RAPHAEL BERTRAND HEIDEIER

**Metodologia para avaliar o emprego de técnicas de seleção e
conversão da radiação solar sobre a produção de energia elétrica
de células fotovoltaicas**

São Paulo

2017

RAPHAEL BERTRAND HEIDEIER

**Metodologia para avaliar o emprego de técnicas de seleção e
conversão da radiação solar sobre a produção de energia elétrica
de células fotovoltaicas**

Tese apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de doutor em
ciências.

**São Paulo
2017**

RAPHAEL BERTRAND HEIDEIER

**Metodologia para avaliar o emprego de técnicas de seleção e
conversão da radiação solar sobre a produção de energia elétrica
de células fotovoltaicas**

Tese apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de doutor em
ciências. Área de concentração:
Engenharia elétrica – Sistemas
de Potência. Orientação:
Professor Dr. André Luiz Veiga
Gimenes.

São Paulo

2017

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Heideier, Raphael Bertrand

Metodologia para avaliar o emprego de técnicas de seleção e conversão da radiação solar sobre a produção de energia elétrica de células fotovoltaicas / R. B. Heideier -- versão corr. -- São Paulo, 2017.

77 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Fontes naturais de energia 2.Energia solar 3.Sistemas fotovoltaicos 4.Radiação solar (Seleção) 5.Radiação solar (Conversão) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil.

Agradeço especialmente ao meu orientador professor Dr. André Luiz Veiga Gimenes pela confiança, apoio e contribuições.

Ao professor Dr. Marco Antonio Saidel e ao professor Dr. Fernando Amaral de Almeida Prado Jr. por abrirem as portas que me trouxeram até aqui.

À professora Dra. Eliane A. Fadigas, ao Dr. Julio R. Martinez e João Flesch Fortes pelo apoio, por disponibilizarem acesso aos equipamentos do laboratório de energia renováveis do Departamento de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da USP e ajuda com experimentos.

Aos professores titulares Dr. Hermi Felinto de Brito e Dr. Lucas Carvalho Veloso Rodrigues – Laboratório dos Elementos do Bloco “F” do Departamento de Química Fundamental do Instituto de Química da USP – pela cooperação e grande contribuição.

Aos professores Dr. Fernando Josepetti Fonseca, Professor Dr. Manuel Cid Sanchez, Professor Dr. Roberto K. Onmori e Dr. Carlos Ramos do Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos da Escola Politécnica da USP.

À Professora Dra. Wang Shu Hui e ao Dr. Emerson Roberto Santos do Laboratório de Engenharia de Macromoléculas da Escola Politécnica da USP.

À equipe do Laboratório de Cristais Iônicos, Filmes Finos e Datação (LACIFID), em especial à Dra. Roseli F. Gennari.

Ao laboratório de Fotometria do Instituto de Energia e Ambiente da USP pela colaboração, em especial ao Eng. Ms. Rinaldo Caldeira Pinto.

Ao professor Dr. Miguel E. M. Udaeta pelas contribuições.

Ao meu padrinho e amigo Dr. Carlos Alberto Alvim de Azevedo Santos pelas contribuições e conselhos.

À Roberta Toroko pela ajuda e indicações, ao Dr. Roberto Valer e ao Dr. Carlos Alberto Febres Tapia pelos conselhos.

E aos amigos e colaboradores do PEA que participaram direta ou indiretamente deste trabalho. Em especial, ao Adelino Alves Damaceno por ajudar inúmeras vezes com os experimentos e à Cláudia da Secretaria de Pós-Graduação da Eng. Elétrica.

“Aliens might be surprised to learn that in a cosmos with limitless starlight, humans kill for energy sources buried in the sand.”

(Neil de Grasse Tyson, Jan. 2013)

RESUMO

Esta tese propõe uma metodologia para avaliar o emprego de técnicas de seleção e conversão da radiação solar para aumentar a produção de energia elétrica de células fotovoltaicas.

Foi feita uma revisão dos mecanismos fotovoltaicos para produção de energia elétrica e os entraves para aumentar sua eficiência, em especial os impactos da temperatura e da absorção do espectro solar.

Uma metodologia foi criada para definir um filtro óptico ótimo a ser utilizado em uma região na presença ou não de conversão do espectro, através de simulações computacionais, que define a faixa do espectro solar que deve ser absorvida pela célula para se ter o melhor equilíbrio entre absorção e aquecimento.

Um modelo matemático foi criado e implementado computacionalmente, para calcular a produção de energia de um módulo fotovoltaico, em uma dada região com ou sem a aplicação de técnicas de conversão e seleção da radiação solar.

Através de um estudo de caso com dados da cidade de Petrolina, PE, Brasil, concluiu-se que o ganho esperado para utilização de um filtro óptico que reflete ondas de comprimento superiores a 1000 nm é cerca de 1% da energia gerada.

Ensaio empíricos permitiram validar a metodologia proposta, comparando os dados reais com os dados teóricos obtidos pelas simulações do modelo matemático. Após a calibração do modelo matemático, verificou-se que os resultados de potência instantânea calculados com o modelo matemático variavam cerca de 5% tanto para o módulo com filtro quanto para o módulo sem filtro.

Para contornar a restrição construtiva do filtro óptico e verificar outros ganhos possíveis são propostos experimentos com compostos de conversão de radiação solar associados com filtros ópticos para seleção da radiação solar. Com isto, espera-se aumentar significativamente a produção de energia elétrica de células fotovoltaicas de Silício cristalino.

Palavras-chave: Célula Fotovoltaica. Geração de Eletricidade. Seleção de Radiação Eletromagnética, Conversão de Radiação Eletromagnética.

ABSTRACT

This thesis proposes a methodology to evaluate the use of solar radiation selection and conversion techniques to increase the production of electric energy of photovoltaic solar cells.

A review of the photovoltaic mechanisms for the production of electrical energy and the obstacles to increase its efficiency, especially the impacts of temperature and the absorption of the solar spectrum was done.

A methodology was developed to define an optimal optical filter to be used in a region in the presence or not of solar spectrum conversion, through computational simulations, which defines the range of the solar radiation that must be absorbed by the cell in order to have the best balance between absorption and heating.

A mathematical model was created and implemented computationally to calculate the energy production of a photovoltaic module in a given region with or without the application of solar radiation conversion and selection techniques.

A case study with data from the city of Petrolina, PE, Brazil, concluded that the expected gain for the use of an optical filter that reflects wavelengths above 1000 nm is about 1% of the power generated.

Empirical tests allowed validating the proposed methodology comparing the actual data with the theoretical data obtained by the simulations of the mathematical model. After calibration of the mathematical model, it was verified that the instantaneous power results calculated with the mathematical model vary about 5% for both the filter module and the unfiltered module.

To avoid the constructive constraint of the optical filter and to verify other possible gains are proposed experiments with solar radiation conversion compounds associated with optical filters to select the solar radiation. With this, it is expected to significantly increase the electricity production of crystalline silicon photovoltaic cells.

Keywords: Photovoltaic cell. Electricity Generation. Electromagnetic Radiation Selection. Electromagnetic Radiation Conversion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2-1: COMPARAÇÃO ENTRE POTENCIAL ENERGÉTICO DE FONTES PRIMÁRIAS.....	4
FIGURA 2-2: IRRADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA POR METRO QUADADO NO MUNDO.	5
FIGURA 2-3: CONCENTRADOR SOLAR DFK.	12
FIGURA 2-4: ESPECTRO DE IRRADIAÇÃO SOLAR EXTRATERRESTRE E AO NÍVEL DO MAR.	15
FIGURA 2-5: EFICIÊNCIA TEÓRICA MÁXIMA E PERDAS PARA CÉLULAS FV ILUMINADO PELA INTENSIDADE DE UM SOL, EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE JUNÇÕES.	16
FIGURA 2-6: GRÁFICO DA POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA DIFERENTES TECNOLOGIAS.	18
FIGURA 2-8: PERDA DE BOLTZMANN E POTÊNCIA DE SAÍDA PARA CÉLULA FV ILUMINADA POR DIFERENTES INTENSIDADES DE RADIAÇÃO SOLAR.....	19
FIGURA 2-9: RESPOSTA ESPECTRAL EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA.	20
FIGURA 2-10: EFICIÊNCIA QUÂNTICA EXTERNA NORMALIZADA EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA.	21
FIGURA 2-11: FILTRO SELETIVO PARA O ESPECTRO SOLAR.	27
FIGURA 2-12: SISTEMA DE FILTROS COM NANO FLUÍDO.	27
FIGURA 2-13: GANHOS TEÓRICOS DO APROVEITAMENTO DO ESPECTRO SOLAR POR CÉLULAS DE C-SI.	30
FIGURA 3-1: RESPOSTA ESPECTRAL RELATIVA EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA.	38
FIGURA 3-2: FLUXOGRAMA DO PROCESSO PARA AVALIAR FILTRO ÓPTICO ÓTIMO.	39
FIGURA 3-3: FLUXOGRAMA DO PROCESSO PARA O CÁLCULO DO MODELO DE PRODUÇÃO DE ENERGIA DO MÓDULO.....	40
FIGURA 3-4: FLUXOGRAMA DO PROCESSO PARA CALIBRAR O MODELO DE CÁLCULO DA POTÊNCIA DE SAÍDA.	41

FIGURA 3-5: FLUXOGRAMA DO PROCESSO PARA MEDIR A RESPOSTA ESPECTRAL DE UMA CÉLULA FV.....	42
FIGURA 4-1: POTÊNCIA DE SAÍDA DO MÓDULO EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA REFLETIDO E CURVA DO ESPECTRO SOLAR DE REFERÊNCIA. ...	44
FIGURA 0-1: DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA EMISSÃO DOS LEDS PRIMÁRIOS EM MÍNIMA POTÊNCIA.....	61
FIGURA 0-2: GERAÇÃO DE ENERGIA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA CÉLULA DE M-SI.	61
FIGURA 0-3:GERAÇÃO DE ENERGIA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA CÉLULA DE P-SI.	62
FIGURA 0-1: DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA EMISSÃO DOS LEDS PRIMÁRIOS...	64
FIGURA 0-2: DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA EMISSÃO DOS LEDS COMPOSTOS.	65
FIGURA 0-1: CURVA DE TRANSMITÂNCIA DO FOA FABRICADO PELO FORNECEDOR CHINÊS.....	72
FIGURA 0-2: CURVA DE TRANSMITÂNCIA DO FOA IMPORTADO DA CHINA.	72
FIGURA 0-3: ANÁLISE DA CURVA DE TRANSMITÂNCIA DO FOA IMPORTADO DA CHINA.	73
FIGURA 0-4: MÓDULOS FV PARA TESTE PRELIMINAR FIXADOS EM ESTRUTURA DE MADEIRA PARA TESTE EM CAMPO.	74
FIGURA 0-5: REDUTOR DE TENSÃO CONSTRUÍDO E TESTADO NO LABORATÓRIO DO GEPEA.	74
FIGURA 0-6: CONFIGURAÇÃO DO DATALOGGER.....	75
FIGURA 0-7: EQUIPAMENTOS INSTALADOS NO TELHADO DO ESPAÇO CULTURAL.	75
FIGURA 0-8: MONTAGEM DOS MÓDULOS E CÉLULA DE REFERÊNCIA PARA ENSAIO DA CURVA CARACTERÍSTICA.	76
FIGURA 0-9: MEDIÇÕES DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS MÓDULOS.....	76
FIGURA 0-10: CURVA DE TRANSMITÂNCIA DA AMOSTRA DO FILTRO ÓPTICO ADQUIRIDO LIMPA E SUJA.	77

LISTA DE TABELAS

TABELA 2-1: INTEGRAL DA CURVA DE IRRADIÂNCIA SOLAR EM WATTS/M ² ...	22
TABELA 2-2: EFICIÊNCIA E TEMPERATURA MÁXIMA DA CÉLULA EXPOSTA POR FAIXA DE ESPECTRO DE IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL AO NÍVEL DO MAR.	23
TABELA 4-1: MÉDIA DA RADIAÇÃO HORÁRIA MÁXIMA E RESPECTIVA TEMPERATURA AMBIENTE MÉDIA PARA OS DADOS DE CADA MÊS UTILIZADO NA SIMULAÇÃO.....	43
TABELA 4-2: COMPARAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA PARA RESPOSTA ESPECTRAL DE REFERÊNCIA, DADOS DE PETROLINA, ANO DE 2013, COM A MESMA REFLETÂNCIA DO VIDRO DO MÓDULO PARA RADIAÇÃO VISÍVEL.	46
TABELA 4-3: COMPARAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA PARA RESPOSTA ESPECTRAL DE REFERÊNCIA, DADOS DE PETROLINA, ANO DE 2013, COM REFLETÂNCIA 5% SUPERIOR A DO VIDRO DO MÓDULO PARA RADIAÇÃO VISÍVEL.	46
TABELA 0-1: POTÊNCIA DE EMISSÃO DOS LEDS EM ÂNGULO PARA MÍNIMA POTÊNCIA.....	65
TABELA 0-2: POTÊNCIA DE EMISSÃO DOS LEDS EM ÂNGULO VARIANDO A POTÊNCIA.....	66
TABELA 0-3: VARIAÇÃO TEMPORAL DA POTÊNCIA DE EMISSÃO.....	66

LISTA DE SIGLAS

ACL - Ambiente de Contratação Livre
ACR - Ambiente de Contratação Regulada
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
a-Si - Silício Amorfo
BoS - Balance of System
C - Celsius
CA - Corrente Alternada
CC - Corrente Contínua
CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CdTe - Telureto de cádmio
CFV - Células Fotovoltaicas
CIGS - Cobre-Índio-Gálio-Selênio
c-Si - Silício Cristalino
DSC - *Dye Solar Cell* (célula solar de corante)
DSSC - *Dye-Sensitized Solar Cell* (célula solar sensibilizada por corante)
EPE - Empresa de Pesquisa Energética
EQE - Eficiência Quântica Externa
EQI - Eficiência Quântica Interna
FC - Fator de Capacidade
FV - Fotovoltaicas
GaAS – Arseneto de Gálio
K - Kelvin
LED – *Light-Emitting Diode*
 μm - micrômetro
m-Si - Silício Monocristalino
nm - Nanômetro
OFV - Células Orgânicas Fotovoltaicas
OSC - *Organic Solar Cell* (célula solar orgânica)
PEE - Programa de Eficiência Energética
p-Si - Silício Policristalino
RE - Resposta Espectral

SEB – Setor Elétrico Brasileiro

SI - Sistema Internacional

TUSD - Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição

TUST - Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão

VPL - Valor Presente Líquido

LISTA DE SÍMBOLOS

A - área do módulo (m^2);

c - velocidade da luz no vácuo [$2.998.10^8$ m/s];

CO_f - comprimento de onda final, que fecha a janela de absorção do módulo;

CO_i - comprimento de onda final, que abre a janela de absorção do módulo;

e - carga do elétron [$1,6.10^{-19}$ Coulombs];

E_g - energia gerada (Wh);

E_{g0} - lacuna energética do semicondutor [1,21 eV];

h - constante de Planck [$6.63.10^{-34}$ m².kg/s];

I₀ - corrente de escuro [A];

I_G - Irradiação Global (W/m²) em função do comprimento de onda – CO;

I_L - corrente de saída da célula/módulo [A];

I_{ph} - fotocorrente gerada na célula/módulo [A];

k - constante de Boltzmann [$1.38.10^{-23}$ J/K];

m - fator de idealidade da célula;

P – Potência de saída;

P(λ) - irradiação eletromagnética [W/m²];

RE - Resposta Espectral (%) em função do comprimento de onda – CO;

R_{sh} - resistência paralela (Ohm);

S - área da secção [10^{-7} m²];

T - temperatura da célula;

T₀ - temperatura de referência [300K];

t_f e t_i definem o horizonte de tempo em que a energia é calculada discretizado em passos de 10 minutos;

T_M - Temperatura do Módulo (K)

T_R - curva de transmitância do filtro óptico (%), em função do CO;

U - tensão de saída;

U_{oc} - tensão de circuito aberto (V);

$\Delta\lambda$ - faixa de comprimento de onda absorvida;

$\eta(\lambda)$ - eficiência quântica da célula;

λ - comprimento de onda;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA.....	3
1.2	HIPÓTESES	3
2	ESTADO DA ARTE DA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA.....	4
2.1	CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	6
2.1.1	CÉLULAS DE PRIMEIRA GERAÇÃO – SILÍCIO CRISTALINO	7
2.1.2	CÉLULAS DE SEGUNDA GERAÇÃO – FILMES FINOS.....	8
2.1.3	CÉLULAS DE TERCEIRA GERAÇÃO – MULTIJUNÇÃO	9
2.1.4	CÉLULAS ORGÂNICAS FV	10
2.1.5	TECNOLOGIAS EMERGENTES	10
2.2	CONCENTRADORES FOTOVOLTAICOS.....	11
2.3	ARREFECIMENTO DE CÉLULAS FV	13
2.4	OUTROS COMPONENTES	13
2.5	ESPECTRO SOLAR	14
2.6	A EFICIÊNCIA DA GERAÇÃO SOLAR FV	15
2.6.1	RESPOSTA ESPECTRAL DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	19
2.6.2	RELAÇÃO DA TEMPERATURA, EFICIÊNCIA E FAIXA DE RADIAÇÃO	21
2.6.3	MODELAGEM MATEMÁTICA DA CÉLULA FV DE SILÍCIO CRISTALINO.....	23
2.7	SEPARAÇÃO DO ESPECTRO SOLAR	26
2.8	FILTROS ÓPTICOS.....	28
2.9	CONVERSÃO DO ESPECTRO SOLAR.....	29
2.9.1	<i>UP CONVERSION</i>	30
2.9.2	<i>DOWN SHIFTING</i>	31
2.9.3	<i>DOWN CONVERSION</i>	31
3	METODOLOGIA PARA AVALIAR O EMPREGO DE TÉCNICAS DE SELEÇÃO E CONVERSÃO DA RADIAÇÃO SOLAR SOBRE A PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO	33
3.1	CÁLCULO DA ENERGIA GERADA COM O EMPREGO DO FILTRO ÓPTICO	34
3.1.1	CONSIDERAÇÕES PARA CALCULAR A ENERGIA GERADA.....	35
3.2	PRÉ-SELEÇÃO DE FILTROS ÓPTICOS	36

