



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

IGOR DE MEDEIROS MACIEL

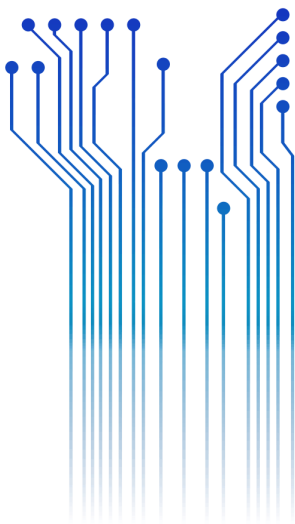


Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
ANÁLISE DOS EFEITOS DA TEMPERATURA SOBRE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS E TÉRMICO/FOTOVOLTAICO HÍBRIDOS



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande-PB, 2016

IGOR DE MEDEIROS MACIEL

ANÁLISE DOS EFEITOS DA TEMPERATURA SOBRE
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS E TÉRMICO/FOTOVOLTAICO
HÍBRIDOS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação de Graduação do curso de
Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Áreas de Concentração: Controle e Automação

Orientador:

Professor João Batista Moraes dos Santos, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba
Outubro de 2016

IGOR DE MEDEIROS MACIEL

ANÁLISE DOS EFEITOS DA TEMPERATURA SOBRE
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS E TÉRMICO/FOTOVOLTAICO
HÍBRIDO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação de Graduação do curso de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a obtenção do
grau de Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Áreas de Concentração: Controle e Automação

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por não medirem esforços para me proporcionar todas as condições necessárias a obter uma boa formação, me guiando por bons caminhos e provendo suporte essencial para superação de todas as adversidades ao longo desta caminhada. Agradeço a essa Instituição, pelas condições oferecidas, que me permitiram concluir este trabalho.

Agradeço também à minha imensa e acolhedora família, que com todo carinho e amor, não mediu esforços para me acolher bem em Campina Grande.

Agradeço também ao meu orientador, João Batista, pela paciência e tempo dedicado a orientar este trabalho.

“In the middle of difficulty lies opportunity”

Albert Einstein.

RESUMO

Este trabalho analisa comparativamente, por meio de técnicas de simulações computacionais com modelos que representam o comportamento de sistemas reais no ambiente do SIMULINK, como as variações na temperatura impactam na eficiência de sistemas de energia solar fotovoltaicos de células de cristal silício comerciais e como estas se comportariam com sistema de dissipação de calor que estabiliza a temperatura. A partir de modelos elaborados de acordo com especificações de painéis fotovoltaicos disponíveis no mercado, analisa-se a potência de saída de um módulo fotovoltaico para diversas temperaturas de operação. Por fim, é feita uma análise comparativa do aproveitamento energético dos painéis com dissipador estabilizante de temperatura comparados à operação normal sem dissipador acoplado.

Palavras-chave: Eficiência fotovoltaica, Fotovoltaico/térmico, Energia Solar, PVT.

ABSTRACT

This work develop a comparative study, using techniques computer simulations with models that represent the behavior of real systems in SIMULINK environment, focusing on how the temperature variations impacts the performance of commercially available photovoltaic energy systems and how they behave with a coupled heat dissipation system that stabilizes the temperature below a maximum offset. Using models developed in accordance with the specifications of PV modules available in the market, the power output of a photovoltaic module for different operating temperatures is measured. Finally, it is made a comparative analysis of the energy output of panels with temperature stabilizer sink compared to normal operation without heat sink attached..

Keywords.: Photovoltaics, Photovoltaic/Thermal, PVT, Solar Energy.

SUMÁRIO

Agradecimentos.....	iv
Resumo.....	vi
Abstract.....	vii
Sumário.....	viii
1 Introdução.....	9
1.1 Objetivos.....	10
1.2 Motivação.....	10
1.3 Metodologia.....	11
2 Revisão Bibliográfica.....	12
2.1 O Recurso Solar.....	12
2.1.1 A Natureza do Recurso Solar.....	13
2.1.2 A Intermittência Solar: Imprevisibilidade e Variabilidade Temporal.....	14
2.1.3 Variabilidade Geográfica Do Potencial Solar.....	16
2.2 Painéis fotovoltaicos.....	18
2.2.1 Energia e potência.....	18
2.2.2 Luz.....	19
2.2.3 Eletricidade e Potência.....	20
2.2.4 Materiais Eletrônicos.....	20
2.2.5 Diodos de junção PN e Células Solares.....	22
2.2.6 Eficiência de uma Célula Solar.....	26
2.2.7 Fabricação de Células Solares.....	28
2.2.8 Arrays de Células Solares.....	28
2.3 Efeitos da temperatura sobre sistemas fotovoltaicos.....	30
2.3.1 Dependência da temperatura para a eficiência de um modulo fotovoltaico.....	32
2.3.2 Eficiência fotovoltaica no mundo.....	33
3 Simulações e Resultados.....	36
3.1 Modelo SIMULINK.....	36
3.2 Resultados.....	40
4 Conclusões.....	41
Bibliografia.....	42

1 INTRODUÇÃO

O aumento da conscientização quanto à gravidade das consequências climáticas causadas por emissões de gases oriundos da queima de combustíveis fósseis, juntamente com o crescimento da demanda de energia elétrica descentralizada, tem atraído a atenção para utilização de fontes de energia limpas para industriais, pesquisadores e consumidores como alternativa às termoelétricas. Dentre as diversas fontes e obtenção de energia renováveis e relativamente limpas, a energia solar pode ser utilizada para obter energia na forma de eletricidade e calor em painéis solares. No entanto, o alto custo para obter eletricidade a partir de painéis fotovoltaicos e produção relativamente baixa quando comparado a outras fontes, limitaram por muito tempo os investimentos na geração de energia elétrica a partir de fontes que utilizam o efeito fotovoltaico. Além do fator do custo, existem algumas condições que limitam as aplicações que precisa serem contornadas. Alguns exemplos são: a intermitência da luz solar, a dificuldade para o armazenamento da energia gerada e perda de eficiência da célula fotovoltaica com aumento da temperatura de operação.

Painéis fotovoltaicos de cristal de silício, os mais utilizados atualmente, chegam a absorver até 80% da irradiação solar incidentes em sua superfície. No entanto, apenas 14–22% da energia incidente é efetivamente convertida em eletricidade, dependendo da tecnologia da célula fotovoltaica utilizada. A energia restante é convertida em calor. Devido a este efeito, em dias ensolarados laminados fotovoltaicos podem atingir temperaturas superiores a 35°C acima da temperatura ambiente. Tal aquecimento reduz significativamente o rendimento da conversão da energia da radiação solar em energia elétrica feita pelas células fotovoltaicas tornando-as extremamente ineficientes em alta temperatura ambiente e baixas condições de dissipação de calor, como, por exemplo, o sertão do nordeste brasileiro.

Vários mecanismos são responsáveis pela conversão em calor de irradiação em painéis fotovoltaicos. O mais importante estes são relacionados com a bandgap, efeito no qual apenas uma parte da irradiação solar de entrada é convertida em eletricidade, devido a perdas fundamentais que ocorrem nas células fotovoltaicas. A energia de fótons com uma frequência fora da banda de conversão do não irá ser absorvida pelo material da célula solar ativa. A energia destes fótons, em muitos dos sistemas atuais, é transformada em perdas muitas vezes nocivas ao rendimento e vida útil do sistema.

O painéis termo solares, por sua vez, utilizam a circulação de um fluido para realizar troca de calor, absorvendo o calor proveniente da absorção da energia luminosa pela superfície exposta ao sol. A utilização destes combinados com os painéis fotovoltaicos é conveniente e torna útil uma energia que

antes era perdida. Tais sistemas são denominados sistemas solares híbridos, por unirem as duas tecnologias de aproveitamento de energia solar.

Sendo assim, a utilização de sistemas solares híbridos representa uma excelente solução, do ponto de vista da eficiência energética. Podendo ser utilizado como uma alternativa para melhorar a eficiência de sistemas de geração de energia termoeletrica. Podendo ser utilizado conjugado com plantas térmicas para realizar o pré-aquecimento do fluido a ser utilizado para mover as turbinas e fornecendo energia elétrica para a planta de maneira independente.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como principal objetivo apresentar o efeito fotovoltaico com foco nos fatores que podem gerar reduções na eficiência da produção de energia elétrica destes. Em seguida, levando em consideração estes fatores físicos, realizar uma análise comparativa, por meio de simulações computacionais, quanto aos possíveis ganhos de rendimento entre um sistema geração de energia fotovoltaica comum e um sistema híbrido com a temperatura estabilizada por um dissipador ideal acoplado ao painel. Através de simulações computacionais, utilizando dados de painéis comerciais e variáveis que representem um ambiente quente e seco, por fim apresentar resultados que possam estimar as melhoras no aproveitamento energético do sistemas híbridos comparados aos sistemas fotovoltaicos convencionais.

1.2 MOTIVAÇÃO

Os recentes aumentos no custo da energia elétrica ao consumidor brasileiro, resultado da crise hídrica e financeira, faz com que o mercado busque soluções de eficiência energética economicamente viáveis. Com a queda significativa dos custos das células fotovoltaicos, estas estão se tornando, em casos específicos, uma alternativa financeiramente vantajosa para redução de custos com energia elétrica.

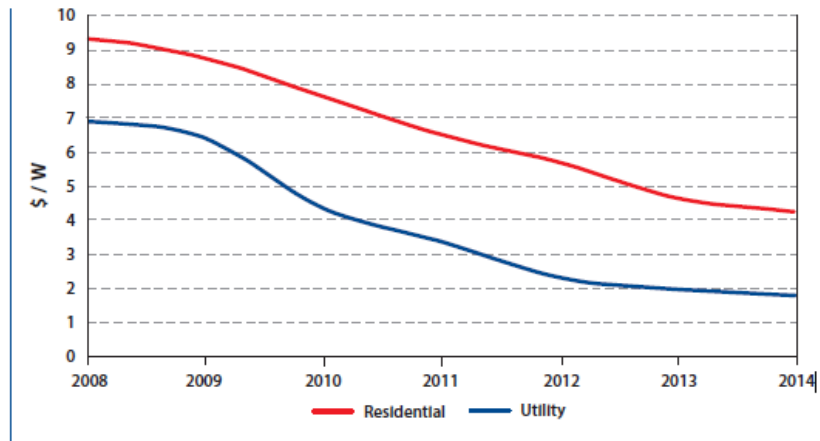


Figura 1 – Preço médio para sistemas fotovoltaicos residenciais e industriais em dólar por watt .

Buscando explorar de melhor maneira as possibilidades criadas pela resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012 da Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), (que estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.), este trabalho analisa um sistema alternativo com maior aproveitamento energético em regiões quentes.

Um grave problema quanto à utilização dos sistemas fotovoltaicos em grande parte do Brasil é a perda significativa de eficiência e a acelerada degradação dos módulos quando exposta a altas temperaturas.

Este trabalho busca analisar a solução sistemas de energia solar fotovoltaico/térmico híbridos para este problema e analisa os ganhos no aproveitamento energético do sistema de energia solar comparado ao sistema comum e se apresenta como alternativa econômica às indústrias e lares brasileiros.

1.3 METODOLOGIA

Este trabalho começa por uma revisão bibliográfica, partindo de uma apresentação do recurso solar como principal fonte de energia para o nosso planeta, abordando fatores relevantes à exploração da luz solar como fonte de energia elétrica, seguindo para uma breve explanação dos princípios físicos do efeito fotovoltaico, destacando as características intrínseca que influenciam majoritariamente a variação no desempenho da célula elétrica.

Numa segunda parte, é elaborado um modelo no ambiente do MATLAB para comparar a eficiência do sistema sem o controle de temperatura feito pela circulação de água e com o controle de temperatura.

Por fim, é feita uma reflexão sobre esta alternativa com base nos dados das simulações. Sua viabilidade prática, vantagens e desvantagens e projetos futuros que podem aplicar este princípio.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O RECURSO SOLAR

Para ressaltar a importância do tópico abordado por este trabalho começa-se por apresentar o quão é abundante a energia solar e como ela é pouco explorada para geração de energia elétrica em relação ao seu vasto potencial. A energia incidente sobre a terra oriunda do sol é várias ordens de grandeza maior do que qualquer outra fonte de energia disponível na Terra. Aproximadamente 174.000 terawatts (TW) de potência são continuamente entregues pela radiação solar para o nível superior da atmosfera da Terra. Dado que o total das médias globais de consumo de energia é cerca de 17 TW, a energia solar que atinge a Terra em uma hora é mais do que suficiente para suprir todas as necessidades de energia atuais da humanidade por um ano. Com exceção das energias nuclear, geotérmica e das marés, energia solar é a fonte de raiz de todos os recursos energéticos utilizados por seres humanos - do calor que impulsiona o vento e o ciclo hidrológico à energia química derivada de fotossíntese armazenada em combustíveis fósseis. O recurso solar está disponível gratuitamente e, em comparação com outras fontes de energia, relativamente distribuído uniformemente em todo o globo.

