



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/05.14.11.09-TDI

## RESPOSTA ESPECTRAL E CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE CÉLULA SOLAR DE TRIPLA JUNÇÃO

Dalmo Geraldo Pasin

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, orientada pelos Drs. Waldeir Amaral Vilela, e Nelson Veissid, aprovada em 13 de maio de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3TAC9DL>>

INPE  
São José dos Campos  
2019

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

## **CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**

### **Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

### **Membros:**

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/05.14.11.09-TDI

## RESPOSTA ESPECTRAL E CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE CÉLULA SOLAR DE TRIPLA JUNÇÃO

Dalmo Geraldo Pasin

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, orientada pelos Drs. Waldeir Amaral Vilela, e Nelson Veissid, aprovada em 13 de maio de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3TAC9DL>>

INPE  
São José dos Campos  
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Pasin, Dalmo Geraldo.

P263r Resposta espectral e caracterização elétrica de célula solar de tripla junção / Dalmo Geraldo Pasin. – São José dos Campos : INPE, 2019.

xxiv + 84 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/05.14.11.09-TDI)

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.

Orientadores : Drs. Waldeir Amaral Vilela, e Nelson Veissid.

1. Célula solar. 2. Tripla junção. 3. Resposta espectral. 4. Curva IxV. I.Título.

CDU 621.383.51:629.78

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

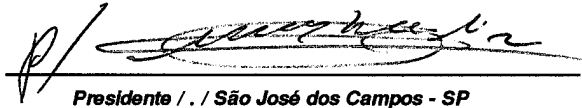
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Dalmo Geraldo Pasin**

Título: "RESPOSTA ESPECTRAL E CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE CÉLULA SOLAR DE TRIPLA JUNÇÃO"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Mestre** em **ETE/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores**

Dr. Marcos Dias da Silva

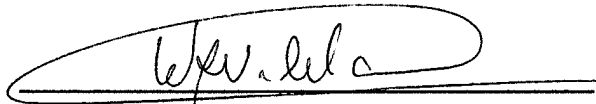


Presidente / . / São José dos Campos - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Dr. Waldeir Amaral Vilela



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Dr. Nelson Veissid




Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Dr. Luiz Angelo Berni



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

**Este trabalho foi aprovado por:**

( ) maioria simples

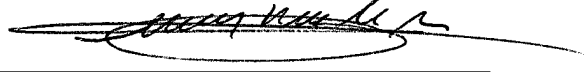
( ) unanimidade

São José dos Campos, 13 de maio de 2019 .

Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de **Mestre** em  
**ETE/Ciência e Tecnologia de Materiais e  
Sensores**

Dr. Tiago Franca Paes

P/



Convidado(a) / UFBA / Salvador - BA

Participação por Video - Conferência

Aprovado      ( ) Reprovado

**Este trabalho foi aprovado por:**

( ) maioria simples

unanimidade

**São José dos Campos, 13 de maio de 2019**

“A ciência nunca resolve um problema sem criar pelo menos outros dez”.  
(George Bernard Shaw)





## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente a minha família que sempre esteve ao meu lado e me apoiou em todos os momentos.

Sou grato pela ajuda do Dr. Marcos Dias da Silva durante o processo de desenvolvimento desse projeto.

A Ariana, minha noiva, que me ajudou na correção e permaneceu ao meu lado mesmo nos momentos mais difíceis desta jornada.

Ao Dr. Waldeir, que me deu a oportunidade de realizar esse projeto e me orientou.

Ao Dr. Nelson Veissid que me ajudou nas questões sobre célula solares e na orientação do trabalho.

Ao Laboratório Associado de Sensores e Materiais – LABAS por ter disponibilizado a infraestrutura necessária para a execução deste trabalho.

Ao Laboratório de Integração e Teste - LIT por ter disponibilizado o simulador solar para realizar medidas.

Ao CNPq que deu apoio financeiro para a realização deste trabalho.



## RESUMO

Células solares de tripla junção são utilizadas em satélites modernos como, por exemplo, os satélites do projeto CBERS do INPE. Nestes satélites as células do tipo GaInP/GaInAs/Ge são importadas da China e caracterizadas pelo fabricante. Em função disto, o Grupo de Dispositivos Fotovoltaicos - GDF do INPE viu a necessidade de caracterizar e estudar estas células para compreender melhor esta tecnologia. Este trabalho teve como objetivo principal desenvolver técnicas para determinar a resposta espectral destas células solares e também realizar a caracterização elétrica das células solares de tripla junção. Para isto, foi necessário modernizar o sistema de medida das curvas de corrente por tensão do GDF para permitir a caracterização da célula solar de junção tripla.

Palavras-chave: Célula Solar; Tripla Junção; Resposta Espectral; Curva IxV.



# **SPECTRAL RESPONSE AND ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF TRIPLE JUNCTION SOLAR CELL**

## **ABSTRACT**

Triple junction solar cells are used in modern satellites, such as the satellites of INPE CBERS project. In these satellites GaInP/GaInAs/Ge type cells are imported from China and characterized by the manufacturer. But unfortunately such information is not available in details. Therefore, Photovoltaic Devices Group - GDF of INPE felt the need to characterize and study these cells to better understand this technology. The main objective of this work was to develop techniques to determine the spectral response of these solar cells and also to perform the electrical characterization of triple junction solar cells. Also, the current measurement system by voltage curves of the GDF was improved to permit the characterization of triple junction solar cell.

Keywords: Solar Cell; Triple Junction; Spectral Response; Electrical Characterization.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Evolução da eficiência das diferentes tecnologias de células solares.....	8
Figura 2.2 - Foto do SCD-1 no laboratório de Integração e teste LIT/INPE. ....	10
Figura 2.3 - Módulo do Experimento Célula Solar.....	11
Figura 2.4 - Desenho geral dos satélites CBERS.....	12
Figura 2.5 - Imagem do Satélite CBERS-3 durante integração no LIT no INPE em São José dos Campos. ....	13
Figura 2.6– Foto do SACI-1.....	14
Figura 2.7 - Desenho ilustrativo de uma onda eletromagnética se propagando na direção do vetor K. ....	16
Figura 2.8 - Curvas espectrais para a radiação de corpo negro em diferentes temperaturas. ....	18
Figura 2.9 - Relação geométrica entre o raio da órbita da Terra e o raio do Sol.....	20
Figura 2.10–Curva da variação da intensidade da irradiância que chega ao topo da atmosfera em função da variação da distância Terra- Sol ao longo do ano. ....	21
Figura 2.11 - Valor de TSI ao longo de anos obtidos por radiômetros absolutos.....	22
Figura 2.12 - Espectro solar. ....	23
Figura 2.13 - Variação do coeficiente de absorção de alguns semicondutores em função do comprimento de onda. ....	25
Figura 2.14 - Faixas de energia.....	28
Figura 2.15 - Semicondutor tipo P dopado com boro e tipo N dopado com fósforo. ....	29
Figura 2.16 - Barreira de potencial de uma junção PN.....	30
Figura 2.17 - Processo de conversão da radiação solar em corrente elétrica em Células fotovoltaicas.....	31
Figura 2.18 - Circuito eletrônico Equivalente sem (A) e com as resistências (B). ....	32
Figura 2.19 - Curva corrente x tensão.....	33

Figura 2.20 - Efeito da resistência em série na curva I x V em células de silício. ....	36
Figura 2.21–Efeito da resistência em paralelo na curva IxV em células de silício. ....	37
Figura 2.22 - Resposta espectral para diferentes tipos de células. ....	39
Figura 2.23– Resposta individual de cada junção para uma célula solar de três junções. ....	40
Figura 2.24 - Célula solares da primeira geração.....	41
Figura 2.25–Painel Solar formado por Células solares de silício amorfo. ....	41
Figura 2.26 - Célula solar de terceira geração. ....	42
Figura 2.27 - Esquema das junções da célula solar de tripla junção.....	43
Figura 2.28 - Esquema reduzido de uma célula solar como diodo.....	43
Figura 2.29 - Relação de Custo por eficiência de cada geração de célula solar. Os números I, II e III indicam as gerações das células solares. ....	44
Figura 3.1 - SCA (Solar Cell Assembly) utilizada no CBERS-3 e 4.....	45
Figura 3.2 - Típica Curva IxV de uma célula de tripla junção. ....	46
Figura 3.3 - Células Solares de Silício. ....	47
Figura 3.4 - Sistema de Caracterização Espectral. ....	49
Figura 3.5 - Espectro de uma lâmpada de Xe com 500 W medido a uma distância de 50 cm. ....	50
Figura 3.6 - Espectro de uma lâmpada QTH com 250 W medido a uma distância de 50 cm. ....	50
Figura 3.7 - Espectro de uma lâmpada QTH com 250 W medido a uma distância de 50 cm. ....	51
Figura 3.8 - Transmitância do filtro de interferência de 449nm. ....	52
Figura 3.9 - Filtros passa banda.....	52
Figura 3.10 - Transmitância do filtro passa alta de 700nm.....	53
Figura 3.11–Esquema ilustrativo para caracterização da junção de topo. ....	55
Figura 3.12 - Esquema ilustrativo para caracterização da junção do meio. ....	56
Figura 3.13 - Esquema ilustrativo para caracterização da junção da base. ....	57
Figura 3.14 - Simulador solar da Oriel modelo 81193.....	58
Figura 3.15 - Espectro AM0 da ASTM x Espectro AM0 do Simulador Solar. ....	59
Figura 3.16 - Simulador Solar.....	60
Figura 3.17 - Modernização do sistema IxV. ....	61



Figura 3.18 - Sistema de caracterização de células solares. ....	62
Figura 3.19 - Circuito para medição da Curva IxV.....	62
Figura 3.20 - Comparativo entre o programa antigo e o programa novo de aquisição de dados. ....	64
Figura 3.21 - Simulador LAPSSGen 2.....	65
Figura 4.1 - Irradiância para caracterizar a junção de topo. ....	66
Figura 4.2 - Resposta da junção de topo. ....	67
Figura 4.3 - Espectro para caracterização espectral da junção do meio.....	68
Figura 4.4 - Resposta da junção do meio.....	69
Figura 4.5 - Espectro para caracterização espectral da junção de base.....	70
Figura 4.6 - Resposta da junção de base.....	71
Figura 4.7 - Resposta da célula solar de tripla junção.....	71
Figura 4.8 - Caracterização Elétrica obtida com simulador solar ORIEL.....	72
Figura 4.9 - Caracterização Elétrica obtida com simulador solar LAPSS.....	73



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores de Gap para diferentes semicondutores .....	26
Tabela 3.1 - Tabela de especificações típicas das células solares de tripla junção.....	46
Tabela 3.2 - Característica Célula solares .....	47
Tabela 3.3 - Especificações do piranômetro CM11 .....	48
Tabela 4.1 - Características elétricas obtidas no simulador Solar Oriel e no LAPSSGen2.....	74



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu_0$	Permeabilidade magnética no vácuo
A	Área
B	Campo Magnético
c	Velocidade de propagação de uma onda no vácuo (299.792.458 m/s)
D	Distância Terra até a superfície do Sol
E	Campo Elétrico
$E_0$	Constante Solar
$E_f$	Eficiência
FF	Fator de Forma
G	Irradiância Espectral
h	Constante de Planck
$H_{sol}$	Densidade de potência na superfície do Sol
$I_{cc}$	Corrente de curto circuito
$I_{cn\lambda}$	Exitância espectral emitida pelo Corpo Negro
ID	Corrente de saturação reversa do diodo
IFG	Corrente Fotogerada
IMP	Corrente de máxima potência
$I_t$	Corrente total gerada pela célula fotovoltaica
k	Constante de Boltzmann
$M_b$	Exitância
n	Fator de qualidade do diodo
P	Vetor de Poynting
$P_{mp}$	Potência máxima fornecida pela célula
q	Carga do elétron
Q	Eficiência Quântica
R	Raio
$R_p$	Resistência em Paralelo
$R_s$	Resistência em Série
$R_{sol}$	Raio do Sol em metros
T	Temperatura do Corpo Negro
$V_{ca}$	Tensão de circuito aberto

VMP	Tensão de máxima potência
$\epsilon_0$	Permissividade Elétrica no vácuo
$\eta$	Eficiência
$\lambda$	Comprimento de onda da radiação eletromagnética (nm)
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AM	Massa Ar
ASTM	American Society for Testing and Materials
BSF	Back Surface Field
CAR	Camada Antirefletora
CAST	Academia Chinesa de Tecnologia Espacial
CBERS	Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres
CELSOL	Grupo de Células Solares
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
COCTE	Coordenação de Laboratórios Associados
ComSat	Laboratório Communications Satélite Corporation
CSMJ	Células Solares de Múltiplas Junções
ECS	Experimento Célula Solar
ETE	Engenharia e Tecnologia Espacial
GaAs	Arseneto de Gálio
GaInAs	Arseneto de Gálio Índio
GaInP	Fosfeto de Gálio Índio
GDF	Grupo de Dispositivos Fotovoltaicos
Ge	Germânio
GPIB	General Purpose Interface Bus
GPS	Sistema de Posicionamento Global
IBM	International Business Machines
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IV	Infravermelho
LABAS	Laboratório Associado de Sensores e Materiais
LAPSS	Large Area Pulsed Solar Simulator
LIM	Laboratório de Instrumentação Meteorológica
LIT	Laboratório de Integração e Teste
LME	Laboratório de Microeletrônica
MECB	Missão Espacial Completa Brasileira
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NI	National Instruments

NREL	National Renewable Energy Laboratory
QTH	Lâmpada halógena
RE	Resposta Espectral
SACI	Satélite Avançado de Comunicações Interdisciplinares
SCA	Solar Cell Assembly
SCD	Satélite de Coleta de Dados
Si	Silício
TJ	Tripla Junção
TSI	Irradiância Solar Total
TV	Televisão
USP	Universidade de São Paulo
UV	Ultravioleta
UVA	Região do espectro que, de acordo com a norma ISO, situa-se entre 315 a 400 nm
UVB	Região do espectro que, de acordo com as normas ISO e CIE, situa-se entre 280 e 315 nm
UVC	Região do espectro que, de acordo com as normas ISO e CIE, situa-se entre 100 e 280 nm
VIS	Visível
Xe	Xenon



## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
2.1 Histórico .....	5
2.1.1 Evolução dos Geradores Solares nos Satélites Brasileiros .....	9
2.2 Radiação eletromagnética .....	14
2.3 Espectro e Irradiância Solar .....	19
2.4 Absorção de radiação solar nos dispositivos fotovoltaicos.....	24
2.5 Efeito fotovoltaico .....	27
2.5.1 Semicondutor tipo P e tipo N.....	28
2.5.2 Junção PN e a Célula Solar Fotovoltaica .....	29
2.6 Célula solar fotovoltaica .....	30
2.6.1 Circuito equivalente de uma célula solar.....	31
2.7 Curva Corrente x Tensão (I x V).....	33
2.7.1 Efeito da resistência em série na curva Ix V.....	36
2.7.2 Efeito da resistência em paralelo na curva Ix V.....	36
2.8 Resposta espectral e Eficiência Quântica de uma célula solar .....	37
2.9 Gerações de célula solar.....	40
3 METODOLOGIA.....	45
3.1 Células usadas na caracterização.....	45
3.1.1 Célula solar de tripla junção .....	45
3.1.2 Ajuste do Simulador Solar .....	47
3.2 Sistema de Caracterização Espectral .....	48
3.2.1 Equipamentos eletrônicos utilizados no sistema de resposta espectral. .	53
3.2.2 Configuração para caracterização da junção de topo .....	54
3.2.3 Configuração para caracterização da junção do meio.....	55
3.2.4 Configuração para caracterização da junção de base .....	56
3.3 Sistema de caracterização elétrica.....	57
3.3.1 Simulador Solar .....	58
3.3.2 Sistema de aquisição de dados.....	60
3.3.3 Programa para caracterização elétrica de células solares .....	63
3.3.4 Simulador Solar LAPSSGen 2.....	65
4 RESULTADOS .....	66

4.1 Resposta espectral (RE) .....	66
4.1.1 RE da junção do topo .....	66
4.1.2 RE da junção do meio .....	68
4.1.3 RE da junção da base .....	69
4.1.4 RE global da célula solar de tripla junção.....	71
4.2 Caracterização elétrica utilizando simulador ORIEL modelo 81193.....	72
4.3 Caracterização elétrica de uma célula de tripla junção utilizando o simulador LAPSSGen 2 .....	73
4.4 Características elétricas obtidas no simulador Solar Oriel e no LAPSSGen2 das demais células solares utilizadas no trabalho. ....	73
5 CONCLUSÃO.....	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	78

## 1 INTRODUÇÃO

Satélites artificiais são artefatos de alta tecnologia construídos pelo homem e colocados em órbitas ao redor da Terra para melhor monitorar o meio ambiente e desenvolver as atividades antrópicas. Existem diversos tipos de satélites, bem como diversas são as funções que um satélite artificial pode exercer. Eles podem ser científicos, de coleta de dados, meteorológicos, sensoriamento remoto, militares, de serviços de telecomunicações e etc., sendo que a maior parte dos satélites em operação ao redor do nosso planeta são destinados à telecomunicações, por meio da transmissão de sinais de TV, rádio, sistema de posicionamento global (GPS), telefonia e outros serviços. Apesar dos satélites serem dos mais diversos tipos, todos precisam de energia para o seu funcionamento, por isso eles contam com painéis solares e baterias. Apesar de mais de quarenta países possuírem satélites em órbita, poucos países possuem a tecnologia para a sua fabricação e o Brasil faz parte deste seleto grupo. O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE é o responsável pelo desenvolvimento, controle e utilização dos satélites brasileiros.

O Sistema de Suprimento de Energia é uma das principais partes de um satélite e o sucesso de uma missão espacial depende do seu correto funcionamento. Os níveis de consumo de energia elétrica nos primeiros satélites eram insignificantes comparados ao consumo dos atuais satélites. A demanda de energia dos satélites aumentou devido ao aumento da complexidade e da quantidade de subsistemas e instrumentos que um satélite passou a ter. A tendência é que esta demanda continue aumentando. A energia elétrica utilizada nos satélites é gerada através de painéis solares.

Nos primeiros satélites desenvolvidos pelo INPE os geradores solares eram de células solares de silício monocristalino para aplicação espacial. Este tipo de célula é de alta confiabilidade e fisicamente resistente, porém apresenta uma eficiência média de conversão de energia de 18%. Este tipo de célula, embora vantajosa em termos de custo, está se tornando obsoleta para aplicação espacial em satélites de grande porte que tem uma alta demanda de energia.

O desenvolvimento tecnológico das células de silício encontra-se próximo ao limite teórico e quase não há mais pesquisas a serem feitas. A tendência para uso espacial é a utilização de células solares de multijunção, pois este tipo de célula é capaz de aproveitar melhor o espectro da radiação solar e por isso tem uma eficiência muito maior. Este tipo de célula ainda se encontra em franco desenvolvimento e vem sendo cada vez mais utilizada em programas espaciais, apesar de seu custo elevado.

Nos atuais satélites do INPE, como por exemplo, os CBERS 3 e 4 e Amazônia 1 foram utilizados painéis solares constituídos de células solares de tripla junção (TJ). O Brasil não possui tecnologia para fabricar este tipo de célula, por isso, elas são importadas, tem alto custo e sua especificação e utilização exige especial cuidado. Poucos países são capazes de produzir este tipo de célula e os fabricantes normalmente omitem informações, pois o domínio tecnológico são segredos industriais. O conhecimento dos parâmetros internos e de funcionamento destas células solares é fundamental para o correto dimensionamento de um painel solar em um projeto de satélite.

O Grupo de Dispositivos Fotovoltaicos - GDF realiza pesquisa em células solares e materiais para fabricação de dispositivos. Este grupo teve como precursor o Grupo de Células Solares - CELSOL, cujas atividades foram iniciadas em 1980, com a finalidade de desenvolver tecnologia para fabricação de células solares espaciais no Brasil.

Neste período o CELSOL participou de vários projetos no INPE, dos quais ressaltamos: o desenvolvimento de células solares de silício com qualificação espacial em colaboração com o LME/USP; Experimento Célula Solar do satélite SCD1; Experimento Célula Solar do satélite SCD2; desenvolvimento de radiômetros solares em colaboração com o LME/USP e a Orbital Engenharia Ltda; desenvolvimento de simuladores solares de baixo custo em colaboração com a Orbital Engenharia Ltda e diversos outros trabalhos de pesquisas em materiais e métodos de caracterização de células solares e sensores fotovoltaicos.

O GDF, ao longo dos anos, vem desenvolvendo também pesquisas na área de energia solar de aplicação terrestre e técnicas de desenvolvimento e caracterização de dispositivos fotovoltaicos para atender as necessidades do INPE e da sociedade brasileira.

A caracterização de células solares de múltiplas junções de uso espacial é de suma importância para o INPE, pois estes dispositivos são amplamente utilizados nos atuais satélites e deverão permanecer no mercado por muitos anos até o surgimento de tecnologias mais eficientes. Nas Revisões Preliminares e Críticas dos projetos de geradores solares de satélites desenvolvidos pelo INPE, normalmente surgem questões técnicas relativas ao funcionamento e desempenho destas células e sua aplicação adequada nos projetos e montagens dos painéis de satélites. Para a solução dos problemas técnicos apresentados por esses dispositivos são necessários estudos e testes de caracterização em laboratório. Esta constatação foi verificada na prática pela equipe de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE/INPE) na montagem dos satélites recentemente construídos pelo INPE.

Dentro deste contexto, este trabalho de mestrado tem um caráter inovador no Brasil, pois apresenta uma técnica de caracterização espectral de células solares de tripla junção de uso espacial simples e de baixo custo, sem a pretensão de ser uma técnica de alta precisão devido à instrumentação utilizada, mas permite estabelecer elementos para que, no futuro, o INPE possa dispor de um sistema mais sofisticado.

Acredita-se que este trabalho irá contribuir significativamente no desenvolvimento de métodos e procedimentos de ensaio para caracterização elétrica e óptica de células e de demais dispositivos fotovoltaicos a serem desenvolvidos e utilizados pelo INPE, contribuindo com a ETE nos procedimentos de aceitação e qualificação de serviços, processos e materiais e dando ao Brasil competência nesta área estratégica.

O potencial uso das células solares de tripla junção em larga escala na aplicação terrestre ainda está distante devido ao alto custo na sua produção.

Uma das possibilidades de aplicação terrestre das células de tripla junção é o emprego em sistemas de módulos fotovoltaicos com concentradores. Este tipo de gerador solar é constituído por um conjunto integrado de elementos ópticos (concentrador) e células fotovoltaicas pequenas, mas de alta eficiência. Os sistemas com concentrador têm o objetivo de substituir as usinas solares de grande área e custo elevado, principalmente aquelas próximas aos grandes centros consumidores. As células multijunção como as de GaInP/GaInAs/Ge ou AsInP/GaAs/Ge, empregadas em sistemas com fator de concentração de 500X ou mais, quando expostas a radiação solar concentrada, apresentam eficiência duas vezes maior que as convencionais de silício monocristalino, sem concentrador o que permite construir geradores com alta potência com uma significativa redução da área utilizada, porém estes sistemas ainda não são de interesse comercial, pois apresentam um custo muito elevado e desafios tecnológicos a serem superados (VIANA, 2010).

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Histórico

O desenvolvimento de células solares remonta ao começo do século XIX com a descoberta acidental do efeito fotovoltaico em células eletrolíticas. No início, esta descoberta teve pouca importância, mas pouco depois as empresas do setor de telecomunicações viram nesta nova forma de gerar energia uma grande oportunidade, pois os sistemas de comunicação, telégrafos e telefones, naquela época utilizavam como fontes de energias, baterias químicas não recarregáveis que tinham que ser substituídas regularmente. Com a modernização dos sistemas de telecomunicações e a expansão das redes elétricas, a utilização de painéis solares fotovoltaicos nestes sistemas ficaram restritas a aplicações em localidades remotas e de difícil acesso onde a rede de distribuição elétrica ainda não chegaram. (BRAGA, 2008). A produção industrial de painéis solares ocorreu somente a partir 1956 acompanhando o desenvolvimento da microeletrônica. Com o surgimento dos satélites artificiais, o desenvolvimento das células solares ganhou um novo impulso, porém tornou-se um segmento específico para esta aplicação, restrito a poucos países. A crise energética de 1973 renovou o interesse em aplicações terrestres. Porém, para tornar economicamente viável a utilização da energia solar fotovoltaica, seria necessário, naquele momento, reduzir em até 100 vezes o custo de produção das células solares em relação ao daquelas células usadas em explorações espaciais. Modificou-se, também, o perfil das empresas envolvidas no setor. Por exemplo, nos Estados Unidos as empresas de petróleo resolveram diversificar seus investimentos, englobando a produção de energia a partir da radiação solar (CRESESB, 2004).