3.3	APLICAÇÃO DE CONVERSÃO DO ESPECTRO SOLAR.....	37
3.4	METODOLOGIA PARA ESCOLHA DO FILTRO ÓPTICO ÓTIMO.....	39
3.4.1	CALIBRAÇÃO DO MODELO	41
3.4.2	MEDIÇÕES DA RESPOSTA ESPECTRAL	42
4	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA PARA PROJETER UM FILTRO ÓPTICO ÓTIMO PARA UMA REGIÃO ESPECÍFICA	43
4.1	RESULTADOS DA PRÉ-SELEÇÃO DE FILTROS ÓPTICOS	43
4.2	AVALIAÇÃO DA ENERGIA GERADA	45
5	VALIDAÇÃO EMPÍRICA DO MODELO MATEMÁTICO	47
6	CONCLUSÕES	49
6.1	TRABALHOS FUTUROS	50
	REFERÊNCIAS.....	52
	ANEXO A – ESTUDO DA POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA	60
	ANEXO B - PARÂMETROS DO MODELO TERMODINÂMICO DO MÓDULO	63
	ANEXO C – ESPECTRO FOTOMETRIA DA EMISSÃO DOS LEDS REALIZADO NO LABORATÓRIO DE FOTOMETRIA DO IEE.....	64
	ANEXO D - ESPECIFICAÇÕES MÓDULOS DE TESTES LABORATÓRIO	67
	ANEXO E - RESULTADO DA ESPECTROFOTOSCOPIA DAS AMOSTRAS DE FILMES CEDIDOS PELA EMPRESA INSULFILME®	68
	ANEXO F – EXPERIMENTOS PARA VALIDAÇÃO EMPÍRICA DO MODELO MATEMÁTICO	72

1 INTRODUÇÃO

O Setor Energético Brasileiro (SEB) foi estruturado com os objetivos de realizar o melhor equilíbrio entre manter o preço da energia acessível e competitivo, diminuir o risco de racionamento, promover a expansão da oferta de energia visando atender às necessidades da sociedade e minimizar a agressão ao meio ambiente (HEIDEIER, 2009). Uma alternativa que vem sendo elaborada por países como Alemanha, Espanha e, agora, também o Brasil, na busca conciliadora desses objetivos é a geração distribuída de energia elétrica utilizando geração solar fotovoltaica.

O esgotamento do potencial hidráulico aliado às restrições ambientais para o aproveitamento desta fonte abriu grandes perspectivas para o planejamento energético brasileiro. Inicialmente, para uma aceleração da utilização de combustíveis fósseis, alternativa cara e de grande impacto ambiental. A geração distribuída de energia com sistemas fotovoltaicos (FV) tem potencial de gerar energia suficiente para promover a expansão da oferta com baixo impacto ambiental e agregar positivamente o desenvolvimento social utilizando a tecnologia como se conhece hoje. A exemplo da Alemanha (SALAMONI; RÜTHER; ZILLES, 2009), que em 2008 implementou 1,5 GW em sua rede, através de um programa de incentivo governamental que gerou mais de 50 mil postos de trabalho.

No entanto, o custo dessa tecnologia ainda é alto e, mesmo com incentivos governamentais, torna-se viável apenas em casos específicos. Segundo nota técnica da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2012), o custo residencial da geração com CFV varia em relação à capacidade instalada, de R\$ 600,00 /MWh a R\$ 541,00 /MWh, em contrapartida a um custo total médio de R\$ 457,00 /MWh oferecido pelas concessionárias de distribuição, incluindo PIS/COFINS e ICMS.

O Brasil possui tarifas de energia elétrica que figuram no contexto internacional como das mais altas (ABRADEE, 2011). Os incentivos propostos pelo governo Brasileiro, aprovados pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL – através da Resolução Normativa nº 482, de 17/04/2012, reduzem barreiras para instalação de geração distribuída de pequeno porte, que incluem a micro geração, com até 100 kW de potência, e a mini geração, de 100 KW a 1 MW. A norma criou o Sistema de Compensação de Energia, que permite ao consumidor instalar pequenos

geradores em sua unidade consumidora e trocar energia com a distribuidora local. A regra é válida para geradores que utilizem fontes incentivadas de energia, ou seja, hídrica, solar, biomassa, eólica e cogeração qualificada (ANEEL, 2012).

Paralelamente ao sistema de compensação de energia, a ANEEL aprovou novas regras para descontos na Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) e na Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão (TUST) para usinas maiores (de até 30 MW) que utilizarem fonte solar: Para os empreendimentos que entrarem em operação comercial até 31 de dezembro de 2017, o desconto de 80% será aplicável nos 10 primeiros anos de operação da usina e o desconto será reduzido para 50% após o décimo ano de operação da usina; e para os empreendimentos que entrarem em operação comercial após 31 de dezembro de 2017, mantém-se o desconto de 50% nas tarifas (ANEEL, 2012).

O desenvolvimento de um mercado de geração FV distribuída pode contribuir para modicidade tarifária, segurança e inserção social: i) Permite ao consumidor ter uma opção que limite o preço praticado pelos agentes de mercado; ii) Permite investimentos em expansão no curto prazo a custo inferior que as térmicas a óleo; iii) Apresenta oportunidades para pequenos empreendedores investirem; vi) Traz geração de empregos em maior quantidade que térmicas (SIMAS, 2012).

Com o emprego de técnicas de seleção e conversão da radiação solar, estudos apontam para o aumento teórico do aproveitamento da energia do Sol de até 39.6% (TRUPKE; GREEN; WÜRFEL, 2002) para células simples de Silício cristalino (c-Si) sem concentradores.

Portanto, esforços para tornar o custo da geração distribuída de energia com sistemas FV menor são interessantes como estratégia para alcançar os objetivos do modelo atual do SEB e, com isso, gerar um ciclo virtuoso para sociedade brasileira e no âmbito internacional.

O objetivo principal desta tese é desenvolver pesquisa científica para definir metodologia inédita para avaliar o emprego de técnicas de seleção e conversão da radiação solar sobre a produção de energia elétrica de células fotovoltaicas.

Este trabalho apresenta uma ampla revisão dos mecanismos FV para produção de energia elétrica e os entraves para aumentar sua eficiência, em especial os impactos da temperatura e da absorção do espectro solar, modelagem matemática da produção de energia de uma célula fotovoltaica de Silício Cristalino e

o emprego de técnicas de seleção e conversão da radiação solar sobre a produção de energia elétrica de células FV. Este texto está dividido em 4 partes:

1. Estado da arte do ambiente em que esta tecnologia se insere no Brasil e no mundo quanto à sua aplicação para geração de energia elétrica e estudo aprofundado dos modelos teóricos e empíricos de geração fotovoltaica, com a finalidade de entender os principais gargalos para aumentar a potência gerada das tecnologias mais usadas comercialmente.
2. Metodologia para avaliar a produção de energia de um módulo fotovoltaico com ou sem o emprego de técnicas de seleção e conversão da radiação solar em dada região.
3. Experimentos e simulações computacionais para projetar e avaliar o desempenho de um filtro óptico aplicado em células FV de c-Si ótimo para a região definida como estudo de caso.
4. Validação empírica do modelo matemático.

1.1 DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA

Embora a metodologia desenvolvida seja genérica para qualquer tecnologia de célula fotovoltaica, os modelos matemáticos serão específicos para módulos de células de Silício cristalino, uma vez que 80% da capacidade instalada no Brasil utiliza esta tecnologia.

1.2 HIPÓTESES

Existem faixas de comprimentos de onda no espectro solar que contribuem pouco ou nada para geração de energia elétrica e refleti-los para que não aqueçam o módulo FV ou convertê-los para faixas de comprimento de onda que geram mais eletricidade aumenta a produção de energia.

2 ESTADO DA ARTE DA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez pelo físico francês Alexandre-Edmond Becquerel em 1839, mas apenas em 1954 foi produzida uma célula de Silício cristalino com 6% de eficiência por Chapin (CHAPIN; FULLER; PEARSON, 1954). Desde então, muitas aplicações foram dadas e estudadas para as células fotovoltaicas – FV (FRAAS; PARTIAN, 2010). As aplicações para as células FV são muitas, inclusive para geração de energia elétrica, complementando a matriz energética dos países.

O potencial para geração de energia utilizando a radiação solar é maior que qualquer outra fonte de energia disponível na Terra (EPIA; GREENPEACE, 2011). A Figura 2-1 apresenta uma comparação das reservas de recursos não renováveis com o potencial anual disponível das fontes renováveis.

Fonte: (EPIA; GREENPEACE, 2011)

A energia solar está presente em toda superfície do planeta. Regiões com intensa incidência de radiação solar podem produzir mais energia, o que implica em retorno do capital investido em menor tempo, com mais que o dobro da produção de energia por potência instalada (EPIA; GREENPEACE, 2011). A Figura 2-2 apresenta um mapa solarimétrico mundial que ilustra a quantidade diária de energia incidente por metro quadrado.

A produção de energia elétrica de uma célula fotovoltaica a 25°C sobre uma incidência normal de 1 kW/m² de radiação solar, dividido por 1 kW define a eficiência desta célula. Esta eficiência varia de acordo com o tipo de semicondutor utilizado e

tecnologias empregadas para melhorar as propriedades físicas da célula, assim como associação de camadas de diferentes semicondutores. No entanto, em condições de operação, variações meteorológicas influenciam tanto o desempenho, que células mais eficientes podem gerar menos energia que células menos eficientes em determinadas regiões do globo.

Figura 2-2: Irradiação solar diária por metro quadrado no Mundo.

Fonte: SolarGIS © 2013 GeoModel Solar

Uma forma de comparar a produção de energia considerando essa interação das propriedades da tecnologia fotovoltaica com o ambiente em condições de operação é utilizar uma medida de disponibilidade de geração de energia elétrica, como o fator de capacidade (FC) que mede a relação entre a geração de uma usina e sua capacidade instalada, ou seja, em um dado período, qual a porcentagem da capacidade instalada Watt pico (Wp) desta tecnologia vai efetivamente gerar de energia em Watt hora (Wh).

Por exemplo, em regiões de altitude elevada a irradiação é mais intensa, pois há menor camada de ar (aerossóis e vapor de água) que filtra os raios solares (GAMBI et al., 1998). A temperatura ambiente, assim como a poluição do ar, afeta a eficiência dos módulos. Quanto maior a latitude, maior a diferença do FC entre o inverno e o verão, pois no verão o tempo que o Sol brilha na região é maior que no inverno, e a inclinação mais acentuada da irradiação solar no inverno proporciona uma variação da quantidade de energia por área em função da inclinação do módulo FV.

Para os módulos FV o FC está entre 10% a 25% para sistemas fixos, mas valores fora deste intervalo podem ser encontrados para regiões específicas (IRENA, 2012). Na Europa, o valor médio medido em 2011 foi próximo de 10%, sendo gerados 44,8 TWh (IRENA, 2012). Para Alemanha este valor é de 9% nos dados de 2011, isto devido a uma latitude maior (IRENA, 2012). No Brasil, os fatores de capacidade encontrados estão entre 10% e 17% (BENEDITO, 2009).

Ambientalmente, um indicador importante é o retorno energético da fonte, que avalia em quanto tempo a instalação demora a gerar a energia necessária para manufaturar os equipamentos que a compõem. Esse indicador é importante uma vez que as células FV exigem grande quantidade de energia para serem produzidas. Estudos apontam retorno energético entre 1,5 e 2,5 anos (YUE; YOU; DARLING, 2014). Espera-se que o avanço nas técnicas de construção e tecnologias disponíveis reduzam os custos de produção consideravelmente, diminuindo o custo energético para seis meses nos próximos anos (MASSON; ORLANDI; REKINGER, 2014).

Para entender as expectativas de redução significativa dos custos da geração fotovoltaica, deve-se analisar as tecnologias e os componentes necessários para sua utilização. O núcleo dessa tecnologia são os módulos FV, compostos por conjuntos de células responsáveis pela conversão da radiação solar em eletricidade, mas também são necessários inversores, controladores de carga e bancos de baterias, para sistemas autônomos.

2.1 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

As tecnologias dos módulos FV disponíveis comercialmente hoje são divididas em células de 1ª, 2ª, 3ª geração e tecnologias emergentes (KHAN; ARSALAN, 2016).

As células de primeira geração são de Silício cristalino. Essas células são as mais comuns comercialmente por serem as células que apresentam o melhor custo benefício no momento.

As células de segunda geração compreendem os filmes finos, células que são fabricadas pela deposição do semicondutor sobre filmes flexíveis. Essa geração de

célula foi concebida para reduzir os custos de fabricação e está em desenvolvimento. Sua principal desvantagem é a eficiência inferior.

As células de terceira geração estão sendo desenvolvidas para obter máxima eficiência. Compreendem as células multijunção, as quais possuem eficiência duas vezes superiores às células de Silício. No entanto, o custo de fabricação dessas células é muito elevado.

Células de tecnologias emergentes são células sensibilizadas por corantes, orgânicas e Peroviskita. Sendo a utilização da Peroviskita a inovação mais promissora neste campo.

2.1.1 Células de Primeira Geração – Silício Cristalino

A primeira geração de células fotovoltaicas são as células de Silício cristalino, que representavam 90% do mercado mundial em 2014 (STATISTICA, 2016).

O processo de fabricação consiste em converter o Silício metalúrgico, que possui pureza entre 98 e 99%, em Silício policristalino (p-Si) com grau de pureza superior a 99,99999%, grau eletrônico. O p-Si pode formar as células de Silício multicristalino ou passar por um processo de cristalização para formar Silício monocristalino (m-Si). O m-Si possui estrutura homogênea em toda sua extensão, o que o torna mais elevado o custo para ser obtido, porém com maior eficiência na conversão fotovoltaica.

O processo para purificar o Silício metalúrgico ao grau eletrônico é feito, atualmente, por processos químicos de alto custo que resultam resíduos ambientais de difícil tratamento. Processos metalúrgicos para a produção de Silício grau solar estão em desenvolvimento. Esse processo demanda menos energia e reduz os impactos ao meio ambiente, além de se esperar redução no custo de produção entre 30% e 50% (EPE, 2013).

Em seguida, o p-Si é fundido e transformado em lingotes que são cortados em *wafers* tratados para produzir uma superfície perfeitamente plana. Então, são dopados, o que consiste na introdução de determinados tipos de átomos formando duas camadas para criar uma diferença de potencial. A camada tipo *p* recebe átomos de Boro e fica com excesso de cargas positivas, enquanto a camada tipo *n* recebe átomos de Fósforo e fica com excesso de cargas negativas. Em um forno de

difusão, recebem um revestimento antirreflexo e posterior metalização, usualmente prata, nas superfícies. Finas redes de metal, chamadas de contatos, são conectadas na frente da célula para coletar a corrente gerada. Os contatos são conectados a barras que, por sua vez, conectam grupos de células formando os módulos FV. Toda a parte de trás de cada célula é revestida com alumínio para criar uma superfície interior reflexiva. Finalmente, as células recebem uma camada de vidro na frente e de polímero atrás, cobertas por uma manta muito fina de isolante (EVA ou PVB) para protegê-las da exposição ao tempo.

Células de Silício monocristalino simples sem concentradores possuem eficiência em laboratório de 25%, com concentradores de 27,6% e policristalinos simples sem concentradores 21,3% (NREL, 2016).

2.1.2 Células de Segunda Geração – Filmes Finos

Com o objetivo principal de reduzir o custo de fabricação das células FVs, surgiram as células de filmes finos, construídas pela deposição de finas camadas de material fotossensível (semicondutores) sobre uma superfície de baixo custo, como vidro, aço inoxidável ou polímero, e revestidas por acrílico ou vidro para proteção mecânica. Quando o semicondutor é depositado sobre filmes plásticos e revestido também por filmes plásticos, os módulos formados são flexíveis, permitindo aumentar a aplicação dessa tecnologia.

Os materiais semicondutores comercialmente utilizados na fabricação dos filmes são:

- Silício amorfo (a-Si): O a-Si absorve mais luz solar que o c-Si. No entanto, o fluxo de elétrons é prejudicado, gerando uma eficiência bem mais baixa, entre 6 e 8% para células comerciais, porém, em laboratório 13,4% (NREL, 2016);
- Telureto de cádmio (CdTe): A utilização do CdTe como semicondutor reduz o custo de fabricação. A extração de Te está associada ao processamento do cobre, que limita a disponibilidade desta matéria prima e cria um elevado risco em relação à disponibilidade e preço deste insumo. Eficiência de 20% (NREL, 2016);
- Disseleneto de Cobre Índio Gálio (CIGS): Esta é a mais eficiente das tecnologias de filmes finos, 20% em laboratório, mas o processo de

fabricação é mais complexo e menos padronizável, encarecendo esse produto. A disponibilidade de índio e gálio é limitada e seu uso compete com outras aplicações como monitores LCD, aumentando o preço dessa matéria-prima. A eficiência dos módulos comerciais está entre 7 a 12% (NREL, 2016).

