

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC

CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ANGELO FILLIPI DE PAIVA

**METODOLOGIA DE COMPARAÇÃO DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS PARA A IMPLEMENTAÇÃO EM UMA USINA
EXPERIMENTAL DE 6kWp**

JOINVILLE-SC

2013

ANGELO FILLIPI DE PAIVA

**METODOLOGIA DE COMPARAÇÃO DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS PARA A IMPLEMENTAÇÃO EM UMA USINA
EXPERIMENTAL DE 6kWp**

Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Elétrica, apresentado para o cumprimento da ementa do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas – CCT.

Professor: Yales Rômulo de Novaes, Dr.

JOINVILLE-SC

2013

ANGELO FILLIPI DE PAIVA

**METODOLOGIA DE COMPARAÇÃO DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS PARA A IMPLEMENTAÇÃO EM UMA USINA
EXPERIMENTAL DE 6kWp**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina como requisito para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Orientador:

Prof. Dr. Eng. Eletricista Yales Rômulo de Novaes
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Membro:

Prof. Dr. Eng. Eletricista Fernando Buzzullini Prioste
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Membro:

Prof. Dr. Eng. Eletricista Sérgio Vidal Garcia Oliveira
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Joinville, 03/07/2013

RESUMO

PAIVA, Angelo Fillipi de. **METODOLOGIA DE COMPARAÇÃO DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS PARA A IMPLEMENTAÇÃO EM UMA USINA EXPERIMENTAL DE 6kWp**. Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado de Santa Catarina para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica. Área: Energia Fotovoltaica – Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, 2013.

A geração de energia fotovoltaica teve grande expansão na última década, devido à crescente busca pela geração distribuída - mais perto dos centros consumidores, e por fontes energéticas alternativas à matriz vigente - baseada na queima de combustíveis fósseis. Atualmente, a tecnologia dominante no mercado de energia fotovoltaica utiliza células de silício cristalino para a geração de energia, porém diversas outras tecnologias surgiram nos últimos anos, e têm se mostrado competitivas ao silício cristalino. Este trabalho tem como objetivo mapear essas tecnologias, além de desenvolver um método para definir quais delas são mais vantajosas para a implementação de uma usina fotovoltaica experimental. Primeiramente é apresentado o modelo equivalente de uma célula fotovoltaica, seguido por um método de comparação de módulos comerciais. Então, são mapeadas e comparadas as tecnologias alternativas ao silício cristalino, sendo, por fim, dimensionado o inversor e estimada a energia gerada por uma usina experimental de 6kWp.

ABSTRACT

PAIVA, Angelo Fillipi de. **A METHOD OF COMPARISON OF DIFFERENT PHOTOVOLTAIC MODULES TECHNOLOGIES FOR THE DESIGN OF A 6kWp EXPERIMENTAL PHOTOVOLTAIC POWER PLANT.** Final Paper presented to the University of the State of Santa Catarina for the obtainment of the Bachelor of Electrical Engineering degree. Area: Photovoltaic generation – UDESC – University of the State of Santa Catarina. Joinville, 2013.

The photovoltaic market has expanded in the last decade due to the growing need for distributed generation - closer to consumer centers, and for alternative energy sources. Currently, the dominant photovoltaic technology at the market is made of crystalline silicon. However, several technologies have been developed in the last years and are now competing in price and electrical generation with crystalline silicon solar cells. This paper aims to map these technologies and to develop a method to define which of them are more beneficial to the design of an experimental photovoltaic power plant. First, the equivalent electrical model of a photovoltaic solar cell is shown, followed by the mapping and comparison of these technologies alternative to crystalline silicon. Finally, the generated energy of a 6kWp experimental power plant is estimated.

LISTA DE ABREVIATÖES

<i>m-Si</i>	Silício monocristalino
<i>p-Si</i>	Silício policristalino
<i>a-Si</i>	Silício amorfo
<i>c-Si</i>	Silício cristalino
<i>CdTe</i>	Teuloreto de Cádmio
<i>CiGS</i>	Seleneto de Cobre-Índio-Gálio
<i>HIT</i>	<i>Heterojunction with Intrinsic Thin-Layer</i>
<i>nc-Si</i>	Silício nanocristalino
<i>µm-Si</i>	Silício microcristalino
<i>NREL</i>	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
<i>Vmp</i>	Tensão no ponto de máxima potência
<i>Imp</i>	Corrente no ponto de máxima potência
<i>STC</i>	<i>Standard Test Conditions</i>
<i>NOCT</i>	<i>Nominal Operating Cell Temperature</i>
<i>Pmpp</i>	Ponto de máxima potência
<i>Isc</i>	Corrente de curto-circuito
<i>Voc</i>	Tensão de circuito aberto
<i>K_I</i>	Coeficiente térmico de corrente
<i>K_V</i>	Coeficiente térmico de tensão
<i>K_P</i>	Coeficiente térmico de potência
<i>N_s</i>	Número de células em série
<i>SDM</i>	<i>Single diode model</i>
<i>I_{pv}</i>	Corrente fotovoltaica
<i>I₀</i>	Corrente de saturação do diodo
<i>R_p</i>	Resistência shunt do módulo
<i>R_s</i>	Resistência série do módulo
<i>a</i>	Constante de idealidade do diodo
<i>k</i>	Constante de Boltzmann
<i>q</i>	Carga de um elétron
<i>i_{tol}</i>	Tolerância de corrente
<i>ε_{tol}</i>	Tolerância de tensão
<i>K_T</i>	Coeficiente técnico
<i>K_E</i>	Coeficiente econômico
<i>K_C</i>	Coeficiente construtivo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	TECNOLOGIA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	11
2.1	SILÍCIO CRISTALINO	11
2.2	SILÍCIO AMORFO (a-Si).....	13
2.3	TELURETO DE CÁDMIO (CdTE).....	14
2.4	SELENETO DE COBRE-ÍNDIO-GÁLIO (CIGS)	15
2.5	OUTRAS TECNOLOGIAS	16
2.6	COMPARAÇÃO ENTRE AS TECNOLOGIAS	18
2.7	EFEITO FOTOELÉTRICO	20
2.8	IRRADIAÇÃO SOLAR E COEFICIENTE MASSA-AR	21
3	SOFTWARE DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE UM PAINÉL FOTOVOLTAICO	24
3.1	MODELAGEM DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA - <i>SINGLE DIODE MODEL</i>	27
3.2	MODELO ELÉTRICO EQUIVALENTE DE UM PAINEL FOTOVOLTAICO.....	30
3.3	PARÂMETROS FORNECIDOS NOS CATÁLOGOS DOS FABRICANTES	31
3.4	RELACIONANDO OS PARÂMETROS DO <i>SINGLE DIODE MODEL</i> COM OS PARÂMETROS DE <i>DATASHEET</i>	33
3.4.1	Análise Matemática do Modelo	33
3.5	SOFTWARE DE ITERAÇÃO NUMÉRICA PARA ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO	36
3.5.1	Análise do Software	36
3.6	TESTES DO SOFTWARE	40
3.6.1	Testes Iniciais.....	40
3.6.2	Variação Paramétrica	43
3.7	EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DO <i>SOFTWARE</i>	53
3.8	PROBLEMAS ENCONTRADOS	56
3.9	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	57
4	SIMULAÇÃO DA ENERGIA GERADA PARA OS MÓDULOS FOTOVOLTÁICOS ESTUDADOS.....	58
4.1	AQUISIÇÃO DOS PARÂMETROS METEOROLÓGICOS	60

4.2 DADOS ECONÔMICOS E CONSIDERAÇÕES SOBRE O <i>DATASHEET</i>	66
4.3 FORMULÁRIO.....	68
5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	71
5.1.1 COEFICIENTES PARA OS PAINÉIS DE SILÍCIO AMORFO.....	74
5.1.2 COEFICIENTES PARA OS PAINÉIS DE CdTe	77
5.1.3 COEFICIENTES PARA OS PAINÉIS DE CIGS	81
5.1.4 COEFICIENTES PARA OS PAINÉIS DE CIS	85
5.1.5 COEFICIENTES PARA OS PAINÉIS DE $\mu\text{-SI}$	89
5.1.6 COEFICIENTES PARA OS PAINÉIS DE OUTRAS TECNOLOGIAS	93
5.2 ESCOLHA DOS MÓDULOS PARA PROJETO DA PLANTA DE 6kWp	97
5.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E DO MÉTODO PROPOSTO	100
6 ESCOLHA DO INVERSOR SOLAR	103
6.1 ESCOLHA DO INVERSOR PARA O MÓDULO CX-3.....	104
6.2 ESCOLHA DO INVERSOR PARA O MÓDULO Q.SMART UF L 115	107
6.3 ESCOLHA DO INVERSOR PARA O MÓDULO POWERMAX STRONG	109
6.4 ESCOLHA DO INVERSOR PARA O MÓDULO UM-SI 130 PLUS.....	111
6.5 ESCOLHA DO INVERSOR PARA O MÓDULO OP-315-72	113
6.6 ESCOLHA DO INVERSOR PARA O MÓDULO NA-142H5.....	115
6.7 RESUMO DOS INVERSORES UTILIZADOS.....	117
7 ESTUDO DE CUSTO E ENERGIA GERADA DA PLANTA FOTOVOLTAICA	118
7.1 ANÁLISE DE IMPORTAÇÃO	119
7.2 ENERGIA GERADA.....	121
8 CONCLUSÕES	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129

1 INTRODUÇÃO

Os problemas socioambientais causados pela matriz energética mundial, quando baseada nos combustíveis fósseis, fizeram aparecer nos últimos anos uma crescente preocupação em relação aos impactos causados por nosso desenvolvimento tecnológico e estilo de vida – aquecimento global, alterações climáticas e problemas de saúde relacionados à poluição são alguns dos problemas causados. Entre as diversas medidas propostas para a diminuição deste problema, a de maior interesse para a área de engenharia elétrica é a de energias alternativas e renováveis.

As energias renováveis são fontes energéticas que visam substituir, em parte, a geração a partir de combustíveis fósseis [1]. Como exemplo de fontes alternativas, pode-se citar a hidrelétrica, que corresponde atualmente a mais de 70% da geração elétrica no Brasil; a eólica, que vem se firmando no mercado energético mundial, com uma média de 20GW de novas usinas por ano no globo [2], e a energia solar.

A energia fotovoltaica, que nos últimos 10 anos cresceu quase 400% [3], caracteriza-se pela geração de energia através da radiação solar. Este rápido crescimento - aproximadamente 40% ao ano, ocorreu principalmente devido ao aumento de rendimento da célula e da diminuição do custo médio do watt gerado [3].

É extremamente importante o estudo e pesquisa da tecnologia fotovoltaica, pois se trata de uma das fontes energéticas mais versáteis que se tem conhecimento, podendo ser instalada em plantas solares de centenas de megawatts, fornecendo eletricidade à cidades inteiras, ou em microssistemas residenciais, comerciais e industriais conectados à rede de distribuição, sendo uma fonte auxiliar nos horários de maior demanda. Também pode ser utilizada em lugares remotos, onde é inviável a construção de um sistema de distribuição elétrica ou o transporte de geradores de energia.

O Brasil também vem acompanhando o crescimento mundial. Diversos projetos de usinas solares estão sendo realizados para futura implementação no norte e no nordeste do Brasil [4].

Em Santa Catarina, cita-se os a planta solar de 300kW que está sendo implementada na fábrica da General Motors, em Joinville [5].

Partindo da importância atual e do potencial de crescimento que a geração fotovoltaica possui, este trabalho tem como objetivo o estudo de uma das áreas da geração fotovoltaica, que corresponde ao estudo das diferentes tecnologias de painéis solares existentes no mercado, a fim de definir qual a mais vantajosa para uma dada aplicação.

Os objetivos específicos desse trabalho de conclusão de curso são: levantar métodos de análise com os quais seja possível definir quais os módulos e inversores solares mais vantajosos para uma dada instalação, criar um *software* capaz de simular o comportamento de um painel fotovoltaico, realizar comparações entre diferentes tecnologias alternativas ao silício cristalino que se tem conhecimento no mercado, para então, através do *software* de simulação numérica e do método de escolha de módulos fotovoltaicos, escolher qual dos painéis é mais vantajoso.

Para alcançar estes objetivos, esse trabalho de conclusão de curso está dividido em seis partes distintas. Primeiramente será realizada uma revisão das tecnologias de painéis fotovoltaicos existentes no mercado. Numa segunda etapa será realizado o estudo do *software* desenvolvido, abrangendo a análise matemática e testes do programa. Na terceira etapa será feita a simulação numérica dos módulos escolhidos, onde serão levantados seus parâmetros físicos, além de parâmetros econômicos, para serem comparados na quarta etapa do projeto, onde se definirá quais os módulos mais vantajosos. Na quinta etapa serão escolhidos os inversores que melhor se adequam à planta projetada, e na sexta etapa será realizado o estudo de custo dos módulos e dos inversores, além da energia gerada pelo conjunto.

As definições iniciais de projeto são: uma planta experimental de 6kWp, abrangendo 6 diferentes tecnologias de painéis fotovoltaicos (1kWp por tecnologia), com a finalidade de definir quais as tecnologias que mais trariam vantagens operando em Santa Catarina.

Neste projeto serão escolhidos os painéis e os inversores. Sensores, estrutura mecânica para instalação, assim como circuitos de proteção serão desconsiderados. Por não haver até a conclusão deste projeto o local de instalação, estudo de sombreamento e perdas ôhmicas da instalação não foram realizados. Os módulos serão conectados diretamente na rede, através de inversores do tipo *Grid-Tie*.

2 TECNOLOGIA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Existem diversas tecnologias de painéis fotovoltaicos sendo comercializadas e estudadas atualmente. Neste capítulo serão descritas as principais tecnologias em âmbito comercial, no que diz respeito à eficiência e no que tange ao potencial para produção em escala.

O mercado fotovoltaico é dividido em dois grupos dominantes: os módulos de silício cristalino e os filmes finos, sendo que ambos representam juntos mais de 85% dos painéis comercializados na atualidade [6,7]. As células de Silício Cristalino usam como semicondutor gerador o silício, segundo material mais abundante na crosta terrestre, atrás apenas do Oxigênio [8]. Os filmes finos utilizam estruturas químicas diversas, podendo ou não conter silício. Devido aos avanços na infraestrutura para confecção de painéis com esta tecnologia e ao aumento de eficiência dos módulos, os filmes finos vem tornando-se cada vez mais competitivos em relação ao silício cristalino [9].

Além desses dois grupos, outras tecnologias tem se mostrado competitivas. Pode-se citar aqui os painéis de silício nanocristalinos, as células multi-junções e os concentradores.

2.1 SILÍCIO CRISTALINO

O silício cristalino tem dominado o mercado da energia fotovoltaica em escala comercial desde seu início. Atualmente, mais de 80% dos painéis comercializados utilizam esta tecnologia [6]. Apesar de outras tecnologias apresentarem consideráveis avanços no que se diz respeito à eficiência e diminuição do custo de produção, estima-se que os módulos de silício cristalino ainda serão líderes de mercado por pelo menos mais uma década.

Essa vantagem em relação às outras tecnologias vem desde os anos 60, quando enormes investimentos na área de processamento de silício foram realizados tanto pela indústria quanto pelos governos de diversos países, a fim de entender e dominar as propriedades químicas e elétricas do silício, além de desenvolver os equipamentos necessários para a obtenção do material para uso na confecção de semicondutores. A indústria de painéis fotovoltaicos tomou proveito da tecnologia já existente e as adaptou para a produção de células fotovoltaicas, evitando assim ter que recriar toda a infraestrutura científica e tecnológica necessária para a confecção dos módulos.