No entanto, o recurso solar é fundamentalmente distinto de outros recursos energéticos por sua intermitência. Em um determinado local na superfície da Terra, o recurso solar sofre de imprevisibilidade estocástica (flutuações em intervalos de tempo de minutos a dias resultantes da cobertura de nuvens e sistemas meteorológicos) e a variabilidade determinista (flutuações previsíveis mais de intervalos de tempo de dias a meses resultante da rotação diária da terra e mudanças sazonais). Apesar do seu tamanho grande, o recurso solar também é disperso. Dezenas de milhares de quilômetros quadrados de terra precisariam ser abrangidos por sistemas de captação de energia solar, para que a

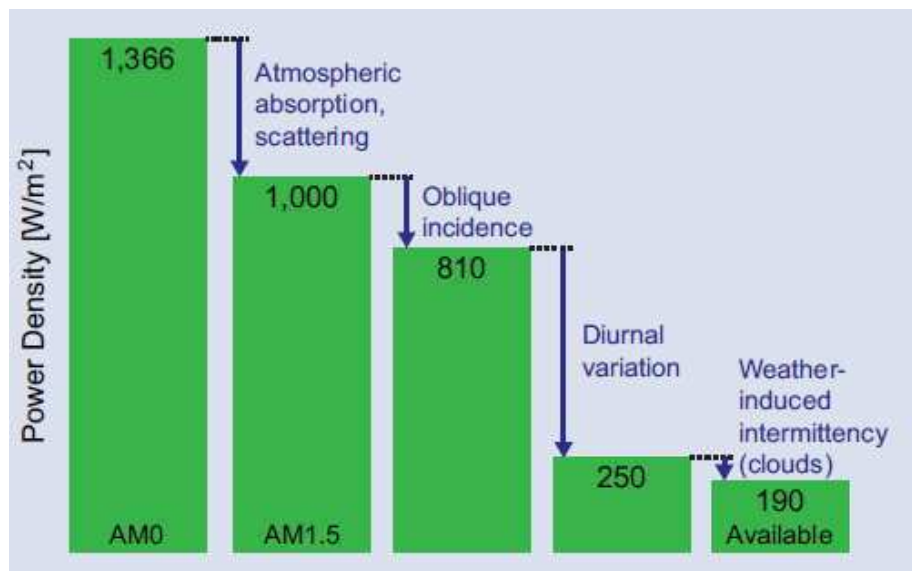
energia solar venha a desempenhar um papel significativo na transição para a fontes de energia zero de carbono, que são necessárias para evitar níveis perigosos de mudanças climáticas antropogênicas.

2.1.1 A NATUREZA DO RECURSO SOLAR

A grande maioria da luz que atinge a terra é oriunda do sol, que durante os últimos 4,6 bilhões de anos mantém uma reação de fusão termonuclear que produz a energia equivalente a cerca de 1 trilhão de bombas atômicas por segundo. Esta reação aquece a superfície do sol para cerca de 5500 ° C e faz com que ele emita radiação através de mecanismo similar ao que um filamento de tungstênio aquecido produz uma luz visível em uma lâmpada incandescente.

A luz solar leva 8,3 minutos para viajar os 150 milhões de quilômetros que separam o sol da Terra. Devido à grande distância de propagação, os raios de luz oriundos dos sol atingem o nível superior da atmosfera da Terra ao longo de caminhos praticamente paralelos. O sol pode, assim, ser considerada uma fonte de luz colinear. A luz solar atinge o topo da atmosfera da Terra com uma intensidade média de 1.366 watts por metro quadrado (W/m^2); esta quantidade é conhecida como a constante solar (Figura 2). Esta intensidade varia de acordo com $\pm 3,3\%$ ao longo do ano, como órbita ligeiramente elíptica da Terra leva-lo para mais perto e mais longe do sol. Também existem menores variações (inferior a $\pm 0,1\%$) ao longo do ciclo de manchas solares de 11 anos do sol.

Figura 2 -Redução da densidade de potência solar média por diversos fatores

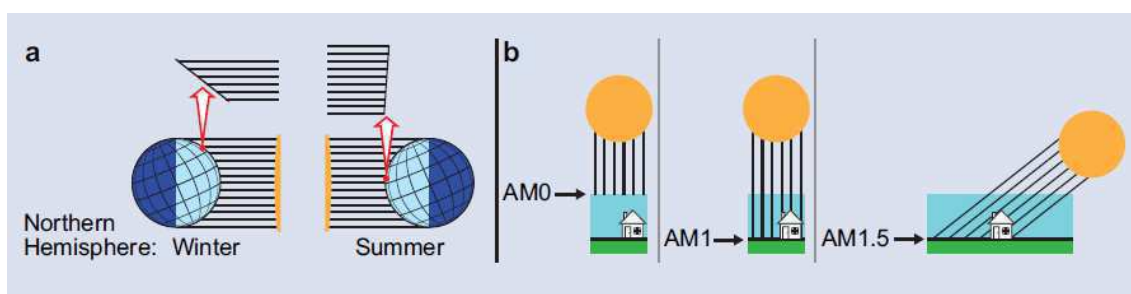


Fonte: (ENERGY INITIATIVE MIT, 2015)

A luz solar que viaja a partir do topo da atmosfera para a superfície da terra é tanto difundida como é absorvida pelas moléculas de ar, partículas em suspensão, e nuvens. A interação com a atmosfera

diminui, portanto, a intensidade da luz do sol a partir do valor medido na borda mais externa da atmosfera. Os efeitos de atenuação atmosférica são descritos pelo fator de massa de ar, em que uma massa de ar de 1 ("AM1") corresponde à intensidade de luz solar na superfície da terra, quando o sol está diretamente por cima (em outras palavras, no zênite) e a luz passou através de uma coluna de ar de espessura igual à da atmosfera (Figura 3). Por conseguinte, a constante solar corresponde a condições "AM0".

Figura 3 - Radiação solar Incidente, (a) Efeitos da Variação Sazonal, (b) Efeito da atenuação atmosférica.



Fonte: (ENERGY INITIATIVE MIT, 2015)

Uma massa de ar de 1,5 corresponde à intensidade de luz solar quando o sol é de $48,2^\circ$ a partir do ápice e a luz do sol ter passado através de uma coluna de ar 1,5 vezes mais longo do que a espessura da atmosfera. Desde que o sol raramente está diretamente acima, AM1.5 é usado como uma intensidade padrão típico nos testes e relatórios de ganhos de eficiência de células solares. Condições AM1.5, representam o padrão da iluminação do meio-dia normal em muitos dos grandes centros populacionais do mundo, corresponde a $1,000 \text{ W/m}^2$.

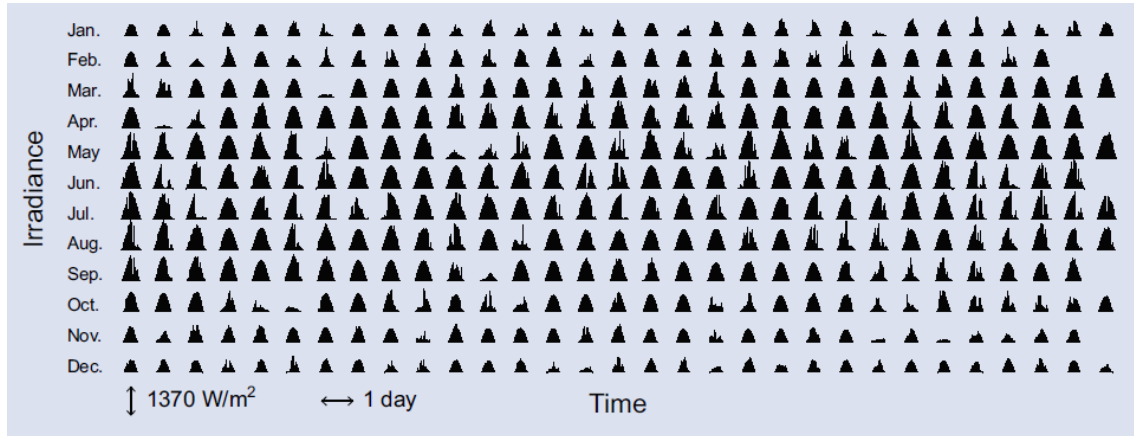
As principais fontes de variação na intensidade solar através do tempo e localização geográfica surgem a partir da obliquidade variável de radiação solar incidente em diferentes latitudes, revolução da Terra em torno do Sol (variação sazonal), a rotação da Terra sobre seu próprio eixo (variação diurna) e mudanças no clima.

2.1.2 A INTERMITÊNCIA SOLAR: IMPREVISIBILIDADE E VARIABILIDADE TEMPORAL

Tal como ilustrado pela Figura 4, a radiação solar incidente na superfície da Terra varia em muitas escalas temporais ao longo de um ano. Um desafio incontornável inerente à utilização de energia solar para satisfazer uma parte significativa das necessidades de energia da humanidade reside em converter este recurso altamente intermitente, que se caracteriza por flutuações dramáticas em

magnitude através de escalas temporais de largura, em uma fonte estável e altamente confiável de eletricidade.

Figura 4 - Perfil completo de Irradiancia Solar em Golden, Colorado (Noites inclusas na escala de tempo)



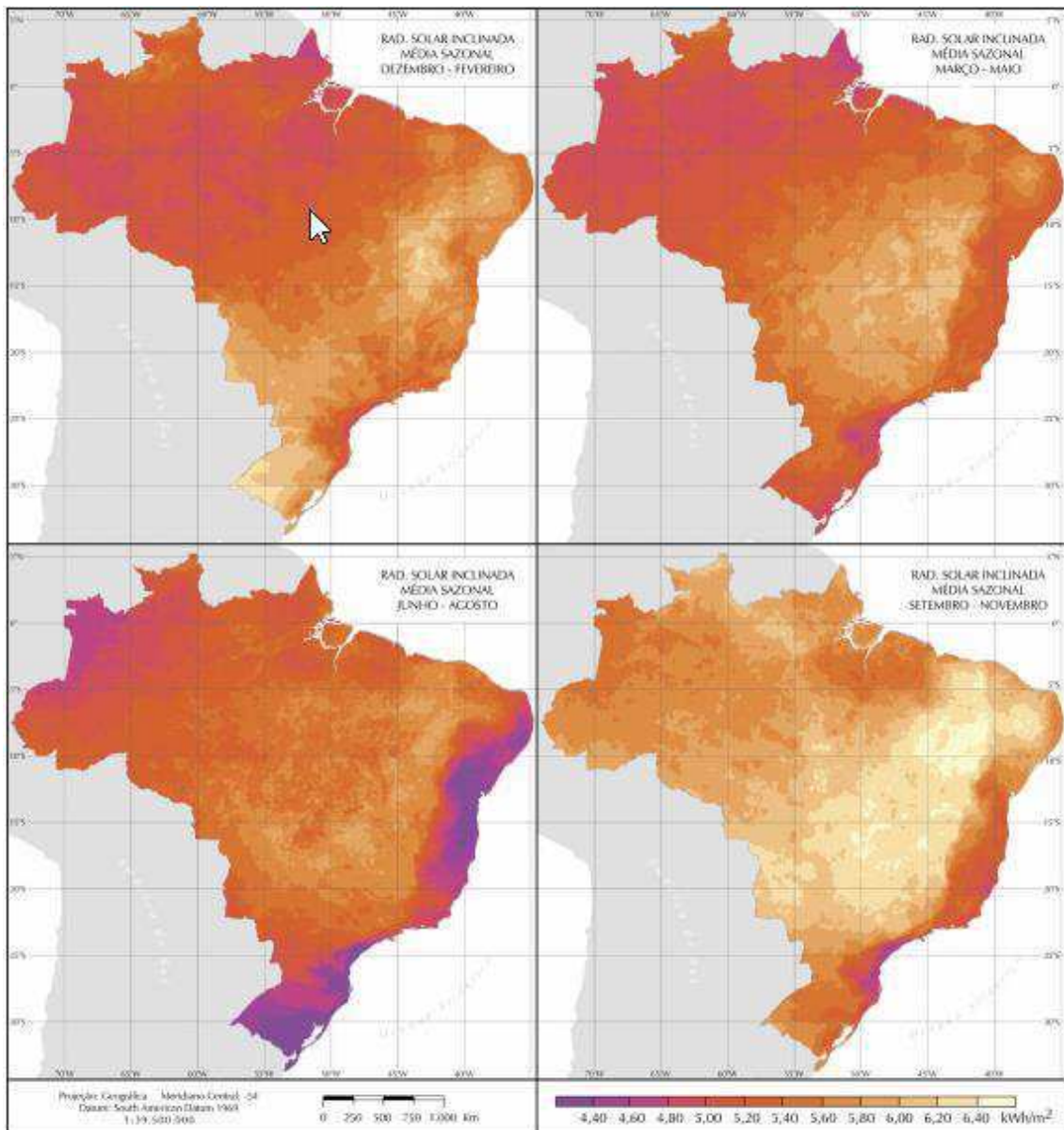
Fonte: (ENERGY INITIATIVE MIT, 2015)

A característica temporal mais óbvia do recurso solar é a sua flutuação diária. Variações maiores também são vistas ao longo do ano: o comprimento do dia, bem como o pico de irradiância e aumento integrado move-se no verão e diminui a mover-se no inverno. Nos prazos mais curtos, mudanças na cobertura de nuvens pode causar variações bruscas de intensidade solar: a radiação solar pode cair por um fator de cinco ou mais no espaço de minutos, como resultado de nuvens passageiras. A diferença entre um dia completamente ensolarado e um dia completamente nublado pode ascender a uma diferença de 15 vezes na radiação integrada e em sistemas meteorológicos que produzem condições nubladas, por vezes, persistem por vários dias. Algumas dessas mudanças na intensidade - incluindo resumo, alterações minuto a minuto, bem como flutuações do dia-a-dia devido ao mau tempo - são aleatórios e são rotulados aqui como fontes de imprevisibilidade. Outras variações - incluindo variação diurna e sazonal - são amplamente previsível e marcado aqui como fontes de variabilidade. Ao projetar sistemas de geração de energia é necessário considerar cada uma dessas características do recurso solar, começando com a imprevisibilidade.