Atualmente, células solares vêm sendo largamente usadas nos dois segmentos: terrestre e espacial. Na área terrestre o desenvolvimento busca baixo custo e na área espacial o desenvolvimento busca confiabilidade, desempenho aliado com menor massa possível. Célula solar é um dispositivo semicondutor que converte diretamente energia solar em energia elétrica. O processo físico que explica o funcionamento de uma célula solar é chamado de

efeito fotovoltaico. Os dispositivos fotovoltaicos foram durante muito tempo usado apenas como sensor de luminosidade. Em 1877, dois inventores norte-americanos W. G. Adams e R. E. Day, utilizaram as propriedades fotocondutores do selênio para desenvolver o primeiro dispositivo sólido de produção de eletricidade por exposição à luz (ADAMS; DAY, 1877). Em 1958, Chapin e colaboradores, do Bell Laboratory nos Estados Unidos da América, publicaram o primeiro artigo sobre células solares em silício, ao mesmo tempo em que registravam a patente de uma célula com uma eficiência de 4,5% (NASA, 1971).

A corrida espacial foi fundamental para a evolução das células solares. Os primeiros satélites lançados utilizavam pilhas químicas e o primeiro satélite que utilizou a energia solar foi o norte-americano Vanguard I, lançado em 17 de março de 1958. O sistema fotovoltaico neste satélite funcionou até 1964 e era composto por seis células solares como fonte alternativa no caso de falha ou esgotamento da pilha convencional utilizada para alimentar os transmissores (NASA,1971). As células de silício utilizadas no Vanguard I eram de Silício e tinham uma eficiência em torno de 10%. Cada célula fornecia menos de 1 W de potência (NASA,2018).

Em 1972 ocorreram três acontecimentos que foram muito importantes para o desenvolvimento na área fotovoltaica (FONSECA, 1985). O laboratório Communications Satellite Corporation (Comsat) anunciou o desenvolvimento da célula solar “violeta”, que maximizava a resposta da região espectral próxima ao violeta. Isso acontece devido a utilização de junções muito rasas (0,25mm) e camada antirrefletora (CAR) de pentóxido de tântalo ( $Ta_2O_5$ ). Em segundo lugar, o Centro de Pesquisas Lewis Research Center da NASA, apresentou a célula solar com campo “retro-superficial” (Back Surface Field - BSF). Esse campo diminui a perda dos portadores fotogerados na recombinação da superfície anterior. Por último, a International Business Machines (IBM) patenteou a célula solar de arseneto de gálio e alumínio (GaAlAs), iniciando uma nova fase de células solares com novos materiais.

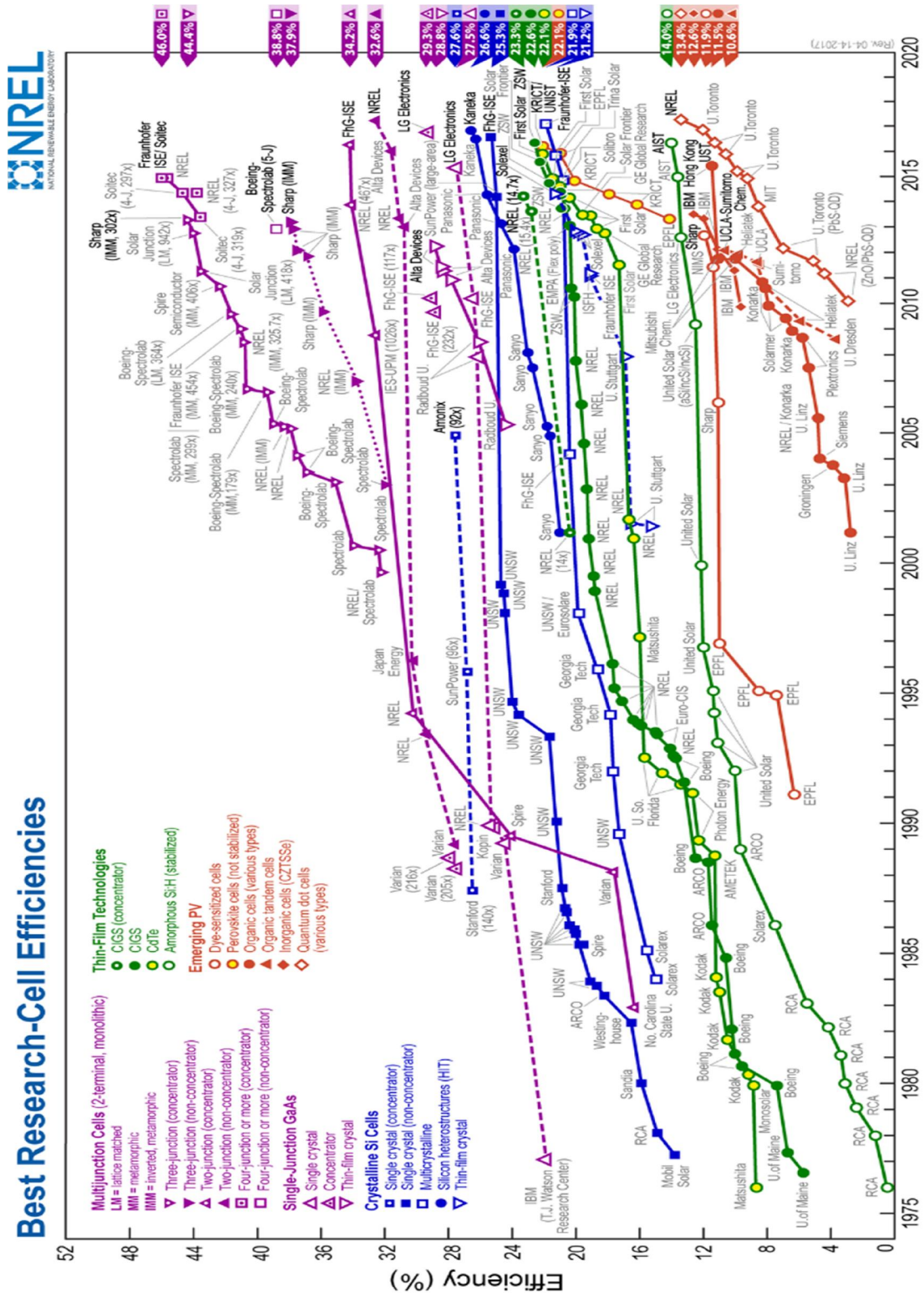


Em 1974, novamente o Laboratório Comsat desenvolveu a célula texturizada com eficiência de 15% no espectro acima da atmosfera terrestre (Air Mass Null-AM0). Os resultados destas células aperfeiçoadas eram praticamente independentes da resistividade e espessura do substrato (FONSECA, 1985).

Com o aperfeiçoamento das técnicas e processos de fabricação de células para aplicação espacial, principalmente com a obtenção de silício com alto grau de pureza através de crescimento do cristal de silício grau eletrônico, foi possível obter no final dos anos 80, células de silício que apresentaram eficiência recorde superior a 20%. Nesta mesma época as células de Arseneto de Gálio (GaAs) foram desenvolvidas com alta eficiência, porém este semicondutor é mais raro na natureza e tem um custo elevado (ABREU, 2006). Loferski havia calculado que a máxima eficiência a ser obtida por uma célula de homojunção de Arseneto de Gálio seria de 24%, com a otimização da banda de energia proibida em 1,5V. Assim, para atingir eficiência superior a 20%, novas tecnologias deveriam ser empregadas (SPITZER, 1991).

Nos anos 90 com a demanda crescente de energia nos satélites, as pesquisas visando obter células cada vez mais eficientes se intensificaram, então ocorreu o desenvolvimento da tecnologia da célula de duas ou mais junções denominadas genericamente de células de Multijunção. Esse termo significa que a célula é composta por subcélulas de diferentes materiais (e diferentes gaps) (SPITZER, 1991). Os primeiros estudos promissores foram obtidos com células de Arseneto de Gálio e Índio. A célula Multijunção apresenta a vantagem de aproveitar melhor o espectro da radiação solar, pois pode-se combinar células de diferentes respostas espectrais aproveitando fótons de diferentes energias. Esse tipo de tecnologia de células tem potencial teórico para alcançar eficiências de conversão superiores a 50% (TORRES, 2014). A primeira célula de tripla junção comercial foi produzida com uma eficiência superior a 20% com junções de GaInP/GaInAs/Ge (KEENER et al., 1997). Na Figura 2.1 pode-se observar a evolução da eficiência das células solares de diferentes tecnologias, de acordo com o rastreamento de National Renewable Energy Laboratory (NREL).

Figura 2.1 - Evolução da eficiência das diferentes tecnologias de células solares.



Fonte: NREL (2017).

As células solares de múltiplas junções (CSMJ) são os dispositivos com maior perspectiva de atingir altos índices de eficiência na geração fotovoltaica. Em 2016 através da colaboração entre a empresa Soitec (França) e o Instituto Fraunhofer (Alemanha) foi desenvolvida uma célula solar de quatro junções que atingiu o recorde de 46% (NEVES, 2018).

### **2.1.1 Evolução dos Geradores Solares nos Satélites Brasileiros**

Um dos segmentos da indústria de células solares que mais investiu em pesquisa nos últimos anos foi o da aplicação espacial. Com o surgimento dos satélites artificiais, foi necessário o desenvolvimento das células solares especiais cada vez mais eficientes que atendessem as rigorosas exigências que aplicação.

Toda demanda de energia elétrica nos satélites artificiais é atendida pelo subsistema de suprimento de energia. Existem diversas topologias destes subsistemas, mas basicamente ele é constituído pelo gerador solar, que converte a energia solar em energia elétrica através de células solares fotovoltaicos, pelo condicionador de energia, que é responsável por manter a tensão dentro do range especificado, e pelo banco de baterias, que armazena energia e mantém o satélite funcionando nos períodos de eclipse solar ou complementando a energia quando o gerador não for capaz de atender toda a demanda de energia (VIANA, 2010).

Para o correto dimensionamento do gerador solar de um satélite artificial é imprescindível conhecer as condições de operação dele no espaço e a correta especificação das células solares a serem utilizadas. Trabalha-se com diversos parâmetros importantes na especificação e dimensionamento dos geradores solares de satélites entre eles: a potência gerada pelo painel, resistência a vibração mecânica durante o lançamento, resistência a variação de temperatura, dimensões dos painéis, a massa total do sistema, a degradação e vida útil do painel e etc. A correta escolha do tipo de célula solar a ser utilizada no gerador de um satélite é um grande desafio, pois tem alto impacto no projeto tanto em termos de custo quanto na confiabilidade. Por isso é

fundamental ter o máximo de informações sobre o tipo de célula solar a ser utilizado.

O Brasil faz parte do seleto grupo das nações que possuem tecnologia para desenvolver satélites artificiais. O programa espacial brasileiro teve seu início em 1979 com a aprovação pelo governo federal da Missão Espacial Completa Brasileira (MECB). Neste programa foi estabelecido que o INPE era o responsável pelo desenvolvimento de satélites de coleta de dados e sensoriamento remoto. O primeiro satélite desenvolvido pelo INPE foi SCD-1, um pequeno satélite de coleta de dados de um metro de diâmetro em forma de um cilindro com base octogonal e massa de aproximadamente de 115 Kg que foi lançado com grande sucesso em 09 de fevereiro de 1993 (MILESKI, 2018). Após o lançamento do SCD-1, o INPE desenvolveu e lançou outros satélites das séries SCD, SACI e CBERS. A Figura 2.2 mostra o satélite SCD-1.

Figura 2.2 - Foto do SCD-1 no laboratório de Integração e teste LIT/INPE.

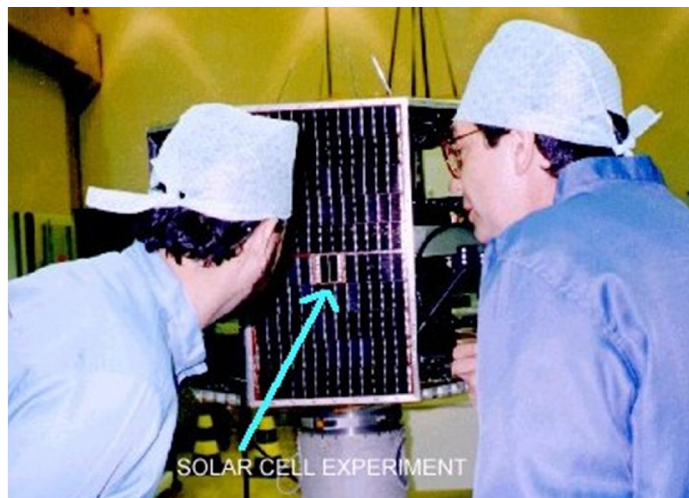


Fonte: LIT/INPE (2019).

Os satélites da série SCD's utilizavam painéis solares como gerador de energia elétricas acoplados no corpo do satélite na lateral e no topo. As células solares utilizadas nos seus painéis eram de silício fabricados pela Spectrolab com eficiência em torno de 15%. Os painéis laterais tinham as dimensões de 25,05 x 62,05 x 0,20 cm e os painéis de topo 20,85 x 62,05 x 0,20 cm. Os geradores solares dos SCD's foram dimensionados para gerar no final de sua vida útil uma potência de aproximadamente 72W (TORRES, 2014).

Nos satélites SCD-1 e SCD-2 foram colocados a bordo experimentos para qualificar células solares de silício de uso espacial que foram projetadas e fabricadas no Brasil. Estes experimentos consistiram em um pequeno módulo composto de um arranjo de três pares de células solares que foram desenvolvidas por pesquisadores brasileiros do LAS/INPE e do LME/USP (VEISSID; BELOTO, 2010). O objetivo principal destes Experimentos de Células Solares (ECS1 e ECS2) era estudar a degradação dessas células por danos de radiação por partículas, pelos ciclos térmicos e por outros efeitos ambientais encontrados fora da atmosfera terrestre, além de dominar a tecnologia de fabricação de células solares de silício de aplicação espacial e transferir esta tecnologia para a indústria nacional aumentando o índice de nacionalização dos componentes dos satélites produzidos pelo Brasil e capacitando o mercado nacional para atender esta demanda. A Figura 2.3 mostra uma foto do pequeno módulo do Experimento Células Solar acoplado à superfície do painel lateral do satélite antes de seu lançamento.

Figura 2.3 - Módulo do Experimento Célula Solar.



Fonte: LAS/INPE (2019).

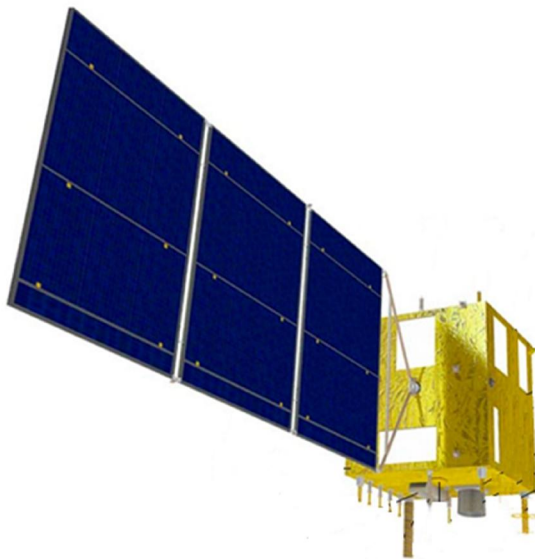
Um avanço científico significativo para o Brasil foi obtido com os satélites de sensoriamento remoto CBERS. Os satélites da série CBERS têm formato próximo de um cubo nas dimensões 1,8 m x 2,0 m x 2,2 m, massa total de 1450kg. Os satélites CBERS foram desenvolvidos através da parceria entre Brasil e China no setor técnico-científico espacial através do Instituto Nacional

de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Academia Chinesa de Tecnologia Espacial (CAST), sendo que o primeiro satélite da série foi lançado com sucesso em 14 de outubro de 1999.

Os geradores solares dos primeiros satélites da série CBERS eram compostos por três painéis solares retangulares tendo no total uma área de 6,3m x 2,6m. Estes painéis foram dimensionados para gerar uma potência de útil de aproximadamente 1,5 kW através da utilização de 15.000 células solares de silício nas dimensões de 2cm x 4cm, fabricadas pela SISF- China com eficiência de 13%. Para proteger as células dos danos de radiação no espaço elas foram recobertas com uma fina camada de vidro especial (coverglass) (TORRES, 2014).

A Figura 2.4 mostra desenho geral dos satélites CBERS onde pode-se observar os painéis solares.

Figura 2.4 - Desenho geral dos satélites CBERS.



Fonte: LIT/INPE (2019).

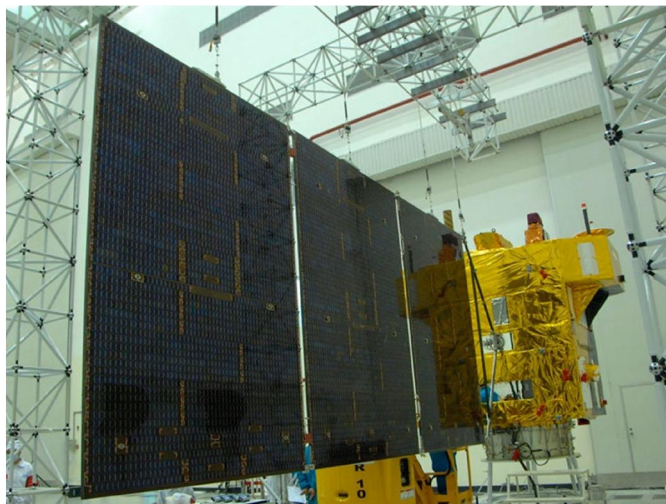
A partir do quarto satélite da série CBERS, o projeto foi alterado para que ele recebesse uma carga útil maior, além da massa total do satélite que melhorias

significativas nos desempenhos geométricos e radiométricos no processo de sensoriamento remoto.

Para atender a demanda de energia dos novos satélites, os geradores solares foram redimensionados e, nos painéis solares, as células de silício foram substituídas por células de tripla junção do tipo GaInP/GaInAs/Ge, que possuem eficiência aproximadamente de 28 %. Os painéis do CBERs 3 e 4 foram confeccionados com 10.000 células solares de tripla junção com capacidade de geração de até 2.500 Watts (TORRES, 2014; VEISSID, 2010).

A Figura 2.5 mostra uma Imagem do Satélite CBERS-4 durante o processo de integração no LIT no INPE em São José dos Campos. O conjunto que compõem o painel solar pesa apenas 55 kg e foi fabricado pelas empresas Orbitale Cenic, ambas de São José dos Campos.

Figura 2.5 - Imagem do Satélite CBERS-3 durante integração no LIT no INPE em São José dos Campos.

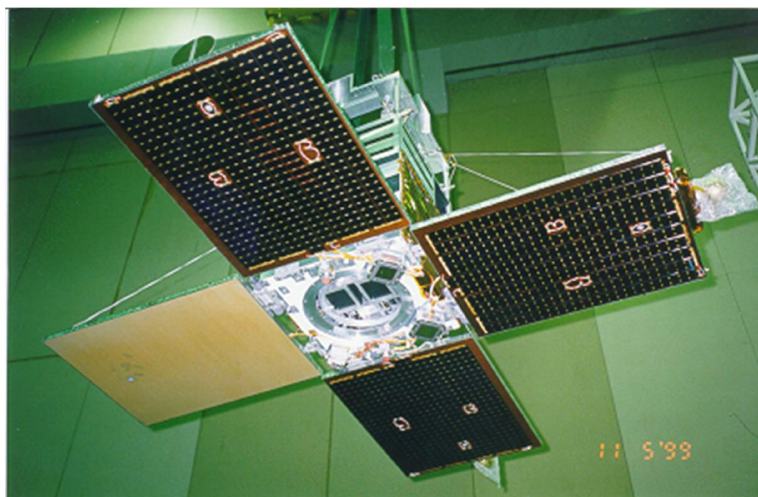


Fonte: LIT/INPE (2019).

Além dos principais satélites apresentados aqui de forma resumida, também foram desenvolvidos pelo INPE seis outros satélites que não entraram em órbita ou não funcionaram. Entre os satélites que não entraram em operação, os microssatélites da série SACL tiveram características especiais. São satélites pequenos com 60 cm x 40 cm x 40 cm de dimensões, com massa entre 60 a

100 kg com finalidade científica e concebidos para serem lançados como carga secundária de lançamentos de satélites maiores. Nos geradores solares dos SACI's foram utilizados três painéis solares com células de Arseneto de Gálio (GaAs/Ge) com eficiência de 19% gerando uma potência em torno de 150W, sendo que o gerador solar do SACI-1 foi importado e do SACI-2 foi totalmente desenvolvido no Brasil. Os painéis utilizados no SACI são do tipo articulado ao corpo do satélite. Durante o lançamento os painéis estão travados junto ao corpo do satélite já na posição orbital quando no espaço, os painéis são abertos. Na Figura 2.6 podemos ver uma foto do SACI-1 com seus painéis solares na configuração orbital.

Figura 2.6– Foto do SACI-1.



Fonte: ETE/INPE (2019).

## 2.2 Radiação eletromagnética

A energia elétrica gerada por uma célula solar é devida a interação da radiação eletromagnética proveniente de uma fonte como o Sol com uma junção semicondutora produzindo pares de elétrons e lacunas. Para estudar os processos de interação da radiação eletromagnética com a matéria muitas vezes são consideradas características discretas da radiação na forma de pacote de energia ou quanta (plural de quantum) e em outros apenas fenômenos puramente ondulatórios são necessários. O estudo dessa interação

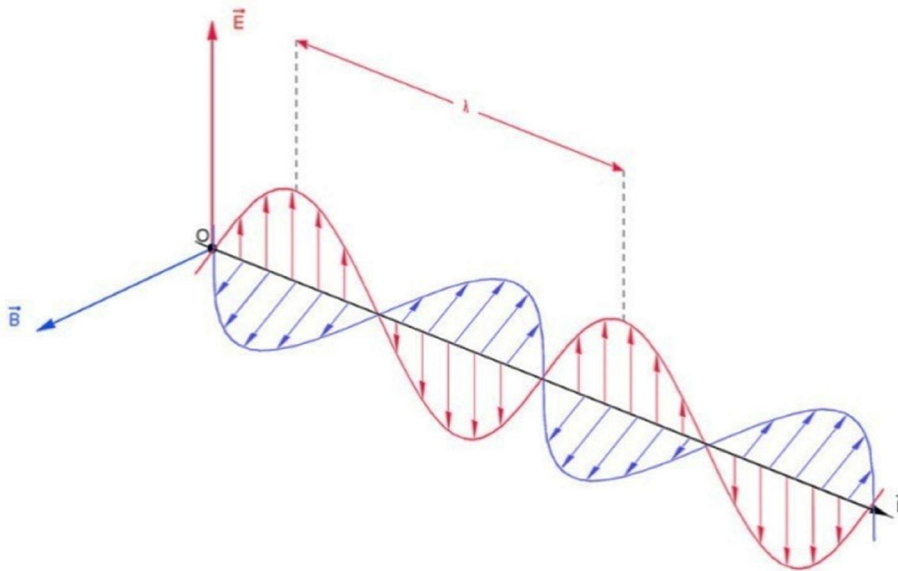


é complexo e não será discutido neste trabalho, por isso apresentamos aqui apenas alguns conceitos básicos sobre a radiação eletromagnética que são necessários para compreensão deste trabalho.

Existem vários processos físicos capazes de gerar radiação eletromagnética, mas a forma mais comum e natural de gerar radiação eletromagnética é através da energia térmica que um corpo ou partícula possui. O Sol é um exemplo de fonte natural de radiação eletromagnética de origem térmica. Ele emite radiação eletromagnética devido a elevada temperatura da sua superfície. Esta radiação se propaga pelo universo em todas as direções e atinge a Terra, sendo responsável por diversos processos físicos e biológicos que ocorrem no planeta. Qualquer corpo que esteja numa temperatura acima do zero absoluto ( $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) é um emissor de radiação eletromagnética e essa radiação se propaga no espaço por meio de ondas que não necessitam de um meio material para se propagar. Já em um meio material, as ondas eletromagnéticas podem sofrer absorção, espalhamento, reflexão, refração, difusão e interferências.