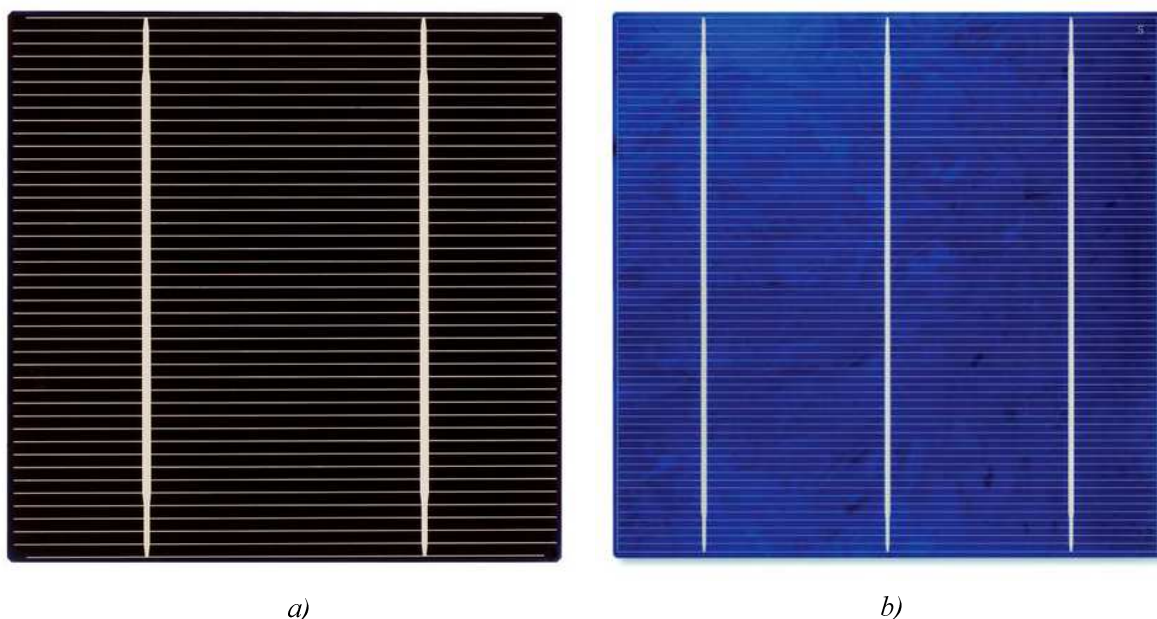
O silício cristalino pode ser dividido em múltiplas categorias, dependendo do tipo de estrutura cristalina que possui. Essas categorias são:

- Silício mono-cristalino (c-Si): é obtido a partir do processo de Czochralski. O material é constituído de pastilha de cristal de silício homogêneo, sendo raro na natureza e de difícil produção em laboratório, sendo por isso mais caro que os módulos de silício multi-cristalino. Como é fabricado em pastilhas que precisam ser posteriormente cortadas, o seu processo produtivo acarreta num considerável desperdício de material [10]. A eficiência de uma célula fotovoltaica mono-cristalina é de aproximadamente 25%, tendo o módulo eficiência média de 16% [1].
- Silício multi-cristalino (poly-Si): as pastilhas desse material são feitas a partir de uma mistura de diversos blocos de cristais de silício derretido e cuidadosamente resfriados e solidificados. Seu processo produtivo é mais barato que o do silício mono-cristalino, porém sua eficiência é menor, tendo uma célula 20% de eficiência e um painel cerca de 15%.
- Fita de silício: são filmes finos de estrutura poli-cristalina. Eles possuem menos eficiência que o silício poli-cristalino, porém economizam material, uma vez que não precisam ser cortados de *wafers* [10]. Segundo a NREL, a eficiência de uma célula de fita de silício é de aproximadamente 16%.

A eficiência teórica máxima do silício cristalino é de 29% [1]. Em laboratório são alcançados valores próximos. O que acarreta na diminuição de rendimento dos módulos comerciais são, entre outros fatores, as conexões metálicas que devem ser feitas (diminuindo assim a área apta a gerar energia), a reflexão da luz solar e as perdas resistivas. Na Figura 1 são

mostradas uma célula mono-cristalina (Figura 1a)) e uma célula poli-cristalina de silício (Figura 1b)).

Figura 1 – Células de Silício. a) Célula mono-cristalina (m-Si), b) Célula poli-cristalina (c-Si).



Fonte: Sunways

2.2 SILÍCIO AMORFO (a-Si)

Ao contrario do silício cristalino, que possui uma estrutura bem definida formando uma rede bem ordenada, o silício amorfo consiste numa rede contínua e aleatória de átomos de silício. Entre as vantagens deste tipo de material estão a alta capacidade de absorção de energia – cerca de três vezes mais que o silício cristalino [11], a necessidade de menos material e a possibilidade de ser depositado em vários tipos de substratos, como os flexíveis ou curvados.

O material é constituído de um filme fino de silício feito por deposição química de vapores de gás silano ou gás hidrogênio [10]. Comumente é referenciado por a-Si ou a-Si:H. Por ter um processo de produção mais simples, é mais barato que o silício cristalino. Apesar de

absorver mais energia, possui menor eficiência devido a sua estrutura desordenada (possui grandes deformações nas camadas de valência e de condução). A eficiência de uma célula de silício amorfo é de 12%, sendo que os módulos comerciais possuem eficiência média de 7%.

Uma desvantagem desta tecnologia é que ela necessita de um tempo de estabilização – cerca de 1000h de incidência solar [11] - para alcançar o seu rendimento nominal, diminuindo seu rendimento em aproximadamente 1,26% neste período [12]. Essa estabilização ocorre devido ao Efeito Staebler-Wronski [11], que refere às mudanças nas propriedades químicas do silício amorfo hidrogenado quando exposto à luz solar.

2.3 TELURETO DE CÁDMIO (CdTe)

O telureto de Cádmio (CdTe) é um composto cristalino formado de Cádmio e Telúrio. Atualmente é a única tecnologia de filmes finos capaz de ter menor custo comparado ao silício cristalino para sistemas de alta potência [13]. Atualmente as células de CdTe conseguem gerar cerca de 60% do seu valor limite de eficiência [1], o que mostra que ainda são necessárias pesquisas em laboratório para se compreender melhor a utilização do composto químico para geração de eletricidade.

Comparado com outras tecnologias de filmes finos, o CdTe é mais fácil de depositar e mais apto à produção em larga escala, apesar do Telúrio ser um material raro. Uma desvantagem desta tecnologia está na toxicidade do Cádmio se inalado, ingerido ou manuseado inapropriadamente.

O rendimento máximo de uma célula de CdTe, segundo a NREL, é de 17,3%. O rendimento médio de um módulo de CdTe situa-se em torno de 11%. A Figura 2 mostra parte de uma planta de 20MW de painéis de Telureto de Cádmio instalada no Novo México, Estados Unidos [14].

Figura 2 - Usina fotovoltaica com painéis de telureto de Cádmio, nos Estados Unidos.



Fonte: First Solar [14].

2.4 SELENETO DE COBRE-ÍNDIO-GÁLIO (CiGS)

A célula solar de Seleneto de Cobre-Índio-Gálio (CiGS) é um composto químico formado por uma solução sólida de Seleneto de Cobre-Índio (CiS) com Seleneto de Cobre-Índio-Gálio. Comercialmente pode ser referenciada por CiGS ou CiS, dependendo do grau de pureza da célula.

Essa tecnologia tem potencial para ser a de maior eficiência entre as de filmes finos, tendo a célula alcançado rendimento de 20% e o módulo 13%, ambos em laboratório. A maior dificuldade encontrada pelos pesquisadores é a produção em escala do material [16].

A vantagem desta tecnologia em relação ao CdTe é que ela não possui materiais tóxicos e sua eficiência é maior [16]. Em relação ao silício cristalino, ela não possui maior rendimento, porém utiliza muito menos material para absorver a mesma porção de energia, e pode vir a ter menor custo, se desenvolvida a tecnologia necessária para sua produção em escala [17].

Na Figura 3 está apresentada a fotografia de uma usina fotovoltaica de 28,8MW utilizando esta tecnologia instalada em Bochow, na Alemanha. A planta possui 205.000 painéis [18].

Figura 3 - Usina fotovoltaica de 28.8MW instalada na Alemanha.



Fonte: Solar Frontier [18].

2.5 OUTRAS TECNOLOGIAS

Além dos módulos de silício cristalino e filmes finos que predominam o setor de energia fotovoltaica, outras tecnologias tem sido pesquisadas e comercializadas, adquirindo resultados relevantes, principalmente no que tange a rendimento. Entre essas tecnologias, cita-se a de silício nanocristalino, as células de multi-junções, a tecnologia *HIT*, da *SANYO* e os concentradores.

As células solares de silício nanocristalino (nc-Si), comumente chamadas de silício microcristalino ($\mu\text{m-Si}$), são estruturas similares ao a-Si, porém com pequenas quantidades de cristais de m-Si em sua estrutura, formando assim um composto com algumas vantagens em

relação ao silício amorfo puro, entre elas, pode-se citar o aumento do espectro solar que a célula é capaz de absorver e uma melhoria na estabilidade por causa dos menores níveis de hidrogênio presentes na célula. Várias pesquisas ocorrem com esta tecnologia, porém ela já está presente no mercado através de células multi-junções, alcançando rendimentos até 30% superiores se comparados com módulos de silício-amorfo [19].

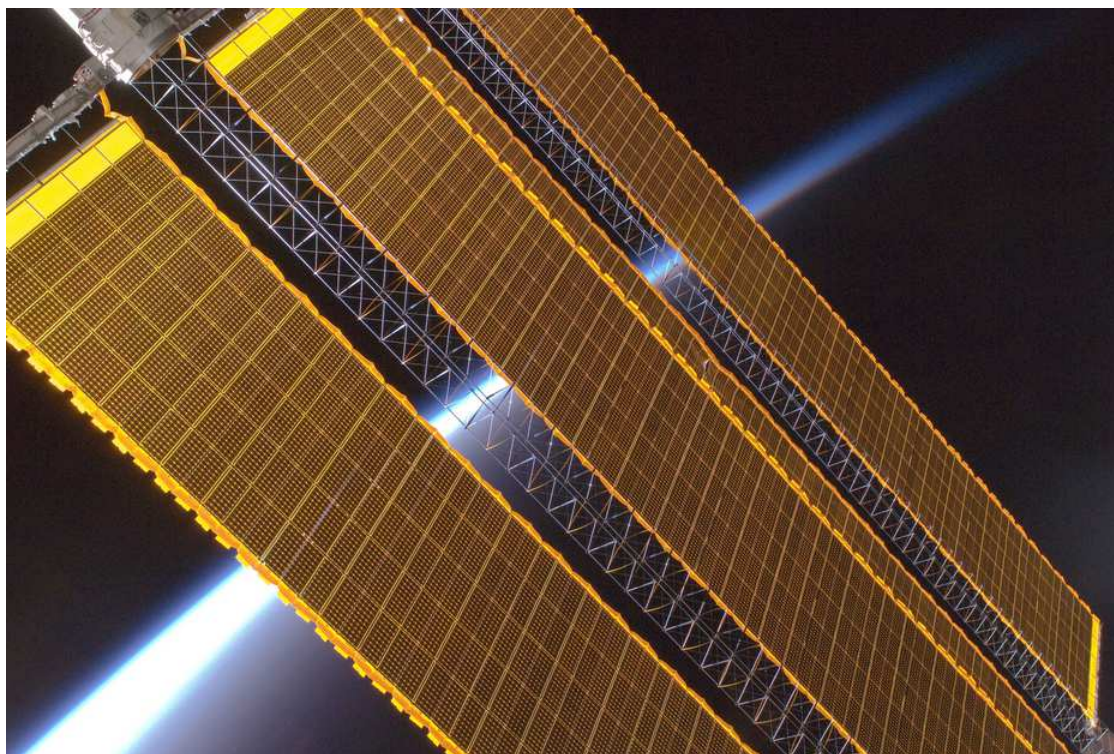
As células solares multi-junções possuem diversas junções p-n, cada uma sendo responsável por obter energia a partir de uma parte do espectro solar, tendo alcançado rendimentos de até 43,5% em laboratório [20]. Apesar da alta eficiência, o seu alto preço e baixa relação preço/desempenho limitaram seu uso quase que exclusivamente para operações aeroespaciais, onde o alto custo de produção é compensado pelo custo de instalação e lançamento de cargas no espaço [1]. Algumas versões comerciais foram lançadas nos últimos anos: são células multi-junções que utilizam como base as células de silício amorfo modificadas para cada uma captar parte do espectro solar. Eficiências de 10% foram alcançadas com esta tecnologia [21].

Na Figura 4 são mostrados painéis solares multi-junções da Estação Espacial Internacional, que geram 90kW de pico numa área de 4 mil metros quadrados.

Outra célula solar que utiliza mais de uma tecnologia de geração fotovoltaica é a *Heterojunction with Intrinsic Thin-Layer*, ou HIT, da SANYO. O módulo consiste numa célula de silício mono-cristalina cercada de um filme ultrafino de silício amorfo, que resulta em módulos fotovoltaicos com eficiência de até 17,4% [1], superiores em até 20% se comparados aos módulos mono-cristalinos puros.

Outra forma de aumentar o rendimento das células fotovoltaicas é através do uso de concentradores - equipamentos que tem como objetivo concentrar a luz solar numa pequena área de célula fotovoltaica. Sistemas com esta tecnologia alcançam rendimentos de até 40% em laboratório [1], e já existem painéis fotovoltaicos com concentradores comercializados que alcançam até 28% de rendimento [22].

Figura 4 - Painéis solares da estação espacial internacional.



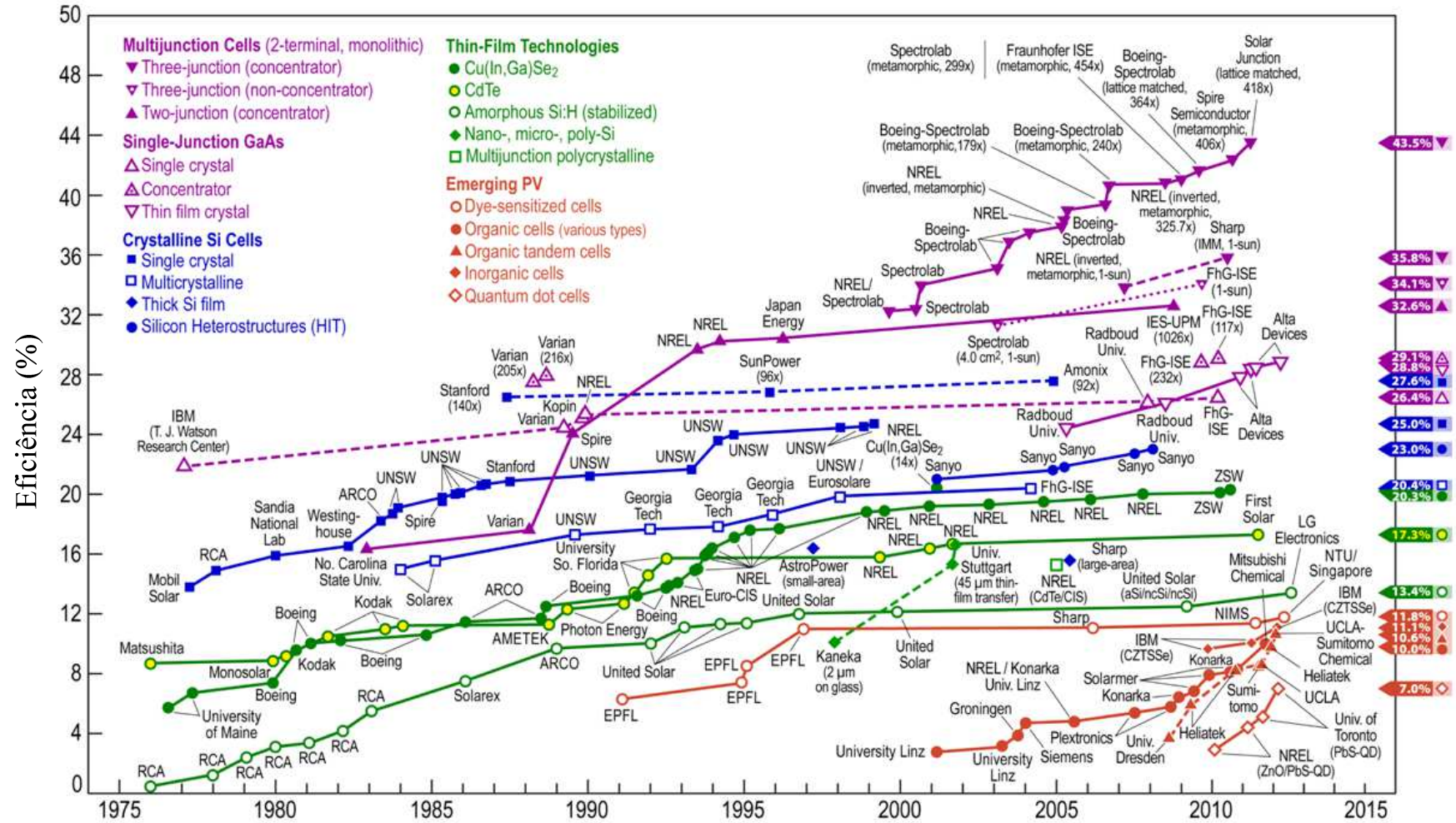
Fonte: Site de notícias da NASA [23].