2.1.3 VARIABILIDADE GEOGRÁFICA DO POTENCIAL SOLAR

Nota-se que o aumento da extensão geográfica de sistemas de energia solar pode suavizar alguns dos imprevisibilidade intrínseca do recurso solar. No entanto, a insolação também varia previsivelmente entre diferentes localizações geográficas. Na Figura 5 é ilustrada a variação geográfica em média de insolação no Brasil ao longo das estações.

Figura 5 -Radiação Solar Inclinada Sazonal no Brasil



(PEREIRA, 2006)

Analisando os mapas, fica evidente que o Nordeste oferece condições mais auspiciosas para a energia solar, com quase o dobro da intensidade média solares das demais regiões. É também claro a partir destes mapas que diferentes tecnologias de colheita solares são ideais para locais diferentes concentrando-se principalmente em fazer uso de iluminação direta normal e, portanto, necessitam de monitoramento para operar de forma eficiente, enquanto os sistemas não-concentração pode aproveitar tanto a iluminação direta e difusa.

2.2 PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Nesta seção será apresentado, em termos simples, os princípios que regem a conversão da luz em energia elétrica dentro de dispositivos fotovoltaicos (PV). Começando por descrever os fundamentos da conversão de energia, luz e energia elétrica. Em seguida, introduzir o conceito de semicondutores e discutir as propriedades elétricas e ópticas que regem a sua interação com a luz. Explorando em seguida o conceito do diodo como a unidade funcional fundamental de um dispositivo fotovoltaico e avaliar a caracterização e as métricas de desempenho padrão de células solares. Por fim, explicar como as células solares são combinados para formar módulos fotovoltaicos e arrays.

2.2.1 ENERGIA E POTÊNCIA

A energia pode ser definida como a capacidade de um sistema para realizar trabalho. No Sistema Internacional de Unidades, a unidade de medida de energia é o Joule, Potência é a taxa de fluxo de energia por unidade de tempo e é medido em unidades de watts, onde um watt é igual a uma energia de fluxo de um Joule por segundo. A energia pode, assim, ser expresso de forma equivalente em termos de potência vezes o tempo em unidades de watts-hora ou, mais comumente no setor de energia elétrica, quilowatt, megawatt, gigawatt - ou terawatt-horas, onde os prefixos *kilo*, *mega*, *giga*, e *tera* denotam fatores de multiplicação de mil, um milhão, um bilhão e um trilhão, respectivamente. Uma casa típica utiliza energia elétrica a uma taxa média de cerca de 1,3 quilowatts, correspondendo a um consumo de energia de cerca de 30 quilowatts-hora por dia

Energia não pode ser criada ou destruída, mas pode ser armazenada e convertida entre diferentes formas. Existem muitas formas diferentes de energia: a energia química armazenada dentro das ligações carbono-carbono em um pedaço de carvão, a energia potencial gravitacional do água elevada num reservatório represado, e a energia radiante continuamente entregue à superfície da terra pelo sol são exemplos familiares. O que são tipicamente vistos como dispositivos de geração de energia usinas a queima de combustíveis, hidrelétricas, ou painéis solares - são, portanto, na verdade, dispositivos de conversão de energia.

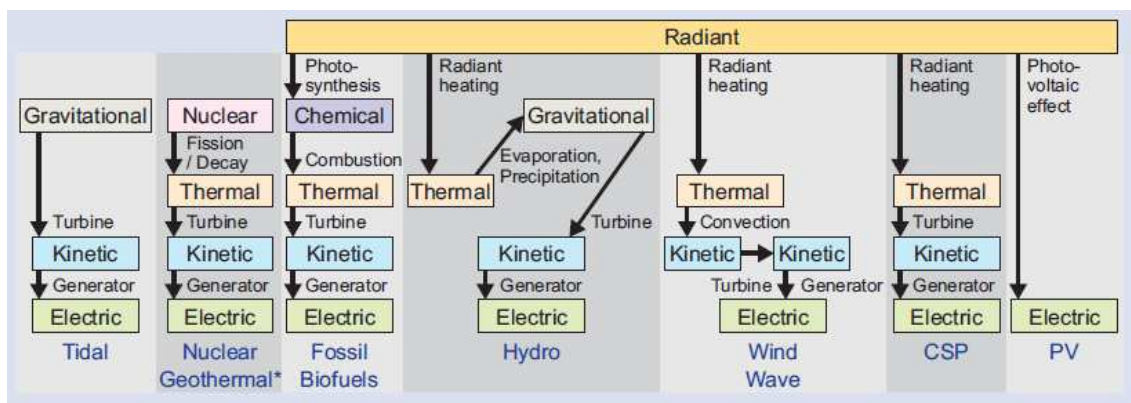


Figura 6 - Formas de Energia e Processos de Conversão (ENERGY INITIATIVE MIT, 2015)

Na figura 6 é apresentada em formato simplificado as formas de energia e processos de conversão de energia que são relevantes para a geração de energia elétrica. Nota-se que a única entrada contínua de energia para a Terra é a energia radiante do sol. Cada processo de conversão de energia, indicado pelas setas marcadas na Figura 6, envolve a conversão irreversível de alguma porção da entrada de energia térmica para energia de baixa qualidade (isto é, o calor residual). Neste contexto, a eficiência de um processo de conversão de energia é a relação entre a produção de energia utilizável no final do processo de conversão para a energia de entrada; calor residual de baixo grau principalmente vira o "desperdício" de energia em um processo ineficiente. Alguns processos de conversão são mais eficientes que outros, por exemplo: geradores elétricos pode converter a energia cinética de uma turbina em rotação a energia eléctrica com eficiência maior do que 90%, mas apenas cerca de 30% -40% da energia térmica liberada quando o carvão é queimado pode ser extraída como energia cinética. Conversores fotovoltaicos são únicos com capacidade de converter diretamente a energia luminosa radiante em energia eléctrica; eliminando os processos relativamente ineficientes da fotossíntese (0,5% -2% eficácia) e conversão térmica-cinética. A energia fotovoltaica representam o uso mais direto da fonte de energia primária da Terra, a luz solar.

2.2.2 LUZ

Luz tipicamente refere-se a um tipo específico de radiação eletromagnética que é visível para o olho humano. A radiação eletromagnética é composta de campos eléctricos e magnéticos oscilantes que vibram com uma determinada frequência e comprimento de onda e se propagam em uma linha reta. A luz visível é tipicamente caracterizada como radiação eletromagnética com um comprimento de onda entre cerca de 400 e 750 nanómetros. Os seres humanos percebem a luz de diferentes comprimentos de onda como cores diferentes. A luz visível ocupa uma pequena fracção de um espectro de comprimentos

de onda que se estende por muitas ordens de grandeza, a partir de raios gama e raios-X, por meio de radiação ultravioleta, visível e infravermelha, a micro-ondas e ondas de rádio.

A unidade fundamental quantizada (ou *quantum*) da luz é o *fóton*, que representa a menor pacote isolável de radiação eletromagnética um determinado comprimento de onda. O teor de energia de um *fóton* é proporcional à sua frequência e inversamente proporcional ao seu comprimento de onda e a potência fornecida por uma fonte de luz a uma superfície de absorção é igual ao fluxo, ou taxa de fluxo, de *fótons* absorvidos por esta superfície multiplicado pela energia de cada fóton incidente. O espectro de emissão do sol se estende desde o ultravioleta através do infravermelho. A energia fornecida pela radiação solar a superfície apontada para o sol, localizada na superfície da terra ao meio-dia, em um dia sem nuvens e com um representante latitude de muitos dos grandes centros populacionais do mundo, é cerca de um kilowatt por metro quadrado.

2.2.3 ELETRICIDADE E POTÊNCIA

A eletricidade é caracterizado pela tensão e corrente. Corrente, medida em *amperes*, corresponde à taxa de fluxo de cargas; se imaginar eletricidade que flui através de um fio como análoga a água que flui através de um tubo, a corrente é a taxa de fluxo da água. Voltagem, medido em *volts*, corresponde à diferença de energia potencial elétrico, por unidade de carga, entre os dois pontos. Na nossa analogia do fluxo de água, a tensão entre dois pontos corresponde à pressão ou a altura diferencial entre estes pontos; isto é a força motriz por trás do fluxo. A resistência elétrica é de uma material amostral, é a razão entre a tensão aplicada à amostra e a corrente que flui através dele. em nossa analogia fluxo de água, a resistência seria inversamente proporcional ao diâmetro do tubo através do qual a água flui.

2.2.4 MATERIAIS ELETRÔNICOS

Um típico sólido, como o silício, contém aproximadamente 700 bilhões de bilhões (7×10^{20}) elétrons por milímetro cúbico de material, em que um elétron é uma partícula subatômica com uma carga elétrica, por definição de $-1 eV$. Elétrons ocupam estados de energia bem definidos dentro de um sólido; bem como água enchendo um balde, elétrons minimizam sua energia por preencher os estados de menor energia (a parte mais profunda do balde, ou os estados de energia de ligação atômica mais forte.) em primeiro lugar. Os elétrons são um dos dois tipos de transportadores de cargas dentro de um sólido típico; O outro tipo de portador de carga é a *lacuna*, que é simplesmente a ausência de um elétron numa posição em que um elétron seria normalmente encontrado. Se elétrons são comparados com gotas de água, os lacunas podem ser comparados com bolhas abaixo da superfície da água. Através da

realização de uma ausência de carga negativa dentro de uma mar circundante de elétrons de carga negativa, i uma lacuna pode ser tratado como um transportador de carga positiva, que se deslocam na direção oposta a partir de um elétron sob um campo elétrico aplicado. A condutividade elétrica de um material é proporcional à densidade (o número por unidade de volume) de elétrons e lacunas móveis multiplicado pela *mobilidade* (razão entre a velocidade do portador de carga em relação à magnitude do campo elétrico que gera este movimento) destes portadores de carga internos ao material.

Elétrons podem ser excitados pela absorção de energia externa na forma de fótons ou calor. Uma única excitação gera tanto um elétron como uma lacuna; o elétron excitado, na sua transição para um estado de maior energia, deixa para trás uma lacuna vazia em seu estado anterior. Num típico sólido à temperatura ambiente, o calor é manifestada principalmente como vibrações minúsculas dos átomos que formam o sólido. Para elétrons, este calor tem o efeito de um espectro contínuo de excitações de baixa energia, induzindo pequenas ondulações na superfície do mar energético de elétrons.

Tal como acontece com modos de vibração em uma corda de violão vibrando, apenas certas energias de elétrons são fisicamente permitidas dentro de um material. Em um único átomo ou molécula estas energias existem como estados de energia discretos, isoladas. Em sólidos extensos, com grande número de átomos, esses estados discretos são espalhados em bandas de energia amplas. Em materiais puros, os elétrons só podem residir em energias contidas nestas faixas; eles não podem ocupar energias entre bandas, onde não existem estados eletrônicos. As propriedades eletrônicas de um dado material são determinadas em grande parte pelo perfil destas bandas de energia e a extensão em que eles são preenchidos com elétrons.

A banda de energia mais alta que está completa com elétrons é chamada *banda de valência*; a banda superior mais próxima é chamada *banda de condução*.

Como demonstrado na Figura 7, a três principais classes de materiais eletrônicos - metais, isoladores, e semicondutores - são caracterizadas por distintas disposições de banda de energia. Metais contêm uma banda de energia incompletamente preenchida, permitindo o movimento coletivo dos elétrons na superfície energética dos estados preenchidos (semelhante às ondas num recipiente parcialmente cheio de água). Materiais isolantes, contêm bandas completamente preenchidas separadas por um grande espaço de banda. Este *bandgap* em isoladores é demasiado largo para permitir excitação significativa de elétrons através da banda por calor ou fótons visíveis. Visto que na maior parte das situações, a banda de valência de isoladores é preenchida com elétrons (sem lacunas móveis) e a banda de condução está vazia de elétrons, nenhum portador de carga estaria disponível para fluir sob um campo elétrico aplicado, fazendo com que estes materiais sejam eletricamente resistentes.