Estas células, embora mais baratas, por possuírem eficiência muito menor que as células de c-Si são pouco empregadas comercialmente.

2.1.3 Células de Terceira Geração – Multijunção

Com o objetivo de aumentar a eficiência das células foram desenvolvidas as células de terceira geração que utilizam diferentes camadas de semicondutores para converter de forma eficiente uma faixa maior do espectro solar. Essas células são chamadas de multijunção.

O projeto NGCPV, maior esforço colaborativo para tornar a geração fotovoltaica competitiva teve início em junho de 2010 e terminou em novembro de 2014. Ele integrou um total de 16 parceiros científicos: 9 japoneses (Instituto Técnico Toyota, AIST, Universidade de Tóquio, Daido Steel, Sharp, Universidade de Kobe, Asahi Kasei, Takano, e Universidade de Miyazaki) e sete europeus (UPM, Fraunhofer-ISE, Imperial College, ENEA, CEA-INES, BSQ e PSE). Dez desses parceiros são universidades e seis são empresas (CRISTÓBAL LÓPEZ et al., 2012).

O objetivo principal do projeto foi reduzir o custo do kWh gerado por células FV com utilização de células solares eficientes (CRISTÓBAL LÓPEZ et al., 2012). O aumento contínuo da eficiência das células solares multijunção fez esta tecnologia ser levada a sério. Mais de 20 MW destes sistemas foram instalados em 2011.

Apesar de progressos consideráveis já terem sido feitos, restam possibilidades para aumentar ainda mais a sua eficiência e reduzir o custo. A este respeito, houve três alvos principais que foram perseguidos pelo projeto NGCPV: (1) entender quais são os custos reais envolvidos na instalação de uma usina FV; (2) prever a produção de energia de uma usina FV em função do local de radiação e da tecnologia utilizada; e (3) progredir no estudo da arte das tecnologias envolvidas em geração com sistemas CPV, a saber: as células de alta eficiência, módulos e rastreadores.

As células multijunção desenvolvidas no projeto NGCPV possuem eficiência de 38,8% para células com 4 camadas (GaInP/GaAs/InGaAs/InP), 37,9% com 3 camadas (GaInP/GaAs/InGaAs) e 31% com duas camadas (GaInP/GaAs), sem concentradores. Com concentradores, células com 4 camadas chegam a 46%, 3 a 44,4% e 2 a 34% (NREL, 2016). O custo de células desse tipo é muito elevado. Células de 3 camadas podem ser compradas por 50 mil USD o m², logo essa tecnologia precisa ser usada com concentradores.

2.1.4 Células orgânicas FV

Células orgânicas estão num estágio muito novo de desenvolvimento. Apenas 20 anos de pesquisas respaldam essa tecnologia que consiste na utilização de compostos orgânicos de hidrocarboneto semicondutores. A eficiência ainda é muito baixa, entre 10 e 11% em laboratório, mas apresentam uma relação custo eficiência muito promissora, além de um vasto campo de aplicação como *Light Emitting Diode* (LED) orgânicos, transistores em filme fino e outras (JØRGENSEN et al., 2013).

2.1.5 Tecnologias emergentes

Aumento da eficiência ainda é importante, porque o custo de instalação dos módulos pode até exceder o custo para fabricá-los, e este custo é reduzido quando a área para atingir uma potência de saída desejada é menor (BAILIE et al., 2015). Embora a eficiência das células de 3ª geração seja elevada, o elevado custo de fabricação das células torna necessária a utilização de sistemas de concentração da radiação solar. Portanto, o equilíbrio entre custo de fabricação e eficiência ainda é uma relação importante para pesquisa nesta área.

Do inglês, **hybrid dye-sensitised solar cells** (DSSC), estas células FV usam um corante orgânico ao invés de semicondutor para absorver radiação. A eficiência desse tipo de célula é muito baixa ainda, 14% em laboratório (VAN HAL et al., 2003).

Geração **Termo Fotovoltaica** é uma tecnologia recente que busca converter a radiação da combustão de combustíveis ou de concentradores solares em energia elétrica. Sua aplicação estende-se a veículos híbridos, aquecimento doméstico e indústrias que utilizam alta temperatura, como a de cogeração, vidro, cimento etc. A

eficiência dessa tecnologia ainda é baixa, 11%, mas trabalhos apontam para uma eficiência futura de 24%, tornando esta tecnologia atraente (BASI et al., 2012).

Filmes finos que utilizam **nanoestruturas inorgânicas avançadas esféricas CIS** (*core-interface-shell*) (IMAI et al., 2012), em laboratório com eficiência entre 20% e 23%.

Células **multijunção utilizando Peroviskita e Cobre Índio Gáleo Selênio (CIGS)** são promissoras porque o Peroviskita é um mineral cujo processamento é mais simples que a purificação do Silício e com muito menor custo.

Liu et al., (2015) avalia o potencial de células solares multijunção de CIGS com Si. Concluiu que a eficiência das células atuais, em condições reais de operação, seria de 30% e que essa tecnologia pode ser melhorada. Logo, acredita-se que utilizando a Peroviskita, que possui eficiência teórica de 31%, pode-se chegar ao mesmo desempenho associada a CIGS, no entanto, com custo de fabricação entre 25 e 50% menor (BAILIE et al., 2015).

2.2 CONCENTRADORES FOTOVOLTAICOS

Concentradores consistem em usar espelhos parabólicos ou lentes para concentrar os raios solares em uma área menor, aumentando a intensidade da radiação incidente e utilizando menor área de células fotovoltaicas. Com pequenas áreas de semicondutores FV, viabiliza a aplicação de células multijunção, de alta eficiência e elevado custo. No entanto utilizam apenas radiação direta. Logo, são eficientes em locais com alta incidência de radiação direta e exigem uso de rastreadores solares, ou seja, equipamentos que movimentam o módulo e ou as lentes/espelhos para que se mantenham alinhados de forma a otimizar o aproveitamento da radiação direta ao longo do dia.

O emprego de eixos rastreadores, duplos ou simples, aumenta significativamente o custo dos investimentos. Ainda, devido ao aumento de temperatura da célula FV, concentradores exigem a utilização de filtros ou sistemas de arrefecimento para o módulo.

O tipo de lente mais empregado para este fim é a lente de Fresnel, pois ela possui menor custo de fabricação, podem ser fabricadas com uma ampla gama de material e são mais leves que as demais lentes. As lentes de Fresnel são divididas

em dois grupos: i) Com Imagem: lentes que produzem imagens precisas; e ii) Sem Imagem: lentes que não produzem imagem, apenas concentram a radiação(KUMAR; SHRIVASTAVA; UNTAWALE, 2015).

No entanto, as lentes de Fresnel sem imagem ainda podem gerar pontos de maior concentração de radiação na área próxima ao ponto focal. Para solucionar isto é utilizado uma segunda lente que uniformiza a distribuição da radiação concentrada em uma área precisa. Com a associação destes dois mecanismos foi criado o concentrador conhecido como *Dome-shaped Fresnel Köhler* (DFK), descrito na Figura 2-3.

Figura 2-3: Concentrador solar DFK.

Fonte: (ZAMORA et al., 2012a)

Desenvolvidos para o projeto NGCPV é composto por uma lente de Fresnel em forma de domo como Elemento Óptico Primário – do inglês POE – e um refrator, integrador Köhler, como o Elemento Óptico Secundário – SOE (ZAMORA et al., 2012a, 2012b).

Xie et al., (2011) estudaram a utilização de lentes para concentrar radiação solar analisando muitos trabalhos e chegaram à conclusão que lentes de Fresnel com imagem precisam de um rastreamento preciso para apropriada concentração da radiação e para não gerar pontos de concentração de radiação que possam danificar células FV. Como sistemas de rastreamento precisos possuem elevado custo de instalação, os autores desencorajam a utilização desta lente. No entanto,

encorajam o uso de lentes de Fresnel sem imagem para receber baixa, média e alta concentração aplicadas a concentradores solares por serem muito competitivos devido à alta eficiência óptica e pouco peso.

2.3 ARREFECIMENTO DE CÉLULAS FV

O resfriamento do módulo fotovoltaico é uma preocupação primária quando se deseja projetar sistemas com concentradores, tanto pela perda de eficiência com o aumento da temperatura da célula como, também, pela degradação a longo prazo da célula pela exposição a altas temperaturas. Esses conceitos serão discutidos com profundidade no próximo capítulo.

O sistema de arrefecimento deve ser projetado para manter a temperatura da célula baixa e uniforme, ser simples e de confiança, minimizar o consumo de energia e, se possível, permitir utilizar a energia extraída (ROYNE; DEY; MILLS, 2005).

Royne, Dey e Mills (2005) fizeram uma vasta pesquisa de técnicas passivas de resfriamento, com ar e micro canais utilizando fluidos. Compararam as diferentes técnicas de resfriamento de células com uso de concentradores e concluíram que todas são viáveis, no entanto demandam mais estudos para verificar a viabilidade econômica da sua utilização.

Micheli et al., (2013) fizeram um estudo da arte da aplicação de micro e nano tecnologia para resfriamento de células fotovoltaicas e concluíram que nano fluidos são promissores, porém, todas as aplicações carecem de estudos aplicados aos módulos com concentradores.

2.4 OUTROS COMPONENTES

Para extrair a máxima energia dos módulos FV, um equipamento chamado *maximum power point tracker* (MPPT) controla a tensão de operação dos módulos a todo instante para que estes operem o mais próximo possível do ponto de máxima potência.

Quando um módulo FV está operando, a energia elétrica é gerada em corrente contínua (CC), enquanto a rede de distribuição de eletricidade opera com corrente alternada (CA). Por isso é necessário, além dos módulos FV, acoplar ao

sistema de geração um inversor, responsável por converter a CC em CA. Mais recentemente, esse é o equipamento que faz a conexão da geração fotovoltaica com a rede elétrica. Esse equipamento apenas é dispensável em aplicações isoladas e em que os equipamentos a serem acoplados ao sistema de geração FV sejam alimentados por CC.

Os inversores são equipamentos de fabricação simples e disponíveis em diferentes faixas de potências. Além de converter a corrente eles também interagem com a rede básica, controlando a potência entregue a rede dependendo da frequência ou tensão da rede. Estes equipamentos podem, ainda, prestar serviços ancilares à rede como, por exemplo, fornecer reativo, caso configurados para tal.

Os sistemas isolados da rede elétrica, muitas vezes, precisam armazenar energia para utilizarem em horários de maior demanda ou quando o sistema não está gerando energia. Neste caso, utilizam-se bancos de baterias. Para carregar as baterias são usados controladores de carga que têm grande influência na vida útil do banco de baterias e inversores para despachar a energia das baterias caso sua utilização seja em CA. Esses componentes, quando necessário, pode elevar o custo do sistema solar FV em até 100%.

2.5 ESPECTRO SOLAR

A irradiação solar é emitida em diferentes comprimentos de onda e com diferentes intensidades. Ao atravessar a atmosfera, essa radiação sofre reflexão e absorção pela vasta gama de elementos e moléculas presentes. Logo, a intensidade da radiação que chega à superfície terrestre é diferente em virtude do local, dia e hora e altitude onde ela é medida.

A Figura 2-4 apresenta a potência presente no espectro solar para radiação extraterrestre, global e direta, para cada comprimento de onda. Esses dados foram criados pela G173-03¹ norma ASTM (GUEYMARD; MYERS; EMERY, 2002). Os comprimentos de onda estão divididos em 4 faixas distintas pela cor do fundo do gráfico: i) roxa radiação Ultra Violeta (UV), comprimentos de onda inferiores a 400

¹ Tabelas padrão para espectro de irradiância Solar de referência com massa de ar 1,5: Normal direta e Hemisférica para superfície inclinada a 37 °, Amer. Society for Testing Matls., West Conshocken PA, EUA. A curva mais escura é a norma ASTM E490-00, tabela padrão para espectro de irradiância Solar de referência para Constante Solar e massa de ar Zero.

nm; ii) amarela radiação visível, luz. Comprimentos de onda entre 380 nm e 780 nm; iii) laranja radiação Infravermelha próxima. Comprimentos de onda entre 780 nm e 3000 nm; e vi) vermelha radiação Infravermelha intermediária. Comprimentos de onda entre 3000 nm e 6000 nm.

A integral da curva azul entre os comprimentos de onda 250 nm e 4.000 nm, radiação global, resulta em 1.000 W/m^2 , que é a potência que se espera receber em um metro quadrado horizontal, proveniente da radiação emitida pelo Sol na condição padrão especificada. Com esses dados pode-se calcular a energia esperada para qualquer faixa do espectro solar.

Figura 2-4: Espectro de Irradiação Solar extraterrestre e ao nível do mar.

Fonte: (GUEYMARD; MYERS; EMERY, 2002)

O infravermelho possui ainda mais duas faixas, o distante que compreende a radiação com comprimentos de onda entre $6 \times 10^3 \text{ nm}$ e $15 \times 10^3 \text{ nm}$ e o extremo que compreende a faixa de comprimentos de onda entre $15 \times 10^3 \text{ nm}$ e $1 \times 10^6 \text{ nm}$.

2.6 A EFICIÊNCIA DA GERAÇÃO SOLAR FV

A eficiência de uma tecnologia de geração de energia elétrica é a quantidade da energia primária disponível que é convertida em energia elétrica. Essa energia

primária pode ser química, no caso dos combustíveis, mecânica, no caso da água e do vento, térmica, no caso do calor do interior da Terra, e radiação eletromagnética, no caso da solar.

A eficiência de uma célula convencional de junção única, ou seja, com apenas um tipo de semicondutor, não pode ir além do limite estabelecido por Shockley e Queisser (SHOCKLEY; QUEISSER, 1961) de 33%, sem concentração da radiação, devido a uma limitação física dos semicondutores para aproveitar todo o espectro solar. A Figura 2-5 apresenta a fração da radiação solar que incide em uma célula que será convertida ou perdida por cada fenômeno.

Figura 2-5: Eficiência teórica máxima e perdas para células FV iluminado pela intensidade de um Sol, em função do número de junções.

Fonte: (HIRST; EKINS-DAUKES, 2011)

Nessa figura, a energia gerada representa o limite teórico de eficiência de uma célula com diferentes números de junções. Pode-se perceber que o aproveitamento mais amplo do espectro associando diferentes semicondutores permite aumentar a eficiência em mais de 20% do limite teórico, e técnicas de

redução do aquecimento conseguem contribuir com mais de 25% de aumento da eficiência.

Fótons com energias abaixo da lacuna energética do semiconductor não podem ser convertidos em eletricidade e são desperdiçados enquanto uma grande parte dos fótons acima do gap serão convertidos de forma ineficiente devido à perda de estabilização térmica (HIRST; EKINS-DAUKES, 2011).

A eficiência de uma tecnologia FV é afetada pelos seus componentes e por fatores climáticos. A seguir são evidenciadas as perdas para eficiência das células FV:

- **Reflexão:** Refere-se à parte de radiação que é refletida pelo módulo, não alcançando a célula. Na Figura 2-5 está representada pela área amarela. A utilização de uma camada antirreflexiva fornece ganho à eficiência das células e é uma prática utilizada em todas as tecnologias.
- **Não absorção:** Esta perda é visualizada na Figura 2-5 está em rosa. Nenhuma tecnologia pode converter todos os comprimentos de onda do espectro solar em energia de forma eficiente, apenas a radiação que possui energia próxima ao gap energético.

Pode-se citar a técnica de utilização de uma micro camada de Silício amorfo (a-Si) sobre o m-Si aumentando substancialmente a eficiência da célula. A combinação dessas camadas permite que uma vasta faixa do espectro de radiação seja aproveitada para conversão da irradiação em eletricidade.

- **Sombra:** Os contatos são colocados sobre a célula na forma de malha para conduzir os elétrons gerados. Esta área que os contatos ocupam não recebe radiação, o que ocasiona uma perda.

A tecnologia de enterrar os contatos de uma placa utilizando ranhuras a laser traz aumento de eficiência em células (GREEN; WENHAM, 1984). Outra alternativa investigada são células com contatos atrás, o revestimento de alumínio na superfície de trás da célula não é colocada e os dedos e barras são colocados atrás da célula.

Temperatura: Muitos parâmetros da célula são dependentes da temperatura. A perda por aquecimento é resultado da diminuição da lacuna energética com o aumento da temperatura. A princípio a redução da lacuna

energética aumenta a foto corrente. No entanto, aumenta também a corrente de escuro. Como a tensão de circuito aberto é inversamente proporcional a corrente de escuro, a tensão de circuito aberto diminui. Sendo a potência o produto da corrente e tensão, e a queda na tensão mais acentuada que o aumento na corrente, resulta em diminuição do ponto de máxima potência da célula.

Paghasian e Tamizhmani (2011) ilustram a dependência da eficiência e temperatura no gráfico da Figura 2-6.

Figura 2-6: Gráfico da potência em função da temperatura para diferentes tecnologias.

Fonte: (PAGHASIAN; TAMIZHMANI, 2011)

- **Boltzmann:** Na Figura 2-5 representada pela área verde, essa perda tem origem na relação entre os ângulos de absorção e emissão, que resulta em um processo de geração de entropia (HIRST; EKINS-DAUKES, 2011).