2.6 COMPARAÇÃO ENTRE AS TECNOLOGIAS

Na Figura 5 está exibido um gráfico comparando a eficiência das diferentes tecnologias de células fotovoltaicas, fornecido pela NREL [24]. É possível perceber as seguintes tendências e características:

- As células multi-junções com concentradores são as que têm melhor eficiência;
- As tecnologias de filmes-finos estão alcançando valores de eficiência próximos às células de silício cristalino;
- As tecnologias emergentes estão começando a obter resultados de eficiência relevantes.

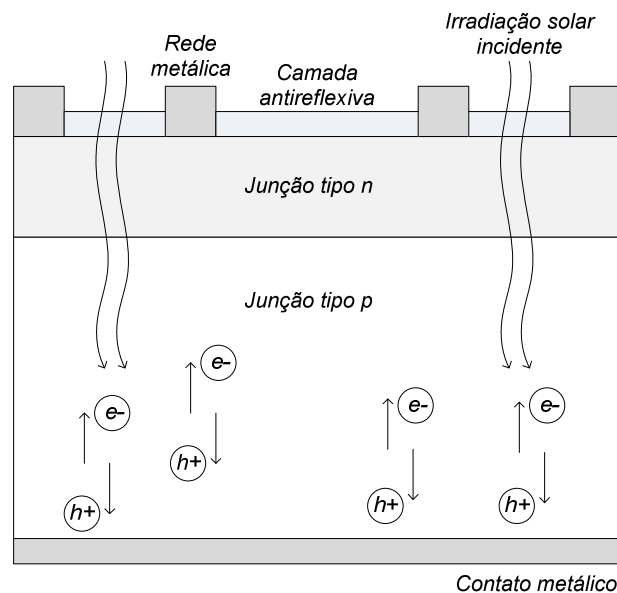
Figura 5 – Eficiência das células fotovoltaicas no decorrer dos anos. Fonte: NREL [24].



2.7 EFEITO FOTOELÉTRICO

As células fotovoltaicas tem capacidade de gerar eletricidade a partir de fótons que incidem sobre sua superfície. O nome dado a este processo físico chama-se Efeito Fotovoltaico [1,6]. *Jeffery F. Gray* [10] define bem uma célula fotovoltaica: “ela é simplesmente um diodo semiconductor que foi cuidadosamente projetado e construído para absorver e converter, eficientemente, a luz incidente sobre ele em energia elétrica” (tradução livre). Na Figura 6 é demonstrado um modelo simplificado de uma célula solar. Basicamente, ela consiste numa junção *pn*, um eletrodo (rede metálica) para a junção tipo *n* e outro eletrodo (contato metálico) para a junção tipo *p*.

Figura 6 - Modelo simplificado de uma célula solar.



Fonte adaptado de [1]

A junção tipo *n* é um elemento semiconductor com excesso de elétrons livres, ficando negativamente carregado. Já a junção tipo *p* possui excesso de lacunas livres, ficando positivamente carregada. Na fronteira entre as duas regiões ocorre a recombinação das cargas, que é o deslocamento de alguns elétrons da região *n* para a região *p* e vice-versa. Isso resulta na criação de um campo elétrico que impede a recombinação das demais cargas. Essa região recebe o nome de camada de depleção [25,26].

Para que ocorram mais deslocamentos de elétrons e lacunas entre as junções, a energia incidente sobre os átomos da junção pn tem que ser maior do que a energia necessária para se retirar um elétron da ligação covalente. Essa energia é usualmente chamada de E_g (*energy gap*) [10]. Este deslocamento resulta no excesso de elétrons na junção n e no excesso de lacunas na região p . Esse excesso de carga é captado pelos eletrodos e entregue à carga, gerando uma corrente elétrica.

O *energy gap* está diretamente relacionada ao comprimento de onda do fóton incidente. Os fótons com energia superior a E_g contribuem para o processo de geração de energia, e os fótons com energia inferior são dissipados na forma de calor na própria célula.

2.8 IRRADIAÇÃO SOLAR E COEFICIENTE MASSA-AR

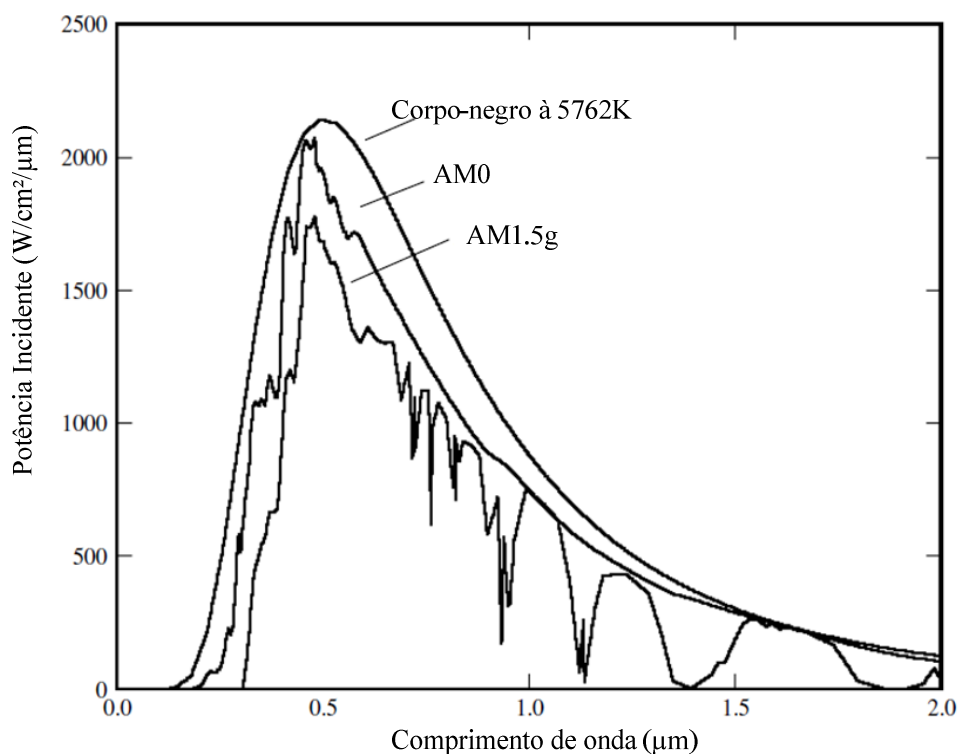
São dois os fatores que afetam a capacidade de um módulo fotovoltaico de gerar energia: a temperatura e a irradiação solar. A primeira afeta diretamente as características químicas e físicas dos materiais das células, que por sua vez influenciam a geração. A irradiação solar interfere diretamente no funcionamento dos painéis solares, pelo fato da geração de energia fotovoltaica estar relacionada com o espectro de frequência da luz incidente. O espectro de irradiação proveniente do sol pode ser comparado ao de um corpo-negro a 6000K [6]. Por definição, um corpo-negro é um corpo físico idealizado que absorve e emite irradiação em todas as direções [6].

Apesar da distribuição ser isotrópica, a distância da terra em relação ao sol permite considerar que a irradiação solar incide com raios perpendiculares em relação à superfície terrestre [6].

Os raios solares, antes de atingirem a superfície terrestre, tem parte da irradiação dispersada e absorvida pela atmosfera terrestre. Uma maneira de estimar essa dispersão é através do coeficiente Massa-Ar [6,27]. Este coeficiente ajuda na caracterização da irradiação solar depois que ela passou pela atmosfera terrestre, e é utilizada como padrão de espectro da irradiação solar para fabricantes de painéis solares [27].

Logo acima da atmosfera terrestre, a intensidade de irradiação é de cerca $1,353\text{kW/m}^2$ [6]. Essa distribuição espectral é referenciada como AM0 (air-mass zero). O coeficiente padrão para comparação de desempenho de painéis elétricos é o AM1.5, que consiste numa intensidade de irradiação de $1,0\text{kW/m}^2$. Há um decréscimo entre a radiação na entrada da atmosfera e na superfície terrestre devido a diversos fatores, como por exemplo a difusão da luz. Esse coeficiente pode ser referenciado por AM1,5g, que contém em seu espectro as componentes difusas, ou o AM1,5d, que não contém essas componentes [6]. A Figura 7 mostra o espectro de frequência de um corpo-negro, a irradiação na entrada da atmosfera (AM0) e na superfície terrestre (AM1,5g).

Figura 7 - Espectros de irradiação de um corpo-negro, na entrada da atmosfera e superfície da terra.



Adaptado Fonte [6]

2.9 COMENTÁRIOS

O objetivo deste capítulo foi fornecer ao leitor uma breve introdução às tecnologias que serão comparadas no decorrer deste projeto. Foi feito neste capítulo

uma breve explicação sobre as principais tecnologias de módulos fotovoltaicos alternativos ao silício cristalino presentes no mercado. Além disso, os conceitos de geração de energia a partir de células fotovoltaicas foram mostrados, como também conceitos sobre irradiação solar.

Concluiu-se através das pesquisas realizadas que muita atenção se dá ao rendimento que as células fotovoltaicas estão alcançando. Neste quesito, as células de silício cristalino ainda detém certa vantagem se comparadas às tecnologias alternativas. Porém, como será visto no decorrer deste trabalho, o rendimento não diz respeito ao comportamento do painel diante a variação da irradiação e da temperatura, que são parâmetros importantes para a escolha dos módulos solares.

Na sequência deste trabalho, será feita uma análise matemática do módulo, necessária para o desenvolvimento do projeto. Após isso, serão escolhidos os painéis a serem estudados, seguidos pela comparação dos módulos e discussão dos resultados.

3 SOFTWARE DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE UM PAINÉL FOTOVOLTAICO

O projeto está definido em três etapas distintas: modelagem do módulo; escolha dos painéis e projeto da planta. A escolha dos painéis será realizada através de dois critérios: técnicos e econômicos. Os critérios técnicos dizem respeito ao comportamento do módulo em diferentes condições de operação, a fim de estimar qual painel gerará mais energia operando na capital catarinense. Já os critérios econômicos buscam definir qual dos painéis estudados tem o melhor custo-benefício, e é dependente do critério técnico.

Além do rendimento, outros parâmetros devem ser analisados para se definir quais módulos mais vantajosos, como por exemplo a resposta dos painéis às variações meteorológicas. Os critérios técnicos serão definidos a partir do comportamento do painel a essas variações. Os objetivos que se desejam alcançar através desses critérios podem ser definidos através dos seguintes tópicos, listados abaixo:

- Estimar quais painéis são mais sensíveis à variação de temperatura e irradiação solar;
- Estimar a quantidade de energia que um arranjo fotovoltaico formado pelos módulos em estudo pode gerar;
- Definir, a partir dos dois tópicos acima, quais módulos estudados geram mais energia, para uma mesma potência instalada.

O catálogo dos módulos fotovoltaicos comumente são pobres em dados técnicos, e somente a partir dos valores de *datasheet* não é possível se obter dados mais precisos sobre o comportamento do módulo. Isto porque, como será visto em sequência, os catálogos fornecem dados da energia gerada apenas para dois pontos de operação. Comprar diversos módulos e testá-los individualmente sobre as mesmas condições, apesar de altamente preciso, é um modo extremamente caro.

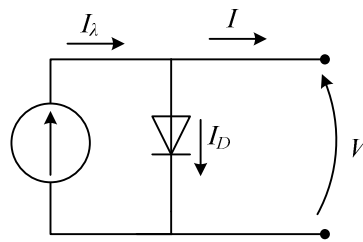
Um modo acessível economicamente e eficaz de se estimar o comportamento

de um módulo fotovoltaico é através de simulações numéricas a partir do modelo matemático do painel. Diversos modelos matemáticos já foram propostos, alguns utilizam dados empíricos para estimar o comportamento do painel, como é o caso do *Sandia Model* [28], um modelo matemático de boa precisão desenvolvido pelo *Sandia National Laboratories*. Ele não será estudado aqui pelo fato de necessitar de dados empíricos.

Alguns trabalhos fornecem procedimentos analíticos para estimar o comportamento do módulo, como GARCIA, A. Molina *et al.*, que, através do artigo “*CdTe Thin-Film Solar Module Modeling Using a Non-Linear Regression Approach*” utiliza a curva de Gompertz para estimar o funcionamento de um módulo de *CdTe*. Os resultados obtidos pelo autor foram bons, porém, mesmo utilizando método analítico, necessita de dados que comumente os fabricantes não fornecem nos *datasheets* dos módulos.

O método analítico que foi escolhido para a realização deste projeto foi proposto por VILLALVA, M. Gradella *et al.*, através do artigo “*Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays*” [29]. O autor propõe, através de uma análise do *Single Diode Model* – modelo matemático de uma célula fotovoltaica bem difundido na literatura [6,10,30] – um método para se obter os parâmetros desse modelo, do qual é possível estimar o comportamento do painel para diferentes condições de operação. O método proposto pelo autor necessita apenas dos parâmetros fornecidos pelos *datasheets* dos fabricantes.

O *Single Diode Model*, aqui chamado de *SDM*, é um modelo elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica, e foi inicialmente proposto para módulos de silício. Na Figura 8 está mostrado o modelo simplificado do *SDM*. Entre as vantagens desse modelo está a facilidade de análise e boa precisão para condições de operação de média e alta irradiação. O modelo também pode ser utilizado em análises de painéis parcialmente sombreados. Quando trabalhando sob essas condições, é necessário saber quais células estarão sombreadas e a quantidade de diodos *by-pass* do módulo, para a construção do arranjo equivalente do módulo [31]. Neste projeto não serão realizados estudos de sombreamento do módulo. Outro modelo, como o *Double Diode Model*, também foi cogitado, porém ele é menos preciso que o *SDM* (GARCIA, A. Molina *et al.*).

Figura 8 – Single Diode Model**Fonte: autor.**

Algumas considerações necessitam ser feitas: o *SDM* é um modelo para células de silício. Neste projeto em questão, serão modelados outros tipos de células, como as de filmes finos, mais precisamente de *CiGS* e *CdTe*. PROROK, M. *et al.* em “*Applicability of Equivalent Diode Models to Modeling Various Thin-Film Photovoltaic (PV) Modules in a Wide Range of Temperature and Irradiance Conditions*” [32] coletou dados experimentais de módulos de filmes finos e os comparou com dados provenientes do *SDM*. Os autores concluíram que *SDM* é confiável para a modelagem de painéis *CiGS* e *CdTe*, porém menos confiáveis para a modelagem de painéis de silício amorfo. Neste projeto serão simuladas diversas tecnologias de módulos fotovoltaicos, incluindo os de silício amorfo. Resultados inesperados ou imprecisos serão relatados.

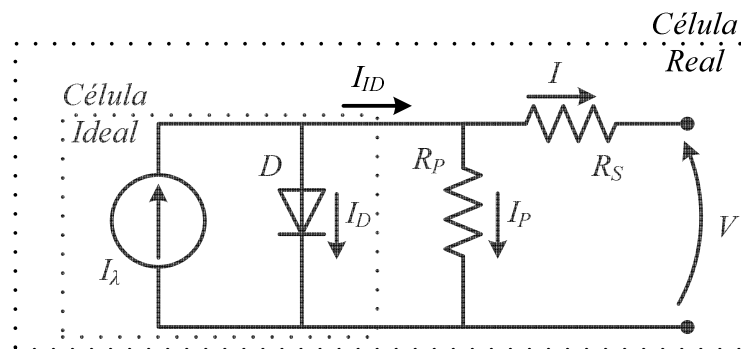
Estipulados o modelo matemático da célula fotovoltaica e o método sob o qual será realizada a simulação numérica do painel, o restante desse capítulo será dedicado à análise detalhada do modelo e do método utilizado. Este capítulo está organizado de forma sequencial – primeiramente serão realizadas as análises iniciais do modelo matemático de uma célula partindo para a readequação do modelo para painéis. Então, serão abordadas as discrepâncias entre o modelo matemático e os parâmetros fornecidos pelos catálogos dos painéis, assim como o método utilizado para o contorno desse problema. Finalmente o *software* desenvolvido pelo autor será explicado, assim como os resultados obtidos. Ao final do capítulo, os resultados obtidos e os problemas encontrados serão relatados de forma resumida.

