existem também os sistemas fotovoltaicos híbridos que reúnem características das técnicas dos inversores autônômicos e dos que interagem com a rede, mas esses não serão abordados aqui. (PORTAL SOLAR, 2021)



Fonte: International Copper Association Brazil, 2022

Procedimento Prático

1. Identificar componentes da bancada e Fóton Lab e preencher com os dados solicitados.

Tabela 1 - Identificação de parâmetros do módulo fotovoltaico

Fabricante		
Info	Valor	Unidade
G (irradiância)		
AM (espectro)		
T _{cell} (temperatura da célula)		
P _{máx} (potência máxima)		
V _{mp} (tensão máxima)		
I _{mp} (corrente máxima)		
Observações:		

Tabela 2 - Identificação de parâmetros do inversor

Fabricante		
Info	Valor	Unidade
P_{continua} a 25°C		
P_{continua} a 40°C		
V_{ca}		
Frequência (f)		
Observações:		

2. Explique a função de cada equipamento de forma resumida.

- **Módulo ESF:** Transforma a energia incidente na forma de radiação em energia solar por meio do efeito fotovoltaico.

Figura 33 - Módulos ESF Bancada Móvel IFG Goiânia



Fonte: Autor

- **Inversor:** Transforma tensão DC que sai do módulo ESF em tensão AC para alimentar as cargas consumidoras AC e/ou injeta na rede da concessionária o excedente (*grid-tie*).

Figura 34 - Inversor Bancada Móvel ESF IFG Goiânia



Fonte: Autor

- **MPPT:** Controlador de carga responsável pelo ponto de máxima potência do módulo fotovoltaico e transfere essa potência para tensão da bateria. Mantendo a mesma em flutuação em condições normais de operação e/ou carga nos casos de descarga acentuada.

Figura 35 - MPPT Fóton Lab



Fonte: Autor

- **Bateria estacionária:** É um acumulador de energia que armazena ou fornece tensão DC oriunda dos módulos ESF.

Figura 36 - Bateria Fóton Lab



Fonte: Autor

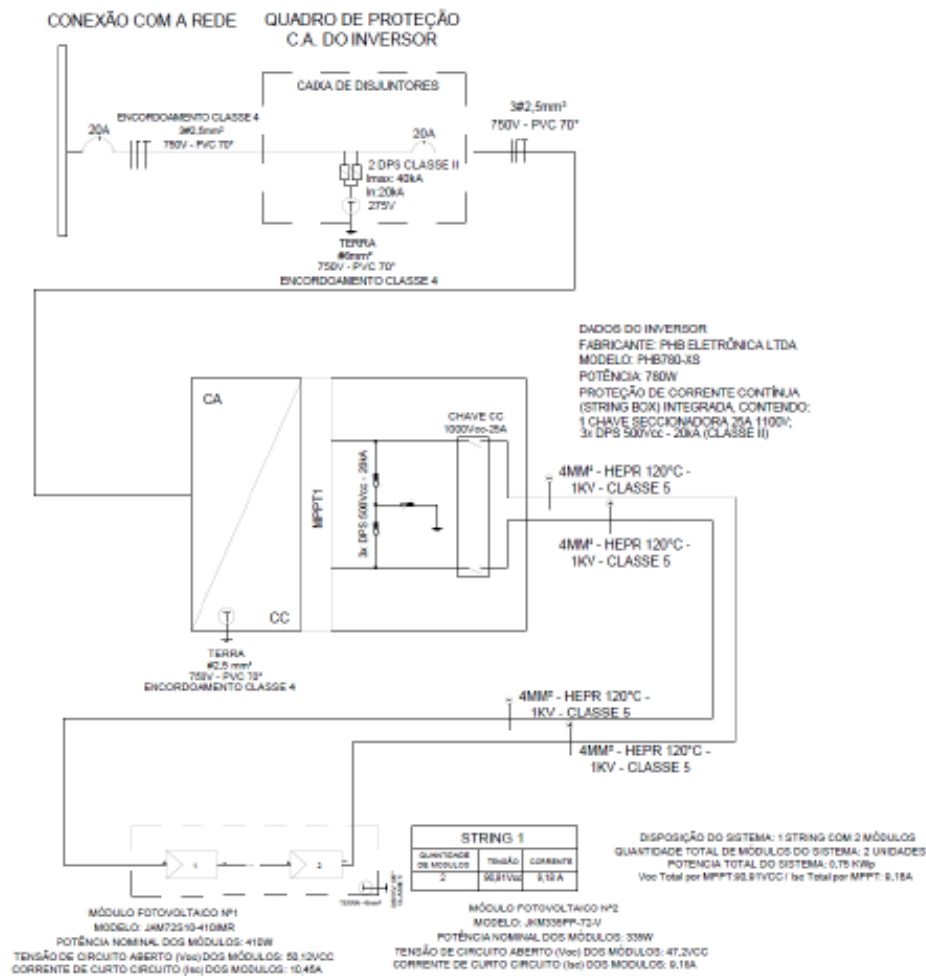
3. Identificar componentes do sistema ESF por meio do diagrama unifilar e foto da bancada

Figura 37 - Visão geral dos componentes da Bancada Móvel ESF



Fonte: Autor

Figura 38 - Diagrama Unifilar da Bancada Móvel ESF IFG Goiânia



Fonte: SANTAREM/QUIXABEIRA, 2022

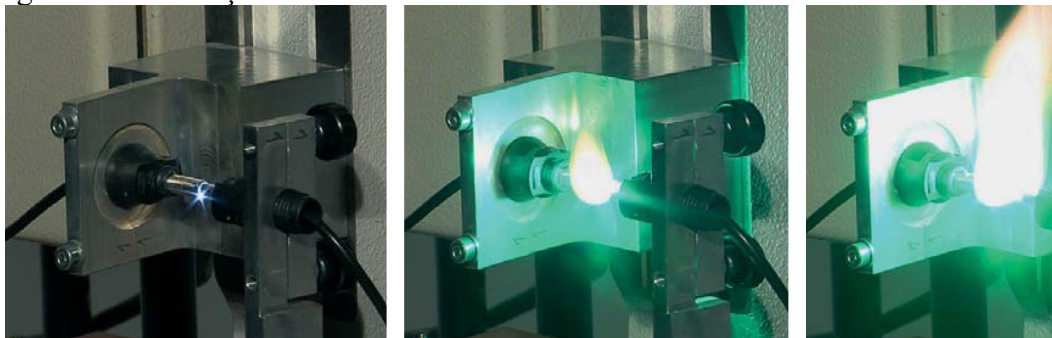
4. Marque a opção correta quanto ao sistema ESF utilizado na Bancada Móvel Fotovoltaica.

- () *Off-grid*
- () *Grid-tie*
- () Híbrido

5. Siga as regras de acesso, permanência e de segurança na operação e observação dos experimentos. Realize as medições usando os instrumentos e escalas de acordo com a grandeza a ser medida. Só toque nas conexões se tiver certeza de que as mesmas estão desenergizadas.

Conforme a Figura 39 há o risco de formação de arco-voltaico ao retirar os conectores MC-04 dos cabos que interligam os módulos e o inversor com os mesmos energizados.

Figura 39 - Formação arco-voltaico nos conectores mc-04 dos módulos fotovoltaicos



Fonte: UFSC, 2022

Bibliografia

CADERNO DIDÁTICO ENERGIA SOLAR. Experimentação remota móvel para educação básica: Conversão de Energia Solar em Energia. RexLab/UFSC. Disponível em: <http://relle.ufsc.br/moodle/pluginfile.php/3152/mod_resource/content/2/caderno%20didatico.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2023.

FILHO, J. P. A. Atividades Experimentais: Do Método À Prática Construtivista. 2000. 302 f. Tese (Doutorado em Educação) – Departamento de Centro de Ciências da Educação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

JINKO SOLAR. *Datasheet PV module Eagle 72P 320-340 Watt*. Disponível em: <<https://www.jinkosolar.com/en/site/dwparametern/>>. Acesso em: 01 abr. 2023.

PINHO, J.T., GALDINO, M.A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB. 2014.

PHB SOLAR. *Datasheet inversor PHB780-XS*. Disponível em: <<https://www.energiasolarphb.com.br/produto/inversor-phb780-xs-2/>>. Acesso em: 01 abr. 2023.

TEIXEIRA, J. G. M., SOUSA, P. C. Roteiros de experimento para prática laboratorial no Fóton Lab. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica). UFG. Goiânia. GO, 2021.

SANTAREM, H.M.M., QUIXABEIRA, P.L.C. Desenvolvimento de bancada didática para sistema de energia solar fotovoltaica. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica). IFG Câmpus Goiânia. Goiânia. GO, 2022.

VILLALVA, M. G., GAZOLI, J.R. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. 1 ed. São Paulo: Érica. 2012.

Experimento 2 – Estudo do efeito fotovoltaico

Objetivos

Ao concluir às atividades propostas, o aluno deverá ser capaz:

- Descrever o efeito fotovoltaico;
- Descrever como funcionam os módulos ESF;
- Correlacionar a tensão de saída com variações na fonte;
- Compreender a importância da irradiância na ESF.

Materiais: Bancada Móvel ESF, alicate amperímetro AC/DC, multímetro TrueRMS, lona escura e papel manteiga.

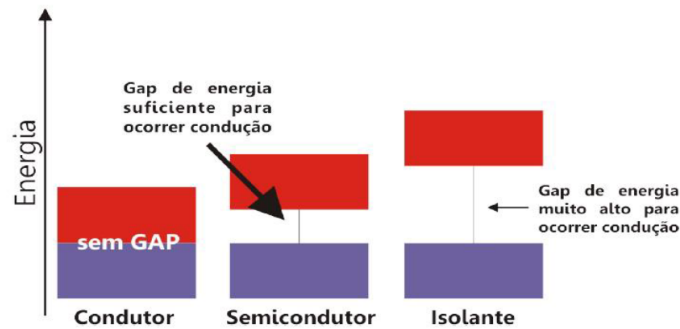
Introdução teórica

O Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico, caracteriza-se quando sobre um material semicondutor há incidência de luz, sendo esta luz de qualquer fonte, assim os elétrons se movimentam através das bandas de energia. Os materiais semicondutores são usados na produção das células fotovoltaicas, tornando possível um fluxo ordenado de elétrons, que geram uma corrente elétrica, dessa forma a conversão é direta de energia solar para elétrica.

Os semicondutores apresentam dois comportamentos distintos: podem se comportar como materiais condutores ou materiais isolantes a depender dos fatores aos quais estão submetidos, tais como: temperatura, radiação incidente, pressão, dentre outros. Os semicondutores apresentam um *Gap* entre as bandas de condução e valência, podendo ser entendido como um intervalo entre as bandas, sendo suficiente para passagem de elétrons e assim estabelecer uma corrente, conforme ilustra a Figura 40.

Figura 40 - Nível de energia entre os materiais

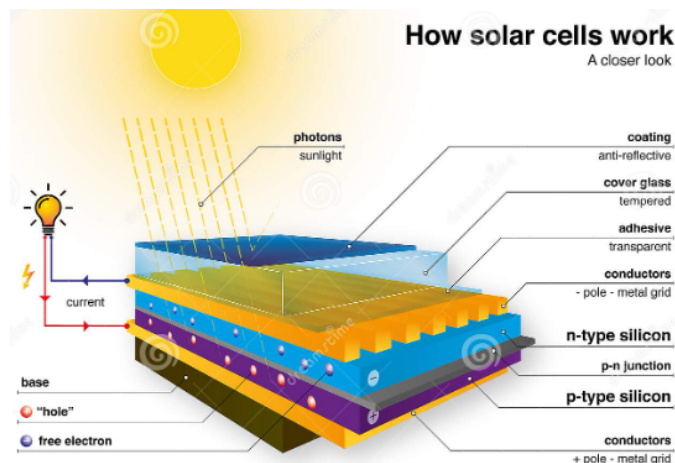


Fonte: CADERNO DIDÁTICO/UFSC, 2015

Normalmente a banda de valência dos materiais semicondutores, está completa, e a banda de condução vazia. Nestas condições os elétrons da camada de valência obtêm energia cinética, conseguem quebrar ligações alcançando seu estado livre. Tal fenômeno acontece quando ele recebe fótons de radiação eletromagnética, dentro do espectro visível, ou seja, os elétrons da camada de valência podem saltar para a camada de condução, gerando dentro estrutura cristalina do semicondutor uma corrente elétrica.

Atualmente os semicondutores mais indicados para conversão fotovoltaica, são: o silício amorfo hidrogenado (a-Si:H) e o silício cristalino (c-Si), bastante utilizados. O silício cristalino é o material dominante em tecnologias fotovoltaicas. Tem-se uma diferença estrutural e também uma distinção na viabilidade econômica entre eles, no entanto, há várias pesquisas, empenhadas no desenvolvimento de tecnologias que visam otimizar custos e eficiência dessas células ESF. A Figura 41 ilustra o efeito fotovoltaico na junção PN.

Figura 41 - O efeito fotovoltaico na junção pn



Fonte: www.nucleoats.ind.br

Procedimento Prático

1. Monte a bancada móvel ESF, para que fique conforme Figura 42, a seguir, obstrua totalmente um dos módulos.

Figura 42 - Etapa 1 efeito fotovoltaico



Fonte: Autor

Após a montagem confira todas as conexões, ligue a bancada sem carga e preencha a tabela 3 com os dados informados no painel do inversor. Calcule a diferença entre a potência nominal e anote também.

Tabela 3 - Valores medidos após ligar a bancada

Etapa 1	I	V	Potência (W)	P _{NOM} (W)	Diferença (%)
Valor					
Observações:					

2. Ao finalizar a etapa anterior, repita novamente, mas agora com os 2 módulos fotovoltaicos descobertos. Conforme Figura 43.

Figura 43 - Etapa 2 módulos sem obstrução



Fonte: Autor

Tabela 4 - Valores medidos após ligar a bancada (sem carga)

Etapa 2	I	V	Potência (W)	P _{NOM} (W)	Diferença (%)
Valor					

Observações:

3. Com base nos valores obtidos, avalie as diferenças entre os resultados das etapas 1 e 2.

Os resultados obtidos são diferentes uma vez que a irradiância incidente no painel solar em cada etapa do experimento varia. Observa-se que tanto tensão como corrente são diretamente proporcionais à luminosidade incidente nos módulos (absorvida). De acordo com o referencial teórico, o efeito fotovoltaico é um fenômeno físico no qual as energias dos fótons são absorvidas pelos elétrons, de forma que esses conseguem romper o *gap* de energia que existe nos materiais semicondutores.

Bibliografia

CADERNO DIDÁTICO ENERGIA SOLAR. Experimentação remota móvel para educação básica: Conversão de Energia Solar em Energia. RexLab/UFSC. Disponível em: <http://relle.ufsc.br/moodle/pluginfile.php/3152/mod_resource/content/2/caderno%20didatico.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2023.

FILHO, J. P. A. Atividades Experimentais: Do Método À Prática Construtivista. 2000. 302 f. Tese (Doutorado em Educação) – Departamento de Centro de Ciências da Educação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

INTERNATIONAL COPPER ASSOCIATION BRAZIL. Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: Conceitos, Aplicações e Estudos de Caso. Disponível em: <https://abcobre.org.br/livro-energia-solar-fotovoltaica-no-brasil/>. Acesso em 29 abr. 2023.

JINKO SOLAR. *Datasheet PV module Eagle 72P 320-340 Watt*. Disponível em: <<https://www.jinkosolar.com/en/site/dwparametern/>>. Acesso em: 01 abr. 2023.

TEIXEIRA, J. G. M., SOUSA, P. C. Roteiros de experimento para prática laboratorial no Fóton Lab. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica). UFG. Goiânia. GO, 2021.

PINHO, J.T., GALDINO, M.A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESEB. 2014.

PHB SOLAR. *Datasheet inversor PHB780-XS*. Disponível em: <<https://www.energiasolarphb.com.br/produto/inversor-phb780-xs-2/>>. Acesso em: 01 abr. 2023.

VILLALVA, M. G., GAZOLI, J.R. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. 1 ed. São Paulo: Érica. 2012.

Experimento 3 – Sombreamento

Objetivos

Ao concluir às atividades propostas, o aluno deverá ser capaz:

- Compreender o efeito do sombreamento no desempenho do módulo ESF;
- Correlacionar as variações da corrente de saída do módulo, devido ao sombreamento;
- Realizar medições de corrente de curto quando a célula é sombreada.

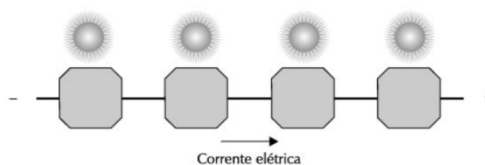
Materiais: Bancada Móvel ESF, alicate amperímetro AC/DC, multímetro TrueRMS, lona escura e papel manteiga.

Introdução teórica

Efeitos do Sombreamento no Módulo Fotovoltaico

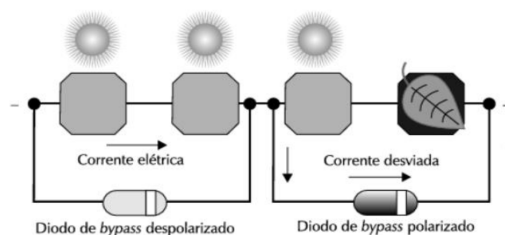
O sombreamento é um problema significativo na produção de energia dos módulos fotovoltaicos. Quando uma área do módulo fica sombreada, há diminuição na irradiância absorvida pelo módulo e consequente queda na geração de energia. Nas Figuras 44 e 45 têm-se o funcionamento normal e com sombreamento das células. Qualquer obstáculo aos raios solares causará sombreamento no módulo, fazendo a corrente diminuir e essa redução se propaga para as demais células devido à conexão em série das células fotovoltaicas. (PINHO, 2014).

Figura 44 - Funcionamento normal do módulo fotovoltaico



Fonte: VILLALVA, 2012.

Figura 45 - Funcionamento do módulo fotovoltaico com sombreamento



Fonte: VILLALVA, 2012.

O sombreamento pode levar ao efeito de Ponto Quente (*Hot-Spot*) nos módulos fotovoltaicos. Isso ocorre quando há transferência de energia em excesso das células não sombreadas para a célula sombreada, o que pode resultar em um aumento significativo de temperatura e até mesmo na ruptura do vidro da célula afetada. Para evitar esse problema, são utilizados diodos de desvio (*bypass*) que são conectados em paralelo, oferecendo um caminho alternativo para a corrente elétrica da célula sombreada. (PINHO, 2014)

Procedimento Prático

1. Monte a bancada móvel ESF, para que fique conforme Figura 33 do Experimento 1, de forma que os módulos fiquem desobstruídos. Anote os valores na tabela.

Tabela 5 - Medidas (sem sombreamento)

Etapa 1	I_{sc} (A)
Sem sombreamento	

Observações:

2. Obstrua parcialmente um dos módulos ESF e anote os valores na tabela. Conforme Figura 42 do Experimento 2.

Tabela 6 - Medidas (parcialmente sombreado)

Etapa 2	I_{sc} (A)
Parcialmente sombreado	

Observações:

3. Obstrua totalmente os módulos ESF e anote os valores na tabela.

Tabela 7 - Medidas (totalmente sombreado)

Etapa 3	I _{sc} (A)
Sombreamento total	
Observações:	

4. Avalie a variação dos parâmetros de saída com os módulos obstruídos, parcialmente obstruído e sem obstrução.

O sombreamento em sistemas fotovoltaicos causa variações na corrente de saída, afetando a geração de energia. Existe uma correlação entre a potência calculada e o efeito na produtividade do módulo quando ocorre sombreamento. É importante analisar o potencial de sombreamento antes da instalação do sistema e implementar soluções de mitigação para maximizar a produtividade.

5. O que é o fenômeno *hotspot* e como ele influencia nas células que compõem os módulos ESF.

Quando uma célula fotovoltaica está sombreada, ela pode agir como uma carga para outras células, dissipando energia como calor e aumentando a temperatura. Isso é conhecido como ponto quente ou *hotspot*, e é prejudicial e irreversível. Para mitigar esse problema, é recomendado o uso de diodos de desvio (*bypass*) que redirecionam a corrente ao redor da célula sombreada, minimizando os efeitos negativos do sombreamento.

Bibliografia

FILHO, J. P. A. Atividades Experimentais: Do Método À Prática Construtivista. 2000. 302 f. Tese (Doutorado em Educação) – Departamento de Centro de Ciências da Educação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

JUNIOR, L.A.P., KRENZINGUER, A. Desenvolvimento de bancada para monitoramento de módulos fotovoltaicos em ensaio de light-soaking. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado, RS. p. 349, 2018.

TEIXEIRA, J. G. M., SOUSA, P. C. Roteiros de experimento para prática laboratorial no Fóton Lab. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica). UFG. Goiânia. GO, 2021.

PINHO, J.T., GALDINO, M.A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESEB. 2014.

VILLALVA, M. G., GAZOLI, J.R. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. 1 ed. São Paulo: Érica. 2012.

Experimento 4 – Irradiância, temperatura e sujidade

Objetivos

Ao concluir às atividades propostas, o aluno deverá ser capaz:

- Identificar os parâmetros de entrada e saída do sistema;
- Correlacionar as variações da entrada com a saída;
- Compreender a importância da irradiância e sua relação com a geração de ESF;
- Compreender as variações na saída causada pela temperatura e sujidade dos módulos ESF.

Materiais: Bancada Móvel ESF, alicate amperímetro AC/DC, multímetro TrueRMS, lona escura e papel manteiga.

Introdução teórica

Os Efeitos da irradiância, temperatura e sujidade

A célula fotovoltaica converte a energia que chega na forma de luz solar em energia elétrica. A taxa na qual essa energia na forma luminosa chega à célula por unidade de área (ou densidade superficial de potência) é chamada de “irradiância”, que é simbolizada pela letra G maiúscula e medida em Watt por metro quadrado.

$$Irradiância = G \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

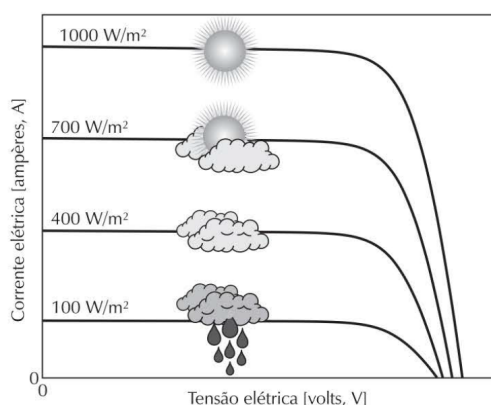
A irradiância é influenciada pela hora do dia, disponibilidade de raios solares e massa atmosférica (AM). Nos ensaios padronizados, são adotadas as STC (standard test conditions) que estabelecem valores padrões para os parâmetros de entrada, incluindo a irradiância (PINHO, 2014).

$$GSTC = 1000 \left[\frac{W}{m^2} \right] = 1 \text{ sol pleno}$$

Estes valores padronizados servem para melhorar o comparativo entre os diferentes módulos. Os outros valores *standard test conditions* são: Incidência normal, Espectro solar AM 1.5 e temperatura da célula de 25 °C.

A limpeza da superfície do módulo fotovoltaico é uma condição importante nos ensaios, pois a sujeira na superfície afeta a incidência de raios luminosos nas células fotovoltaicas. A corrente elétrica que o módulo fotovoltaico pode fornecer está diretamente relacionada à intensidade da radiação solar que incide sobre as células. Com uma irradiância de 1 sol pleno, ou seja, 1000 W/m^2 , o módulo é capaz de fornecer a corrente máxima especificada em sua ficha técnica, considerando uma temperatura de 25°C . Essa corrente máxima fornecida pelo módulo varia de forma proporcional à irradiância (PINHO, 2014). Em situações de baixa incidência luminosa, a capacidade de geração de energia do módulo é comprometida, como mostrado na Figura 46. Isso destaca a importância de manter a superfície dos módulos limpa, a fim de maximizar a incidência de luz solar e, conseqüentemente, a geração de energia.

Figura 46 - Influência da radiação solar na operação do módulo ESF

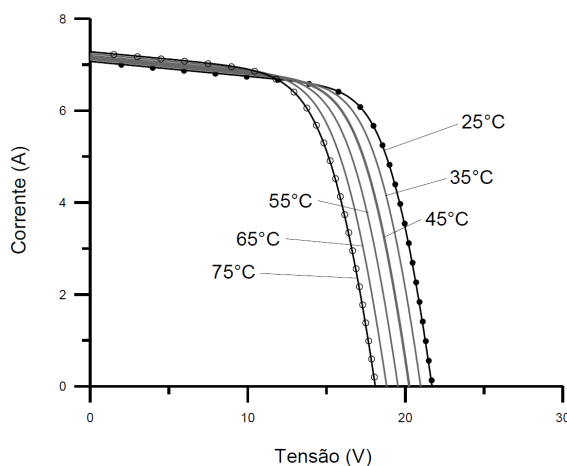


Fonte: VILLALVA, 2012

Já a temperatura tem influência significativa na tensão e corrente dos módulos fotovoltaicos. A tensão do módulo diminui à medida que a temperatura aumenta, pois a taxa de recombinação de portadores de carga (elétrons e lacunas) dentro das células solares aumenta, o que leva a uma diminuição da tensão de saída. A corrente do módulo também é afetada pela temperatura, mas de forma diferente da tensão, a medida que a temperatura sobe, a corrente de saída tende a aumentar, porque o aumento da temperatura fornece mais energia térmica aos portadores de carga, aumentando sua mobilidade e, conseqüentemente, a corrente elétrica. A potência de saída do módulo, geralmente diminui à medida que a temperatura aumenta, devido à queda na tensão. O aumento da temperatura pode levar a perdas adicionais de eficiência nos módulos, devido à resistência interna mais alta, maior degradação das células solares e degradação de materiais em condições ambientais adversas. As curvas I-V

em função da temperatura são ilustradas na Figura 47.

Figura 47 - Curvas I-V módulo de ESF em função da temperatura



Fonte: PINHO, 2014

A sujidade na superfície do módulo fotovoltaico é um fator importante a ser considerado. Partículas de sujeira podem bloquear a luz que deve alcançar as células, reduzindo a energia disponível para gerar corrente elétrica. Isso resulta em uma diminuição da eficiência do módulo, pois a potência fornecida é reduzida para uma mesma quantidade de energia irradiante, estudos demonstraram que a sujidade pode diminuir a eficiência dos módulos consideravelmente. Na Figura 48, é possível observar a aparência opaca da superfície de um módulo exposto à poeira. Portanto, é essencial realizar a limpeza regular dos módulos fotovoltaicos para manter sua eficiência e garantir a máxima geração de energia.

Figura 48 - Módulo fotovoltaico sujo



Fonte: <https://mecatronsolar.com.br>

Procedimento Prático

1. Monte a bancada móvel ESF, conforme Figura 49, confira todas as conexões e ligue. Preencha a tabela com os valores nominais STC e NOCT disponíveis no *datasheet* dos módulos, a seguir anote os valores sem obstrução e com obstrução parcial.

Figura 49 - Bancada móvel etapas experimeto-4



Fonte: Autor

Tabela 8 - Etapa 1 experimento 4

Fabricante/modelo		
INFO	Módulo 1	Módulo 2
Valores nominais do sistema (STC)¹		
Tensão de circuito aberto (Voc)		
Corrente de curto-circuito (Isc)		
Valores nominais do sistema (NOCT)¹		
Tensão de circuito aberto (Voc)		
Corrente de curto-circuito (Isc)		
Valores sem obstrução		
Tensão de circuito aberto (Voc)		
Corrente de curto-circuito (Isc)		
Valores obstrução parcial		
Tensão de circuito aberto (Voc)		
Corrente de curto-circuito (Isc)		
Observações:		

(1) – Valores fornecidos no *datasheet* dos módulos ESF

2. Compare os valores nominais do sistema STC (*standard test conditions*) e NOCT (*Normal Operation Cell Temperature*) com os obtidos na prática. Avalie os resultados.

Os valores obtidos na prática diferem dos valores nominais do sistema devido à diferença da irradiação e temperatura sobre o módulo obtido no ensaio STC/NOCT e os valores obtidos na prática, conforme as condições climáticas do momento.

3. Estime a irradiância com e sem obstrução dos módulos usando a fórmula:

$$G_i = \frac{1000 * I_{sc}}{I_{sc}(STC)}$$

Tabela 9 - Irradiância estimada sem e com obstrução

Info	Valor	Unidade
G ₁		
G ₂		
Observações:		

4. Retire a obstrução, meça a temperatura sobre a superfície do módulo e anote os valores na Tabela 10. Após um minuto, obstrua toda superfície dos módulos, anote os valores na tabela.

5. Aguarde 5 minutos e retire a obstrução dos módulos, anote os valores na Tabela 10. Após um minuto, obstrua-os novamente e anote os novos valores na tabela.

6. Deixe a bancada móvel ESF sob sombra durante 10 minutos, decorrido o tempo exponha-a novamente de forma que os módulos recebam irradiação sem obstrução, realize as medidas e anote na tabela. Meça a temperatura sobre os módulos, caso esteja inferior às etapas anteriores aguarde até que a superfície esteja num valor mais elevado e anote os valores na tabela.

7. Mantenha a bancada móvel exposta sem obstruções até que a temperatura fique maior que na etapa anterior ($TA_7 > TA_6$) e anote os valores na Tabela 10.

Tabela 10 - Efeitos da temperatura/sujidade na geração

Fabricante/modelo		
ETAPAS		Valor
Em temperatura ambiente		
		Sem obstrução Com obstrução
Etapa-4	V_{OC}	V_{OC}
	I_{SC}	I_{SC}
	$T_{MÓD}$	$T_{MÓD}$
Temperatura ambiente (após 5 min)		
		Sem obstrução Com obstrução
Etapa-5	V_{OC}	V_{OC}
	I_{SC}	I_{SC}
	$T_{MÓD}$	$T_{MÓD}$
Temperatura ambiente (após 10 min)		
		Sem obstrução Com obstrução
Etapa-6	V_{OC}	V_{OC}
	I_{SC}	I_{SC}
	$T_{MÓD}$	$T_{MÓD}$
Temperatura ambiente longa exposição ($T_{A7} > T_{A6}$)		
		Sem obstrução
Etapa-7	V_{OC}	
	I_{SC}	
	$T_{MÓD}$	
Observações:		

8. Avalie a variação dos parâmetros de saída com os módulos obstruídos e quando estão aquecidos (temperatura ambiente, exposição curta e exposição longa). O que ocorre nos módulos para que haja tais variações?