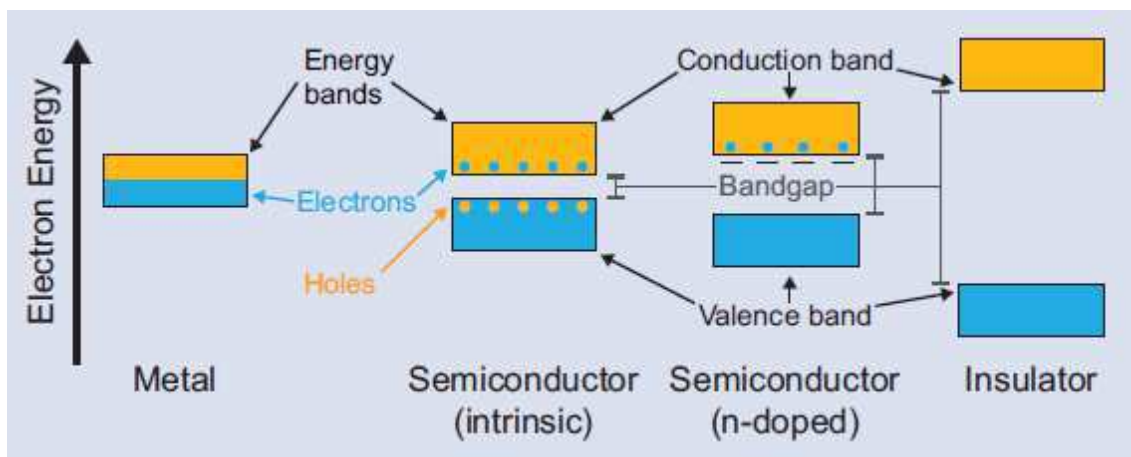


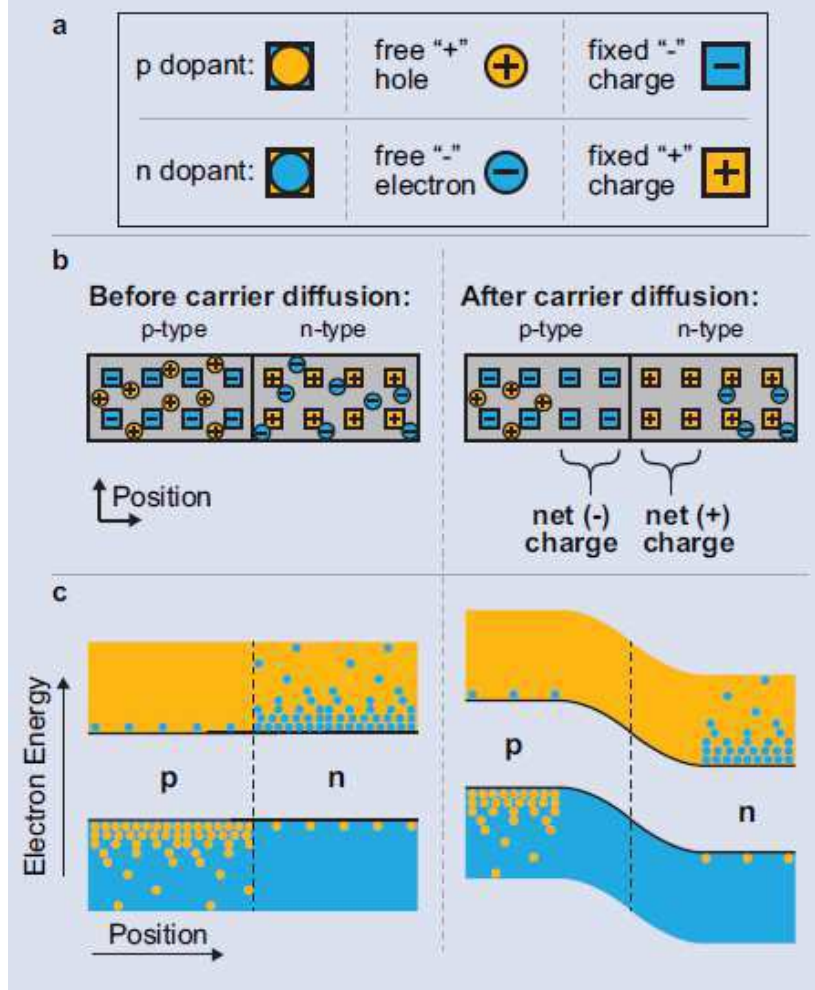
Figura 7 – Estrutura de bandas de energia de metais, semicondutores e isolantes (ENERGY INITIATIVE MIT, 2015)

Semicondutores são intermediários entre os metais e isoladores; eles apresentam um *bandgap* entre as bandas cheias e vazias, mas a diferença é pequena o suficiente para que os elétrons possam ser excitados através de calor ou fótons visíveis. Semicondutores podem ser dopado com quantidades mínimas de átomos de impureza que pode facilmente doar elétrons ou lacunas em excesso para o resto do sólido, aumentando assim a densidade de portadores de carga livres e a condutividade do semicondutor.

2.2.5 DIODOS DE JUNÇÃO PN E CÉLULAS SOLARES

A unidade funcional fundamental de uma célula solar é um diodo de junção PN que se forma na interface entre dois semicondutores, onde um semicondutor é dopado com um excesso de impurezas dadoras de elétrons (um semicondutor do tipo-n, assim chamado devido ao excesso de elétrons livres carregados negativamente) e o outro semicondutor é dopado com impurezas de um excesso de doador de furos (um semicondutor do tipo p, assim chamado para o excesso de lacunas carregados positivamente). Na Figura 8 estão ilustrados os fundamentos do diodo de junção PN.

Figura 8 Estrutura física e Propriedades Elétricas de um diodo de junção PN.



Fonte: (ENERGY INITIATIVE MIT, 2015)

Quando materiais tipo n e do tipo p são colocados em contato, elétrons livres do lado do tipo n e lacunas livres do lado do tipo p irá difundir através da interface, cancelando-se mutuamente (os elétrons "preenchem" as lacunas). Este "anular" dos portadores livres na região da interface descobre os encargos fixos dos dopantes que originalmente equilibrada a carga dos elétrons livres e lacunas, gerando um campo elétrico na região de interface que impede maior difusão. Este campo corresponde a um gradiente de tensão intrínseco entre os lados do tipo n e do tipo p da junção.

O diodo age como uma válvula unidirecional para portadores de carga, conforme mostrado na Figura 9. Se uma tensão positiva é aplicada ao lado do tipo P da junção (o lado esquerdo da junção, como mostrado aqui) em relação ao lado do tipo n, o campo embutido é reduzido, e um grande número de portadores pode difundir através da interface, gerando uma grande corrente. Se uma tensão negativa é aplicada ao lado do tipo p em relação ao lado do tipo n, o campo interno é reforçado, e o fluxo de corrente permanece desfavorável.

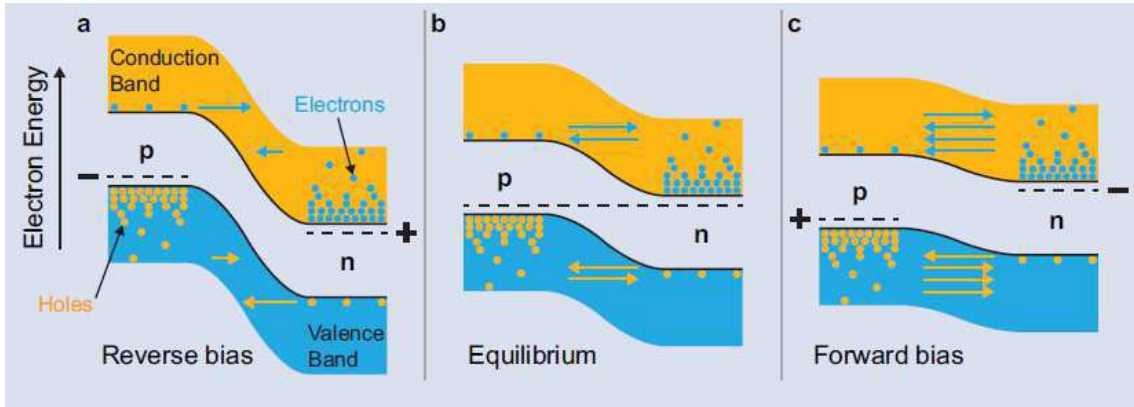


Figura 9 – Bandas de energia durante a operação de um Diodo de junção PN (ENERGY INITIATIVE MIT, 2015)

A curva rotulada "dark" na Figura 10a mostra a corrente passada através de um diodo representante em diferentes níveis de tensão aplicados; esta corrente aumenta exponencialmente com tensão positiva, porém permanece pequena para tensões negativas.

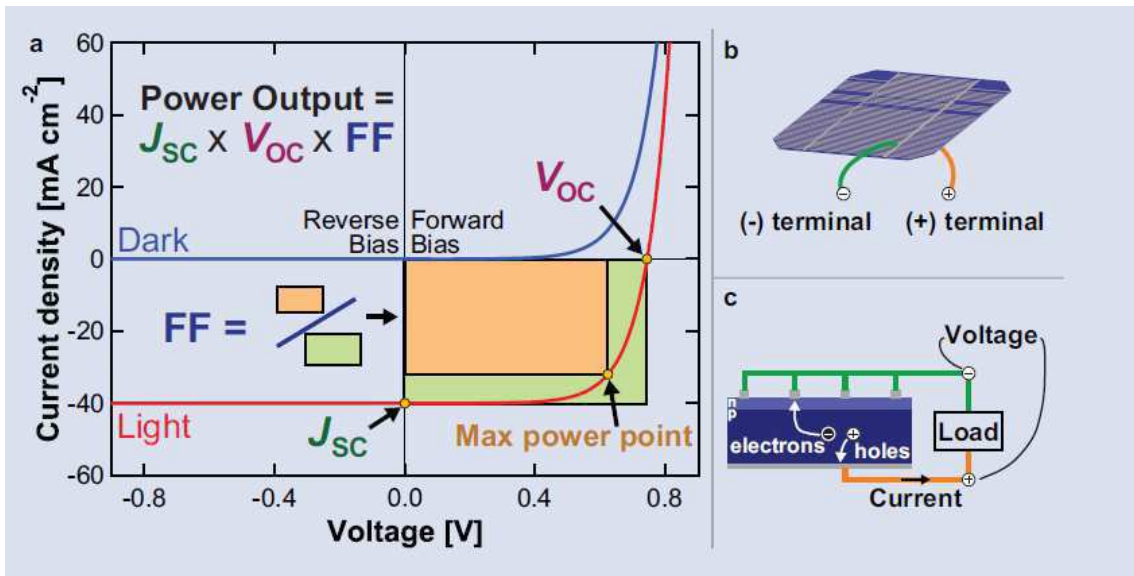


Figura 10 – (a) Curva característica tensão x Corrente de uma Célula Solar (ENERGY INITIATIVE MIT, 2015)

A saída de corrente de uma célula solar iluminada é proporcional à sua área de superfície iluminada, de forma corrente de saída é geralmente expressa como densidade de corrente (corrente dividida pela área) para normalizar para diferentes tamanhos de células solares. Tensão e a corrente são medidas entre os terminais positivos e negativos da célula solar (Figuras 10b, 10c).

Uma célula solar é simplesmente um diodo que pode gerar elétrons e lacunas livres através da absorção de luz, tal como ilustrado na Figura 10. Estes portadores de carga livres são separados sob efeito do campo elétrico interno do diodo, gerando uma fotocorrente. A geração aproximadamente independente da tensão através da célula solar, de modo que a curva "light" na figura 9 é distante de um valor constante da curva "dark". A corrente é correlacionada com o número de portadores gerados, que por sua vez dependem das propriedades de absorção do semiconductor e a sua eficiência em transformar

fótons absorvidos em portadores de carga extraíveis (esta eficiência, conhecida como a eficiência quântica externa). A tensão está correlacionada com a força do campo eléctrico interno do diodo.

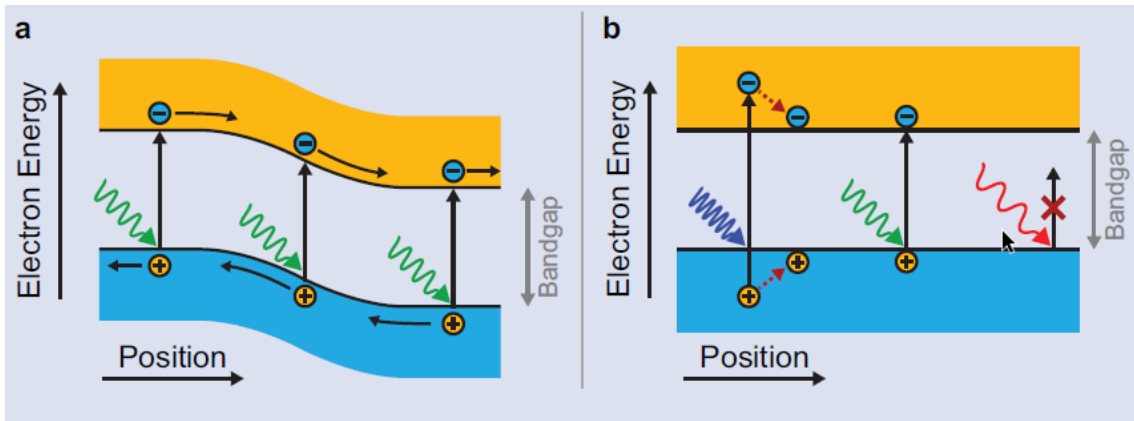


Figura 11 - Operação de uma célula solar sob iluminação e interação da luz com um semiconductor absorvente de luz. (ENERGY INITIATIVE MIT, 2015)

Na Figura 10, é ilustrada a saída de corrente-tensão de uma célula solar representativa, tanto no escuro (curva azul, na qualidade de um diodo simples) e sob iluminação (curva a vermelho), e parâmetros operacionais. A tensão em circuito aberto (V_{oc}) é a tensão medida entre os dois terminais de uma célula solar iluminada quando os terminais são deixados "aberto" (ou seja, não ligadas umas às outras por um percurso condutor) e nenhuma corrente é deixada a fluir. A densidade de corrente de curto-circuito (J_{sc}) é a densidade de corrente que flui através da célula solar, quando os dois terminais são "curto-circuitados" entre si por uma via altamente condutora (como um fio de cobre) e mantém-se a mesma tensão.