3.1 MODELAGEM DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA UTILIZANDO O *SINGLE DIODE MODEL*

Nessa seção será apresentado o modelo elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica, as principais equações que regem seu funcionamento, as considerações para o modelo elétrico equivalente de um painel fotovoltaico e uma análise do *datasheet* dos painéis comerciais, com a finalidade de se obter um modelo que permita simular o comportamento do painel para diversas condições de operação.

O *SDM* mostrado na Figura 8 é o modelo idealizado de uma célula fotovoltaica – composta pela fonte de corrente I_λ e pelo diodo intrínseco D . Porém, o modelo idealizado não representa características reais de uma célula fotovoltaica, por exemplo o diodo D possui uma corrente de fuga que deve ser representada no modelo. Além disso, os eletrodos de conexão da célula possuem uma resistência que interferem diretamente na potência de saída do modelo *SDM*. O circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica considerando a resistência shunt do diodo (R_P) e a resistência dos eletrodos de conexão (resistência série - R_S) é demonstrado na Figura 9.

Figura 9 - Modelo equivalente de uma célula fotovoltaica.



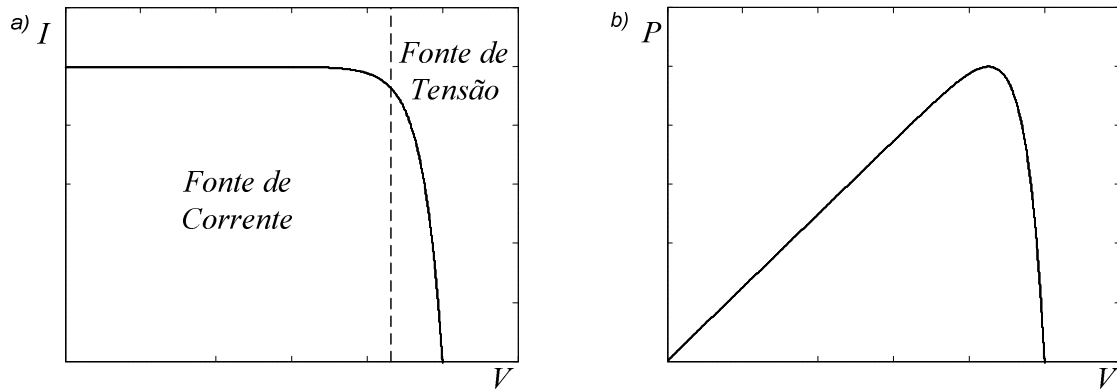
Fonte: do autor.

A corrente I do circuito acima é descrita por (1):

$$I = I_\lambda - I_D - I_P \quad (1)$$

Sabendo que a equação da corrente no diodo é dependente da tensão, a equação (1) resulta num gráfico $I \times V$ e $P \times V$ conforme a Figura 10:

Figura 10 – Modos de operação de uma célula fotovoltaica. em a) $I \times V$ e em b) $P \times V$.



Fonte: autor.

Uma célula fotovoltaica tem duas regiões de operação: como fonte de corrente e como fonte de tensão. Isso ocorre pois, conforme é possível ver na Figura 10, há duas regiões de operação distintas, uma onde a corrente praticamente não varia, e outra onde a tensão praticamente não varia. Quando operando na região de fonte de corrente, R_p exerce mais influência, e quando operando na região fonte de tensão, R_s exerce mais influência.

Expandindo os termos da equação (1), onde I_D pode ser representada pela equação da corrente do diodo Schokley [25] e I_p a equação da corrente num resistor [33]. O resultado obtido é apresentado na equação (2):

$$I = I_{\lambda} - I_{0,célula} \cdot \left[\exp\left(\frac{V + R_s \cdot I}{V_T \cdot a}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (2)$$

Onde:

$I_{0,célula} \rightarrow$ Corrente de saturação do diodo [A];

$V_T \rightarrow$ Tensão térmica do diodo [V];

$a \rightarrow$ Constante de idealidade do diodo ($1 < a < 2$).

A equação da tensão térmica do diodo pode ser expandida conforme a equação (3):

$$V_T = k \cdot T / q \quad (3)$$

Onde:

$k \rightarrow$ Constante de Boltzmann [$1,3806503 \times 10^{-23}$ J/K];

$q \rightarrow$ Carga de um elétron [$1,6021765 \times 10^{-19}$ C];

$T \rightarrow$ Temperatura [K].

A corrente I_λ , apesar de modelada como uma fonte de corrente constante, varia dependendo da irradiação solar e da temperatura na célula [29]. A equação (4) demonstra a variação da corrente I_λ em relação a esses parâmetros.

$$I_\lambda = (I_{\lambda,n} + K_I \cdot (T - T_n)) \frac{G}{G_n} \quad (4)$$

Onde:

$I_{\lambda,n} \rightarrow$ Corrente I_λ nominal [A];

$K_I \rightarrow$ Coeficiente de temperatura da célula [A/K];

$T_n \rightarrow$ Temperatura nominal [K];

$G \rightarrow$ Irradiação [W/m^2];

$G_n \rightarrow$ Irradiação nominal [W/m^2].

A corrente de saturação do diodo $I_{0,célula}$ é um parâmetro dependente da temperatura de junção do semicondutor [29,34] e pode ser expressa conforme (5):

$$I_{0,célula} = I_{0,célula,n} \cdot \left(\frac{T_n}{T} \right)^3 \cdot \exp \left[\frac{q \cdot E_g}{a \cdot k} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (5)$$

Onde:

$I_{0,célula,n} \rightarrow$ Corrente de saturação nominal [A];

$E_g \rightarrow$ *Energy gap* do semicondutor [eV].

3.2 MODELO ELÉTRICO EQUIVALENTE DE UM PAINEL FOTOVOLTAICO

Para a caracterização de um painel fotovoltaico, o modelo elétrico equivalente utilizado é o mesmo de uma célula solar. Porém, como o mesmo é formado por um arranjo de células em série e/ou paralelo, é necessário realizar a correção de certos parâmetros da célula para que o modelo seja válido para o painel [7,29].

As resistências R_S e R_P serão renomeadas deste ponto em diante neste trabalho como as resistências equivalentes série e paralelo do arranjo fotovoltaico. Na equação (6) é feita a correção para a tensão térmica do diodo para N_S células conectadas em série.

$$V_T = N_S \cdot k \cdot T / q \quad (6)$$

Células conectadas em série aumentam a tensão de saída do painel, assim como células conectadas em paralelo aumentam tanto a corrente de saturação do diodo quanto a corrente I_λ [29]. Nas equações (7) e (8) estão as correções dos parâmetros da corrente I_0 e I_λ , para N_p células conectadas em paralelo:

$$I_{pv} = N_p \cdot I_\lambda \quad (7)$$

$$I_0 = N_p \cdot I_{0,célula} \quad (8)$$

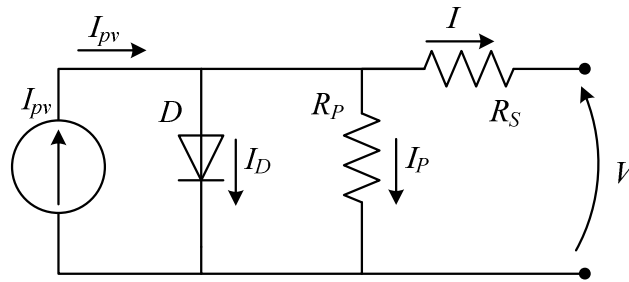
Onde:

$I_{pv} \rightarrow$ Foto corrente equivalente de um arranjo fotovoltaico [A];

$I_0 \rightarrow$ Corrente de saturação de um arranjo fotovoltaico [A].

A Figura 11 mostra o modelo equivalente do módulo fotovoltaico com as devidas correções.

Figura 11 - Modelo equivalente de um painel fotovoltaico.



Fonte: autor.

3.3 PARÂMETROS FORNECIDOS NOS CATÁLOGOS DOS FABRICANTES

A Comissão Internacional de Eletrotécnica (IEC) define em normas os parâmetros e dados relevantes que o *datasheet* de um painel fotovoltaico precisa fornecer. Entre as normas, destaca-se a IEC61215 [34], que define os parâmetros para células de silício cristalino, e a IEC61646 [35], que define os parâmetros para células solares de filmes finos.

Os parâmetros elétricos fornecidos nos catálogos de painéis são diferentes dos encontrados no modelo elétrico equivalente. Os fabricantes fornecem valores de tensão, corrente, rendimento e potência em três condições de operação, para duas condições meteorológicas diferentes. Além disso, são fornecidos os coeficientes de temperatura, que demonstram as variações que ocorrem na tensão e na corrente com a variação da temperatura no painel.

As condições de operação fornecidas pelo fabricante são:

- Curto-circuito do painel fotovoltaico;
- Operação de máxima potência;
- Condição de circuito aberto.

As condições meteorológicas nas quais os painéis são testados são chamadas de STC e a NOCT onde:

- STC (*Standard Test Condition*) - Neste ponto de operação as condições meteorológicas são as seguintes: irradiação de 1000W/m², temperatura na célula de 25°C e espectro de AM1.5;

- NOCT (*Nominal Operation Condition Test*) - A realização dos testes ocorre perante as seguintes condições: irradiação de 800W/m², temperatura na célula de 46°C e espectro de AM1.5.

Além dos parâmetros elétricos, parâmetros físicos - como tamanho da célula, tipo de célula utilizada e peso do painel - também são fornecidos. Na Tabela 1 estão os parâmetros elétricos do painel fornecidos no *datasheet*. Nos catálogos comumente são fornecidas duas tabelas, uma na STC e outra na NOCT.

Tabela 1 - Parâmetros Elétricos de Catálogos de Painéis Fotovoltaicos.

Sigla	Significado
I_{sc}	Corrente de curto circuito
V_{oc}	Tensão de circuito aberto
P_{mpp}	Potência no ponto de máxima potência
I_{mpp}	Corrente no ponto de máxima potência
V_{mpp}	Tensão no ponto de máxima potência
η	Eficiência do painel.
K_V	Coefficiente de temperatura de tensão
K_I	Coefficiente de temperatura de corrente

A corrente de curto circuito I_{sc} é a máxima corrente que o painel poderá fornecer [29]. Ela é obtida realizando-se um curto-circuito entre os eletrodos de saída do painel. A tensão de circuito aberto V_{oc} ocorre quando não há nenhuma carga conectada a ele. O painel possui uma condição de tensão V_{mpp} e corrente I_{mpp} onde irá fornecer a máxima potência P_{mpp} para a carga e esses três valores estão catalogados no *datasheet*. A eficiência do painel fotovoltaico é a relação entre a potência que o painel fornece sobre a potência que incide sobre ele e é demonstrada na equação (9).

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{G_n \cdot S} \quad (9)$$

Onde:

$G_n \rightarrow$ Irradiação nominal [W/m²];

$S \rightarrow$ Área total das células do painel fotovoltaico [m²].

No anexo I está mostrado parte do *datasheet* do painel PROTECT POLY da SCHOTT, onde é possível identificar os parâmetros mostrados nessa seção.

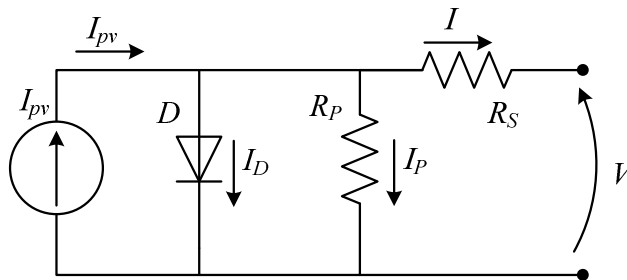
3.4 RELACIONANDO OS PARÂMETROS DO *SINGLE DIODE MODEL* COM OS PARÂMETROS DE *DATASHEET*

Como visto nas seções anteriores, os parâmetros fornecidos pelos fabricantes de painéis solares são diferentes dos parâmetros necessários para o ajuste dos modelos matemáticos do módulo fotovoltaico. Nessa seção será demonstrado um método iterativo para se determinar os parâmetros físicos do painel fotovoltaico a partir dos parâmetros fornecidos pelos fabricantes, baseado no artigo “*Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays* (Villalva, 2009)”. Na seção 3.4.1 será realizada a análise matemática do método.

3.4.1 Análise Matemática do Modelo

A Figura 12 mostra o modelo do módulo fotovoltaico [29]. Algumas simplificações são comumente realizadas para facilitar o equacionamento, como desconsiderar a resistência *shunt*, por exemplo. Neste projeto serão consideradas ambas as resistências série e *shunt*, pois isto resulta num modelo mais fiel.

Figura 12 – Modelo do módulo fotovoltaico.



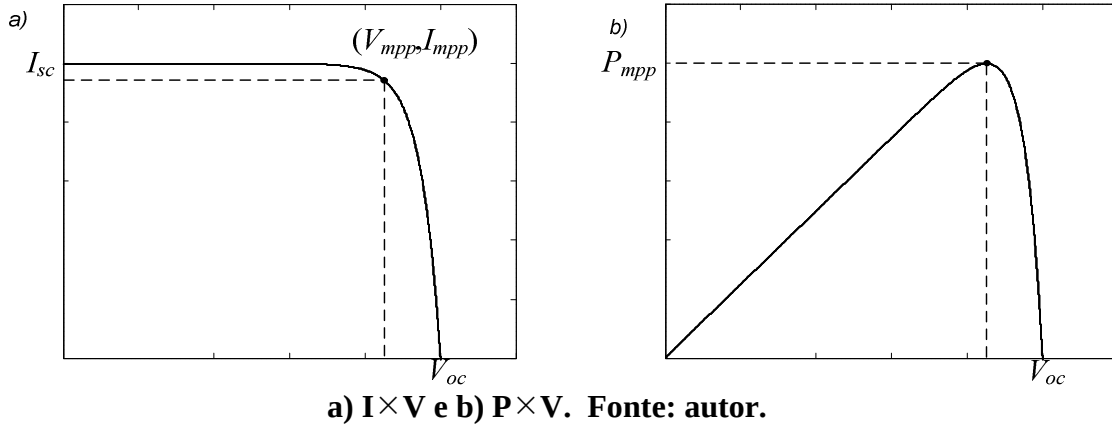
Fonte: autor.

A equação que rege a corrente de saída I é definida por (10):

$$I = I_{pv} - I_0 \cdot \left[\exp \left(\frac{V + R_s \cdot I}{N_s \cdot V_T \cdot a} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (10)$$

As curvas características $I \times V$ e $P \times V$ para um módulo fotovoltaico são mostradas na Figura 13. A curva característica depende dos parâmetros internos do circuito (R_s , R_p , a , N_s e I_{pv}) e de parâmetros externos, que são o índice de irradiação solar e a temperatura. Estão identificados também na Figura 13 alguns dos parâmetros elétricos comumente fornecidos pelo *datasheet*.

Figura 13 – Curva $I \times V$ e $P \times V$.



A corrente gerada pelo painel é representada pela fonte I_{pv} , e a quantidade de energia que o painel pode oferecer é extremamente dependente da luz incidente. O *datasheet* apenas fornece a corrente de curto circuito $I_{sc,n}$, que é a máxima corrente disponível nos terminais do painel. Considerando uma resistência R_s baixa e R_p alta, pode-se assumir que $I_{sc,n} \approx I_{pv}$. A equação de I_{pv} é então regida por (11):

$$I_{pv} = (I_{sc,n} + K_I \cdot (T - T_n)) \frac{G}{G_n} \quad (11)$$

Onde $I_{sc,n}$ é a corrente de curto circuito para o painel operando na condição nominal (STC), e por consequência $I_{pv,n}$ é a corrente do modelo no STC. ($G=1000\text{W/m}^2$, $T=298,15\text{K}$). Assumindo que a resistência R_s é baixa e R_p é alta, temos $V \approx V_{oc,n}$ e $I_{pv} \approx I_{sc,n}$ na equação (3). Isolando a variável I_0 , obtém-se a equação (12):

$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + K_I \cdot \Delta T}{\left[e^{\left(\frac{V_{oc,n} + K_V \cdot \Delta T}{N_s \cdot a \cdot V_t} \right)} - 1 \right]} \quad (12)$$

A constante de idealidade do diodo a é um valor que pode variar entre 1 e 2. Como o parâmetro a pode ser definido empiricamente, neste projeto ele será utilizado para um ajuste fino do método iterativo.