Nas simulações de sujidade e temperatura em módulos fotovoltaicos, menos fótons atingem a célula, resultando em menos elétrons excitados e menor corrente elétrica gerada. O aumento da temperatura aumenta a condutividade do material, permitindo que mais elétrons saltem entre as camadas e gerem maior corrente. No entanto, o aumento da temperatura também causa uma queda na tensão de saída devido ao aumento da resistência interna do material. Portanto, a sujidade/obstrução reduz a corrente e a temperatura aumenta a corrente, mas diminui a tensão.

Bibliografia

CADERNO DIDÁTICO ENERGIA SOLAR. Experimentação remota móvel para educação básica: Conversão de Energia Solar em Energia. RexLab/UFSC. Disponível em: <http://relle.ufsc.br/moodle/pluginfile.php/3152/mod_resource/content/2/caderno%20didatico.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2023.

CUNHA, A.F.V., SILVA, M.J.F.M.S., SILVA, M.K.A., SILVA, T.S. Projeto e aplicação de um conjunto didático sobre energia solar fotovoltaica. V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife, PE. p. 2129, 2015.

FILHO, J. P. A. Atividades Experimentais: Do Método À Prática Construtivista. 2000. 302 f. Tese (Doutorado em Educação) – Departamento de Centro de Ciências da Educação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

JINKO SOLAR. *Datasheet PV module Eagle 72P 320-340 Watt*. Disponível em: <<https://www.jinkosolar.com/en/site/dwparametern/>>. Acesso em: 01 abr. 2023.

JINKO SOLAR. *Datasheet PV module Cheetah HC 72M 390-410 Watt*. Disponível em: <<https://www.jinkosolar.com/en/site/dwparametern/>>. Acesso em: 01 abr. 2023.

JUNIOR, L.A.P., KRENZINGUER, A. Desenvolvimento de bancada para monitoramento de módulos fotovoltaicos em ensaio de light-soaking. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado, RS. p. 349, 2018.

TEIXEIRA, J. G. M., SOUSA, P. C. Roteiros de experimento para prática laboratorial no Fóton Lab. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica). UFG. Goiânia. GO, 2021.

PINHO, J.T., GALDINO, M.A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB. 2014.

PHB SOLAR. *Datasheet inversor PHB780-XS*. Disponível em: <<https://www.energiasolarphb.com.br/produto/inversor-phb780-xs-2/>>. Acesso em: 01 abr. 2023.

VILLALVA, M. G., GAZOLI, J.R. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. 1 ed. São Paulo: Érica. 2012.

Experimento 5 – Inclinação e direção dos módulos ESF

Objetivos

Ao concluir às atividades propostas, o aluno deverá ser capaz:

- Compreender a importância do ângulo de incidência e a direção do módulo ESF;
- Correlacionar as variações do ângulo com a potência de saída;
- Entender que o sombreamento dos módulos ESF também está relacionada com a geometria Sol/Terra.

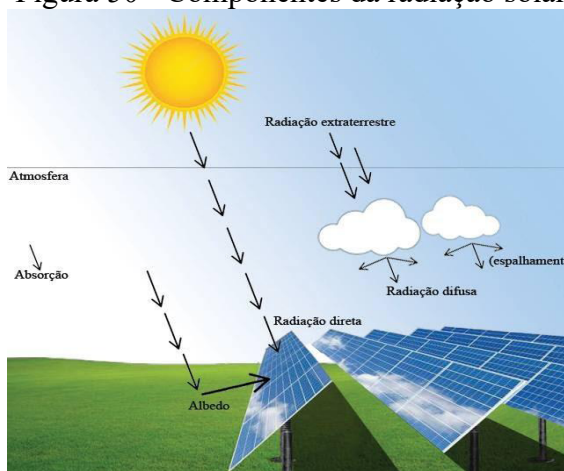
Materiais: Bancada Móvel ESF, alicate amperímetro AC/DC, multímetro TrueRMS.

Introdução teórica

Os Efeitos da inclinação e direção dos módulos ESF na irradiância absorvida

O ângulo de incidência e a direção do módulo fotovoltaico são fatores importantes a serem considerados na instalação e no desempenho da geração de energia solar fotovoltaica. O ângulo de incidência é o ângulo formado entre a direção dos raios solares incidentes e a superfície do módulo fotovoltaico. Quando os raios solares incidem perpendicularmente à superfície do painel (ângulo de incidência de 0 grau), a eficiência de conversão é maximizada. Na Figura 50 têm-se os componentes da radiação solar.

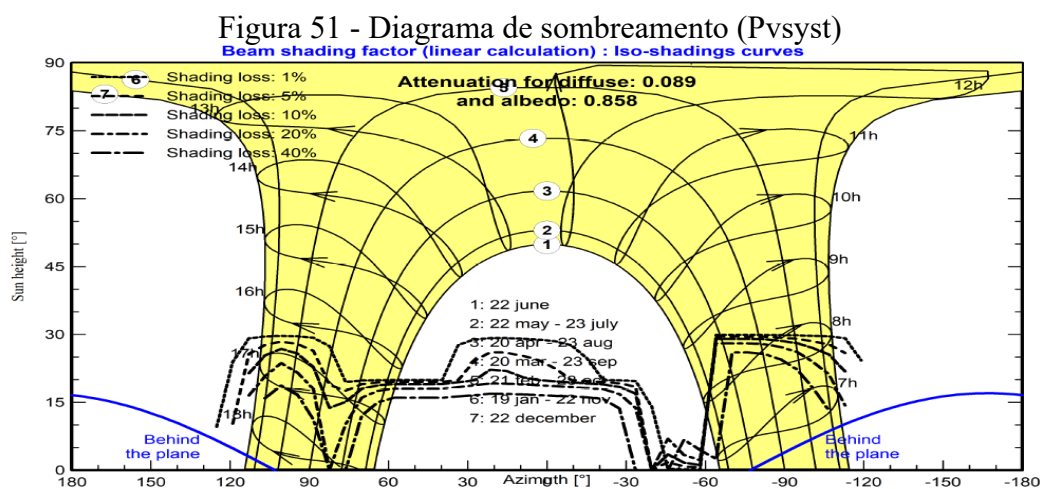
Figura 50 - Componentes da radiação solar



Fonte: PINHO, 2014.

À medida que o ângulo de incidência aumenta, a eficiência de conversão diminui, resultando em uma menor produção de energia elétrica. Ao ajustar o ângulo de inclinação do módulo fotovoltaico, é possível absorver a maior quantidade possível de luz solar. Isso significa que o módulo estará mais alinhado com a direção dos raios solares durante diferentes períodos do dia e ao longo do ano. O ajuste adequado do ângulo de inclinação pode maximizar a exposição ao sol e, consequentemente, a produção de energia. (MARIANO, 2022).

Já a direção do módulo fotovoltaico refere-se à orientação em relação aos pontos cardeais, como norte, sul, leste ou oeste. Dependendo da localização geográfica, a direção solar ideal pode variar. Em geral, para o hemisfério sul, orientar os painéis solares para o norte pode proporcionar uma melhor exposição solar ao longo do dia. A direção correta pode garantir uma captura máxima de energia solar ao longo do ano. Na Figura 51 tem-se um diagrama de sombreamento no qual podemos ver a importância do ângulo de incidência numa instalação.



Assim considerar o ângulo de incidência e a direção do módulo fotovoltaico é essencial para dimensionar adequadamente o sistema. Também podemos deduzir que a incidência da radiação solar é intermitente, não estando disponível a qualquer tempo, pois depende do posicionamento do sistema de captação e de variações meteorológicas, período do dia e estação do ano. Na maior parte do Brasil, assim como em todo hemisfério sul, os raios solares têm direção norte/sul quase o ano todo, sendo aconselhável nas instalações

fotovoltaicas o direcionamento dos painéis solares para o norte para melhor incidência da radiação solar. (LABREN, 2017)

Procedimento Prático

1. Monte a bancada móvel ESF, para que fique conforme Figura 52. Após a montagem posicione a bancada para posição de ângulo 0° . Anote os valores obtidos na Tabela 11.

Figura 52 - Bancada móvel com tilt 0°



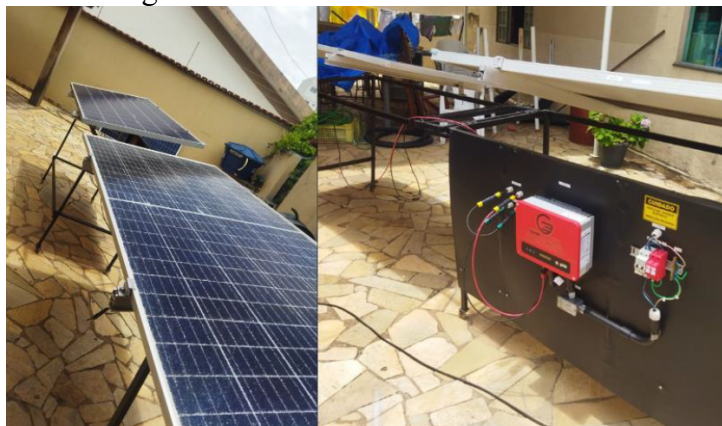
Fonte: SANTAREM/QUIXABEIRA, 2022

Tabela 11 - Experimento ângulo de incidência tilt 0°

Experimento 0°		
Info	Valor	Unidade
Tensão dos módulos em série		
Corrente dos módulos em série		
Potência injetada na rede		
Observações:		

2. Agora posicione a bancada para posição de ângulo 15° , conforme Figura 53. Anote os valores obtidos na Tabela 12.

Figura 53 - Bancada móvel com tilt 15°



Fonte: SANTAREM/QUIXABEIRA, 2022

Tabela 12 - Experimento ângulo de incidência tilt 15°

Experimento 15°		
Info	Valor	Unidade
Tensão dos módulos em série		
Corrente dos módulos em série		
Potência injetada na rede		
Observações:		

3. Agora posicione a bancada para posição de ângulo 30°, conforme Figura 54. Anote os valores obtidos na Tabela 13.

Figura 54 - Bancada móvel com tilt 30°



Fonte: SANTAREM/QUIXABEIRA, 2022

Tabela 13 - Experimento ângulo de incidência tilt 30°

Experimento 30°		
INFO	VALOR	UNIDADE
Tensão dos módulos em série		
Corrente dos módulos em série		
Potência injetada na rede		
Observações:		

4. Agora posicione a bancada para posição de ângulo 45° , conforme Figura 55. Anote os valores obtidos na Tabela 14.

Figura 55 - Bancada móvel com tilt 45°



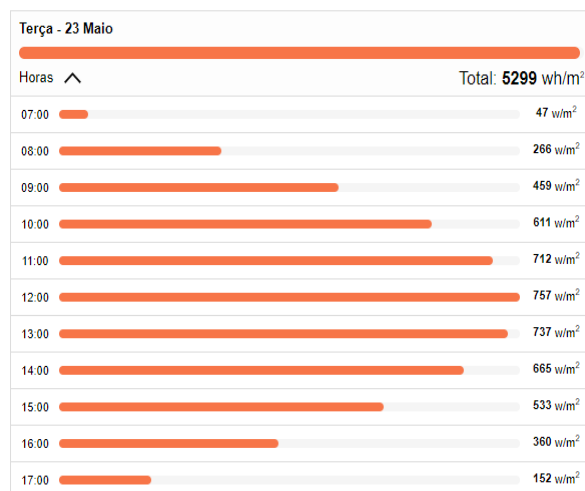
Fonte: SANTAREM/QUIXABEIRA, 2022

Tabela 14 - Experimento ângulo de incidência tilt 45°

Experimento 45°		
Info	Valor	Unidade
Tensão dos módulos em série		
Corrente dos módulos em série		
Potência injetada na rede		
Observações:		

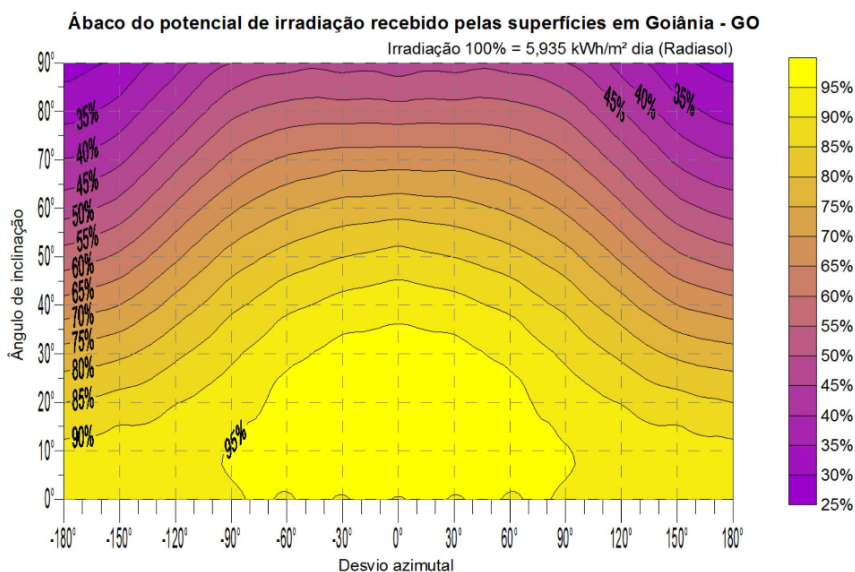
5. Avalie os dados obtidos no experimento e os compare a irradiação solar, conforme Figura 56, prevista para Goiânia em 22/05/2023 e com o Ábaco do potencial de irradiação de Goiânia, conforme Figura 57.

Figura 56 - Irradiação prevista para Goiânia (23/05/2023)



Fonte: <https://pt.tutiempo.net/radiacao-solar/goiania.html>

Figura 57 - Ábaco potencial de irradiação solar em Goiânia



Fonte: SANTOS/UFSC, 2013.

Espera-se que os resultados obtidos sejam bem próximos aos previstos, sendo as condições meteorológicas no momento do teste fator preponderante na avaliação dos resultados, bem como o sombreamento, sujidade e temperatura dos módulos.

Bibliografia

CADERNO DIDÁTICO ENERGIA SOLAR. Experimentação remota móvel para educação básica: Conversão de Energia Solar em Energia. RexLab/UFSC. Disponível em: <http://relle.ufsc.br/moodle/pluginfile.php/3152/mod_resource/content/2/caderno%20didatico.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2023.

JINKO SOLAR. *Datasheet PV module Eagle 72P 320-340 Watt*. Disponível em: <<https://www.jinkosolar.com/en/site/dwparametern/>>. Acesso em: 01 abr. 2023.

PINHO, J.T., GALDINO, M.A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB. 2014.

PHB SOLAR. *Datasheet inversor PHB780-XS*. Disponível em: <<https://www.energiasolarphb.com.br/produto/inversor-phb780-xs-2/>>. Acesso em: 01 abr. 2023.

SANTAREM, H.M.M., QUIXABEIRA, P.L.C. Desenvolvimento de bancada didática para sistema de energia solar fotovoltaica. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica). IFG Câmpus Goiânia. Goiânia. GO, 2022.

VILLALVA, M. G., GAZOLI, J.R. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. 1 ed. São Paulo: Érica. 2012.

Experimento 6 – Alimentando cargas CA

Objetivos de aprendizado

Ao final dessa aula, os alunos devem ser capazes de:

- Entender a função do inversor no sistema fotovoltaico;
- Identificar os pontos de ligação de entrada e saída;
- Mensurar as grandezas elétricas de entrada e saída de um inversor;
- Compreender o processo de conversão CC/CA;
- Estimar a eficiência de um inversor a partir das potências de entrada e saída.

Materiais: Bancada Móvel ESF, alicate amperímetro AC/DC, multímetro TrueRMS, 2 lâmpadas LED.

Introdução teórica

O inversor é responsável por converter a corrente CC dos módulos fotovoltaicos em corrente CA para as cargas, otimizar o desempenho do sistema, sincronizar com a rede elétrica, proteger o sistema e permitir a integração com sistemas de armazenamento de energia. Ele desempenha um papel crucial na viabilização do uso da energia solar em aplicações práticas. O inversor possui recursos avançados, como o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), ele monitora a tensão e a corrente de entrada dos módulos e ajusta a operação para maximizar a eficiência do sistema, garantindo que o máximo de energia possível seja extraído dos módulos, na Figura 58 tem-se as conexões da bancada móvel do IFG, onde vemos os cabos que vem dos módulos e entram no inversor e as conexões AC que vão passar pelas proteções e vão para o medidor bidirecional ou *smart meter*.

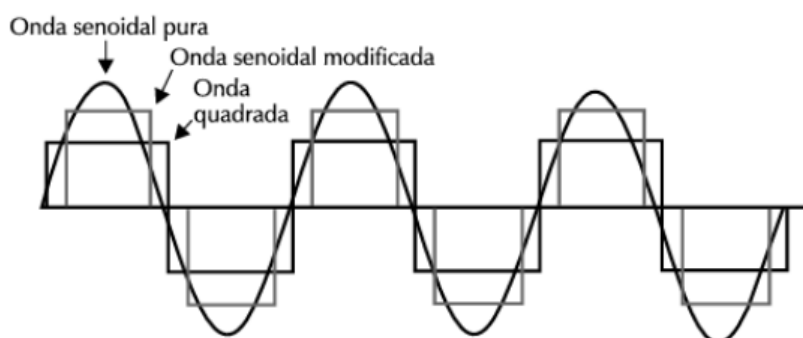
Figura 58 - Conexões inversor bancada móvel



Fonte: Autor

Um inversor típico emprega a modulação por largura de pulsos (PWM, *Pulse Width Modulation*) para converter o sinal de corrente contínua em um sinal de corrente alternada. O PWM alterna rapidamente o estado dos dispositivos semicondutores, geralmente transistores MOSFETs ou IGBTs, para criar um sinal de tensão alternada aproximado, na Figura 59 tem-se uma ilustração da forma de onda na saída do inversor. Esse sinal é inicialmente quadrado, mas pode ser filtrado para se obter uma forma de onda senoidal pura.

Figura 59 - Forma de onda senoidal pura, modificada e quadrada



Fonte: VILLAVA, 2012

A modulação PWM consiste em variar a largura dos pulsos de corrente contínua aplicada aos dispositivos semicondutores em alta frequência. A largura dos pulsos é controlada para reproduzir uma forma de onda senoidal no lado de saída do inversor. O controle da largura dos pulsos é realizado por meio de algoritmos de controle que ajustam

continuamente a largura dos pulsos com base nas condições de operação, como a demanda de carga e as características dos módulos fotovoltaicos.

Na bancada móvel ESF do IFG é usado um inversor *string* PHB780XS de 780W. No Anexo – A, tem-se o *datasheet* onde encontramos os dados técnicos necessários para realização do experimento.

Procedimento Prático

1. Com auxílio do professor e a bancada desligada monte o conjunto de lâmpadas de led conectando na saída CA para a carga, conforme Figura 58 da introdução teórica, por meio de um disjuntor. Ligue a bancada com as lâmpadas desligadas em seguida ligue as lâmpadas e anote os valores.

Tabela 15 - Valores entrada CC e saída CA

Info	Valor	Unidade
Valores de entrada CC		
V _{in}		
I _{in}		
Valores de saída CA		
Tensão de pico V _{p rms}		
Corrente de pico I _{p rms}		
Observações:		

2. Calcule P_{in} e P_{out} usando os valores obtidos na Etapa-1 por meio das equações a seguir e anote na tabela.

$$P_{in} = (V_{in} * I_{in})$$

$$P_{out} = (V_p * I_{out}) * (f.p)$$

Tabela 16 - Valores potência de entrada e saída

Info	Valor	Unidade
Entrada CC		
P _{in}		
Saída CA		
P _{out}		
Observações:		

3. Compare os valores calculados na Etapa 2 com os dados disponíveis no *datasheet* e verifique se são compatíveis. Agora calcule a eficiência do inversor a partir da equação a seguir e anote os dados na tabela.

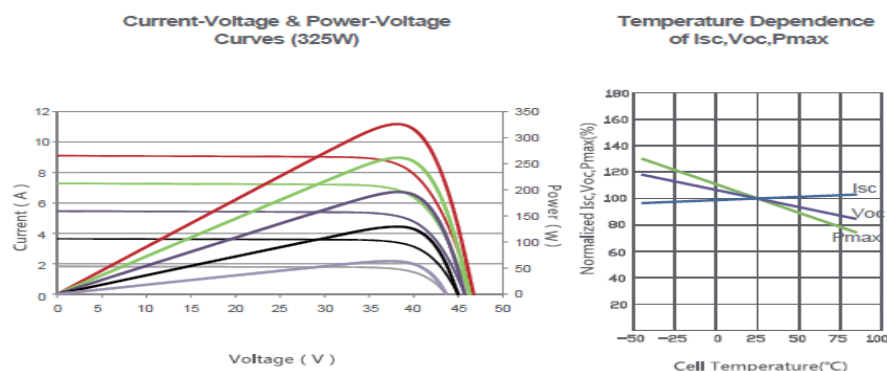
$$\eta \% = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \%$$

Tabela 17 - Eficiência do inversor

Info	Valor	Unidade
$\eta\%$		
Observações:		

4. O inversor da bancada móvel tem uma eficiência de 97,4%, segundo *datasheet*, compare o valor calculado na Etapa 3 com o valor nominal. Observe a curva I-V na Figura 60 para relembrar conceitos e pontos de destaque.

Figura 60 - Curva I-V pontos notáveis



Fonte: JINKO, 2022

É esperado que os alunos façam uma revisão dos conceitos previamente estudados e tenham em mente que os valores nominais são estimados nas Condições de Teste Padrão (STC - *Standard Test Conditions*), as quais não são encontradas durante um experimento realizado em ambiente de campo.

5. Sabendo que a bancada móvel do IFG é um sistema *on-grid* é possível deduzir que a energia produzida é injetada na rede e também alimenta nosso consumidor local, no caso, as lâmpadas de LED. Seria possível conectar uma carga CC no inversor? Explique!

Sim, em um sistema *on-grid*, a energia solar produzida é injetada na rede elétrica e

alimenta os consumidores locais. No entanto, a conexão de uma carga CC diretamente ao inversor dependerá das especificações do inversor em questão. Alguns inversores *on-grid* possuem uma saída CC auxiliar que permite a conexão de cargas CC adicionais, enquanto outros não possuem essa funcionalidade, o PHB 780XS usado na bancada não permite. Sempre consulte os dados técnicos do equipamento antes de realizar as conexões.

Bibliografia

CADERNO DIDÁTICO ENERGIA SOLAR. Experimentação remota móvel para educação básica: Conversão de Energia Solar em Energia. RexLab/UFSC. Disponível em: <http://rele.ufsc.br/moodle/pluginfile.php/3152/mod_resource/content/2/caderno%20didatico.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2023.

CUNHA, A.F.V., SILVA, M.J.F.M.S., SILVA, M.K.A., SILVA, T.S. Projeto e aplicação de um conjunto didático sobre energia solar fotovoltaica. V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife, PE. p. 2129, 2015.

FILHO, J. P. A. Atividades Experimentais: Do Método À Prática Construtivista. 2000. 302 f. Tese (Doutorado em Educação) – Departamento de Centro de Ciências da Educação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

JINKO SOLAR. *Datasheet PV module Eagle 72P 320-340 Watt*. Disponível em: <<https://www.jinkosolar.com/en/site/dwparametern/>>. Acesso em: 01 abr. 2023.

JINKO SOLAR. *Datasheet PV module Cheetah HC 72M 390-410 Watt*. Disponível em: <<https://www.jinkosolar.com/en/site/dwparametern/>>. Acesso em: 01 abr. 2023.

JUNIOR, L.A.P., KREZINGUER, A. Desenvolvimento de bancada para monitoramento de módulos fotovoltaicos em ensaio de light-soaking. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado, RS. p. 349, 2018.

TEIXEIRA, J. G. M., SOUSA, P. C. Roteiros de experimento para prática laboratorial no Fóton Lab. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica). UFG. Goiânia. GO, 2021.

PINHO, J.T., GALDINO, M.A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESEB. 2014.

PHB SOLAR. *Datasheet inversor PHB780-XS*. Disponível em: <<https://www.energiasolarphb.com.br/produto/inversor-phb780-xs-2/>>. Acesso em: 01 abr. 2023.

VILLALVA, M. G., GAZOLI, J.R. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. 1 ed. São Paulo: Érica. 2012.

Experimento 7 – Uso de imagens termográficas no diagnóstico de falhas

Objetivos de aprendizado

Ao final dessa aula, os alunos devem ser capazes de:

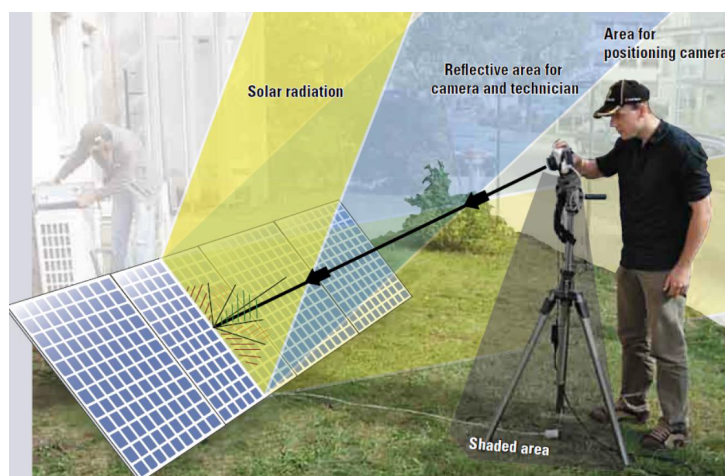
- Entender como funciona uma câmera termográfica;
- Identificar os pontos críticos do sistema fotovoltaico com uso da termografia;
- Ter noções básicas para manutenção por meio da termografia.

Materiais: Bancada Móvel ESF, câmera termográfica.

Introdução teórica

Os sistemas fotovoltaicos têm se tornado cada vez mais populares como fonte de energia renovável. Para garantir o desempenho ideal desses sistemas, é fundamental realizar testes e análises detalhadas. Nesse contexto, a utilização de câmeras termográficas tem se destacado como uma ferramenta valiosa. A câmera termográfica permite a captura de imagens térmicas dos painéis solares, fornecendo informações precisas sobre a distribuição de temperatura e auxiliando na identificação de possíveis falhas ou problemas que afetam a eficiência do sistema. Exemplo de posicionamento da câmera para análise termográfica de módulos fotovoltaicos conforme Figura 61.

Figura 61 - Posicionamento ideal para análise termográfica



Fonte: UFSC, 2022

As imagens termográficas obtidas pela câmera permitem uma análise detalhada do

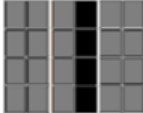
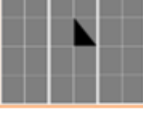
comportamento térmico dos painéis solares. Por meio dessas imagens, é possível identificar áreas com temperatura excessiva, como os *hotspots*, que podem indicar falhas nas células, problemas de conexão ou obstruções. Com base nessas informações, recomendações podem ser feitas para otimizar o sistema, como ajustar o posicionamento dos painéis para melhor aproveitamento da radiação solar e evitar o superaquecimento. Além disso, as informações termográficas são úteis na avaliação do impacto de fatores externos, como sombreamento, orientação solar e fluxo de ar, na temperatura dos módulos fotovoltaicos, consequentemente, na eficiência da geração de energia. Com base nessas análises, medidas de resfriamento adequadas podem ser implementadas para evitar o superaquecimento e melhorar o desempenho do sistema. A identificação de áreas que necessitam de manutenção também é facilitada pelas imagens termográficas, permitindo ações preventivas e corretivas para garantir a confiabilidade e a vida útil do sistema fotovoltaico.

Em resumo, o uso da câmera termográfica no teste de sistemas fotovoltaicos, como a bancada móvel do IFG, proporciona uma avaliação precisa do comportamento térmico dos painéis solares. Essas informações detalhadas permitem que técnicos e engenheiros tenham embasamento para otimizar o desempenho, a eficiência e a vida útil do sistema. Além disso, a detecção precoce de possíveis problemas por meio das imagens termográficas permite a realização de manutenções adequadas, evitando falhas graves e garantindo um fornecimento de energia confiável e sustentável.

Procedimento Prático

1. Com auxílio do professor ligue a bancada móvel e aguarde a ela começar a gerar energia. A bancada móvel possui 2 módulos diferentes, sendo que um deles está com a superfície danificada. Identifique por meio da imagem termográfica uma possível causa, use a Figura 62 para auxiliar a identificar o problema.

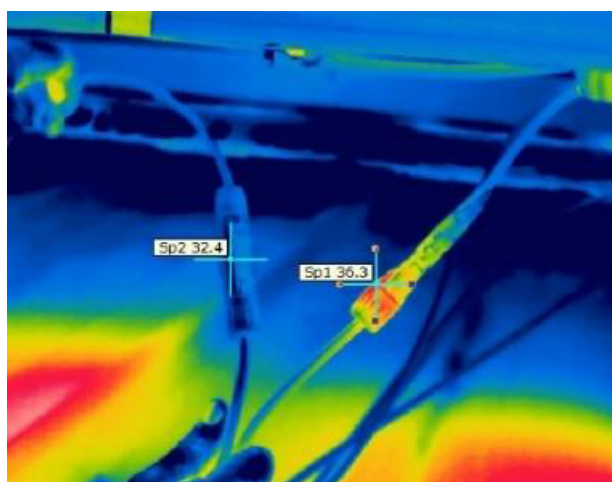
Figura 62 - Padrão de falhas identificadas em módulos fotovoltaicos

Padrão	Descrição	Erro	Causa	Medidas elétricas	Comentário
	Um módulo está mais quente		Módulo não está ligado	Módulo funciona normalmente	
	Uma fileira de células está mais quente	Curto circuito nas células	Diodo de bypass com defeito; Curto circuito interno	Perdas de potência na string, diminuição da tensão circuito aberto	Marcas de queimado na medição com termo câmera
	Várias células distribuídas aleatoriamente estão mais quentes	Curto circuito no módulo	Diodos com defeito, conexão incorreta	Potência do módulo quase nula, tensão de circuito aberto diminuiu consideravelmente	
	Uma célula está mais quente		Sombreamento, célula quebrada	Não necessariamente diminuição de potência	Inspeção visual
	Parte da célula está mais quente	Célula quebrada	Impacto mecânico externo	Diminuição da potência, diminuição de tensão e "fill factor"	

Fonte: UFSC, 2022

2. Com auxílio do professor simule um mal contato num dos conectores MC-04, de forma que se obtenha uma imagem parecida a da Figura 63.