A saída de tensão de uma célula solar operante irá variar entre zero e o valor de sua tensão de circuito aberto V_{oc} . A saída de corrente e de tensão de uma célula solar não pode ser maximizada ao mesmo tempo. Uma vez que uma célula solar só pode absorver fótons com uma energia maior do que a banda proibida, reduzindo a banda proibida irá conduzir a maiores correntes. No entanto, como mostrado na Figura B.7b, os elétrons excitados por fótons com energia maior do que o bandgap dissipar rapidamente o excesso de energia na forma de calor desperdiçado, em última análise, chegando ao descanso com uma energia igual à bandgap. A energia de banda proibida é assim a energia máxima que pode ser extraída como energia eléctrica de cada fóton absorvida pela célula solar. A redução da banda proibida vai levar a tensões menores, eventualmente, contrariando a benefício de aumento da corrente. O espectro de emissão larga do sol limita, assim, a capacidade de recolher, tanto o número máximo de fótons e a energia máxima a partir de cada fóton. A eficiência máxima teórica de conversão de energia de uma célula solar singlejunction, sob iluminação solar, não concentrada e operação em temperatura ambiente, é de aproximadamente 33%, uma quantidade conhecida como o Shockley-Queisser Limit.¹⁶
¹⁷ Este limite pode ser ultrapassado por células solares multijunções que usam uma combinação de

materiais de diferentes bandgaps; Estes dispositivos permitem uma maior fracção da energia de cada fóton absorvido a ser extraído, como tensão e tem uma eficiência máxima teórica de cerca de 68% sob sunlight.¹⁸ não concentrado Em uma célula solar real, a presença de defeitos e as perdas resistivas parasitárias irá diminuir a eficiência para valores inferiores a esses limites. Como mencionado acima, a eficiência quântica externa (EQE) de uma célula solar é a eficiência com a qual fótons individuais de um determinado comprimento de onda são convertidos para portadores de carga extraídos. Figura B.8 mostra os espectros EQE de células solares recorde mundial de vários tipos, em comparação com o espectro solar observada na superfície da terra. Pontos de corte afiados em EQE são observados no lado de alta comprimento de onda (baixa energia) de cada espectro na banda proibida do material de absorção, como fótons com uma energia menor do que a banda proibida não pode ser absorvida. O produto multiplicativo do espectro EQE e do espectro solar, integrado para todos os comprimentos de onda, deve dar o JSC produzido pela célula solar. Muitos processos de perda pode reduzir o EQE a níveis abaixo de 100%, incluindo reflexão de luz a partir da superfície da célula solar, a absorção de luz por materiais não corrente de geração dentro da célula solar, ou perda de corrente devido a resistências parasitas. A saída de potência a uma dada tensão é igual ao produto da tensão e da corrente em que a tensão e vai atingir um máximo perto do "joelho" aparente na curva de corrente-tensão (como representado pelo retângulo laranja na Figura 10). O fator de preenchimento de uma célula solar, o que corresponde à forma quadrada em sua curva de corrente-tensão iluminada, é a relação entre a sua potência de saída no ponto de potência máxima e o produto da sua J_{sc} e V_{oc} . A eficiência de conversão de energia de uma célula solar é igual ao produto do J_{sc} , V_{oc} , e fator de preenchimento, dividido pela intensidade da luz incidente (geralmente medido sob condições normais de iluminação de um quilowatt por metro quadrado).

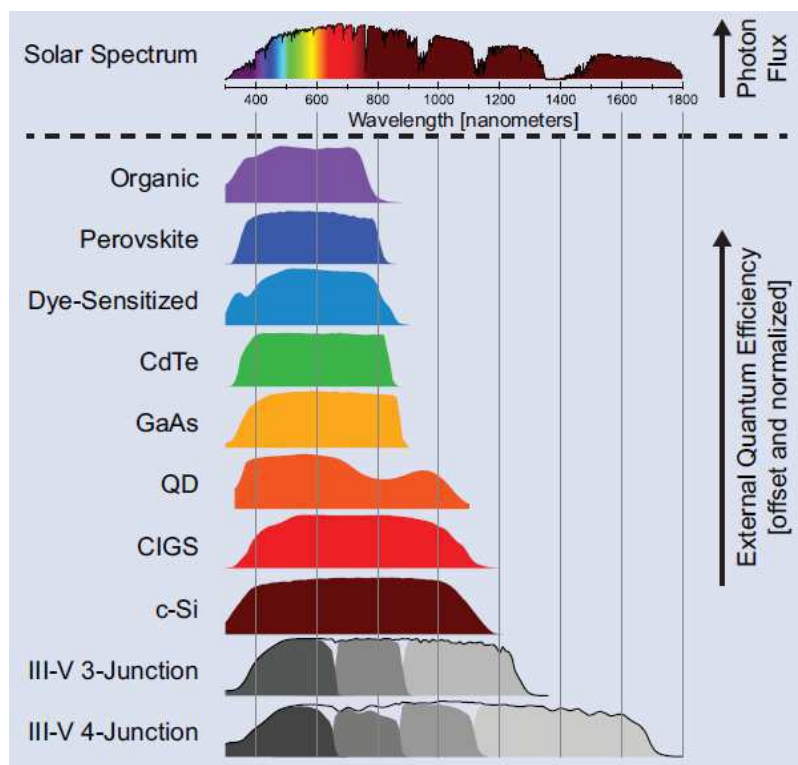
2.2.6 EFICIÊNCIA DE UMA CÉLULA SOLAR

A saída de corrente e de tensão de uma célula solar não podem ser maximizadas ao mesmo tempo. Uma vez que uma célula solar só pode absorver fótons com uma energia maior do que a banda proibida, reduzindo a banda proibida irá conduzir maiores correntes. No entanto, como mostrado na Figura 11, os elétrons excitados por fótons com energia maior do que a banda de passagem dissipam rapidamente o excesso de energia na forma de calor, que é desperdiçado, chegando ao descanso numa energia igual à da banda proibida. A energia de banda proibida, é assim a energia máxima que pode ser extraída como energia elétrica de cada fóton absorvido pela célula solar. A redução da banda proibida vai levar a tensões menores, eventualmente contrariando o benefício do aumento da corrente.

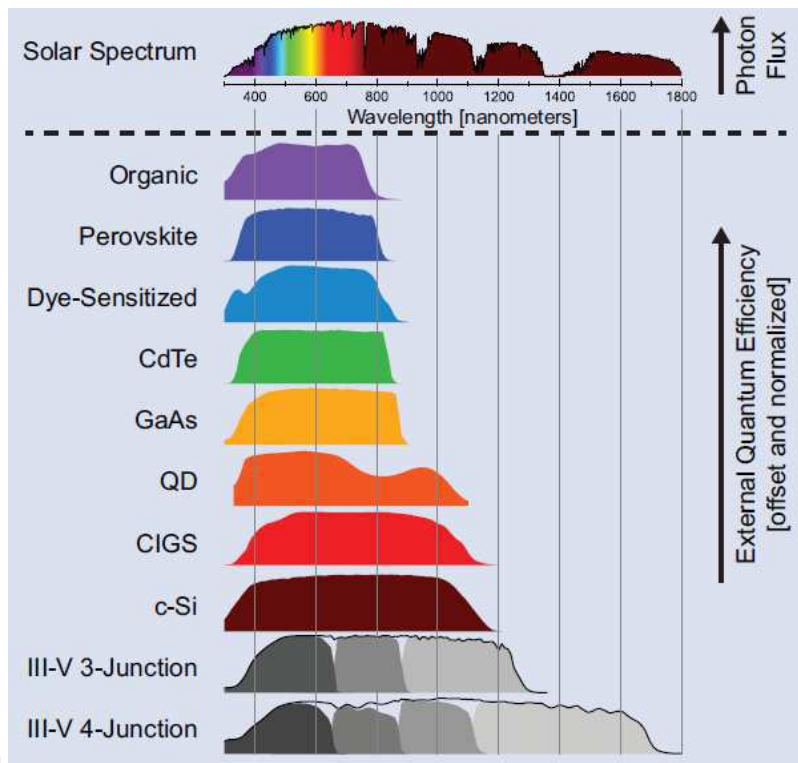
O largo espectro de emissão do sol limita, assim, a capacidade de recolher, tanto o número máximo de fótons ao mesmo tempo que a energia máxima a partir de cada fóton. A eficiência máxima teórica de conversão de energia de uma célula solar *singlejunction* (única junção), sob iluminação solar, não concentrada e em operação em temperatura ambiente, é de aproximadamente 33%, uma quantidade conhecida como o *limite de Shockley-Queisser*. Este limite pode ser ultrapassado por células solares de múltiplas junções que usam uma combinação de materiais de diferentes *bandgaps*; Estes dispositivos permitem uma maior fração da energia de cada fóton absorvido possa ser extraída, como tensão e tem uma eficiência máxima teórica de cerca de 68% sob a luz do sol. Em uma célula solar real, a presença de defeitos e as perdas resistivas parasitárias irá diminuir a eficiência para valores inferiores a esses limites.

Como mencionado anteriormente, a *eficiência quântica externa* (EQE) de uma célula solar é a eficiência com a qual fótons individuais de um determinado comprimento de onda são convertidos para portadores de carga extraídos.

Figura 12 - Fluxo de fótons solar na superfície da Terra e espectros EQE normalizados para diferentes tipos de células solares.



Fonte: (ENERGY INITIATIVE MIT, 2015)



Na

são apresentados os espectros

de EQE de células solares recordistas mundiais de vários tipos em comparação com o espectro solar observado na superfície da terra. Pontos de corte bruscos em EQE são observados no lado de alto comprimento de onda (baixa energia) de cada espectro no *bandgap* do material de absorção, como fótons com uma energia menor do que a banda proibida não podem ser absorvidos. O produto multiplicativo do espectro de EQE e do espectro solar, integrado para todos os comprimentos de onda, deve dar o J_{sc} produzido pela célula solar. Muitos processos de perda podem reduzir a EQE a níveis abaixo de 100%, incluindo reflexão de luz a partir da superfície da célula solar, a absorção de luz por materiais que não geram corrente dentro da célula solar, ou perda de corrente devido a resistências parasitas.

2.2.7 FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES

Uma célula solar é tipicamente fabricada por um dos dois métodos gerais: modificação da estrutura de um *wafer* ou aditivo de deposição de filmes finos sobre um substrato.

A primeira abordagem, a modificação do *wafer*, é usado para células de silício cristalino convencionais e células III-V. Neste método, uma bolacha de semiconductor extremamente puro é usado como o material de partida e contaminantes são introduzidos perto da superfície para criar uma junção pn. A bolacha serve como absorvente de luz e o substrato; portadores de carga são gerados no interior da pastilha e são extraídos diretamente a partir da frente (parte superior) e da parte traseira faces (inferior) da bolacha por contatos elétricos.

A segunda abordagem, a deposição de aditivo, é usada para fazer a maioria das células solares de película fina. Aqui, um substrato separado - uma folha de vidro, plástico, ou metal, que pode ser rígido ou flexível - serve como um suporte mecânico para a célula ativa. Películas absorventes de luz e contatos elétricos são formados num processo camada-por-camada sobre o substrato usando vapor- ou técnicas de deposição baseados em soluções, tais como evaporação térmica, deposição de vapor químico, revestimento por pulverização, ou serigrafia. Diferentes materiais podem ser otimizados individualmente para absorção de luz e transporte de carga, camadas adicionais são muitas vezes introduzidas para melhorar a extração de carga.

2.2.8 ARRAYS DE CÉLULAS SOLARES

Uma célula solar única 6 polegadas por 6 polegadas de silício gera uma tensão de cerca de 0,5-0,6 volts e uma potência de cerca de 4-5 watts sob iluminação com luz solar direta a uma intensidade de um quilowatt por metro quadrado. Como mostrado na Figura 13, células individuais são ligados em série num módulo fotovoltaico para aumentar a sua tensão de saída coletiva. Um módulo típica pode conter 60 a 96 células individuais, a geração de uma tensão de 30-48 volts e uma potência de saída de 260-320 watts. Módulos fotovoltaicos também incorporam materiais para suporte mecânico e encapsulação. Estes módulos podem depois ser ligados em série para aumentar ainda mais a sua tensão de saída coletiva, ou em paralelo, para aumentar a sua produção conjunta de corrente; uma coleção de módulos solares é muitas vezes chamado de um painel solar.

Componentes adicionais de equilíbrio do sistema (BOS, *balance-of-system*), tais como inversores, transformadores são necessários para converter a saída de corrente contínua (CC) de um painel solar em corrente alternada (AC) para incorporação em uma rede elétrica; aplicações para fora da rede, a saída de CC de um painel solar pode ser utilizada diretamente, ou baterias e controladores de carga podem ser incorporados para armazenar a energia gerada para uso posterior.