Como mostra a Figura 2-7, o aumento da concentração da radiação incidente reduz o descasamento entre a radiação absorvida e o ângulo de emissão, convertendo-se na redução da perda de Boltzmann.

Observando a evolução da eficiência das células FV desenvolvidas em laboratório em todo o mundo (NREL, 2016), verifica-se que os limites teóricos apresentados são coerentes com os resultados empíricos.

A não absorção e o aquecimento são os principais responsáveis para a baixa eficiência de células FV. Para entender por que isso ocorre é necessário entender a natureza do espectro solar e como o efeito fotovoltaico é promovido na célula.

Figura 2-7: Perda de Boltzmann e potência de saída para célula FV iluminada por diferentes intensidades de radiação solar.

Fonte: (HIRST; EKINS-DAUKES, 2011)

2.6.1 Resposta Espectral das Células Fotovoltaicas

Cada tipo de semicondutor promove o efeito fotovoltaico, ou seja, converte a radiação eletromagnética em energia elétrica, para uma determinada faixa de comprimento de onda. A resposta espectral de um dispositivo fotovoltaico permite conhecer qual faixa de comprimento de onda do vasto espectro solar cada tecnologia utiliza para gerar energia elétrica.

A Figura 2-8 apresenta a resposta espectral de diferentes tipos de células FV em função do comprimento de onda. Ressalta-se que as células de c-Si possuem eficiência máxima, ou seja, máxima geração de corrente por potência de radiação recebida, para o comprimento de onda em torno de 950 nm e 1000 nm.

Figura 2-8: Resposta Espectral em função do comprimento de onda.

Fonte: (SANDIA, 2016)

Outra forma de medir a resposta da célula FV à radiação é a eficiência quântica (EQ) um adimensional. Dois tipos de EQ são considerados:

- Eficiência Quântica Externa (EQE): a razão entre o número de transportadores fotogerados (elétrons gerando corrente) para os fótons incidentes sobre a célula solar a partir de fora (fótons incidentes). A Figura 2-9 apresenta a EQE normalizada de diversas tecnologias FV em função do comprimento de onda e o espectro solar como referência.
- Eficiência Quântica Interna (EQI): a razão entre o número de transportadores fotogerados (elétrons gerando corrente) para os fótons absorvidos pela célula.

A norma internacional IEC 60904-8 apresenta a metodologia para medição da resposta espectral de um dispositivo fotovoltaico e determina uma técnica conhecida como método do filtro monocromático para definir a resposta espectral de uma célula fotovoltaica. Essa técnica consiste em iluminar o dispositivo com uma série de feixes (quase) monocromáticos em diferentes comprimentos de onda e medindo a corrente de curto-circuito gerado no âmbito de cada comprimento de onda. A resposta espectral (RE) é medida pela razão entre a fotocorrente (Ampere) gerada pela potência de radiação (Watt) incidente.

Figura 2-9: Eficiência quântica externa normalizada em função do comprimento de onda.

Fonte: Adaptado de SCHMALENSEE et al., 2015.

2.6.2 Relação da temperatura, eficiência e faixa de radiação

Como se pode observar pela resposta espectral na Figura 2-8, para células de Silício cristalino, poli ou mono, a faixa de comprimento de onda do espectro solar que promove conversão fotovoltaica está entre 300 e 1200nm, ou seja, parte da radiação infravermelha próxima, a luz visível ao olho humano e parte do ultra violeta. A radiação com comprimento de onda superior a 1200nm aquece a célula, reduzindo sua eficiência sem gerar eletricidade.

Integrando-se a curva de radiação solar global no nível do mar para faixa de comprimento de onda entre 300 e 1200nm obtém-se 83,6% da energia do espectro solar. Logo, considerando o espectro padrão da irradiação solar no nível do mar proposto por Gueymard; Myers e Emery (2002) e filtrando-se o restante do espectro que não é sensível para célula de c-Si, a célula deixa de receber 16,4% de energia

que não gera fotocorrente, mas contribui para aquecer a célula e, consequentemente, reduz sua eficiência. Ou seja, quanto menor a faixa do espectro solar que a célula absorve, menor sua temperatura de equilíbrio.

Essa quantidade de energia pode variar com a região do planeta. Em regiões de grandes altitudes o espectro solar é mais intenso. Buracos na camada de Ozônio permitem maior intensidade de raios ultravioletas chegarem à superfície. Os valores de potência do espectro solar utilizados são esperados para condições atmosféricas específicas e definidas pela referência da Figura 2-4. Para curva de radiação solar extraterrestre a célula deixaria de receber 21,4% da energia do espectro. A Tabela 2-1 apresenta os resultados para diferentes faixas de comprimento de onda selecionadas.

Utilizando o modelo termodinâmico proposto por Jones e Underwood (2001) pode-se calcular a temperatura de equilíbrio do módulo FV para cada faixa radiação incidente e, então, calcula-se a eficiência esperada para a célula a esta temperatura.

Tabela 2-1: Integral da curva de irradiância solar em Watts/m².

Faixa do Espectro Solar [nm]	Potência da Irradiância em W/m ²					
	Extraterrestre		Global		Direta	
Todo Espectro	1.347,93	100%	1.000,37	100%	900,14	100%
Resposta Espectral m-Si	958,05	71%	784,60	78%	701,69	78%
750-1150	339,97	25%	281,77	28%	262,93	29%
700-1150	407,22	30%	341,87	34%	317,64	35%
600-1150	566,33	42%	481,29	48%	443,71	49%
500-1150	751,16	56%	632,38	63%	577,50	64%
400-1150	936,60	69%	770,97	77%	691,70	77%

(Fonte: Autor)

Considerando uma célula de m-Si com eficiência de 14,8% exposta à radiação padrão no nível do mar, obtém-se a Tabela 2-2, que representa a temperatura máxima que a célula alcança quando selecionadas diferentes faixas de comprimento de onda incidindo no módulo e sua eficiência a esta temperatura.

Nota-se que, excluindo a radiação com comprimento de onda que não promove o efeito fotovoltaico, 22% da energia do espectro solar, a temperatura de operação da célula diminui 13 °C, o que representa uma redução de 0,59% da perda da eficiência por aquecimento. Ou seja, a célula produz 5,5% mais energia.

Tabela 2-2: Eficiência e Temperatura máxima da célula exposta por faixa de espectro de irradiação solar global ao nível do mar.

Faixa do Espectro Solar [nm] ²	Temperatura [°C]	Eficiência FV [%]
Espectro Inteiro	82,9	10,69
300-1200	74,6	11,28
400-1200	71,9	11,47
500-1200	64,3	12,01
600-1200	55,7	12,62
700-1200	47,5	13,20

(Fonte: Autor)

Como se pode observar na Figura 2-8, a resposta espectral da célula de c-Si é muito baixa para comprimentos de onda menores que 400nm, cerca de 10%. Considerando-se que a radiação com comprimento de onda inferior a 400nm e superior a 1200nm seja refletida, a temperatura de equilíbrio do módulo diminui e com isso a eficiência de operação da célula aumenta 0,79%, o que significa produzir 7,3% mais energia.

O mesmo raciocínio não é possível ser feito para refletir comprimentos de onda maiores que 400nm, pois a resposta espectral é maior para estes comprimentos de onda, ou seja, quando impedimos que a radiação com comprimento de onda menor que 500nm incidam no módulo, estamos privando a célula de uma parte da radiação que ela consegue converter em energia elétrica. Então, haveria um ganho pela redução da temperatura do módulo, mas haveria também uma perda por deixar de aproveitar radiação que promove o efeito fotovoltaico. Este cálculo não é linear. Para calcular o ponto de equilíbrio é necessário utilizar um modelo matemático que permita calcular a geração de corrente pela célula por comprimento de onda.

2.6.3 Modelagem matemática da célula FV de Silício cristalino

Radziemska (2003) e Radziemska e Klugmann (2002) modelam uma célula fotovoltaica de Silício cristalino em função da temperatura da célula para estudar o efeito da temperatura sobre o desempenho da célula.

² A especificação dos parâmetros utilizados para modelar a célula é apresentada no Anexo B.

Nesse estudo a corrente de curto-circuito, chamada pelos autores de fotocorrente, é calculada pela fórmula:

$$I_{ph}(\lambda) = \eta(\lambda) \cdot e \cdot \frac{P(\lambda) \cdot \lambda}{h \cdot c} \quad (1)$$

Em que:

λ é o comprimento de onda;

$I_{ph}(\lambda)$ é a fotocorrente em função do comprimento de onda [A];

$\eta(\lambda)$ é a eficiência quântica da célula em função do comprimento de onda;

e é a carga do elétron [$1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulombs];

$P(\lambda)$ é a radiação eletromagnética incidente na célula [$W/m^2/nm$];

h é a constante de Planck [$6.63 \cdot 10^{-34} m^2 \cdot kg/s$]; e

c é a velocidade da luz no vácuo [$2.998 \cdot 10^8 m/s$].

A corrente em escuro fixada em 10^{-9} A a $0^\circ C$ e o coeficiente de temperatura empregado é 14.5%/K (RADZIEMSKA; KLUGMANN, 2002). Disso temos a equação para o cálculo da corrente de escuro como:

$$I_0 = (1 + 0,145 \cdot (T - 273)) \cdot 10^{-9} \quad (2)$$

E a corrente de saída I_L é calculada por:

$$I_L = I_{ph} - I_0 \cdot \left(\exp \frac{eU}{mkT} - 1 \right) \quad (3)$$

Em que:

I_L é a corrente de saída (A);

$I_{ph}(\lambda)$ é a fotocorrente (A);

I_0 é a corrente de escuro (A);

e é a carga do elétron [$1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulombs];

U é a tensão de saída (V);

T é a temperatura da célula (K);

K é a constante de Boltzmann [$1.38 \cdot 10^{-23} J/K$]; e

m é o fator de idealidade da célula.

Em Benda (2012) fica evidente a relação da resistência da célula com a intensidade da radiação. Isso por que a resistência é função da temperatura.

Bunea et al. (2006) estudaram a desempenho de células de Silício cristalino em baixas intensidades e atribuíram a resistência de junção à perda acentuada de eficiência em baixas intensidades de radiação. A tensão é calculada em função da corrente de curto circuito, não é necessário adicionar correção. A correção usada para a corrente utiliza a resistência de junção (shunt):

$$I_L = I_{ph} - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{eU}{mkT}\right) - 1 \right] - \frac{U}{R_{SH}} \quad (4)$$

Em que:

I_L é a corrente de saída (A);

$I_{ph}(\lambda)$ é a fotocorrente (A);

I_0 é a corrente de escuro (A);

e é a carga do elétron [$1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulombs];

U é a tensão de saída (V);

T é a temperatura da célula (K);

R_{sh} é a resistência paralela (Ohm);

K é a constante de Boltzmann [$1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K]; e

m é o fator de idealidade da célula.

A tensão de circuito aberto $U_{oc}(T_0)$ é calculada como:

$$U_{oc}(T_0) = \frac{mkT_0}{e} \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) \quad (5)$$

Para a E_{g0} , a lacuna energética do semiconductor é 1,12 eV para o Silício cristalino a 300 K e a tensão de circuito aberto corrigida pelo efeito da temperatura T da célula é calculada como (RADZIEMSKA, 2003):

$$U_{oc}(T) = U_{oc}(T_0) - \left[\frac{E_{g0}}{e} - U_{oc}(T_0) \right] \cdot \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) - \frac{3kT}{e} \ln \frac{T}{T_0} \quad (6)$$

Em que:

$U_{oc}(T)$ é a tensão de circuito aberto (V);

T_0 é a temperatura de referência [300 K];

T é a temperatura da célula (K);

Radziemska e Klugmann (2002) calculam a derivada de (8) e concluem que a variação da tensão em função da temperatura é constante e igual a -0,00245 V/K. Com isto definimos a equação para a corrente de circuito aberto como:

$$U_{oc}(T) = U_{oc}(T_0) - 0,00245 \cdot (T - 298) \quad (7)$$

Em seu estudo, Hirst e Ekins-Daukes (2011) modelam a eficiência da célula em função da temperatura dela, da temperatura do espectro e do ângulo sólido de emissão, já que o ângulo sólido de absorção é um parâmetro da célula em questão. Essa simplificação utilizando o ângulo sólido de emissão foi baseada nos estudos de Markvart (2008). Essa variável é diretamente proporcional à corrente e à tensão. Com isso, fica demonstrado que a intensidade da radiação não afeta a perda de Boltzmann, pois esta perda é função apenas do ângulo sólido de emissão da fonte. O emprego de filtros ópticos não altera o ângulo sólido de emissão.

2.7 SEPARAÇÃO DO ESPECTRO SOLAR

A separação do espectro solar é uma ideia antiga, proposta em 1955 por Jackson. Essa ideia vem sendo aplicada como alternativa a células de multijunção, uma vez que células com diferentes semicondutores são arranjadas separadamente e recebem apenas a faixa do espectro que permite cada uma promover o efeito fotovoltaico de forma mais eficiente.

Mojiri et al. (2013) fazem uma ampla revisão das técnicas aplicadas à separação do espectro solar para aumentar a eficiência de células FV. A Figura 2-10 ilustra uma camada que filtra uma faixa do espectro solar, refletindo o restante do espectro.

As conclusões de Mojiri mais importantes são que o custo de filtros ópticos ideais é muito elevado e precisa ser balanceado com os ganhos esperados para aplicação dessa técnica, pois as separações implicam em perdas óticas significativas e, por isso, devem ser evitadas muitas faixas de separação.

Figura 2-10: Filtro seletivo para o espectro solar.

Fonte: (MOJIRI et al., 2013)

Taylor, Otanicar e Rosengarten (2012) sugerem a utilização de um sistema que circula água com nano partículas sobre o módulo para filtrar a radiação que incide na célula e aquecer o fluido a ser utilizado para aquecimento de água em residências.

Figura 2-11: Sistema de filtros com nano fluído.

Fonte: (TAYLOR; OTANICAR; ROSENGARTEN, 2012)

Essa proposta foi testada para diferentes tecnologias de células FV, mas filtros ópticos convencionais apresentaram melhores resultados para filtrar a faixa do espectro específica que se desejava, com exceção do Ge, em que o nano fluído

apresentou melhores resultados. Não foi testado o desempenho da célula em relação à sua produção de energia.

Muitos revestimentos de sol-gel foram relatados em trabalhos científicos com reflexão da radiação ultravioleta e antirreflexo para a radiação infravermelha próxima. Não são reportados estudos para calcular que faixa de infravermelho ou comprimentos de onda próximos do ultravioleta devem ser desprezadas mesmo promovendo o efeito fotovoltaico.

Russo et al. (2014) avaliaram a eficiência teórica da utilização de 4 tipos de células (InGaP2, GaAs], Si, e GaSb) e a separação do espectro solar para que cada célula recebesse a faixa de radiação que proveria a máxima eficiência para produção de eletricidade e concluíram que para filtros ideais a eficiência poderia chegar em 41,65% com células experimentais. Neste estudo, Russo não considera a concentração da radiação e sugere como estudo futuro.

Imenes e Mills (2004) propõem que um filtro óptico separe a faixa de 700 nm a 1100nm para direcioná-la a geradores fotovoltaicos e o restante direcionado para o absorvedor de uma usina termo solar do tipo torre, na Austrália.

2.8 FILTROS ÓPTICOS

Sebastian (1992) investigou as propriedades de um filme fino de Seleneto de Cobre (Cu_2Se) e Seleneto de Cádmio e Telúrio (CdSeTe) para evitar o aquecimento de módulos fotovoltaicos em regiões tropicais. As propriedades óticas desse filtro não eram adequadas e, embora verificado o efeito desejado, não houve ganho em produção de energia com a aplicação do filtro.

Roppolo et al. (2014) propuseram um revestimento hidrofóbico e que reflete a radiação com comprimento de onda superior a 1200nm. A temperatura dos módulos testados foi de fato menor. No entanto, a eficiência da célula foi inferior à eficiência sem o revestimento, devido a reflexão de parte da radiação útil à célula de c-Si, segundo os autores.

Revestimentos de sol-gel para reflexão da radiação ultravioleta e antirreflexo para a radiação infravermelha próxima são amplamente pesquisados (BARRERA et al., 2008; PRADO et al., 2010).

No entanto, não foram encontrados estudos que calculem a faixa de infravermelho ou ultravioleta que devam ser desprezadas mesmo promovendo o efeito fotovoltaico.

2.9 CONVERSÃO DO ESPECTRO SOLAR

Como a faixa entre 700 nm e 1000 nm apresenta a maior eficiência na produção de energia, maior resposta espectral, para geração fotovoltaica com m-Si é possível utilizando elementos de terras raras para conversão de determinadas frequências pouco eficientes para promoção do efeito FV para frequências maiores ou menores que são mais eficientes para gerar energia.

As terras raras são um grupo relativamente abundante de 17 elementos químicos, dos quais 15 pertencem, na tabela periódica, ao grupo dos lantanídeos (elementos com números atômicos entre $Z=57$ e $Z=71$, isto é, do lantânio ao lutécio), aos quais se juntam o escândio ($Z=21$) e o ítrio ($Z=39$), elementos que estão presentes nos mesmos minérios e apresentam propriedades físico-químicas semelhantes.

As aplicações dos metais de terras raras são abundantes, como os supercondutores, magnetos miniaturizados, catalisadores utilizados em refino de produtos diversos e componentes para carros híbridos. Íons de terras raras são utilizados como os átomos ativos em materiais luminescentes usados em aplicações de fotônica, com destaque para o laser Nd:YAG. Foram também extensivamente utilizados como dopantes em tubos de raios catódicos para televisores e computadores.