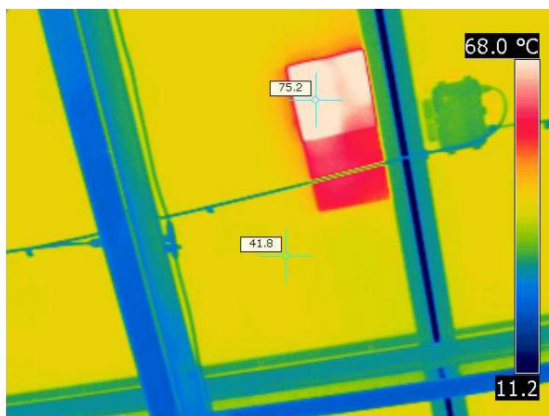
Figura 63 - Conector MC-04 com mal contato



Fonte: UFSC, 2022

3. Simule um sombreamento sobre o módulo fotovoltaico, e observe a imagem obtida, e veja se está parecida com a Figura 64 a seguir.

Figura 64 - Simulação de sombreamento sobre o módulo



Fonte: UFSC, 2022

4. Com base no referencial teórico e etapas anteriores como a câmera termográfica pode auxiliar na otimização do sistema fotovoltaico?

A câmera termográfica fornece dados térmicos detalhados que permitem identificar áreas problemáticas, como *hotspots*, e fazer recomendações para melhorar o desempenho e a vida útil do sistema. As recomendações podem incluir ajustes no posicionamento dos painéis, conexões, limpezas periódicas, implementação de medidas de resfriamento adequadas e identificação de áreas que necessitam de manutenção.

5. Qual é a importância das limpezas periódicas dos módulos solares com base nas informações termográficas? Como as informações termográficas auxiliam na identificação de áreas que necessitam de manutenção?

As informações termográficas ajudam a identificar acúmulos de sujeira nos módulos que afetam a eficiência de absorção de radiação. Limpezas periódicas são recomendadas para manter o desempenho ideal do sistema. Através das imagens termográficas, é possível identificar *hotspots* e áreas com temperaturas anormais nos painéis, indicando possíveis falhas ou problemas. Isso permite que a equipe de manutenção identifique e resolva problemas antes que causem danos significativos ao sistema.

Bibliografia

NASCIMENTO, L. IX CBENS: Apresentação Comissionamento de Sistemas Fotovoltaicos e Análise de Desempenho. RexLab/UFSC. UFSC 2022.

APÊNDICE B – SIMULAÇÃO DA BANCADA MÓVEL NO *PVSYST*

PVsyst - Simulation report

Grid-Connected System

Project: ifg bancada

Variant: bancada movel 1

Sheds on ground

System power: 680 Wp

Ifg bancada móvel - Brazil

Author

Universidade Federal de Goias (Brazil)



Project: ifg bancada

Variant: bancada movel 1

PVsyst V7.3.4

VC0, Simulation date:
03/06/23 01:46
with v7.3.4

Universidade Federal de Goiás (Brazil)

Project summary

Geographical Site

ifg bancada móvel

Brazil

Situation

Latitude -16.67 °S
Longitude -49.26 °W
Altitude 739 m
Time zone UTC-3

Project settings

Albedo 0.20

Meteo data

ifg bancada móvel

Meteonorm 8.1 (2008-2015), Sat=100% - Synthetic

System summary

Grid-Connected System

PV Field Orientation

Fixed plane

Tilt/Azimuth 30 / 0 °

Sheds on ground

Near Shadings

Detailed electrical calculation
acc. to module layout

User's needs

Unlimited load (grid)

System information

PV Array

Nb. of modules

2 units

Pnom total

680 Wp

Inverters

Nb. of units

1 unit

Pnom total

700 W

Pnom ratio

0.971

Results summary

Produced Energy 702.90 kWh/year Specific production 1034 kWh/kWp/year Perf. Ratio PR 48.29 %

Table of contents

Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Near shading definition - Iso-shadings diagram	4
Main results	6
Loss diagram	7
Predef. graphs	8
Single-line diagram	14
CO ₂ Emission Balance	15



PVsyst V7.3.4

VC0, Simulation date:
03/06/23 01:46
with v7.3.4

Universidade Federal de Goiás (Brazil)

General parameters

Grid-Connected System

Sheds on ground

PV Field Orientation

Orientation

Fixed plane

Tilt/Azimuth 30 / 0 °

Sheds configuration

Models used

Transposition Perez
Diffuse Perez, Meteorom
Circumsolar separate

Horizon

Free Horizon

Near Shadings

Detailed electrical calculation
acc. to module layout

User's needs

Unlimited load (grid)

PV Array Characteristics

PV module

Manufacturer

Model

(Original PVsyst database)

Unit Nom. Power

Number of PV modules

Nominal (STC)

Modules

At operating cond. (45°C)

Pmpp

U mpp

I mpp

Total PV power

Nominal (STC)

Total

Module area

Cell area

Generic

JKM 340M-72

340 Wp

2 units

680 Wp

1 String x 2 In series

628 Wp

72 V

8.8 A

0.680 kWp

2 modules

3.9 m²3.4 m²

Inverter

Manufacturer

Model

(Custom parameters definition)

Unit Nom. Power

Number of inverters

Total power

Operating voltage

Max. power (=>45°C)

Pnom ratio (DC:AC)

Generic

PHB780-XS

0.70 kWac

1 unit

0.70 kWac

40-450 V

0.77 kWac

0.97

Total inverter power

Total power

Max. power

Number of inverters

Pnom ratio

0.7 kWac

0.8 kWac

1 unit

0.97

Array losses

Thermal Loss factor

Module temperature according to irradiance

Uc (const) 29.0 W/m²KUv (wind) 0.0 W/m²K/m/s

DC wiring losses

Global array res.

24 mΩ

Loss Fraction

0.3 % at STC

Serie Diode Loss

Voltage drop

0.7 V

Loss Fraction

0.9 % at STC

Module Quality Loss

Loss Fraction -0.8 %

Module mismatch losses

Loss Fraction

0.6 % at MPP

IAM loss factor

ASHRAE Param.: IAM = 1 - bo (1/cosi -1)

bo Param.

0.05

AC wiring losses

Inv. output line up to injection point

Inverter voltage

230 Vac mono

Loss Fraction

0.16 % at STC

Inverter: PHB780-XS

Wire section (1 Inv.)

Copper 1 x 2 x 6 mm²

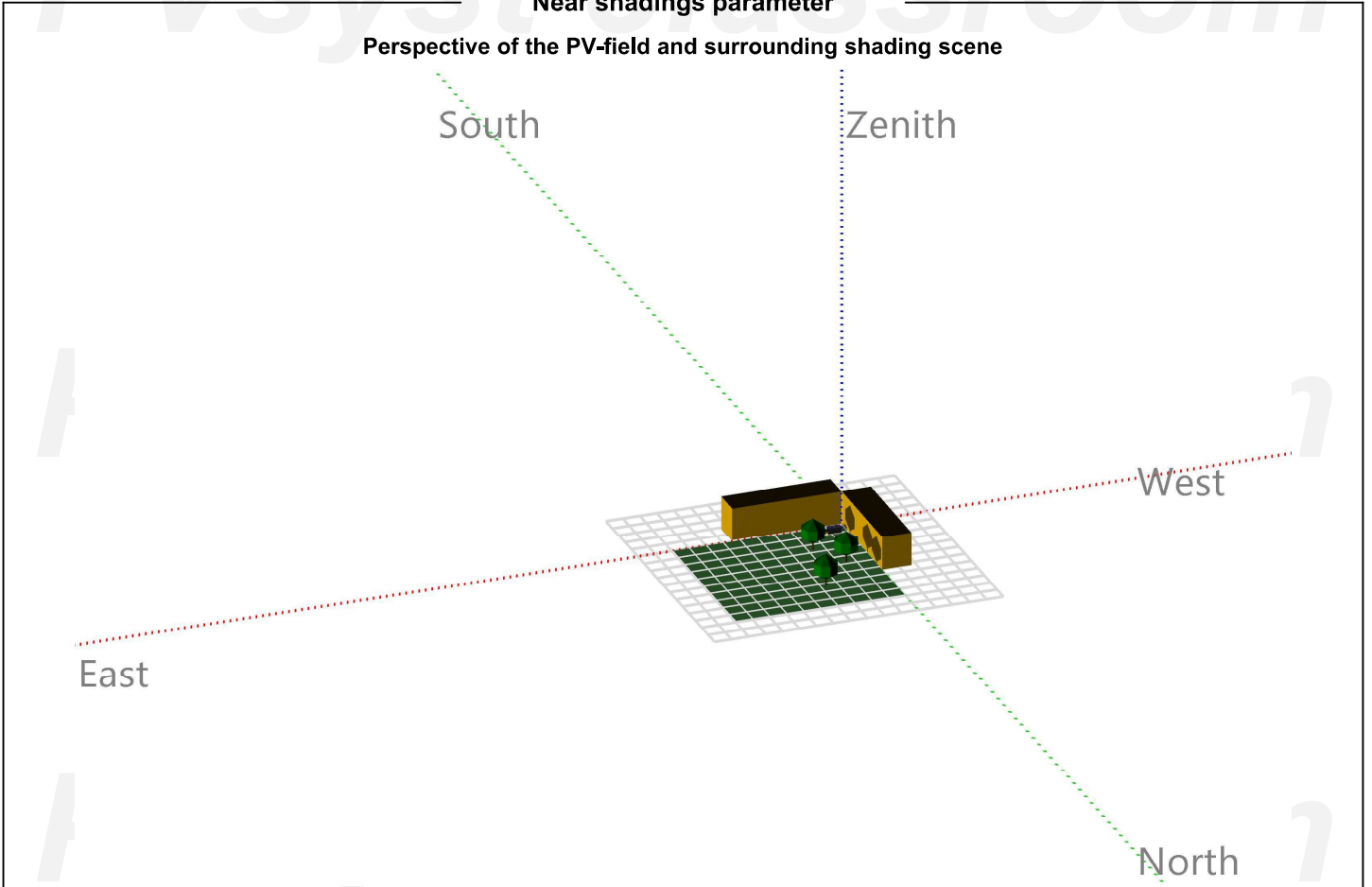
Wires length

20 m



Near shadings parameter

Perspective of the PV-field and surrounding shading scene

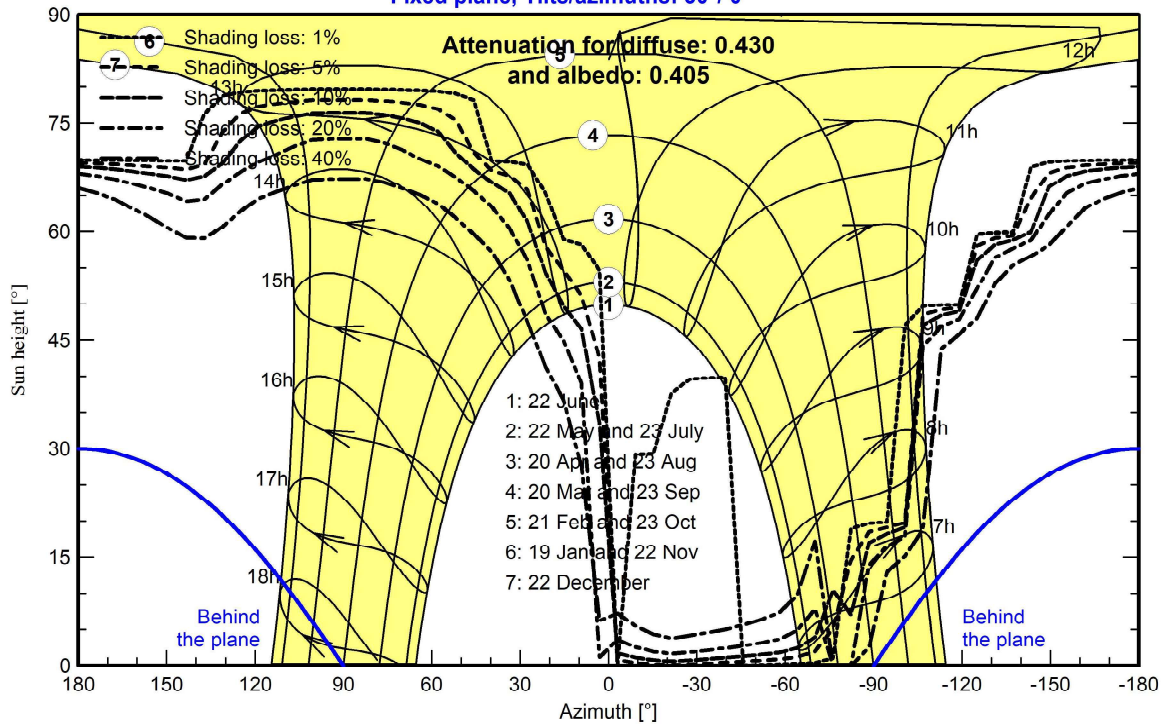




Iso-shadings diagram

Orientation #1

Fixed plane, Tilts/azimuths: 30°/ 0°





Main results

System Production

Produced Energy

702.90 kWh/year

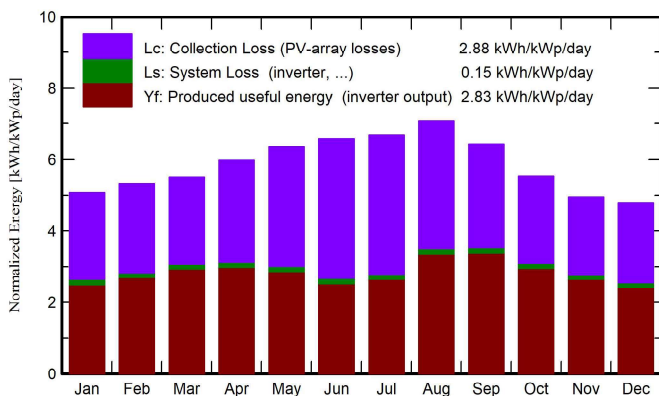
Specific production

1034 kWh/kWp/year

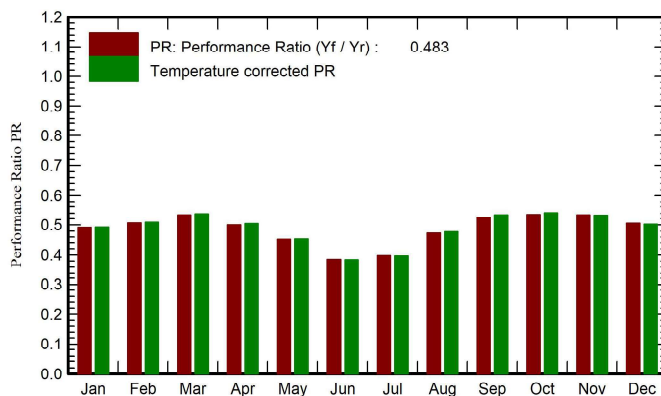
Perf. Ratio PR

48.29 %

Normalized productions (per installed kWp)



Performance Ratio PR



Balances and main results

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	189.7	75.79	23.00	157.9	105.6	55.83	52.80	0.492
February	164.0	72.52	22.92	149.0	101.2	54.04	51.29	0.506
March	170.2	76.59	22.74	170.8	117.0	65.11	62.09	0.535
April	159.6	51.31	22.30	179.4	116.3	64.06	61.02	0.500
May	155.5	43.84	21.20	196.6	119.2	63.63	60.53	0.453
June	146.2	33.15	19.57	197.2	110.0	54.60	51.63	0.385
July	156.9	35.90	19.56	206.8	119.3	59.01	55.88	0.397
August	181.3	41.09	21.30	220.2	141.1	74.28	70.91	0.474
September	181.4	55.05	23.05	192.9	129.9	72.29	69.02	0.526
October	182.2	74.02	24.11	171.8	114.9	65.67	62.51	0.535
November	175.3	79.83	22.57	148.8	98.4	56.99	54.10	0.535
December	185.1	79.60	22.85	148.8	95.9	54.07	51.13	0.505
Year	2047.3	718.66	22.09	2140.3	1369.1	739.58	702.90	0.483

Legends

GlobHor Global horizontal irradiation

DiffHor Horizontal diffuse irradiation

T_Amb Ambient Temperature

GlobInc Global incident in coll. plane

GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings

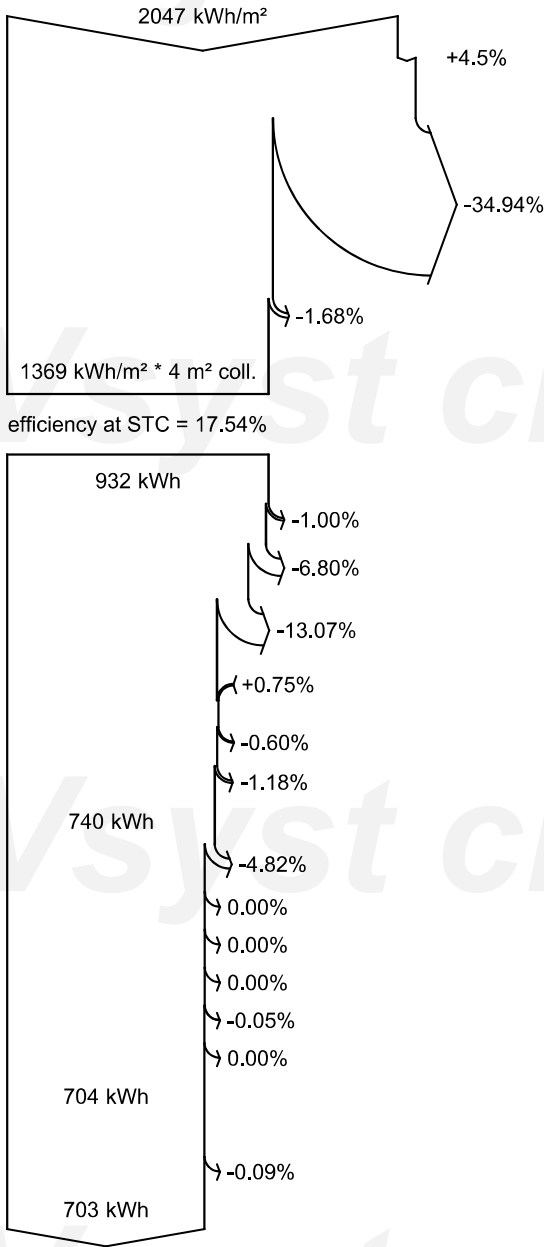
EArray Effective energy at the output of the array

E_Grid Energy injected into grid

PR Performance Ratio



Loss diagram



Global horizontal irradiation

Global incident in coll. plane

Near Shadings: irradiance loss

IAM factor on global

Effective irradiation on collectors

PV conversion

Array nominal energy (at STC effic.)

PV loss due to irradiance level

PV loss due to temperature

Shadings: Electrical Loss detailed module calc.

Module quality loss

Module array mismatch loss

Ohmic wiring loss

Array virtual energy at MPP

Inverter Loss during operation (efficiency)

Inverter Loss over nominal inv. power

Inverter Loss due to max. input current

Inverter Loss over nominal inv. voltage

Inverter Loss due to power threshold

Inverter Loss due to voltage threshold

Available Energy at Inverter Output

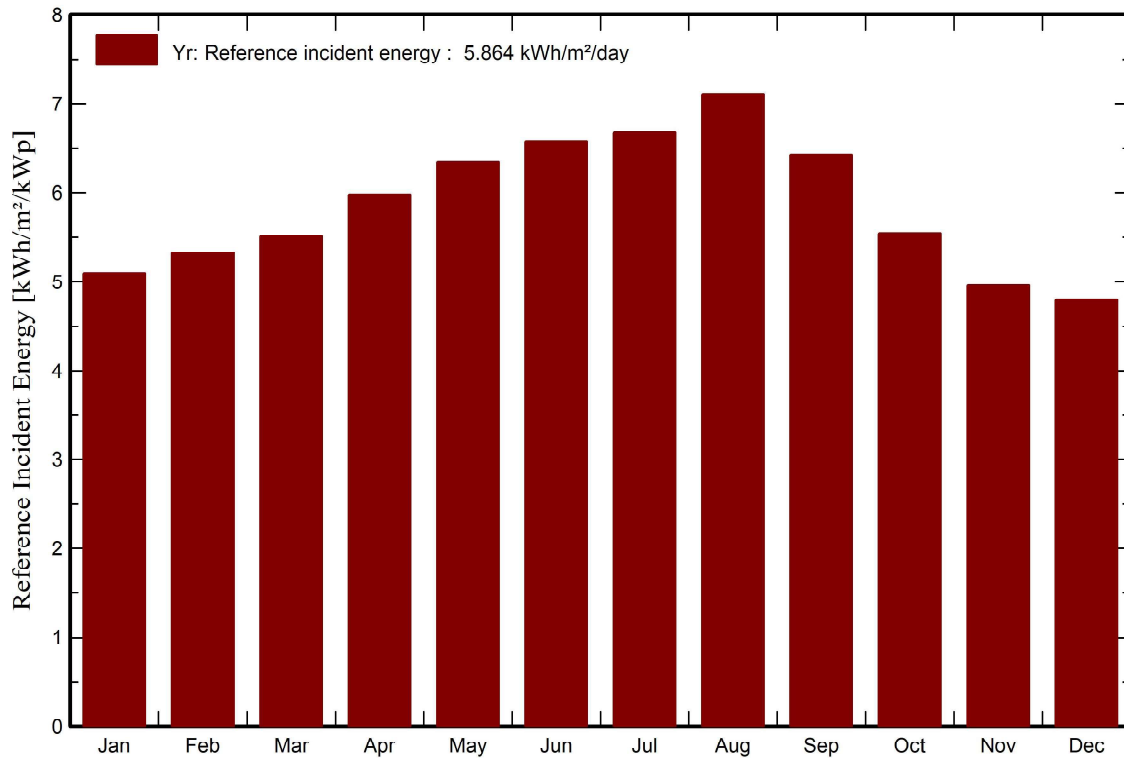
AC ohmic loss

Energy injected into grid

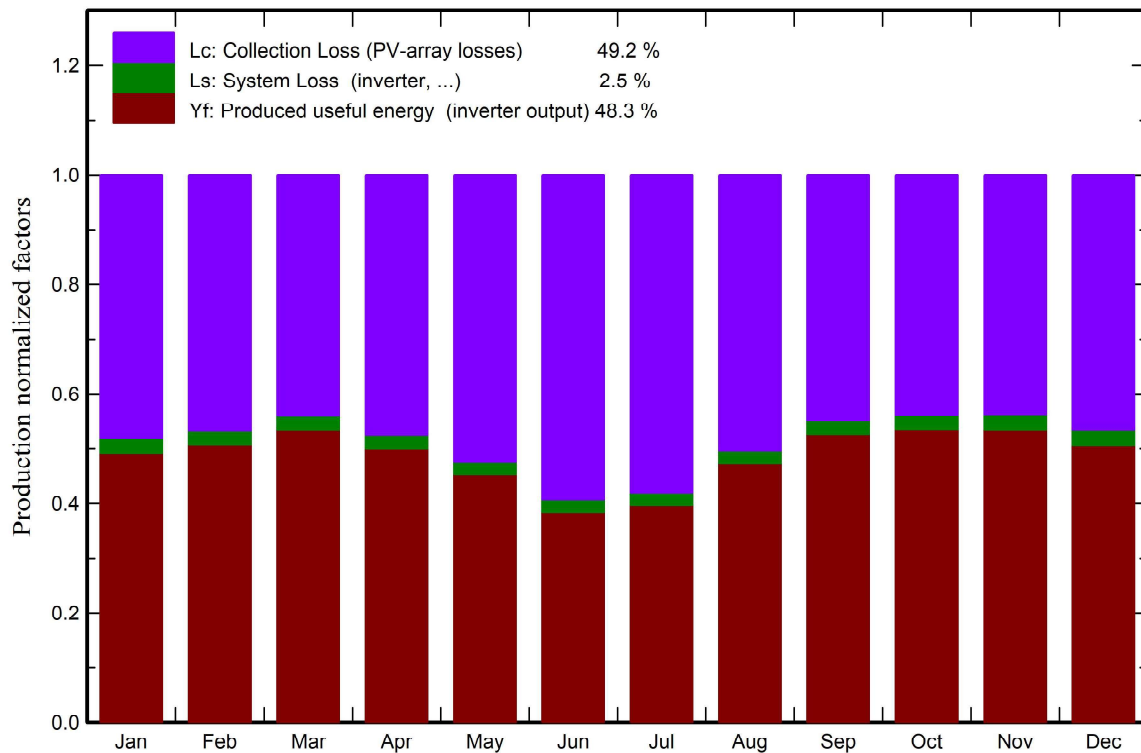


Predef. graphs

Reference Incident Energy in Collector Plane



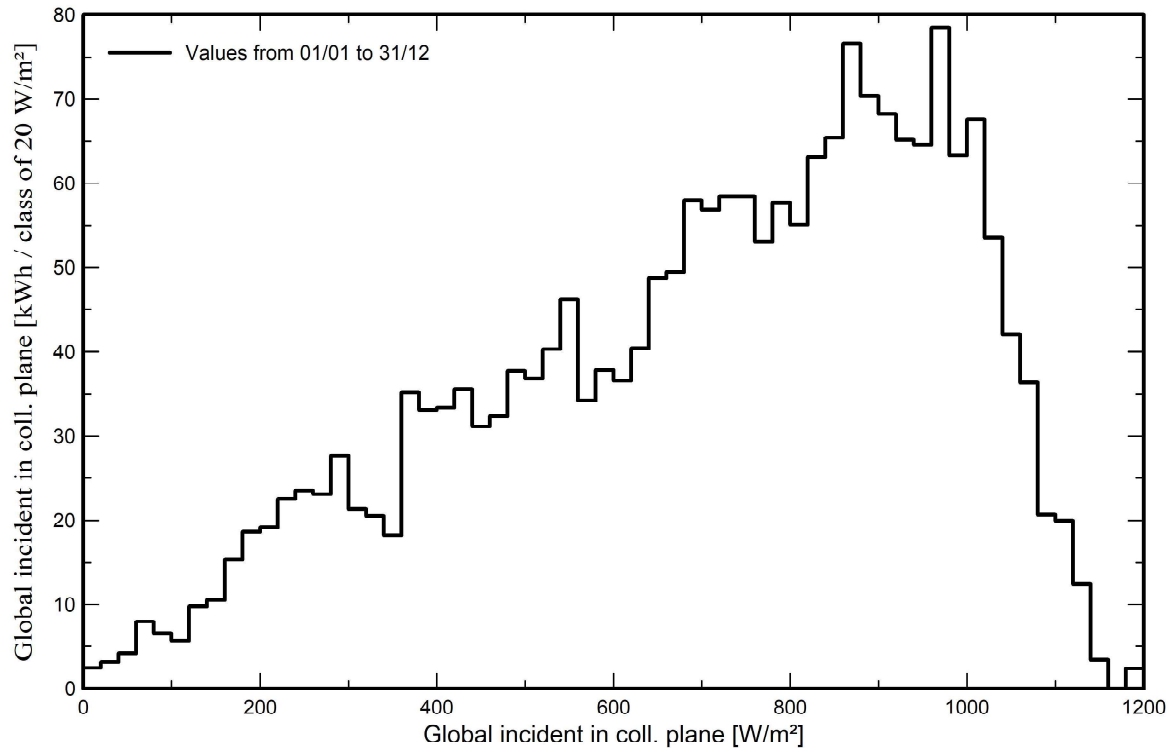
Normalized Production and Loss Factors



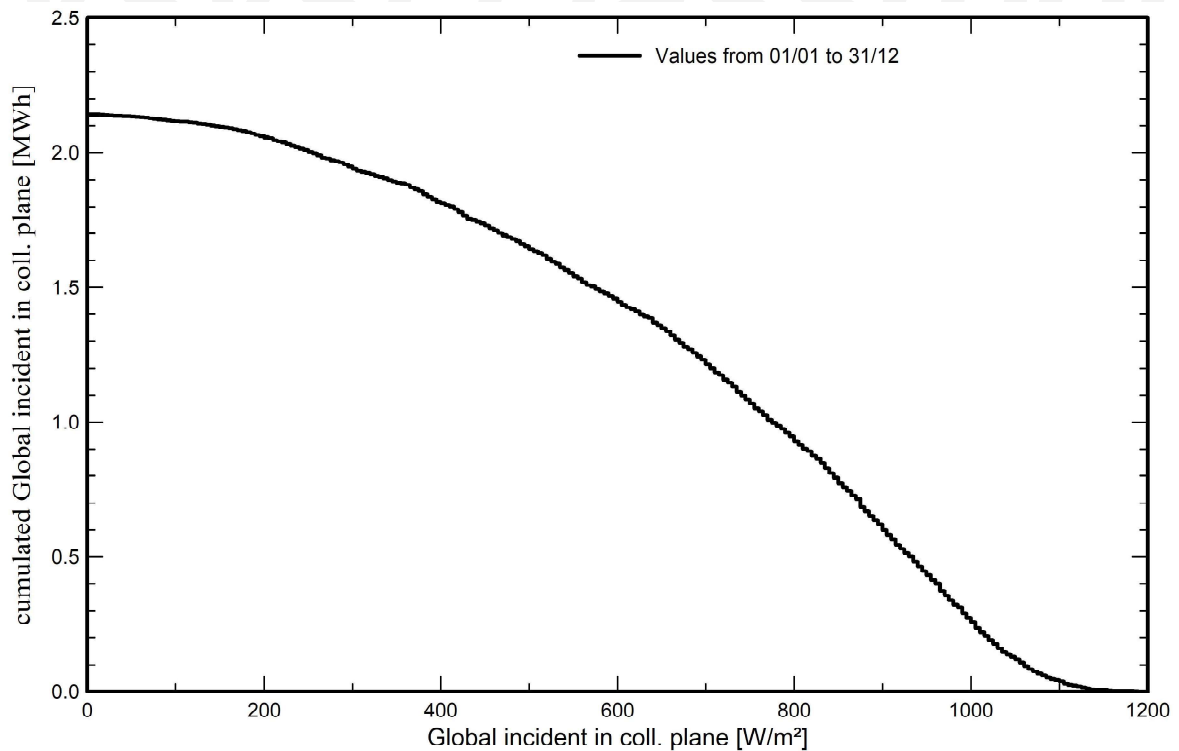


Predef. graphs

Incident Irradiation Distribution



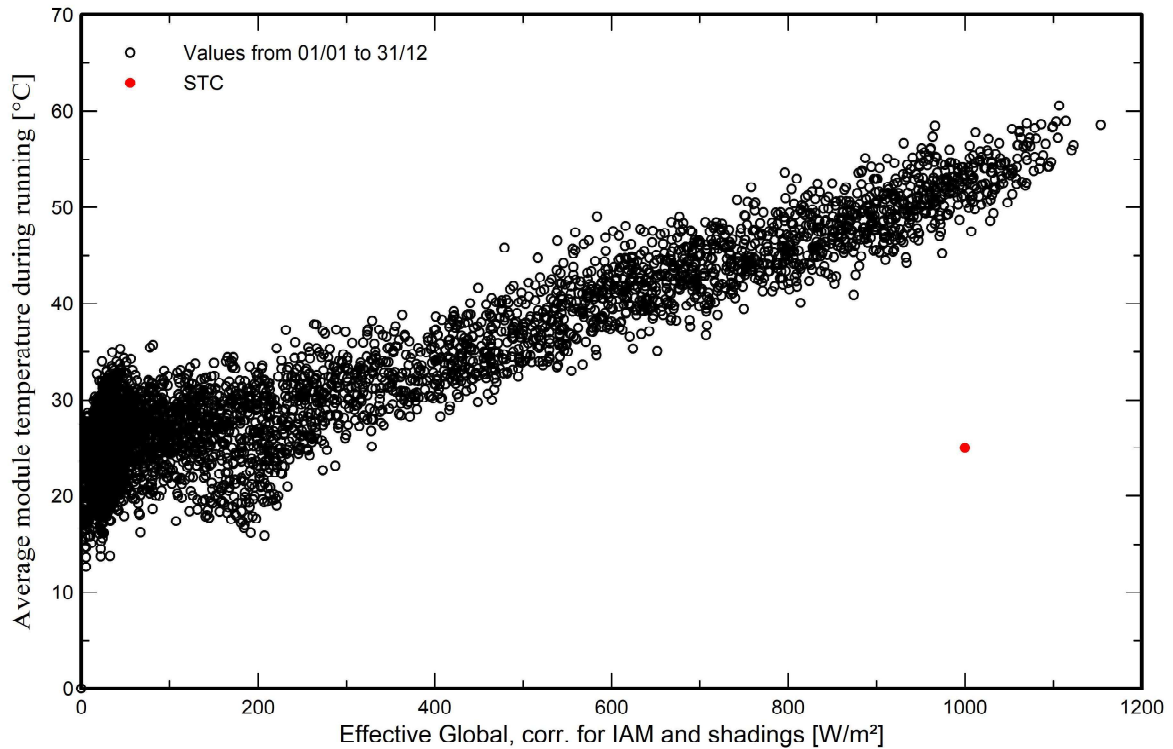
Incident Irradiation cumulative distribution