A radiação eletromagnética transporta energia de um ponto para outro por meio da flutuação dos campos elétrico e magnético. Na Figura 2.7 podemos observar uma representação de uma onda eletromagnética se propagando no espaço, onde observamos que o campo elétrico **E** é perpendicular ao Campo magnético **B**. O comprimento de onda, representado pela letra grega lambda ( $\lambda$ ) é a distância mínima em que um padrão temporal da onda se repete paralela à direção de propagação desta onda.

Figura 2.7 - Desenho ilustrativo de uma onda eletromagnética se propagando na direção do vetor  $\mathbf{K}$ .



Fonte: Ciência (2019).

O fluxo de energia transportado por uma onda eletromagnética pode ser associado a um vetor  $\mathbf{P}$ . Este vetor representa a densidade direcional do fluxo de energia (a quantidade de energia transferida por unidade de área) de um campo eletromagnético. Esse vetor  $\mathbf{P}$  é chamado de vetor de Poynting (equação 2.1), em homenagem a John Henry Poynting (1852 – 1914) que foi o primeiro a definir sua propriedade (Halliday; Resnick 1984).

$$\mathbf{P} = \frac{1}{\mu} \mathbf{E} \times \mathbf{B} \quad (2.1)$$

No sistema internacional,  $\mathbf{P}$  se expressa em  $\text{W}/\text{m}^2$ . A direção e o sentido de  $\mathbf{P}$  coincidem com a direção de propagação da energia. Os vetores  $\mathbf{E}$  e  $\mathbf{B}$  representam os valores instantâneos dos campos elétricos e magnéticos no ponto considerado.

As ondas eletromagnéticas se propagam no vácuo com uma velocidade constante e independente do referencial. Esta velocidade é dada pela equação 2.2.

$$V = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = c \quad (2.2)$$

Onde  $\epsilon_0$  é a permissividade elétrica do vácuo e  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo. Aplicando os valores na expressão acima, encontra-se a velocidade de propagação no vácuo para qualquer onda eletromagnética:

$$c = 299.792.458 \text{ m/s}$$

Na presença de um meio material, a velocidade de propagação da radiação eletromagnética depende das características físicas deste meio e do comprimento de onda da radiação.

Um corpo aquecido emite radiação eletromagnética em todos os comprimentos de onda com diferentes intensidades. Esta distribuição de intensidade da radiação que um corpo emite devido a sua temperatura para diferentes comprimentos de ondas é denominada de espectro de radiação. Este espectro depende da temperatura e da composição do corpo que está emitindo a radiação, sendo que a temperatura é a que mais caracteriza o espectro emitido, mas o comprimento de onda que possui a maior intensidade é uma característica exclusiva da temperatura deste corpo. Porém determinados corpos quando aquecidos emitem um espectro de caráter Universal, estes corpos são chamados de Corpos Negros. O Corpo Negro ideal é um objeto imaginário que a princípio teria a propriedade de absorver toda a radiação que nele incide e também um emissor perfeito cuja emissão depende apenas da sua temperatura quando em equilíbrio termodinâmico. Através da Lei de Planck (equação 2.3) é possível estimar a emissão espectral de um Corpo Negro no vácuo em função da sua temperatura para cada comprimento de onda (NEVES, 2016).

$$I_{cn\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [e^{(hc/\lambda kT)} - 1]} \quad (2.3)$$

Onde:

$I_{\text{cn}\lambda}$  = Exitância espectral emitida pelo Corpo Negro dada ( $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$  )

$h$  = Constante de Planck =  $6,626176 \times 10^{-34}$  (Js)

$c$  = Velocidade da Luz no vácuo = (299.792.458 m/s)

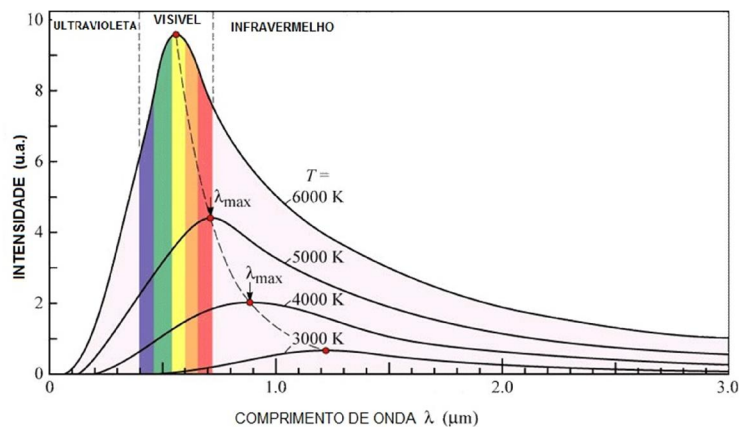
$k$  = Constante de Boltzmann =  $1,380662 \times 10^{-23}$  J/K

$\lambda$  = Comprimento de Onda em  $\mu\text{m}$

$T$  = Temperatura do Corpo Negro em K

A Figura 2.8 mostra curvas espectrais (densidade de potência por comprimento de onda) para o corpo negro com temperaturas de 3.000 K, 4.000 K, 5.000 K e 6.000 K. Podemos observar o deslocamento dos picos máximos de emissão em função da temperatura, para temperaturas mais altas. O comprimento de onda de maior intensidade tende a ser menor e, também, pode-se notar que a área embaixo de cada curva, ou seja a irradiância, é maior para temperaturas maiores.

Figura 2.8 - Curvas espectrais para a radiação de corpo negro em diferentes temperaturas.



Fonte: Abreu (2006).

Conhecendo a temperatura de um corpo negro é possível determinar a radiação total emitida por ele e através da lei de Stefan-Boltzmann, dada pela equação 2.4, é possível determinar a exitância deste corpo.

$$M_b = \sigma T^4 \quad (2.4)$$

Onde:

$\sigma$ - Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,6697 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{k}^{-4}$ )

T – Temperatura (K)

Na natureza não existem corpos negros perfeitos, já que nenhum objeto consegue ter absorção e emissão perfeitas, mas podemos utilizar esta teoria para determinar a emissão de uma estrela como o Sol com uma boa precisão.

### **2.3 Espectro e Irradiância Solar**

O Sol é a estrela central do Sistema Solar e ele é a principal fonte de radiação eletromagnética que atinge a Terra. Basicamente uma estrela é uma esfera de plasma que se encontra em equilíbrio hidrostático entre a pressão termodinâmica, produzida pelas altas temperaturas internas, e a força gravitacional. A temperatura na superfície do Sol é de aproximadamente 5800 K, por isso podemos considerar que ele emite radiação eletromagnética com um espectro próximo à de um Corpo Negro nesta temperatura. (BARROS, 2016). A energia eletromagnética emitida pelo Sol está contida na faixa que vai de aproximadamente 200nm até 4.000nm. A radiação solar que atinge o topo da atmosfera terrestre tem um pico máximo em torno de 500 nm.

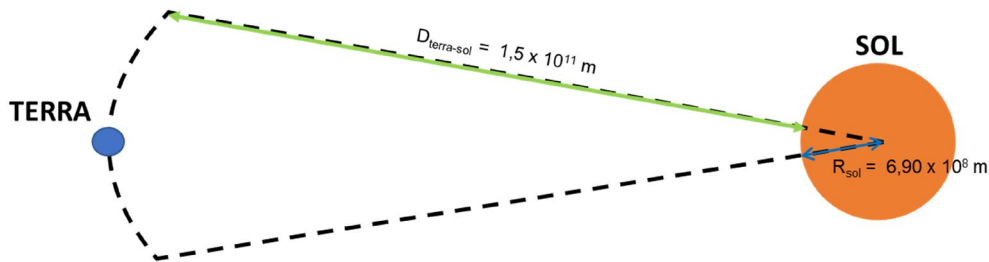
Apenas uma pequena fração da energia total que é emitida pelo Sol atinge o nosso planeta. Considerando o Sol como um corpo negro perfeito com temperatura de aproximadamente 5.800 K, podemos determinar a sua emissão em torno de  $5.961 \times 10^7 \text{ Wm}^{-2}$ . A irradiância solar é a densidade de potência emitida pelo corpo negro na temperatura do Sol multiplicado pela área da superfície do Sol ( $A=4\pi R^2$ ) onde  $R$  é o raio do Sol ( $\sim 6,90 \times 10^8 \text{ m}$ ). A medida que vai se distanciando do Sol, a irradiação vai se propagando em todas as direções como se fosse emitida por uma esfera com um raio cada vez maior com o Sol no centro. Considerando o topo da atmosfera terrestre como um ponto em uma esfera de raio igual a distância Terra-Sol ( $1,5 \times 10^{11} \text{ m}$ ) a densidade de fluxo radiante que chega no topo da atmosfera terrestre pode ser calculada pela relação das áreas das duas esferas conforme a equação 2.5.

$$H_{Terra} = \frac{R_{Sol}^2}{D^2} * H_{Sol} \quad (2.5)$$

Onde:  $H_{Sol}$ -Densidade de potência na superfície do Sol ( $W/m^2$ ) determinada pela equação de Stefan-Boltzmann;  $R_{Sol}$  – Raio do Sol em metros e  $D$  é a distância Terra até a superfície do Sol. Para cálculos mais precisos é necessário considerar o raio da Terra e a variação da distância da Terra ao Sol em função da órbita do planeta.

Portanto, a parcela da densidade de potência da radiação solar calculada que atinge o topo da atmosfera terrestre é cerca de  $1,36 \text{ kW} / \text{m}^2$ . Os parâmetros geométricos utilizados no cálculo são mostrados na Figura 2.9 abaixo.

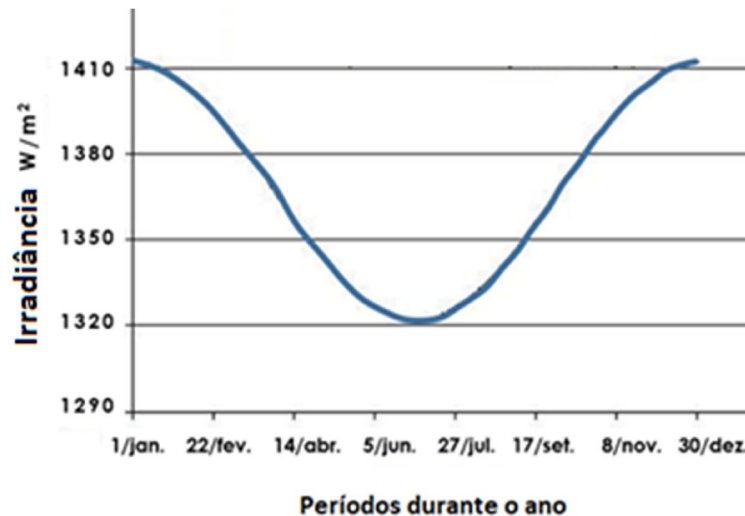
Figura 2.9 - Relação geométrica entre o raio da órbita da Terra e o raio do Sol.



Fonte: Adaptado Pveducation (2019).

A densidade de potência que chega no topo da atmosfera terrestre varia ligeiramente por causa da variação da distância Terra-Sol. A órbita da Terra em torno do Solé ligeiramente elíptica, cuja excentricidade é de 0,017, e isso causa uma variação de potência de cerca de 3,4%, com a maior irradiação solar ocorrendo em janeiro e a menor irradiação solar em julho. Na Figura 2.10 podemos observar a curva variação da intensidade da irradiação que chega ao topo da atmosfera em função da variação da distância Terra- Sol ao longo do ano.

Figura 2.10—Curva da variação da intensidade da irradiância que chega ao topo da atmosfera em função da variação da distância Terra- Sol ao longo do ano.



Fonte: Adaptado Neves (2016).

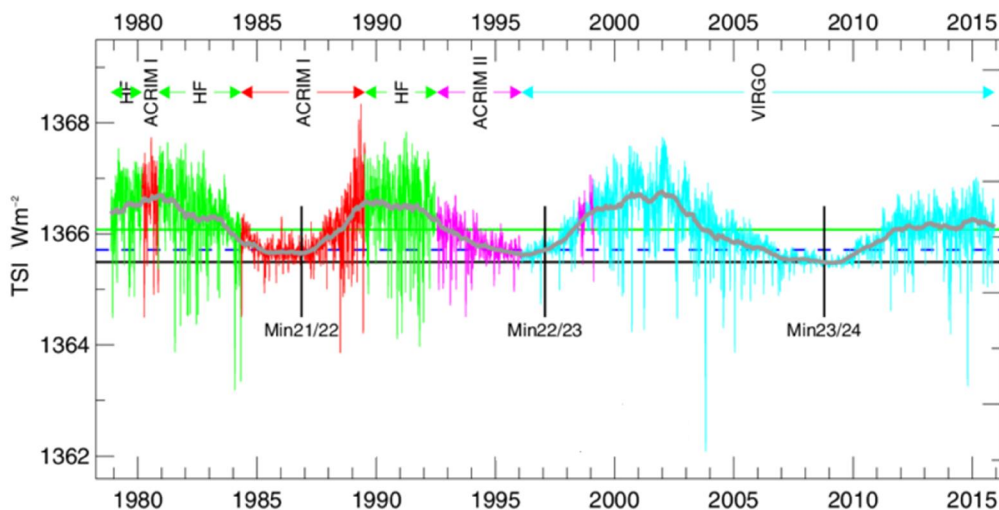
O valor da irradiância solar integrada em toda a faixa do espectro solar que chega ao topo da atmosfera terrestre recebeu a denominação de constante solar  $E_0$ . Este valor foi muito utilizado em previsões de irradiância na superfície do planeta e na previsão meteorológica e ainda é muito utilizada em modelos teóricos no dimensionamento de sistemas elétricos de satélites. Ao longo de vários anos o valor preciso da constante solar foi um desafio para vários pesquisadores, ela foi determinada por cálculos e por uma série de observações cuidadosas com vários aparelhos diferentes em vários lugares do planeta, inclusive com o uso de sondas e satélites artificiais. A Constante Solar também foi padronizada pela ASTM para uso científico e para unificar o seu uso em diversos laboratórios ao redor do mundo. A Norma ASTM E490-00 estabeleceu o valor de  $E_0 = 1366,1 \text{ W/m}^2$ , tendo sido obtida a partir da média de medições diárias realizadas com seis satélites diferentes entre os anos de 1978 e 1998 (NEVES, 2016).

Embora o valor da constante solar seja prático em termos de utilização, ele não representa a realidade da irradiação solar que chega ao topo da atmosfera por ser um valor médio. A irradiância solar sofre variações não somente em função da variação da distância entre a Terra e o Sol, mas também devido as atividades solares, por isso, atualmente o termo constante solar está em

desuso e no lugar passou-se a utilizar o termo Valor Médio da Irradiância Solar Extraterrestre Total ou somente TSI (*Total Solar Irradiance*). Para explicar o porquê das variações da irradiância solar, vários fenômenos têm sido estudados e correlacionados com a atividade solar, sendo que os fenômenos magnéticos que ocorrem na superfície do Sol é o que demonstra uma maior correlação (GOMEZ, 2018).

A TSI afeta o clima da Terra em diferentes escalas de tempo e intensidade. Estudos recentes mostram que os valores de TSI estão entre 1363 e 1368 W/m<sup>2</sup>. Porém valores precisos da irradiância solar são importantes em modelos de previsão de clima e atmosfera, por isso, dependendo da aplicação, os valores da TSI são determinados através de modelos matemáticos que utilizam redes neurais artificiais para prever a TSI a partir da evolução do campo magnético solar. Na Figura 2.11 pode-se observar a variação do valor de TSI ao longo de anos obtidos por radiômetros absolutos (ACRIM1, HF, ACRIM II e VIRGO) de alta precisão a bordo de vários satélites.

Figura 2.11 - Valor de TSI ao longo de anos obtidos por radiômetros absolutos



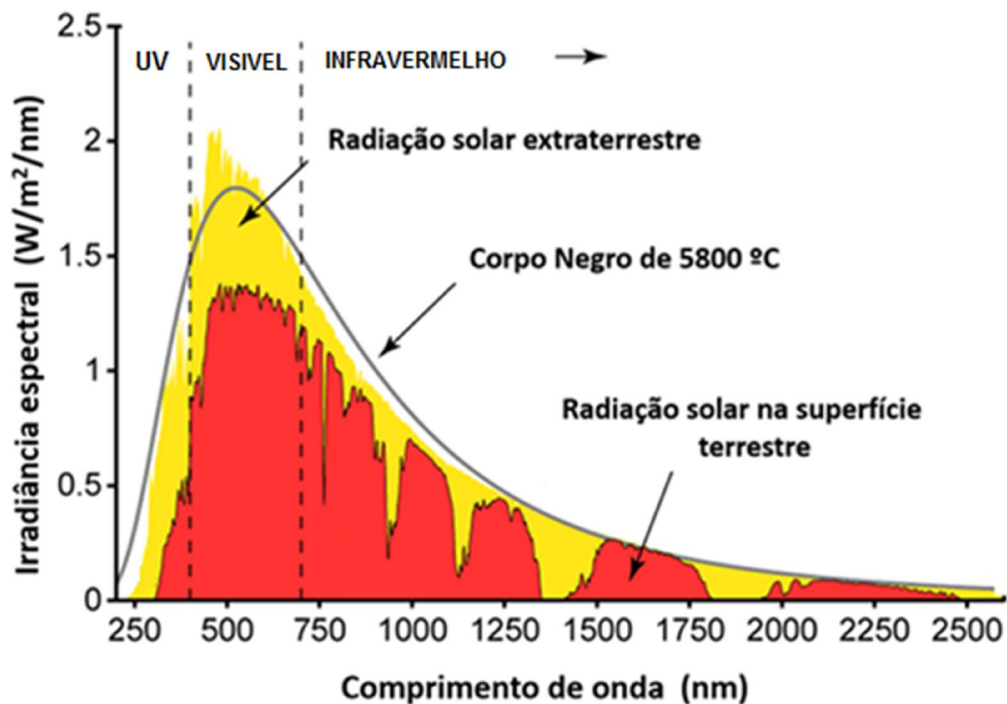
Fonte: Adaptada de Kopp (2016 )

A radiação solar pode ser didaticamente separada em três grandes partes de acordo com o comprimento de onda em: radiação ultravioleta (UVA, UVB e UVC), radiação visível (VIS) e infravermelha (IV próximo, IV médio e IV



distante). Sendo que no espectro solar a radiação ultravioleta (UV) corresponde somente uma pequena parcela da radiação total emitida pelo Sol, entorno de 8%. A radiação visível (VIS), que o olho humano é capaz de detectar, está compreendida aproximadamente na faixa de 400 nm até 780nm e corresponde a 47%. O restante do espectro solar corresponde aproximadamente a 45% da radiação total do Sol, está na faixa denominada infravermelho. Na Figura 2.12 temos o espectro solar extraterrestre e o terrestre para uma comparação entre os mesmos.

Figura 2.12 - Espectro solar.



Fonte: Adaptado de Howard (2013).

Conforme mencionado, a radiação que chega no topo da atmosfera terrestre tem um espectro diferente daquele que atinge a superfície. Além do espectro ser diferente, a irradiância solar que atinge a superfície terrestre sofre atenuação devido interação com atmosfera, sendo sempre menor do que a extraterrestre e tem a sua intensidade variando ao longo do dia e do ano devido aos movimentos de rotação e translação do planeta. A radiação solar extraterrestre é aparentemente mais bem-comportada que a radiação que atinge a superfície do planeta, pois não sofre interações significativas com

nenhuma matéria no espaço, porém ela é afetada pela distância entre a Terra e o Sol e pelas atividades solares.

Com o objetivo de determinar um espectro da radiação solar que fosse referência para uso em pesquisas e em laboratórios da comunidade aeroespacial, a American Society for Testing and Materials – ASTM desenvolveu em 2000 um espectro para a radiação solar no topo da atmosfera que foi padronizado na norma 2000 ASTM Standard Extraterrestrial Spectrum Reference E-490-00. O espectro padrão, denominado espectro AM0, teve como base uma série de medições realizadas por instrumentos a bordo de satélites, sondas espaciais, telescópios solares em terra e ferramentas computacionais para modelagem.

## **2.4 Absorção de radiação solar nos dispositivos fotovoltaicos.**

Os dispositivos fotovoltaicos mais utilizados atualmente são as células solares e os fotodiodos, que têm respostas espectrais nas regiões do ultravioleta, visível e infravermelho próximo. A radiação eletromagnética ao incidir sobre a junção semicondutora destes dispositivos gera uma corrente elétrica através da absorção de fótons que produz pares elétrons-lacunas. Para comprimentos de onda nas faixas do infravermelho médio ou distante, os fótons não possuem energia suficiente para gerar pares elétrons lacunas e podem ser absorvidos gerando apenas efeitos térmicos. A intensidade da radiação vai diminuindo à medida que penetra no material, pois os fótons vão sendo absorvidos. Nem todos os fótons absorvidos pelo dispositivo semicondutor vão gerar pares elétron-lacuna, pois sempre existem outros processos físicos envolvidos. A equação (6) abaixo permite determinar a intensidade da radiação em função da penetração no material.

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (2.6)$$

Onde:

$I(x)$  - Intensidade da radiação dentro do material

$I_0$  – Intensidade da radiação na superfície do material

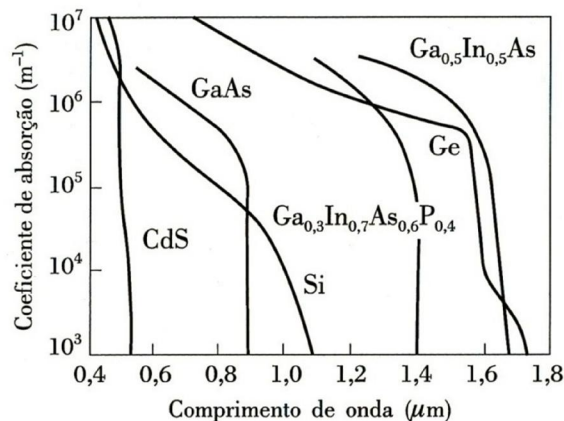
$x$  – Distância entre a superfície do semicondutor e o ponto de interesse.

$\alpha$  - Coeficiente de penetração

Para que todos os fótons incidentes no material semicondutor, na faixa de sensibilidade do material, sejam absorvidos é necessário que a espessura do material seja muito maior que  $\alpha^{-1}$ . Os semicondutores empregados na fabricação de células solares em geral têm  $\alpha \sim 10^6 \text{ m}^{-1}$ , isso garante que quase a totalidade dos fótons incidente sejam absorvidos numa distância da superfície da célula de alguns micrometros.

O Coeficiente de absorção ( $\alpha$ ) é uma propriedade do material semicondutor que está relacionado com a capacidade que os fótons de uma determinada faixa de comprimentos de ondas ( $\lambda$ ) têm para penetrar neste material até serem absorvidos. Na Figura 2.13 podemos observar a variação do coeficiente de absorção de alguns semicondutores em função do comprimento de onda.

Figura 2.13 - Variação do coeficiente de absorção de alguns semicondutores em função do comprimento de onda.



Fonte: Abreu (2006).

Na Figura 2.13 podemos observar que o silício, um dos semicondutores mais empregados na fabricação de células solares, tem absorção praticamente zero para fótons com  $\lambda > 1,1 \mu\text{m}$ . O germânio outro semiconductor muito utilizado nas células de tripla junção, tem absorção somente na região do infravermelho, para fótons com  $\lambda$  entre  $0,9\mu\text{m}$  e  $1,7\mu\text{m}$ . Fora deste intervalo o germânio praticamente não apresenta absorção.

Os semicondutores possuem eletros distribuídos, essencialmente, em duas camadas de energia, a camada de valência e a camada de condução. Entre elas existe um *gap* de energia conhecido com banda proibida. A energia de banda proibida em um semiconductor é a energia necessária para que o elétron consiga se locomover da camada de valência para a camada de condução.