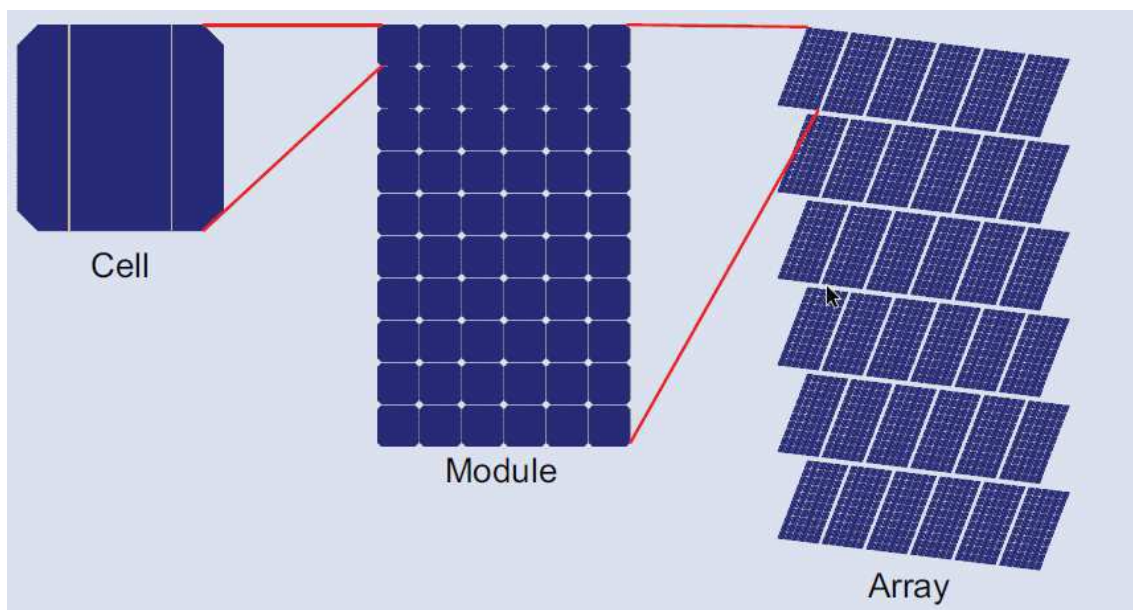


Figura 13 - Representação esquemática de uma célula solar, um módulo solar, e um array Solar (ENERGY INITIATIVE MIT, 2015)

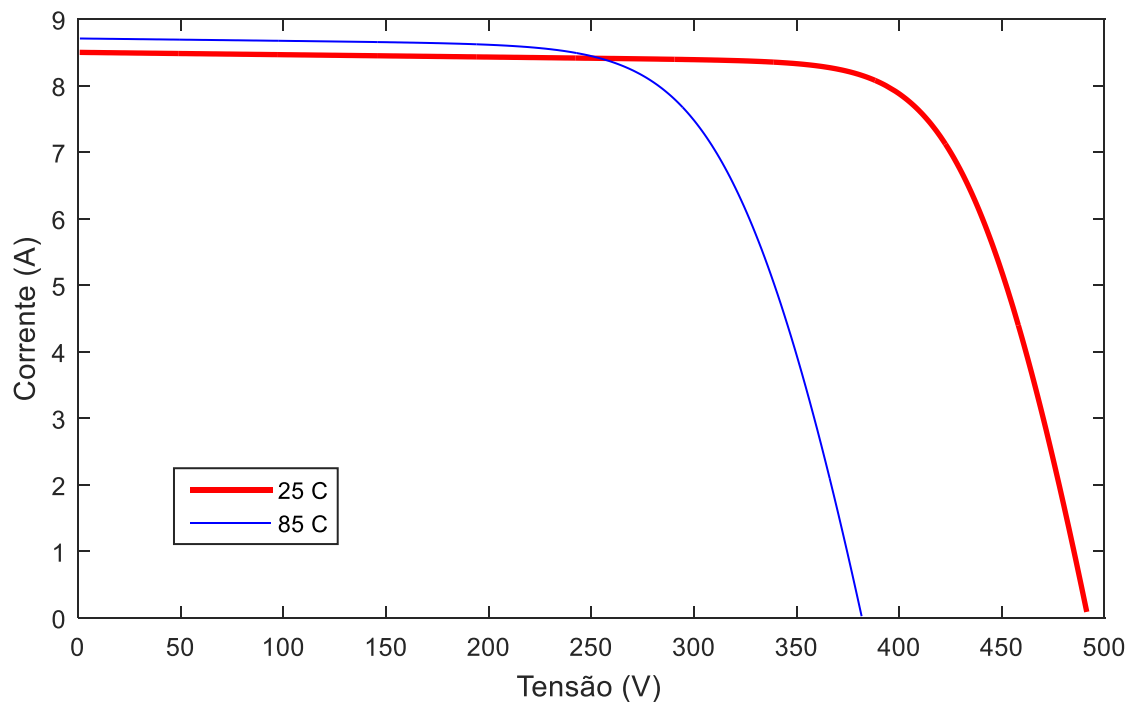
Painéis solares pode ser estacionários ou pode utilizar o rastreamento solar, em que os painéis solares são movimentados ao longo do curso do dia para apontar para o sol, aumentando desse modo a potência de saída por painel. Alguns painéis solares, particularmente aqueles que utilizam células solares *multijunction*, fazem uso de espelhos ou lentes para concentrar a luz solar sobre as células solares. Concentrar sistemas permitem o uso de células solares menores, mas geralmente necessitam de sistema de rastreamento solar preciso para manter a luz solar concentrada e focada sobre as células.

2.3 EFEITOS DA TEMPERATURA SOBRE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Como todos os outros dispositivos semicondutores, as células solares são sensíveis à temperatura. Os aumentos na temperatura reduzem o *bandgap* do semicondutor, afetando assim a maior parte dos parâmetros do material semicondutor. A diminuição do *bandgap* do semicondutor com um aumento da temperatura pode ser vista como o aumento da energia dos elétrons no material. Assim, é necessária uma quantidade menor energia para elevar estes elétrons à banda de condução. Portanto o aumento da temperatura reduz o gap.

Nas células solares, os parâmetro mais afetado por um aumento na temperatura é a tensão de circuito aberto. O impacto de um aumento na temperatura sobre uma célula fotovoltaica pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 - Curvas de Tensão x Corrente de um painel fotovoltaico em diferentes temperaturas



Fonte: Autor

Enquanto podemos observar que a corrente de curto-circuito aumenta levemente. Portanto, a temperatura de operação de um painel fotovoltaico exerce uma grande influência sobre a potência máxima de saída de uma célula fotovoltaica está bem estabelecido e documentado, como pode ser visto a partir da atenção que tem recebido pela comunidade científica. Há muitas correlações expressando T_c , a temperatura da célula PV, em função de variáveis climáticas, tais como temperatura ambiente, T_a ,

velocidade do vento local, V_w , e fluxo de radiação solar/irradiância, $I(t)$, com materiais e propriedades dependentes do sistema como parâmetros, por exemplo, reflexão cobertura da transmissão, τ , absorvância, α , etc.

Um número igualmente grande de correlações que expressam a dependência da temperatura para a eficiência elétrica de um módulo fotovoltaico, η_c , também pode ser recuperada, embora muitos deles assumem a forma linear familiar, diferindo apenas nos valores numéricos dos parâmetros relevantes que, como esperado, são materiais e dependente do sistema. No que diz respeito às variáveis climáticas relevantes, como qualitativo, verificou-se que o aumento da temperatura da célula fotovoltaica sobre o ambiente é extremamente sensível à velocidade do vento, direção do vento para menos, e pouco sensível à temperatura atmosférica. Por outro lado, é, obviamente, fortemente depende da irradiação incidente, isto é, o fluxo de radiação solar sobre a célula ou módulo.

Do ponto de vista matemático, as correlações para a temperatura de operação de sistemas fotovoltaicos são ou explícitas em forma, dando assim T_c diretamente, ou eles estão implícitos, ou seja, elas envolvem variáveis que se dependem T_c . Neste último caso, um processo de iteração é necessária para um cálculo relevante. A maioria das correlações incluem geralmente um estado de referência e os valores correspondentes das variáveis pertinentes.

O desempenho elétrico é influenciado principalmente pelo tipo de tecnologia fotovoltaica usada. Um módulo fotovoltaico típico converte 6-25% da radiação solar incidente em energia elétrica, dependendo do tipo de células solares e condições climáticas. O restante desta radiação solar incidente é convertida em calor, o que aumenta significativamente a temperatura do módulo fotovoltaico e reduz a eficiência PV do módulo.

Este calor pode ser extraído/dissipado por um fluxo de água corrente/ar em contato com o módulo fotovoltaico utilizando coletores térmicos, chamados coletores térmicos fotovoltaicos (PhotoVoltaicThermal, PVT). Na prática, apenas a-Si (silício amorfo) e Si cristalino(c-Si) foram encontrada na literatura sobre PVT. A maior eficiência de Si cristalino vai resultar em uma maior eficiência elétrica e uma proporção elétrico-para-térmica mais elevada do sistema PVT do que no caso de a-Si.

Medições experimentais sobre PVT-líquido e coletores PVT ao ar para ambos a-Si e c-Si. Encontra-se que em zero temperatura reduzida, por seu coletor de líquido PVT, a eficiência do seu protótipo c-Si é de 55% e seu protótipo a-Si 60%, enquanto que para o coletor de ar PVT o protótipo c-Si é de 38% e o a-Si protótipo de 45%. No entanto, o desempenho elétrico para os módulos c-Si é de 12% e para o a-Si é de 6%. (TRIPANAGNOSTOPOULOS Y, 2002)

Um maior rendimento térmico, também foi encontrada para a-Si. (JI J, 2003) No entanto, em outras experiências uma eficiência térmica mais baixa foi encontrada para a-Si do que para (PLATZ R, 1997).

A comparação entre um módulo fotovoltaico convencional, um módulo de PVT não vidrada e um módulo de PVT envidraçado. A eficiência média anual eléctrica verificou-se ser de 7,2%, 7,6% e 6,6%, respectivamente (ZONDAG HA, 2003).

O desempenho eléctrico de um coletor PVT *termossifão* com o PV na parte alta e na extremidade baixa do elemento absorvente de calor. Para o fim baixo, mais frio, há uma eficiência eléctrica 3% maior. (CHOW, 2003)

Tipicamente, em cenários de alta irradiação, a redução de temperatura em um sistema PVT é de cerca de 20 °C em relação a um sistema solar residencial convencional, o que leva a um aumento de 9-12% no rendimento eléctrico, de acordo com a estratificação.

2.3.1 DEPENDÊNCIA DA TEMPERATURA PARA A EFICIÊNCIA DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO

As correlações que expressam a temperatura da célula fotovoltaica (T_c , a temperatura da célula PV, em função de variáveis climáticas, tais como temperatura ambiente, T_a , velocidade do vento local, V_w , fluxo de radiação solar/irradiância, $I(t)$, com materiais e propriedades dependentes do sistema como parâmetros, por exemplo, reflexão cobertura da transmissão, τ , absorvância, α , etc. O efeito da temperatura sobre a eficiência eléctrica de uma célula PV / módulo pode ser obtida por meio da equação fundamental:

$$P_m = I_m V_m = (FF) I_{sc} V_{oc}$$

Nesta equação, FF é fator de preenchimento, o I_{sc} é corrente de curto-circuito, V_{oc} é tensão de circuito aberto e subscrito m refere-se ao ponto de potência máxima nos módulos I-V curva. Tanto a tensão de circuito aberto, quanto o fator de preenchimento decaem substancialmente com o aumento da temperatura (como os elétrons excitados termicamente começam a dominar as propriedades eléctricas do semi-condutores), enquanto a curto-circuito corrente aumenta, mas apenas ligeiramente. (SWAPNIL DUBEY*, 2012)

Assim, o efeito líquido leva a uma relação linear sob a forma:

$$\eta_c = \eta_{T_{ref}} [1 - \beta_{ref}(T_c - T_{ref}) + \gamma \log_{10} I(t)]$$

Para o qual η_{ref} é a eficiência elétrica do módulo na temperatura de referência o valor de referência, T_{ref} para irradiação solar de 1000 W/m^2 . O coeficiente de temperatura β_{ref} , e a o coeficiente de irradiação solar, γ , são propriedades do material, a princípio, tendo valores de aproximadamente 0.0004 K^{-1} e 0.12 , respectivamente, para um módulo c-Si. Este último, no entanto, é geralmente tomada como zero. Reduzindo para:

$$\eta_c = \eta_{T_{ref}} [1 - \beta_{ref}(T_c - T_{ref})]$$

Que representa a expressão linear tradicional para a eficiência eléctrica fotovoltaica.

2.3.2 EFICIÊNCIA FOTOVOLTAICA NO MUNDO

A geração de energia eléctrica fotovoltaica(PV) é uma tecnologia promissora para a geração de energia renovável a partir da radiação solar. No entanto, a saída do PV é sensível às suas condições de funcionamento, de tal forma estimar o potencial PV com precisão é um problema complexo. Além disso, dada a limitada disponibilidade de dados para todo o mundo, um método que atinja estimativas necessita de mais dados disponíveis. A maioria das estimativas de potencial de uso de PV utiliza o método de potência ou o método de classificação de energia. O método de classificação de potência integra a geração de energia PV instantânea ao longo do tempo, representando, assim, para o da produção PV dependente do tem. O principal problema deste método é a sua complexidade e requisitos de dados meteorológicos instantâneos completos que não estão disponíveis globalmente, de modo nenhum este trabalho estima o potencial PV mundial pelo método de classificação de potência. O método de classificação de energia estima potencial PV multiplicando a irradiação solar total durante um período específico de tempo por uma relação de desempenho. A simplicidade do método de classificação de energia e da disponibilidade de dados meteorológicos globais permitiram estimar o potencial de PV para o mundo, e numerosos países. Estes estudos utilizam uma relação de desempenho constante. No entanto, o coeficiente de rendimento efetivo altera-se sob condições de funcionamento diferentes, especialmente temperatura ambiente, o que limita a precisão destes estudos.

Um método de classificação de energia modificado com base no método JIS (JIS C 8907; padrão industrial japonês) que estima o efeito da temperatura ambiente sobre o potencial de PV global (KAWAJIRI K, 2011).

O método foi utilizado para gerar um mapa global da relação do desempenho potencial e anual c-Si PV considerando sistemas fotovoltaicos montados em uma plataforma acima do solo e operaram sob a ligação directa à rede sem qualquer tipo de armazenamento, como baterias.