Os parâmetros que restam são R_s e R_p . Como não é possível resolver isoladamente as duas incógnitas, será utilizado um método iterativo para se calcular R_s e R_p , baseado na premissa que há apenas um par $\{R_s, R_p\}$ que satisfaça $P_{max,m} = P_{max,e} = V_{mp} I_{mp}$. A relação entre R_s e R_p é obtida pela equação da potência de saída do módulo e isolando-se R_p . Ela é demonstrada na equação (13):

$$R_p = \frac{V_{mp} \cdot (V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s)}{\left\{ V_{mp} \cdot I_{pv} - V_{mp} \cdot I_0 \left[e^{\left(\frac{V_{oc,n} + K_V \cdot \Delta T}{N_s \cdot a \cdot V_t} \right)} - 1 \right] + V_{mp} \cdot I_0 - P_{max,e} \right\}} \quad (13)$$

O método iterativo consiste na seguinte estrutura:

- Achar um valor de R_s e R_p que façam o ponto de máxima potência da curva P-V coincidir com o ponto de máxima potência fornecido pelo *datasheet*. Isso requer diversas iterações, até que $P_{max,m} = P_{max,e}$.
- R_s é incrementado lentamente, o valor de R_p é encontrado, e a equação é resolvida (só é possível resolvê-la através de método numérico) para o intervalo $V \in [0, V_{oc,n}]$. É encontrada uma curva I-V para o ponto $\{R_s, R_p\}$, e consequentemente P-V. Calcula-se $P_{max,m}$ e compara-se com $P_{max,e}$.

Para melhorar o método, a cada iteração R_s e R_p é possível recalculer $I_{pv,n}$, conforme a equação (14) – a equação é obtida através da análise do circuito da Figura 13, na condição de curto-circuito na saída.

$$I_{pv,n} = \left(\frac{R_p + R_s}{R_p} \right) I_{sc,n} \quad (14)$$

O valor inicial de R_s é zero, enquanto que o valor inicial de R_p é determinado por (15) - que é a equação da inclinação da reta entre o ponto de curto-circuito e o ponto de máxima potência.

$$R_{p,min} = \frac{V_{mp}}{I_{sc,n} - I_{mp}} - \frac{V_{oc,n} - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (15)$$

O valor máximo que R_s pode alcançar é dado pela equação (16). Ela é obtida calculando-se a inclinação da reta entre o ponto de máxima potência e o ponto de circuito aberto.

$$R_s = \frac{V_{oc,n} - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (16)$$

A partir das equações (11),(12),(13),(14),(15) e (16) é possível criar um *software* que, através de métodos iterativos, seja capaz de estimar os parâmetros físicos de uma célula fotovoltaica a partir dos parâmetros de *datasheet*.

3.5 SOFTWARE DE ITERAÇÃO NUMÉRICA PARA ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO

O software para determinar os parâmetros foi realizado através do ambiente de computação numérica MATLAB 2010[®]. Foi escolhido este programa por ser de simples programação, utilizar linguagem similar à C++, além de possuir uma ampla biblioteca de funções gráficas e de resolução de equações.

Esta seção será dividida em quatro etapas distintas. Num primeiro momento será feita a análise do software de simulação, onde serão abordadas a estrutura do programa e o processo iterativo. Na segunda etapa serão demonstrados testes iniciais com o software. A terceira etapa abordará a influência que a variação paramétrica das variáveis de entrada tem sobre o resultado final. A quarta etapa trará um exemplo de como será o procedimento utilizado no decorrer do projeto para se obter os parâmetros para o modelo matemático do painel fotovoltaico.

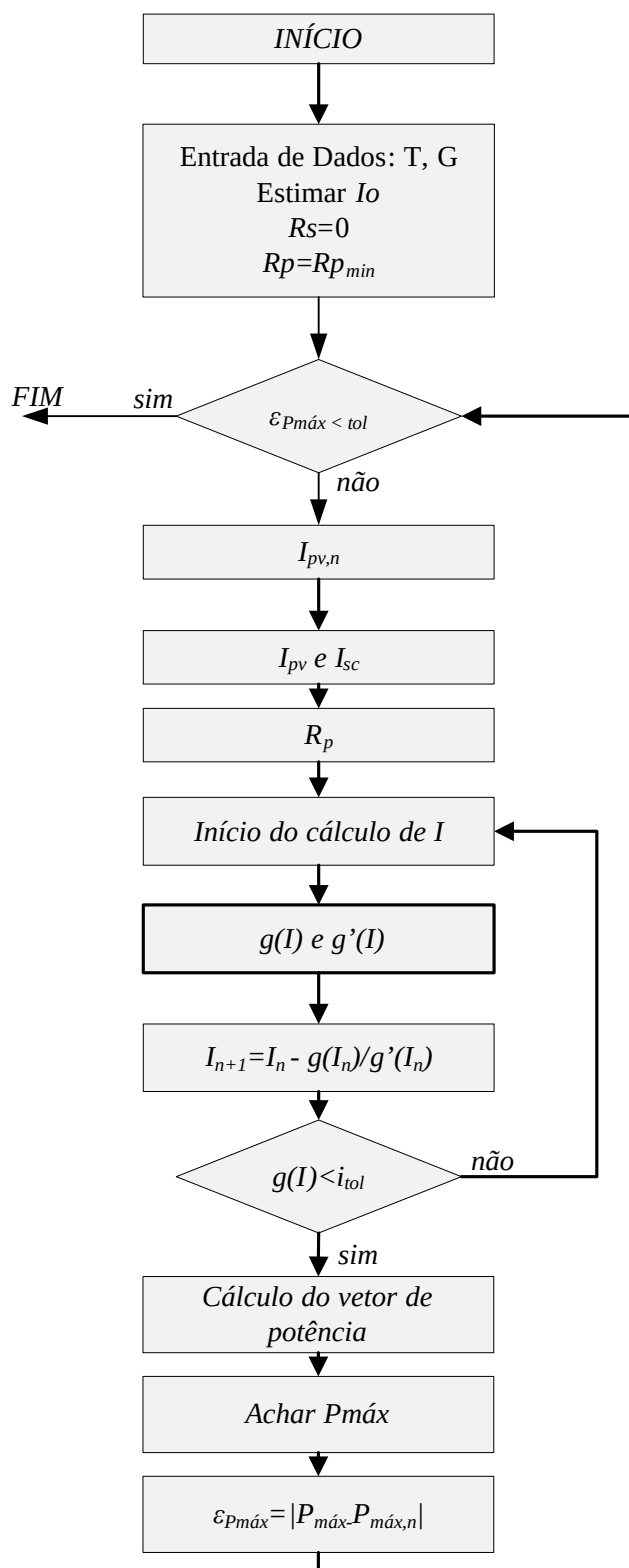
3.5.1 Análise do Software

O software é estruturado conforme o fluxograma da Figura 14. Primeiramente os dados de temperatura e irradiação solar incidente sobre o painel são fornecidos ao programa, além dos parâmetros $V_{oc,n}$, $I_{sc,n}$, $V_{mp,n}$, $I_{mp,n}$ e $P_{max,e}$, N_s , K_V e K_I , - fornecidos pelo *datasheet*, e “ a ”, estipulado pelo usuário. Após isto, é calculado o valor da corrente de saturação do diodo I_0 – através da equação (12), definido $R_s=0$ e calculado o valor mínimo de R_p (R_{pmin}) – através da equação (15).

Definidos e calculados os parâmetros universais, o processo iterativo é iniciado. Calcula-se $I_{pv,n}$, através da equação (14), e a partir dela calcula-se I_{pv} , através da equação (11). Caso esteja-se trabalhando na condição nominal, $I_{pv}=I_{pv,n}$. Após o cálculo desses parâmetros, é possível calcular o valor de R_p , conforme a equação (15).

Com os parâmetros equacionados é possível calcular a corrente I na saída do módulo fotovoltaico para o intervalo $[0, V_{oc,n}]$ para o ponto $\{R_s, R_p\}$. Como não é possível isolar algebricamente a variável I , optou-se pelo método de Newton-Raphson [29] para o cálculo da corrente de saída do módulo fotovoltaico.

Figura 14 – Fluxograma do software



Fonte: [29].

O método de Newton-Raphson consiste em encontrar – através de sucessivas aproximações - o valor da raiz de uma função com uma variável [36]. Ela pode ser descrita conforme (17):

$$x : f(x) = 0 \quad (17)$$

Onde cada novo valor de x é dado pela expressão abaixo:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (18)$$

Somando $-I$ em ambos os lados da equação da corrente I (10), obtém-se (19):

$$-I + I_{pv} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{N_s V_T a}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} = 0 \quad (19)$$

Como a equação acima depende apenas de I – já que o restante das variáveis já foi previamente definido, inclusive V , podemos reescrever da seguinte forma (20):

$$g(I) = -I + I_{pv} - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{N_s \cdot V_T \cdot a}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (20)$$

Logo, pelo método de Newton-Raphson, deseja-se encontrar um valor de I que zere $g(I)$. Onde cada novo valor de I é dado por:

$$I_{n+1} = I_n - \frac{g(I_n)}{g'(I_n)} \quad (21)$$

E $g'(I_n)$ é a derivada de (20) em relação a “ I ”, e é mostrada em (22):

$$g'(I_n) = -1 - \frac{I_0 \cdot R_s}{N_s \cdot V_T \cdot a} \left[\exp\left(\frac{V + R_s \cdot I_n}{N_s \cdot V_T \cdot a}\right) \right] - \frac{R_s}{R_p} \quad (22)$$

Como o método é iterativo, o valor de $g(I_n)$ nunca chegará a zero. Logo, a tolerância utilizada no software foi $I_{tol}=1\text{mA}$.

Com todos os valores de I calculados para o intervalo $[0, V_{oc,n}]$, é possível calcular o vetor P de potência de saída do painel multiplicando-se I e V . O vetor P pode ser escrito da seguinte maneira:

$$P[j] = I[j] \cdot V[j] \quad (23)$$

É simples encontrar o valor máximo do vetor $P[j]$. Denominando esse valor de $P_{max,m}$, podemos calcular a diferença entre o P_{max} encontrado e o $P_{max,e}$.

$$\varepsilon_{tol} = |P_{max,m} - P_{max,e}| \quad (24)$$

A tolerância ε_{tol} é definida pelo usuário. Caso a tolerância fique acima do valor definido, um novo processo iterativo é iniciado, começando pelo cálculo de $I_{pv,n}$, e assim por diante. Encerra-se assim a análise matemática do software. Nas próximas seções serão mostrados os testes iniciais para validação do software, assim como os efeitos das variações paramétricas. O *software* programado no MatLab pode ser encontrado no anexo II.

3.6 TESTES DO SOFTWARE

O objetivo dessa seção é demonstrar o funcionamento do *software*, mostrando os resultados que são possíveis obter com o mesmo, além dos problemas do modelo utilizado. Primeiramente serão demonstrados testes iniciais, com o objetivo de habituar o leitor com o *software*. Após isso, serão demonstrados os efeitos da variação dos parâmetros no modelo proposto. Por fim, um exemplo de como serão encontrados os parâmetros durante o restante do trabalho.

3.6.1 Testes Iniciais

Nesta seção serão comparados os resultados obtidos pelo programa criado e pelo *software* do autor do artigo “*Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays* (Villalva, 2009)”. O painel escolhido foi o SW130, da SolarWorld. Abaixo, estão os dados do *datasheet* do fabricante:

Tabela 2 – Dados do *datasheet* SW130

Fabricante	Solarworld
Modelo	SW130
$V_{oc,n}$	21,5V
$I_{sc,n}$	7,99A

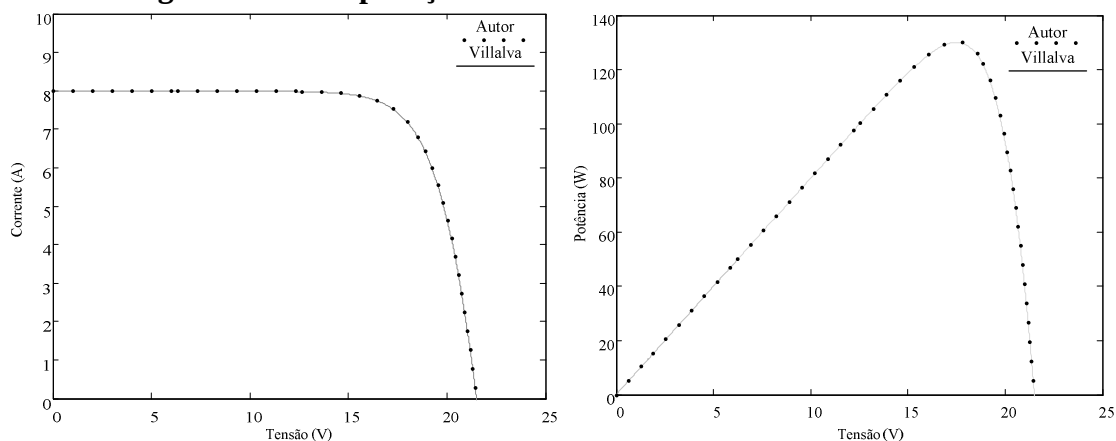
P_{mpp}	130,3W
V_{mpp}	7,49
I_{mpp}	17,4
N_s	36
K_V	-0,34%/K
K_I	0,034%/K

Através do mesmo método iterativo, os seguintes resultados foram obtidos:

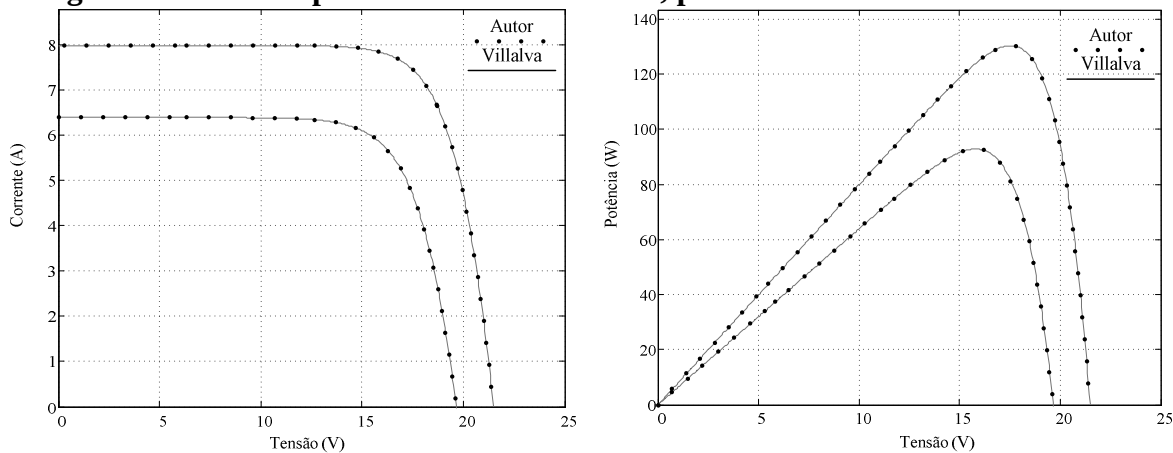
Tabela 3 – Comparação dos resultados obtidos

	Villalva	Autor
R_s	80,3mΩ	81,0mΩ
R_p	89,6kΩ	98,72kΩ
a	1,365	1,365
I_{pv}	7,99A	7,99A
I_0	$3,212 \times 10^{-7} \text{ A}$	$3,212 \times 10^{-7} \text{ A}$
P_{max}	130,38W	130,4W
V_{mp}	17,4V	17,43V
I_{mp}	7,49A	7,47A

Na Figura 15 estão plotadas as duas curvas $I \times V$ e $P \times V$ dos modelos matemáticos de uma módulo fotovoltaico do autor e do Villalva. É possível perceber que os modelos se equivalem, mesmo havendo diferença - principalmente no R_p . Esta diferença foi causada pela diferença do passo utilizado nas iterações entre um programa e outro.