Essa característica do semiconductor é muito importante, pois somente os fótons com energia maior que a energia de banda proibida são capazes de formar um par elétron-lacuna. Conhecendo o valor da energia de banda proibida, sabemos como o material irá se comportar em determinado espectro de luz incidente. Na tabela 2.1 é apresentado valores de *gap* para diferentes materiais.

Tabela 2.1 - Valores de *gap* para diferentes semicondutores.

<b>Semiconductor</b>	<b>GAP em eV (300K)</b>
Sulfeto de Cadmio (CdS)	2.4
Fosfetode Cadmio (CdP)	2.2
Selenode Cadmio (CdSe)	1.7
Arseneto de Galio (GaAs)	1.4
Silício (Si)	1.1
Germanio (Ge)	0.7
Arseneto de Índio (InAs)	0.43
Sulfeto de Chumbo (PbS)	0.37
Telureto de Chumbo (PbTe)	0.29
Seleneto de Chumbo (PbSe)	0.26
Antimoneto de Índio (InSb)	0.23

Fonte: Adaptado de Abreu (2006).

Os fótons de diferentes energias são absorvidos em diferentes profundidades quando penetra um semicondutor, por isso nas células que possuem mais de uma junção, cujos semicondutores são empilhados em camadas umas sobre os outros, as camadas inferiores são de materiais que possuem absorção de fótons com maior poder de penetração. Como podemos observar, a resposta espectral de uma célula solar está diretamente relacionada com a energia dos fótons e com o coeficiente de absorção do semicondutor com que ela é fabricada. Em alguns casos, os fótons não conseguem penetrar no material, em outros casos o semicondutor é praticamente transparente para o fóton, ele atravessa-o sem sofrer qualquer interseção com o semicondutor.

## **2.5 Efeito fotovoltaico**

O efeito fotovoltaico acontece em materiais semicondutores, que tem como característica uma banda de valência preenchida por elétrons e uma banda de condução vazia a temperaturas muito baixas. A separação entre as duas bandas nos semicondutores é conhecida como *gap* de energia e é tipicamente da ordem de 1 eV, o que os diferencia dos isolantes onde os *gaps* são maiores, atingindo vários eV. Essa diferença faz com que os semicondutores apresentem várias características interessantes. Uma delas é o aumento de sua condutividade com a temperatura, devido à excitação térmica de portadores da banda de valência para a banda de condução. (WURFEL, 2005).

Uma propriedade fundamental para as células fotovoltaicas é a possibilidade de fótons, com energia superior ao *gap* do material, excitarem elétrons para banda de condução. Na Figura 2.14 é apresentado as faixas de energia junto com a banda de condução e de valência. Este efeito, que pode ser observado em semicondutores puros, também chamados de intrínsecos, não garante por si só o funcionamento de células fotovoltaicas. Para obtê-las é necessária uma estrutura apropriada para que os elétrons excitados possam ser coletados, gerando uma corrente (REIS, 2015).

Figura 2.14 - Faixas de energia.



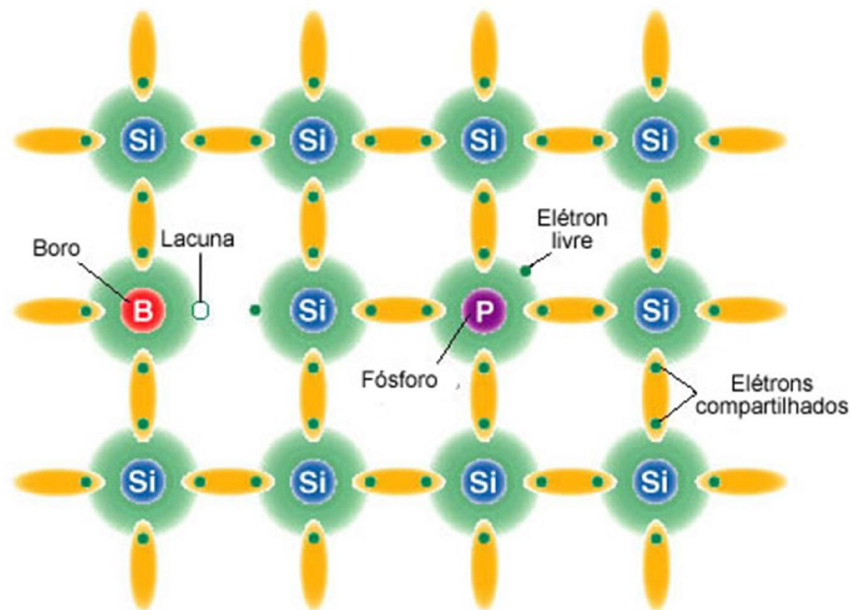
Fonte: Braga (2008).

### 2.5.1 Semicondutor tipo P e tipo N

O silício é encontrado em grande abundância na natureza, em sua forma pura não apresenta elétrons livres na última camada, portanto não é considerado um bom condutor de eletricidade. (SMITH; HASHEMI, 2013). O silício possibilita a inserção de elementos químicos na sua rede cristalina, entre as mais usadas estão o fósforo e o boro. Fazendo essa inserção com os elementos citados podemos encontrar diferentes comportamentos do silício, esse processo é chamado de dopagem do elemento. Quando dopado com o fósforo, que é um elemento da família 5A da tabela periódica, permite que o silício tenha elétrons livres ou fracamente ligados ao átomo. Com isso faz que o material tenha uma perturbação na estrutura e apareça um estado de energia entre a banda de valência e a banda de condução, recebendo um novo nome nesse estado de energia, conhecido como banda proibida. Com esse processo o silício se torna do tipo N (BOYLESTAD; NASHELSKY, 1998).

O silício do tipo P acontece quando o silício puro é dopado com o boro, que se encontra na família 3A, como demonstrado na Figura 2.15, que apresenta um semicondutor do tipo P dopado com boro. O processo de dopagem é similar ao processo para se obter o tipo N, porém neste caso, acontece que no material falta um elétron em sua última camada, tornando-se um material com carga positiva, apresentando lacunas livres.

Figura 2.15 - Semicondutor tipo P dopado com boro e tipo N dopado com fósforo.

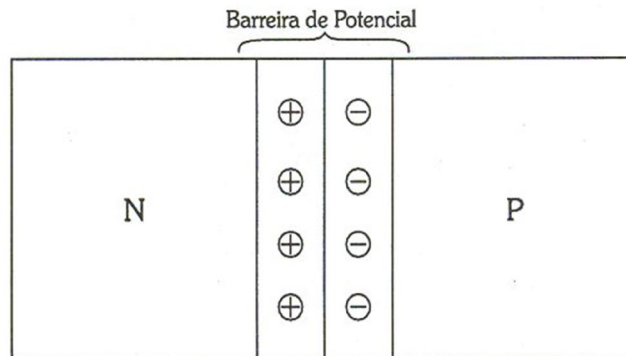


Fonte: Andrade (2018).

### 2.5.2 Junção PN e a Célula Solar Fotovoltaica

A junção PN ocorre quando é feita a união dos dois semicondutores, um do tipo P e outro do tipo N. Ao unir os dois materiais, ocorre uma difusão de elétrons do lado tipo N para o lado tipo P, pois no lado N existe excesso de elétrons e no lado P existe excesso de lacunas. Com isso, forma-se uma região de carga espacial, conhecida como região de depleção, e, conseqüentemente, uma barreira de potencial (MACHADO; MIRANDA, 2015). A Figura 2.16 mostra a barreira de potencial, que inibe a transferência constante de elétrons entre o lado N e o lado P. Se radiação eletromagnética incide e é absorvida nessa região de depleção, podem ser gerados pares eletro-lacuna que caminham impulsionados pelo campo elétrico. Se esta junção pn estiver ligada a um circuito externo fechado, é então gerada uma corrente elétrica nesse circuito. É assim que funciona uma célula solar.

Figura 2.16 - Barreira de potencial de uma junção PN.



Fonte: Almada (2019).

## 2.6 Célula solar fotovoltaica

Em 1956 foi fabricada a primeira célula solar fotovoltaica industrial, que foi possível somente graças aos avanços da microeletrônica. O elevado custo da fabricação inviabilizava a sua utilização, mas isso não é o fator que predomina quando o assunto é o setor espacial. Com o baixo peso e alta confiabilidade, as células solares foram utilizadas em satélites, devido ao sistema desenvolvido para alimentação do satélite. Esse sistema é um conjunto de células solares interligadas, chamado de painel solar (JENA et al., 2012).

Outro fator que impulsionou o avanço da pesquisa em relação a células solares foi a crise do petróleo em 1973. Nessa época houve um grande incentivo do governo para a produção de energia renovável, porém, mesmo com todo avanço da tecnologia, o custo benefício da produção de células solares ainda continuava muito alto em relação a potência gerada por ela (KONAGAI, 2011).

O funcionamento de uma célula solar ocorre em dois estágios (NASCIMENTO, 2004):

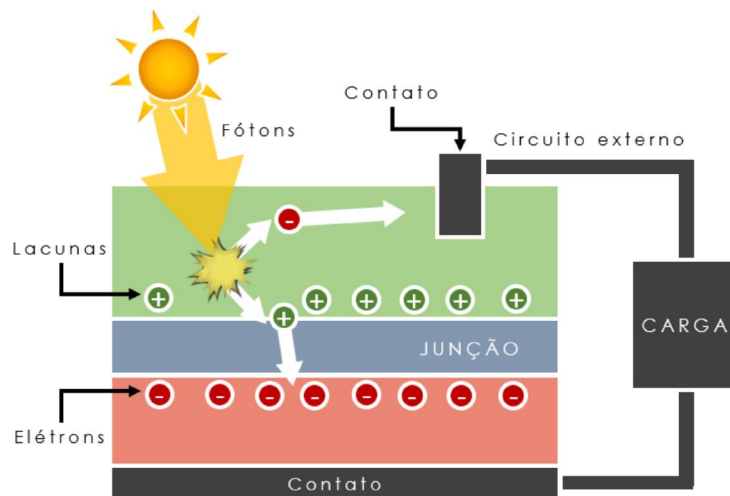
- O primeiro estágio é quando os fótons atingem a célula e geram um par elétron-lacuna. Isso acontece pelo efeito fotovoltaico.



- O segundo estágio acontece quando o par elétron-lacuna se separa e vai para os terminais negativo e positivo, respectivamente.

Na Figura 2.17 é apresentado o processo de conversão de uma célula solar fotovoltaica. O processo ocorre quando a Energia da Banda Proibida for igual ou menor que a energia do fóton que atinge a célula.

Figura 2.17 - Processo de conversão da radiação solar em corrente elétrica em Células fotovoltaicas.

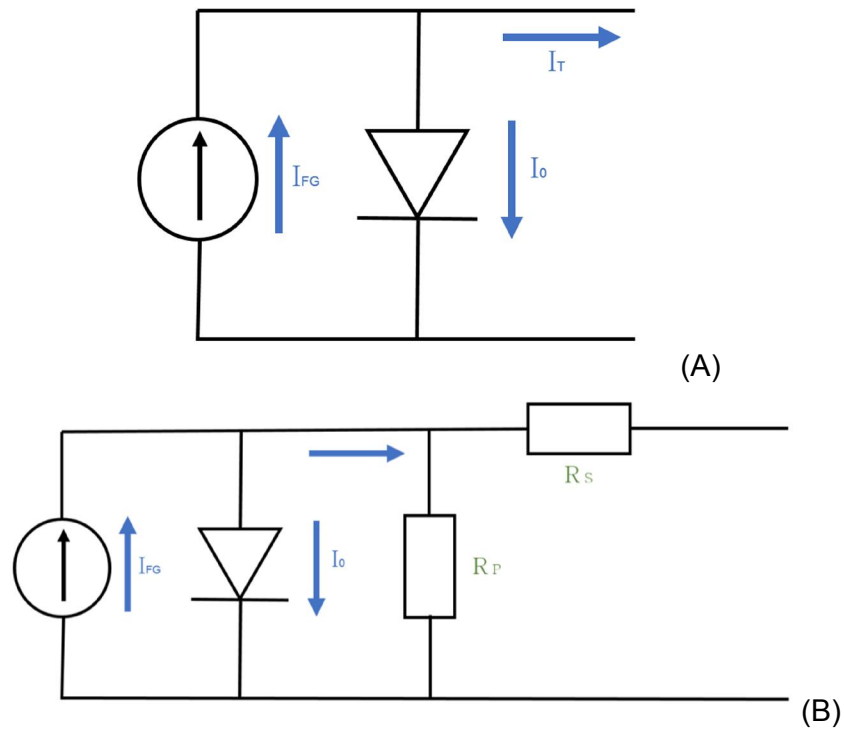


Fonte: Adaptado de Neves (2016).

### 2.6.1 Circuito equivalente de uma célula solar

Uma célula solar possui um circuito eletrônico equivalente, conforme mostrado na Figura 18 (A), sendo o circuito com uma fonte de corrente com um diodo em paralelo, esse circuito é o ideal para uma célula. Na fabricação de células solares existem fatores que influenciam a produção energética da mesma, para que isso seja representado no circuito equivalente é inserido no circuito um resistor em paralelo e um resistor em série, conforme mostrado na Figura 2.18 (B). A corrente gerada pela célula é descrita na equação 2.7, onde foi derivada da equação de Shockley para um diodo ideal, levando em consideração a corrente fotogerada da célula (CASARO; MARTINS, 2008).

Figura 2.18 - Circuito eletrônico Equivalente sem (A) e com as resistências (B).



Fonte: Adaptado de Neves (2016).

$$I_T(V) = I_{FG} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.7)$$

Onde:

$I_T(V)$  : Corrente total gerada pela célula fotovoltaica (A);

$I_{FG}$  : Corrente fotogerada (A);

$I_0$  : Corrente de saturação reversa do diodo (A);

$q$  : Carga do elétron  $1,6 \times 10^{-19}$  C

$k$ : Constante de Boltzmann =  $1,38 \times 10^{-23}$  J/K ou  $8,617 \times 10^{-5}$  eV/K

$T$ : Temperatura (K);

$n$ : Fator de qualidade do diodo

Como foi visto na maioria dos casos a célula solar possui fatores físicos que agregam resistências na sua geração de corrente, com isso a equação que corresponde a esses casos é a equação 2.8.

$$I_T(V) = I_{FG} - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + IR_s)V}{nkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2.8)$$

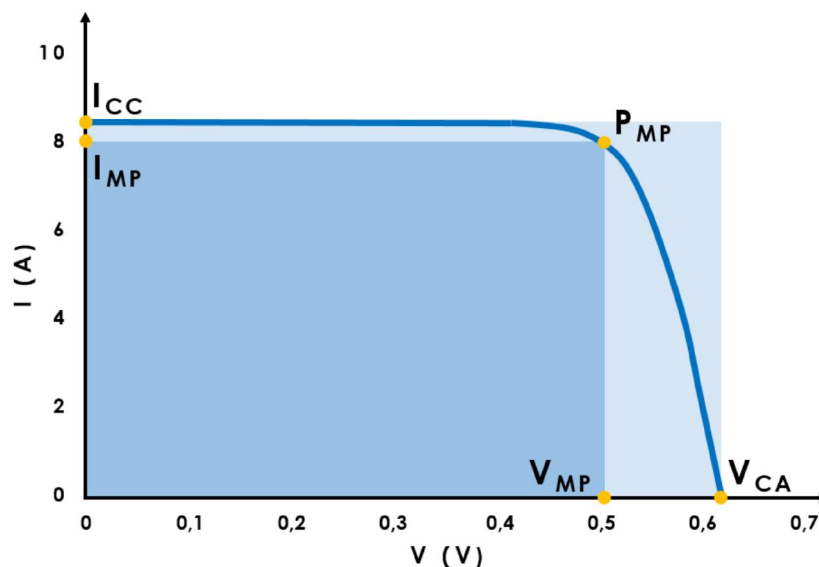
Onde, agora soma-se os símbolos Rs: Resistência em Série ( $\Omega$ ) e Rp: Resistência em Paralelo ( $\Omega$ );

## 2.7 Curva Corrente x Tensão (I x V)

A curva IxV de um dispositivo fotovoltaico, como por exemplo uma célula solar, é uma ferramenta muito importante e imprescindível na análise de seu funcionamento. Com ela é possível determinar os seus principais parâmetros e a qualidade do seu processo de fabricação. A curva IxV de uma célula solar mostra o comportamento desta célula para diversos valores de cargas resistivas aplicada em seus terminais. Cada ponto desta curva está relacionado a potência entregue pela célula para uma determinada carga.

Podemos extrair da curva IxV os parâmetros mais importantes de funcionamento da célula, tais como: a corrente de curto circuito ( $I_{cc}$ ); a tensão de circuito aberto ( $V_{ca}$ ); a potência máxima fornecida pela célula ( $P_{mp}$ ), Fator de forma. Na Figura 2.19 é apresentado alguns dos parâmetros fornecidos pela curva IxV (GASPARIN, 2009).

Figura 2.19 - Curva corrente x tensão.



Fonte: Adaptado de Neves (2016).

Os parâmetros que podemos obter com a curva IxV são:

Corrente de Curto Circuito ( $I_{CC}$ ): É a corrente máxima fornecida pela célula fotovoltaica, e só pode ser medida quando os terminais da célula estiverem em curto circuito. Esse parâmetro depende do fluxo de fótons incidido na célula e da área da mesma, quando as resistências da célula são próximas as idéias a corrente de curto circuito é próxima da corrente fotogerada, descrita pela equação 2.9 (BELOTO, 1983).

$$I_{CC} \approx I_{FG} = A \int_{\lambda_A}^{\lambda_B} G(\lambda) RE(\lambda) d\lambda \quad (2.9)$$

Onde:

$I_{CC}$ : Corrente de curto circuito (A);

$I_{FG}$ : Corrente fotogerada (A)

A = Área do dispositivo ( $m^2$ )

$G(\lambda)$ : Irradiancia Espectral ( $W/m^2nm$ )

$RE(\lambda)$ : Resposta Espectral do dispositivo ( $A/Wnm$ );

$\lambda_A$  e  $\lambda_B$ : Intervalo de comprimento de onda da Resposta Espectral (nm);

Tensão de Circuito Aberto ( $V_{CA}$ ): é a máxima tensão da célula fotovoltaica, a sua medição é realizada quando não existe circulação de corrente no circuito da célula. A dependência da tensão de circuito aberto com a corrente fotogerada e com a corrente de saturação do diodo é descrita pela equação 2.10.

$$V_{CA} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_{FG}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.10)$$

Onde:

$V_{CA}$ : Tensão de circuito aberto (V)

$I_{FG}$ : Corrente Fotogerada (A);

$I_D$ : Corrente de saturação reversa do diodo (A);

Fator de Forma (FF): é razão entre a potência máxima produzida pela célula e o produto dentre a tensão de circuito aberto e a corrente de curto circuito, conforme descrito na equação 2.11, este parâmetro permite obter indicativos de como estão o efeito das resistências em serie e paralelo sobre o dispositivo (VILELA, 2010).

$$FF = \frac{P_{MP}}{V_{CA}I_{CC}} = \frac{V_{MP}I_{MP}}{V_{CA}I_{CC}} \quad (2.11)$$

Onde:

- FF : Fator de forma;
- $P_{MP}$  : Potência máxima (W);
- $V_{MP}$  : Tensão de máxima potência (V);
- $I_{MP}$  : Corrente de máxima potência (A);
- $V_{CA}$  : Tensão de circuito aberto (V);
- $I_{CC}$  : Corrente de curto circuito (A);

Eficiência de conversão é o parâmetro que representa o quanto é eficiente o processo de conversão da célula fotovoltaica, sendo a razão entre a potência máxima da célula sobre o produto entre a área da mesma e a irradiância incidente, conforme apresentado na Figura 2.12, o seu valor é dado em percentual de energia convertida, existem fatores que podem influenciar esse parâmetro, como o processo da fabricação, impurezas do material e defeitos em sua estrutura (PAES, 2012).

$$\eta = \frac{P_{MP}}{P_{IN}} = \frac{V_{MP}I_{MP}}{A G} \quad (2.12)$$

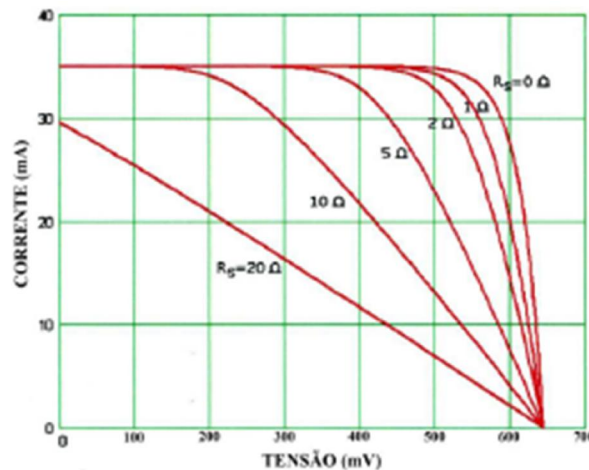
Onde:

- $\eta$  : Eficiência;
- $P_{MP}$  : Potência máxima produzida pelo módulo (W);
- $P_{IN}$  : Potência máxima que chega ao módulo (W);
- $V_{MP}$  : Tensão de máxima potência (V);
- $I_{MP}$  : Corrente de máxima potência (A);
- A : Área do dispositivo fotovoltaico ( $m^2$ );
- G : Irradiância incidente ( $W/m^2$ );

### 2.7.1 Efeito da resistência em série na curva I x V

Um parâmetro importante na célula solar é a resistência em série, pois afeta a curva I x V alterando o formato e diminuindo o valor do fator de preenchimento e conseqüentemente diminuindo a sua potência. A resistência em paralelo afeta a corrente de curto circuito, assumindo assim valores abaixo da fotocorrente devido à perda de corrente na resistência. A Figura 2.20 mostra o efeito da resistência em série na curva I x V em células de silício (BUHLER, 2007).

Figura 2.20 - Efeito da resistência em série na curva I x V em células de silício.

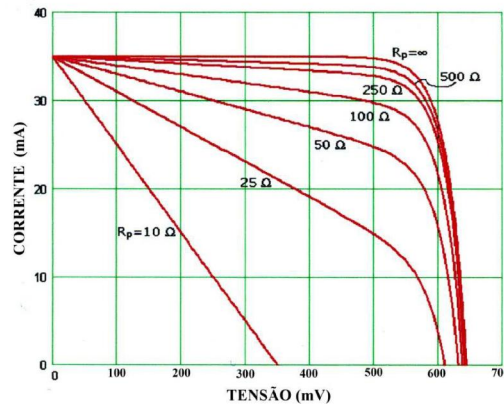


Fonte: Buhler (2007).

### 2.7.2 Efeito da resistência em paralelo na curva I x V

A resistência em paralelo é consequência da fuga de corrente pela junção PN de uma célula, isso acontece devido a micro defeitos na estrutura cristalina e por fuga nas bordas da célula. Esta resistência não afeta a corrente de curto circuito, porém afeta a tensão de circuito aberto e o fator de preenchimento e conseqüentemente causando uma perda na potência máxima da célula. Na Figura 2.21 temos um exemplo de como a resistência em paralelo afeta uma célula solar fotovoltaica (HECKTHBEUER, 2001).

Figura 2.21 –Efeito da resistência em paralelo na curva IxV em células de silício.



Fonte: Buhler (2007).

## 2.8 Resposta espectral e Eficiência Quântica de uma célula solar

A responsividade espectral de uma célula solar fotovoltaica pode ser definida como a capacidade que a célula apresenta ao absorver um fóton de uma determinada energia e gerar um par elétron/lacuna. A curva que relaciona a corrente elétrica gerada pela célula solar para cada comprimento de onda do espectro eletromagnético que incide sobre a mesma é denominada de resposta espectral. Existem alguns fatores que podem influenciar a resposta espectral como o material e a tecnologia utilizada na fabricação da célula (BELOTO, 1983).

Através da curva da resposta espectral de uma célula solar é possível obter diversos parâmetros funcionais importantes desta célula. Entre esses parâmetros estão: a eficiência quântica da célula e o efeito da camada antirreflexo (PAES, 2012).