A distribuição global da irradiação anual total (H_y) em superfícies inclinadas apontadas ao equador obtidos pela soma dos valores de radiação solar total mensais no banco de dados da NASA, que são médias de 22 anos de dados de 1983 a 2005, é mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

O mapa global de potencial de geração de energia anual é para sistemas fotovoltaicos c-Si de geração é apresentado na Figura 16. As regiões com os maiores valores de radiação têm grandes potencialidades PV. Em particular, as regiões do sul dos Andes e Himalaya e têm potenciais de energia de mais de 1.800 kWh / kW PV, devido à combinação de grandes valores de irradiação e baixas temperaturas. A região do Himalaia é especialmente atraente porque é perto de regiões com grandes demandas de energia no futuro, como a China e Índia. Claro, muitos problemas devem ser abordados durante a instalação de sistemas fotovoltaicos em regiões de grande altitude, como logística e aumento da necessidade de manutenção devido às condições ambientais severas. Vários sistemas fotovoltaicos de alta altitude estão atualmente em operação.

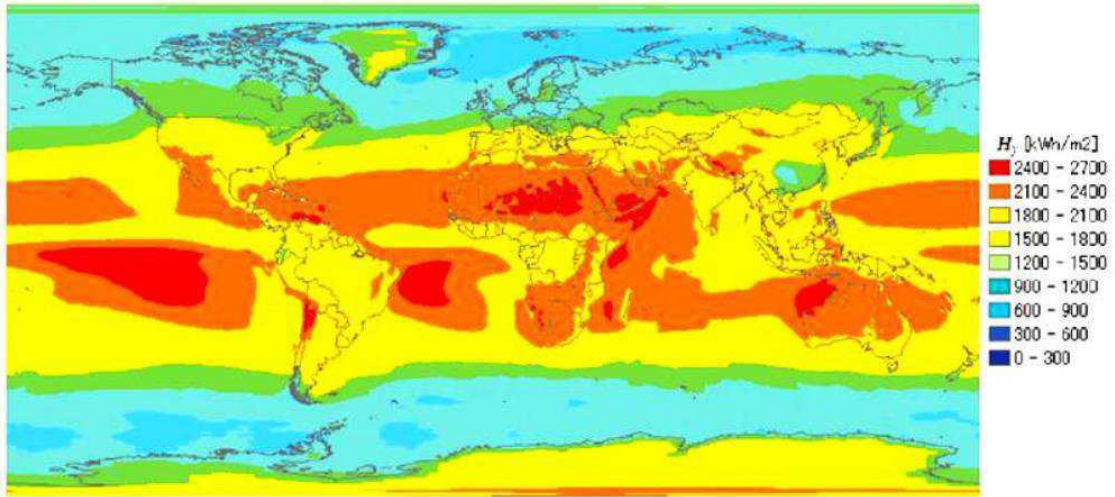


Figura 15 - Mapa da irradiação anual total (H_y) em superfícies inclinadas no ângulo de latitude do equador. (KAWAJIRI K, 2011)

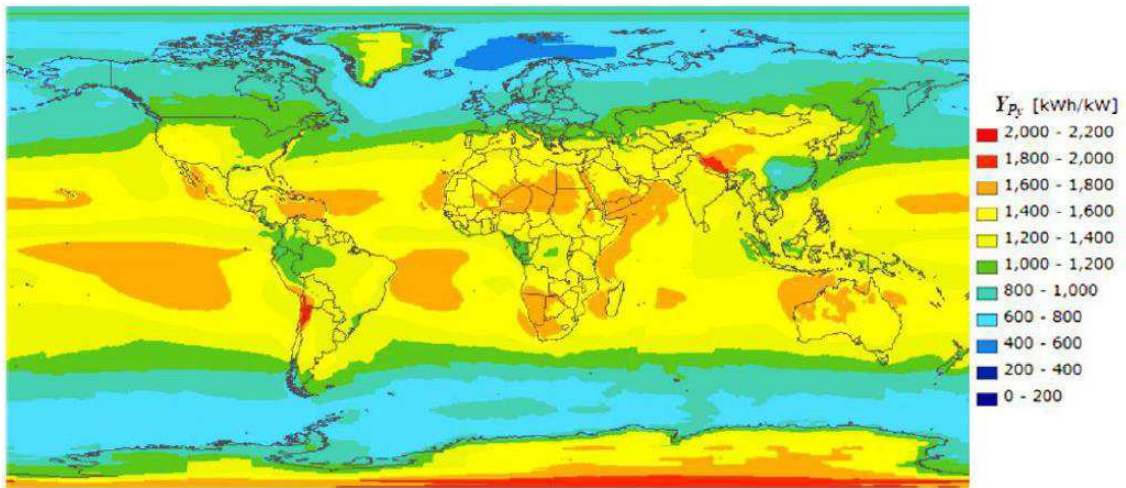


Figura 16 – Mapa global do potencial global de geração de energia fotovoltaica pelo módulo de c-Si PV (KAWAJIRI K, 2011)

3 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Com base nos princípios físicos apresentados, visando demonstrar os efeitos das temperaturas de operação do painel sobre a eficiência de sistemas fotovoltaicos e realizar uma comparação do aproveitamento energético de um sistema PVT com temperatura estabilizada pela absorção de calor através de sistema de circulação de fluido e um sistema fotovoltaico residencial comum, foram elaborados modelos utilizando ferramentas da plataforma SIMULINK do MATLAB para estimar a quantidade de energia elétrica potencialmente gerada por cada sistema ao longo de um dia.

3.1 MODELAGEM DO SISTEMA

O modelo utilizado para representar um módulo solar fotovoltaico tem como entradas a irradiação solar incidente e a temperatura de operação dos painéis e como saída uma corrente, uma tensão, a potência máxima de saída e calor. Para obter dados que se aproximam da realidade, foram utilizados métodos para estimar os valores que estes valores sejam estimados de maneira correta.

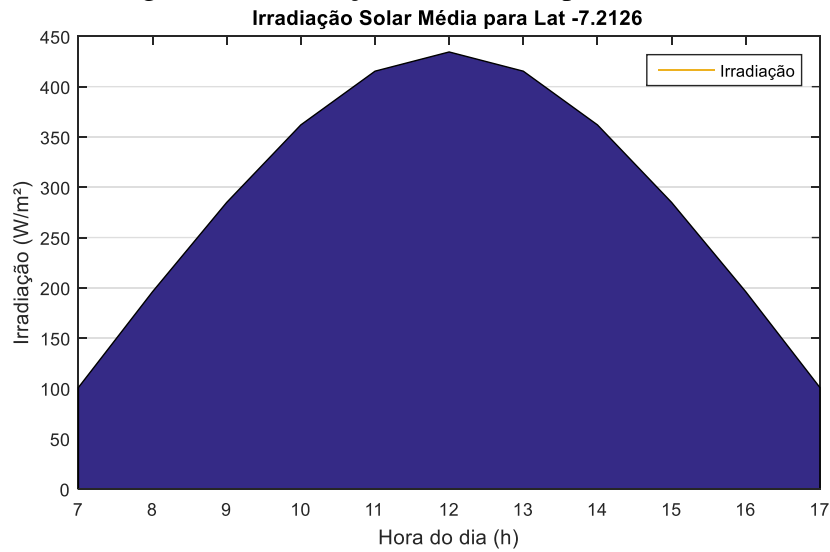
Neste estudo, optou-se por utilizar como entrada longo de um dia e a temperatura de operação dos painéis e fornece como saídas a quantidade de energia gerada neste intervalo pelos sistemas de painéis fotovoltaicos com e sem a estabilização da temperatura.

3.1.1 ESTIMAÇÃO DA IRRADIAÇÃO

Para obter um valor aproximado da irradiação solar média por hora para ser utilizado como entrada foi utilizado a função *SolarModel.m* disponível no Anexo A em que faz uso de um modelo apresentado em *An Introduction to Environmental Biophysics* (CAMPBELL, 1998.) para estimar a irradiação solar média por hora em um local como base na latitude e na pressão atmosférica.

Como parâmetros de entrada foram utilizados como parâmetros de entrada a latitude local do campus I da Universidade Federal de Campina Grande de aproximadamente -7.2126° e a pressão atmosférica de 1014 Pa, obtendo os valores representados no gráfico da Figura 17

Figura 17 –Irradiação Solar média por hora do dia



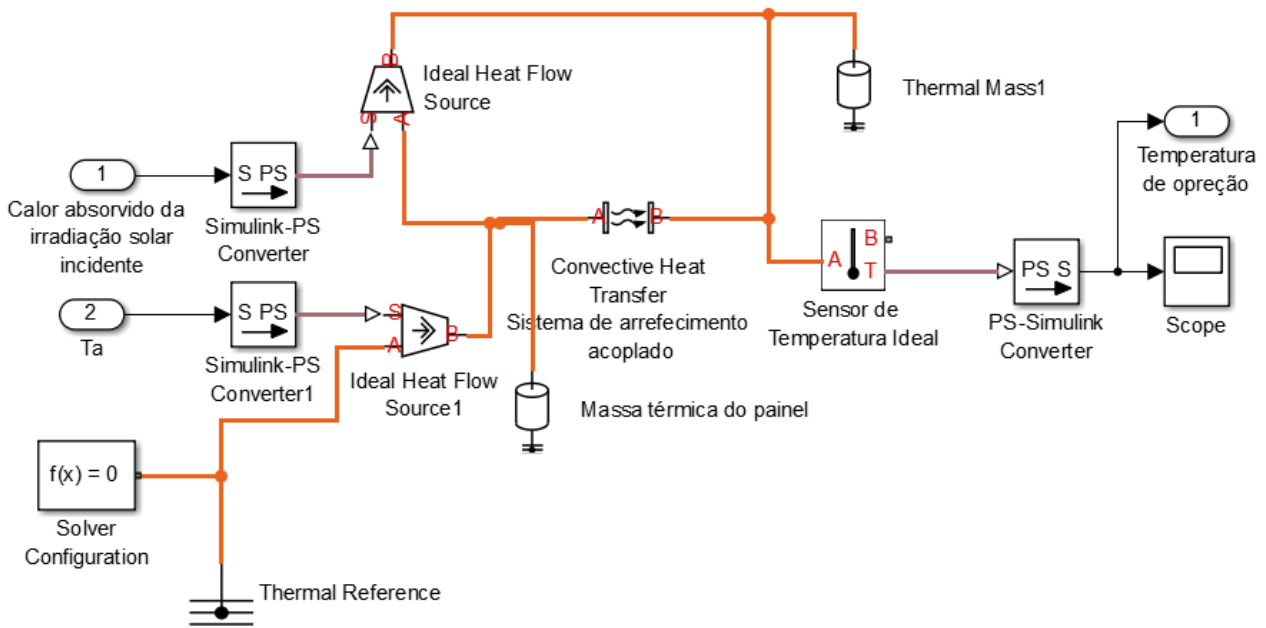
Fonte: Autor

3.1.2 MODELO DO SISTEMA TÉRMICO

Para estimar o comportamento térmico do sistema em estudo, foi elaborado um subsistema no SIMULINK para emular a dinâmica térmica do sistema híbrido, no qual o painel absorve na forma de calor 60% do da irradiação solar incidente sobre o mesmo. Assim que o sistema atinge uma temperatura pré-determinada, o fluxo do fluido de arrefecimento é ativado e o calor absorvido é transferido para uma massa térmica que simula um tanque de armazenamento. Para esta análise caso optou-se 45° C como a temperatura de ativação por ser uma temperatura adequada para aplicações de uso doméstico.

Um modelo foi elaborado utilizando elementos de plataforma simscape para representar os fluxos de calor que ocorrem no sistema. Este modelo está apresentado na Figura 18

Figura 18 – Modelo SIMULINK do subsistema que representa a dinâmica térmica do conjunto híbrido.

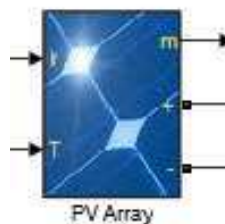


Fonte: Autor

3.2 O BLOCO PV ARRAY

O SIMULINK dispõe de um bloco que simula o comportamento elétrico de uma variedade de módulos PV utilizando os parâmetros de modelos pré-definidos disponíveis no banco de dados NREL System Advisor Model (Jan. 2014). No qual se pode escolher um modelo de módulo disponível no mercado e determinar o arranjo dos arrays. Dentre esses foram escolhidos alguns que figuravam nos rankings dos melhores painéis para aplicações residenciais em junho de 2015, quando este estudo foi realizado.

Figura 19 - Bloco PV Array

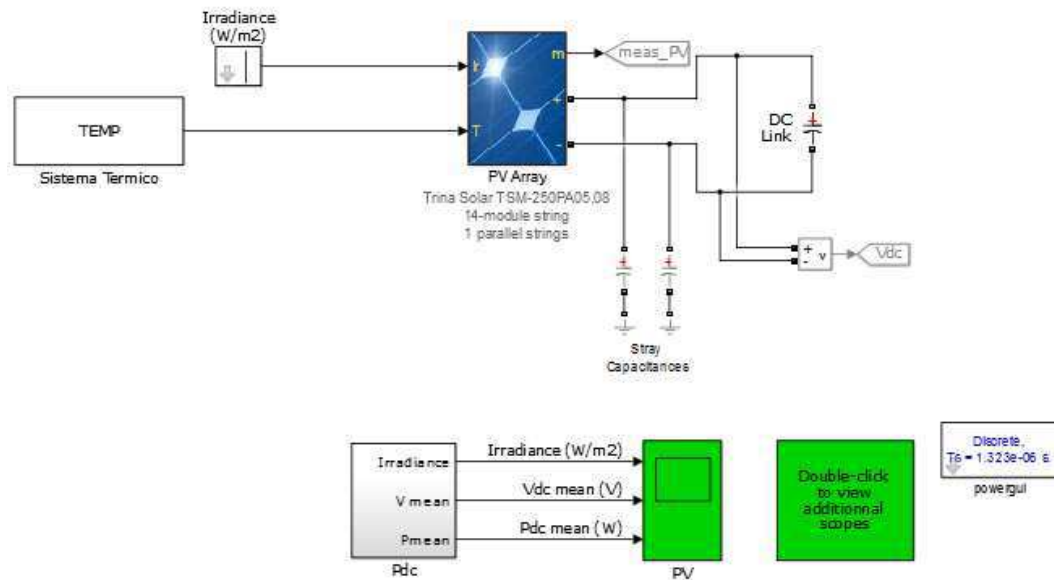


Fonte: SIMULINK

3.3 MODELO COMPLETO

O modelo final que integra todos os subsistemas descritos representa uma montagem ideal para que se possa analisar mais especificamente os efeitos da variação da temperatura de operação sobre o desempenho do sistema de geração de energia e comparar ao dados dos padrões de teste de um sistema PV, no qual a temperatura de operação é artificialmente fixada em 25 °C, com irradiação determinada em 3.1.2, utilizando o bloco PV Array com 14 módulos em série com e 1 strings em paralelo. Neste modelo, podemos monitorar e armazenar as variáveis de saída para posterior análise dos resultados.