A propriedade interessante desse grupo de materiais é a capacidade de receber fótons em diferentes frequências e emitir outros fótons em faixas específicas de frequência com eficiência.

Quando um elemento recebe um fóton com comprimento de onda pequeno (bastante energia) e emite fóton(s) com comprimento de onda maior (menor energia), chama-se este fenômeno de conversão para baixo (*Down Conversion ou Down Shifting*). Quando ocorre o oposto, chama-se conversão para cima (*Up Conversion*).

Os íons lantanídeos possuem as propriedades mais promissoras para *up* e *down conversion*. Explorando as propriedades desses elementos, pode-se obter maior eficiência para células fotovoltaicas. Estudos apontam para um aumento teórico da produção de energia da célula de até 40% para células de c-Si sem concentradores solares (VAN; MEIJERINK; SCHROPP, 2012).

A título de exemplo a Figura 2-12 ilustra os possíveis ganhos de aproveitamento do espectro solar com a aplicação de técnicas de conversão de radiação. Faixas de radiação que não geram corrente poderiam ser convertidas para uma faixa de comprimento de onda que produziria energia (*Up Conversion*). E faixas de radiação que possuem fótons com energia muito superior à lacuna energética do semiconductor podem ser convertidos para comprimentos de onda maiores de forma a aproveitar de forma mais eficiente a energia presente neles (*Down Conversion*).

Figura 2-12: Ganhos teóricos do aproveitamento do espectro solar por células de c-Si.

Fonte: (VAN; MEIJERINK; SCHROPP, 2012)

2.9.1 *Up Conversion*

Proposto por Bloembergen em 1959, o composto recebe fótons de menor energia e emite fótons de maior energia. Como o composto precisa receber mais de

um fóton de menor energia para emitir um fóton de maior energia, este processo tem eficiência inferior a 100% de conversão de fótons e são necessárias concentrações altas de energia. No entanto, a absorção se dá em uma faixa que não promove o efeito fotovoltaico, ou seja, uma parcela da radiação do espectro solar não útil.

Utilizando compostos dopado com Érbio (Er^{+3}) e Itérbio (Yb^{+3}) pode-se absorver fótons emitidos com comprimento de onda entre 1050 a 3000 nm e convertê-los para uma faixa de frequência por volta de 700nm (VAN; MEIJERINK; SCHROPP, 2012).

2.9.2 Down Shifting

Down shifting é similar a *down conversion*, porém o composto absorve um fóton e emite apenas um fóton.

Em 2013 um ganho 0,16% na eficiência de célula de c-Si foi demonstrado por Shao, Lou e Xiao (2015) utilizando *Down Shifting* com granada de Ítrio e Alumínio dopada com Cério (YAG:Ce_3).

Em 2015, Yang et al. (2015) divulgaram ter conseguido um aumento de 15,38% na eficiência de uma célula de c-Si aplicando nano camadas de silicato de Fósforo e óxido de Silício para promover *Down Shifting*, obtido com um aumento de 34% da corrente de curto-circuito. E, em 2016, a mesma equipe publicou aumento de 18,77% na eficiência de uma célula de c-Si aplicando nano camadas de silicato de Fósforo e óxido de Silício para promover *Down Shifting* (HO et al., 2016).

2.9.3 Down Conversion

Proposto por Dexter em 1953 e demonstrado por Piper, DeLuca e Ham e Sommerdijk, Bril e Jager em 1974 (VAN; MEIJERINK; SCHROPP, 2012), absorvendo 1 fóton de maior energia (menor comprimento de onda) compostos emitem 2 fótons de menor energia (maior comprimento de onda).

Utilizando o Itérbio (Yb^{+3}) combinado com outro(s) íon(s) lantanídeos, absorve-se um fóton na faixa de comprimento de onda entre 500 a 550 nm e emite-se, para cada fóton absorvido, dois fótons com comprimento de onda por volta de 980nm. Utilizando o Praseodímio (Pr^{+3}) combinado com outro(s) íon(s) lantanídeos,

absorve-se um fóton na faixa de comprimento de onda entre 300 a 500 nm e emite-se, para cada fóton absorvido, dois fótons com comprimento de onda por volta de 980nm. Essas conversões são muito vantajosas para células de c-Si, pois a emissão acontece na faixa de máxima eficiência quântica da célula (MEIJERINK et al., 2006; VAN DER ENDE; AARTS; MEIJERINK, 2009; VAN; MEIJERINK; SCHROPP, 2012).

Em 2014, Park et al. (2014) demonstraram, empiricamente, que é possível obter ganho de eficiência utilizando *down conversion*. Nesse artigo foi testada uma célula de c-Si com eficiência de 10,22% sem a camada com dopantes para *down conversion*. Com a adição de uma camada com 1 mol de Túlio (Tm^{+3}), sua eficiência caiu para 9,87% e com Túlio (Tm^{+3}) e Itérbio (Yb^{+3}) caiu para 9,47%. Essa queda da eficiência foi atribuída a absorção e reflexão dos fótons de parte do espectro que se deseja que seja absorvido pela célula, pela geometria dos cristais de dopantes. O ganho de eficiência foi constatado apenas quando excluída a faixa do espectro que estava sendo refletida/absorvida pelos cristais. Constatou-se que, sem os dopantes a eficiência era de 5,05% e com os dopantes, respectivamente 5,57% e 5,48%.

Para confecção de um filme de *down conversion* transparente é necessário que os cristais dos dopantes sejam menores que 50nm (VAN; MEIJERINK; SCHROPP, 2012).

Qoaidier e Steinbrecht (2010) desenvolveram um filme de PMMA dopado com Európio (Eu^{+3}) e conseguiram um aumento de 0,1% na eficiência quântica, ou seja, cerca de 6,6% na energia gerada a um custo de € 0,08 /m².

3 METODOLOGIA PARA AVALIAR O EMPREGO DE TÉCNICAS DE SELEÇÃO E CONVERSÃO DA RADIAÇÃO SOLAR SOBRE A PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO

Sabe-se que a perda de eficiência é linear em função da temperatura, segundo a literatura (SKOPLAKI; PALYVOS, 2009). Mas sua relação para cada comprimento de onda não é bem explorada. Radziemska afirma que o aumento da temperatura reduz a penetração da irradiação na célula de c-Si e equaciona a relação da temperatura com a penetração na célula, para promover o efeito fotovoltaico (RADZIEMSKA, 2003).

O espectro solar é composto por uma ampla gama de comprimentos de ondas. Existem comprimentos de onda no espectro solar que pouco ou nada contribuem para geração elétrica de acordo com a tecnologia fotovoltaica. Não obstante, tais frequências do espectro contribuem para aumentar a temperatura de operação da célula e, conseqüentemente, aumentam perdas por aquecimento (RADZIEMSKA, 2003; ROPPOLO et al., 2014).

Células de Silício amorfo são pouco sensíveis à temperatura, no entanto, sua resposta espectral é restrita a uma pequena faixa do espectro solar. Por essa razão, possuem uma eficiência mais baixa que as células de Silício cristalino (FIELD, 1997; TAYLOR; OTANICAR; ROSENGARTEN, 2012).

Portanto, propõe-se uma metodologia para projetar e avaliar mecanismos de seleção e conversão do espectro solar. Um filtro óptico que reflete os comprimentos de onda que aquecem o módulo sem gerar energia ou gerando pouquíssima energia pode reduzir a perda de eficiência decorrente do aumento de temperatura. Porém, para desenvolver essa metodologia as hipóteses a seguir foram verificadas verdadeiras, a saber:

Hipótese 1: O Coeficiente térmico para ondas de maior energia é o mesmo que para ondas de menor energia?

Hipótese 2: O Coeficiente térmico varia linearmente para todas as frequências?

Para responder às hipóteses colocadas, foi realizado o experimento descrito no anexo A que constatou tanto a linearidade quanto o mesmo valor do coeficiente

térmico das células tanto de m-Si como p-Si, para diferentes frequências de radiação.

3.1 CÁLCULO DA ENERGIA GERADA COM O EMPREGO DO FILTRO ÓPTICO

Um filtro óptico é definido pela quantidade de radiação eletromagnética que ele reflete, transmite ou absorve para cada comprimento de onda. O filtro que permite à célula não aquecer desnecessariamente é um filtro que reflete ondas inferiores a um determinado comprimento de onda inicial (COi) e reflete ondas superiores a um determinado comprimento de onda final (COf). Ondas entre COi e COf devem ser transmitidas o máximo possível, pois forma uma janela de absorção pela célula FV da radiação incidente. Logo, essas duas variáveis são variáveis de decisão para projetar o filtro óptico. O objetivo é maximizar a energia gerada pelo módulo (E_g) em um determinado horizonte de tempo e determinadas condições ambientais. A energia gerada é calculada por:

$$E_g = \int_{t_i}^{t_f} I_L^t(U, I_{ph}) \cdot U^t(T_M) \cdot dt \quad (8)$$

Em que:

E_g é a energia gerada (Wh);

$I_L^t(U, I_{ph}^t)$ é a corrente de saída do módulo (A) no instante t , em função da tensão de saída do módulo e da fotocorrente;

$U^t(T)$ é a tensão de saída do módulo (V) no instante t , em função da temperatura e corrente do módulo;

$T_M(\Delta co, v, T)$ é a temperatura do módulo (K) no instante t , em função da faixa de comprimento de onda (Δco) absorvida, temperatura ambiente e velocidade do vento;

t_f e t_i definem o horizonte de tempo em que a energia é calculada discretizado em passos de 10 minutos.

Para que as influências das propriedades do filtro óptico possam ser incorporadas pela modelagem matemática da célula descrita a priori, a fotocorrente precisa ser calculada por:

$$I_{ph} = \int_{CO_i}^{CO_f} A \cdot I_{G(co,t)} \cdot T_R(co) \cdot RE(co) \cdot dco \quad (9)$$

Em que:

I_{ph} é a fotocorrente (A);

A é a área do módulo (m²);

RE(co) é a resposta Espectral (%) em função do comprimento de onda (CO);

I_G (co, t) é a irradiação solar global (W/m²/nm), em função do CO e do instante t;

T_R (co) é a curva de transmitância do filtro óptico (%), em função do CO;

CO_i é o comprimento de onda final, que abre a janela de absorção do módulo;

CO_f é o comprimento de onda final, que fecha a janela de absorção do módulo.

3.1.1 CONSIDERAÇÕES PARA CALCULAR A ENERGIA GERADA

Para calcular a geração de energia do módulo ao longo do horizonte de tempo definido, considerando as variações climáticas da região onde se pretende implantar esta geração, propõe-se utilizar a modelagem matemática exposta até o momento com as premissas descritas a seguir.

Para corrigir a radiação que incide na célula, recebe-se a informação de densidade de potência da radiação solar no plano horizontal [W/m²/nm], decompõe-se este valor de forma a reproduzir o espectro naquele instante de acordo com o horário, sobre o plano do módulo, descontando a parcela de radiação refletida pelo filtro.

Entender como o espectro solar pode ser alterado diante de mudanças ambientais é fundamental para uma precisa simulação temporal. Fernández et al. (2014) apresentam um estudo sobre a influência de parâmetros atmosféricos na geração de energia de células fotovoltaicas. Concluem que a massa de ar e a profundidade ótica dos aerossóis são os parâmetros mais relevantes e que a quantidade de água precipitável causa distorção do espectro pouco significativa.

Outro ponto a ser analisado é o efeito no espectro solar durante a manhã e à tarde, onde a massa do ar aumenta significativamente e, como constatado, afeta significativamente a distribuição do espectro. Ghitas (2012) estuda a variação da composição do espectro solar no período da manhã e da tarde e conclui que,

durante a manhã, o espectro solar possui entre 5 e 10% mais radiação no comprimento do vermelho e infravermelho (700-1200 nm) e durante a tarde 5% mais radiação no comprimento do azul e verde (400-600 nm).

3.2 PRÉ-SELEÇÃO DE FILTROS ÓPTICOS

O cálculo do filtro ideal só é possível para uma condição ambiental específica em um momento específico. Como os parâmetros ambientais variam bastante ao longo do ano e também entre os anos, não existe um filtro ideal que possua valores de CO_i e CO_f exatos. Além disso, esta precisão não é passível de ser executada ao se construir um filtro óptico.

Portanto, para se determinar qual o filtro deve ser construído para uma determinada região, propõe-se calcular a energia gerada para diversos tipos de filtros e comparar o desempenho em relação a geração de energia sem filtro algum, de forma que permita saber qual o valor de CO_i e CO_f desejável nesta região.

Para calcular n filtros, definem-se os valores de CO_i e CO_f que maximizam a potência de saída do módulo exposto à média de radiação horária máxima diária e respectiva temperatura ambiente média.

Para determinar os comprimentos de onda inicial e final do filtro, que maximiza a potência de saída, é feita uma otimização por varredura. A potência ótima de saída é calculada para incidência do espectro de $CO_i=280\text{nm}$ a $CO_f=4000\text{nm}$, dado que comprimentos de onda superiores a 4000nm são refletidos de qualquer forma pelo vidro.

Em seguida, para CO_f fixo, os comprimentos de onda menores são diminuídos em passos de 1 nm e para cada novo valor de CO_i , a potência de saída é recalculada. O mesmo é feito para as ondas de maior comprimento, ou seja, CO_i é fixado em 280nm e calculam-se as potências de saída para valores de CO_f decrescendo em passos de 1 nm.

Após a análise com CO_f fixo, diferentes filtros são definidos para diferentes condições ambientais frequentes na região em estudo. Estes valores de CO_i e CO_f devem ser ajustados para faixas passíveis de implementação física.

Ao final do processo obter-se-á um conjunto de filtros possíveis para serem aplicados nessa região. Esses filtros são avaliados quanto à produção de energia do módulo de forma que possibilite a escolha de um filtro único para ser aplicado.

3.3 APLICAÇÃO DE CONVERSÃO DO ESPECTRO SOLAR

Como pode ser constatado na Figura 3-1, a radiação eletromagnética com comprimento de onda inferior a 500nm gera 50% menos energia que comprimentos de onda entre 900 e 1000nm para células de Silício cristalino. Isso ocorre porque o fóton com comprimento de onda menor carrega mais energia que a necessária para promover o efeito fotovoltaico, logo este excedente de energia não é aproveitado.

Existem duas abordagens atuais para utilizar a radiação de comprimento de onda curto de forma mais eficiente. Uma é criar uma célula com várias junções, nas quais cada junção absorve eficientemente uma faixa de comprimento de onda do espectro solar. A outra é converter a radiação com comprimento de onda curto em radiação com maior comprimento de onda.

A segunda utiliza compostos químicos dopados com lantanídeos, que possuem a propriedade de receber fótons em diferentes frequências e emitir outros fótons em faixas específicas de frequência com eficiência.

Os processos de *up conversion* são muito mais complexos, pois exigem concentradores solares e sua eficiência, assim como o *down shifting*, é baixa para os compostos conhecidos. Portanto, esta tese foi focada apenas em *down conversion*, que é mais promissora.

O espectro solar possui a maior intensidade de energia para a radiação com comprimento de onda entre 500nm e 600nm. No entanto, nessa faixa a resposta espectral relativa para as células de Silício cristalino é inferior a 60%. Já para a radiação entre 900nm e 1000nm, a resposta espectral relativa dessa tecnologia é superior a 90%. Isso ocorre porque cada fóton com comprimento de onda menor carrega muito mais energia que a necessária para superar a lacuna energética do semicondutor (c-Si), enquanto que os fótons com comprimento de onda maior, que estão mais próximos do valor da lacuna energética do semicondutor, aproveitam toda sua energia para gerar corrente, sendo mais eficientes.

O que se propõe com a conversão de fótons de menor comprimento de onda para fótons de maior comprimento de onda é aumentar o aproveitamento energético destes fótons. Ou seja, se a eficiência quântica para ambos os comprimentos de onda forem iguais, aumentar-se-ia em um terço a quantidade de energia convertida em corrente pela radiação com comprimento de onda de 500nm a 550nm. A Figura

3-1 ilustra, no mesmo gráfico, a resposta espectral relativa de uma célula de Silício cristalino, o espectro solar e as faixas de absorção e emissão do composto químico.

Fonte: Adaptado de (ISET Kassel; Mullingan, 2004)

Em células solares de c-Si de baixa qualidade a eficiência quântica da radiação na faixa de emissão (comprimento de onda de 980nm) pode ser menor que a da radiação na faixa de absorção (comprimento de onda entre 500nm e 550nm). Desde que a eficiência quântica na faixa de emissão seja maior que 50% da eficiência quântica da faixa de absorção, é possível, através deste processo, obter-se ganho, porque, em teoria, o composto converte cada fóton com comprimento de onda entre 500nm e 550nm em dois fótons com menor energia e, consequentemente, com maior comprimento de onda, 980nm.

Existem perdas no processo de conversão, reabsorção de fótons e reflexão da radiação incidente. Logo, para utilizar a metodologia é necessário ensaiar a resposta espectral da célula com e sem a aplicação do composto. Então, compara-se a geração de energia sem filtro óptico nem conversão do espectro, apenas com o filtro óptico ótimo e com o filtro óptico utilizando o composto para conversão do espectro.

Ressalta-se que, desta forma, diferentes módulos de mesma tecnologia podem apresentar resultados bastante distintos decorrentes das características de sua resposta espectral. Isto justifica a aplicação da metodologia proposta.