A resposta espectral ( $RE(\lambda)$ ) de uma célula solar é definida como razão entre a densidade de corrente de curto circuito ( $A/cm^2$ ) e a radiação incidente sobre a célula ( $W/cm^2$ ) em função do comprimento de onda ( $\lambda$ ). A resposta espectral interna de uma célula solar leva somente em consideração a transmitância e a

refletividade da superfície da célula. A relação entre as respostas espectrais é dada pela equação 2.13.

$$RE(\lambda)_{int} = \frac{RE(\lambda)}{1-R(\lambda)} \quad (2.13)$$

Onde:

$RE(\lambda)_{int}$  : é a resposta espectral interna

$RE(\lambda)$ : é a resposta espectral absoluta

$1 - R(\lambda)$ : transmitância do material

A eficiência quântica ( $Q(\lambda)$ ) é definida como sendo o número de pares de elétron-lacuna gerados em regime de curto circuito, relativos ao número de fótons incidentes sobre a célula (FONSECA, 1985). A relação entre a resposta espectral e a eficiência quântica é dada pela equação 2.14.

$$Q(\lambda) = \frac{h c}{\lambda e} \cdot RE(\lambda) \quad (2.14)$$

Onde:

$Q(\lambda)$ : é a eficiência quântica

$h$ : é a constante de Planck;

$c$ : é a velocidade da luz no vácuo;

$\lambda$ : Comprimento de onda;

$e$ : é a carga do elétron;

$RE(\lambda)$ : é a resposta espectral absoluta da célula.

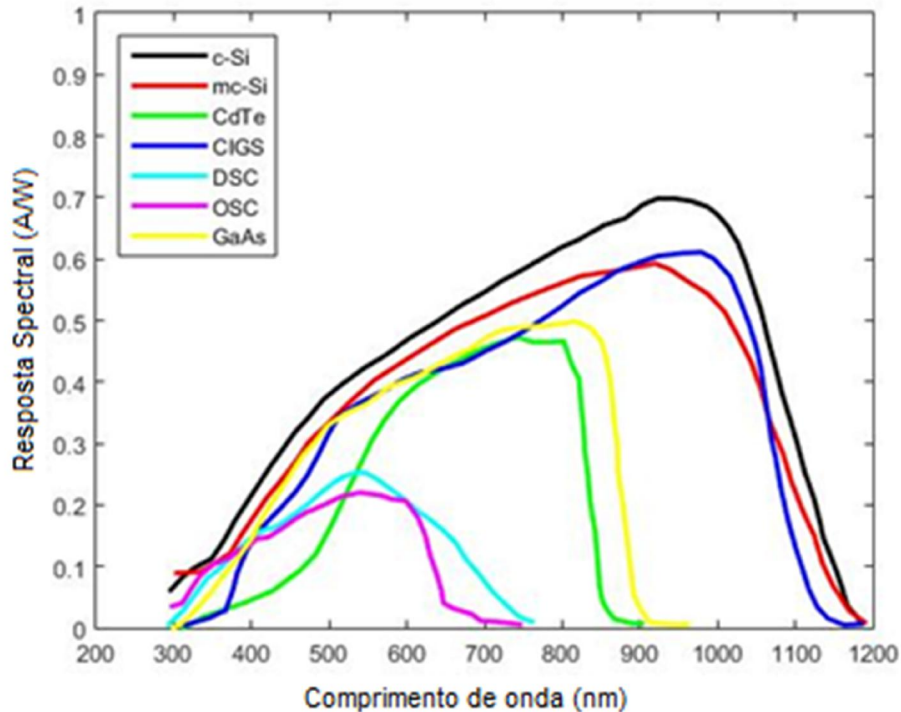
O valor máximo da eficiência quântica é  $Q(\lambda) = 1$ , ou seja 100%, em toda a faixa de comprimentos de onda em que o material da célula é sensível, assim como o valor  $Q(\lambda) = 0$  quando o material não apresenta nenhuma sensibilidade.

Na Figura 2.22, podemos observar a resposta espectral para diferentes tecnologias de células solares. Notamos que existem diferentes tipos de



respostas que variam de acordo com o material que a célula solar é formada, e com isso limitada pelo coeficiente de absorção de cada material.

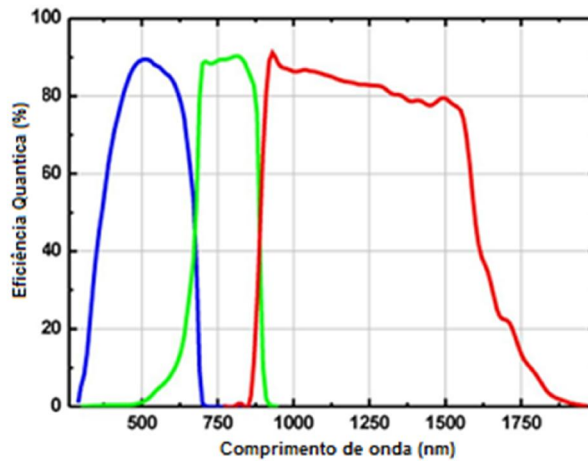
Figura 2.22 - Resposta espectral para diferentes tipos de células.



Fonte: Buhler (2007).

A resposta espectral para células solares de tripla junção é uma combinação das respostas de cada junção individualmente, sendo que cada junção tem sua própria resposta espectral. Por exemplo, na Figura 2.23, para a célula de GaInP/GaInAs/Ge, podemos perceber que cada junção responde numa região do espectro. A junção de topo (GaInP) absorve a radiação no Ultra-Violeta (UV) e Visível, mas funciona como uma janela para a radiação no Infra-Vermelho (IR); a junção do meio (GaInAs) por sua vez, absorve parte da radiação no IR mais próximo e deixa passar o restante do IR, que é absorvido pela junção de base (Ge). Dessa forma, essas três regiões do espectro são absorvidas com maior eficiência de conversão de energia por cada uma das respectivas junções.

Figura 2.23– Resposta individual de cada junção para uma célula solar de três junções.



Fonte: Buhler (2007).

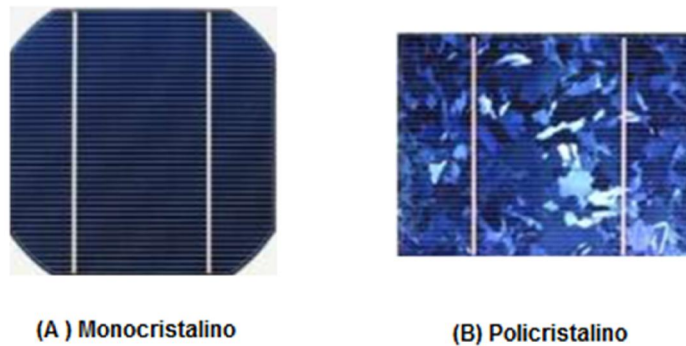
## 2.9 Gerações de célula solar

Basicamente podemos considerar o desenvolvimento tecnológico das células solares em três gerações. O processo de desenvolvimento das células solares é um processo contínuo, não havendo uma interface clara quando uma tecnologia atingiu o desenvolvimento total e outra começou a ser desenvolvida. Essa divisão das gerações leva em conta o aparecimento comercial das células ou a publicação científica sobre a tecnologia desenvolvida. A cronologia adotada tem como referência as principais características inovadoras com base na análise do tipo de célula (PINHO; GALDINO, 2014).

**Primeira Geração:** As células solares de primeira geração são as mais encontradas no mercado. Essas são as células de silício monocristalino ou policristalino, essas células dominam o mercado principalmente por causa do seu baixo custo. Sendo este tipo de célula amplamente utilizada para uso terrestre. Na Figura 2.24 é mostrado um exemplo de célula solar de silício de uso terrestre. Em (a) pode se observar uma célula de silício monocristalino e em (b) uma célula de silício policristalino. As células de silício monocristalino

apresentam uma eficiência maior do que a policristalino, mas em contrapartida apresenta um custo mais alto na sua produção.

Figura 2.24 - Células solares da primeira geração.



Fonte: Adaptada de Cancela (2018).

**Segunda geração:** As células de segunda geração são as células de filmes finos, como as células de telureto de cádmio e o silício amorfo. Essa geração significou um grande avanço, pois possibilitou a produção de células de poucos microns de espessura. A Figura 2.25 apresenta um exemplo de painel solar montado com base em silício amorfo.

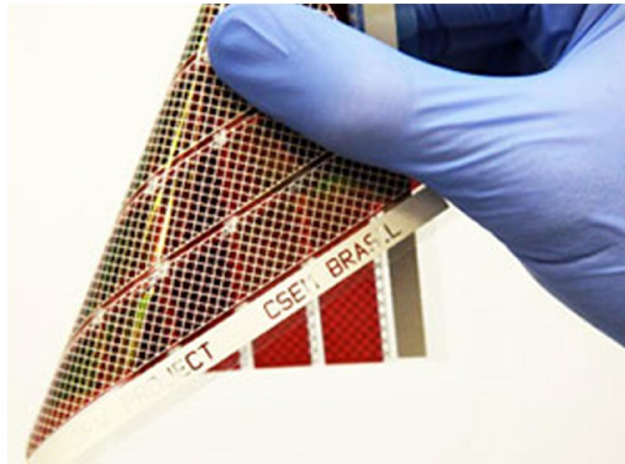
Figura 2.25–Painel Solar formado por Células solares de silício amorfo.



Fonte: Solar (2019).

**Terceira Geração:** Enquadram-se nessa categoria as células de multijunção (que é o foco deste trabalho), células de corantes e as células orgânicas. As células de corantes e as células orgânicas são células de baixa eficiência, porém estão em grande ascendência, sempre presente em pesquisas de importantes centros tecnológicos e em universidades dentro e fora do Brasil. Na Figura 2.26 é possível observar um exemplo de célula solar de corante.

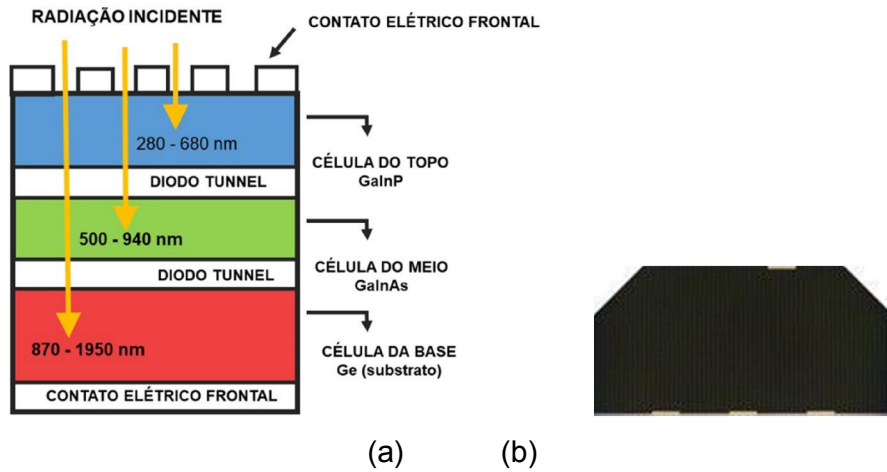
Figura 2.26 - Célula solar de terceira geração.



Fonte: Solar (2019).

A célula solar de tripla junção é composta por três junções de materiais diferentes para que possam aproveitar melhor o espectro solar e com isso ter uma eficiência melhor que a primeira e segunda geração. Na Figura 2.27(a) temos um diagrama esquemático de célula solar de tripla junção e na Figura 2.27(b) podemos observar a imagem de uma célula solar de GaInP/GaInAs/Ge de aplicação solar.

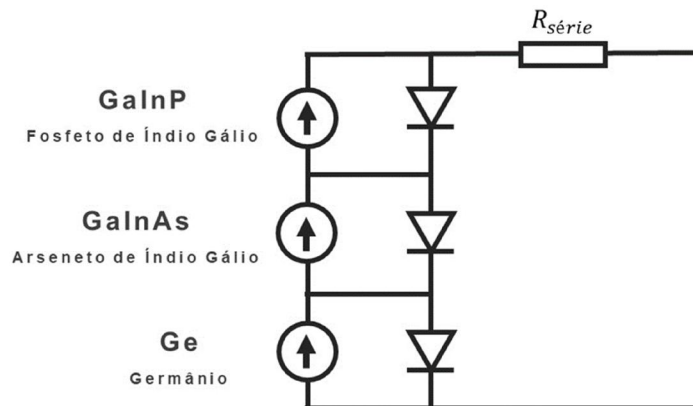
Figura 2.27 - Esquema das junções da célula solar de tripla junção.



Fonte: Abreu (2006).

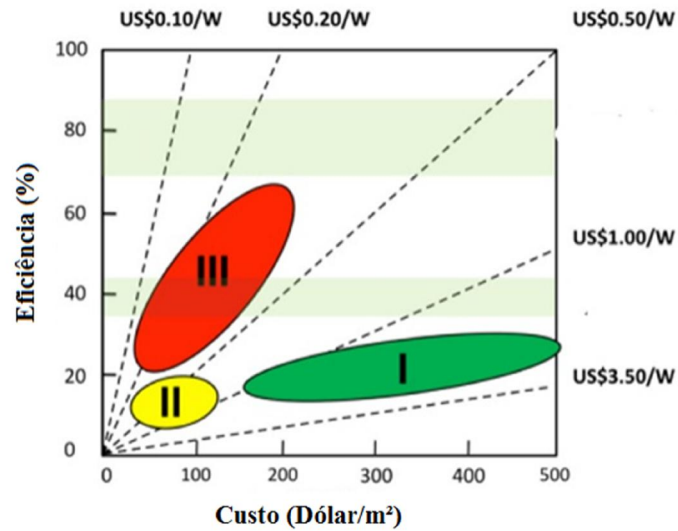
A formação da célula solar nos apresenta três junções de modo serial, então podemos considerar as junções como diodo ou como chaves. É utilizado esta analogia pois para que tenha condução ou geração de corrente elétrica as três células têm que estar iluminada, ou no caso de chaves tem que estar fechadas, permitindo assim a circulação de corrente elétrica. Na Figura 2.28 temos um esquema ilustrativo da célula solar como um diodo.

Figura 2.28 - Esquema reduzido de uma célula solar como diodo.



As eficiências das gerações podem ser vistas na Figura 2.29. Através dela é possível notar que a terceira geração possui potencial de chegar a eficiências maiores que as duas gerações anteriores garantindo menores custos.

Figura 2.29 - Relação de Custo por eficiência de cada geração de célula solar. Os números I, II e III indicam as gerações das células solares.



Fonte: Adaptada de Kouhnavard (2014).

### 3 METODOLOGIA

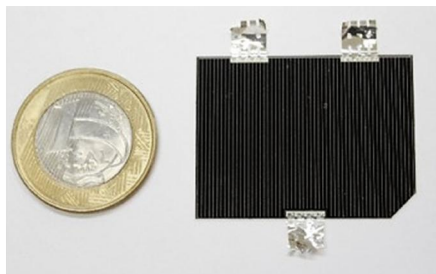
Este trabalho visou montar um sistema simples para obter a resposta espectral de células solares de tripla junção utilizando equipamentos e dispositivos (lâmpadas, filtro ópticos, detectores de radiação etc.) disponíveis no laboratório GDF e melhorar o sistema de aquisição de dados para obtenção das curvas de corrente-tensão, utilizando equipamentos da National Instruments.

#### 3.1 Células usadas na caracterização

##### 3.1.1 Célula solar de tripla junção

Este trabalho teve como principal elemento de estudo as células solares de tripla junção remanescentes do lote das utilizadas no CBERS-4. A Figura 3.1 mostra um conjunto (célula solar, vidro de proteção, e interconector) denominado SCA (Solar Cell Assembly) comparado com uma moeda de um Real. Neste trabalho foram utilizadas seis células solares deste tipo nomeadas como: C1; C2; C3; C4; C5 e C7.

Figura 3.1 - SCA (Solar Cell Assembly) utilizada no CBERS-3 e 4.

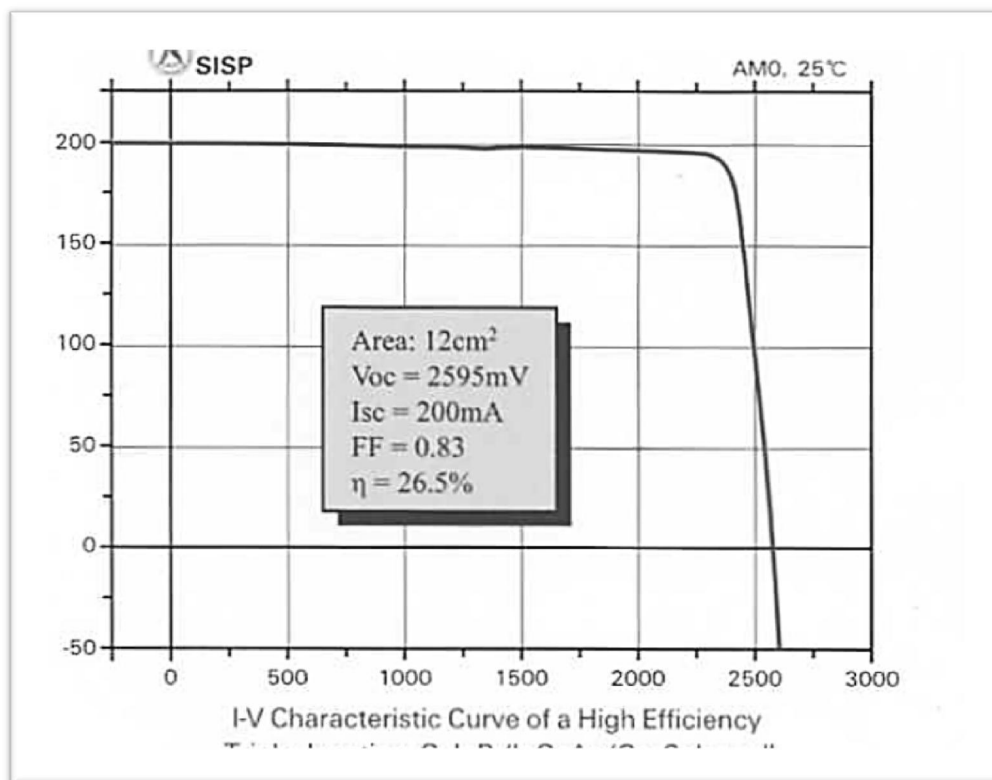


As células solares de tripla junção utilizadas neste trabalho são formadas por junções dos seguintes materiais GaInP/GaInAs/Ge, o fabricante não fornece as especificações individuais de cada junção, porém fornece especificações genéricas. Por exemplo, a tabela 3.1 mostra os parâmetros da curva  $I \times V$  do lote que foi utilizado pelo programa CBERS-4, conforme dados do fabricante SISP. A Figura 3.2 mostra a curva característica de corrente por tensão ( $I \times V$ ) da célula solar de tripla junção típica especificada na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Tabela de especificações típicas das células solares de tripla junção.

Voc	2595 mV
Isc	16.6 mA/cm <sup>2</sup>
Vmax	23300 mV
Jmax	15.6 mA/cm <sup>2</sup>
Pmax	35.88 mW/cm <sup>2</sup>
η	26.50%
Espessura	0,17 mm ± 0,03mm
Area	12 cm <sup>2</sup>

Figura 3.2 - Típica Curva IxV de uma célula de tripla junção.



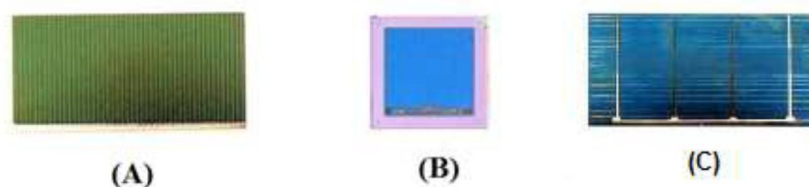
Fonte: LIT/INPE (2019).



### 3.1.2 Ajuste do Simulador Solar

Para o ajuste de intensidade do simulador solar, visando obter a condição de AM0 ( $1353 \text{ W/m}^2$ ), foram utilizadas três células solares de silício como padrões, uma chinesa, uma da Spectrolab e outra fabricada na USP, apresentadas na Figura 3.3 e cujas características se encontram na Tabela 3.3. A chinesa (CHINA 923), fabricada e com calibração original na SISP – China, foi utilizada como padrão de referência. A Spectrolab e a fabricada no laboratório de Microeletrônica da USP foram calibradas em comparação com a chinesa e utilizadas para verificação da intensidade do simulador antes de cada medida.

Figura 3.3 - Células Solares de Silício.



(A) Célula Solar Spectrolab 1500  
 (B) Célula Solar USP 25-01  
 (C) Célula Solar Chinesa 923

As características das células solares estão apresentadas na tabela 3.2.

Tabela 2.2 - Característica Célula solares

<b>Característica</b>	<b>Célula USP</b>	<b>Spectrolab</b>	<b>Chinesa</b>
<i>Pais</i>	Brasil	EUA	China
<i>Material</i>	Si - mono	Si - mono	Si – mono
<i>Área (cm<sup>2</sup>)</i>	2,4	8	7,8
<i>Faixa Espectral (nm)</i>	400-1100	400-1100	400-1100
<i>Tipo de uso</i>	Terrestre	Espacial	Espacial

Devido ao fato da célula ser de silício e ter sua faixa espectral limitada a 1100 nm, para verificação da irradiância do simulador solar foi utilizado o piranômetro de termopilha, modelo CM11 da Kipp&Zonen, calibrado no Laboratório de Instrumentação Meteorológica – LIM, com especificações apresentadas na tabela 3.3. O valor da Irradiância obtido com o piranômetro foi de 1321 W/m<sup>2</sup>, confirmando a condição de AM0 dentro da incerteza do equipamento.

Tabela 3.3 - Especificações do piranômetro CM11.

Fabricante	Kipp&Zonen
Faixa Espectral	305 a 2800 nm
Sensibilidade	4 a 6 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
Tempo de Resposta	15 s
Temperatura de Operação	de -40°C a 80° C

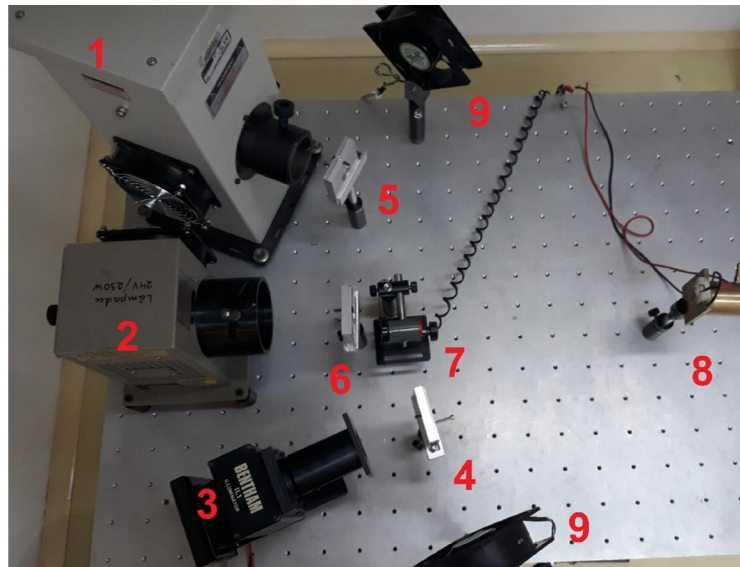
Fonte: Campbell (2010).

### 3.2 Sistema de Caracterização Espectral

A determinação precisa da função de resposta espectral de um radiômetro solar, ou mesmo de uma célula solar, é complexa e exige a utilização conjunta de fontes de radiação calibrada em espectro, monocromadores de precisão, *chopper* e amplificadores como *lock-in*, além de um rigoroso controle das condições ambientais tais como temperatura, umidade e fontes espúrias de radiação. As intensidades de radiação medidas nestes sistemas são muito pequenas e os sinais elétricos nas saídas dos sensores para cada comprimento de onda são muito fracos, o que exige amplificadores especiais com alta relação sinal ruído. Como não dispomos de tais equipamentos a caracterização dos protótipos foi realizada utilizando o sistema descrito na Figura 33. O nosso objetivo neste trabalho foi obter a resposta espectral relativa dos protótipos com fins qualitativos, cientes de que não seria possível obter uma resposta com alto grau de precisão.