Figura 15 – Comparação entre o modelo do Villalva e do autor.**Fonte: do autor.**

Obtidos os parâmetros físicos do modelo equivalente, é possível realizar a operação inversa – estimar a potência que será gerada pelo módulo fotovoltaico a partir das condições climáticas. As duas variáveis meteorológicas do modelo são a temperatura e o índice de irradiação solar. Os únicos parâmetros do modelo que são modificados com a variação de T (temperatura na superfície do painel) e G (índice de irradiação no módulo) são a corrente de curto circuito I_{sc} e a corrente de saturação I_0 . Recalculando esses parâmetros para um par (T, G) é possível estimar o comportamento do painel para tal condição de operação. No anexo III está mostrado o software que foi feito para realizar tal tarefa. Na Figura 16 os resultados para os parâmetros encontrados pelo software do Villalva e do autor:

Figura 16 – Painél operando no STC e NOCT, para ambos os softwares.**Fonte: do autor.**

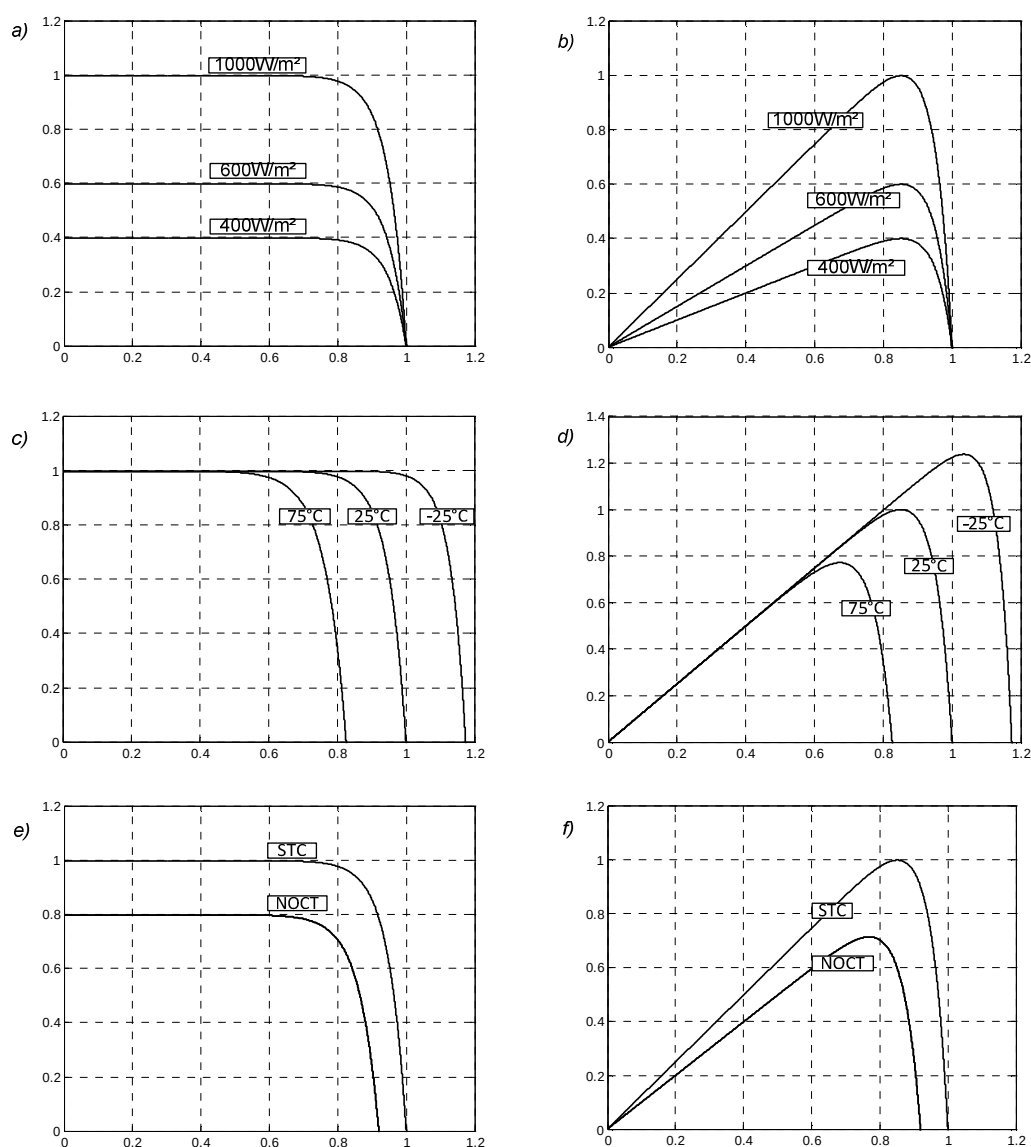
Ambas as curvas de potência e corrente estão sobrepostas, o que significa que a diferença entre os parâmetros dos modelos é insignificante. Isso comprova que o *software* desenvolvido está de acordo com o *software* programado pelo autor do artigo, o que acarreta numa maior confiança dos valores que serão obtidos.

3.6.2 Variação Paramétrica

Um estudo importante do projeto é o da variação paramétrica. Isso porque é necessário o conhecimento prévio do comportamento do modelo matemático no caso de variação dos valores de entrada do software. Basicamente quatro parâmetros poderão variar: temperatura (T), índice de irradiação solar (G), fator de idealidade do diodo (a), número de células em série do módulo fotovoltaico (N_s), a tolerância ε_{tol} definida pelo usuário e o passo de simulação n_v .

A variação dos parâmetros de entrada de cunho meteorológicos (T e G) já é esperada pelo próprio conceito do funcionamento de painel fotovoltaico, e não necessita de um estudo mais detalhado. Na Figura 17) a) está mostrado o comportamento do painel fotovoltaico para variação na temperatura, enquanto que em b) está demonstrado o comportamento do painel para variação na irradiação solar. Enquanto que a variação da irradiação acarreta numa variação diretamente proporcional da corrente de saída, a variação da temperatura tem efeito contrário. O painel gerará mais energia operando em temperaturas mais baixas. A Figura 17)c) mostra a diferença de comportamento do módulo para dois pontos de operação distintos do painel: STC e NOCT.

Figura 17 – Variação paramétrica da temperatura e irradiação. a) V_{normal} versus I_{normal} para três condições: irradiação de 1000W/m^2 , 600W/m^2 e 400W/m^2 , mantendo-se a temperatura constante; b) V_{normal} versus P_{normal} para mesma condição de a); c) V_{normal} versus I_{normal} para três temperaturas diferentes: -25°C , 25°C e 75°C mantendo-se a irradiação constante; d) V_{normal} versus P_{normal} para mesma condição de c); e) e f) Comparativo do funcionamento do painel no STC e no NOCT.



Fonte: do autor.

O estudo da variação do parâmetro “a” é importante, pois como é um dado escolhido pelo usuário, é necessário um conhecimento prévio se essa variação causará

muita diferença no valor final da simulação. Por exemplo, será que se o usuário escolher $a=1$, o módulo se comportará do mesmo jeito caso ele escolha $a=2$?

Para responder essa pergunta foi realizada uma simulação-teste onde é variado o parâmetro “ a ”, encontrado diferentes vetores $\{R_s, R_p, I_{pv}, I_0\}$ e analisada as variações nas curvas de potência e de energia gerada

O painel escolhido para teste é o CX-3, da Calyxo. Ele foi escolhido pelo fato do *datasheet* não fornecer o número de células em série (N_s) – isso será estudado na sequência. Como visto anteriormente, apesar de ele não ser de silício, o SDM pode ser utilizado como modelo do painel. Na Tabela 4 estão os parâmetros de *datasheet* fornecido pelo fabricante:

Tabela 4 – Parâmetros de *datasheet* – CX-3

Fabricante	Calyxo
Modelo	CX-3
$V_{oc,n}$	63,6V
$I_{sc,n}$	2,06A
P_{mpp}	85W
V_{mpp}	47,8V
I_{mpp}	1,78A
N_s	116
K_V	-0,24%/K
K_I	0,024%/K

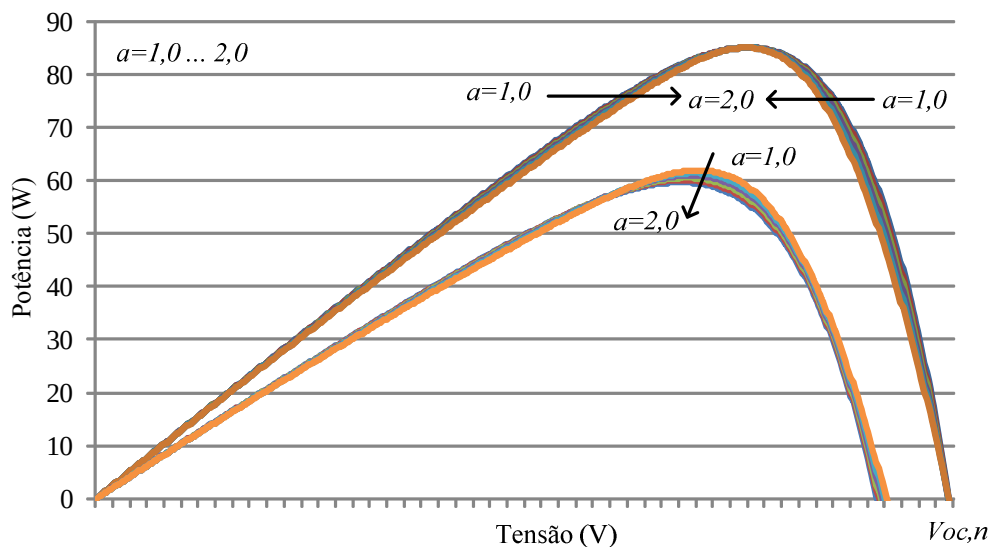
O parâmetro “ a ” foi variado de entre 1 e 2. Para cada variação, um novo vetor $\{R_s, R_p, I_{pv}, I_0\}$ foi encontrado. Eles estão mostrados na tabela:

Tabela 5 – Variação de outros Parâmetros com a variação de “ a ”

a	$R_s(\Omega)$	$R_p(\Omega)$	$I_{pv}(A)$	$I_0(A)$
1,0	3,85	260,86	2,09	1,11 η
1,2	3,19	292,99	2,08	38,96 η
1,4	2,58	333,00	2,075	494,0 η
1,6	2,07	385,31	2,07	3,32 μ
1,8	1,49	456,20	2,067	14,62 μ
2,0	1,01	558,35	2,063	47,86 μ

Mantendo-se $N_s=116$ e variando-se “ a ”, é possível perceber que com o aumento do parâmetro, a resistência série tende a diminuir, enquanto que a *shunt* tende a crescer. A corrente do I_{pv} varia pouco – cerca de 1%, enquanto que a corrente de saturação do diodo varia consideravelmente. Como todos esses parâmetros variam ao mesmo tempo, o comportamento do painel varia pouco, como pode ser visto na Figura 18, que mostra as diferentes curvas para o STC e NOCT. Como esperado, todas as diferentes curvas convergiram no ponto de máxima potência, havendo diferença apenas na abertura da curva para o ponto STC. Já no NOCT houve diferença aproximadamente de 6% entre os dois extremos de variação no ponto de máxima potência. Isso pode acarretar em um modelo que gera mais ou menos energia para o mesmo painel.

Figura 18 – Comportamento do painel para variação paramétrica de “ a ”

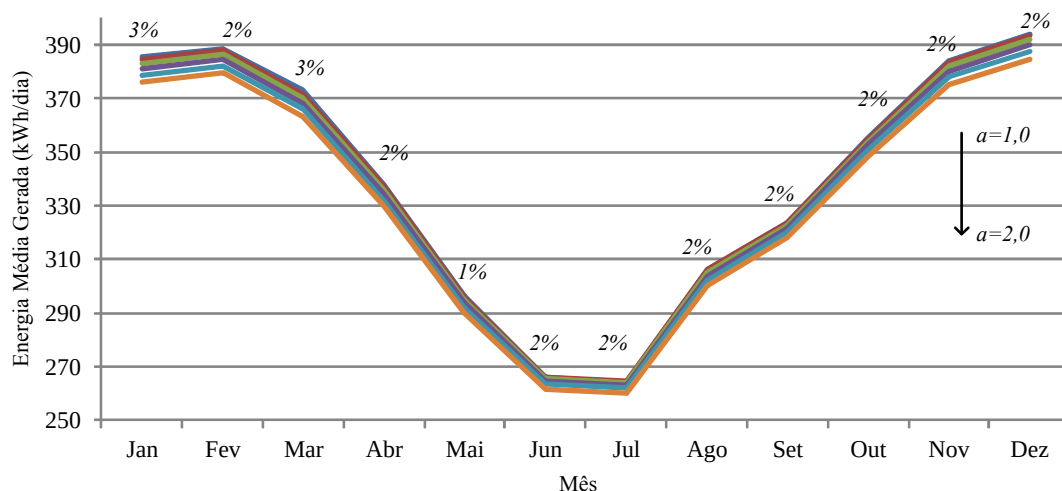


Fonte: do autor.

A fim de estudar o efeito da variação paramétrica sobre a potência gerada, fez-se um estudo da energia média gerada. Na seção 4.1 está a análise detalhada sobre os valores de irradiação utilizados no projeto. Na Figura 19 está mostrada a energia média gerada (kWh/dia) do módulo para as mesmas curvas estudadas anteriormente. A diferença da energia gerada é de no máximo 3% e de no mínimo 1%. Em um ano a variação média será 2%. Isso mostra que, apesar de poder haver diferentes curvas para

um mesmo módulo devido à variação paramétrica de “ a ”, o efeito dessa variação sobre a energia gerada é baixo.

Figura 19 – Efeito da variação paramétrica de “ a ” sobre a energia gerada



Fonte: do autor.

Outro parâmetro que deve ser analisado é a quantidade de células em série (N_s) de um painel fotovoltaico. Isso porque nem todos os fabricantes fornecem esse dado e logo ele deve ser estimado. Neste projeto, a quantidade de células em um módulo fotovoltaico foi estimada a partir de painéis de mesma tecnologia e de potência similar cujo fabricante fornece a quantidade de células série.

O módulo com o qual será realizada a variação paramétrica, como visto anteriormente, é o CX-3, da CALYXO. As células desse painel são de CdTe. Abaixo na Tabela 6 estão mostrados os dados da tecnologia CdTe e a quantidade de painéis série:

Tabela 6 – Comparação dos parametros de painéis de CdTe			
Modelo	Fabricante	Potência(W)	N_s
CX-3	Calyxo	85	Não fornecido
CdTe-83W	General Electrics	82,5	116
FS-277	First Solar	77,5	116

Pelo fato de ser da mesma tecnologia e ter potência similar à módulos de outros fabricantes, é aceitável deduzir que a quantidade de células série do painel CX-3 da Calyxo será um valor próximo a 116. Abaixo a Tabela 7 com a variação de N_s e os parâmetros R_s , R_p , I_{pv} e I_0 para cada variação.

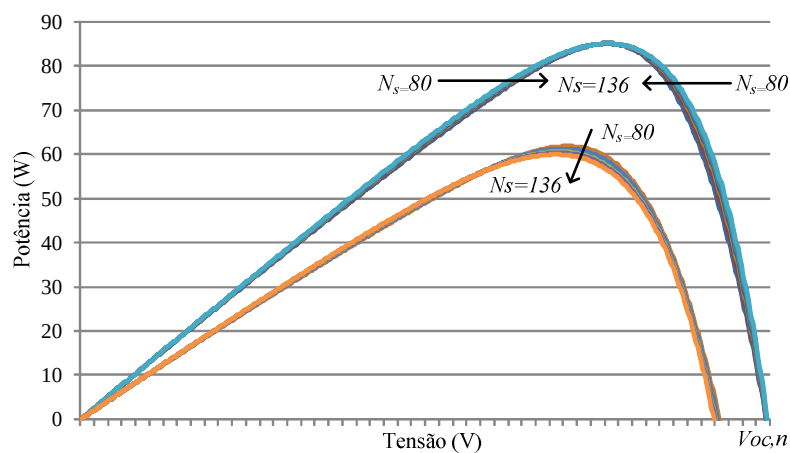
Tabela 7 - Variação paramétrica de N_s

N_s	$R_s(\Omega)$	$R_p(\Omega)$	$I_{pv}(A)$	$I_0(A)$
80	2,465	306,97	2,077	39,3 η
96	1,67	367,46	2,069	5,18 μ
108	1,13	430,80	2,065	21,71 μ
116	0,79	486,36	2,063	47,86 μ
124	0,463	557,88	2,062	95,27 μ
136	0,0078	715,44	2,060	229,8 μ

N_s não foi variado abaixo de 80 pois, como será visto no decorrer deste projeto, os módulos, independente da tecnologia, possuem N_s na faixa simulada – variando de 80 à 136 na maioria dos casos. A variação de N_s para valores maiores de 116 fizeram a simulação convergir com poucas iterações, o que resultou num baixo valor de R_s . As consequências da variação da tolerância serão vistos em sequência.

Como ao alterar-se o parâmetro N_s os outros parâmetros também variam, o comportamento do módulo simulado também pouco varia. Na Figura 20 está mostrada a curva $P \times V$ para a variação paramétrica. Percebe-se que todas as curvas convergem à P_{mpp} , porém a quantidade de células série tem efeito direto sobre o comportamento do painel sob diferentes condições, por exemplo no NOCT. Isso ocorre pois a corrente circulante pelo diodo do *SDM* é dependente de N_s . Mesmo assim a variação total da potência no NOCT é baixa, em torno de 3V para o intervalo simulado.