3.4 METODOLOGIA PARA ESCOLHA DO FILTRO ÓPTICO ÓTIMO

A metodologia proposta nesta tese para escolher o melhor filtro óptico, em um horizonte de tempo compreendido entre t_i e t_f , é apresentada no fluxograma da Figura 3-2.

Neste fluxograma, os dados ambientais são recebidos e tratados: radiação incidente, velocidade do vento e temperatura ambiente. Conforme a disponibilidade de dados, o período de análise pode ficar restrito aos meses críticos em termos climáticos ou ser estendido para vários anos.

Uma curva de resposta espectral para célula estudada (R_i) é definida no modelo. No caso de se utilizar compostos de conversão de espectro, uma curva de resposta espectral é ensaiada e definida para o sistema célula mais composto, e definida no modelo.

As propriedades do filtro óptico N e premissas estabelecidas são utilizadas para corrigir a radiação que irá incidir na célula FV. Desta forma, para cada instante de tempo t , com passos de 10 minutos, tem-se uma curva de radiação $[W/m^2]$ por

comprimento de onda [nm]. Para cada instante t calcula-se a energia gerada pelo módulo. Esse processo é repetido para todos os instantes de t_i a t_f .

Em seguida, as propriedades do filtro óptico $N=1$ são alteradas pelas propriedades do filtro óptico $N=2$ e o processo todo reinicia com $t = t_i$.

O processo para calcular a energia gerada pelo módulo em cada intervalo de tempo é apresentado na Figura 3-3.

Figura 3-3: Fluxograma do processo para o cálculo do modelo de produção de energia do módulo.

(Fonte: Autor)

Definida a radiação incidente no módulo e as variáveis ambientais, calcula-se a temperatura de equilíbrio do módulo em cada instante t . Para calcular a temperatura do módulo em função da radiação incidente foi utilizado o modelo termodinâmico proposto por Jones e Underwood (2001). Esse processo está definido no fluxograma da Figura 3-3 como modelo TEMP.

Com a temperatura de equilíbrio do módulo e a radiação incidente em função do comprimento de onda, a potência de saída do módulo é calculada utilizando-se as equações 2, 4, 5, 7 e 9. A potência de saída será o produto da corrente de saída pela tensão de saída. Para rastrear o ponto de máxima potência aplicou-se o seguinte modelo de otimização.

$$\text{Objetivo: Maximizar } P = I_L(U(T_M), I_0(T_M), I_{ph}) \cdot U(T_M)$$

Tal que $U(T_M) \leq U_{OC}$ da equação 7. Este processo está definido no fluxograma da Figura 3-3 como modelo POT.

Calcula-se a energia gerada pelo módulo integrando os intervalos de t , para cada mês utiliza-se a equação 10, com as premissas para o comportamento do espectro solar. Este processo está definido no fluxograma da Figura 3-3 como modelo ENRG.

Por fim, compara-se a energia gerada pelo módulo com filtro, para todo o horizonte de tempo de análise, com a energia gerada pelo mesmo módulo sem o filtro.

3.4.1 Calibração do modelo

Os parâmetros do módulo que será utilizado precisam ser ajustados para que o modelo matemático capture com a melhor precisão possível os efeitos da radiação sobre a produção de energia. A Figura 3-5 ilustra o fluxo do processo para calibrar os parâmetros utilizados no modelo de cálculo da potência de saída do módulo.

Figura 3-4: Fluxograma do processo para calibrar o modelo de cálculo da potência de saída.

(Fonte: Autor)

Para uma dada radiação e temperatura do módulo, os parâmetros da célula no modelo matemático são ajustados para que os valores de corrente e tensão do módulo no modelo matemático sejam o mais próximo possível dos dados reais.

O mesmo processo é feito para calibrar o modelo termodinâmico do módulo. Para os dados ambientais medidos, verifica-se a temperatura do módulo e ajustam-se os parâmetros do modelo termodinâmico para que a temperatura prevista para o módulo seja o mais próxima possível das temperaturas medidas.

3.4.2 Medições da Resposta Espectral

Para avaliar o desempenho das técnicas de conversão da radiação, é necessário medir a resposta espectral do módulo e utilizar esta resposta espectral para calcular a energia gerada. A Figura 3-5 apresenta o processo utilizado para medir a resposta espectral de uma célula FV.

Figura 3-5: Fluxograma do processo para medir a resposta espectral de uma célula FV.

(Fonte: Autor)

A faixa de absorção da célula é discretizada em T valores de comprimento de onda. Para cada T, um filtro óptico monocromático é interposto entre a fonte de radiação (uma lâmpada de xenônio) e a célula FV. Mede-se a corrente gerada pela radiação que incide na célula e corrige-se este valor utilizando uma célula de referência. Esse valor é anotado e repete-se o processo até que todos os comprimentos de onda T sejam medidos.

4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA PARA PROJETAR UM FILTRO ÓPTICO ÓTIMO PARA UMA REGIÃO ESPECÍFICA

Como estudo de caso, foram adotados os dados ambientais do ano de 2013 da cidade de Petrolina, PE a 9° Sul, localizada no Brasil em uma região caracterizada por temperaturas elevadas ao longo de todo o ano e baixos índices pluviométricos. Esses dados estão disponíveis na referência (SONDA, 2016). Os dados dos meses de Janeiro, Abril, Julho e Outubro foram utilizados neste estudo de caso. Nesses meses, a temperatura média foi de 27,2°C, com máximas de 38°C e mínima de 17°C. A Tabela 4-1 apresenta a média da radiação horária máxima diária e respectiva temperatura ambiente média para cada mês simulado.

Tabela 4-1: Média da radiação horária máxima e respectiva temperatura ambiente média para os dados de cada mês utilizado na simulação.

Mês	Radiação [W/m ²]	Temperatura [°C]
Janeiro	791	31,6
Abril	686	30,5
Julho	636	26,6
Agosto	855	30,7

(Fonte: Autor)

4.1 RESULTADOS DA PRÉ-SELEÇÃO DE FILTROS ÓPTICOS

Para utilizar os modelos matemáticos propostos é necessário, como dado de entrada, a eficiência quântica da célula ou sua resposta espectral. Os dados medidos de resposta espectral foram obtidos da referência (GREEN, 2008).

A célula modelada é uma célula de Silício monocristalino, com coeficiente térmico igual a 0,5% por K e temperatura ambiente de 306 K (33°C). As demais especificações estão colocadas no Anexo D. É importante notar que, nesta pré-seleção, não é considerada a perda por reflexão inerente à aplicação do filtro sobre o módulo.

Como pode-se observar no gráfico da Figura 4-1, o aumento de potência para o filtro de ondas de comprimento curto é pouco significativo. Usualmente, o corte destas ondas (ultravioleta) até 400nm é feito para retardar a degradação da célula. Já o corte das ondas de comprimento longo apresentam aumento expressivo da potência de saída.

Figura 4-1: Potência de saída do módulo em função do comprimento de onda refletido e curva do espectro solar de referência.

(Fonte: Autor)

Como pode ser observado na Figura 4-1, o filtro ótimo corta as ondas de comprimento superiores a 989nm, resultando uma potência de saída 16% superior a potência inicial.

Observando a resposta espectral da célula plotada no mesmo gráfico, nota-se que as ondas de comprimento curto e longo são cortadas até o ponto em que a resposta espectral é inferior a 10%, indicando que resposta espectral inferior a 10% causa maior perda por aumento de temperatura que ganho com geração de eletricidade.

Alterando a temperatura ambiente para 303,7 K (30,7°C) e uma radiação solar de 855 W/m², como a observada em Outubro (vide Tabela 4-1), o filtro ótimo corta as ondas de comprimento superiores a 1008 nm, resultando em uma potência de saída 13% superior à potência inicial.

Para temperatura ambiente de 304 K (31°C) e uma radiação solar de 791 W/m², como a observada em Janeiro, o filtro ótimo corta as ondas de comprimento superiores a 1005 nm, resultando em uma potência de saída 12% superior a potência inicial.

Para temperatura ambiente de 303,5 K (30,5°C) e uma radiação solar de 686 W/m², como a observada em Julho, o filtro ótimo corta as ondas de comprimento superiores a 1026 nm, resultando em uma potência de saída 10% superior à potência inicial.

Por fim, para temperatura ambiente de 299,6 K (26,6°C) e uma radiação solar de 636 W/m², como a observada em Abril, o filtro ótimo corta as ondas de comprimento superiores a 1034 nm, resultando em uma potência de saída 9% superior à potência inicial.

Pode-se concluir que um filtro que corta apenas os comprimentos de onda superiores a 1000 nm deve ser o mais robusto diante das diferentes situações que o módulo está exposto ao longo dos diferentes meses do ano. Para verificar essa afirmação, é feita a simulação que calcula a energia gerada para o módulo com e sem filtro óptico.

4.2 AVALIAÇÃO DA ENERGIA GERADA

Para o cálculo da intensidade propõe-se, como simplificação possível, a aplicação de apenas um fator Radiação(t)/Radiação(padão) para todos os comprimentos de onda. No período da manhã, esse fator é acrescido na radiação superior a 700 nm e decrescido para a faixa entre 400-600 nm. No período da tarde, o inverso. Para a radiação entre 10 e 14h propõe-se a utilização do espectro padrão.

Uma premissa razoável é a de que, em curto prazo, em cidades sem grande quantidade de poluentes sendo emitidos, como é o caso de Petrolina, a profundidade ótica dos aerossóis dispersos não deve mudar a médio prazo. Com isso não são necessários ajustes ao espectro solar para essa variável.

Os pontos são integrados a cada 10 minutos e admite-se que o módulo opera em equilíbrio termodinâmico para a temperatura ambiente e radiação médias deste intervalo de tempo.

Cerca de 3 a 10% da radiação incidente sobre o filtro óptico é refletida (HSIAO et al., 2013). Portanto, considerou-se um filtro óptico que reflete a mesma radiação que o vidro do módulo reflete e outro filtro óptico que reflete 5% a mais que o vidro do módulo. Os resultados são apresentados nas Tabela 4-2 e Tabela 4-3.

Comparando o desempenho dos filtros 1, 2, 3 e 4 pode-se concluir que o filtro 3 apresenta um ponto de inflexão que resulta no melhor resultado para as condições

ambientais dessa região. A aplicação desse filtro nessa região resultaria em um ganho médio de 6,6% em produção de energia para os quatro meses simulados.

Tabela 4-2: Comparação da geração de energia para resposta espectral de referência, dados de Petrolina, ano de 2013, com a mesma refletância do vidro do módulo para radiação visível.

Mês	Filtro 1 COi 280nm COf 1200nm	Filtro 2 COi 280nm COf 1050nm	Filtro 3 COi 280nm COf 1000nm	Filtro 4 COi 280nm COf 950nm
Janeiro	4,8%	6,8%	7,1%	5,5%
Julho	4,0%	5,6%	5,7%	4,1%
Abril	4,4%	6,2%	6,4%	4,8%
Outubro	5,1%	7,2%	7,6%	6,1%
Total	4,6%	6,5%	6,8%	5,2%

(Fonte: Autor)

Aumentando a refletância para radiação visível, o ganho esperado cai de forma não linear. No entanto, a faixa ótima da seleção da radiação permanece a mesma.

Tabela 4-3: Comparação da geração de energia para resposta espectral de referência, dados de Petrolina, ano de 2013, com refletância 5% superior a do vidro do módulo para radiação visível.

Mês	Filtro 5 COi 280nm COf 1200nm	Filtro 6 COi 280nm COf 1050nm	Filtro 7 COi 280nm COf 1000nm	Filtro 8 COi 280nm COf 950nm
Janeiro	-0,8%	1,1%	1,4%	-0,1%
Julho	-1,5%	0,0%	0,2%	-1,4%
Abril	-1,2%	0,6%	0,8%	-0,7%
Outubro	-0,5%	1,5%	1,9%	0,4%
Total	-1,0%	0,9%	1,1%	-0,4%

(Fonte: Autor)

5 VALIDAÇÃO EMPÍRICA DO MODELO MATEMÁTICO

Para aquisição de dados para validar o modelo matemático foi feita a fotoespectroscopia das amostras dos filtros ópticos e foram coletados dados de temperatura ambiente, temperatura dos módulos, radiação global, tensão e corrente de dois módulos de m-Si de 5 W durante 20 dias com e sem filtro óptico. Também foram ensaiadas curvas características de ambos os módulos com e sem filtro óptico.

A análise comparativa dos dados indicou que o módulo com o filtro apresentou temperaturas até 6°C inferiores que as do módulo sem filtro. Em média o módulo 1, com filtro, apresentou temperatura 1,5°C inferior ao módulo 2.

Durante a fase controle, o módulo 1 apresentou 13,3% mais geração de energia que o módulo 2. Durante a fase de teste, o módulo 1 gerou apenas 2,3% mais energia que o módulo 2. Isso indica que as perdas inerentes da fixação do filtro e somadas às perdas do filtro óptico não foram compensadas pela redução de temperatura.

Com os dados do ensaio da curva característica dos módulos observou-se que, para uma radiação de 1100 W/m², o módulo sem o filtro apresentou temperatura 6°C superior ao módulo com filtro e ambos os módulos possuíam mesma potência máxima, 4,4 W. No entanto, ao se retirar o filtro óptico do módulo 1 a temperatura deste módulo se igualou à temperatura do módulo 2 e a potência máxima do módulo 1 subiu para 5,7W, ou seja, a aplicação do filtro reduziu a potência do mesmo módulo em 22,8%.

Para calibração do modelo matemático foi seguido o procedimento descrito no tópico 3.4.1 para ajustar os parâmetros da célula modelada e os parâmetros do modelo termodinâmico do módulo.

Após a calibração do modelo teórico foi possível verificar a origem das perdas observadas no ensaio da curva característica. Calculou-se que 2,7% da perda de corrente foi decorrente das falhas do filtro óptico na faixa do verde, comprimentos de onda entre 500nm e 550nm, e na faixa de comprimento de onda entre 400nm e 450nm, cor azul, que contribuiu com 3,3%. A sujeira no filtro foi responsável por 3,1% da perda observada. As perdas pelas falhas e pela sujeira não eram esperadas e somaram 9,1% no total de redução de corrente. A mudança de meio

entre o filtro e o vidro do módulo estimou a perda de 4,1%. Essa perda era esperada, mas foi desconsiderada na simulação teórica uma vez que o produto final da pesquisa seria depositado sobre o vidro do módulo e essa perda não ocorreria. O infravermelho que o filtro óptico cortou correspondeu a uma perda de corrente de 4,6%.

Por fim, demais perdas de transmitância do filtro óptico, já esperadas, somaram 7,7%. Essas demais perdas estavam estimadas em 5% na simulação teórica. Caso o filtro óptico fosse feito no vidro do módulo estas perdas seriam anuladas uma vez que são inerentes das propriedades do substrato que não possui nenhum tipo de tratamento antirreflexo.

O ganho proporcionado pelo filtro foi de 3% pela redução de temperatura da célula. Ganho inferior ao esperado de 5%. Esse ganho subestimado foi decorrente do coeficiente de dissipação de calor do módulo utilizado para os testes preliminares que é muito superior ao coeficiente de dissipação de um módulo maior.

Os dados obtidos com os ensaios de curva características foram comparados com os dados calculados com o modelo teórico e indicaram que o modelo prevê a potência de saída do módulo para os casos com e sem filtro com erro de 5%.

6 CONCLUSÕES

Nesta tese foi proposta uma metodologia para avaliação de mecanismos de seleção e conversão de radiação solar com o objetivo de se obter o melhor equilíbrio entre absorção de energia e aquecimento de módulos FV.

Como estudo de caso foi desenvolvido um modelo matemático para módulos de Silício monocristalino para avaliar o desempenho de filtros ópticos temporalmente e concluiu-se, teoricamente, que o ganho esperado para utilização de um filtro que reflete ondas de comprimento superiores a 1000nm, para o estudo de caso na cidade de Petrolina, PE a 9° Sul, estaria entre em torno de 1%.

Os ensaios empíricos permitiram validar a metodologia proposta comparando os dados reais com os dados teóricos obtidos pelas simulações do modelo matemático. Após a calibração do modelo matemático, verificou-se que os resultados de potência instantânea calculados com o modelo matemático e os dados medidos variam cerca de 5% tanto para o módulo com filtro quanto para o módulo sem filtro.

Verificou-se, ainda, que com a utilização do filtro óptico ocorre redução de 6°C, inferior à redução esperada. Essa discrepância foi decorrente da previsão da temperatura do módulo porque o coeficiente de dissipação térmica do módulo utilizado nos cálculos iniciais era inferior ao medido empiricamente.

Um parâmetro que também influenciou os resultados foi a diferença da curva de resposta espectral da célula utilizada nos teste e da célula teórica inicial. A resposta espectral da célula utilizada nos testes apresentava um aproveitamento superior de comprimentos de onda superiores a 1000nm que a curva de resposta espectral inicialmente utilizada.

Devido às propriedades do filtro óptico, como alta reflexão em comprimentos de onda úteis, não foi verificado ganho empírico com a utilização apenas de filtros ópticos. No entanto, caso fosse construído um filtro óptico com propriedades mais próximas da ideal seria possível constatar ganho real apenas com a utilização de filtro óptico.