Para a realização da caracterização espectral foi montada um sistema de medida em uma bancada ótica para caracterização das três junções de uma célula solar de tripla junção, como apresentado na Figura 3.4. A caracterização individual de cada junção da célula solar necessita que as outras duas junções estejam iluminadas com intensidade suficiente para que seus diodos permaneçam conduzindo corrente. Para que isso seja possível, foram utilizadas três lâmpadas selecionadas com base no seu espectro e, também, pela disponibilidade no laboratório. Duas delas foram utilizadas para a luz de ativação das junções e a outra foi utilizada para gerar a luz de medida na junção cuja resposta espectral estava sendo avaliada. A luz de medida foi filtrada em bandas estreitas (de 10 nm a 12 nm) utilizando-se filtros de interferência nos diversos comprimentos de onda selecionados para cada junção em medida. Um modulador óptico de luz (chopper) foi utilizado para modular a luz de medida a fim de melhorar a relação sinal-ruído.

Figura 3.4 - Sistema de Caracterização Espectral.



1) Lâmpada Xe de 500W; 2) Lâmpada QTH de 250W; 3) Lâmpada QTH de 200W; 4) Suporte para filtros passa banda; 5) Suporte para filtros passa banda; 6) Suporte para filtro de interferência; 7) Chopper; 8) Suporte para célula solar e 9) Ventoinha para refrigeração dos filtros.

Os espectros das lâmpadas 1, 2 e 3 são mostrados nas Figuras 3.5, 3.6 e 3.7, respectivamente.

Figura 3.5 - Espectro de uma lâmpada de Xe com 500 W medido a uma distância de 50 cm.

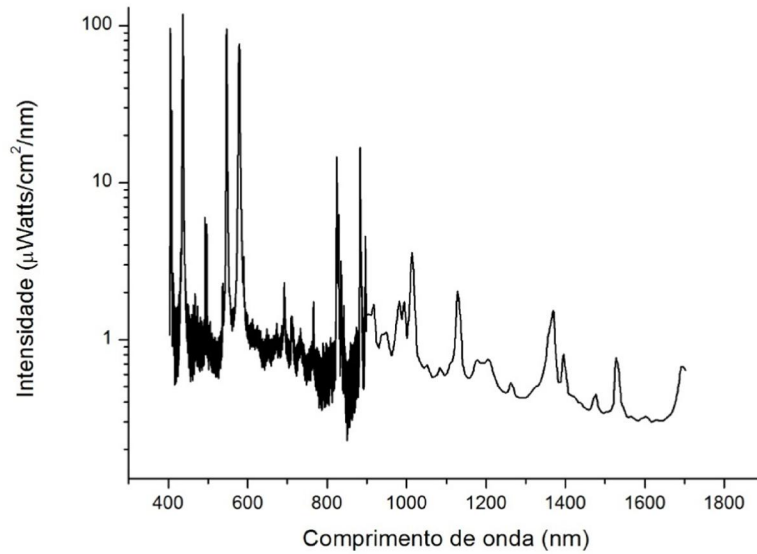


Figura 3.6 - Espectro de uma lâmpada QTH com 250 W medido a uma distância de 50 cm.

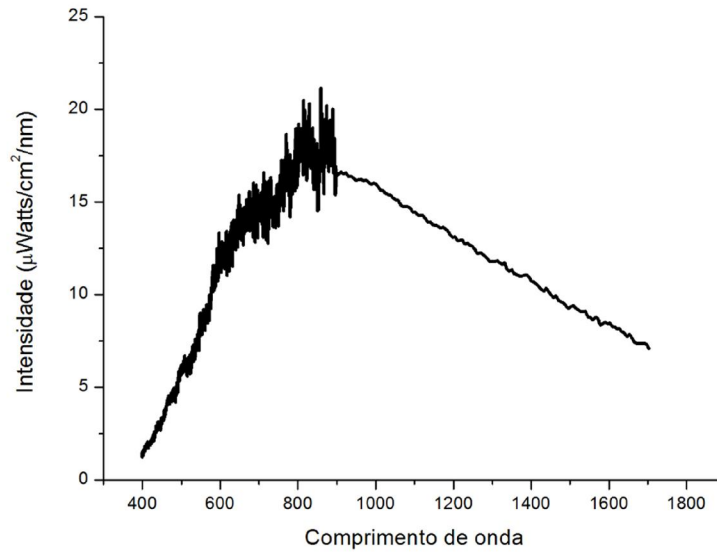
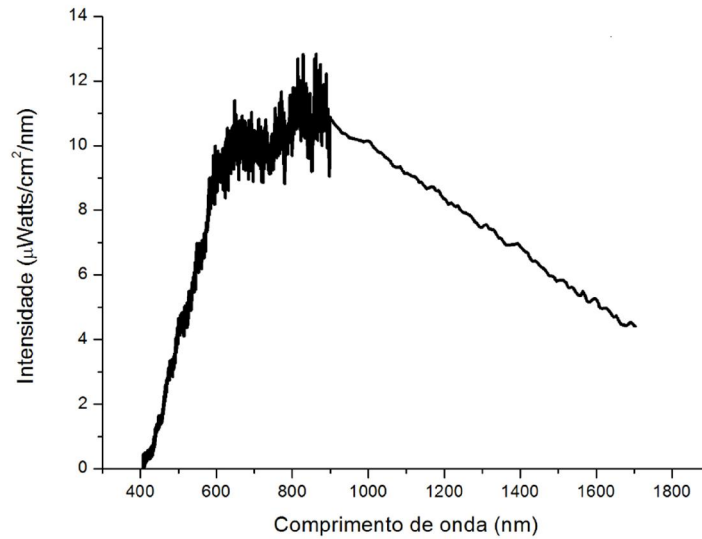
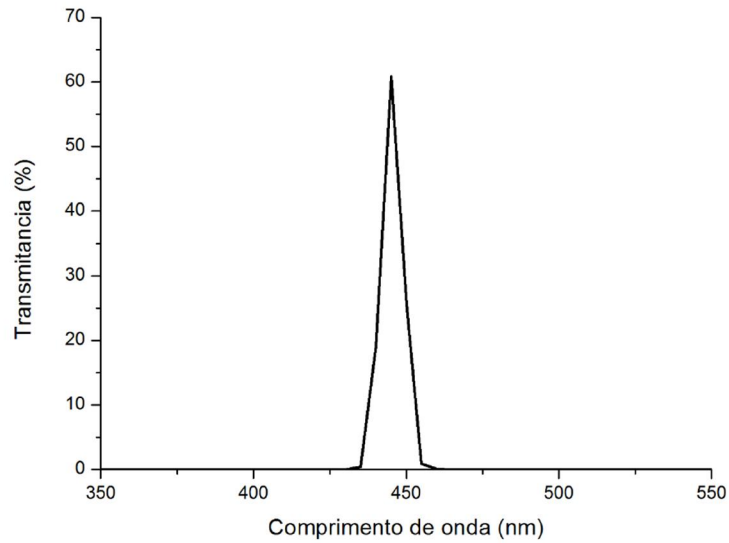


Figura 3.7 - Espectro de uma lâmpada QTH com 250 W medido a uma distância de 50 cm.



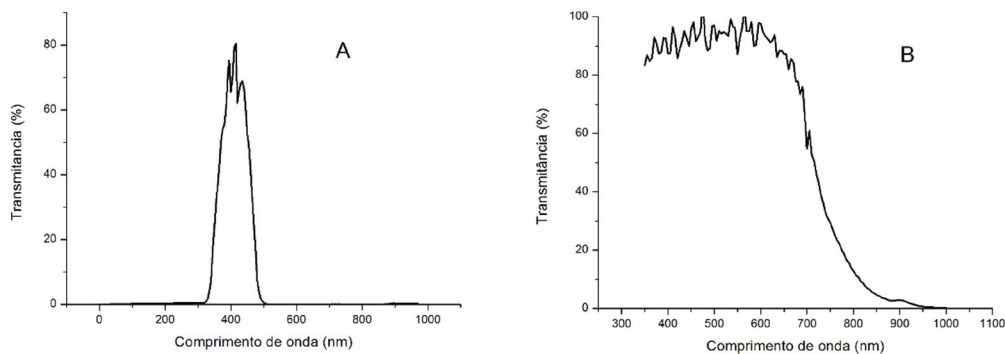
No sistema foram utilizados filtros óticos de interferência para a geração da luz de medida e filtros passa banda e passa alta para a luz de ativação das junções. O ideal seria ter uma luz branca e de intensidade igual em todos os comprimentos de onda para cada célula, no entanto, com as lâmpadas de que dispomos, o ajuste do espectro de ativação dos diodos foi obtido com a utilização de filtros passa banda. Os filtros de interferências utilizados têm uma banda passante de 10 a 12 nm e os comprimentos de onda centrais são: 350, 400, 449, 500, 549.5, 600, 650, 700, 749.5, 800, 849.5, 900, 950, 1000, 1050, 1100, 1150, 1200, 1250, 1300, 1350, 1400, 1450, 1500, 1550, 1600, 1650 e 1700 nm. Na Figura 3.8 é apresentada, como exemplo, a transmitância de um filtro interferência com comprimento de onda central de 449 nm.

Figura 3.8 - Transmitância do filtro de interferência de 449nm.



Os filtros passa banda utilizados no trabalho para gerar a luz de polarização, juntamente com as lâmpadas, foram os filtros BG12 e KG1. Na Figura 3.9 é apresentado o espectro de transmitância desses filtros.

Figura 3.9 - Filtros passa banda.

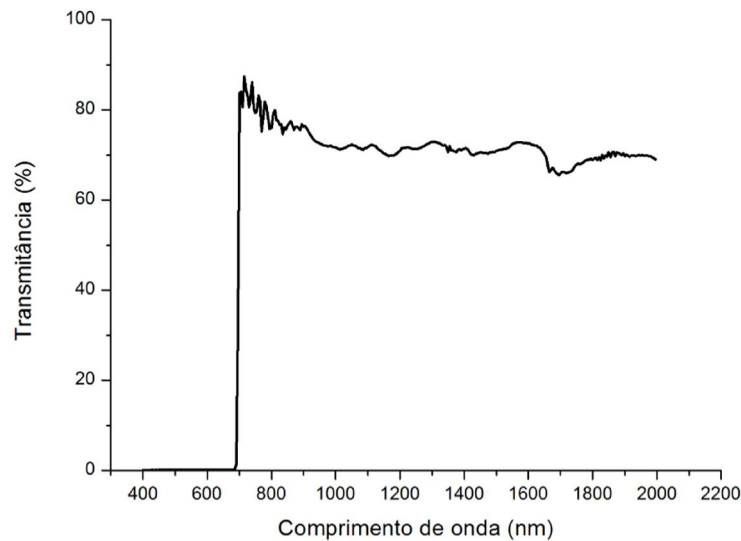


A) Filtro Passa Banda BG12 (310 a 510nm)

B) Filtro Passa Banda KG1 (200 a 950nm)

Ainda, foram utilizados filtros passa alta de 700nm e 900nm para a geração da luz de polarização junto com as lâmpadas. Na Figura 3.10 é apresentado, como exemplo, o espectro de transmitância do filtro passa alta de 700nm.

Figura 3.10 - Transmitância do filtro passa alta de 700nm.



### 3.2.1 Equipamentos eletrônicos utilizados no sistema de resposta espectral.

Juntamente com os dispositivos já apresentados, foram utilizados outros equipamentos neste trabalho. Abaixo são descritos esses equipamentos, os quais estavam disponíveis no laboratório de energia solar do LABAS/INPE.

- Espectrômetro modelo GetSpec NIR128L-1.7TE, que responde numa faixa espectral de 900 a 1700nm e possui resolução nominal de 12,5nm. Este equipamento foi utilizado para obter os espectros do simulador solar e das configurações da banca de medida espectral.

-Espectrômetro modelo Thorlabs CCS-200, que responde numa faixa espectral de 200 a 1000 nm, possui resolução nominal de 2 nm e possui um tempo de integração máximo de 60s. Este equipamento foi utilizado para obter os espectros do simulador solar e das configurações da banca de medida espectral.

Ambos os espectrômetros foram calibrados com lâmpada halógena de tungstênio calibrada da *Optronic Laboratories* de 200W modelo S-709 e os espectros coletos de 300 até 1700nm.

- Voltímetro Sincrono ou Amplificador *Lock-in*, modelo SR850-DSP, possui sensibilidade de 2nV a 1V, impedância de entrada de  $10M\Omega + 25pF$ , precisão típica de  $\pm 0,2\%$  e resolução de fase de  $0,001^\circ$ , foi utilizado para realizar a leitura da tensão das células solares em estudo, iluminadas pela radiação modulada pelo *Chopper*.

- Modulador mecânico de Luz ou *Chopper*, marca *Stanford Research System*, modelo SR540, com frequência ajustável de 4Hz a 3,7 kHz, foi utilizado para modular a luz de medida e evitar que tenha qualquer interferência de outras fontes de radiação externas.

- Adaptador GPIB para USB Modelo: GPIB-USBHS, fabricado pela *National Instruments*, foi utilizado para realizar a comunicação entre as cargas dinâmicas e o computador no sistema de caracterização elétrica IxV.

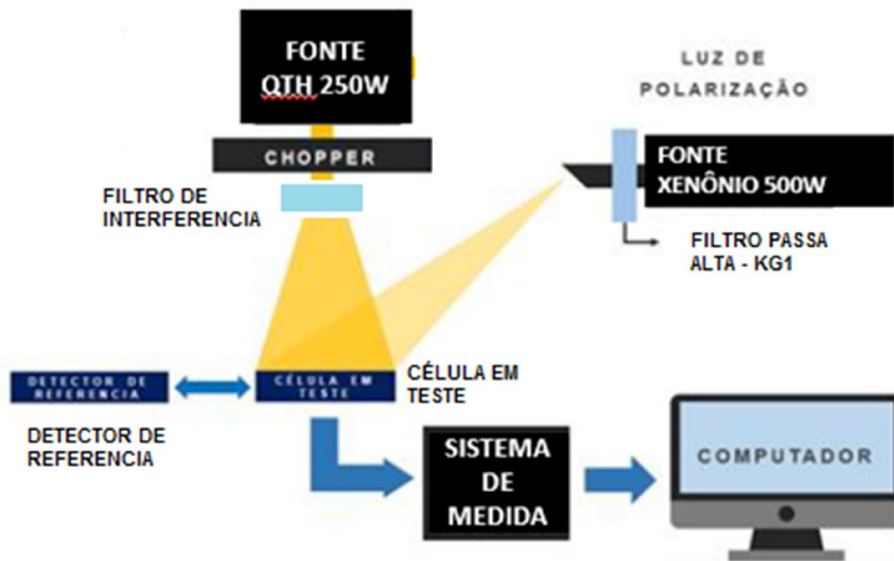
### **3.2.2 Configuração para caracterização da junção de topo**

Para a caracterização individual de cada junção de uma célula solar de tripla junção foi montado uma configuração diferente pois existe a necessidade de polarizar as outras duas junções.

A configuração para a caracterização da junção de topo, Figura 3.11, consiste em uma lâmpada de Xe de 500W, pois tem intensidade alta acima de 700 nm, e um filtro passa alta de 700 nm para a luz de ativação das junções do meio e da base. Note que, com esse filtro, é possível ter uma alta intensidade acima de 700nm e nenhuma intensidade abaixo desse comprimento de onda. Para a luz de medida, foi utilizada uma lâmpada QTH de 250W com filtros interferência com bandas centradas em: 350, 400, 449.5, 500, 549.5, 600, 650, 700, 749.5nm.



Figura 3.11–Esquema ilustrativo para caracterização da junção de topo.



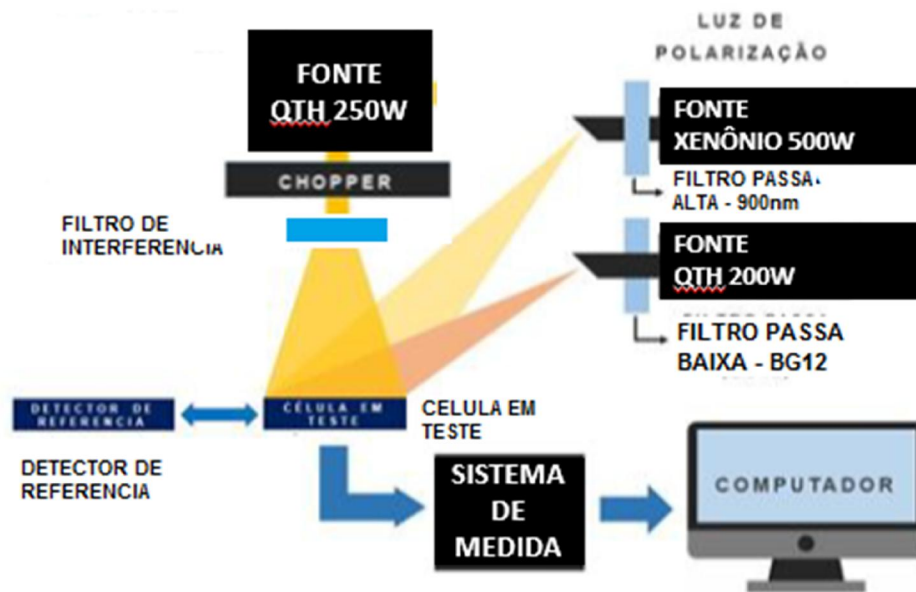
Foi utilizado um modulador mecânico de luz (*chopper*) em 32Hz para separar a luz de medida da luz de polarização e de possíveis interferências de frequências externas. Para realizar a leitura do sinal modulado pelo *chopper* foi utilizado um amplificador look-in.

### 3.2.3 Configuração para caracterização da junção do meio

Para caracterização da junção do meio é necessário polarizar a junção do topo e a junção da base, e com isso a configuração para a caracterização, Figura 3.12, consiste em uma lâmpada de Xe de 500W e um filtro passa alta de 900 nm para eliminar o espectro antes de 900nm e com isso ativar o diodo da junção de base e uma lâmpada QTH de 200W com filtro passa banda BG12, com esse filtro eliminamos os comprimentos de luz acima de 550nm e ativamos a junção de topo e esse conjunto formamos a luz de ativação das junções e uma lâmpada QTH de 250W com filtros interferências para luz de medida, os

filtros interferenciais usados foram: 500, 549.5, 600, 650, 700, 749.5, 800, 849.5nm.

Figura 3.12 - Esquema ilustrativo para caracterização da junção do meio.



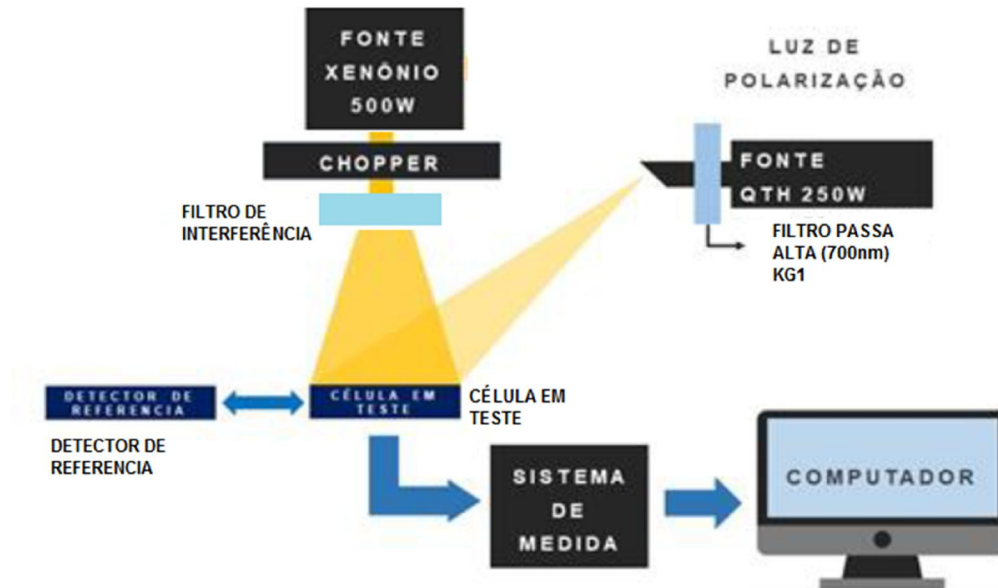
Foi utilizado um *chopper* em 32Hz para separar a luz de medida da luz de polarização e de possíveis interferências de frequências externas. Para realizar a leitura do sinal modulado pelo *chopper* foi utilizado um multímetro síncrono para realizar a leitura (amplificador look-in).

### 3.2.4 Configuração para caracterização da junção de base

Para a caracterização da junção de base é necessário a polarização da célula do topo e da célula do meio, e com isso a configuração para a caracterização, Figura 3.13, consiste em uma lâmpada QTH de 250W com filtro passa banda KG1 para a luz de ativação das junções, pois com essa configuração é possível eliminar os comprimentos de onda baixo de 1000nm e para luz de medida é utilizado uma lâmpada Xe de 500W com filtros interferências, os filtros

inferenciais usados foram: 800, 849.5, 900, 950,1000, 1050, 1100, 1150, 1200, 1250, 1300, 1350, 1400, 1450, 1500, 1550 e 1600nm.

Figura 3.13 - Esquema ilustrativo para caracterização da junção da base.



Para realizar a normalização da luz de medida, pois as fontes de luz não emitem uma radiação plana em comprimento de luz e os filtros de interferências não apresentam a mesma transmitância e nem a mesma largura de banda passante, devido a isso foi utilizado o radiômetro de termopilha Laser Precision Corp. Modelo Rk-5720 que responde em comprimento de onda de 250 a 3000nm.

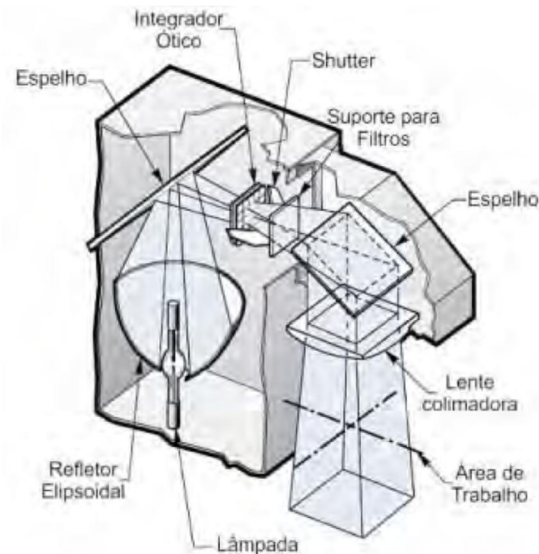
### 3.3 Sistema de caracterização elétrica

Para obtenção da curva Corrente x Tensão de um dispositivo fotovoltaico o Grupo de Dispositivos Fotovoltaicos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais dispõem de um simulador solar e de um sistema de aquisição de dados para caracterização de células solares.

### 3.3.1 Simulador Solar

O simulador solar do Grupo de Dispositivos Fotovoltaicos é o simulador solar da Oriel de 1000 Watts modelo 81193, Figura 3.14, sendo alimentado por uma fonte estabilizada e utiliza uma lâmpada de descarga em gás de alta pressão de Xenônio de 1000W, assim iluminando uma área de 152x152 mm<sup>2</sup> e reproduzindo um o espectro AM0 ou AM1.5G, conforme inserção de filtros em seu interior. Além destes componentes, ele é composto por um refletor elipsoidal, dois espelhos à 45°, um integrador ótico, um *shutter* e uma lente colimadora.

Figura 3.14 - Simulador solar da Oriel modelo 81193.



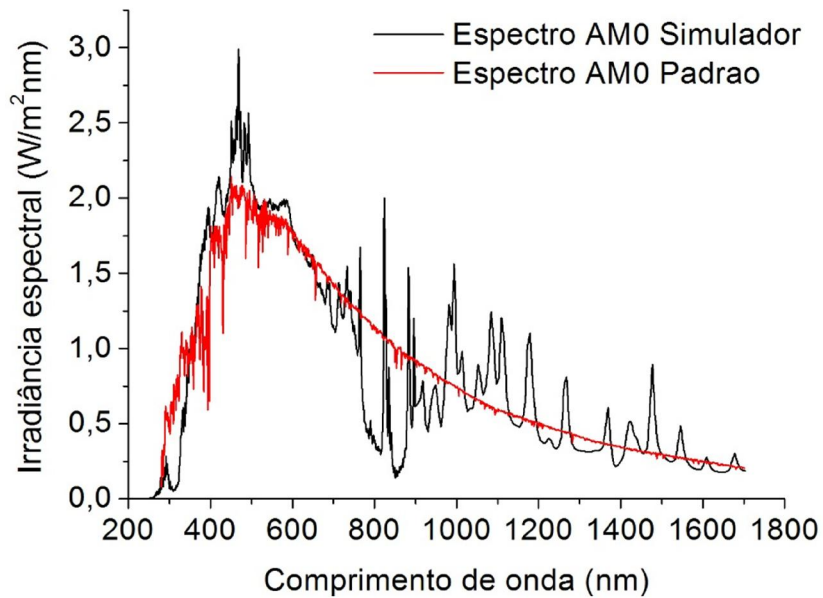
Fonte: Newport (2011).