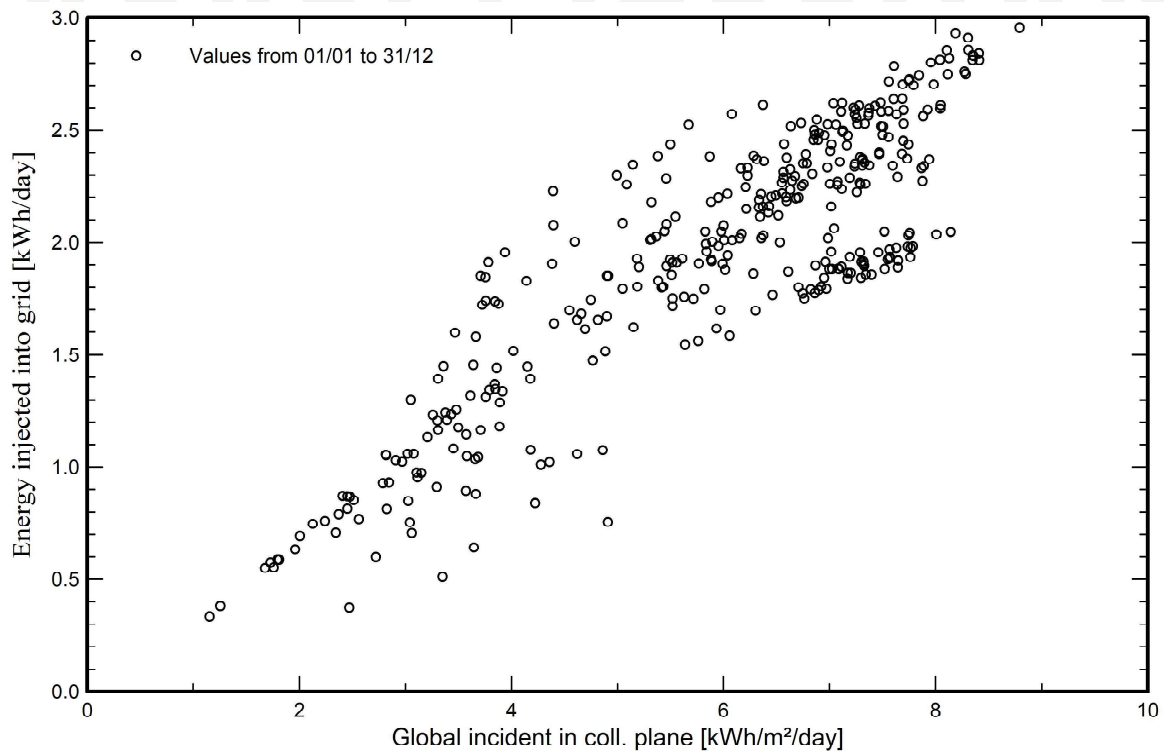


Predef. graphs

Array Temperature vs. Effective Irradiance



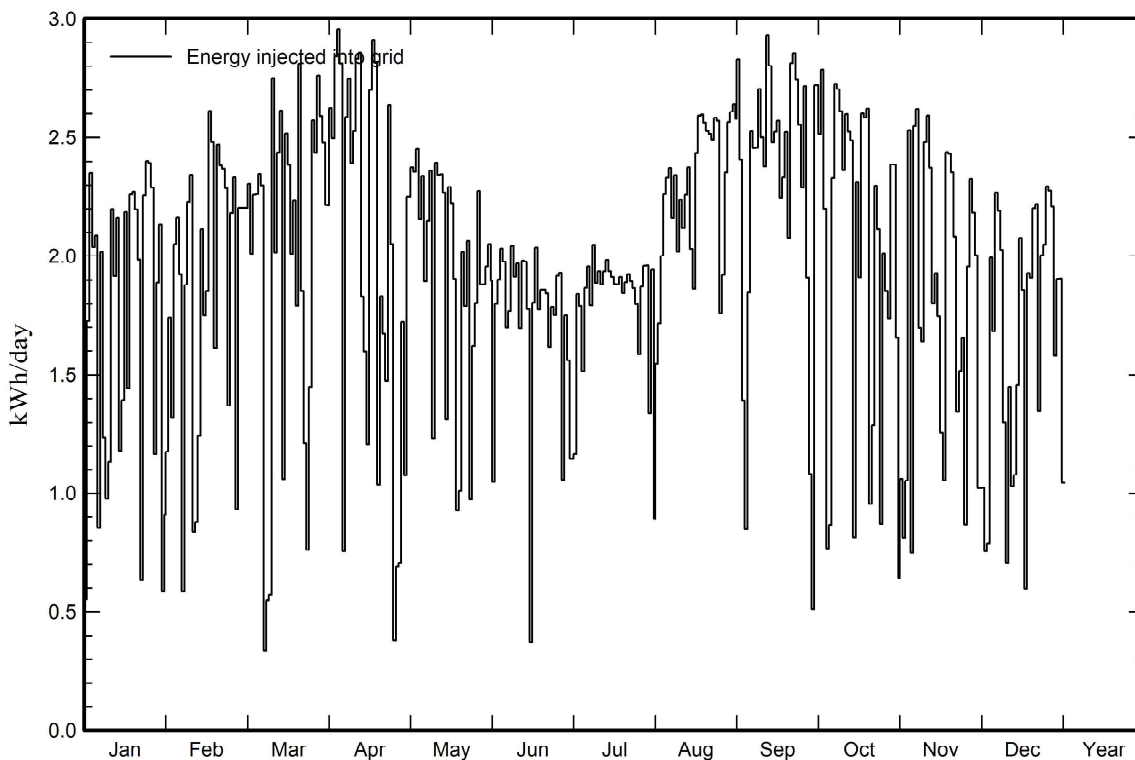
Daily Input/Output diagram



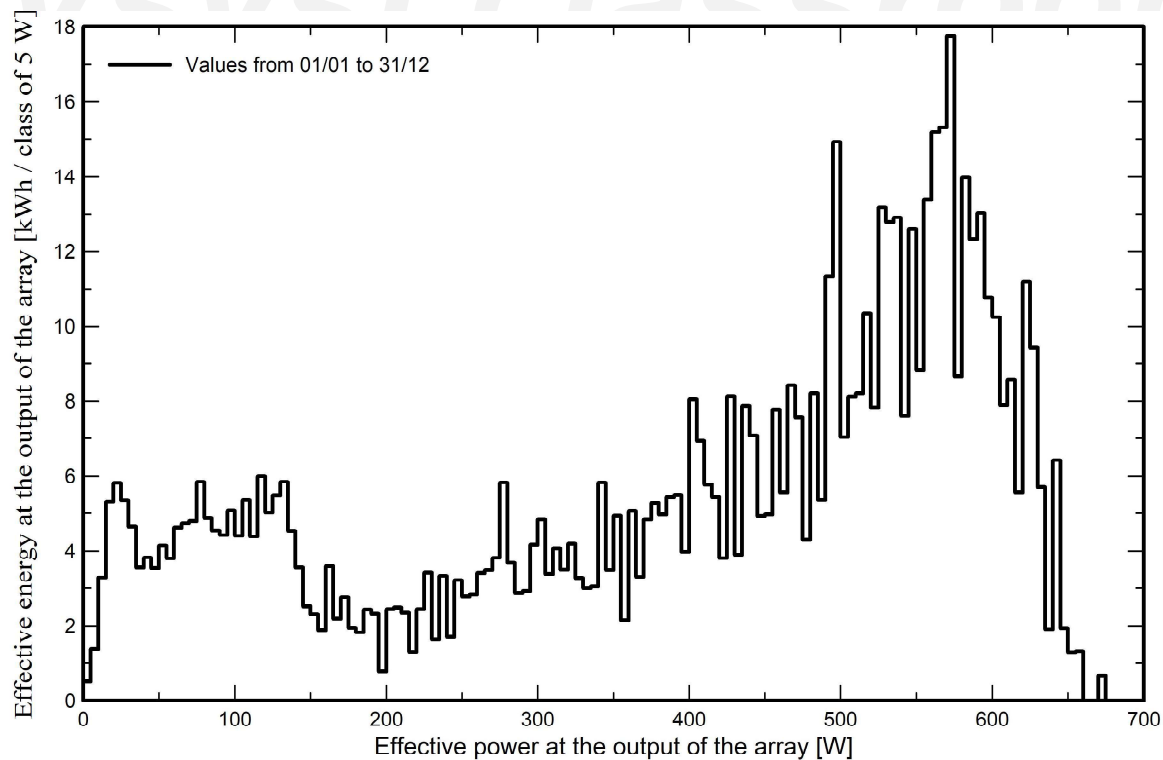


Predef. graphs

Daily System Output Energy



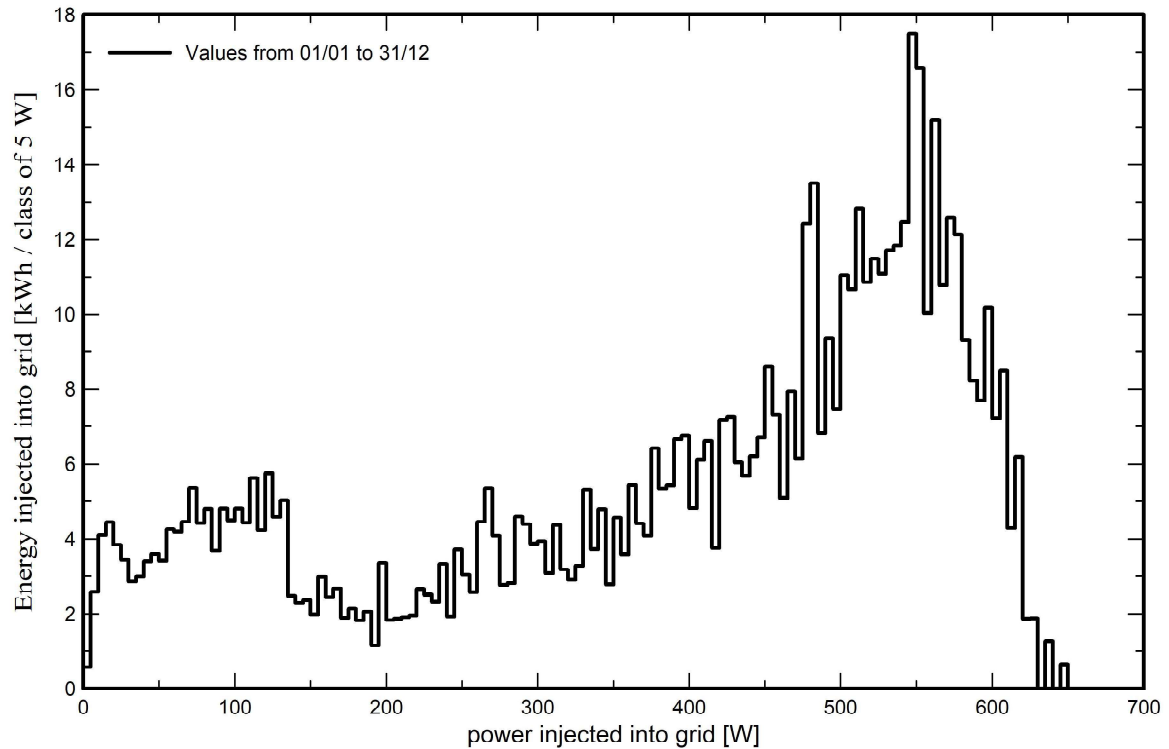
Array Power Distribution



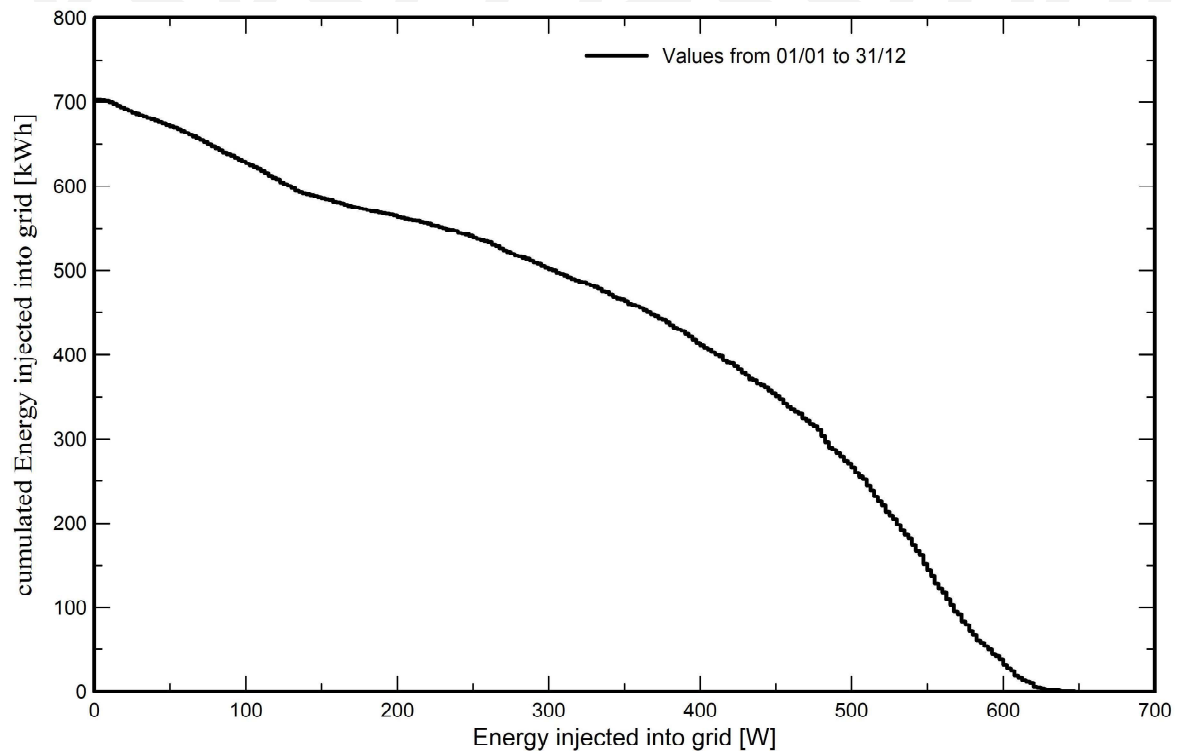


Predef. graphs

System Output Power Distribution



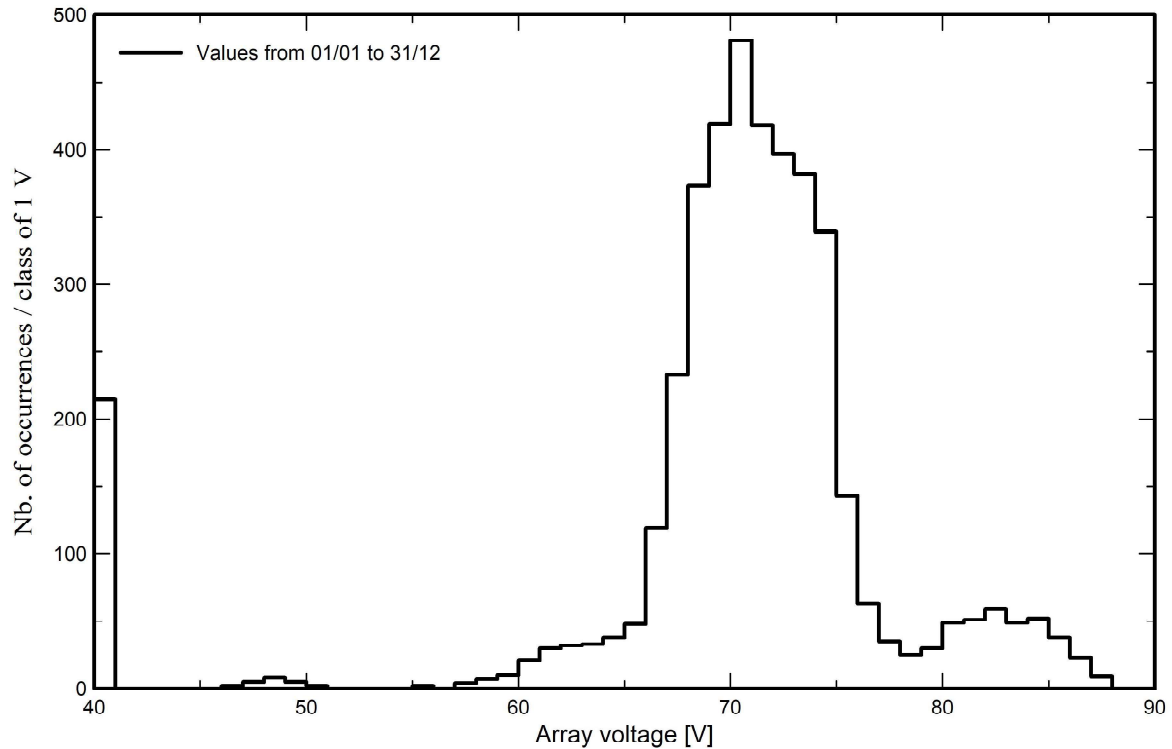
System Output Power cumulative distribution



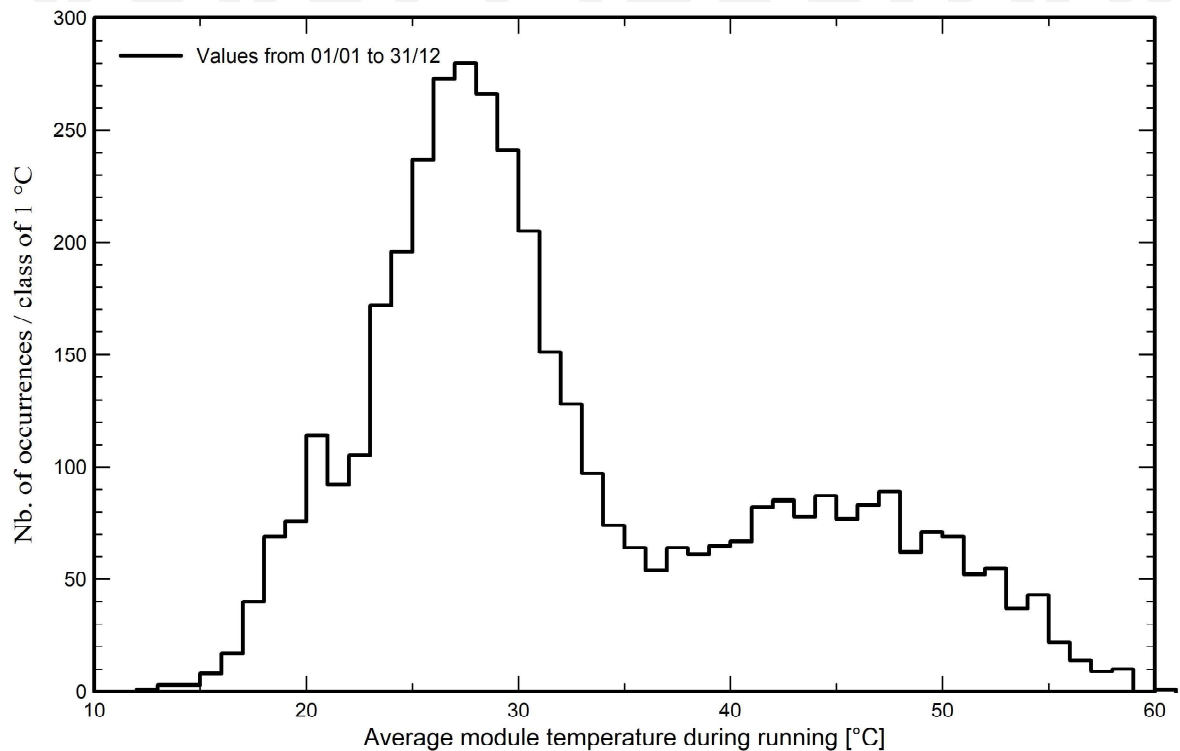


Predef. graphs

Array Voltage Distribution



Array Temperature Distribution during running

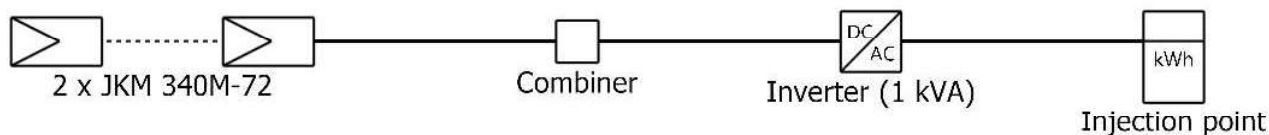




PVsyst V7.3.4

VC0, Simulation date:
03/06/23 01:46
with v7.3.4

Single-line diagram



PV module	JKM 340M-72
Inverter	PHB780-XS
String	2 x JKM 340M-72

ifg bancada Universidade Federal de Goias (

VC0 : bancada movel 1

03/06/23

**CO₂ Emission Balance**Total: -10.1 tCO₂**Generated emissions**Total: 11.62 tCO₂

Source: Detailed calculation from table below

Replaced EmissionsTotal: 1.7 tCO₂

System production: 702.90 kWh/yr

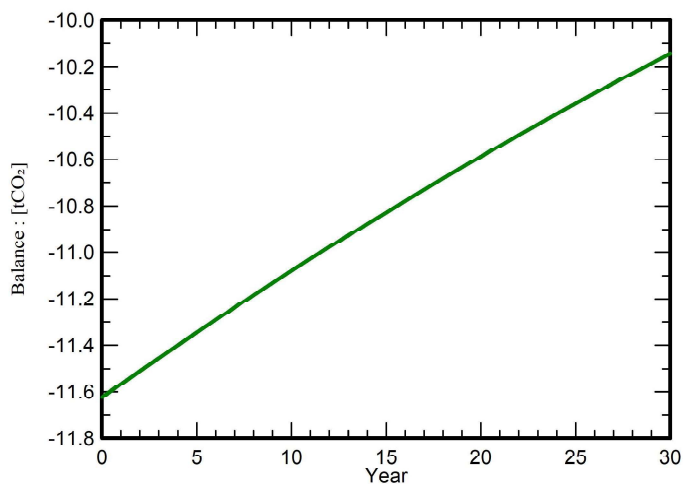
Grid Lifecycle Emissions: 81 gCO₂/kWh

Source: IEA List

Country: Brazil

Lifetime: 30 years

Annual degradation: 1.0 %

Saved CO₂ Emission vs. Time**System Lifecycle Emissions Details**

Item	LCE	Quantity	Subtotal
[kgCO ₂]			
Modules	2404 kgCO ₂ /kWp	4.76 kWp	11441
Supports	0.54 kgCO ₂ /kg	140 kg	75.6
Inverters	53.5 kgCO ₂ /	2.00	107

APÊNDICE C – SIMULAÇÃO DO FÓTON LAB NO *PVSYST*

PVsyst - Simulation report

Stand alone system

Project: EMC_DUSOL

Variant: New simulation variant

Stand alone system with batteries

System power: 330 Wp

EMC_BL-E - Brazil

Author

Universidade Federal de Goias (Brazil)



Project: EMC_DUSOL

Variant: New simulation variant

PVsyst V7.1.8

VC0, Simulation date:
28/09/21 20:06
with v7.1.8

Universidade Federal de Goiás (Brazil)

Project summary

Geographical Site

EMC_BL-E

Brazil

Situation

Latitude -16.68 °S
Longitude -49.24 °W
Altitude 789 m
Time zone UTC-3

Project settings

Albedo 0.20

Meteo data

EMC_BL-E

Meteonorm 7.3 (2008-2015), Sat=100% - Synthetic

System summary

Stand alone system

PV Field Orientation

Fixed plane
Tilt/Azimuth 17 / 13 °

Stand alone system with batteries

Near Shadings

Linear shadings

User's needs

Daily household consumers
Constant over the year
Average 0.2 kWh/Day

System information

PV Array

Nb. of modules 1 Unit
Pnom total 330 Wp

Battery pack

Technology Lead-acid, sealed, Gel
Nb. of units 2 units
Voltage 24 V
Capacity 14 Ah

Results summary

Available Energy	544.2 kWh/year	Specific production	1649 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR	8.72 %
Used Energy	61.3 kWh/year			Solar Fraction SF	100.00 %

Table of contents

Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Near shading definition - Iso-shadings diagram	4
Detailed User's needs	5
Main results	6
Loss diagram	7
Special graphs	8



General parameters

Stand alone system

PV Field Orientation

Orientation

Fixed plane

Tilt/Azimuth 17 / 13 °

Near Shadings

Linear shadings

Stand alone system with batteries

Sheds configuration

User's needs

Daily household consumers

Constant over the year

Average 0.2 kWh/Day

Models used

Transposition	Perez
Diffuse	Perez, Meteonorm
Circumsolar	separate

PV Array Characteristics

PV module

Manufacturer

Canadian Solar Inc.

Model

CS6U-330M

(Original PVsyst database)

Unit Nom. Power

330 Wp

Number of PV modules

1 Unit

Nominal (STC)

330 Wp

Modules

1 String x 1 In series

At operating cond. (50°C)

Pmpp

296 Wp

U mpp

34 V

I mpp

8.8 A

Controller

Universal controller

Technology

MPPT converter

Temp coeff.

-5.0 mV/°C/Elem

Converter

Maxi and EURO efficiencies

97.0 / 95.0 %

Total PV power

Nominal (STC)

0 kWp

Total

1 modules

Module area

1.9 m²

Cell area

1.8 m²

Battery

Manufacturer

Sonnenschein

Model

Solar S12/17 G5

Technology

Lead-acid, sealed, Gel

Nb. of units

2 in series

Discharging min. SOC

20.0 %

Stored energy

0.3 kWh

Battery Pack Characteristics

Voltage

24 V

Nominal Capacity

14 Ah (C10)

Temperature

Fixed 20 °C

Battery Management control

Threshold commands as

SOC calculation

Charging

SOC = 0.90 / 0.75

approx.

29.8 / 24.8 V

Discharging

SOC = 0.20 / 0.45

approx.

23.2 / 24.1 V

Array losses

Thermal Loss factor

Module temperature according to irradiance

Uc (const)

20.0 W/m²K

Uv (wind)

0.0 W/m²K/m/s

DC wiring losses

Global array res.