Figura 20 - Modelo utilizado nas simulações



Fonte: Autor

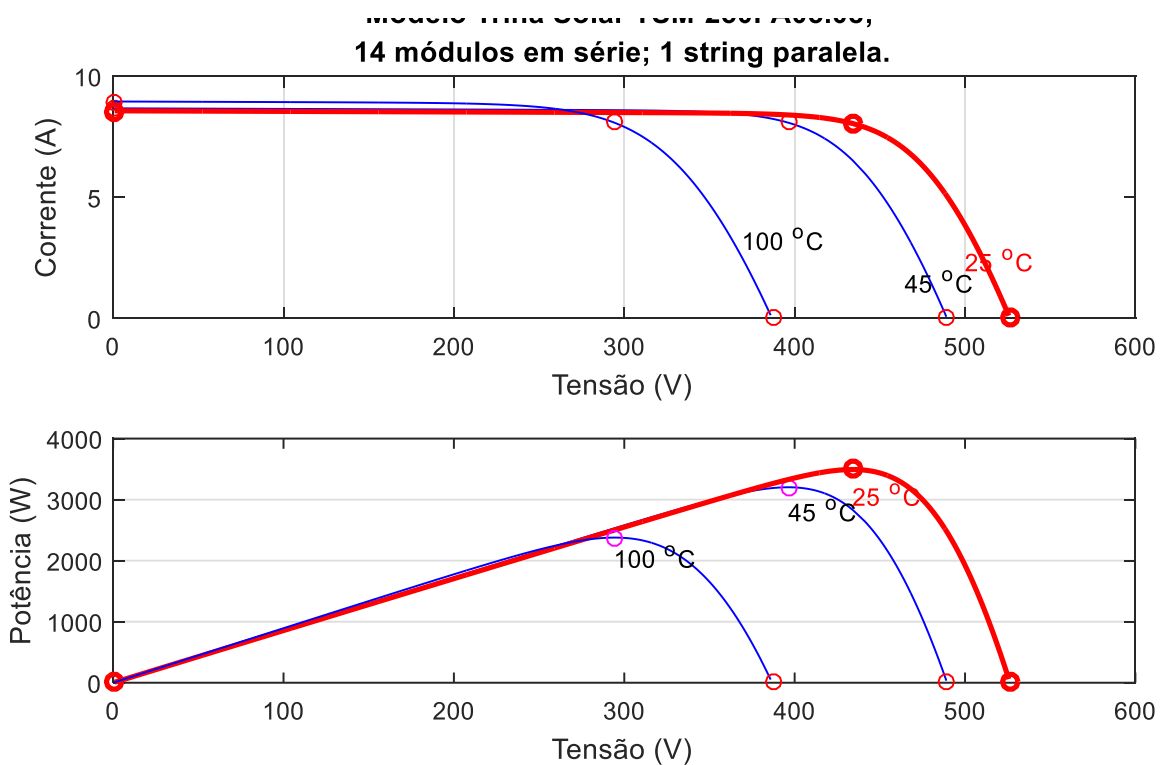
3.4 RESULTADOS

A partir do sistema térmico podemos observar que sem a atuação do arrefecimento, o painel poderia atingir temperaturas 90°C acima da temperatura ambiente, o que pode representar um erro no dimensionamento do calor específico dos painéis e dissipação por irradiação.

Para destacar os efeitos da temperatura sobre o desempenho elétrico do sistema foram utilizadas as temperaturas padrão de 25, 45 e 105 °C para representar a operação destes painéis em três situações extremas diferentes. A primeira para condições de laboratório, a segunda para o sistema híbrido com temperatura estabilizada, e a última para o painel operando em ambiente de alta temperatura.

A partir dos dados de saída obtidos foram plotados as curvas da Figura 21, onde o ponto de máxima potencia de cada curva é destacado por um círculo vermelho.

Figura 21 Curvas VxI e PxV para temperaturas de 25, 45 e 105 °C



4 CONCLUSÕES

Pôde ser constatado o efeito negativo do aumento da temperatura da célula fotovoltaica sobre a sua potência de saída, chegando a ser 60% inferior para temperaturas mais elevadas como pôde ser observado na Figura 21.

A temperatura de operação realmente desempenha um papel central no processo de conversão fotovoltaica. Tanto a eficiência eléctrica, quanto a potência de saída de um módulo fotovoltaico dependem linearmente da temperatura de operação diminuindo com o aumento de T_c . Porém é difícil estimar com precisão um modelo que represente o comportamento desta, visto que variáveis como vento e humidade, posicionamento da placa, influenciam muito o valor da temperatura dos módulos.

Neste estudo foi feita uma análise simulada para demonstrar este efeito baseado em parâmetros fictícios. Assim, é preciso ter cuidado na aplicação de uma expressão particular para a temperatura de funcionamento de um módulo fotovoltaico, porque as equações disponíveis foram desenvolvidos com um nível básico para critérios de simulação.

Os sistemas híbridos Fotovoltaicos/Térmicos, se mostraram uma alternativa mais eficiente do ponto de vista do aproveitamento energético.

Trabalhos futuros podem elaborar um modelo mais preciso da do sistema térmico e desenvolver um controlador mais eficiente para a regulação de temperatura. Outra análise que pode ser feita inserindo variáveis empíricas com condições ambientais para obter dinâmicas mais próximas das do ambiente que o sistema irá operar.

BIBLIOGRAFIA

ABNT. **NBR 10520 - Informação e documentação - Citações em documentos - Apresentação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]: ABNT. 2002. p. 7.

ABNT. **NBR 6023 - Informação e documentação - Referências - Elaboração**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]: ABNT. 2002. p. 24.

ABNT. **NBR 6028 - Informação e documentação - Resumo - Apresentação**. [S.l.]: Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2003. p. 2.

ABNT. **NBR 14724 - Informação e documentação — Trabalhos acadêmicos — Apresentação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]: ABNT. 30 dez. 2005. p. 9.

ABNT. **NBR 6034 - Informação e documentação - Índice - Apresentação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]: ABNT. 2005. p. 4.

AFFOLTER P, H. A. R. D. T. P. **A new generation of hybrid solar collectors - Absorption and high temperature behaviour evaluation of amorphous modules**. 16th European Photovoltaic Solar Energy. Glasgow, UK: [s.n.]. 2000.

CAMPBELL, G. S. . A. J. M. N. **Introduction to environmental biophysics**. 2a. ed. Nova Iorque: Springer, 1998.

CHOW, T. T. Performance analysis of PVT collector by explicit dynamic model. **Solar Energy**, v. 83, p. 143-52, 2003.

ENERGY INITIATIVE MIT. **The Future of Solar Energy**. Massachusetts Institute of Technology. [S.l.]. 2015. (ISBN (978-0-928008-9-8)).

INMETRO. Unidades Legais de Medida. **Inmetro**, 2010. Disponível em:
<<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/unidLegaisMed.asp?iacao=imprimir>>. Acesso em: 12 ago. 2010.

JI J, C. T. H. W. Dynamic performance of hybrid photovoltaic/thermal collector wall in Hong Kong. **Building Environment**, v. 38, p. 1327-34, 2003.

KAWAJIRI K, O. T. G. Y. Effect of Temperature on PV Potential in the World. **Environmental Science and**, v. 45, p. 9030-5, 2011.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. **Handbook of Photovoltaic Engineering**. [S.l.]: Wiley, 2003. ISBN ISBN 0-471-49196-9.

PEREIRA, E. B. E. A. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. INPE. [S.l.]. 2006.

PLATZ R, F. D. Z. M. A. S. J. H. A. S. A. **Hybrid collectors using thin-film technology**. 26th Photovoltaic Specialists Conf. Anaheim, CA: [s.n.]. 1997.

SWAPNIL DUBEY*, J. N. S. B. S. **Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV production in the world**. PV Asia Pacific Conference. Singapore: [s.n.]. 2012.

TRIPANAGNOSTOPOULOS Y, N. T. S. M. Y. P. Hybrid photovoltaic/thermal solar systems. **Solar Energy**, p. 217-234, 2002.

ZONDAG HA, D. V. D. V. H. W. V. Z. R. V. S. A. The yield of different combined PVthermal collectors design. **Solar Energy**, v. 74, p. 253-69, 2003.

ANEXO A – ROTINA *SOLARMODEL.M*

```
%  
%  MODELO SOLAR BASEADO EM "An Introduction to Environmental Biophysics: 2nd  
%  edition - Gaylon S. Campbell, John M. Norman (1998)"  
%  
%  INPUTS: - Latitude em graus  
%           - Pressão do ar em Pascal (Pa)  
%  
%  OUTPUT: - Irradiação solar média mensal (W/m²)  
%           - Irradiação solar média diária (W/m²)  
%  
function [Monthly,Hourly]=SolarModel(Latitude, airpressure)  
  
Month=zeros(1,12);  
p=airpressure;  
Hourly=0;  
  
for DayOfYear=1:365  
    t=0.75; % transmittance (unitless)  
    S=1367; %solar constant (w/m^2)  
  
    hours=[7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17];  
    hangle=(12.0-hours)*15.0*pi/180.0; % Note pi/180.0 is the factor to  
convert angles in degrees in radians.  
  
    declangle=23.45*sin(2.0*pi*(284.0+DayOfYear)/365.0)*pi/180.0;  
  
    cosz=sin(Latitude*pi/180.0)*sin(declangle)+cos(Latitude*pi/180.0)*cos(declangle)*  
cos(hangle);  
  
    m=p./(101.3*cosz); %optical airmass  
  
    Sb=cosz*S.*(t.^m); % Sb is the beam radiation on a horizontal surface  
    Sd=0.3*(1.0-t.^m)*S.*cosz; % Sd is the diffuse radiation on a  
horizontal surface  
    St=Sb+Sd; % St is the total radiation;  
  
    Hourly=(Hourly+St);  
    Irradiance_Wm2 = mean(St);  
  
    %Jan = 1 - 31 (31)  
    %Feb = 32 - 59 (28)  
    %Mar = 60 - 90 (31)  
    %Abr = 91 - 120 (30)  
    %May = 121 - 151 (31)  
    %Jun = 152 - 181 (30)  
    %Jul = 182 - 212 (31)  
    %Aug = 213 - 243 (31)  
    %Sep = 244 - 273 (30)  
    %Oct = 274 - 304 (31)  
    %Nov = 305 - 334 (30)  
    %Dec = 335 - 365 (31)
```

```

if DayOfYear <= 31
    Month(1,1) = Month(1,1)+Irradiance_Wm2;
elseif DayOfYear >=32 && DayOfYear <=59
    Month(1,2) = Month(1,2)+Irradiance_Wm2;
elseif DayOfYear >=60 && DayOfYear <=90
    Month(1,3) = Month(1,3)+Irradiance_Wm2;
elseif DayOfYear >=91 && DayOfYear <=120
    Month(1,4) = Month(1,4)+Irradiance_Wm2;
elseif DayOfYear >=121 && DayOfYear <=151
    Month(1,5) = Month(1,5)+Irradiance_Wm2;
elseif DayOfYear >=152 && DayOfYear <=181
    Month(1,6) = Month(1,6)+Irradiance_Wm2;
elseif DayOfYear >=182 && DayOfYear <=212
    Month(1,7) = Month(1,7)+Irradiance_Wm2;
elseif DayOfYear >=213 && DayOfYear <=243
    Month(1,8) = Month(1,8)+Irradiance_Wm2;
elseif DayOfYear >=244 && DayOfYear <=273
    Month(1,9) = Month(1,9)+Irradiance_Wm2;
elseif DayOfYear >=274 && DayOfYear <=304
    Month(1,10) = Month(1,10)+Irradiance_Wm2;
elseif DayOfYear >=305 && DayOfYear <=334
    Month(1,11) = Month(1,11)+Irradiance_Wm2;
elseif DayOfYear >=335 && DayOfYear <=365
    Month(1,12) = Month(1,12)+Irradiance_Wm2;
end

```

end

```

Month(1,1)=Month(1,1)/31;
Month(1,2)=Month(1,2)/28;
Month(1,3)=Month(1,3)/31;
Month(1,4)=Month(1,4)/30;
Month(1,5)=Month(1,5)/31;
Month(1,6)=Month(1,6)/30;
Month(1,7)=Month(1,7)/31;
Month(1,8)=Month(1,8)/31;
Month(1,9)=Month(1,9)/30;
Month(1,10)=Month(1,10)/31;
Month(1,11)=Month(1,11)/30;
Month(1,12)=Month(1,12)/31;
Monthly=Month;
Hourly=Hourly/365;

```

end