O sistema de medida possui uma base com temperatura controlada e termicamente estável e um sistema de sucção para melhorar o contato da célula solar com a base.

A fonte de luz utilizada pelo simulador neste trabalho é uma lâmpada de descarga em arco de Xenônio 1000 Watts Ozone-Free da Newport modelo 6271. Com esta fonte no simulador é possível obter o espectro AM0 próximo do espectro padrão da ASTM, ilustrado na Figura 3.15, o espectro foi obtido

utilizando os espectrômetros do laboratório e a potencia do simulador foi conferida para AM0 utilizando a célula solar calibrada CHINA-923.

Figura 3.15 - Espectro AM0 da ASTM x Espectro AM0 do Simulador Solar.



Fonte: Paes (2012).

Para manter a estabilidade da lâmpada, um fotodiodo localizado sob a lente colimadora ajusta o brilho variando a corrente de alimentação da fonte. O simulador está sobre uma mesa com controle de altura em 37cm, sendo de alumínio anodizado em preto, não tem um índice de refletância alto, o simulador está ilustrado na Figura 3.16.

Figura 3.16 - Simulador Solar.



Fonte: Paes (2012).

Com este controle horizontal é possível a caracterização de diversos dispositivos além de célula solares, devido a sua versatilidade na altura da mesa em relação ao simulador.

### **3.3.2 Sistema de aquisição de dados**

A modernização do sistema de aquisição teve como início a troca do amperímetro e do voltímetro pelo sistema CompactDaq, da National Instruments, este sistema foi escolhido pela possibilidade de inserção de módulos com diferentes funções possibilitando a versatilidade do sistema.

O sistema CompactDaq é um sistema modular que permite a inserção de vários módulos com funções diferentes, no caso do sistema de aquisição de dados foi utilizado módulos para medir corrente e tensão, esse sistema de aquisição utiliza de uma comunicação USB para troca de dados com o microcomputador. Na Figura 3.17 é ilustrado um comparativo da modernização do sistema.

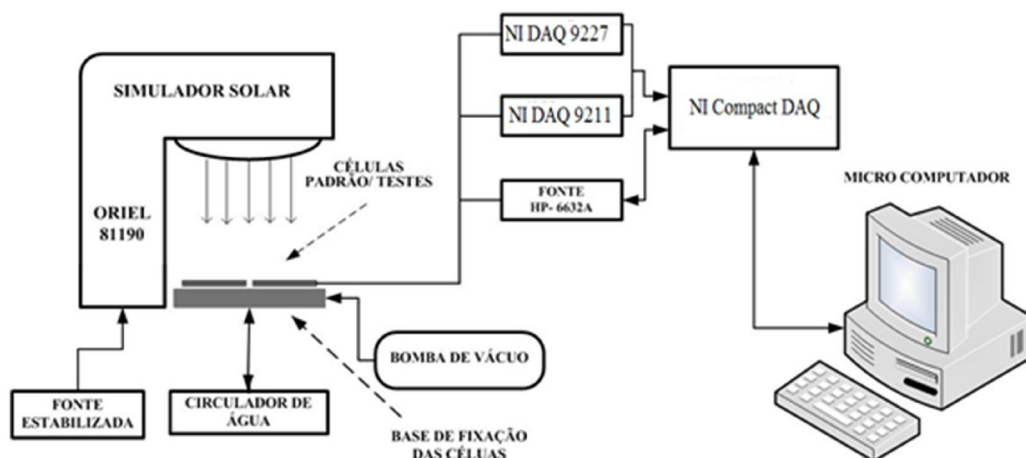
Figura 3.17 - Modernização do sistema IxV.



A utilização do CompactDaq, ao invés do voltímetro e amperímetro, possibilita ao sistema trocar a conexão GPIB por uma conexão USB, com isso o sistema pode ser facilmente instalado em qualquer microcomputador.

Além dos módulos de aquisição de dados que formam o CompactDaq, o sistema conta com uma fonte de carga variável, uma fonte de tensão reversa e um computador para registro dos dados. A Figura 3.18 apresenta uma ilustração do sistema.

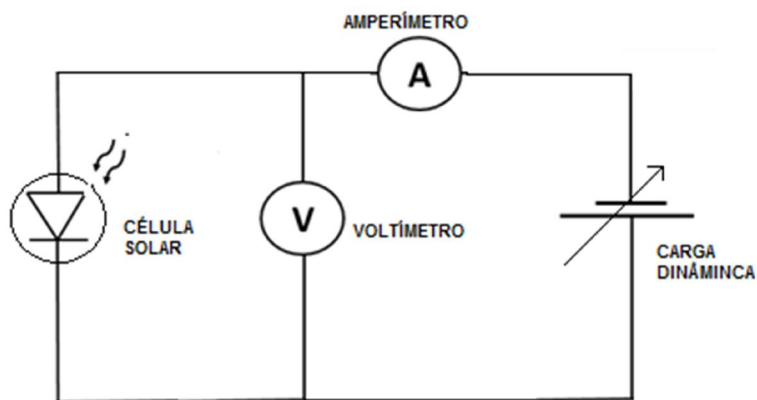
Figura 3.18 - Sistema de caracterização de células solares.



Fonte: Adaptado de Paes (2012).

O circuito para fazer a aquisição da curva  $I \times V$  da célula solar, consiste em uma fonte diretamente polarizada, uma fonte inversamente polarizada, um voltímetro e um amperímetro, é apresentado o circuito na Figura 3.19.

Figura 3.19 - Circuito para medição da Curva  $I \times V$ .



Com o circuito apresentado é possível realizar a medição de célula solar de silício e de células solares de tripla junção que foram utilizadas neste trabalho.



### 3.3.3 Programa para caracterização elétrica de células solares

O programa de caracterização elétrica de célula solares do GDF foi modernizado juntamente com o sistema de aquisição, o programa antigo é um programa desenvolvido em linguagem Basic e desenvolvido para comunicação com placa GPIB.

A modernização do sistema de medidas, juntamente com o programa, foi refeita com a ajuda do estagiário do LABAS/INPE, Yan Ribeiro Chaves. O novo programa foi desenvolvido em Labview, que é uma linguagem de programação gráfica em 2D que segue a mesma ordem do fluxo de dados. Esta linguagem permite ao usuário a facilidade de apenas inserir rotinas com ícones do próprio programa. O código programado em Labview tem como extensão “.vi” que significa Virtual Instruments.

O programa Labview, o CompactDAQ e os módulos de aquisição de tensão e corrente são fabricados pela National Instruments assim permite total integração entre si. O programa desenvolvido, tem as mesmas funcionalidades do anterior, como por exemplo a possibilidade de escolher a quantidade de pontos da curva IxV antes e depois do “joelho” da curva.

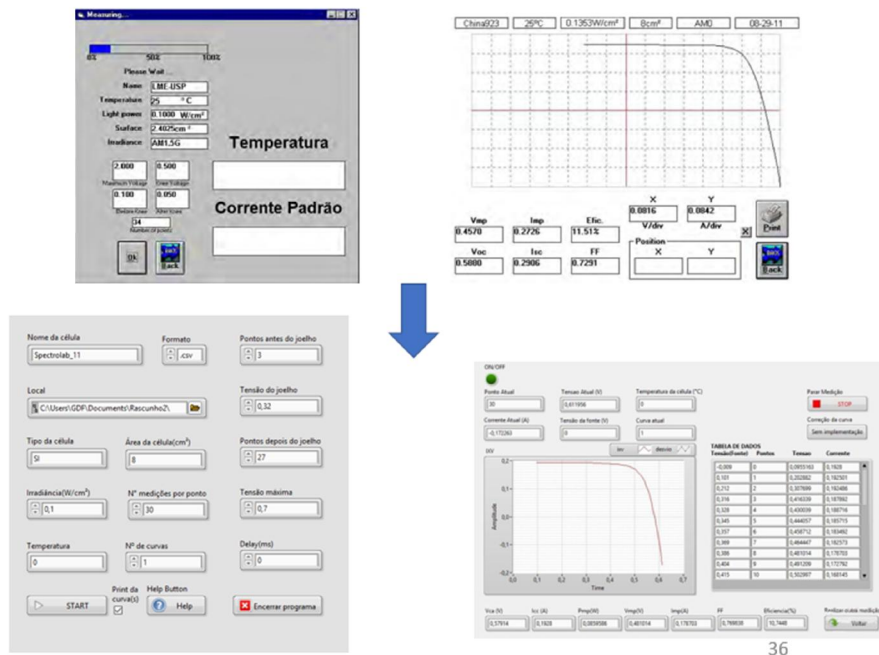
Além das funcionalidades do programa anterior o programa novo permite que você selecione o formato do arquivo que será gravado os dados, este formato pode ser “.txt” ou formato “.csv”, ambos os formatos podem ser lidos por programas como o Microsoft Excel ou Origin. Outro diferencial implementado no programa é a possibilidade de realizar a leitura do mesmo ponto diversas vezes para que se possa ter uma estatística e repetir a obtenção da curva a quantidade de vezes selecionada. Existe no novo programa a possibilidade de tirar um *print* da curva em tempo real para uma rápida análise do seu formato enquanto é realizado o processo demais vezes e pode-se inserir um tempo de *delay* entre um ponto e outro caso o usuário tenha a necessidade.

Enquanto a medição está acontecendo, o usuário tem a possibilidade de acompanhar na tela de saída a informação em tempo real. Na tela de saída, o

usuário pode acompanhar os parâmetros da curva IxV, além de acompanhar o arquivo gerado em tempo real, sabendo assim em qual ponto se encontra a medição. O usuário escolhendo a opção de realizar diversas leituras do mesmo ponto torna possível, na tela de saída, visualizar de forma gráfica o desvio padrão destes pontos junto com o ponto médio calculado.

No final da medição é gerado um arquivo salvo no local escolhido na tela inicial do programa, e neste arquivo é apresentado os valores de desvio padrão de cada ponto, junto com o valor e corrente e de tensão medido. Na Figura 3.20 é apresentado um comparativo entre o programa antigo e o programa novo de aquisição de dados

Figura 3.20 - Comparativo entre o programa antigo e o programa novo de aquisição de dados.



No mesmo arquivo final é apresentado os Valores da Corrente de curto circuito, Tensão de Circuito aberto, Máxima Potência, corrente de máxima potência, tensão de máxima potência, eficiência e fator de forma da curva. Se o usuário do programa tenha escolhido realizar diversas vezes a mesma medida de forma automática será gerado diversos arquivos, um para cada medida selecionada.

### 3.3.4 Simulador Solar LAPSSGen 2

Durante a execução deste trabalho foi usado o simulador LAPSSGen 2, Figura 3.21, como referência para o estudo das curvas  $I \times V$  obtidas no simulador solar Oriel de 1000W com espectro AM0 como também para comparação dos resultados obtidos com o novo sistema e com o novo programa de caracterização elétrica.

Figura 3.21 - Simulador LAPSSGen 2.



Fonte: LIT/INPE (2019).

O simulador LAPSSGen 2 é o simulador atualmente usado para a caracterização elétrica dos painéis utilizados no projeto CBERS, este simulador solar é um simulador do tipo pulsado capaz de gerar 3 pulsos por minutos. Está localizado na sala limpa do Laboratório de Integração e Teste (LIT/INPE).

## 4 RESULTADOS

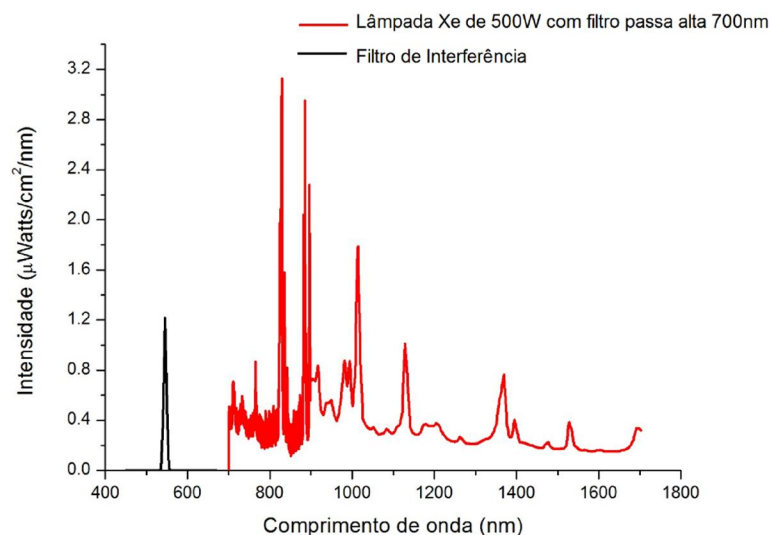
Esta seção mostra os resultados obtidos com a caracterização das junções individuais de uma célula de tripla junção, junto com a resposta completa (três junções) da célula solar, além de, apresentar a curva corrente x tensão da célula solar C5, a medição foi realizada 7 vezes em cada condição e é apresentado o ponto médio com o desvio padrão como barra de erro. No final é apresentado as características elétricas obtidas no simulador Solar Oriel e no LAPSSGen2 das demais células solares utilizadas no trabalho

### 4.1 Resposta espectral (RE)

#### 4.1.1 RE da junção do topo.

Com a configuração para caracterização da junção do topo apresentada na Figura 3.11 é obtido o espectro apresentado na Figura 4.1, juntamente com um filtro de 550nm para exemplificar a luz de medida.

Figura 4.1 - Irradiância para caracterizar a junção de topo.



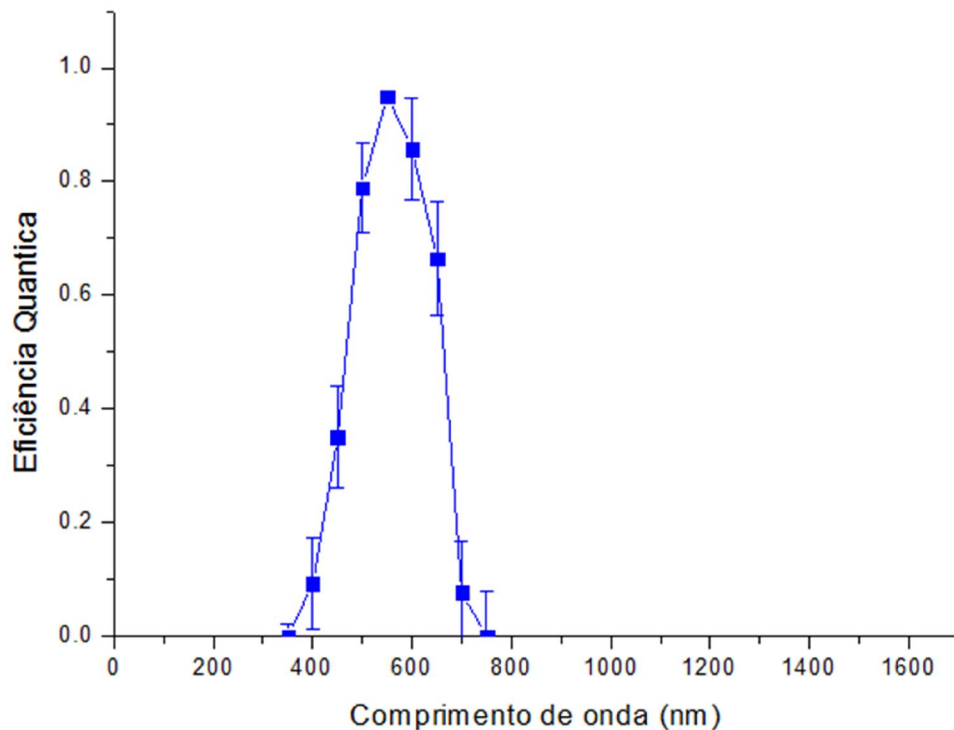
Espectro para caracterização da junção de topo: em vermelho é apresentado o espectro de uma lâmpada Xe de 500W com um filtro passa alta de 700nm; em

preto é apresentado o espectro de um filtro de interferência de 550nm como exemplo para uma luz de medida com banda estreita.

Na Figura 4.1, podemos constatar que as células do meio e da base ficam continuamente iluminadas com intensidade suficiente para que não ocorra limitação de corrente e a célula de topo, cuja resposta espectral está sendo obtida, é varrida com os comprimentos de onda correspondentes a cada filtro de interferência utilizado.

Com a incidência do espectro na célula de tripla junção, é obtida a resposta da junção de topo isoladamente em relação as demais células, esta resposta é apresentada na Figura 4.2, onde percebemos que tem uma resposta próxima a região do visível e tendo sua maior eficiência próximo aos 550nm.

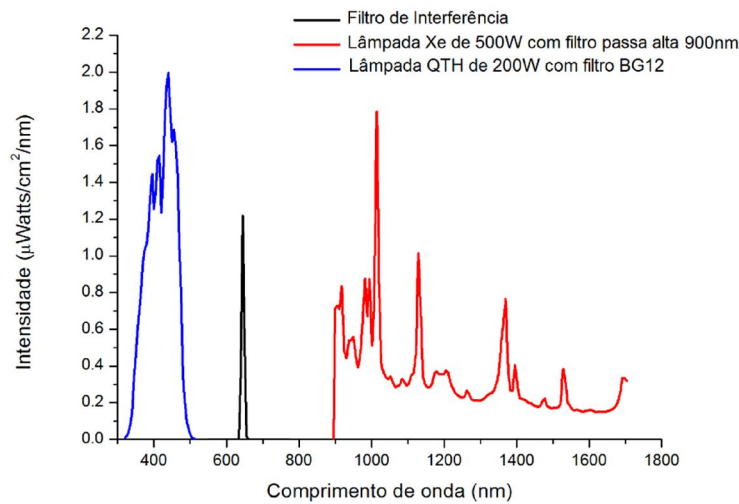
Figura 4.2 - Resposta da junção de topo.



#### 4.1.2 RE da junção do meio

Com a configuração para caracterização da junção do meio apresentada na Figura 3.12 é obtido o espectro apresentado na Figura 4.3, juntamente com um filtro de 649.5nm para exemplificar a luz de medida.

Figura 4.3 - Espectro para caracterização espectral da junção do meio.

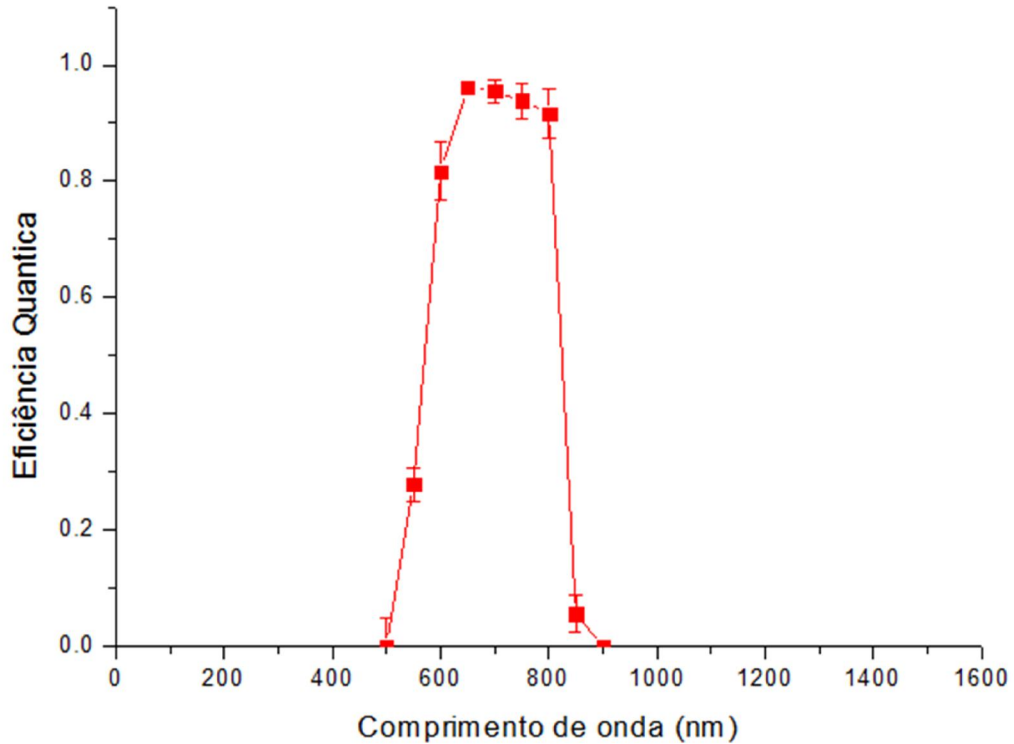


Espectro para caracterização da junção do meio: em azul é apresentado o espectro de uma lâmpada de QTH de 200W com filtro passa banda BG12 ativando a junção de topo e permitindo a condução de corrente e em vermelho é apresentado uma lâmpada Xe de 500W com filtro passa alta de 900nm ativando a junção de base e permitindo a passagem de corrente e formando a luz de ativação das junções. Em preto é apresentado um filtro de interferência de 649nm para exemplificar a luz de medida.

Na Figura 4.3, podemos constatar que as células do topo e da base ficam continuamente iluminadas com intensidade suficiente para que não ocorra limitação de corrente e a célula do meio, cuja resposta espectral está sendo obtida, é varrida com os comprimentos de onda correspondentes a cada filtro de interferência utilizado.

A Resposta da célula do meio obtida com a montagem proposta é apresentada na Figura 4.4, da qual podemos perceber que é obtida isoladamente em relação as demais junções. A célula do meio responde espectralmente começando no visível e indo até o infravermelho, sendo sua maior eficiência perto dos 650nm.

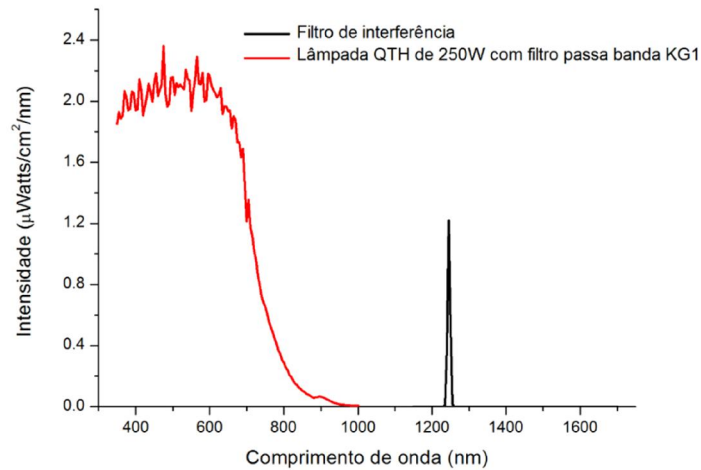
Figura 4.4 - Resposta da junção do meio.



#### 4.1.3 RE da junção da base

Com a configuração para caracterização da junção de base apresentada na Figura 3.13 é obtido o espectro apresentado na Figura 4.5, juntamente com um filtro de 1250nm para exemplificar a luz de medida.

Figura 4.5 - Espectro para caracterização espectral da junção de base.



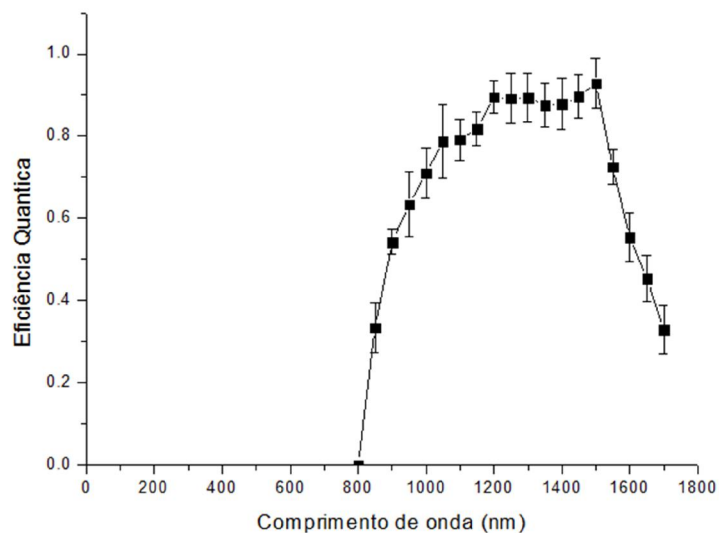
Espectro para caracterização da junção de base: em vermelho é apresentado o espectro da lâmpada QTH 250W com um filtro passa banda KG1. Em preto um filtro interferência de 1250nm como exemplo para a luz de medida.