64 mΩ

Loss Fraction

1.5 % at STC

Serie Diode Loss

Voltage drop

0.7 V

Loss Fraction

1.9 % at STC

Module Quality Loss

Loss Fraction

-0.4 %

Module mismatch losses

Loss Fraction

2.0 % at MPP

Strings Mismatch loss

Loss Fraction

0.1 %

IAM loss factor

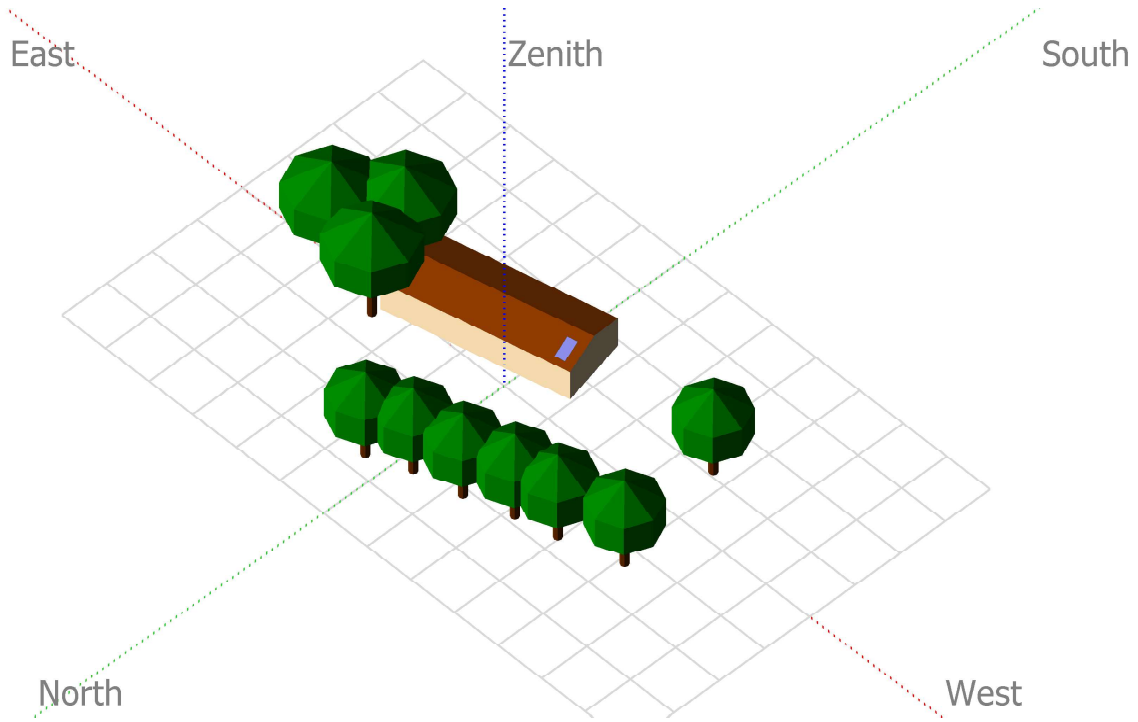
Incidence effect (IAM): User defined profile

10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
0.998	0.998	0.995	0.992	0.986	0.970	0.917	0.763	0.000

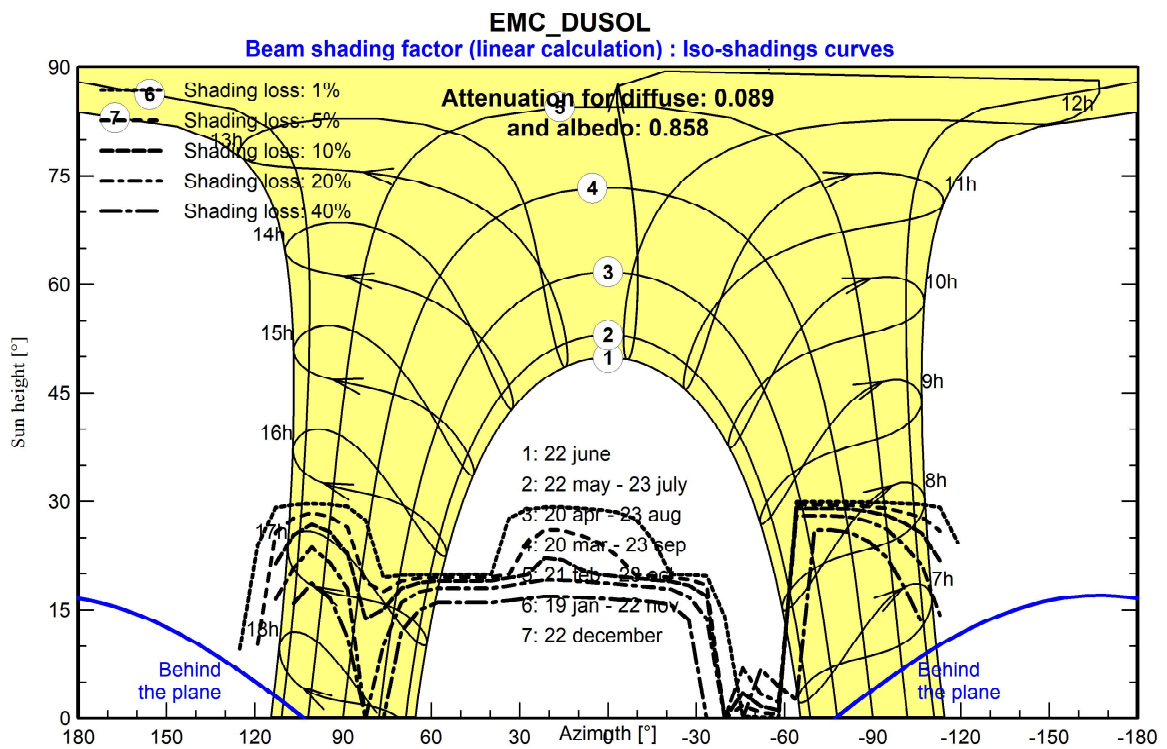


Near shadings parameter

Perspective of the PV-field and surrounding shading scene



Iso-shadings diagram





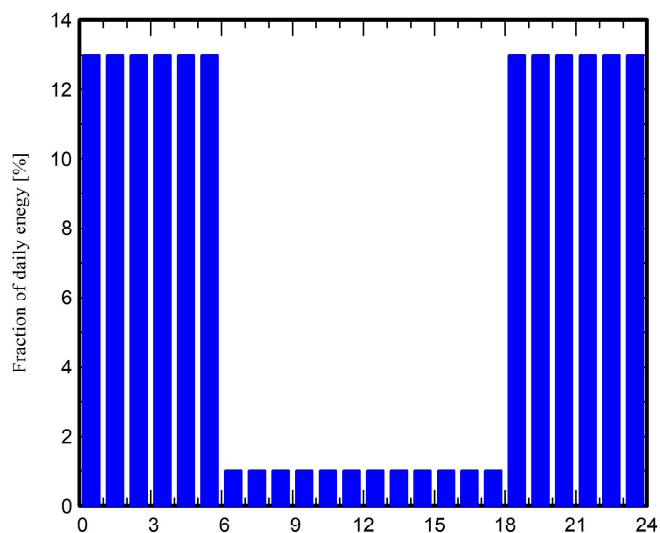
Detailed User's needs

Daily household consumers, Constant over the year, average = 0.2 kWh/day

Annual values

	Number	Power	Use	Energy
		W	Hour/day	Wh/day
Lamps (LED or fluo)	2	6W/lamp	12.0	144
Stand-by consumers			24.0	24
Total daily energy				168Wh/day

Hourly distribution





Project: EMC_DUSOL

Variant: New simulation variant

PVsyst V7.1.8

VC0, Simulation date:
28/09/21 20:06
with v7.1.8

Universidade Federal de Goiás (Brazil)

Main results

System Production

Available Energy 544.2 kWh/year
Used Energy 61.3 kWh/year
Excess (unused) 465.1 kWh/year

Loss of Load

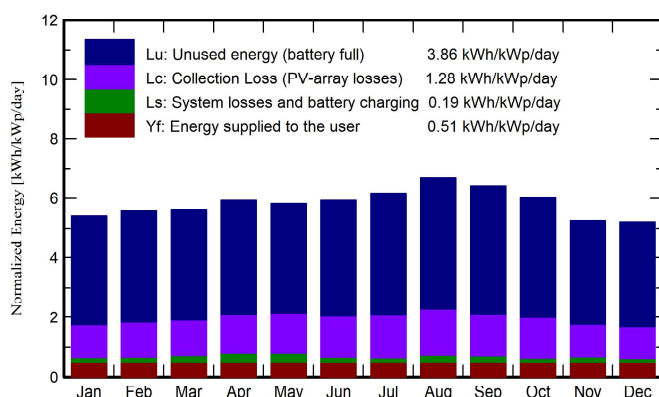
Time Fraction 0.0 %
Missing Energy 0.0 kWh/year

Specific production 1649 kWh/kWp/year
Performance Ratio PR 8.72 %
Solar Fraction SF 100.00 %

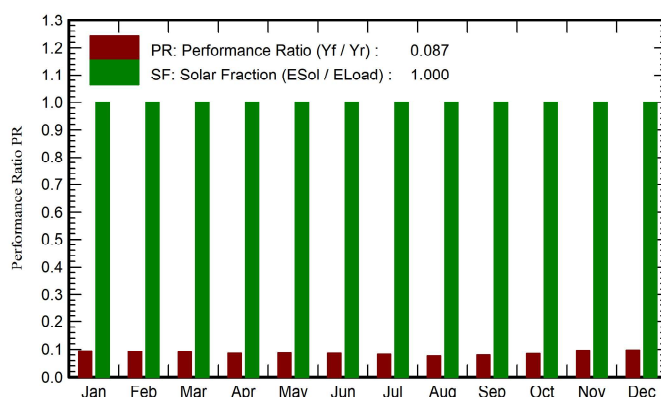
Battery aging (State of Wear)

Cycles SOW 60.3 %
Static SOW 90.0 %

Normalized productions (per installed kWp)



Performance Ratio PR



Balances and main results

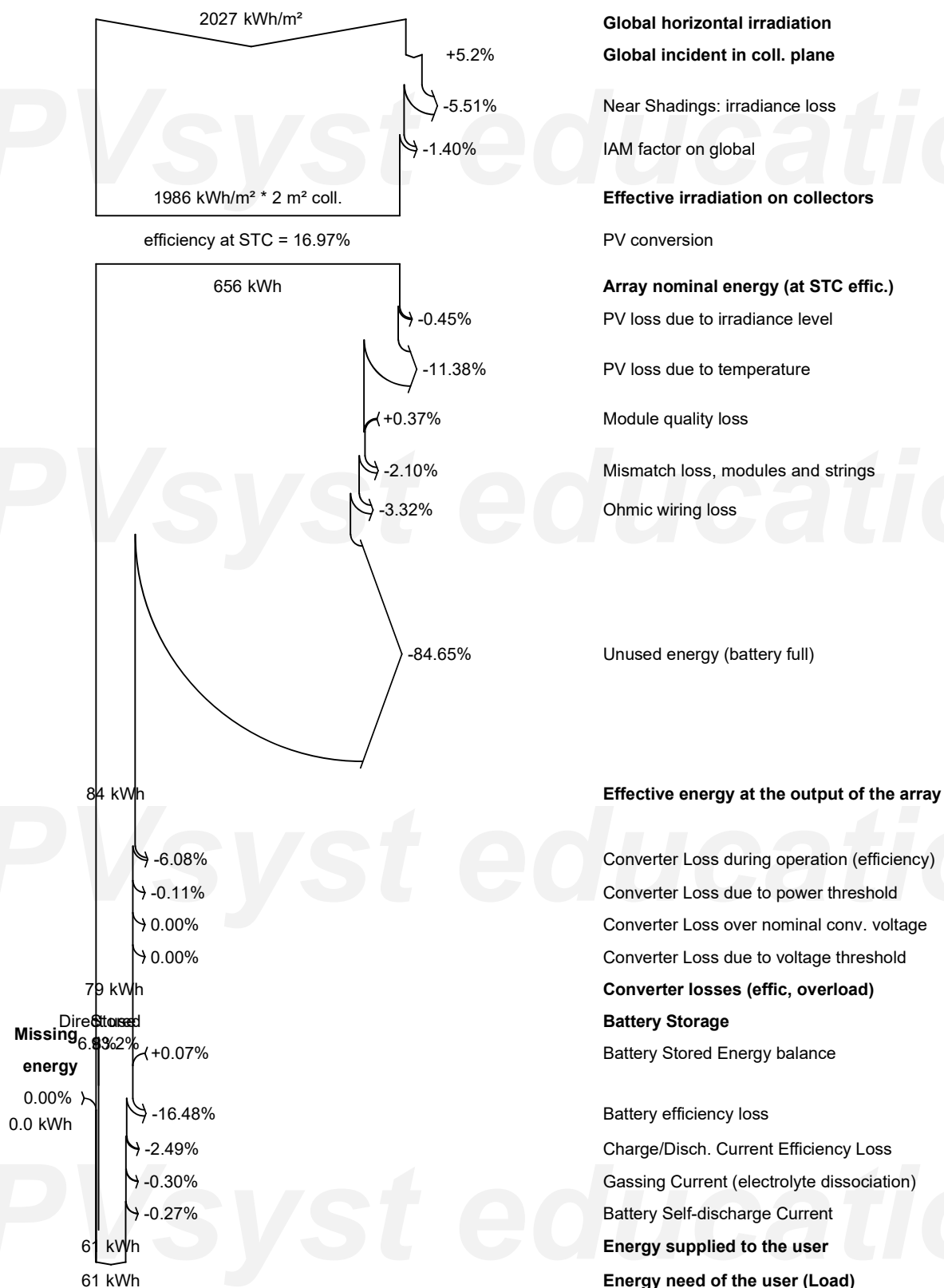
	GlobHor kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	E_Avail kWh	EUnused kWh	E_Miss kWh	E_User kWh	E_Load kWh	SolFrac ratio
January	182.1	158.5	43.80	37.47	0.000	5.208	5.208	1.000
February	160.9	146.7	40.29	34.46	0.000	4.704	4.704	1.000
March	169.6	163.9	44.92	37.90	0.000	5.208	5.208	1.000
April	161.4	166.6	45.38	37.92	0.000	5.040	5.040	1.000
May	154.0	165.3	45.31	37.52	0.000	5.208	5.208	1.000
June	146.0	162.4	44.88	38.65	0.000	5.040	5.040	1.000
July	158.5	174.6	48.01	41.82	0.000	5.208	5.208	1.000
August	180.0	191.9	52.13	44.97	0.000	5.208	5.208	1.000
September	180.6	181.4	48.90	42.27	0.000	5.040	5.040	1.000
October	187.9	175.8	47.43	41.32	0.000	5.208	5.208	1.000
November	169.7	147.8	41.03	34.68	0.000	5.040	5.040	1.000
December	176.6	151.4	42.15	36.12	0.000	5.208	5.208	1.000
Year	2027.2	1986.3	544.21	465.11	0.000	61.320	61.320	1.000

Legends

GlobHor Global horizontal irradiation
GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings
E_Avail Available Solar Energy
EUnused Unused energy (battery full)
E_Miss Missing energy

E_User Energy supplied to the user
E_Load Energy need of the user (Load)
SolFrac Solar fraction (EUsed / ELoad)

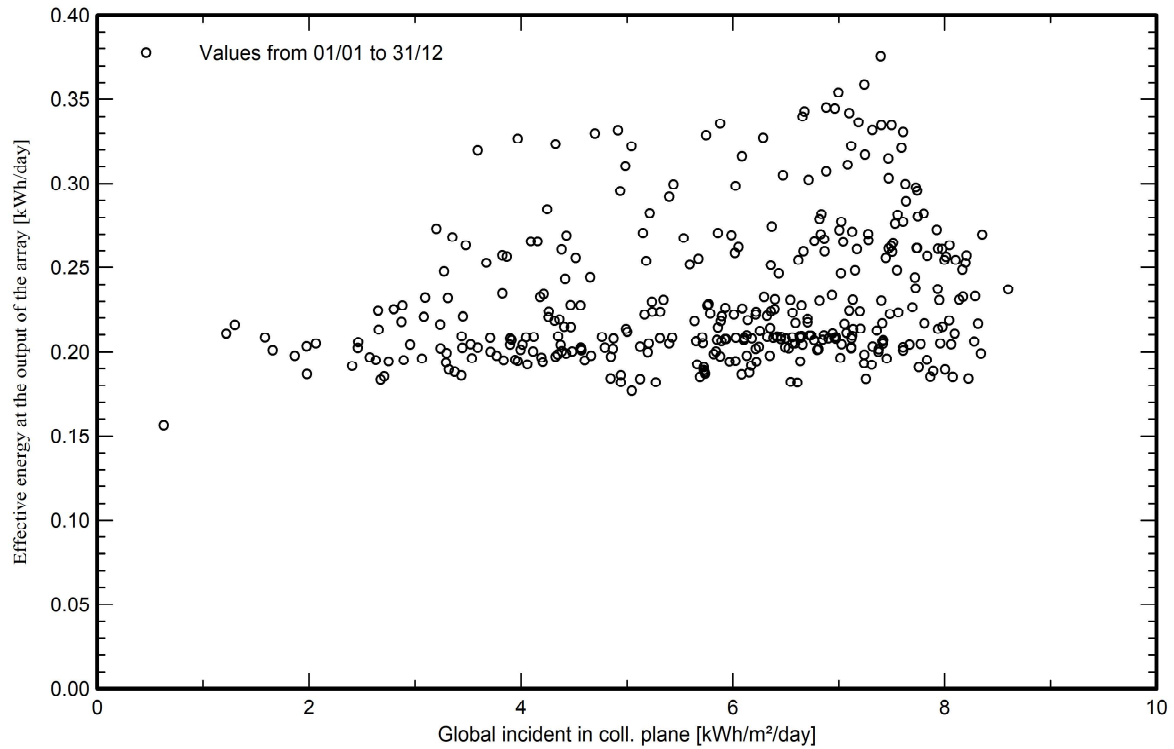
Loss diagram





Special graphs

Daily Input/Output diagram



PVsyst education

PVsyst education

ANEXO A – *DATASHEET* INVERSOR PHB780XS 780W

INVERSOR SOLAR FOTOVOLTAICO MONOFÁSICO PHB

780W(220V)
1500W (220V)



Adequado para sistemas residenciais. Possui design moderno e inovador que facilita o manuseio e instalação.

PHB780-XS INVERSOR FOTOVOLTAICO

PHB1500-XS INVERSOR FOTOVOLTAICO

Atende as Normas: ABNT NBR 16149; ABNT NBR 16150; ABNT NBR IEC 62116.

Possui a garantia de 7 anos* para defeito de fabricação. (consulte o termo de garantia)

Características Principais:

- ✓ Tamanho ultra compacto (tamanho de folha A4);
- ✓ Alta Eficiência;
- ✓ Monitoramento incorporado;
- ✓ String box integrada, reduzindo tempo e área de instalação;
- ✓ Opera a partir de 2 módulos fotovoltaicos (60 células).

**Válido para aquisição a partir de julho de 2021.*

EXCELENTE DESEMPENHO

- ✓ Eficiência Máxima de até 97,4%
- ✓ Eficiência do MPPT > 99,9%
- ✓ THDi menor que 3%
- ✓ Tensão de partida 50V

ALTA SEGURANÇA

- ✓ IP65 anti-poeira e à prova d'água
- ✓ Atende as normas brasileiras
- ✓ Atende as tensões módulo 8 PRODIST
- ✓ Possui relé de anti-ilhamento
- ✓ Registro Inmetro:
PHB780-XS – 008540/2019
PHB1500-XS – 008540/2019

PROJETO ORIENTADO PARA O CLIENTE

- ✓ LCD em português
- ✓ Design de baixo ruído e sem ventilador
- ✓ Fácil e rápida instalação
- ✓ Peso 5,8kg
- ✓ Adequado para instalações residenciais
- ✓ Interface de comunicação: USB SERIAL e WI-FI
- ✓ String Box Integrada



Rua São Bernardino nº 12
Pq. Anhanguera - CEP: 05120-050
São Paulo - SP



(11) 3648-7830
contato@phb.com.br



Dados técnicos

A PHB Solar mantém uma estrutura de equipamentos calibrados, “setups” de testes e técnicos treinados, para proporcionar aos seus clientes um rápido serviço de reparo.

Dados da Entrada CC		
Modelos	PHB780-XS	PHB1500-XS
Max. Tensão CC [V]	500	500
Faixa de Operação SPMP [V]	50~450	50~450
Tensão CC de Partida [V]	50	50
Corrente CC Máxima [A]	12,5	12,5
Número de Strings / MPPT	1/1	1/1
Conector CC	MC4	
String Box Integrada	Interruptor/ Seccionador CC (IEC60947-1 e IEC60947-3), DPS CC classe II (EN50539-11)	
Dados da Saída CA		
Potência CA Nominal [W]	780	1500
Max. Corrente CA [A]	3,5	7,2
Saída Nominal CA	208,220,230,240 e 254Vca; 60Hz	
Faixa de Operação CA	166,4~279,4Vca; 57,5~62Hz	
THD	<3%	
Fator de Potência	Unitário (0.8 Capacitivo. / 0.8 Indutivo)	
Conexão CA	Monofásico ou Bifásico	
Eficiência		
Max. Eficiência	97,4%	
Eficiência SPMP	>99,9%	
Segurança do Equipamento		
Monitoramento de corrente de fuga	Integrado	
Proteção Anti-ilhamento	AFD	
NBR (Normas Brasileiras)	ABNT NBR 16149, 16150 e ABNT NBR IEC 62116	
Normas de Referência		
EMC	EN 61000-6-1, EN 61000-6-2 EN 61000-6-3, EN 61000-6-4	
Segurança	IEC 62109-1, AS3100	
Dados Gerais		
Dimensões (L*A*P) [mm]	295*230*113	
Peso Líquido [kg]	5,8	
Ambiente de Operação	Interno ou Externo	
Montagem	Fixado na parede	
Temperatura de Operação	-25~60°C	
Umidade relativa	0~100%	
Altitude [m]	<4000m	
Grau de Proteção IP	IP65	
Topologia	Sem Transformador	
Ventilação	Convecção Natural	
Display	LCD(Português)	
Comunicação	USB SERIAL / Wi-Fi	
Cor	Vermelho	
Garantia [anos]	7/10/15/20/25 (opcional)	



Rua São Bernardino nº 12
Pq. Anhanguera - CEP: 05120-050
São Paulo - SP



(11) 3648-7830
contato@phb.com.br



ANEXO B – *DATASHEET* MÓDULO ESF *EAGLE* 72P 320-340 W JINKO

Eagle 72P 320-340 Watt

POLY CRYSTALLINE MODULE

Positive power tolerance of 0~+3%

ISO9001:2015、ISO14001:2015、OHSAS18001
certified factory.

IEC61215、IEC61730、UL1703 certified products.



(5BB)



KEY FEATURES



5 Busbar Solar Cell:

5 busbar solar cell adopts new technology to improve the efficiency of modules, offers a better aesthetic appearance, making it perfect for rooftop installation.



High Power Output:

Polycrystalline 72-cell module achieves a power output up to 340Wp.



PID RESISTANT:

Eagle modules pass PID test, limited power degradation by PID test is guaranteed for mass production.



Low-light Performance:

Advanced glass and surface texturing allow for excellent performance in low-light environments.



Severe Weather Resilience:

Certified to withstand: wind load (2400 Pascal) and snow load (5400 Pascal).



Durability against extreme environmental conditions:

High salt mist and ammonia resistance certified by TUV NORD.



Temperature Coefficient:

Improved temperature coefficient decreases power loss during high temperatures.



LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

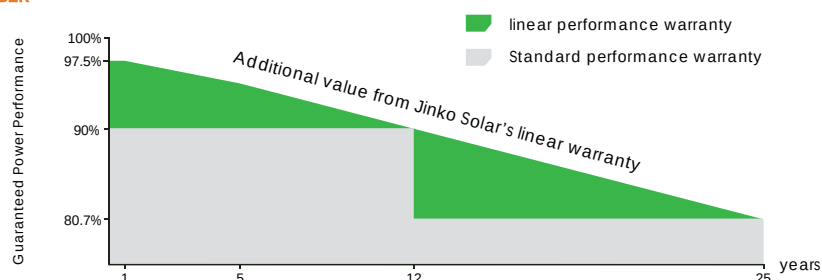
12 Year Product Warranty • 25 Year Linear Power Warranty



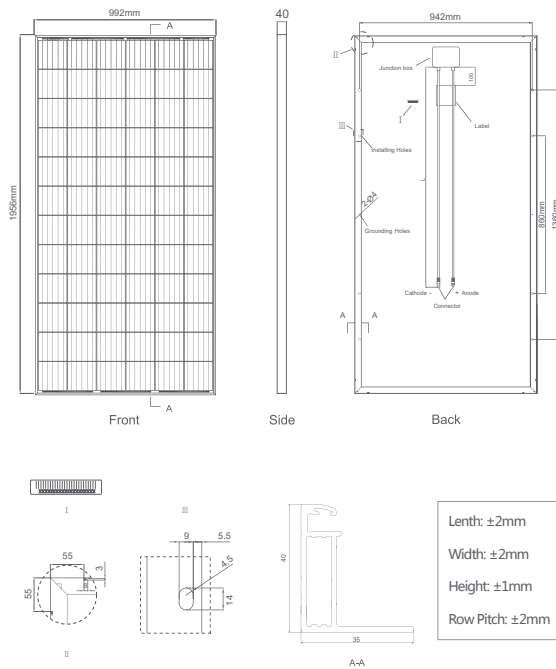
Nomenclature:

JKMxxxPP-60/72-V

Code	Cell	Code	Certification
null	Full	null	1000V
H	Half	V	1500V



Engineering Drawings

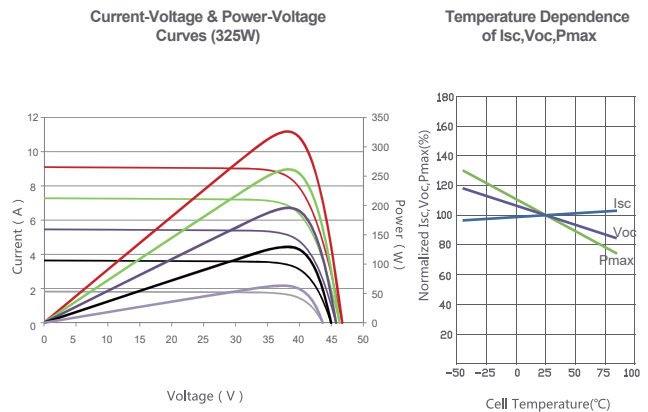


Packaging Configuration

(Two pallets=One stack)

27pcs/pallet, 54pcs/stack, 648 pcs/40'HQ Container

Electrical Performance & Temperature Dependence



Mechanical Characteristics

Cell Type	Poly-crystalline 157×157mm (6 inch)
No. of cells	72 (6×12)
Dimensions	1956×992×40mm (77.01×39.05×1.57 inch)
Weight	22.5 kg (49.6 lbs.)
Front Glass	3.2mm, Anti-Reflection Coating, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP67 Rated
Output Cables	TÜV 1×4.0mm², Length: 1200mm or Customized Length

SPECIFICATIONS

Module Type	JKM320PP-72		JKM325PP-72		JKM330PP-72		JKM335PP-72		JKM340PP-72	
	JKM320PP-72-V		JKM325PP-72-V		JKM330PP-72-V		JKM335PP-72-V		JKM340PP-72-V	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	320Wp	237Wp	325Wp	241Wp	330Wp	245Wp	335Wp	249Wp	340Wp	253Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	37.4V	34.7V	37.6V	35.0V	37.8V	35.3V	38.0V	35.6V	38.2V	35.9V
Maximum Power Current (Imp)	8.56A	6.83A	8.66A	6.89A	8.74A	6.94A	8.82A	6.99A	8.91A	7.05A
Open-circuit Voltage (Voc)	46.4V	43.0V	46.7V	43.3V	46.9V	43.6V	47.2V	43.8V	47.5V	44.0V
Short-circuit Current (Isc)	9.05A	7.35A	9.10A	7.40A	9.14A	7.45A	9.18A	7.52A	9.22A	7.98A
Module Efficiency STC (%)	16.49%		16.75%		17.01%		17.26%		17.52%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~-85°C									
Maximum system voltage	1000/1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	20A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.38%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.31%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.06%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									

STC: Irradiance 1000W/m²

Cell Temperature 25°C

AM=1.5

NOCT: Irradiance 800W/m²

Ambient Temperature 20°C

AM=1.5

Wind Speed 1m/s

* Power measurement tolerance: ± 3%

**ANEXO C – *DATASHEET* MÓDULO ESF *CHEETAH* HC 72M 390-410W
JINKO**

Cheetah HC 72M 390-410 Watt

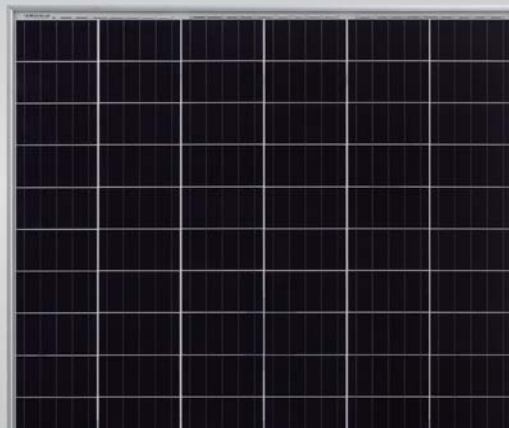
MONO PERC HALF CELL MODULE

Positive power tolerance of 0~+3%

- Half Cell
- Mono PERC 72 Cell



PERC



KEY FEATURES



5 Busbar Solar Cell

5 busbar solar cell adopts new technology to improve the efficiency of modules, offers a better aesthetic appearance, making it perfect for rooftop installation.



High Efficiency

Higher module conversion efficiency (up to 20.38%) benefit from half cell structure (low resistance characteristic).



PID Resistance

Excellent Anti-PID performance guarantee limited power degradation for mass production.



Low-light Performance

Advanced glass and cell surface textured design ensure excellent performance in low-light environment.



Severe Weather Resilience

Certified to withstand: wind load (2400 Pascal) and snow load (5400 Pascal).



Durability Against Extreme Environmental Conditions

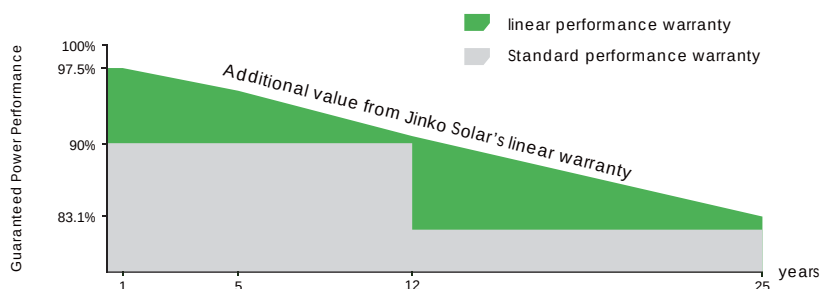
High salt mist and ammonia resistance certified by TUV NORD.

LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

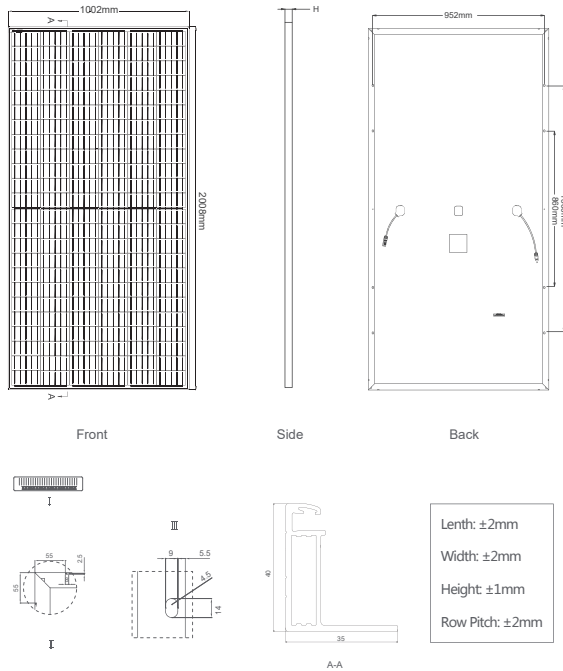
12 Year Product Warranty • 25 Year Linear Power Warranty



- ISO9001:2015, ISO14001:2015, OHSAS18001 certified factory
- IEC61215, IEC61730, UL1703 certified product



Engineering Drawings

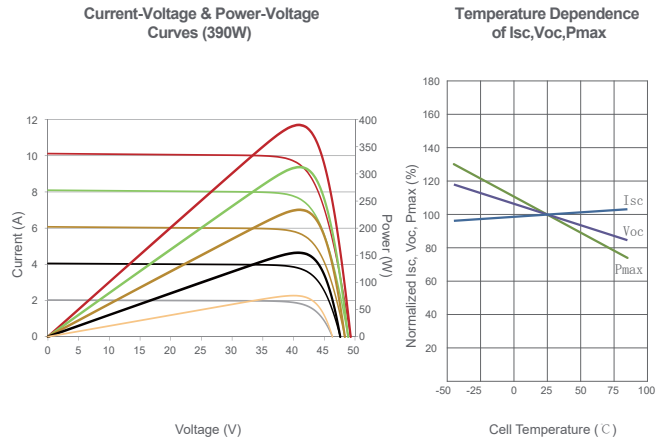


Packaging Configuration

(Two pallets = One stack)

27pcs/pallet, 54pcs/stack, 594pcs/40'HQ Container

Electrical Performance & Temperature Dependence



Mechanical Characteristics

Cell Type	Mono PERC 158.75×158.75mm
No. of Half-cells	144 (6×24)
Dimensions	2008×1002×40mm (79.06×39.45×1.57 inch)
Weight	22.5 kg (49.6 lbs)
Front Glass	3.2mm, Anti-Reflection Coating, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP67 Rated
Output Cables	TÜV 1x4.0mm², (+) 290mm, (-) 145mm or Customized Length

SPECIFICATIONS

Module Type	JKM390M-72H		JKM395M-72H		JKM400M-72H		JKM405M-72H		JKM410M-72H	
	JKM390M-72H-V		JKM395M-72H-V		JKM400M-72H-V		JKM405M-72H-V		JKM410M-72H-V	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	390Wp	294Wp	395Wp	298Wp	400Wp	302Wp	405Wp	306Wp	410Wp	310Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	41.1V	39.1V	41.4V	39.3V	41.7V	39.6V	42.0V	39.8V	42.3V	40.0V
Maximum Power Current (Imp)	9.49A	7.54A	9.55A	7.60A	9.60A	7.66A	9.65A	7.72A	9.69A	7.76A
Open-circuit Voltage (Voc)	49.3V	48.0V	49.5V	48.2V	49.8V	48.5V	50.1V	48.7V	50.4V	48.9V
Short-circuit Current (Isc)	10.12A	8.02A	10.23A	8.09A	10.36A	8.16A	10.48A	8.22A	10.60A	8.26A
Module Efficiency STC (%)	19.38%		19.63%		19.88%		20.13%		20.38%	
Operating Temperature (°C)	-40°C~-+85°C									
Maximum System Voltage	1000/1500VDC (IEC)									
Maximum Series Fuse Rating	20A									
Power Tolerance	0~-+3%									
Temperature Coefficients of Pmax	-0.35%/°C									
Temperature Coefficients of Voc	-0.29%/°C									
Temperature Coefficients of Isc	0.048%/°C									
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	45±2°C									

STC: ☀ Irradiance 1000W/m²

🌡 Cell Temperature 25°C

☁ AM=1.5

NOCT: ☀ Irradiance 800W/m²

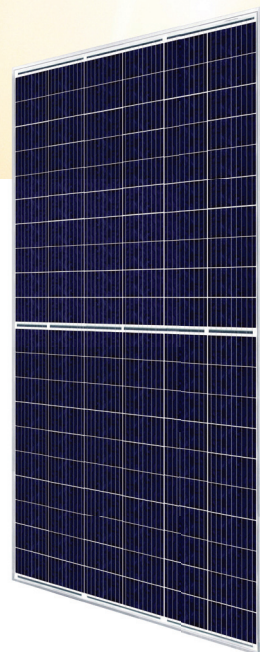
🌡 Ambient Temperature 20°C

☁ AM=1.5

🌀 Wind Speed 1m/s

* Power measurement tolerance: ± 3%

**ANEXO D – *DATASHEET* MÓDULO FOTOVOLTAICO *CANADIAN*
*SOLAR 330W***



HiKu

SUPER HIGH POWER POLY PERC MODULE

325 W ~ 350 W

CS3L-325 | 330 | 335 | 340 | 345 | 350P

MORE POWER



24 % higher power than conventional modules



Up to 4.5 % lower LCOE
Up to 2.7 % lower system cost



Low NMOT: 42 ± 3 °C
Low temperature coefficient (Pmax):
-0.36 % / °C



Better shading tolerance

MORE RELIABLE



Lower internal current,
lower hot spot temperature



Minimizes micro-crack impacts



Heavy snow load up to 5400 Pa,
wind load up to 3600 Pa*

*Black frame product can be provided upon request.



linear power output warranty*



enhanced product warranty on materials and workmanship*

*According to the applicable Canadian Solar Limited Warranty Statement.

MANAGEMENT SYSTEM CERTIFICATES*

ISO 9001:2015 / Quality management system
ISO 14001:2015 / Standards for environmental management system
OHSAS 18001:2007 / International standards for occupational health & safety

PRODUCT CERTIFICATES*

IEC 61215 / IEC 61730: VDE / CE / MCS / INMETRO
UL 1703 / IEC 61215 performance: CEC listed (US) / FSEC (US Florida)
UL 1703: CSA / IEC 61701 ED2: VDE / IEC 62716: VDE / IEC 60068-2-68: SGS
UNI 9177 Reaction to Fire: Class 1 / Take-e-way



* As there are different certification requirements in different markets, please contact your local Canadian Solar sales representative for the specific certificates applicable to the products in the region in which the products are to be used.

* For detail information, please refer to Installation Manual.

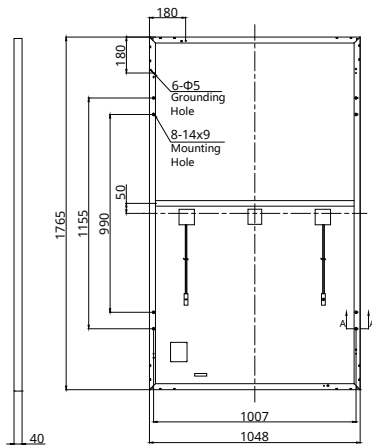
CANADIAN SOLAR INC.

545 Speedvale Avenue West, Guelph, Ontario N1K 1E6, Canada, www.canadiansolar.com, support@canadiansolar.com

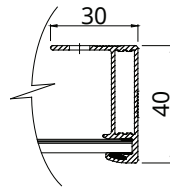
CANADIAN SOLAR INC. is committed to providing high quality solar products, solar system solutions and services to customers around the world. No. 1 module supplier for quality and performance/price ratio in IHS Module Customer Insight Survey. As a leading PV project developer and manufacturer of solar modules with over 40 GW deployed around the world since 2001.

ENGINEERING DRAWING (mm)

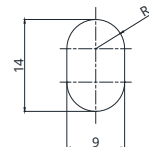
Rear View



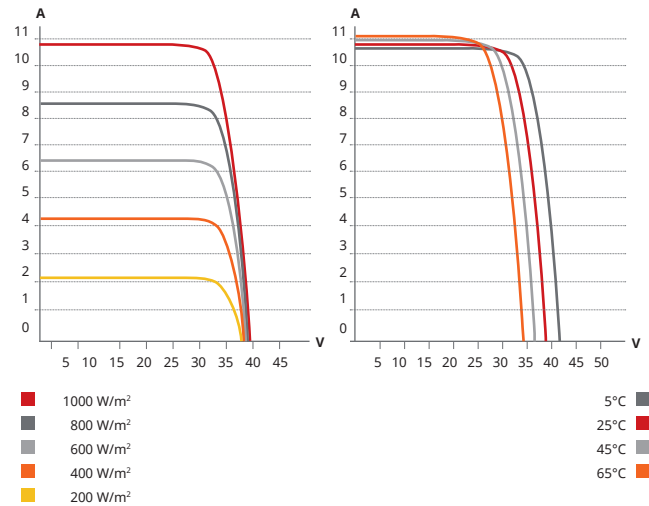
Frame Cross Section A-A



Mounting Hole



CS3L-330P / I-V CURVES



ELECTRICAL DATA | STC*

CS3L	325P	330P	335P	340P	345P	350P
Nominal Max. Power (Pmax)	325 W	330 W	335 W	340 W	345 W	350 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	32.0 V	32.2 V	32.4 V	32.6 V	32.8 V	33.0 V
Opt. Operating Current (Imp)	10.16 A	10.24 A	10.34 A	10.43 A	10.52 A	10.61 A
Open Circuit Voltage (Voc)	39.0 V	39.2 V	39.4 V	39.6 V	39.8 V	40.2 V
Short Circuit Current (Isc)	10.74 A	10.82 A	10.90 A	10.98 A	11.06 A	11.24 A
Module Efficiency	17.6%	17.8%	18.1%	18.4%	18.7%	18.9%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C					
Max. System Voltage	1500V (IEC/UL) or 1000V (IEC/UL)					
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or CLASS C (IEC 61730)					
Max. Series Fuse Rating	20 A					
Application Classification	Class A					
Power Tolerance	0 ~ + 10 W					

* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

ELECTRICAL DATA | NMOT*

CS3L	325P	330P	335P	340P	345P	350P
Nominal Max. Power (Pmax)	242 W	246 W	249 W	253 W	257 W	261 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	29.8 V	30.0 V	30.2 V	30.3 V	30.5 V	30.7 V
Opt. Operating Current (Imp)	8.13 A	8.20 A	8.27 A	8.35 A	8.42 A	8.49 A
Open Circuit Voltage (Voc)	36.6 V	36.8 V	37.0 V	37.2 V	37.4 V	37.8 V
Short Circuit Current (Isc)	8.66 A	8.73 A	8.79 A	8.86 A	8.92 A	9.07 A

* Under Nominal Module Operating Temperature (NMOT), irradiance of 800 W/m² spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.

MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Poly-crystalline
Cell Arrangement	120 [2 X (10 X 6)]
Dimensions	1765 X 1048 X 40 mm (69.5 X 41.3 X 1.57 in)
Weight	21.1 kg (46.5 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass
Frame	Anodized aluminium alloy, crossbar enhanced
J-Box	IP68, 3 bypass diodes
Cable	4.0 mm ² (IEC), 12 AWG (UL)
Cable Length (Including Connector)	Portrait: 500 mm (19.7 in) (+) / 350 mm (13.8 in) (-); landscape: 1250 mm (49.2 in)*
Connector	T4 series or H4 UTX or MC4-EVO2
Per Pallet	27 pieces
Per Container (40' HQ)	702 pieces

* For detailed information, please contact your local Canadian Solar sales and technical representatives.

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.36 % / °C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.28 % / °C
Temperature Coefficient (Isc)	0.05 % / °C
Nominal Module Operating Temperature	42 ± 3°C

PARTNER SECTION



* The specifications and key features contained in this datasheet may deviate slightly from our actual products due to the on-going innovation and product enhancement. Canadian Solar Inc. reserves the right to make necessary adjustment to the information described herein at any time without further notice. Please be kindly advised that PV modules should be handled and installed by qualified people who have professional skills and please carefully read the safety and installation instructions before using our PV modules.

CANADIAN SOLAR INC.

545 Speedvale Avenue West, Guelph, Ontario N1K 1E6, Canada, www.canadiansolar.com, support@canadiansolar.com

ANEXO E – *DATASHEET* INVERSOR *PHOENIX* 24V/375A

Inversores Phoenix

250 VA a 1200 VA 230 V e 120 V, 50 Hz ou 60 Hz

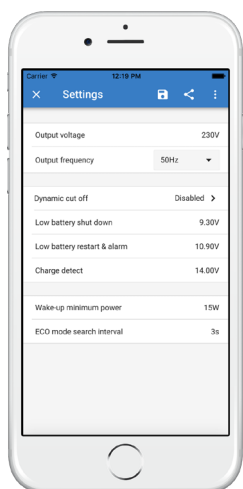
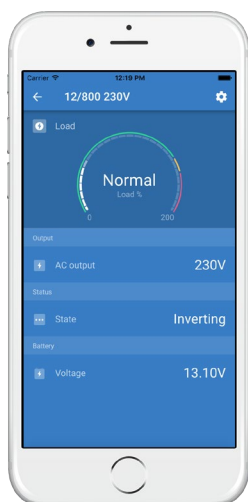
www.victronenergy.com



Phoenix 12/375 VE.Direct



Phoenix 12/375 VE.Direct



Porta de comunicação VE.Direct.

A porta VE.Direct pode ser conectada a:

- Um computador (cabo de interface VE.Direct para USB necessário)
- - *Smartphones, tablets* Apple e Android, MacBook e outros dispositivos: (*dongle* VE.Direct Bluetooth Smart necessário)

Totalmente configurável:

- Níveis de ativação do alarme por tensão de bateria baixa e de reinício
- Níveis de corte e reinício de bateria por tensão baixa
- Corte dinâmico: nível de corte dependente da carga
- Tensão de saída 210 V a 245 V
- Frequência 50 Hz ou 60 Hz
- Modo ECO *On/Off* e nível de detecção do modo ECO

Monitorização:

- Tensão de entrada e saída, percentagem de carga e alarmes

Fiabilidade comprovada

A topologia de ponte completa mais transformador toroidal confirmou a sua fiabilidade há vários anos.

Os inversores são imunes aos curto-circuitos e estão protegidos contra o sobreaquecimento, tanto causado por sobrecarga, como por uma temperatura ambiente elevada.

Elevada potência de arranque

Necessário para arrancar cargas como conversores de potência para lâmpadas LED, lâmpadas de halogéneo ou ferramentas elétricas.

Modo ECO

No modo ECO, o inversor vai mudar para o modo *standby* se a carga for inferior a um valor predefinido (carga mín.: 15 W). Em *standby*, o inversor vai ligar-se durante um breve período a cada 2,5 s (regulável, por defeito: a cada 2,5 s). Se a carga superar um nível predefinido, o inversor vai continuar ligado.

On/Off Remoto

É possível conectar um interruptor *on/off* remoto a um conector de dois polos ou entre o positivo da bateria e o contacto esquerdo do conector de dois polos.

Diagnóstico LED

Consulte a descrição no manual.

Para transferir a carga para outra fonte de CA: um interruptor de transferência automática

Para os nossos inversores de baixa potência recomendamos o comutador de transferência automático Filax.

Este comutador tem um tempo de comutação tão rápido (inferior a 20 ms) que os computadores ou qualquer outro equipamento eletrónico continuarão a trabalhar sem interrupção.

Disponível com diferentes tomadas de saída

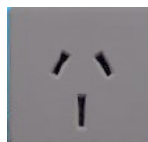
Schuko



UK



AU/NZ



IEC-320

(Ficha macho incluída)



Nema 5-15R



Conexão CC com terminais de parafuso

Não são necessárias ferramentas especiais para a instalação.

GFCI



Inversor Phoenix	12 V 24 V 48 V	12/250 24/250 48/250	12/375 24/375 48/375	12/500 24/500 48/500	12/800 24/800 48/800	12/1200 24/1200 48/1200
Potência contínua a 25 °C (1)	250 VA		375 VA	500 VA	800 VA	1200 VA
Potência cont. a 25 °C / 40 °C	200 / 175 W		300 / 260 W	400 / 350 W	650 / 560 W	1000 / 850 W
Pico de potência	400 W		700 W	900 W	1500 W	2200 W
Tensão / frequência CA de saída (regulável)	230 VCA ou 120 VCA +/- 3 % 50 Hz ou 60 Hz +/- 0,1 %					
Intervalo de tensão de entrada	9,2 V - 17 V / 18,4 V - 34,0 V / 36,8 V - 62,0 V					
Corte por CC baixa (regulável)	9,3 V / 18,6 V / 37,2 V					
Corte dinâmico (dependente da carga) por CC baixa (totalmente configurável)	Corte dinâmico, ver https://www.victronenergy.com/live/ve.direct:phoenix-inverters-dynamic-cutoff					
Reinício CC baixa e alarme (regulável)	10,9 V / 21,8 V / 43,6 V					
Deteção de bateria carregada (regulável)	14,0 V / 28,0 V / 56,0 V					
Eficácia máx.	87 / 88 / 88 %	89 / 89 / 90 %	90 / 90 / 91 %	90 / 90 / 91 %	91 / 91 / 92 %	
Consumo em vazio	4,2 / 5,2 / 7,9 W	5,6 / 6,1 / 55,2 W	6 / 6,5 / 9 W	6,5 / 7 / 9,5 W	7 / 8 / 10 W	
Potência de carga zero por defeito em modo ECO (Intervalo de repetição por defeito: 2,5 s, regulável)	0,8 / 1,3 / 2,5 W	0,9 / 1,4 / 2,6 W	1 / 1,5 / 3,0	1 / 1,5 / 3,0	1 / 1,5 / 3,0	
Configuração da potência de início e paragem em modo ECO	Regulável					
Proteção (2)	a - f					
Temperatura de funcionamento	-40 °C a +65 °C (arrefecimento por ventoinha) Diminuição nominal de 1,25 % por °C acima de 40 °C					
Humidade (sem condensação)	máx. 95 %					
CAIXA						
Material e Cor	Caixa de aço e cobertura de plástico (azul Ral 5012)					
Ligações da bateria	Terminais de parafuso					
Secção máxima do cabo	10 mm² / AWG8	10 mm² / AWG8	10 mm² / AWG8	25/10/10 mm² / AWG4/8/8	35/25/25 mm² / AWG 2/4/4	
Saídas CA normalizadas	230 V: Schuko (CEE 7/4), IEC-320 (ficha macho incluída) UK (BS 1363), AU/NZ (AS/NZS 3112) 120 V: Nema 5-15R, GFCI					
Classe de proteção	IP21					
Peso	2,4 kg / 5,3 lbs	3,0 kg / 6,6 lbs	3,9 kg / 8,5 lbs	5,5 kg / 12 lbs	7,4 kg / 16,3 lbs	
Dimensões (al x la x pr em mm) (al x la x pr em in)	86 x 165 x 260 3,4 x 6,5 x 10,2	86 x 165 x 260 3,4 x 6,5 x 10,2	86 x 172 x 275 3,4 x 6,8 x 10,8	105 x 216 x 305 4,1 x 8,5 x 12,1 (modelo de 12 V: 105 x 230 x 325)	117 x 232 x 327 4,6 x 9,1 x 12,9 (modelo de 12 V: 117 x 232 x 362)	
ACESSÓRIOS						
On/Off Remoto	Sim					
Comutador de transferência automático	Filax					
NORMAS						
Segurança	EN-IEC 60335-1 / EN-IEC 62109-1 / UL 458 (3)					
EMC	EN 55014-1 / EN 55014-2 / IEC 61000-6-1 / IEC 61000-6-2 / IEC 61000-6-3					
Diretiva automóvel	ECE R10-4					
3) UL 458 apenas para inversores com tomada de saída GFCI						
1) Carga não linear, fator de pico 3:1 2) Códigos de proteção: a) curto-circuito de saída b) sobrecarga c) tensão da bateria demasiado alta d) tensão da bateria demasiado baixa h) temperatura demasiado alta f) ondulação CC demasiado elevada						



Alarme de Bateria

Uma tensão de bateria excessivamente alta ou baixa é indicada por um alarme visual e acústico e por um relé para sinalização remota.



Dongle VE.Direct Bluetooth Smart.
(deve ser encomendado em separado)



Monitor de Bateria BMV

O monitor de baterias BMV dispõe de um avançado sistema de controlo por microprocessador, combinado com um sistema de medição de elevada resolução da tensão da bateria e da carga/descarga de corrente. Além disto, o *software* inclui algoritmos de cálculo complexos para determinar exatamente o estado da carga da bateria. O BMV mostra seletivamente a tensão, a corrente, os Ah consumidos ou o tempo restante de carga da bateria. O monitor também guarda uma variedade de dados relacionados com o rendimento e a utilização da bateria.

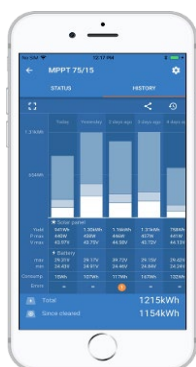
ANEXO F – *DATASHEET MPPT BLUESOLAR 75V 15A 12V/24V*

BlueSolar Charge Controllers

MPPT 75/10, 75/15, 100/15, 100/20-48V



Solar Charge Controller
MPPT 75/15



VE.Direct Bluetooth Smart
dongle needed to enable
Bluetooth

Ultra-fast Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Especially in case of a clouded sky, when light intensity is changing continuously, an ultra-fast MPPT controller will improve energy harvest by up to 30% compared to PWM charge controllers and by up to 10% compared to slower MPPT controllers.

Load output

Over-discharge of the battery can be prevented by connecting all loads to the load output. The load output will disconnect the load when the battery has been discharged to a pre-set voltage.

Alternatively, an intelligent battery management algorithm can be chosen: see Battery Life.

The load output is short circuit proof.

Some loads (especially inverters) can best be connected directly to the battery, and the inverter remote control connected to the load output. A special interface cable may be needed, please see the manual.

Battery Life: intelligent battery management

When a solar charge controller is not able to recharge the battery to its full capacity within one day, the result is often that the battery will continually be cycled between a 'partially charged' state and the 'end of discharge' state. This mode of operation (no regular full recharge) will destroy a lead-acid battery within weeks or months.

The Battery Life algorithm will monitor the state of charge of the battery and, if needed, day by day slightly increase the load disconnect level (i.e. disconnect the load earlier) until the harvested solar energy is sufficient to recharge the battery to nearly the full 100%. From that point onwards the load disconnect level will be modulated so that a nearly 100% recharge is achieved about once every week.

Programmable battery charge algorithm

See the software section on our website for details

Day/night timing and light dimming option

See the software section on our website for details

Programming, real-time data and history display options

- Color Control GX or other GX devices: see the **Venus** documents on our website.
- A smartphone or other Bluetooth-enabled device: VE.Direct Bluetooth Smart dongle needed.

BlueSolar Charge Controller	MPPT 75/10	MPPT 75/15	MPPT 100/15	MPPT100/20
Battery voltage (auto select)	12/24V			12/24/48V
Rated charge current	10A	15A	15A	20A
Nominal PV power, 12V 1a,b)	145W	220W	220W	290W
Nominal PV power, 24V 1a,b)	290W	440W	440W	580W
Nominal PV power, 48V 1a,b)	n. a.	n. a.	n. a.	1160W
Max. PV short circuit current 2)	13A	15A	15A	20A
Automatic load disconnect	Yes			
Max. PV open circuit voltage	75V		100V	
Peak efficiency	98%			
Self-consumption – load on	12V: 25 mA 24V: 15 mA			26 / 20 / 19 mA
Self-consumption – load off				10 / 8 / 7 mA
Charge voltage 'absorption'	14,4V / 28,8V (adjustable)			14,4V / 28,8V / 57,6V (adj.)
Charge voltage 'float'	13,8V / 27,6V (adjustable)			13,8V / 27,6V / 55,2V (adj.)
Charge algorithm	multi-stage adaptive			
Temperature compensation	-16 mV / °C resp. -32 mV / °C			
Max. continuous load current	15A			20A / 20A / 1A
Low voltage load disconnect	11,1V / 22,2V / 44,4V or 11,8V / 23,6V / 47,2V or Battery Life algorithm			
Low voltage load reconnect	13,1V / 26,2V / 52,4V or 14V / 28V / 56V or Battery Life algorithm			
Protection	Output short circuit / Over temperature			
Operating temperature	-30 to +60°C (full rated output up to 40°C)			
Humidity	95%, non-condensing			
Data communication port	VE.Direct (see the data communication white paper on our website)			
ENCLOSURE				
Colour	Blue (RAL 5012)			
Power terminals	6 mm² / AWG10			
Protection category	IP43 (electronic components), IP22 (connection area)			
Weight	0,5 kg		0,6 kg	0,65 kg
Dimensions (h x w x d)	100 x 113 x 40 mm		100 x 113 x 50 mm	100 x 113 x 60 mm
STANDARDS				
Safety	EN/IEC 62109-1, UL 1741, CSA C22.2			
1a) If more PV power is connected, the controller will limit input power. 1b) The PV voltage must exceed Vbat + 5V for the controller to start. Thereafter the minimum PV voltage is Vbat + 1V 2) A PV array with a higher short circuit current may damage the controller.				

**ANEXO G – ROTEIROS DE EXPERIMENTOS VERSÃO PARA
IMPRESSÃO**

Experimento 1 – Conhecendo a bancada móvel ESF e seus componentes

Objetivos

Ao concluir às atividades propostas, o aluno deverá ser capaz:

- Identificar os equipamentos que compõem o sistema ESF;
- Entender o funcionamento básico de cada elemento;
- Conhecer os pontos de interconexão;
- Realizar leitura das grandezas no inversor e pelos instrumentos;
- Compreender os aspectos de segurança dos equipamentos;

Materiais: Bancada Móvel ESF e instrumentos.

Introdução teórica

A captação da radiação solar e sua respectiva conversão em energia elétrica por meio da célula fotovoltaica pode alimentar dispositivos que operam com energia elétrica. Os sistemas fotovoltaicos são compostos por: painel solar, inversor, controlador de carga, e baterias (*off-grid*). A célula fotovoltaica é o elemento fundamental do processo de conversão de energia solar em energia elétrica, sendo construída de material semicondutor. Já o inversor desempenha papel importante num sistema fotovoltaico, pois é responsável por converter a corrente contínua vinda dos módulos ESF em corrente alternada. O controlador de carga é responsável por controlar os efeitos da sobrecarga e descarga nas baterias do sistema, por meio do MPPT – *Maximum Power Point Tracking*. As baterias são responsáveis pelo armazenamento da energia DC da conversão da energia solar convertida nas fotocélulas.

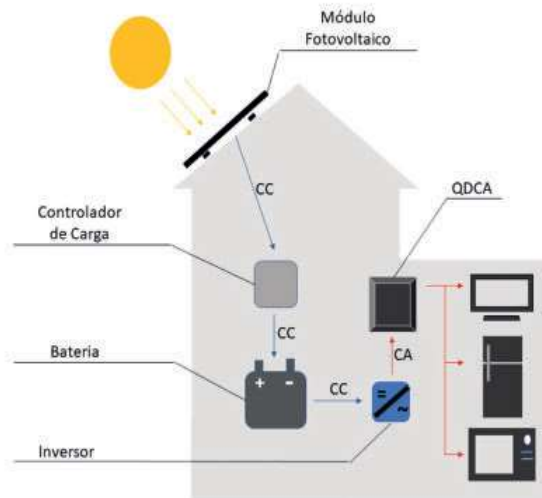
Podemos classificar os Sistemas Fotovoltaicos em 2 categorias principais: sistema isolado (*off-grid*) e sistema conectado à rede (*grid-tie*).

Sistema isolado (*off-grid*)

Do inglês *off-grid* ou fora da rede, também chamado como sistema autônomo, esse sistema foi concebido como solução mais econômica e confiável para obter energia elétrica. Apresenta como principal característica o fato de não estar conectado à rede elétrica.

As instalações residenciais com geração fotovoltaica, representam exemplo, onde tem-se o consumo de energia sendo suprido apenas pela geração fotovoltaica, principalmente em áreas rurais. Nessas instalações nos horários com pouca incidência de radiação solar ou mesmo na sua ausência, o suprimento é fornecido pelas baterias que estão conectados em paralelo ao sistema, ou seja, com incidência solar o suprimento é fornecido pelo gerador fotovoltaico, na ausência da luz solar o suprimento é mantido pela energia armazenada nas baterias. Uma possível configuração é mostrada na Figura 1.

Figura 1 - Sistema fotovoltaico *off-grid*



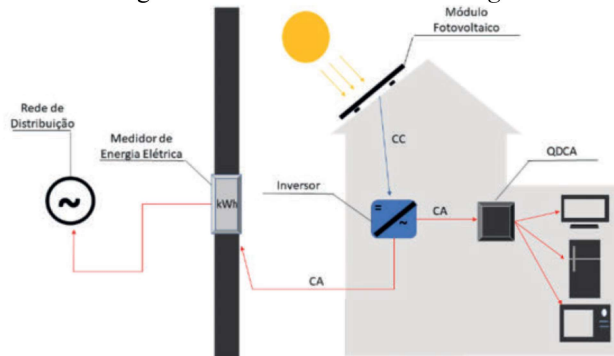
Fonte: *International Copper Association Brazil*, 2022

Sistema conectado à rede (*grid-tie*)

Novas tecnologias de inversores e medidores inteligentes, chamados de *smart meter*, permitiram conceber uma configuração de ligação dos sistemas fotovoltaicos denominada *on-grid (grid-tie)*. Nesta configuração, os sistemas fotovoltaicos são conectados à rede da concessionária de energia elétrica. Dessa forma, quando há excedente na geração fotovoltaica, tal excedente é inserido na rede de distribuição da concessionária, retornando como descontos na fatura do consumidor e/ou microgerador/minigerador. No caso do prossumidor, consumidor que produz energia, se a geração local não consiga suprir a demanda interna, a rede elétrica da concessionária mantém a potência na carga.

Nas instalações que usam a arquitetura *grid-tie* o medidor de energia deve ser do tipo *smart meter* ou do tipo bidirecional, que meça e armazene os dados lidos, tanto na entrada da rede como na saída do gerador do sistema fotovoltaico. Comparado ao sistema *off-grid*, o *grid-tie* é eficiente, na medida que garante que toda geração será usada localmente ou disponibilizada na rede de distribuição da concessionária de energia. Na Figura 2 tem-se a ilustração de um sistema *grid-tie*. Existem também os sistemas fotovoltaicos híbridos que reúnem características das técnicas dos inversores autônomos e dos que interagem com a rede, mas esses não serão abordados aqui. (PORTAL SOLAR, 2021)

Figura 2 - Sistema fotovoltaico *on-grid*



Fonte: International Copper Association Brazil, 2022

Procedimento Prático

1. Identificar componentes da bancada e Fóton Lab e preencher com os dados solicitados.

Tabela 1 - Identificação de parâmetros do módulo fotovoltaico

Fabricante		
Info	Valor	Unidade
G (irradiância)		
AM (espectro)		
T _{cell} (temperatura da célula)		
P _{máx} (potência máxima)		
V _{mp} (tensão máxima)		
I _{mp} (corrente máxima)		
Observações:		

Tabela 2 - Identificação de parâmetros do inversor

Fabricante		
Info	Valor	Unidade
P _{contínua} a 25°C		
P _{contínua} a 40°C		
V _{ca}		
Frequência (f)		
Observações:		

2. Explique a função de cada equipamento de forma resumida.

- **Módulo ESF**: Transforma a energia incidente na forma de radiação em energia solar por meio do efeito fotovoltaico.