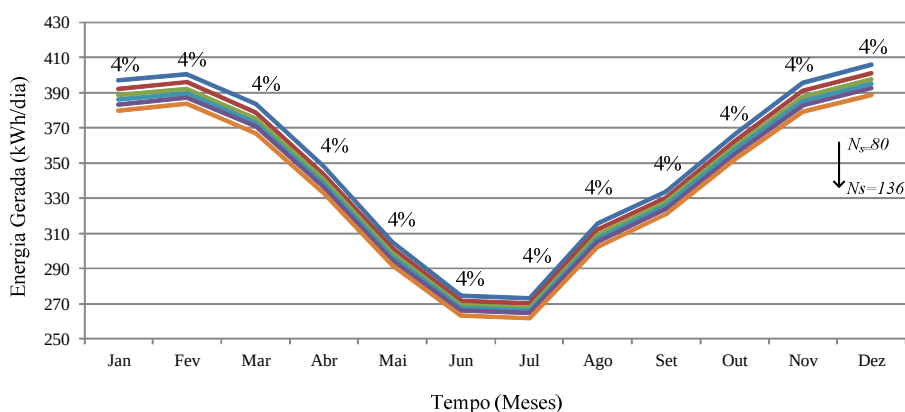
Figura 20 – Variação do comportamento do módulo com a variação paramétrica de N_s



Fonte: do autor.

Os efeitos sobre a energia gerada podem ser vistos na Figura 21. A variação máxima entre um painel com 80 células em série e um com 136 células foi de 4%, para todos os meses. Com esse resultado conclui-se que a variação paramétrica em porcentagem de N_s também gera pouca influencia sobre o modelo do painel fotovoltaico.

Figura 21 – Efeito da variação paramétrica de “ N_s ” sobre a energia gerada



Fonte: do autor.

As variações paramétricas realizadas até então se referem a parâmetros do próprio modelo do painel fotovoltaico. Agora será estudado o comportamento do

software para variação dos parâmetros do método iterativo. São duas as variáveis: ε_{tol} e n_v . O primeiro parâmetro diz respeito à tolerância entre a diferença entre o $P_{mpp,m}$ calculado e o $P_{mpp,e}$ fornecido pelo fabricante. Ele é definido pelo usuário e, como será visto, exerce direta influência sobre os resultados de simulação. O parâmetro n_v está diretamente relacionado com a quantidade de pontos que as curvas $I \times V$ e $P \times V$ terão, pois é através dele que se define o passo de cálculo, e consequente o tamanho dos vetores $V[j]$ e $I[j]$. Abaixo estão os resultados de simulação para a variação paramétrica de n_v . Na Tabela 8 estão os resultados de simulação para a variação do passo de simulação:

Tabela 8 – Resultados de simulação para variação paramétrica de n_v

n_v	$R_s(\Omega)$	$R_p(\Omega)$	$I_{pv}(A)$	$I_0(A)$	$P_{mpp}(W)$	$V_{mpp}(V)$
200	0,784	485,55	2,063	47,86 μ	85,1	48,65
400	0,784	485,55	2,063	47,86 μ	85,1	48,65
500	0,787	486,36	2,063	47,86 μ	85,1	48,59
1000	0,787	486,36	2,063	47,86 μ	85,1	48,59
2000	0,787	486,36	2,063	47,86 μ	85,1	48,59
2500	0,787	486,36	2,063	47,86 μ	85,1	48,59

Pela tabela percebe-se que o passo da simulação somente exerce influencia sobre o resultado de simulação caso esse seja grande demais – valores abaixo de 500 pontos por intervalo $[0, V_{ocn,n}]$. Para o projeto, utilizou-se $n_v=500$, pois a simulação fica mais rápida sem perder precisão. Não serão necessários mais estudos sobre esta variação paramétrica, visto que, se dimensionada corretamente, não exerce influência sobre o resultado de simulação.

O parâmetro de simulação ε_{tol} exerce mais influência sobre o resultado de simulação. Na Tabela 9 estão mostrados os parâmetros do *SDM* para diversas tolerâncias. Conclui-se através dos resultados que essa tolerância exerce efeito sobre o par $\{R_s, R_p\}$, o que é deduzível, pois é ela que define se será necessária mais uma iteração, consequentemente alterando os parâmetros resistivos.

Tabela 9 – Influência de ε_{tol} sobre os parâmetros do *SDM*

ε_{tol}	$R_s(\Omega)$	$R_p(\Omega)$	$I_{pv}(A)$	$I_0(A)$
1	0,174	247,92	2,061	5,18 μ
0,5	0,832	281,935	2,066	5,18 μ
0,1	1,67	367,46	2,069	5,18 μ
0,05	1,869	402,62	2,069	5,18 μ
0,01	2,175	480,37	2,069	5,18 μ

Apesar da Tabela 9 também mostrar o efeito da variação paramétrica de ε_{tol} , é a Tabela 10 que deixa explícita a importância de se definir corretamente o parâmetro. Pelos resultados da tabela, fica claro que quanto menor a tolerância, maior a proximidade dos parâmetros simulados aos fornecidos pelo *datasheet*. Uma tolerância de 1W entre o valor de potência simulado e catalogado exerce sobre a tensão e corrente de potência máxima um diferença de aproximadamente 5%. Logicamente, ao diminuir-se essa tolerância, os mesmos parâmetros tendem a se aproximar – para uma diferença de 10mW entre a potência simulada e catalogada, corrente e tensão de potência máxima calculada difere em apenas 0,5% dos valores fornecidos pelo fabricante.

Tabela 10 – Influência de ε_{tol} sobre os resultados de simulação do módulo

ε_{tol}	$P_{mpp,m}(W)$	$V_{mpp,m}(V)$	$I_{mpp,m}(A)$	$P_{mpp,n}(W)$	$V_{mpp,n}(V)$	$I_{mpp,n}(A)$	$\Delta P(\%)$	$\Delta V(\%)$	$\Delta I(\%)$
1	85,997	50,371	1,707				1,17%	5,38%	4,10%
0,5	85,499	49,48	1,727				0,59%	3,51%	2,98%
0,1	85,099	48,59	1,751	85	47,8	1,78	0,12%	1,65%	1,63%
0,05	85,049	48,34	1,759				0,06%	1,13%	1,18%
0,01	85,009	47,95	1,772				0,01%	0,31%	0,45%

A Figura 22 ajuda a visualizar melhor os efeitos que a variação de ε_{tol} exerce sobre o funcionamento do painel. Percebe-se que a diminuição da tolerância deslocou a curva para esquerda e mudou a concavidade da mesma. A Figura 23 ilustra a energia gerada para diferentes tolerâncias.

Figura 22 - Variação do comportamento do módulo com a variação paramétrica de ε_{tol}

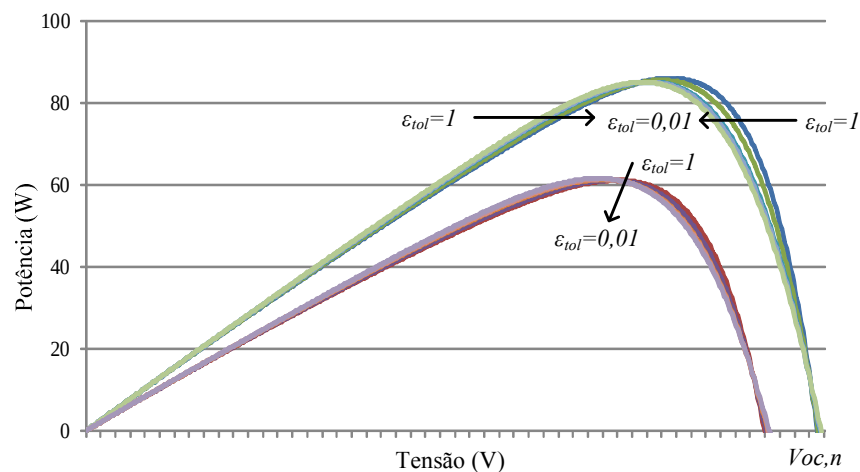
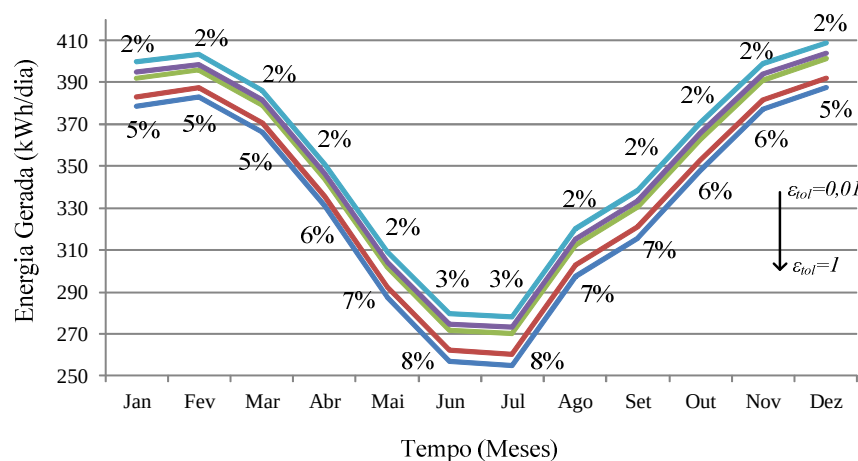


Figura 23 - Efeito da variação paramétrica de “ ε_{tol} ” sobre a energia gerada



Fonte: do autor.

Entre os extremos de tolerância, há uma diferença de 8%, se considerarmos apenas as tolerâncias menores que 100mW, essa diferença cai para 2%. Apesar de ε_{tol} afetar consideravelmente o comportamento do painel e a potência gerada, ele é um parâmetro fácil de ser dimensionado: é só utilizar valores de ε_{tol} os mais baixos possíveis.

Assim encerra-se o estudo da variação paramétrica do *software*. Na sequência será feito um exemplo de como serão encontrados os parâmetros para um módulo, além da conclusão do capítulo.

3.7 EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE

Nesta seção será realizado um exemplo de utilização do programa de simulação numérica desenvolvido, onde serão demonstrados os passos necessários para se obter os parâmetros do SDM a partir dos parâmetros do *datasheet*. O módulo escolhido para teste foi o U-EA 120, da KANEKA. Esse painel é feito da tecnologia μ -Si, e possui as seguintes especificações técnicas, de acordo com a Tabela 11.

Tabela 11 – Dados de catálogo do módulo U-EA 120

Fabricante	KANEKA
Modelo	U-EA 120
$V_{oc,n}$	71V
$I_{sc,n}$	2,6A
P_{mpp} STC	120W
V_{mpp} STC	55V
I_{mpp} STC	2,18A
P_{mpp} NOCT	89,3W
V_{mpp} NOCT	50,2V
I_{mpp} NOCT	1,78A
N_{cell}	53 em série / 2 em paralelo
K_V	-0,39%/K
K_I	0,056%/K

Esse módulo tem uma configuração de células diferente do usual: ao invés de apenas associação série, ele possui associação mista. Por isso os parâmetros necessitam de uma reconfiguração antes da simulação. O módulo possui ao todo 106 células, porém, a configuração dele é como se fossem dois painéis de 53 células em paralelo. Logo, será simulado um painel com 53 células em série, com os seguintes parâmetros:

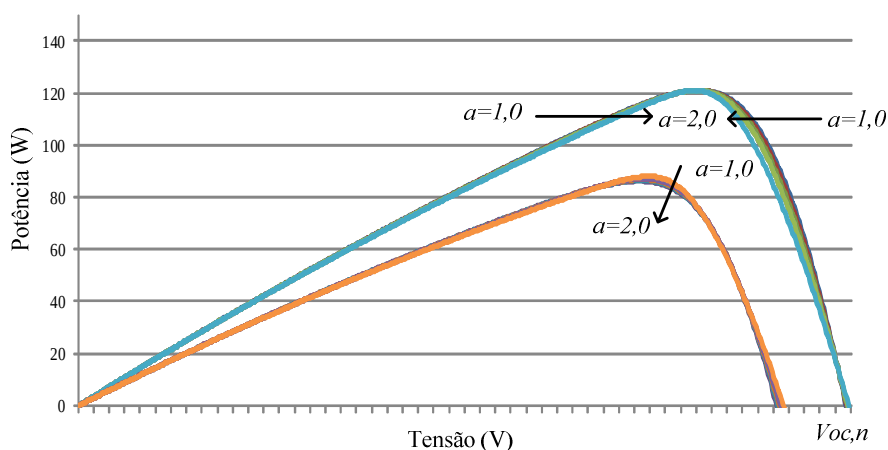
Tabela 12 – Reconfiguração do painel U-EA 120

Fabricante	KANEKA
Modelo	U-EA 120

$V_{oc,n}$	71V
$I_{sc,n}$	1,3A
P_{mpp} STC	60W
V_{mpp} STC	55V
I_{mpp} STC	1,09A
P_{mpp} NOCT	44,65W
V_{mpp} NOCT	50,2V
I_{mpp} NOCT	0,89A
N_s	53 em série
K_V	-0,39%/K
K_I	0,056%/K

Percebe-se que a tensão de circuito aberto e de máxima potência continuam as mesmas, enquanto que a corrente se divide pela metade. Os coeficientes de temperatura não mudam. A tolerância escolhida foi 0,5W, e o passo foi $n_v=500$. Foi escolhido um passo de 0,5W por causa de convergência. Logo, o parâmetro de ajuste fino será a constante de idealidade “ a ”. Na Figura 24 estão as curvas do módulo para diferentes valores de “ a ” para dois módulos em paralelo.

Figura 24 – Comportamento do módulo com a variação de “ a ”



Fonte: do autor.

O comportamento é similar para toda a variação paramétrica de “ a ”. A curva que melhor se adequa aos valores de *datasheet* é a que melhor se aproxima dos valores P_{mpp} , V_{mpp} e I_{mpp} para dois pontos distintos: STC e NOCT. Na tabela abaixo estão os resultados de simulação com esses valores:

Tabela 13 – Resultados de simulação – Módulo U-EA 120

	STC			NOCT		
a	$P_{mpp}(W)$	$V_{mpp}(V)$	$I_{mpp}(A)$	$P_{mpp}(W)$	$V_{mpp}(V)$	$I_{mpp}(A)$
1,0	120,991	56,61	2,152	87,99	52,25	1,6838
1,2	120,998	56,65	2,134	87,604	52,11	1,681
1,4	120,997	56,8	2,13	87,22	51,92	1,6784
1,6	120,998	56,8	2,13	86,88	51,83	1,6762
1,8	120,998	56,94	2,124	86,54	51,54	1,679
2,0	121	56,94	2,124	86,55	51,54	1,679

<i>datasheet STC</i>			<i>datasheet NOCT</i>		
dP(%)	dV(%)	dI(%)	dP(%)	dV(%)	dI(%)
0,83%	2,93%	1,28%	1,47%	4,08%	5,40%
0,83%	3,00%	2,11%	1,90%	3,80%	5,56%
0,83%	3,27%	2,29%	2,33%	3,43%	5,71%
0,83%	3,27%	2,29%	2,71%	3,25%	5,83%
0,83%	3,53%	2,57%	3,09%	2,67%	5,67%
0,83%	3,53%	2,57%	3,08%	2,67%	5,67%

Com o aumento do valor da constante de idealidade do diodo, a diferença entre a potência gerada e a nominal no NOCT tende a aumentar. Já a tensão de máxima potência tem tendência contrária, diminuindo com o aumento de “ a ”. Como o *software* tem a finalidade de simular o comportamento do módulo para se estimar a energia gerada, a proximidade entre a potência calculada e catalogada vem a ser o fator de maior importância. Logo, os parâmetros de SDM para o módulo ficam:

Tabela 14 – Parâmetros do SDM

I_{pv}	1,34A
I_0	$2,95 \times 10^{-23} A$
a	1
R_s	8,48 Ω
R_p	266,15 Ω

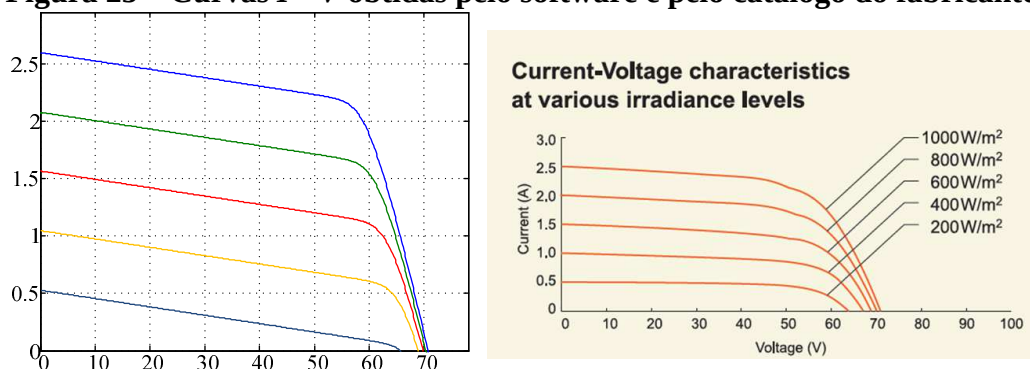
3.8 PROBLEMAS ENCONTRADOS

Alguns problemas foram encontrados no decorrer do estudo dos painéis, nesta seção serão citados os principais. O primeiro problema encontrado, e que será novamente relatado no decorrer do projeto, é a ausência de dados dos fabricantes - alguns *datasheets* não possuem dados para o NOCT, nem a quantidade de células série e paralelo.