Portanto, a tese que se propôs inicialmente foi verificada como verdadeira, pois existem comprimentos de onda que geram energia, mas a perda por aquecimento da célula é maior que a energia gerada por estes comprimentos de

onda. No entanto, restrições construtivas do filtro óptico não permitiram verificar este ganho empiricamente.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

A utilização da conversão do espectro solar utilizando lantanídeos, com o objetivo de levar a maior parte do espectro solar para a faixa de frequência na qual se tem a máxima eficiência quântica das células de c-Si serão estudadas em parceria com o Instituto de Química da USP. Compostos de conversão de radiação serão testados e otimizados para aplicação em células solares.

Células solares com dopantes de conversão de radiação serão produzidas para aperfeiçoar a camada antirreflexo em função das características desejadas para absorção dos dopantes de conversão e seleção do espectro para evitar aquecimento e aumentar a foto corrente gerada. Essa pesquisa está em curso, com uma parceria com o professor Dr. Lucas Carvalho Veloso Rodrigues – Laboratório dos Elementos do Bloco “F” do Departamento de Química Fundamental do Instituto de Química da USP.

Esse composto tem a propriedade de absorver radiação eletromagnética com comprimento de onda entre 500nm e 550nm e emitir esta radiação com comprimento de onda 980nm. A eficiência teórica deste processo é de 200%, ou seja, para cada fóton absorvido, dois fótons são emitidos, pois a radiação com menor comprimento de onda possui mais energia que a radiação com maior comprimento de onda.

Os cristais do composto possuem dimensões inferiores a 50 nm, o que permite que os comprimentos de onda superiores a 550 nm não sejam absorvidos pelo composto.

O ganho seria referente à eficiência da conversão. Em teoria, o composto converte cada fóton com comprimento de onda entre 500 nm e 550 nm em dois fótons com comprimento de onda 980 nm. Na Figura 3-1 pode-se observar que o espectro solar possui a maior intensidade de energia para a radiação com comprimento de onda entre 500 nm e 600 nm. Ainda a Figura 3-1 ilustra, no mesmo gráfico, a resposta espectral relativa de uma célula de Silício cristalino e as faixas de absorção e emissão do composto químico.

Na faixa de absorção do composto de conversão a eficiência quântica relativa para as células de Silício cristalino é inferior a 60%. Já para a radiação entre 900 nm e 1000nm, a eficiência quântica relativa dessa tecnologia é superior a 90%. Portanto, aumentar-se-ia em um terço a quantidade de energia convertida em corrente para esta faixa de 500 nm a 550 nm, idealmente.

Ainda, a dissipação de energia excedente dos fótons deixaria de ocorrer, o que resultaria em redução de temperatura da célula. Essa redução de temperatura também contribui para aumentar a eficiência da célula nas condições de operação.

Para aproveitar ao máximo a energia convertida é necessário refletir a radiação com comprimento de onda próximo de 980 nm.

O filtro que será utilizado possui alta transmitância para radiação com comprimento de onda entre 400nm e 950nm e reflete a radiação com comprimento de onda entre 950nm e 1050 nm.

No entanto, o processo envolve perdas que não são possíveis de se quantificar teoricamente. Existem perdas no processo de conversão, reabsorção de fótons e reflexão que serão medidas e analisadas empiricamente.

Portanto, com os experimentos futuros espera-se obter maior aproveitamento da energia presente em fótons da radiação solar com comprimento de onda entre 500nm e 550nm e reduzir perdas por aquecimento.

Esses resultados permitirão avaliar a viabilidade técnica de se investir no desenvolvimento de compostos químicos com ligantes que possibilitarão a conversão de comprimentos de onda menores simultaneamente, convertendo uma faixa maior de radiação do espectro solar, para aumentar o aproveitamento energético dos fótons e obter maior ganho com redução de temperatura de operação da célula.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA - ABRADÉE. Comparação Internacional de Tarifas de Energia Elétrica. [S.l: s.n., 19--].

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Resolução Normativa nº 481 de 17 de Abril de 2012. n. D, p. 1, 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012481.pdf>>. Acesso em : 14 jan. 2015

BAILIE, C. D. et al. Semi-transparent perovskite solar cells for tandems with silicon and CIGS. *Energy Environ. Sci.*, v. 8, n. 3, p. 956–963, 2015. Disponível em: <<http://xlink.rsc.org/?DOI=C4EE03322A>>. Acesso em: 16 nov. 2016.

BARRERA, M. et al. Antireflecting–passivating dielectric films on crystalline silicon solar cells for space applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 92, n. 9, p. 1115–1122, set. 2008. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927024808001244>>. Acesso em: 16 nov. 2016.

BASI, M.; FERRARIA, C.; MELINO, F.; PINELLI, M.; SPINA, P. R.; VENTURINI, M. Thermophotovoltaic Generation: A state of the art review. *Proceedings of Ecos 2012 - the 25Th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, p. 88, 2012.

BENDA, V. State of art and future trends in photovoltaic cells and modules. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, v. 5, n. 4, p. 1–8, 2012.

BENEDITO, R. da S. Caracterização da geração distribuída de eletricidade por meio de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, no Brasil, sob os aspectos técnico, econômico e regulatório. 2009. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

BUNEA, G. et al. Low light performance of mono-crystalline silicon solar cells. In: 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference, Anais...IEEE, 2006. Disponível em: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=%7B%7Darnumber=4059885%7B%7Dcontenttype=Conference+Publications%7B%7Dsorttype=asc%7B%7Dp%7B%7Dsequence%7B%7Dfilter=AND\(p%7B%7DIS%7B%7Dnumber:4059868\)%5Cnhttp://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDet](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=%7B%7Darnumber=4059885%7B%7Dcontenttype=Conference+Publications%7B%7Dsorttype=asc%7B%7Dp%7B%7Dsequence%7B%7Dfilter=AND(p%7B%7DIS%7B%7Dnumber:4059868)%5Cnhttp://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDet)>. Acesso em: 01 jan. 2016

CHAPIN, D. M.; FULLER, C. S.; PEARSON, G. L. A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. *Journal of Applied Physics*, v.25, n.5, p.676–677, maio 1954. Disponível em: <<http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1721711>>. Acesso em: 17 nov. 2016.

CRISTÓBAL LÓPEZ, A. B. et al. NGCPV: a new generation of concentrator photovoltaic cells, modules and systems. In: 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt. Anais... Frankfurt:[s.n.], 2012. Disponível em: <<http://oa.upm.es/19783/>>. Acesso em: 16 abr. 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. Análise da Inserção da geração solar na matriz elétrica brasileira : Nota Técnica. Rio de Janeiro: EPE, 2012. Disponível em: http://www.epe.gov.br/geracao/Documents/Estudos_23/NT_EnergiaSolar_2012.pdf. Acesso em: 20 jan. 2016

EPIA; GREENPEACE. Solar Generation 6 - Solar photovoltaic electricity empowering the world *The Journal of*. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/climate/2011/FinalSolarGenerationVIfullreportlr.pdf>>.

FERNÁNDEZ, E. F. et al. Analysis of the spectral variations on the performance of high concentrator photovoltaic modules operating under different real climate conditions. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 127, p.179–187, ago.2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2014.04.026>>. Acesso em: 16 nov. 2016.

FIELD, H. Solar Cell Spectral Response Measurement Errors Related. 1997. REVER

FRAAS, L.; PARTIAN, L. Solar cells and their applications. Hoboken, NJ: J. Wiley & Sons, 2010.

GAMBI, W. et al. Influência da altitude e do tamanho das cidades nas previsões de radiação solar do modelo “IGMK” no Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, v.16, n.1, p.15–25, mar.1998. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X1998000100002&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>. Acesso em : 10 nov. 2016.

GHITAS, A. E. Studying the effect of spectral variations intensity of the incident solar radiation on the Si solar cells performance. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, v.1, n.2, p.165–171, 2012. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2090997712000223>>. Acesso em : 16 nov. 2016.

GREEN, M. A. Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300K including temperature coefficients. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v.92, n.11, p.1305–1310, nov.2008. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927024808002158>>. Acesso em : 25 nov. 2014.

GUEYMARD, C. A.; MYERS, D.; EMERY, K. Proposed reference irradiance spectra for solar energy systems testing. *Solar Energy*, v.73, n.6, p.443–467, dez. 2002. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X03000057>>. Acesso em : 24 nov. 2014.

HEIDEIER, R. B. Conceitos básicos de risco na comercialização de energia elétrica no setor elétrico brasileiro e a atuação governamental. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia e Automações Elétricas) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

HIRST, L. C.; EKINS-DAUKES, N. J. Fundamental losses in solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v.19, n.3, p. 286–293, maio 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/pip.1160>>. Acesso em : 16 nov. 2016.

HO, W.-J. et al. Improving efficiency of silicon solar cells using europium-doped silicate-phosphor layer by spin-on film coating. *Applied Surface Science*, v.365, p.120–124, 2016. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169433216000878>>. Acesso em : 10 nov. 2017.

IMAI, Y. et al. Electrically conductive polymeric photonic crystals. *Soft Matter*, v.8, n.23, p.6280, 2012. Disponível em: <<http://xlink.rsc.org/?DOI=c2sm06740d>>. Acesso em : 10 nov. 2016.

IMENES, A. G.; MILLS, D. R. Spectral beam splitting technology for increased conversion efficiency in solar concentrating systems: a review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v.84, n.1–4, p.19–69, out.2004. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927024804001394>>. Acesso em : 10 nov. 2016.

IRENA. Renewable Power Generation Costs. [S.l: s.n., 2012?]. Disponível em: <http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/Overview_Renewable_Power_Generation_Costs_in_2012.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2016.

JONES, A. D.; UNDERWOOD, C. P. A thermal model for photovoltaic systems. *Solar Energy*, v.70, n.4, p.349–359, 2001. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X00001493>>. Acesso em : Acesso em : 10 nov. 2016.

JØRGENSEN, M. et al. The state of organic solar cells : a meta analysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v.119, p.84–93, dez. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2013.05.034>>. Acesso em : 10 nov. 2016.

KHAN, J.; ARSALAN, M. H. Solar power technologies for sustainable electricity generation - a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.55, p.414–425, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.135>>. Acesso em: 10 nov. 2016

KUMAR, V.; SHRIVASTAVA, R. L.; UNTAWALE, S. P. Fresnel lens: a promising alternative of reflectors in concentrated solar power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 44, p. 376–390, 2015.

LIU, H. et al. The realistic energy yield potential of GaAs-on-Si tandem solar cells: a theoretical case study. *Optics Express*, v.23, n.7, p.A382, 6 abr. 2015. Disponível em: <<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=oe-23-7-A382>>. Acesso em:

MARKVART, T. The thermodynamics of optical étendue. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, v.10, n. 1, p.15008, 1 jan. 2008. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/1464-4258/10/i=1/a=015008?key=crossref.88f901325e01cc945de9a11590d70782>>. Acesso em:

MASSON, G.; ORLANDI, S.; REKINGER, M. GLOBAL MARKET OUTLOOK : for Photovoltaics 2014-2018EPIA - European Photovoltaic Industry Association. [s.l:

s.n.]. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10854-007-9177-9>>. Acesso em : 05 nov. 2016.

MEIJERINK, A. et al. Photon management with lanthanides. *Optical Materials*, v.28, n.6–7, p.575–581, maio 2006. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925346705004106>>. Acesso em: 10 abr. 2016

MICHELI, L. et al. Opportunities and challenges in micro- and nano-technologies for concentrating photovoltaic cooling: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.20, p 595–610, abr.2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.051>>. Acesso em:

MOJIRI, A. et al. Spectral beam splitting for efficient conversion of solar energy : a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.28, p.654–663, dez.2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.026>>. Acesso em:

NATIONAL Renewable Energy Laboratory - NREL. Dados de eficiência das tecnologias de células fotovoltaicas existentes. Disponível em: <http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg>. Acesso em: 21 jan. 2016.

PAGHASIAN, K.; TAMIZHMANI, G. Photovoltaic module power rating per IEC 61853-1: a study under natural sunlight. In: 2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anais...IEEE, jun. 2011. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6186418/>>. Acesso em: 21 jan. 2016

PARK, W. J. et al. Down-conversion in Tm³⁺/Yb³⁺ doped glasses for multicrystalline silicon photo-voltaic module efficiency enhancement. *Journal of Non-Crystalline Solids*, v.383, p. 181–183, jan. 2014. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022309313001750>>. Acesso em: 21 nov. 2015

PRADO, R. et al. Development of multifunctional sol–gel coatings: anti-reflection coatings with enhanced self-cleaning capacity. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v.94, n.6, p.1081–1088, jun. 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2010.02.031>>. Acesso em: 19 jan. 2016.

QOAIDER, L.; STEINBRECHT, D. Photovoltaic systems: a cost competitive option to supply energy to off-grid agricultural communities in arid regions. *Applied*

Energy, v.87, n.2, p.427–435, fev.2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.012>>. Acesso em: 10 dez. 2015.

RADZIEMSKA, E. The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells. Renewable Energy, v.28, n.1, p.1–12, jan. 2003. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148102000150>>. Acesso em: 10 dez. 2015.

RADZIEMSKA, E.; KLUGMANN, E. Thermally affected parameters of the current-voltage characteristics of silicon photocell. Energy Conversion and Management, v.43, n.14, p. 1889–1900, 2002.

ROPPOLO, I. et al. Multifunctional NIR-reflective and self-cleaning UV-cured coating for solar cell applications based on cycloaliphatic epoxy resin. Progress in Organic Coatings, v.77, n.2, p. 458–462, 2014.

ROYNE, A.; DEY, C.; MILLS, D. Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: a critical review. Solar Energy Materials and Solar Cells, v.86, n.4, p.451–483, 1 abr. 2005. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927024804003071>>. Acesso em: 21 jan. 2016

RUSSO, J. M. et al. Spectrum splitting metrics and effect of filter characteristics on photovoltaic system performance. Optics Express, v.22, n.S2, p.A528, 10 mar. 2014???. Disponível em: <<https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-22-S2-A528>>. Acesso em: 10 mar. 2014.

SALAMONI, I. T.; RÜTHER, R.; ZILLES, R. Uma oportunidade para o desenvolvimento da indústria fotovoltaica no Brasil: eletricidade solar para os telhados. Parcerias Estratégicas, v.14, n.28, p. 219–243, 2009.

SANDIA. sítio de internet de base de dados estatísticos. Disponível em: <<https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/2-dc-module-iv/effective-irradiance/spectral-mismatch>>. Acesso em: 20 set. 2016.

SCHMALENSEE, R. et al. The future of solar energy: an interdisciplinary MIT study. Massachusetts: MIT, 2015. Disponível em: <<https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2015/05/MITEI-The-Future-of-Solar-Energy.pdf>>. Acesso em 20 fev. 2016.

SEBASTIAN, P. J.; PATTABI, M. Solar control characteristics of Cu₂Se coatings. *Journal of Physics D: Applied Physics*, v.25, n.6 , p. 981–985, 1992. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/25/6/014/pdf>> Acesso em: 23 nov. 2016.

SHAO, G.; LOU, C.; XIAO, D. Enhancing the efficiency of solar cells by down shifting YAG: Ce³⁺ phosphors. *Journal of Luminescence*, v.157, p.344–348, jan.2015. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022231314005286>>. Acesso em:

SHOCKLEY, W.; QUEISSER, H. J. Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. *Journal of Applied Physics*, v.32, n.3, p.510–519, mar.1961. Disponível em: <<http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1736034>>. Acesso em:

SIMAS, M. S. Energia eólica e desenvolvimento sustentável no Brasil: estimativa da geração de empregos por meio de uma matriz insumo-produto ampliada. 2012. Dissertação (Mestrado em Energia)- USP. São Paulo, 2012.

SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J. A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*, v.83, n.5, p.614–624, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008>>. Acesso em:

SONDA : Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais do INPE. [Estação de Petrolina]. Disponível em: <<http://sonda.ccst.inpe.br/basedados/petrolina.html>>. Acesso em: 19 jan. 2016.

STATISTICA. sítio de internet de base de dados estatísticos. Disponível em: <<http://www.statista.com/statistics/492724/solar-pv-global-market-share-by-cell-technology>>. Acesso em: 1 abr. 2016.

TAYLOR, R. A.; OTANICAR, T.; ROSENGARTEN, G. Nanofluid-based optical filter optimization for PV/T systems. *Light: Science & Applications*, v.1, n.10, p.e34, out. 2012. Disponível em: <<http://www.nature.com/doifinder/10.1038/lssa.2012.34>>. Acesso em: 19 jan. 2016.

TRUPKE, T.; GREEN, M. A.; WÜRFEL, P. Improving solar cell efficiencies by down-conversion of high-energy photons. *Journal of Applied Physics*, v.92, n.3, p.1668–1674, ago. 2002. Disponível em: <<http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1492021>>. Acesso em: 19 dez. 2015.

VAN, W. G. J. H. M.; MEIJERINK, A.; SCHROPP, R. E. I. Solar Spectrum Conversion for Photovoltaics Using Nanoparticles. In: Third Generation Photovoltaics. [S.l.] : InTech, 2012. p. 1–29.

VAN DER ENDE, B. M.; AARTS, L.; MEIJERINK, A. Lanthanide ions as spectral converters for solar cells. *Physical Chemistry Chemical Physics*, v.11, n.47, p.11081, 2009. Disponível em: <<http://xlink.rsc.org/?DOI=b913877c>>. Acesso em: 10 dez. 2015.