Figura 3 - Módulos ESF Bancada Móvel IFG Goiânia



Fonte: Autor

- **Inversor**: Transforma tensão DC que sai do módulo ESF em tensão AC para alimentar as cargas consumidoras AC e/ou injeta na rede da concessionária o excedente (*grid-tie*).

Figura 4 - Inversor Bancada Móvel ESF IFG Goiânia



Fonte: Autor

- **MPPT**: Controlador de carga responsável pelo ponto de máxima potência do módulo fotovoltaico e transfere essa potência para tensão da bateria. Mantendo a mesma em flutuação em condições normais de operação e/ou carga nos casos de descarga acentuada.

Figura 5 - MPPT Fóton Lab



Fonte: Autor

- **Bateria estacionária:** É um acumulador de energia que armazena ou fornece tensão DC oriunda dos módulos ESF.

Figura 6 - Bateria Fóton Lab



Fonte: Autor

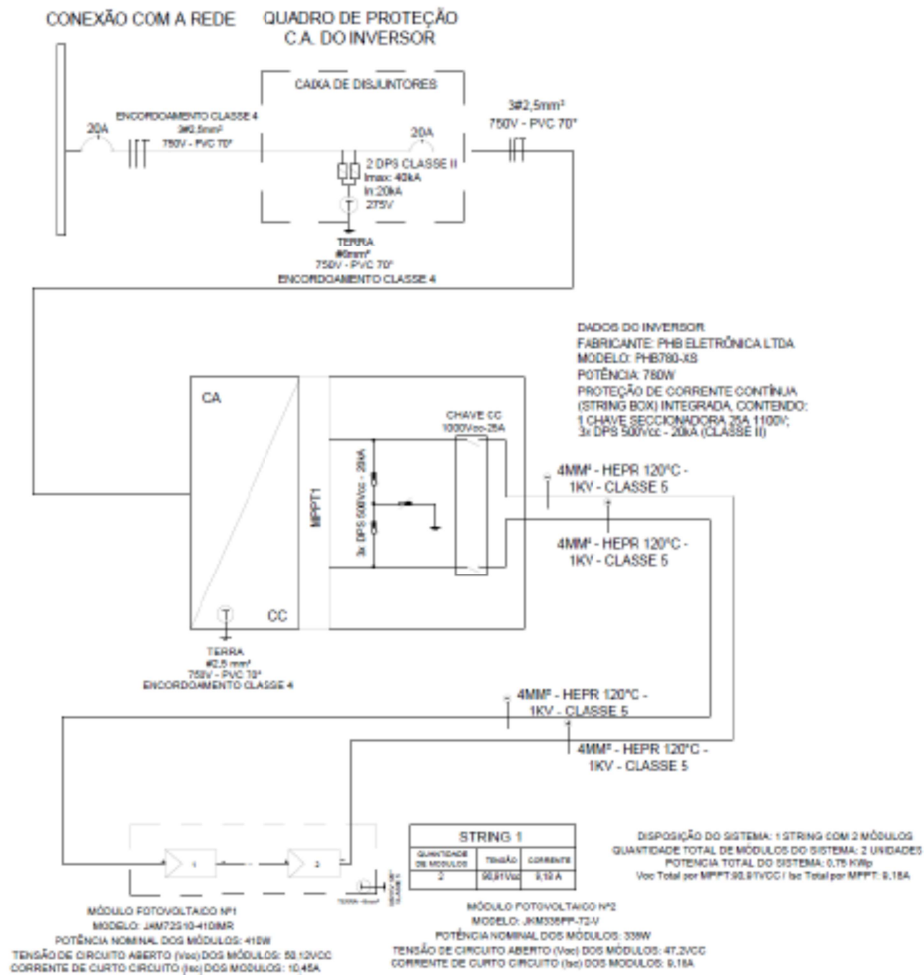
3. Identificar componentes do sistema ESF por meio do diagrama unifilar e foto da bancada

Figura 7 - Visão geral dos componentes da Bancada Móvel ESF



Fonte: Autor

Figura 8 - Diagrama Unifilar da Bancada Móvel ESF IFG Goiânia



Fonte: SANTAREM/QUIXABEIRA, 2022

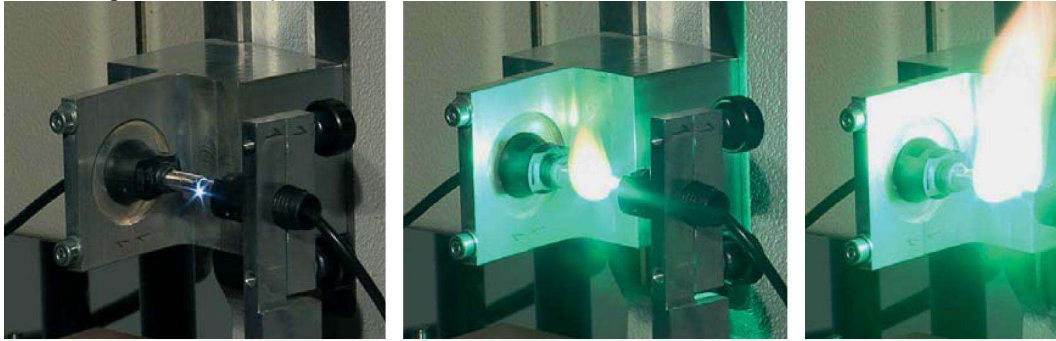
4. Marque a opção correta quanto ao sistema ESF utilizado na Bancada Móvel Fotovoltaica.

- ☐ *Off-grid*
- ☐ *Grid-tie*
- ☐ Híbrido

5. Siga as regras de acesso, permanência e de segurança na operação e observação dos experimentos. Realize as medições usando os instrumentos e escalas de acordo com a grandeza a ser medida. Só toque nas conexões se tiver certeza de que as mesmas estão desenergizadas.

Conforme a Figura 9 há o risco de formação de arco-voltaico ao retirar os conectores MC-04 dos cabos que interligam os módulos e o inversor com os mesmos energizados.

Figura 9 - Formação arco-voltaico nos conectores mc-04 dos módulos fotovoltaicos



Fonte: UFSC, 2022

Bibliografia

CADERNO DIDÁTICO ENERGIA SOLAR. Experimentação remota móvel para educação básica: Conversão de Energia Solar em Energia. RexLab/UFSC. Disponível em: <http://rele.ufsc.br/moodle/pluginfile.php/3152/mod_resource/content/2/caderno%20didatico.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2023.

FILHO, J. P. A. Atividades Experimentais: Do Método À Prática Construtivista. 2000. 302 f. Tese (Doutorado em Educação) – Departamento de Centro de Ciências da Educação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

JINKO SOLAR. *Datasheet PV module Eagle 72P 320-340 Watt*. Disponível em: <<https://www.jinkosolar.com/en/site/dwparametern/>>. Acesso em: 01 abr. 2023.

PINHO, J.T., GALDINO, M.A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPTEL - CRESEB. 2014.

PHB SOLAR. *Datasheet inversor PHB780-XS*. Disponível em: <<https://www.energiasolarphb.com.br/produto/inversor-phb780-xs-2/>>. Acesso em: 01 abr. 2023.

TEIXEIRA, J. G. M., SOUSA, P. C. Roteiros de experimento para prática laboratorial no Fóton Lab. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica). UFG. Goiânia. GO, 2021.

SANTAREM, H.M.M., QUIXABEIRA, P.L.C. Desenvolvimento de bancada didática para sistema de energia solar fotovoltaica. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica). IFG Câmpus Goiânia. Goiânia. GO, 2022.

VILLALVA, M. G., GAZOLI, J.R. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. 1 ed. São Paulo: Érica. 2012.

Experimento 2 – Estudo do efeito fotovoltaico

Objetivos

Ao concluir às atividades propostas, o aluno deverá ser capaz:

- Descrever o efeito fotovoltaico;
- Descrever como funcionam os módulos ESF;
- Correlacionar a tensão de saída com variações na fonte;
- Compreender a importância da irradiância na ESF.

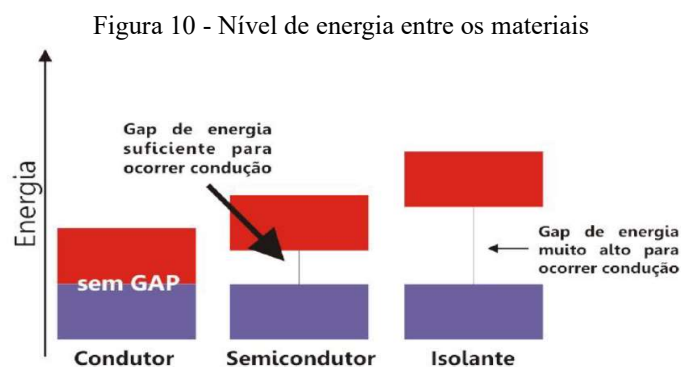
Materiais: Bancada Móvel ESF, alicate amperímetro AC/DC, multímetro TrueRMS, lona escura e papel manteiga.

Introdução teórica

O Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico, caracteriza-se quando sobre um material semicondutor há incidência de luz, sendo esta luz de qualquer fonte, assim os elétrons se movimentam através das bandas de energia. Os materiais semicondutores são usados na produção das células fotovoltaicas, tornando possível um fluxo ordenado de elétrons, que geram uma corrente elétrica, dessa forma a conversão é direta de energia solar para elétrica.

Os semicondutores apresentam dois comportamentos distintos: podem se comportar como materiais condutores ou materiais isolantes a depender dos fatores aos quais estão submetidos, tais como: temperatura, radiação incidente, pressão, dentre outros. Os semicondutores apresentam um *Gap* entre as bandas de condução e valência, podendo ser entendido como um intervalo entre as bandas, sendo suficiente para passagem de elétrons e assim estabelecer uma corrente, conforme ilustra a Figura 10.

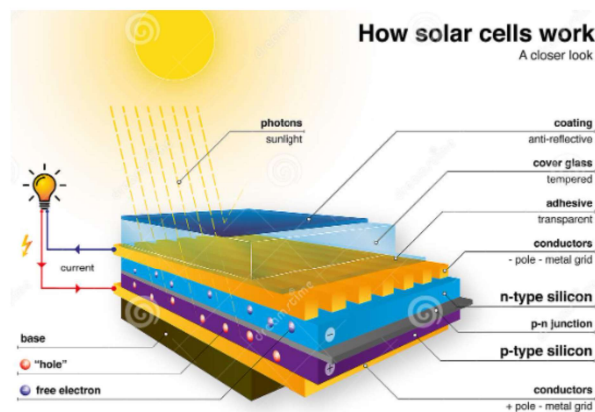


Fonte: CADERNO DIDÁTICO/UFSC, 2015

Normalmente a banda de valência dos materiais semicondutores, está completa, e a banda de condução vazia. Nestas condições os elétrons da camada de valência obtêm energia cinética, conseguem quebrar ligações alcançando seu estado livre. Tal fenômeno acontece quando ele recebe fótons de radiação eletromagnética, dentro do espectro visível, ou seja, os elétrons da camada de valência podem saltar para a camada de condução, gerando dentro estrutura cristalina do semicondutor uma corrente elétrica.

Atualmente os semicondutores mais indicados para conversão fotovoltaica, são: o silício amorfo hidrogenado (a-Si:H) e o silício cristalino (c-Si), bastante utilizados. O silício cristalino é o material dominante em tecnologias fotovoltaicas. Tem-se uma diferença estrutural e também uma distinção na viabilidade econômica entre eles, no entanto, há várias pesquisas, empenhadas no desenvolvimento de tecnologias que visam otimizar custos e eficiência dessas células ESF. A Figura 11 ilustra o efeito fotovoltaico na junção PN.

Figura 11 - O efeito fotovoltaico na junção pn



Fonte: www.nucleoats.ind.br

Procedimento Prático

1. Monte a bancada móvel ESF, para que fique conforme Figura 12, a seguir, obstrua totalmente um dos módulos.

Figura 12 - Etapa 1 efeito fotovoltaico



Fonte: Autor

Após a montagem confira todas as conexões, ligue a bancada sem carga e preencha a tabela 3 com os dados informados no painel do inversor. Calcule a diferença entre a potência nominal e anote também.

Tabela 3 - Valores medidos após ligar a bancada

Etapa 1	I	V	Potência (W)	P_{NOM} (W)	Diferença (%)
Valor					

Observações:

2. Ao finalizar a etapa anterior, repita novamente, mas agora com os 2 módulos fotovoltaicos descobertos, conforme Figura 13 preencha a tabela 4.

Figura 13 - Etapa 2 módulos sem obstrução



Fonte: Autor

Tabela 4 - Valores medidos após ligar a bancada (sem carga)

Etapa 2	I	V	Potência (W)	P_{NOM} (W)	Diferença (%)
Valor					

Observações:

3. Com base nos valores obtidos, avalie as diferenças entre os resultados das etapas 1 e 2.

Os resultados obtidos são diferentes uma vez que a irradiância incidente no painel solar em cada etapa do experimento varia. Observa-se que tanto tensão como corrente são diretamente proporcionais à luminosidade incidente nos módulos (absorvida). De acordo com o referencial teórico, o efeito fotovoltaico é um fenômeno físico no qual as energias dos fótons são absorvidas pelos elétrons, de forma que esses conseguem romper o *gap* de energia que existe nos materiais semicondutores.

Bibliografia

- CADERNO DIDÁTICO ENERGIA SOLAR. Experimentação remota móvel para educação básica: Conversão de Energia Solar em Energia. RexLab/UFSC. Disponível em: <http://rele.ufsc.br/moodle/pluginfile.php/3152/mod_resource/content/2/caderno%20didatico.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- FILHO, J. P. A. Atividades Experimentais: Do Método À Prática Construtivista. 2000. 302 f. Tese (Doutorado em Educação) – Departamento de Centro de Ciências da Educação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.
- INTERNATIONAL COPPER ASSOCIATION BRAZIL. Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: Conceitos, Aplicações e Estudos de Caso. Disponível em: <https://abcobre.org.br/livro-energia-solar-fotovoltaica-no-brasil/>. Acesso em 29 abr. 2023.
- JINKO SOLAR. *Datasheet PV module Eagle 72P 320-340 Watt*. Disponível em: <<https://www.jinkosolar.com/en/site/dwparametern/>>. Acesso em: 01 abr. 2023.
- TEIXEIRA, J. G. M., SOUSA, P. C. Roteiros de experimento para prática laboratorial no Fóton Lab. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica). UFG. Goiânia. GO, 2021.
- PINHO, J.T., GALDINO, M.A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPTEL - CRESEB. 2014.
- PHB SOLAR. *Datasheet inversor PHB780-XS*. Disponível em: <<https://www.energiasolarphb.com.br/produto/inversor-phb780-xs-2/>>. Acesso em: 01 abr. 2023.
- VILLALVA, M. G., GAZOLI, J.R. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. 1 ed. São Paulo: Érica. 2012.

Experimento 3 – Sombreamento

Objetivos

Ao concluir às atividades propostas, o aluno deverá ser capaz:

- Compreender o efeito do sombreamento no desempenho do módulo ESF;
- Correlacionar as variações da corrente de saída do módulo, devido ao sombreamento;
- Realizar medições de corrente de curto quando a célula é sombreada.

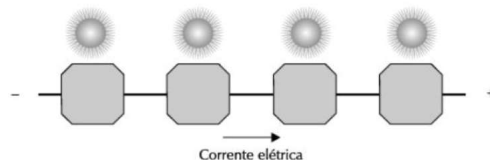
Materiais: Bancada Móvel ESF, alicate amperímetro AC/DC, multímetro TrueRMS, lona escura e papel manteiga.

Introdução teórica

Efeitos do Sombreamento no Módulo Fotovoltaico

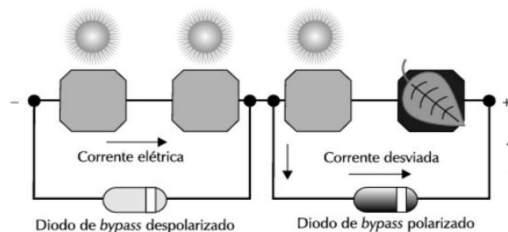
O sombreamento é um problema significativo na produção de energia dos módulos fotovoltaicos. Quando uma área do módulo fica sombreada, há diminuição na irradiância absorvida pelo módulo e consequente queda na geração de energia. Nas Figuras 14 e 15 têm-se o funcionamento normal e com sombreamento das células. Qualquer obstáculo aos raios solares causará sombreamento no módulo, fazendo a corrente diminuir e essa redução se propaga para as demais células devido à conexão em série das células fotovoltaicas. (PINHO, 2014).

Figura 14 - Funcionamento normal do módulo fotovoltaico



Fonte: VILLALVA, 2012.

Figura 15 - Funcionamento do módulo fotovoltaico com sombreamento



Fonte: VILLALVA, 2012.

O sombreamento pode levar ao efeito de Ponto Quente (*Hot-Spot*) nos módulos fotovoltaicos. Isso ocorre quando há transferência de energia em excesso das células não sombreadas para a célula sombreada, o que pode resultar em um aumento significativo de temperatura e até mesmo na ruptura do vidro da célula afetada. Para evitar esse problema, são utilizados diodos de desvio (*bypass*) que são conectados em paralelo, oferecendo um caminho alternativo para a corrente elétrica da célula sombreada. (PINHO, 2014)

Procedimento Prático

1. Monte a bancada móvel ESF, para que fique conforme Figura 13 do Experimento 1, de forma que os módulos fiquem desobstruídos. Anote os valores na tabela.

Tabela 5 - Medidas (sem sombreamento)

Etapa 1	I_{sc} (A)
Sem sombreamento	

Observações:

2. Obstrua parcialmente um dos módulos ESF e anote os valores na tabela. Conforme Figura 42 do Experimento 2.

Tabela 6 - Medidas (parcialmente sombreado)

Etapa 2	I_{sc} (A)
Parcialmente sombreado	

Observações:

3. Obstrua totalmente os módulos ESF e anote os valores na tabela.

Tabela 7 - Medidas (totalmente sombreado)

Etapa 3	I_{sc} (A)
Sombreamento total	

Observações:

4. Avalie a variação dos parâmetros de saída com os módulos obstruídos, parcialmente obstruído e sem obstrução.

O sombreamento em sistemas fotovoltaicos causa variações na corrente de saída, afetando a geração de energia. Existe uma correlação entre a potência calculada e o efeito na produtividade do módulo quando ocorre

sombreamento. É importante analisar o potencial de sombreamento antes da instalação do sistema e implementar soluções de mitigação para maximizar a produtividade.

5. O que é o fenômeno *hotspot* e como ele influencia nas células que compõem os módulos ESF.

Quando uma célula fotovoltaica está sombreada, ela pode agir como uma carga para outras células, dissipando energia como calor e aumentando a temperatura. Isso é conhecido como ponto quente ou *hotspot*, e é prejudicial e irreversível. Para mitigar esse problema, é recomendado o uso de diodos de desvio (*bypass*) que redirecionam a corrente ao redor da célula sombreada, minimizando os efeitos negativos do sombreamento.

Bibliografia

FILHO, J. P. A. Atividades Experimentais: Do Método À Prática Construtivista. 2000. 302 f. Tese (Doutorado em Educação) – Departamento de Centro de Ciências da Educação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

JUNIOR, L.A.P., KREZINGUER, A. Desenvolvimento de bancada para monitoramento de módulos fotovoltaicos em ensaio de light-soaking. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado, RS. p. 349, 2018.

TEIXEIRA, J. G. M., SOUSA, P. C. Roteiros de experimento para prática laboratorial no Fóton Lab. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica). UFG. Goiânia. GO, 2021.

PINHO, J.T., GALDINO, M.A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESEB. 2014.

VILLALVA, M. G., GAZOLI, J.R. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. 1 ed. São Paulo: Érica. 2012.

Experimento 4 – Irradiância, temperatura e sujidade

Objetivos

Ao concluir às atividades propostas, o aluno deverá ser capaz:

- Identificar os parâmetros de entrada e saída do sistema;
- Correlacionar as variações da entrada com a saída;
- Compreender a importância da irradiância e sua relação com a geração de ESF;
- Compreender as variações na saída causada pela temperatura e sujidade dos módulos ESF.

Materiais: Bancada Móvel ESF, alicate amperímetro AC/DC, multímetro TrueRMS, lona escura e papel manteiga.

Introdução teórica

Os Efeitos da irradiância, temperatura e sujidade

A célula fotovoltaica converte a energia que chega na forma de luz solar em energia elétrica. A taxa na qual essa energia na forma luminosa chega à célula por unidade de área (ou densidade superficial de potência) é chamada de “irradiância”, que é simbolizada pela letra G maiúscula e medida em Watt por metro quadrado.

$$\text{Irradiância} = G \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

A irradiância é influenciada pela hora do dia, disponibilidade de raios solares e massa atmosférica (AM). Nos ensaios padronizados, são adotadas as STC (standard test conditions) que estabelecem valores padrões para os parâmetros de entrada, incluindo a irradiância (PINHO, 2014).

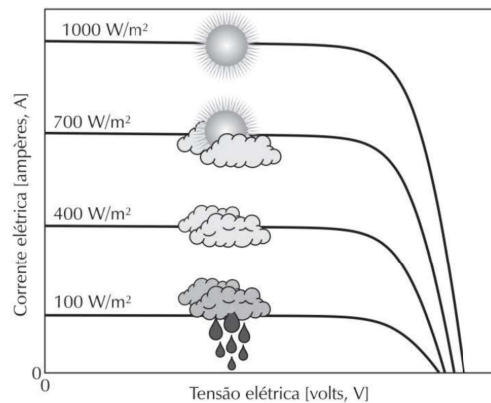
$$G_{STC} = 1000 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] = 1 \text{ sol pleno}$$

Estes valores padronizados servem para melhorar o comparativo entre os diferentes módulos. Os outros valores *standard test conditions* são: Incidência normal, Espectro solar AM 1.5 e temperatura da célula de 25 °C.

A limpeza da superfície do módulo fotovoltaico é uma condição importante nos ensaios, pois a sujeira na superfície afeta a incidência de raios luminosos nas células fotovoltaicas. A corrente elétrica que o módulo fotovoltaico pode fornecer está diretamente relacionada à intensidade da radiação solar que incide sobre as células. Com uma irradiância de 1 sol pleno, ou seja, 1000 W/m², o módulo é capaz de fornecer a corrente máxima especificada em sua ficha técnica, considerando uma temperatura de 25 °C. Essa corrente máxima fornecida pelo módulo varia de forma proporcional à irradiância (PINHO, 2014). Em situações de baixa incidência luminosa, a capacidade de geração de

energia do módulo é comprometida, como mostrado na Figura 16. Isso destaca a importância de manter a superfície dos módulos limpa, a fim de maximizar a incidência de luz solar e, conseqüentemente, a geração de energia.

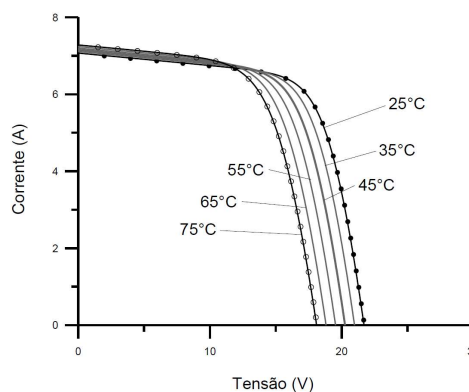
Figura 16 - Influência da radiação solar na operação do módulo ESF



Fonte: VILLALVA, 2012

Já a temperatura tem influência significativa na tensão e corrente dos módulos fotovoltaicos. A tensão do módulo diminui à medida que a temperatura aumenta, pois a taxa de recombinação de portadores de carga (elétrons e lacunas) dentro das células solares aumenta, o que leva a uma diminuição da tensão de saída. A corrente do módulo também é afetada pela temperatura, mas de forma diferente da tensão, a medida que a temperatura sobe, a corrente de saída tende a aumentar, porque o aumento da temperatura fornece mais energia térmica aos portadores de carga, aumentando sua mobilidade e, conseqüentemente, a corrente elétrica. A potência de saída do módulo, geralmente diminui à medida que a temperatura aumenta, devido à queda na tensão. O aumento da temperatura pode levar a perdas adicionais de eficiência nos módulos, devido à resistência interna mais alta, maior degradação das células solares e degradação de materiais em condições ambientais adversas. As curvas I-V em função da temperatura são ilustradas na Figura 17.

Figura 17 - Curvas I-V módulo de ESF em função da temperatura



Fonte: PINHO, 2014

A sujeidade na superfície do módulo fotovoltaico é um fator importante a ser considerado. Partículas de sujeira podem bloquear a luz que deve alcançar as células, reduzindo a energia disponível para gerar corrente elétrica. Isso resulta em uma diminuição da eficiência do módulo, pois a potência fornecida é reduzida para uma mesma quantidade de energia irradiante, estudos demonstraram que a sujeidade pode diminuir a eficiência dos módulos consideravelmente. Na Figura 18, é possível observar a aparência opaca da superfície de um módulo exposto à poeira. Portanto, é essencial realizar a limpeza regular dos módulos fotovoltaicos para manter sua eficiência e garantir a máxima geração de energia.

Figura 18 - Módulo fotovoltaico sujo



Fonte: <https://mecatronsolar.com.br>

Procedimento Prático

1. Monte a bancada móvel ESF, conforme Figura 19, confira todas as conexões e ligue. Preencha a tabela com os valores nominais STC e NOCT disponíveis no *datasheet* dos módulos, a seguir anote os valores sem obstrução e com obstrução parcial.

Figura 19 - Bancada móvel etapas experimeto-4



Fonte: Autor

Tabela 8 - Etapa 1 experimento 4

Fabricante/modelo		
INFO	Módulo 1	Módulo 2
Valores nominais do sistema (STC)¹		
Tensão de circuito aberto (Voc)		
Corrente de curto-circuito (Isc)		
Valores nominais do sistema (NOCT)¹		
Tensão de circuito aberto (Voc)		
Corrente de curto-circuito (Isc)		
Valores sem obstrução		
Tensão de circuito aberto (Voc)		
Corrente de curto-circuito (Isc)		
Valores obstrução parcial		
Tensão de circuito aberto (Voc)		
Corrente de curto-circuito (Isc)		
Observações:		
(1) – Valores fornecidos no <i>datasheet</i> dos módulos ESF		

2. Compare os valores nominais do sistema STC (*standard test conditions*) e NOCT (*Normal Operation Cell Temperature*) com os obtidos na prática. Avalie os resultados.

Os valores obtidos na prática diferem dos valores nominais do sistema devido à diferença da irradiação e temperatura sobre o módulo obtido no ensaio STC/NOCT e os valores obtidos na prática, conforme as condições climáticas do momento.

3. Estime a irradiação com e sem obstrução dos módulos usando a fórmula:

$$Gi = \frac{1000 * Isc}{Isc(STC)}$$

Tabela 9 - Irradiância estimada sem e com obstrução

Info	Valor	Unidade
G ₁		
G ₂		
Observações:		

4. Retire a obstrução, meça a temperatura sobre a superfície do módulo e anote os valores na Tabela 10. Após um minuto, obstrua toda superfície dos módulos, anote os valores na tabela.

5. Aguarde 5 minutos e retire a obstrução dos módulos, anote os valores na Tabela 10. Após um minuto, obstrua-os novamente e anote os novos valores na tabela.

6. Deixe a bancada móvel ESF sob sombra durante 10 minutos, decorrido o tempo exponha-a novamente de forma que os módulos recebam irradiação sem obstrução, realize as medidas e anote na tabela. Meça a temperatura sobre os módulos, caso esteja inferior às etapas anteriores aguarde até que a superfície esteja num valor mais elevado e anote os valores na tabela.

7. Mantenha a bancada móvel exposta sem obstruções até que a temperatura fique maior que na etapa anterior ($TA_7 > TA_6$) e anote os valores na Tabela 10.

Tabela 10 - Efeitos da temperatura/sujidade na geração

Fabricante/modelo		
ETAPAS	Valor	
Em temperatura ambiente		
Etapa-4	Sem obstrução	Com obstrução
	V _{OC}	V _{OC}
	I _{SC}	I _{SC}
	T _{MÓD}	T _{MÓD}
Temperatura ambiente (após 5 min)		
Etapa-5	Sem obstrução	Com obstrução
	V _{OC}	V _{OC}
	I _{SC}	I _{SC}
	T _{MÓD}	T _{MÓD}
Temperatura ambiente (após 10 min)		
Etapa-6	Sem obstrução	Com obstrução
	V _{OC}	V _{OC}
	I _{SC}	I _{SC}
	T _{MÓD}	T _{MÓD}
Temperatura ambiente longa exposição (TA ₇ >TA ₆)		
Sem obstrução		
Etapa-7	V _{OC}	
	I _{SC}	
	T _{MÓD}	
Observações:		

8. Avalie a variação dos parâmetros de saída com os módulos obstruídos e quando estão aquecidos (temperatura ambiente, exposição curta e exposição longa). O que ocorre nos módulos para que haja tais variações?

Nas simulações de sujidade e temperatura em módulos fotovoltaicos, menos fótons atingem a célula, resultando em menos elétrons excitados e menor corrente elétrica gerada. O aumento da temperatura aumenta a condutividade do material, permitindo que mais elétrons saltem entre as camadas e gerem maior corrente. No entanto, o aumento da temperatura também causa uma queda na tensão de saída devido ao aumento da resistência interna do material. Portanto, a sujidade/obstrução reduz a corrente e a temperatura aumenta a corrente, mas diminui a tensão.

Bibliografia

CADERNO DIDÁTICO ENERGIA SOLAR. Experimentação remota móvel para educação básica: Conversão de Energia Solar em Energia. RexLab/UFSC. Disponível em: <http://relle.ufsc.br/moodle/pluginfile.php/3152/mod_resource/content/2/caderno%20didatico.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2023.

CUNHA, A.F.V., SILVA, M.J.F.M.S., SILVA, M.K.A., SILVA, T.S. Projeto e aplicação de um conjunto didático sobre energia solar fotovoltaica. V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife, PE. p. 2129, 2015.

FILHO, J. P. A. Atividades Experimentais: Do Método À Prática Construtivista. 2000. 302 f. Tese (Doutorado em Educação) – Departamento de Centro de Ciências da Educação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

JINKO SOLAR. *Datasheet PV module Eagle 72P 320-340 Watt*. Disponível em: <<https://www.jinkosolar.com/en/site/dwparametern/>>. Acesso em: 01 abr. 2023.

JINKO SOLAR. *Datasheet PV module Cheetah HC 72M 390-410 Watt*. Disponível em: <<https://www.jinkosolar.com/en/site/dwparametern/>>. Acesso em: 01 abr. 2023.

JUNIOR, L.A.P., KREZINGUER, A. Desenvolvimento de bancada para monitoramento de módulos fotovoltaicos em ensaio de light-soaking. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado, RS. p. 349, 2018.