Na Figura 4.5 podemos constatar que as células do meio e do topo ficam continuamente iluminadas com intensidade suficiente para que não ocorra limitação de corrente e a célula da base, cuja resposta espectral está sendo obtida, é varrida com os comprimentos de onda correspondentes a cada filtro de interferência utilizado.

Com a exposição ao espectro apresentado é obtida a resposta da célula de base, com a resposta podemos perceber que esta junção responde no infravermelho e tem sua maior eficiência próximo aos 1500 nm, conforme apresentado na Figura 4.6.



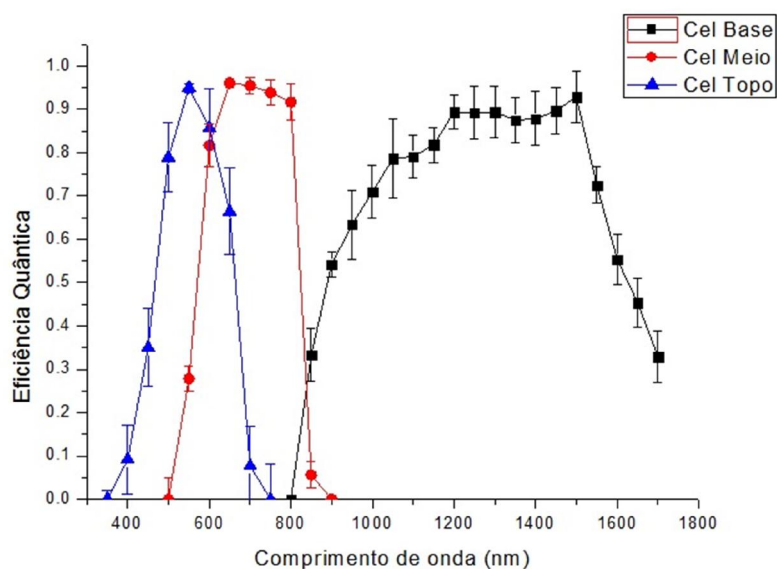
Figura 4.6 - Resposta da junção de base.



#### 4.1.4 RE global da célula solar de tripla junção.

Com a junção das respostas das três junções juntas obtemos a resposta da célula solar de tripla junção, que responde em uma faixa de aproximadamente 350nm até 1800nm.

Figura 4.7 - Resposta da célula solar de tripla junção.

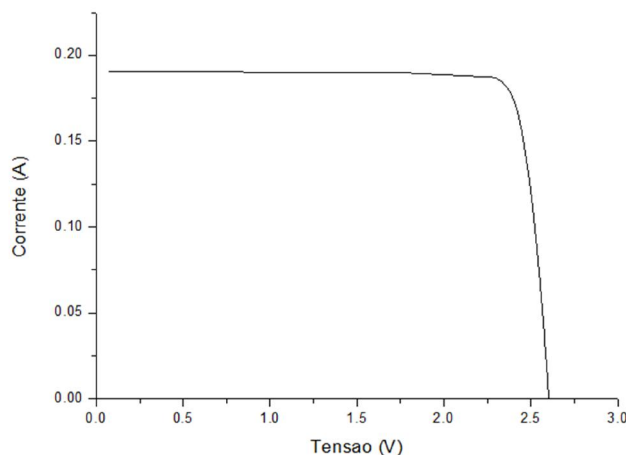


A obtenção da resposta espectral de célula de tripla junção, sendo a resposta de cada junção obtida separadamente, é uma técnica que exige certos cuidados, pois é preciso que as outras junções que não estão sendo caracterizadas também sejam iluminadas, senão, não há corrente fluindo pela célula. Por causa disso a luz aplicada sobre a junção em teste foi pulsada em uma determinada frequência para isolar o sinal de interesse da luz de polarização das outras junções. Também, foi tomada uma série de cuidados para evitar a presença de sinais e ruídos indesejáveis além do controle das condições ambientais.

#### 4.2 Caracterização elétrica utilizando simulador ORIEL modelo 81193

A caracterização elétrica da célula solar de tripla junção (Figura 4.8) foi realizada utilizando o simulador ORIEL modelo 81193 e utilizando o filtro AM0.

Figura 4.8 - Caracterização Elétrica obtida com simulador solar ORIEL.



Foram obtidos os seguintes parâmetros da célula solar através da caracterização:

Filtro utilizando: AMO

Tensão de circuito aberto (VCA): 2,56V

Corrente de Curto-Circuito (ICC): 0,190 A

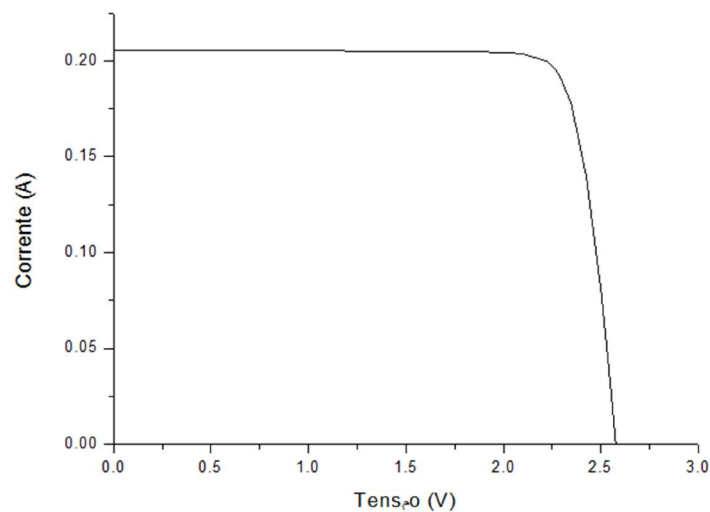
Fator de Forma (FF): 0,872

Eficiência (Ef): 26,93%

### 4.3 Caracterização elétrica de uma célula de tripla junção utilizando o simulador LAPSSGen 2

Utilizando a mesma célula solar de tripla junção do item 4.2 foi obtida a caracterização elétrica através do simulador solar LAPSSGen 2, que é utilizado para caracterização os painéis solares que alimentam os satélites brasileiros. A resposta obtida é apresentada na Figura 4.9.

Figura 4.9 - Caracterização Elétrica obtida com simulador solar LAPSS.



Dados da célula obtido pelo simulador:

Tensão de circuito aberto (VCA): 2,5542V

Corrente de Curto-Circuito (ICC): 0,2058 A

Fator de Forma (FF): 0,8388

Eficiência (Ef): 27,07%

### 4.4 Características elétricas obtidas no simulador Solar Oriel e no LAPSSGen2 das demais células solares utilizadas no trabalho.

Na tabela 4.1 é apresentado as características elétricas obtidas no simulador Solar Oriel e no LAPSSGen2 para que seja possível uma comparação entre os simuladores solares.

Tabela 4.1 - Características elétricas obtidas no simulador Solar Oriel e no LAPSSGen2.

<b>Célula C1</b>				
	VCA (V)	ICC (A)	FF (%)	Efi (%)
<b>Oriel</b>	2,5434	0,193	83,9012	26,9923
<b>LAPSS</b>	2,5542	0,2058	83,8855	27,0718
<b>Célula C2</b>				
	VCA (V)	ICC (A)	FF (%)	Efi (%)
<b>Oriel</b>	2,4998	0,1901	73,3458	22,9873
<b>LAPSS</b>	2,5009	0,1975	71,2702	21,55
<b>Célula C3</b>				
	VCA (V)	ICC (A)	FF (%)	Efi (%)
<b>Oriel</b>	2,5866	0,1925	81,8765	24,0985
<b>LAPSS</b>	2,5887	0,1934	81,5127	25,0045
<b>Célula C4</b>				
	VCA (V)	ICC (A)	FF (%)	Efi (%)
<b>Oriel</b>	2,5755	0,1901	81,1439	25,6598
<b>LAPSS</b>	2,5856	0,1967	81,0954	25,4763
<b>Célula C7</b>				
	VCA (V)	ICC (A)	FF (%)	Efi (%)
<b>Oriel</b>	2,5926	0,1926	74,0481	23,7401
<b>LAPSS</b>	2,5921	0,1974	74,1543	23,3162

A tabela 4.1 mostra coerência entre os dados obtidos nos dois sistemas (Oriel e LAPSS), pois os valores VCA, ICC e FF ficaram bem próximos nas duas medidas. A exceção foi a célula solar C2 que teve um FF menor e isto provocou um menor valor na eficiência. Considerando que a medida no LAPSS foi feita antes da medida Oriel, este fato pode ser explicado em função de algum problema no contato elétrico da célula solar durante a medida.

## 5 CONCLUSÃO

O dimensionamento do suprimento de energia é um dos quesitos principais na elaboração do projeto de um satélite artificial, pois o sucesso de uma missão espacial depende do seu correto funcionamento. A energia elétrica utilizada nos satélites é gerada através de painéis solares. Nos atuais satélites desenvolvidos no INPE são utilizados painéis constituídos de células solares de tripla junção. O Brasil não possui tecnologia para produzir este tipo de célula, por isso, elas são importadas, tem alto custo e sua especificação e utilização exige especial cuidado. Muitas informações sobre este tipo de dispositivos não estão disponíveis por serem segredos comerciais, por isso existe a necessidade de ensaios e processos de caracterização deste tipo de células para uma maior compreensão de seu funcionamento.

Este trabalho de mestrado teve como principal objetivo a montagem de um sistema de caracterização espectral de célula de multijunção. A curva de resposta espectral de uma célula solar é um recurso muito importante para avaliar o seu desempenho quando em funcionamento e gerar informações sobre a física deste dispositivo. Além da responsividade espectral, outros parâmetros podem ser obtidos como a eficiência quântica, o comprimento de difusão dos portadores minoritários, os efeitos da profundidade das junções e o efeito da camada antirefletora. O sistema apresentado neste trabalho é pioneiro no INPE e irá contribuir no estudo e na compreensão do funcionamento de células de multijunção tanto para o uso imediato nos projetos de satélites do INPE como no desenvolvimento futuro deste dispositivo no Brasil. Métodos de caracterização e ensaios de células solares tem a finalidade de extrair vários parâmetros para serem utilizados no modelamento e simulações de painéis solares para projetos de satélites.

Os resultados, obtidos no sistema de caracterização espectral apresentado neste trabalho, mostraram ser possível obter curvas de resposta espectral de células solares de tripla junção que, embora tenha baixa resolução, permite estudar o comportamento deste tipo de célula em análises qualitativas. O

sistema desenvolvido teve como principal característica a simplicidade e o baixo custo e demonstrou a validade e a viabilidade da técnica proposta.

Com o domínio da metodologia de caracterização espectral de células de multijunção será possível obter mais informações sobre as células importadas pelo INPE e assim contribuir nos processos de compras e qualificação destes dispositivos. A utilização de filtros interferências foi uma boa opção, pois evitou investir, numa fase inicial do projeto, em um monocromador que tem elevado custo. Também o uso de filtros permitiu obter sinais mais intensos o que facilitou o processo de medição, além de permitir uma maior flexibilidade na disposição do arranjo experimental, permitindo assim compreender melhor a técnica de caracterização levantando informações importantes para uma futura montagem de um sistema de caracterização espectral mais preciso com o uso de um monocromador.

Neste trabalho também foi explorado com êxito a caracterização elétrica de células solares de tripla junção utilizando um simulador solar de caracterização de células de silício. O simulador solar utilizado neste trabalho é o que está disponível no Laboratório de Energia Solar do GDF da marca Oriel e era considerado inadequado para caracterizar as células de tripla junção, embora ele seja antigo e não atenda uma série de exigência para caracterização de células solar de tripla junção de aplicação espacial, ele apresentou resultados surpreendentes o que justificou uma melhoria no sistema e a utilização dele neste trabalho.

Resultados obtidos no simulador do GDF comparados com os resultados obtidos com simulador solar LAPSSGen 2 do LIT/INPE, que é um simulador de grande área, especialmente desenvolvido para caracterização os painéis solares de uso espacial, mostraram pequenas diferenças que provavelmente se devem a calibração e a problemas relacionados a metodologia de medição. Problemas estes que podem ser facilmente resolvidos para futuras medições.

A melhoria no sistema de caracterização elétrica desenvolvida durante este trabalho consistiu na atualização do sistema de automação e aquisição de

dados. O sistema antigo estava totalmente obsoleto e já não era possível realizar medições. Com a modernização do sistema de automação e aquisição de dados e o desenvolvimento de um novo programa, o sistema de caracterização de células solares foi recuperado e permite a obtenção de curvas IxV de células solares de forma simples e automática.

Embora as células solares de multijunções ainda não sejam comuns para aplicação terrestre, elas já são amplamente utilizadas em satélites e com a redução dos preços deste dispositivo, há uma tendência de que no futuro elas também sejam largamente utilizadas em sistemas terrestres e é necessário que estejamos capacitados para avaliar este tipo de tecnologia ou até mesmo desenvolvê-la aqui no Brasil. Com a montagem dos novos sistemas de medidas de Resposta Espectral e a modernização do Sistema de Medidas de Elétricas (curva I-V) para células de TJ, o INPE atualizará as técnicas de caracterização e extração de parâmetros das modernas células solares que estão sendo utilizadas no momento e que serão utilizadas nos futuros satélites. Deste modo, este trabalho contribuiu significativamente para que o grupo de pesquisa do GDF do LABAS/COCTE tenha condições de continuar auxiliando o INPE no melhor entendimento do funcionamento dessas células e nas respostas às inúmeras indagações que ocorrem nas revisões preliminares e críticas dos projetos de geradores solares dos satélites em desenvolvimento.

Como continuidade deste trabalho, espera-se melhorar a resolução das medidas da resposta espectral utilizando um monocromador no lugar de filtro, reduzir as incertezas das medições com a utilização de multímetros de maior precisão e melhorias no controle das grandezas de interferência tais como: temperatura, umidade e fontes de luz espúrias. Melhorias no sistema de caracterização elétrica de células solares para obtenção de curvas IxV mais precisas e confiáveis deverão ser realizadas, tais como: correção do espectro do simulador solar, calibração das células de referência e melhorias no controle da temperatura das células em teste.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, R. A. S. **Caracterização elétrica de células solares de tripla junção - GaInP/GaAs/Ge**. 2006. 189 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006.

ADAMS, W. G.; DAY, R. E. The action of light on selenium. **Proceedings of the Royal Society**, v. 113, n.A25, 1877.

ALMADA, K. **Introdução à eletrônica BMA/BMB/SEM. semicondutores**. Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/1824003/>>. Acesso em: 10 ago. 2018.

ANDRADE, M. **Semicondutores**. Disponível em: <<https://www.electronica-pt.com/semicondutores>>. Acesso em: 23 set. 2018.

BARROS, L. G.; ASSIS, A.; LANGHI, R. Proposta de construção de espectroscópio como alternativa para o ensino de Astronomia. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 33, n. 3, p. 1026-1046, dez. 2016. ISSN 2175-7941. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2016v33n3p1026>>. Acesso em: 06 ago. 2018.

BELOTO, A. F. **Estudo das características de células solares de silício monocristalino**. 1983. 133f. Dissertação (Mestrado em Física Aplicada) – Instituto de Física e Química de São Carlos, São Carlos, 1983.

BOYLESTAD, N. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008.



BRAGA, R. P. **Energia solar fotovoltaica: fundamentos e Aplicações**. 80 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

BUHLER, A. J. **Determinação de parâmetros fotovoltaicos a partir de ensaios de curvas características sem iluminação**. 2007. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

CAMPBELL SCI. **CM11 pyranometer manual**. 2010. Disponível em <http://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/cmp6-cmp11-cmp21.pdf>  
Acesso em: 23 maio 2018.

CANCELA, A. **Tipos de células solares**. Disponível em:  
<[http://vidrofv.geodesign.com.br/Pages/DeQue\\_VFV](http://vidrofv.geodesign.com.br/Pages/DeQue_VFV)>. Acesso em: 14 out. 2018.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA DE SALVO BRITO (CRESESB). **Manual de Engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CRESESB, 2004.

FONSECA, F. J. **Desenvolvimento de uma célula solar de silício para aplicações espaciais**. 131p. Dissertação (Mestrado em Física Aplicada). Universidade de São Paulo - Instituto de Física e Química de São Carlos, São Carlos - SP, 1985.

GOMEZ, J. M. R.; CARLESSO, F.; VIEIRA, L. E.; SILVA, L.; A irradiância solar: conceitos básicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v.40, n. 3, e3312, 2018 . Disponível em  
<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-11172018000300412&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172018000300412&lng=pt&nrm=iso)>. Acesso em: 16 abr. 2018.

HECKTHBEUER, L. A. **Análise de associações de módulos fotovoltaicos**. 2001. 95 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

HOWARD, B. Sunlight. 2013. Disponível em:  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar\\_spectrum\\_ita.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_spectrum_ita.svg). Acesso em: 4 abr. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. ENGENHARIA E TECNOLOGIA ESPACIAL. **Foto SACI-1**. Disponível em: <Intranet INPE>. Acesso em: 06 mar. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. LABORATÓRIO DE SENSORES E MATERIAIS. **Foto experimento célula solar**. Disponível em: <Intranet INPE>. Acesso em: 05 mar. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. LABORATÓRIO DE INTEGRAÇÃO E TESTES. **Foto SCD-1**. Disponível em: <Intranet INPE>. Acesso em: 03 mar. 2018.

JENA, A.; SHYAMA, P. M.; KUMAR, P.; NADUVATH, J.; GONDANE, V.; LEKHA, P. DAS, J.; NARULA, H. K.; BHARGAVA, S. M. Dye sensitized solar cells: a review. **Transactions of the Indian Ceramic Society**, v. 71, n. 1, p.1-16, jan. 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/0371750x.2012.689503>.

KEENER, D. N.; MARVIN, D. C. Progress toward technology transition of GaInP/GaAs/Ge multijunction solar cells. In: PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE, 26. (PVSC), 1997. California, United States of America. **Proceedings...** New York: IEEE, 1997. p. 787-792. (ISBN 0780337670).

KONAGAI, M. Present status and future prospectsofsilicon thin-film solar cells. **Japanese Journal of Applied Physics**, Nagawaki, v. 1, n. 50, p.19-50, jan. 2011.

KOPP, G. Magnitudes and timescales of total solar irradiance variability. **Journal of Space Weather and Space Climate**, v.6, 2016. DOI: 10.1051/swsc/2016025.

KOUHNAVARD, M.; IKEDA, S.; LUDIN, N.A.; KHAIRUDIN, N.B.A.; GHAFFARI, B.V.; MAT-TERIDI, M.A.; IBRAHIM, M.A.; SOPIAN, K. A review of semiconductor materials as sensitizers for quantum dot – sensitized solar cells. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.37, p.397-407, 2014.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Photovoltaic solar energy: a briefly review. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 1, p.115-136, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20150008>.

MCMILLAN, C. **Astronomy**: a beginner's guide to the Universe.6.ed. [S.I.]: Pearson, 2007.

MILESKI, A. **Satélite de Coleta de Dados - SCD-1: 10 anos**. Disponível em: <<http://www.defesanet.com.br/space/noticia/12596/Satelite-de-Coleta-de-Dados---SCD-1--10-anos/>>. Acesso em: 9 jan. 2018.

NATIONAL AERONAUTICAS AND SPACE ADMINISTRATION. **Spacecraft solar cell arrays**. Los Angeles: Nasa, 1971. p. 5-54. Disponível em: <[https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19710028154 2018-08-04T21:03:48+00:00Z](https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19710028154%2018-08-04T21:03:48+00:00Z)>. Acesso em: 10 ago. 2018.

NASCIMENTO, C. A. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. 2004. 200 f. Trabalho (Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

NATIONALINSTRUMENTS. **Sistemas de medidas**. Disponível em: <<http://www.ni.com/en-us.html>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

NATIONALRENEWABLEENERGY LABORATORY. **Evolução da eficiência das diferentes tecnologias de células solares.** 2017. Disponível em: <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Best\\_Research-Cell\\_Efficiencias.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Best_Research-Cell_Efficiencias.png)>. Acesso em: 07 ago. 2018.

NEVES, G. M. **Influência do espectro da radiação solar em módulos fotovoltaicos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos - SP, 2016.

NEVES, D. Desenvolvimento de células solares de múltiplas junções para aplicações espaciais no laboratório de semicondutores da PUC - Rio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2018, Gramado. **Anais...** 2018.

NEWPORT. **Introduction to solar radiation.** Disponível em: <http://www.newport.com/Introduction-to-Solar-Radiation/411919/1033/content.aspx>. Acesso em: 05 out. 2017.

PAES, T. F. **Sistemas de caracterização de elementos sensores para radiômetros fotovoltaicos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais / Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: CEPEL–CRESESB, 2014. 529 p. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf)>. Acesso em: 11 jun. 2018.

PONTO CIÊNCIA. **Onda eletromagnética.** Disponível em: <<http://www.pontociencia.org.br/galeria/?content%2FFisica%2FOptica%2F>>. Acesso em: 17 abr. 2018.

PORTAL SOLAR. **Tipos de painel solar fotovoltaico**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>>. Acesso em: 20 abr. 2018.

PVEDUCATION. **Solar**. Disponível em: <<https://www.pveducation.org/>>. Acesso em: 15 abr. 2018.

QUERINO, C. A. S. Estudo da radiação solar global e do índice de transmissividade (KT), externo e interno, em uma floresta de mangue em Alagoras – Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 2, p.204-215, ago. 2011.

REIS, L. B. **Geração de energia elétrica**. 2. ed. Barueri: Editora Manole, 2015. 457 p. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?id=YpgDCwAAQBAJ&dq=Uma+propriedade+fundamental+para+as+c%C3%A9lulas+fotovoltaicas+%C3%A9+a+possibilidade+de+f%C3%BR&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.com.br/books?id=YpgDCwAAQBAJ&dq=Uma+propriedade+fundamental+para+as+c%C3%A9lulas+fotovoltaicas+%C3%A9+a+possibilidade+de+f%C3%BR&source=gbs_navlinks_s)>. Acesso em: 27 jul. 2018.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. [S.I.]: AMGH, 2013. 734 p.

SPITZER, M. B. Advances in high performance multijunction III-V solar cells. In: ELECTRO INTERNATIONAL CONFERENCE, 1991, New York, United States of America. **Proceedings...** Los Angeles: Electronic Conventions Management, 1991. p. 674-677.

STEFFEN, C. A.; MORAES, E. C.; GAMA, F. F. Tutorial radiometria óptica spectral. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8., 1996. Salvador. **Anais...** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996.

TORRES, L. C. G. **Análise do comportamento elétrico dos geradores solares da série de satélites CBERS e a confrontação dos resultados com os Dados de projeto.** 2014. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Espacial), Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

VEISSID, N.; NUBILE, P. ;BELOTO, A. F. ; ANDRADE, A. M. The solar cell experiment of the first Brazilian Complete Space Mission Satellite. In: IEEE PHOTOVOLTAICSPECIALISTS, 21., 1999. **Proceedings...** 1999.

VEISSID, N.; VAZ, C. C. Desenvolvimento de simulador solar de baixo custo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2007, Fortaleza. **Anais ...** 2008.

VEISSID, N.; BELOTO, A. F. Oito anos de análise dos dados do experimento célula solar do segundo satélite brasileiro. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 2, n. 1, p.172-178, set. 2010.

VIANA, T. S. **Potencial de geração de energia elétrica com sistemas fotovoltaicos com concentrador no Brasil.** 2010. 156 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

VILELA, W. A. **Estudo, desenvolvimento e caracterização de radiômetros para medidas da radiação solar.** Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos - SP, 2010.

WURFEL, P. **Physics of solar cells:** from principles to new concepts. Weinheim: Wiley, 2005.