VAN HAL, P. A. et al. Photoinduced Electron Transfer and Photovoltaic Response of a MDMO-PPV:TiO₂ Bulk-Heterojunction. *Advanced Materials*, v.15, n.2, p.118–121, 16 jan. 2003. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/store/10.1002/adma.200390022/asset/118_ft.pdf?v=1&t=gqdp5lup&s=9474d1f33d290d7652582d9a84398e77a460006d>. Acesso em: 10 dez. 2015.

XIE, W. T. et al. Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.15, n.6, p.2588–2606, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.03.031>>. Acesso em: 16 jan. 2016.

YANG, G. et al. Efficiency improvement of crystalline-Si Solar cell using the combination of Europium doped silicate phosphors down shifting and SiO₂ antireflective coating. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7183555/>> Acesso em: 10 dez. 2015.

YUE, D.; YOU, F.; DARLING, S. B. Domestic and overseas manufacturing scenarios of silicon-based photovoltaics: Life cycle energy and environmental comparative analysis. *Solar Energy*, v.105, p.669–678, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2014.04.008>>. Acesso em: 10 dez. 2015.

ZAMORA, P. et al. The dome-shaped Fresnel-Köhler concentrator. In: AIP Conference Proceedings, 2012, Anais...2012a. Disponível em: <<http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4753836>>. Acesso em 09 dez. 2015

ZAMORA, P. et al. Photovoltaic performance of the dome-shaped Fresnel-Köhler concentrator. In: Anais...10 out. 2012b. Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.929698>>. Acesso em 21 nov. 2016.

ANEXO A – ESTUDO DA POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

Segundo a literatura, a eficiência quântica é máxima para o comprimento de onda próximo ao 940nm (RADZIEMSKA, 2003), porque as células só convertem em eletricidade os fótons da radiação que estão próximos da lacuna energética (*band gap*) do semicondutor da célula.

Para as ondas menos energéticas o efeito FV não é promovido e apenas as ondas com maior energia produzem corrente. Mas, quanto menor o comprimento de onda, menor eficiência, como evidenciam as curvas de resposta espectral.

Logo, houve a necessidade de realizar um experimento para verificar as hipóteses 1 e 2, que permitisse traçar a curva da potência em função da temperatura para diferentes comprimentos de onda com o objetivo de calcular o coeficiente de temperatura. Esperava-se verificar se esse coeficiente é o mesmo para cada comprimento de onda e se sua variação era linear para todas as frequências.

O coeficiente de temperatura de um módulo FV representa que potência é perdida para cada grau que a temperatura do módulo se elevar. Para o módulo de m-Si o fabricante indicou 0,5%/°C e para o p-Si 0,05%/°C.

Para realizar o experimento foram utilizados, em laboratório, os LEDs primários azul, verde e vermelho e, também, um módulo de célula de m-Si de 5W com eficiência de 14,25%, tensão de circuito aberto 22,44V e corrente de curto circuito a 25°C de 0,34A e um módulo de célula de p-Si de 5W com eficiência de 12,63%, tensão de circuito aberto 21,52V e corrente de curto circuito a 25°C de 0,31A.

Os LED não emitem luz em um comprimento de onda específico, mas a emissão se concentra em uma faixa estreita. A Figura 0-1 ilustra a emissão de radiação eletromagnética, em Watts, para cada comprimento de onda, em nanômetros, de cada um dos LEDs, azul, verde e vermelho. Nota-se que a cor branca utiliza o total das três cores primárias e o magenta o total das cores azul e vermelho.

Também foram medidas, para cada cor de LED, a relação da potência luminosa e Lux, necessária para o experimento. O detalhamento desse ensaio pode ser apreciado no Anexo C.

Para aquecer cada módulo foi utilizado um forno elétrico, doméstico. Os módulos foram aquecidos à temperatura de 100°C e, conforme sua temperatura

decrecia, as medidas foram obtidas. A temperatura da célula foi verificada utilizando um termômetro laser.

Figura 0-1: Distribuição espectral da emissão dos LEDs primários em mínima potência.

(Fonte: Autor)

Os resultados permitiram observar o que se pretendia com o experimento. Nota-se que a cor verde produz, para ambas as tecnologias de células de Si, menos da metade da energia produzida pelas cores azul e vermelha. Isso porque a potência luminosa do LED verde é menor que dos outros LEDs.

Figura 0-2: Geração de energia em função da temperatura para célula de m-Si.

(Fonte: Autor)

Observou-se que o coeficiente de temperatura para o módulo de m-Si foi calculado em 0,45% iluminado pela cor azul, 0,49% iluminado pelo verde e 0,46% iluminado pelo LED vermelho.

Para o módulo de p-Si, foi calculado coeficiente de temperatura igual a 0,05% para o verde e azul e 0,06% para o vermelho.

Figura 0-3: Geração de energia em função da temperatura para célula de p-Si.

(Fonte: Autor)

Desta forma, conclui-se que a perda de eficiência da célula ocorre para todas as faixas de frequência na mesma proporção tanto para célula de m-Si quanto para a de p-Si. Esse resultado rejeita a hipótese de que as ondas de menor comprimento deixariam de promover o efeito fotovoltaico com o aumento da temperatura e aceita a hipótese 1.

ANEXO B - PARÂMETROS DO MODELO TERMODINÂMICO DO MÓDULO

A	1	m ²	Área
hcf	3	W*m ² *K	Coef. Convecção
hcl	3	W*m ² *K	Coef. Convecção
Pot	140	W	Potência do módulo
deltaT	20	K	
Tcéu	300	°C	Temp. Ambiente
Tchão	300	°C	Temp. Ambiente
echão	0.95		Emissividade chão
emódulo	0.9		Emissividade módulo
ecéu	0.95		Emissividade céu
sigma	5.669E-08	W/m ²	Cte. de Stefan–Boltzmann
Cff	1.22	K*m ²	Cte fill factor do módulo
Cmódulo	5723	J/K	Capacidade térmica do m[odulo
rhom	2330	kg/m ³	Densidade do Célula de c-Si
rhopoly	1200	kg/m ¹³²	Densidade do Polímero
rho vidro	3000	kg/m ¹³³	Densidade do Vidro
Cm	677	J/kgK	Capacidade térmica específica do Célula de c-Si
Cpoly	1250	J/kgK	Capacidade térmica específica do Polímero
Cvidro	500	J/kgK	Capacidade térmica específica do Vidro
dm	0.0003	m	Espessura do Célula de c-Si
dpoly	0.0005	m	Espessura do Polímero
dvidro	0.003	m	Espessura do Vidro
alfa	77%		Absorvidade da célula
Beta	0.0054	1/K	Coeficiente de temp.
ef.ref	14.8%		Eficiência de referência
Tcc	35	V	Tensão de máxima Potência
Imp	8.20	A	Corrente de máxima Potência

ANEXO C – ESPECTRO FOTOMETRIA DA EMISSÃO DOS LEDS REALIZADO NO LABORATÓRIO DE FOTOMETRIA DO IEE

O ensaio foi realizado no dia 13 de Abril de 2015, no laboratório de fotometria do Instituto de Energia e Meio Ambiente – IEE – da USP, com início às 9h30, temperatura ambiente 23,6°C, e término às 11h, temperatura ambiente 23%, pelo engenheiro Ms. Rinaldo Caldeira Pinto.

Os objetivos deste ensaio foram:

- Definir a curva de emissão de cada LED, vermelho, verde e azul, em função do comprimento de onda.
- A intensidade da emissão em Watts para diferentes potências, uma vez que o LED permite aumentar ou diminuir a intensidade luminosa.

Inicialmente foi medida a emissão em ângulo com a potência mínima para as 3 cores primárias e também para as cores branca e magenta, também com a potência mínima, sendo estas duas uma composição das três primeiras.

Foi verificado que cada LED primário emite luz em uma faixa de frequência bem definida, segundo a

Figura 0-1: Distribuição espectral da emissão dos LEDs primários.

(Fonte: Autor).

Nota-se que a cor branca utiliza o total das três cores primárias e o magenta o total das cores azul e vermelho.

Figura 0-2: Distribuição espectral da emissão dos LEDs Compostos.

(Fonte: Autor).

Posteriormente, como os dados de distribuição espectral da potência de cada LED primário, foram calculadas as potências totais integrando-se as curvas utilizando o método de Simpson, conforme apresentado na Tabela 0-1.

Tabela 0-1: Potência de emissão dos LEDs em ângulo para mínima potência.

	Azul	Verde	Vermelho	Branco	Magenta
Potência [W/sr.m²]	61,89	26,19	35,58	115,24	94,95
Potência Pico [W/sr.m²]	2,578	0,64	1,606	2,453	2,557
Comprimento de Onda Pico [nm]	443	516	631	Azul, Verde e Vermelho	Vermelho e Azul
Faixa Comprimento de Onda 95% [nm]	422-472	484-562	598-652		

(Fonte: Autor)

Em seguida, foram medidas as emissões do verde para os próximos 4 níveis de intensidade (aumentando a potência luminosa), para o vermelho para o segundo nível. Para o terceiro nível do vermelho o equipamento utilizado não pode realizar a medição porque a potência excede a potência máxima que o aparelho pode receber (excesso de fluxo). Para o segundo nível de potência do azul o equipamento acusou

excesso de fluxo. Conforme a Tabela 0-2, observa-se que os níveis de potência não são lineares.

Tabela 0-2: Potência de emissão dos LEDs em ângulo variando a potência.

	Vermelho1	Vermelho2	Verde1	Verde2	Verde3	Verde4	Verde5
Potência [W/sr.m²]	35,58	67,86	26,19	52,40	76,95	91,43	97,99
Potência Pico [W/sr.m²]	1,606	3,039	0,64	1,25	1,819	2,145	2,332
Fluxo Luminoso [Lux]	5.700	10.750	10.000	19.850	28.750	35.300	37.900

(Fonte: Autor)

Foram medidas as emissões das cores com incidência normal na câmera com as cores verde e vermelha. Para a cor azul o equipamento acusou excesso de fluxo.

Por fim, O LED foi deixado ligado com a cor Azul por 60 minutos e realizadas as medições da emissão para verificar se havia redução da potência emitida (estabilidade da emissão). Conforme a Tabela 0-3, foi verificada uma redução de 0,24% na potência total emitida após 28 minutos e então estabilizou. Para potência de pico houve aumento de 0,85% após 28 minutos e redução de 1% após 58 minutos.

Tabela 0-3: Variação temporal da potência de emissão.

Tempo [minutos]	0	28	58
Potência [W/sr.m²]	63,44	63,28	63,27
Potência Pico [W/sr.m²]	2,596	2,618	2,571

(Fonte: Autor)

ANEXO D - ESPECIFICAÇÕES MÓDULOS DE TESTES LABORATÓRIO

Módulo de m-Si

PHOTOVOLTAIC MODULE	
Model	A-10
Max Power	10 W
I_{sc}	0,62 A
V_{oc}	21,0 V
I_{mp}	0,57 A
V_{mp}	17,0 V
Max V Syst.	600 V
Ser. Number	0207792
SPECIFICATIONS AT 1000W/m ² 25° C AM1.5	

ANEXO E - RESULTADO DA ESPECTROFOTOSCOPIA DAS AMOSTRAS DE FILMES CEDIDOS PELA EMPRESA INSULFILME®

O aparelho utilizado realiza medições para comprimentos de onda entre 3300 e 200 nm. Os gráficos mostram o quanto a película absorve da emissão para cada comprimento de onda. Por exemplo, a amostra 25775 é praticamente transparente na faixa do visível. Ela absorve menos de 10% das emissões entre os comprimentos de onda de 380 a 780 nm. Já a amostra 25760, para a mesma faixa, absorve mais de 80% da emissão, sendo bem escura. Permite passar pouca luz.

A linha violeta (UV) indica o limite superior da faixa de ondas eletromagnéticas visíveis ao olho humano. Para a direita da linha violeta são ondas ultravioletas. As ondas ultravioletas são classificadas em A, B e C, sendo a C mais a direita deste gráfico.

A linha vermelha (IV) indica o limite inferior da faixa de ondas eletromagnéticas visíveis ao olho humano. Para a esquerda da linha vermelha são ondas infravermelhas.

A linha verde (IVP) indica o limite de 1150 nm, pois é o limite inferior da faixa de interesse para geração fotovoltaica utilizando células de Silício cristalino.

A linha azul claro indica a absorbância 1, pois o gráfico continua para cima de 1, no entanto a informação acima deste limite não é sensível a este estudo.

Os termos superior e inferior foram empregados relativos a energia da radiação. Ou seja, ondas com menor comprimento de onda são mais energéticas. Ondas com maior comprimento de onda carregam menos energia.

Código da Amostra: 25869

Código da Amostra: 25868

Código da Amostra: 25775

Código da Amostra: 25765

Código da Amostra: 25760

Código da Amostra: 25756

Código da Amostra: 25754

Código da Amostra: 25750

Código da Amostra: s

ANEXO F – EXPERIMENTOS PARA VALIDAÇÃO EMPÍRICA DO MODELO MATEMÁTICO

Para validação do modelo matemático foi adquirido um filtro óptico de um laboratório chinês. Após o filtro confeccionado, a curva de transmitância das amostras enviada pelo fabricante foi a curva da Figura 0-1.

Figura 0-1: Curva de Transmitância do FOA fabricado pelo fornecedor Chinês.

Após a espectrofotoscopia das amostras, as curvas de transmitância constatadas foram as curvas apresentadas na Figura 0-2.

Figura 0-2: Curva de transmitância do FOA importado da China.

(Fonte: Autor)

A Figura 0-3 apresenta as curvas medidas de transmitância das amostras do filtro óptico importado da China com 3 pontos de divergência.

Figura 0-3: Análise da curva de Transmitância do FOA importado da China.

(Fonte: Autor)

O ponto 1 ressalta que o fornecedor indicou que a transmitância seria mínima a partir de 970nm e constatou-se que o ponto de mínima transmitância é 1010nm.

O ponto 2 mostra uma queda acentuada na transmitância entre os comprimentos de onda 550nm e 600nm. Essa divergência é crítica para a finalidade do FOA, pois a radiação solar é máxima exatamente nesta faixa.

Por fim, o ponto 3 apresenta a queda da transmitância iniciada no comprimento de onda 440nm, atingindo o ponto de mínima transmitância em 410nm, enquanto que esperava-se elevada transmitância até, pelo menos, 400nm.

Preparação do ambiente de prova

Para avaliar o desempenho do emprego do filtro em células de m-Si, foram instalados dois módulos fotovoltaicos de Silício cristalino (A e B), de 5W, no telhado do espaço cultural, local do ambiente de prova do projeto no prédio da Engenharia Elétrica da EPUSP.

Figura 0-4: Módulos FV para teste preliminar fixados em estrutura de madeira para teste em campo.

Inicialmente, os módulos operaram sem receber nenhum tipo de filtro por um mês e os dados serão coletados para construção de um modelo de regressão para calcular a potência do módulo de teste em função da potência do módulo de referência.

Figura 0-5: Redutor de tensão construído e testado no laboratório do GEPEA.

Para medir a potência de cada módulo foi necessário construir um redutor de tensão com duas entradas e duas saídas, resistência variável, desenvolvido no laboratório do GEPEA. Este instrumento foi avaliado e está provendo dados precisos dentro da faixa de operação dos módulos.

Figura 0-6: Configuração do Datalogger.

Foram instalados mais 4 sensores, um PT100 em cada módulo para medir a temperatura dos módulos, um piranômetro para medir a radiação solar e um sensor de temperatura ambiente.

Figura 0-7: Equipamentos instalados no telhado do espaço cultural.

Foram coletados dados dos dois módulos antes da fixação do filtro óptico, fase de controle, durante 20 dias. Desses dados coletados, foram aproveitados 7 dias porque foram desprezados os dados de dias chuvosos e o datalogger deixou de coletar dados por falta de energia. Em seguida, o filtro óptico foi fixado no módulo 1, sem moldura para que o filtro ficasse o mais próximo possível do vidro do módulo, e foram coletados dados durante 10 dias, fase de teste. Desses dados coletados foram aproveitadas 2 dias pelos mesmos motivos já expostos.

A carga ligada a cada módulo foi variada ao longo da coleta dos dados com resistores de 100, 67, 55 e 47 Ohms para medir diferentes pontos da curva de

corrente-tensão, uma vez que não existe seguidor de máxima potência comercial para módulos de 5W.

Ensaio da curva característica

Para verificar o efeito preciso da aplicação do filtro, os módulos foram levados no Instituto de Energia e Meio Ambiente da USP para medir a curva característica dos módulos. Os módulos foram fixados em uma superfície com a inclinação de 23 graus, inclinação correta para os módulos ficarem perpendiculares à radiação solar naquele dia do ano.

Uma célula de referência foi fixada ao lado dos módulos para medir a radiação incidente.

Figura 0-8: Montagem dos módulos e célula de referência para ensaio da curva característica.

Foram feitas várias medidas de curva característica dos módulos 1 e 2 e da respectiva temperatura com a câmera térmica.

Em seguida, o filtro óptico foi removido do módulo 1 e novas curvas características foram medidas e sua temperatura medida com a câmera térmica.

Figura 0-9: Medições das curvas características dos módulos.

Ensaio de Transmissão do filtro Sujo

Após o ensaio da curva característica o filtro retirado do módulo estava muito sujo. Para calibração do modelo matemático teórico desenvolvido e utilizado para projetar o filtro óptico foi necessário realizar novo ensaio de transmitância com o filtro sujo.

A Figura 0-10 apresenta a curva de transmitância da amostra do filtro óptico adquirido limpa e suja.

Figura 0-10: Curva de transmitância da amostra do filtro óptico adquirido limpa e suja.

(Fonte: Autor)