TEIXEIRA, J. G. M., SOUSA, P. C. Roteiros de experimento para prática laboratorial no Fóton Lab. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica). UFG. Goiânia. GO, 2021.

PINHO, J.T., GALDINO, M.A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESEB. 2014.

PHB SOLAR. *Datasheet inversor PHB780-XS*. Disponível em: <<https://www.energiasolarphb.com.br/produto/inversor-phb780-xs-2/>>. Acesso em: 01 abr. 2023.

VILLALVA, M. G., GAZOLI, J.R. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. 1 ed. São Paulo: Érica. 2012.

Experimento 5 – Inclinação e direção dos módulos ESF

Objetivos

Ao concluir às atividades propostas, o aluno deverá ser capaz:

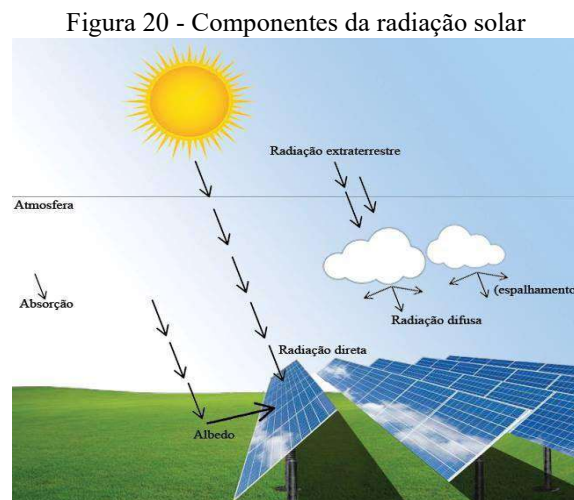
- Compreender a importância do ângulo de incidência e a direção do módulo ESF;
- Correlacionar as variações do ângulo com a potência de saída;
- Entender que o sombreamento dos módulos ESF também está relacionada com a geometria Sol/Terra.

Materiais: Bancada Móvel ESF, alicate amperímetro AC/DC, multímetro TrueRMS.

Introdução teórica

Os Efeitos da inclinação e direção dos módulos ESF na irradiância absorvida

O ângulo de incidência e a direção do módulo fotovoltaico são fatores importantes a serem considerados na instalação e no desempenho da geração de energia solar fotovoltaica. O ângulo de incidência é o ângulo formado entre a direção dos raios solares incidentes e a superfície do módulo fotovoltaico. Quando os raios solares incidem perpendicularmente à superfície do painel (ângulo de incidência de 0 grau), a eficiência de conversão é maximizada. Na Figura 20 têm-se os componentes da radiação solar.

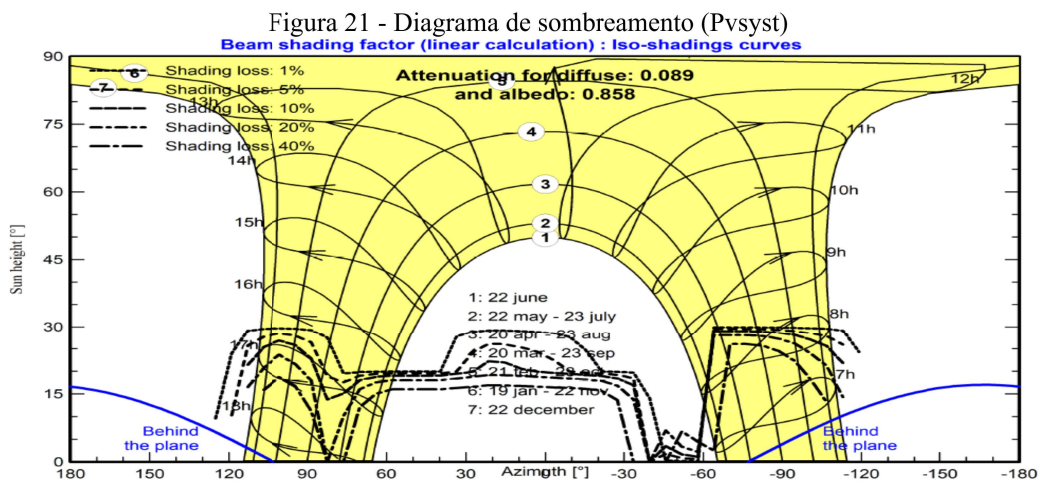


Fonte: PINHO, 2014.

À medida que o ângulo de incidência aumenta, a eficiência de conversão diminui, resultando em uma menor produção de energia elétrica. Ao ajustar o ângulo de inclinação do módulo fotovoltaico, é possível absorver a maior quantidade possível de luz solar. Isso significa que o módulo estará mais alinhado com a direção dos raios solares

durante diferentes períodos do dia e ao longo do ano. O ajuste adequado do ângulo de inclinação pode maximizar a exposição ao sol e, consequentemente, a produção de energia. (MARIANO, 2022).

Já a direção do módulo fotovoltaico refere-se à orientação em relação aos pontos cardeais, como norte, sul, leste ou oeste. Dependendo da localização geográfica, a direção solar ideal pode variar. Em geral, para o hemisfério sul, orientar os painéis solares para o norte pode proporcionar uma melhor exposição solar ao longo do dia. A direção correta pode garantir uma captura máxima de energia solar ao longo do ano. Na Figura 21 tem-se um diagrama de sombreamento no qual podemos ver a importância do ângulo de incidência numa instalação.



Fonte: Autor

Assim considerar o ângulo de incidência e a direção do módulo fotovoltaico é essencial para dimensionar adequadamente o sistema. Também podemos deduzir que a incidência da radiação solar é intermitente, não estando disponível a qualquer tempo, pois depende do posicionamento do sistema de captação e de variações meteorológicas, período do dia e estação do ano. Na maior parte do Brasil, assim como em todo hemisfério sul, os raios solares têm direção norte/sul quase o ano todo, sendo aconselhável nas instalações fotovoltaicas o direcionamento dos painéis solares para o norte para melhor incidência da radiação solar. (LABREN, 2017)

Procedimento Prático

1. Monte a bancada móvel ESF, para que fique conforme Figura 22. Após a montagem posicione a bancada para posição de ângulo 0° . Anote os valores obtidos na Tabela 11.

Figura 22 - Bancada móvel com tilt 0°



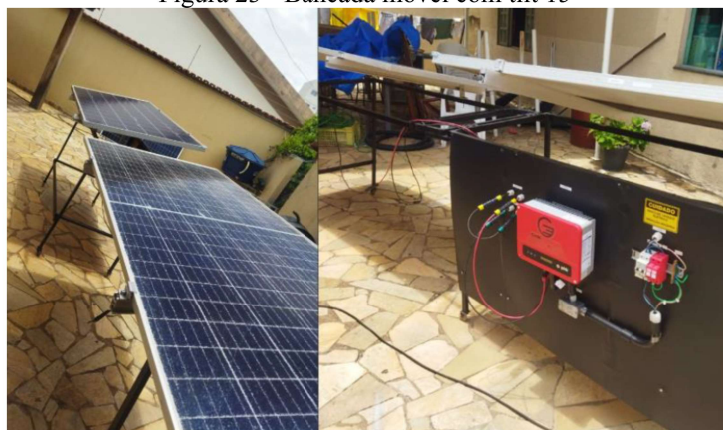
Fonte: SANTAREM/QUIXABEIRA, 2022

Tabela 11 - Experimento ângulo de incidência tilt 0°

Experimento 0°		
Info	Valor	Unidade
Tensão dos módulos em série		
Corrente dos módulos em série		
Potência injetada na rede		
Observações:		

2. Agora posicione a bancada para posição de ângulo 15°, conforme Figura 23. Anote os valores obtidos na Tabela 12.

Figura 23 - Bancada móvel com tilt 15°



Fonte: SANTAREM/QUIXABEIRA, 2022

Tabela 12 - Experimento ângulo de incidência tilt 15°

Experimento 15°		
Info	Valor	Unidade
Tensão dos módulos em série		
Corrente dos módulos em série		
Potência injetada na rede		
Observações:		

3. Agora posicione a bancada para posição de ângulo 30°, conforme Figura 24. Anote os valores obtidos na Tabela 13.

Figura 24 - Bancada móvel com tilt 30°



Fonte: SANTAREM/QUIXABEIRA, 2022

Tabela 13 - Experimento ângulo de incidência tilt 30°

Experimento 30°		
INFO	Valor	Unidade
Tensão dos módulos em série		
Corrente dos módulos em série		
Potência injetada na rede		
Observações:		

4. Agora posicione a bancada para posição de ângulo 45°, conforme Figura 25. Anote os valores obtidos na Tabela 14.

Figura 25 - Bancada móvel com tilt 45°



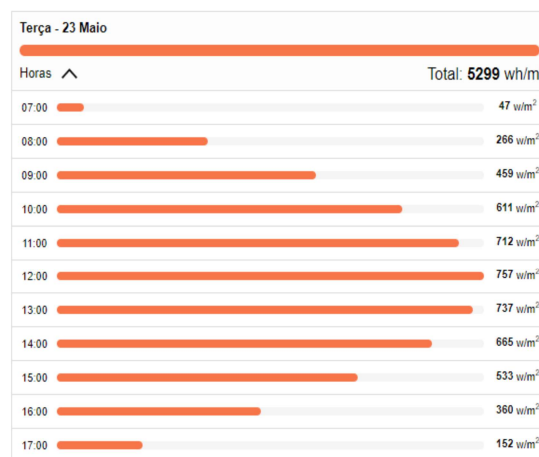
Fonte: SANTAREM/QUIXABEIRA, 2022

Tabela 14 - Experimento ângulo de incidência tilt 45°

Experimento 45°		
Info	Valor	Unidade
Tensão dos módulos em série		
Corrente dos módulos em série		
Potência injetada na rede		
Observações:		

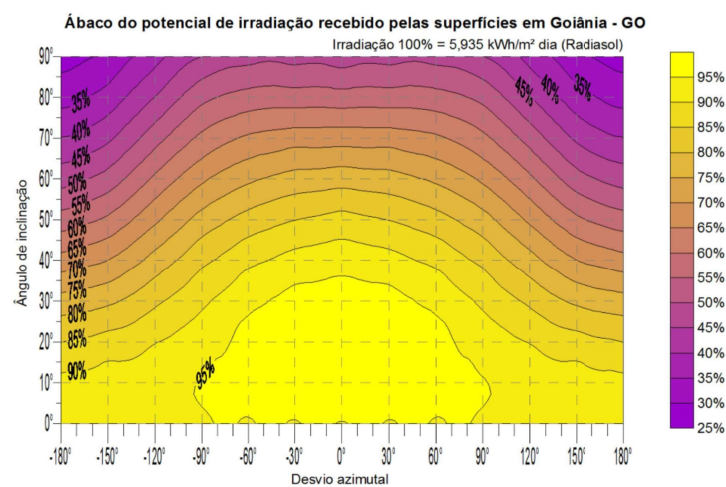
5. Avalie os dados obtidos no experimento e os compare a irradiação solar, conforme Figura 26, prevista para Goiânia em 22/05/2023 e com o Ábaco do potencial de irradiação de Goiânia, conforme Figura 27.

Figura 26 - Irradiação prevista para Goiânia (23/05/2023)



Fonte: <https://pt.tutiempo.net/radiacao-solar/goiania.html>

Figura 27 - Ábaco potencial de irradiação solar em Goiânia



Fonte: SANTOS/UFSC, 2013.

Espera-se que os resultados obtidos sejam bem próximos aos previstos, sendo as condições meteorológicas no momento do teste fator preponderante na avaliação dos resultados, bem como o sombreamento, sujidade e temperatura dos módulos.

Bibliografia

CADERNO DIDÁTICO ENERGIA SOLAR. Experimentação remota móvel para educação básica: Conversão de Energia Solar em Energia. RexLab/UFSC. Disponível em: <http://rele.ufsc.br/moodle/pluginfile.php/3152/mod_resource/content/2/caderno%20didatico.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2023.

JINKO SOLAR. *Datasheet PV module Eagle 72P 320-340 Watt*. Disponível em: <<https://www.jinkosolar.com/en/site/dwparametern/>>. Acesso em: 01 abr. 2023.

PINHO, J.T., GALDINO, M.A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESEB. 2014.

PHB SOLAR. *Datasheet inversor PHB780-XS*. Disponível em: <<https://www.energiasolarphb.com.br/produto/inversor-phb780-xs-2/>>. Acesso em: 01 abr. 2023.

SANTAREM, H.M.M., QUIXABEIRA, P.L.C. Desenvolvimento de bancada didática para sistema de energia solar fotovoltaica. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica). IFG *Câmpus* Goiânia. Goiânia. GO, 2022.

VILLALVA, M. G., GAZOLI, J.R. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. 1 ed. São Paulo: Érica. 2012.

Experimento 6 – Alimentando cargas CA

Objetivos de aprendizado

Ao final dessa aula, os alunos devem ser capazes de:

- Entender a função do inversor no sistema fotovoltaico;
- Identificar os pontos de ligação de entrada e saída;
- Mensurar as grandezas elétricas de entrada e saída de um inversor;
- Compreender o processo de conversão CC/CA;
- Estimar a eficiência de um inversor a partir das potências de entrada e saída.

Materiais: Bancada Móvel ESF, alicate amperímetro AC/DC, multímetro TrueRMS, 2 lâmpadas LED.

Introdução teórica

O inversor é responsável por converter a corrente CC dos módulos fotovoltaicos em corrente CA para as cargas, otimizar o desempenho do sistema, sincronizar com a rede elétrica, proteger o sistema e permitir a integração com sistemas de armazenamento de energia. Ele desempenha um papel crucial na viabilização do uso da energia solar em aplicações práticas. O inversor possui recursos avançados, como o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), ele monitora a tensão e a corrente de entrada dos módulos e ajusta a operação para maximizar a eficiência do sistema, garantindo que o máximo de energia possível seja extraído dos módulos, na Figura 28 tem-se as conexões da bancada móvel do IFG, onde vemos os cabos que vem dos módulos e entram no inversor e as conexões AC que vão passar pelas proteções e vão para o medidor bidirecional ou *smart meter*.

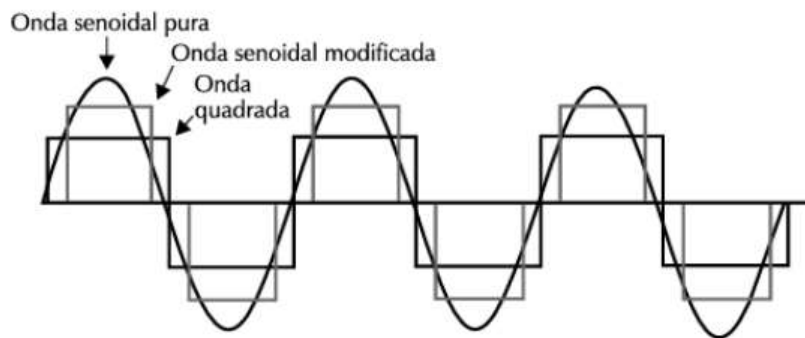
Figura 28 - Conexões inversor bancada móvel



Fonte: Autor

Um inversor típico emprega a modulação por largura de pulsos (PWM, *Pulse Width Modulation*) para converter o sinal de corrente contínua em um sinal de corrente alternada. O PWM alterna rapidamente o estado dos dispositivos semicondutores, geralmente transistores MOSFETs ou IGBTs, para criar um sinal de tensão alternada aproximado, na Figura 29 tem-se uma ilustração da forma de onda na saída do inversor. Esse sinal é inicialmente quadrado, mas pode ser filtrado para se obter uma forma de onda senoidal pura.

Figura 29 - Forma de onda senoidal pura, modificada e quadrada



Fonte: VILLAVA, 2012

A modulação PWM consiste em variar a largura dos pulsos de corrente contínua aplicada aos dispositivos semicondutores em alta frequência. A largura dos pulsos é controlada para reproduzir uma forma de onda senoidal no lado de saída do inversor. O controle da largura dos pulsos é realizado por meio de algoritmos de controle que ajustam continuamente a largura dos pulsos com base nas condições de operação, como a demanda de carga e as características dos módulos fotovoltaicos.

Na bancada móvel ESF do IFG é usado um inversor *string* PHB780XS de 780W. No Anexo – A, tem-se o *datasheet* onde encontramos os dados técnicos necessários para realização do experimento.

Procedimento Prático

1. Com auxílio do professor e a bancada desligada monte o conjunto de lâmpadas de led conectando na saída CA para a carga, conforme Figura 28 da introdução teórica, por meio de um disjuntor. Ligue a bancada com as lâmpadas desligadas em seguida ligue as lâmpadas e anote os valores.

Tabela 15 - Valores entrada CC e saída CA

Info	Valor	Unidade
Valores de entrada CC		
V _{in}		
I _{in}		
Valores de saída CA		
Tensão de pico V _{p rms}		
Corrente de pico I _{p rms}		
Observações:		

2. Calcule P_{in} e P_{out} usando os valores obtidos na Etapa-1 por meio das equações a seguir e anote na tabela.

$$P_{in} = (V_{in} * I_{in})$$

$$P_{out} = (V_p * I_{out}) * (f.p)$$

Tabela 16 - Valores potência de entrada e saída

Info	Valor	Unidade
Entrada CC		
P _{in}		
Saída CA		
P _{out}		
Observações:		

3. Compare os valores calculados na Etapa 2 com os dados disponíveis no *datasheet* e verifique se são compatíveis. Agora calcule a eficiência do inversor a partir da equação a seguir e anote os dados na tabela.

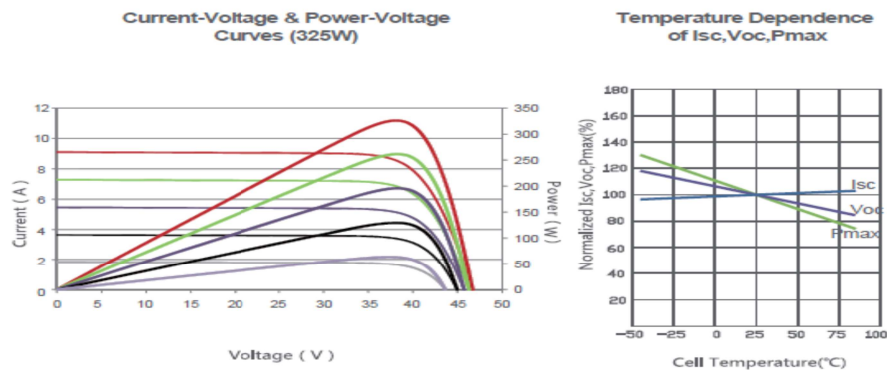
$$\eta \% = \frac{P_{out}}{P_{\square}} \times 100 \%$$

Tabela 17 - Eficiência do inversor

Info	Valor	Unidade
η%		
Observações:		

4. O inversor da bancada móvel tem uma eficiência de 97,4%, segundo *datasheet*, compare o valor calculado na Etapa 3 com o valor nominal. Observe a curva I-V na Figura 30 para relembrar conceitos e pontos de destaque.

Figura 30 - Curva I-V pontos notáveis



Fonte: JINKO, 2022

É esperado que os alunos façam uma revisão dos conceitos previamente estudados e tenham em mente que os valores nominais são estimados nas Condições de Teste Padrão (STC - *Standard Test Conditions*), as quais não são encontradas durante um experimento realizado em ambiente de campo.

5. Sabendo que a bancada móvel do IFG é um sistema *on-grid* é possível deduzir que a energia produzida é injetada na rede e também alimenta nosso consumidor local, no caso, as lâmpadas de LED. Seria possível conectar uma carga CC no inversor? Explique!

Sim, em um sistema *on-grid*, a energia solar produzida é injetada na rede elétrica e alimenta os consumidores locais. No entanto, a conexão de uma carga CC diretamente ao inversor dependerá das especificações do inversor em questão. Alguns inversores *on-grid* possuem uma saída CC auxiliar que permite a conexão de cargas CC adicionais, enquanto outros não possuem essa funcionalidade, o PHB 780XS usado na bancada não permite. Sempre consulte os dados técnicos do equipamento antes de realizar as conexões.

Bibliografia

CADERNO DIDÁTICO ENERGIA SOLAR. Experimentação remota móvel para educação básica: Conversão de Energia Solar em Energia. RexLab/UFSC. Disponível em: <http://relle.ufsc.br/moodle/pluginfile.php/3152/mod_resource/content/2/caderno%20didatico.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2023.

CUNHA, A.F.V., SILVA, M.J.F.M.S., SILVA, M.K.A., SILVA, T.S. Projeto e aplicação de um conjunto didático sobre energia solar fotovoltaica. V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife, PE. p. 2129, 2015.

FILHO, J. P. A. Atividades Experimentais: Do Método À Prática Construtivista. 2000. 302 f. Tese (Doutorado em Educação) – Departamento de Centro de Ciências da Educação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

JINKO SOLAR. *Datasheet PV module Eagle 72P 320-340 Watt*. Disponível em: <<https://www.jinkosolar.com/en/site/dwparametern/>>. Acesso em: 01 abr. 2023.

JINKO SOLAR. *Datasheet PV module Cheetah HC 72M 390-410 Watt*. Disponível em: <<https://www.jinkosolar.com/en/site/dwparametern/>>. Acesso em: 01 abr. 2023.

JUNIOR, L.A.P., KRENZINGUER, A. Desenvolvimento de bancada para monitoramento de módulos fotovoltaicos em ensaio de light-soaking. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado, RS. p. 349, 2018.

TEIXEIRA, J. G. M., SOUSA, P. C. Roteiros de experimento para prática laboratorial no Fóton Lab. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica). UFG. Goiânia. GO, 2021.

PINHO, J.T., GALDINO, M.A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB. 2014.

PHB SOLAR. *Datasheet inversor PHB780-XS*. Disponível em: <<https://www.energiasolarphb.com.br/produto/inversor-phb780-xs-2/>>. Acesso em: 01 abr. 2023.

VILLALVA, M. G., GAZOLI, J.R. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. 1 ed. São Paulo: Érica. 2012.

Experimento 7 – Uso de imagens termográficas no diagnóstico de falhas

Objetivos de aprendizado

Ao final dessa aula, os alunos devem ser capazes de:

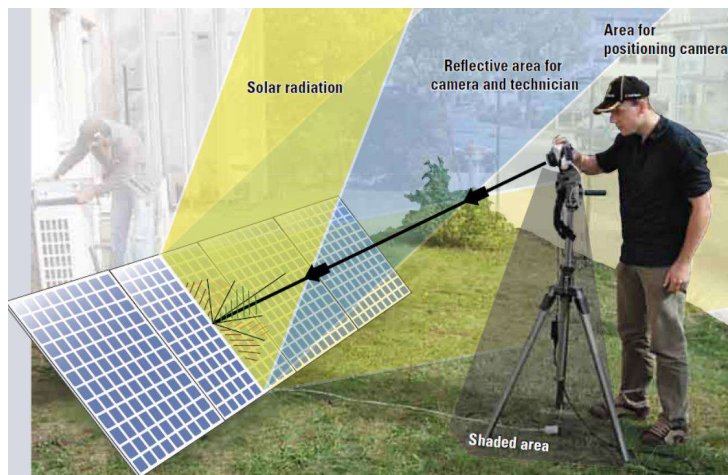
- Entender como funciona uma câmera termográfica;
- Identificar os pontos críticos do sistema fotovoltaico com uso da termografia;
- Ter noções básicas para manutenção por meio da termografia.

Materiais: Bancada Móvel ESF, câmera termográfica.

Introdução teórica

Os sistemas fotovoltaicos têm se tornado cada vez mais populares como fonte de energia renovável. Para garantir o desempenho ideal desses sistemas, é fundamental realizar testes e análises detalhadas. Nesse contexto, a utilização de câmeras termográficas tem se destacado como uma ferramenta valiosa. A câmera termográfica permite a captura de imagens térmicas dos painéis solares, fornecendo informações precisas sobre a distribuição de temperatura e auxiliando na identificação de possíveis falhas ou problemas que afetam a eficiência do sistema. Exemplo de posicionamento da câmera para análise termográfica de módulos fotovoltaicos conforme Figura 31.

Figura 31 - Posicionamento ideal para análise termográfica



Fonte: UFSC, 2022

As imagens termográficas obtidas pela câmera permitem uma análise detalhada do comportamento térmico dos painéis solares. Por meio dessas imagens, é possível identificar áreas com temperatura excessiva, como os *hotspots*, que podem indicar falhas nas células, problemas de conexão ou obstruções. Com base nessas informações, recomendações

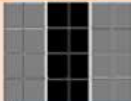
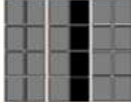
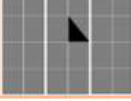
podem ser feitas para otimizar o sistema, como ajustar o posicionamento dos painéis para melhor aproveitamento da radiação solar e evitar o superaquecimento. Além disso, as informações termográficas são úteis na avaliação do impacto de fatores externos, como sombreamento, orientação solar e fluxo de ar, na temperatura dos módulos fotovoltaicos, consequentemente, na eficiência da geração de energia. Com base nessas análises, medidas de resfriamento adequadas podem ser implementadas para evitar o superaquecimento e melhorar o desempenho do sistema. A identificação de áreas que necessitam de manutenção também é facilitada pelas imagens termográficas, permitindo ações preventivas e corretivas para garantir a confiabilidade e a vida útil do sistema fotovoltaico.

Em resumo, o uso da câmera termográfica no teste de sistemas fotovoltaicos, como a bancada móvel do IFG, proporciona uma avaliação precisa do comportamento térmico dos painéis solares. Essas informações detalhadas permitem que técnicos e engenheiros tenham embasamento para otimizar o desempenho, a eficiência e a vida útil do sistema. Além disso, a detecção precoce de possíveis problemas por meio das imagens termográficas permite a realização de manutenções adequadas, evitando falhas graves e garantindo um fornecimento de energia confiável e sustentável.

Procedimento Prático

1. Com auxílio do professor ligue a bancada móvel e aguarde a ela começar a gerar energia. A bancada móvel possui 2 módulos diferentes, sendo que um deles está com a superfície danificada. Identifique por meio da imagem termográfica uma possível causa, use a Figura 32 para auxiliar a identificar o problema.

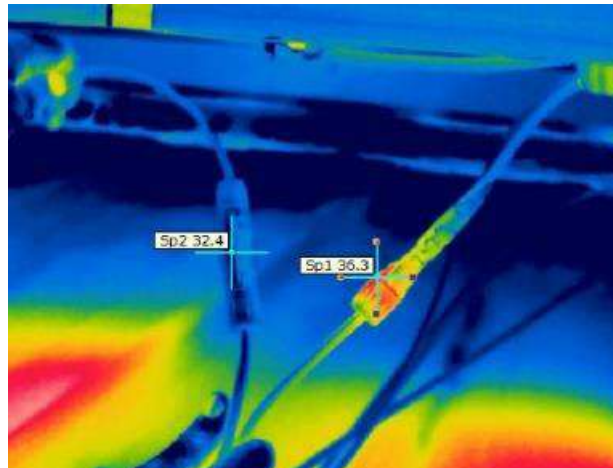
Figura 32 - Padrão de falhas identificadas em módulos fotovoltaicos

Padrão	Descrição	Erro	Causa	Medidas elétricas	Comentário
	Um módulo está mais quente		Módulo não está ligado	Módulo funciona normalmente	
	Uma fileira de células está mais quente	Curto circuito nas células	Diodo de bypass com defeito; Curto circuito interno	Perdas de potência na string, diminuição da tensão circuito aberto	Marcas de queimado na medição com termo câmera
	Várias células distribuídas aleatoriamente estão mais quentes	Curto circuito no módulo	Diodos com defeito, conexão incorreta	Potência do módulo quase nula, tensão de circuito aberto diminuiu consideravelmente	
	Uma célula está mais quente		Sombreamento, célula quebrada	Não necessariamente diminuição de potência	Inspeção visual
	Parte da célula está mais quente	Célula quebrada	Impacto mecânico externo	Diminuição da potência, diminuição de tensão e "fill factor"	

Fonte: UFSC, 2022

2. Com auxílio do professor simule um mal contato num dos conectores MC-04, de forma que se obtenha uma imagem parecida a da Figura 33.

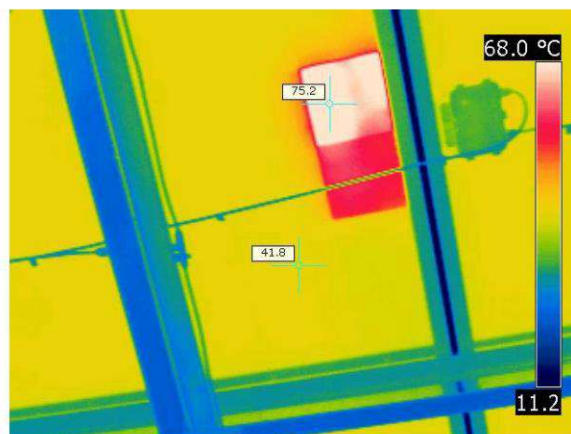
Figura 33 - Conector MC-04 com mal contato



Fonte: UFSC, 2022

3. Simule um sombreamento sobre o módulo fotovoltaico, e observe a imagem obtida, e veja se está parecida com a Figura 34 a seguir.

Figura 34 - Simulação de sombreamento sobre o módulo



Fonte: UFSC, 2022

4. Com base no referencial teórico e etapas anteriores como a câmera termográfica pode auxiliar na otimização do sistema fotovoltaico?

A câmera termográfica fornece dados térmicos detalhados que permitem identificar áreas problemáticas, como *hotspots*, e fazer recomendações para melhorar o desempenho e a vida útil do sistema. As recomendações podem incluir ajustes no posicionamento dos painéis, conexões, limpezas periódicas, implementação de medidas de resfriamento adequadas e identificação de áreas que necessitam de manutenção.

5. Qual é a importância das limpezas periódicas dos módulos solares com base nas informações termográficas? Como as informações termográficas auxiliam na identificação de áreas que necessitam de manutenção?

As informações termográficas ajudam a identificar acúmulos de sujeira nos módulos que afetam a eficiência de absorção de radiação. Limpezas periódicas são recomendadas para manter o desempenho ideal do sistema. Através das imagens termográficas, é possível identificar *hotspots* e áreas com temperaturas anormais nos painéis, indicando possíveis falhas ou problemas. Isso permite que a equipe de manutenção identifique e resolva problemas antes que causem danos significativos ao sistema.

Bibliografia

NASCIMENTO, L. IX CBENS: Apresentação Comissionamento de Sistemas Fotovoltaicos e Análise de Desempenho. RexLab/UFSC. UFSC 2022.