Alguns problemas também foram observados em relação ao *software*, como por exemplo, problemas de convergência: dependendo a tolerância ε_{tol} imposta, o programa não converge. Porém, a tolerância deve ser da ordem de dezenas de mW para que o problema comece a acontecer, e depende dos parâmetros do *datasheet*, como por exemplo tensão de circuito aberto, corrente de curto circuito e máxima potência.

O último problema relatado foi que, para alguns modelos estudados, a curva $I \times V$ ficou fora do estimado pelo fabricante, como pode ser visto na Figura 25, que é a curva $I \times V$ do caso estudado na seção anterior.

Figura 25 – Curvas $I \times V$ obtidas pelo software e pelo catálogo do fabricante.



Fonte: do autor.

Neste caso, a discrepância entre as duas curvas ocorrem devido a dois fatores: o modelo não considera a variação da resistência série em função da irradiação – como é perceptível na curva catalogada e obteve um valor para resistência série diferente. Porém, o modelo obteve com exatidão a energia gerada em dois pontos de operação diferentes: STC e NOCT. Como nesse projeto o importante é a energia máxima gerada

para cada condição de operação, esse problema acaba não surtindo tanto efeito. A diferença entre a potência fornecida pelo *datasheet* e a obtida via simulação foi de 0,1% para o STC e 2,8% para o NOCT.

3.9 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Assim conclui-se a análise do *software* desenvolvido. Neste capítulo foi demonstrada toda a teoria matemática do método utilizado, assim como os passos seguidos para o desenvolvimento, teste e configuração do *software*. Apesar dos problemas descritos, os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, uma vez que o objetivo do software é estimar, através de apenas dois pontos, o comportamento do painel para todo o range de operação. Para trabalhos futuros, ou caso seja necessário um modelo mais próximo da realidade, outros modelos, como o *Sandia Model* [28] podem ser uma boa alternativa ao modelo proposto nesse projeto.

O estudo do modelo matemático foi realizado a fim de simular o comportamento do módulo com a variação da temperatura e da irradiação solar. No próximo capítulo os módulos serão analisados. Esse estudo consiste na simulação de cada painel a diferentes condições meteorológicas, a fim de definir quais as tecnologias que mantêm uma melhor geração para essas variações.

4 SIMULAÇÃO DA ENERGIA GERADA PARA OS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS ESTUDADOS.

Foi apresentada no primeiro capítulo a análise teórica do método proposto para a simulação da energia gerada pelos módulos fotovoltaicos. Neste capítulo será feito o estudo de cada painel escolhido, que consiste no cálculo dos parâmetros físicos e da energia gerada. Num primeiro momento serão mostrados quais os painéis escolhidos, seguido pela definição de qual espectro de irradiação e temperatura que será utilizado nas simulações. Por fim, para cada módulo será criada uma tabela, onde estarão descritos todos parâmetros do modelo matemático relevantes para a comparação entre as tecnologias, além de dados econômicos, como peso, preço e rendimento.

A Tabela 15 apresenta os modelos, tecnologias e fabricantes dos módulos que serão avaliados.

Tabela 15 – Módulos pesquisados

Tecnologia	Modelo	Fabricante
a-Si	PROTECT ASI	SCHOTT
	NA-142H5	SHARP
CdTe	CX-3	CALYXO
	FS-277	FIRST SOLAR
	FS-390	FIRST SOLAR
CiGS	PowerFLEX – 300W	GLOBAL SOLAR
	MS140GG	MIASOLÉ
	Q.Smart UF L 115	Q.CELLS
	STN-140	STION
CiS	PowerMax Smart	AVANCIS
	PowerMax Strong	AVANCIS
	SF160-s	SOLAR FRONTIER
μ -Si	μ m-Si Plus 130	BOSCH

μ -Si	U-SA110	KANEKA
	NA-F135GK	SHARP
HIT	HIT Power 225A	SANYO
Translúcido	BB132A05	BEYOND-PV
Multi-junção a-Si	PowerBond ePVL	UNI-SOLAR
Artsun mono-Si	OP-315-72	SUNIVA

No total foram escolhidos 19 diferentes módulos, abrangendo as tecnologias de silício amorfo, painéis de CdTe, CiGS e CiS, micro-silício, painéis translúcidos e módulos com células multi-junções. Além disso, foram escolhidos dois[módulos de silício com tecnologia exclusiva de uma empresa – a HIT, da SANYO, e a ARTSUN mono-Si, da SUNIVA.

Algumas tecnologias, como por exemplo, a de concentradores, não será estudada pois não há a comercialização desses módulos para potências de 6kWp. É interessante o fato de que houve uma grande quantidade de tecnologias criadas após o ano de 2000, com grandes investimentos e promessa de prosperidade no médio prazo. Porém, o que aconteceu foi a bancarrota de diversos fabricantes de tecnologia não usual. Pode-se citar aqui a SOLYNDRA, fundada em 2005 e fechada em 2011, que possuía tecnologia própria de painéis cilíndricos de CiGS. Ela quebrou por causa da queda do preço do silício, que fez com que a empresa não conseguisse competir com os painéis mais usuais. Outra empresa que veio a falência foi a KONARKA, aberta em 2001 e fechada em 2008, que apostou nas células orgânicas para conquistar uma parcela do mercado. O rendimento das células era muito baixo, próximo a 2%, e em 2008 ela parou suas atividades. E a lista não termina, a Forbes lançou uma matéria no dia 9 de abril de 2013, listando as empresas no setor de energia fotovoltaica que vieram à falência desde 2009. O pico ocorreu em 2012, quando 39 empresas ou terminaram as atividades, ou mudaram de ramo ou foram vendidas. Não é surpresa que a maioria das empresas fechadas são fabricantes de painéis de filmes finos: com a entrada maciça de chineses no mercado e a baixa no preço do silício, o preço dos painéis de silício cristalino inviabilizaram o crescimento de diversas tecnologias. Até o lançamento da matéria, três empresas já tinham parado suas atividades em 2013, a BOSCH, que desistiu do mercado de silício cristalino, a CONCENTRATOR OPTICS, de CPV e a SUNTECH WUXI, por falência [37].

Durante este projeto, muito provavelmente alguns dos fabricantes cujos painéis foram estudados ou faliram ou foram vendidos. O mercado solar, não só de filmes finos, passa por um momento que a PVTECH chama de “*Solar Shakeout*” [38]: há excesso de fabricantes no mercado, os preços estão em queda brusca, sumindo com as margens de lucro dos investidores, levando a falência de diversos fabricantes.

Mas todo esse ambiente já era esperado: o mercado de energia solar estava aquecido até pouco tempo atrás, com diversos investimentos de risco. O que simplesmente está ocorrendo agora é a consolidação das tecnologias e dos fabricantes mais bem preparados e com melhores preços.

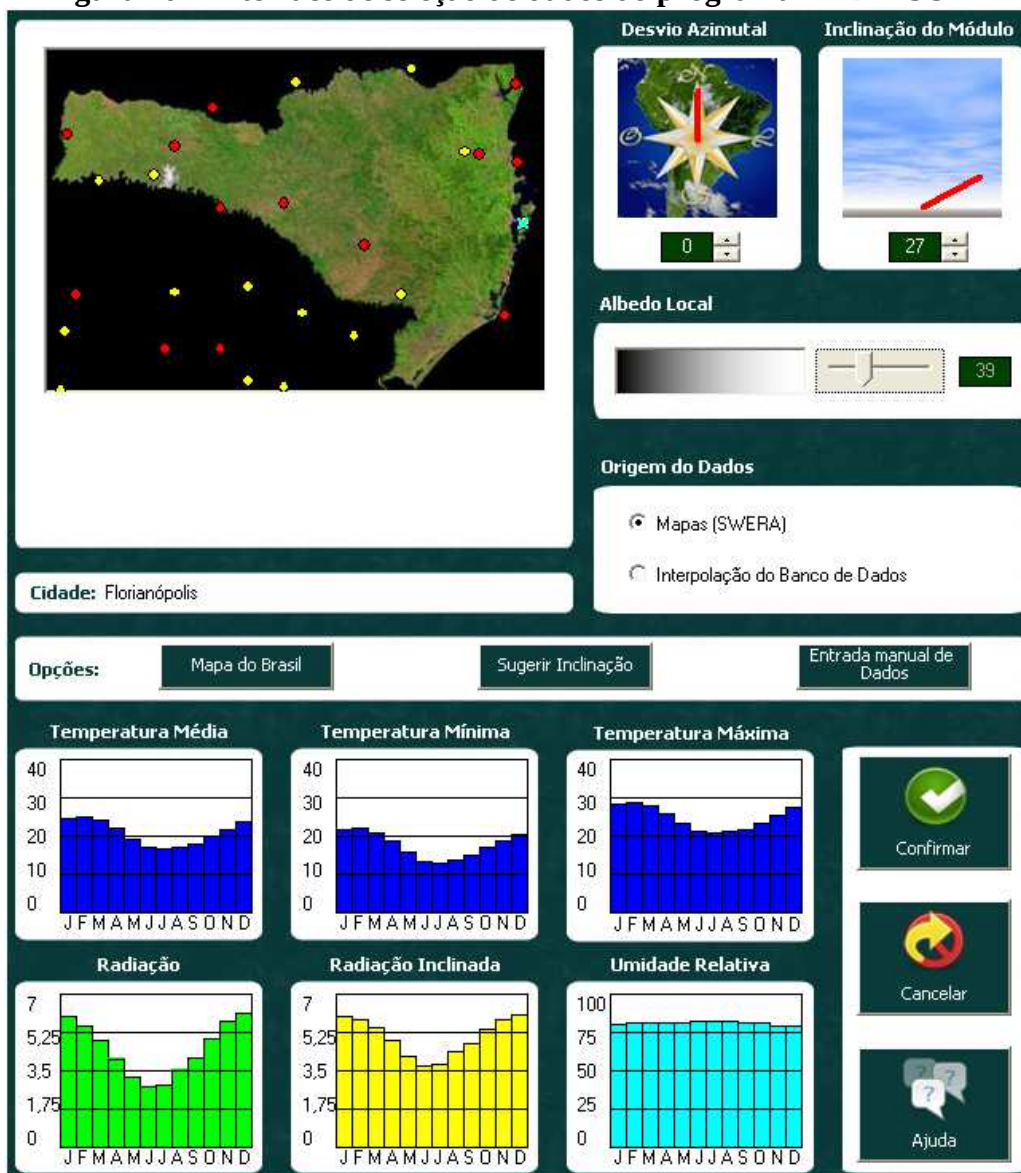
Mas voltando ao objetivo inicial, todos os painéis listados na Tabela 15 são ou de tecnologias alternativas ou silício cristalino, ou de tecnologias privadas, pertencentes a uma única empresa. Na próxima seção, será definido o espectro solar com o qual serão realizadas as simulações.

4.1 AQUISIÇÃO DOS PARÂMETROS METEOROLÓGICOS

Os dados meteorológicos que são necessários para a simulação do funcionamento do painel são dois: a irradiação solar (W/m^2) e a temperatura ($^{\circ}\text{C}$). Para obter-se a irradiação solar utilizou-se o programa RADIASOL 2, desenvolvido por *Krezing, et al*, na UFRGS. O programa estima a partir de dados obtidos pelo projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assesment*) e interpolação, as curvas de irradiação diária de uma dada região.

O projeto SWERA consiste num programa financiado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e que tem por objetivo “promover o levantamento de dados confiáveis e de alta qualidade visando auxiliar o planejamento e desenvolvimento de políticas públicas de incentivo a projetos nacionais de energia solar e eólica” [39]. O *software* possui interface amigável, como pode ser visto na Figura 26.

Figura 26 – Interface de seleção de dados do programa RADIASOL 2



Fonte: programa RADIASOL 2.

Na Figura 26 já está selecionado o estado de Santa Catarina. Porém, o software possui dados de todo o Brasil. Alguns parâmetros precisam ser confirmados antes de gerar as curvas de irradiação. São eles: desvio azimutal, inclinação do módulo e albedo local.

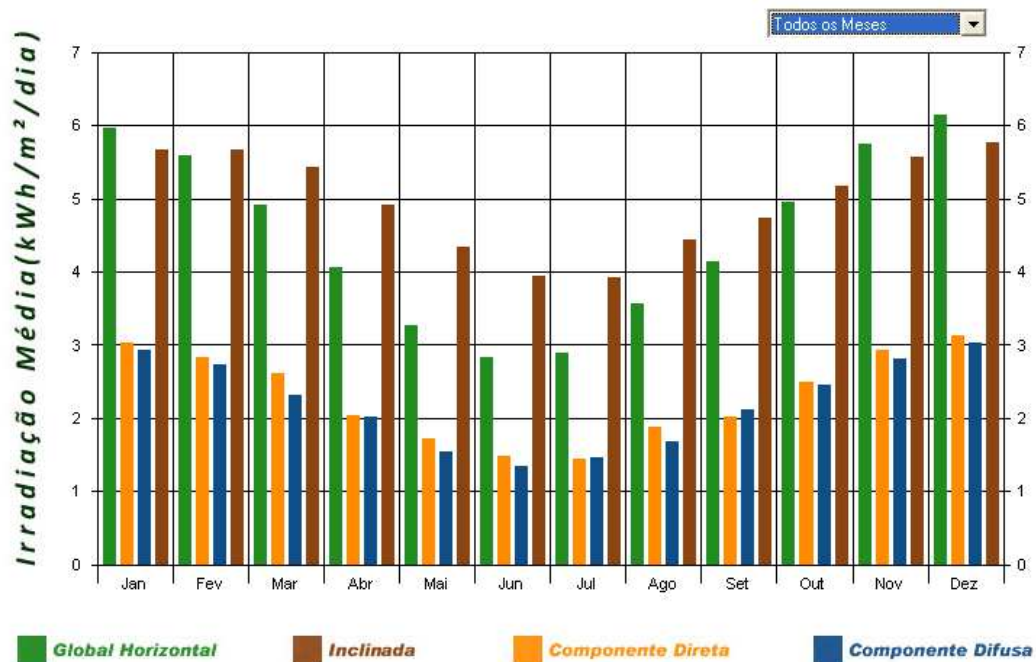
Como neste projeto se deseja estimar a máxima potência que o arranjo fotovoltaico poderá gerar, o painel tem que estar direcionado totalmente ao norte, com um ângulo de inclinação de 27°. Esses parâmetros geram a maior potência para painéis instalados no hemisfério sul da terra, conforme relatado em [40]. Já o albedo depende

das construções ao redor do local de instalação do painel, pois a radiação que incide sobre o painel é formada pela radiação direta e a que é refletida pelos objetos próximos. Em outras palavras, o albedo (ρ) é a razão entre a radiação refletida e a incidente na superfície da terra. Na tabela abaixo, estão os albedos típicos para diferentes superfícies (Iqbal, 1983):

Tabela 16 - Valores típicos de albedo	
Solo comum – terra marrom seca	0,2
Terra preta seca	0,13
Terra preta úmida	0,08
Gramma	0,15-0,30
Asfalto novo	0,09
Areia branca	0,6
Areia molhada	0,09
Neve fresca	0,8
Terra de barro (vermelha)	0,33
Telha de cimento-amianto nova	0,39
Telha de cimento amianto velha	0,25
Tijolo vermelho	0,32
Tinta branca	0,8

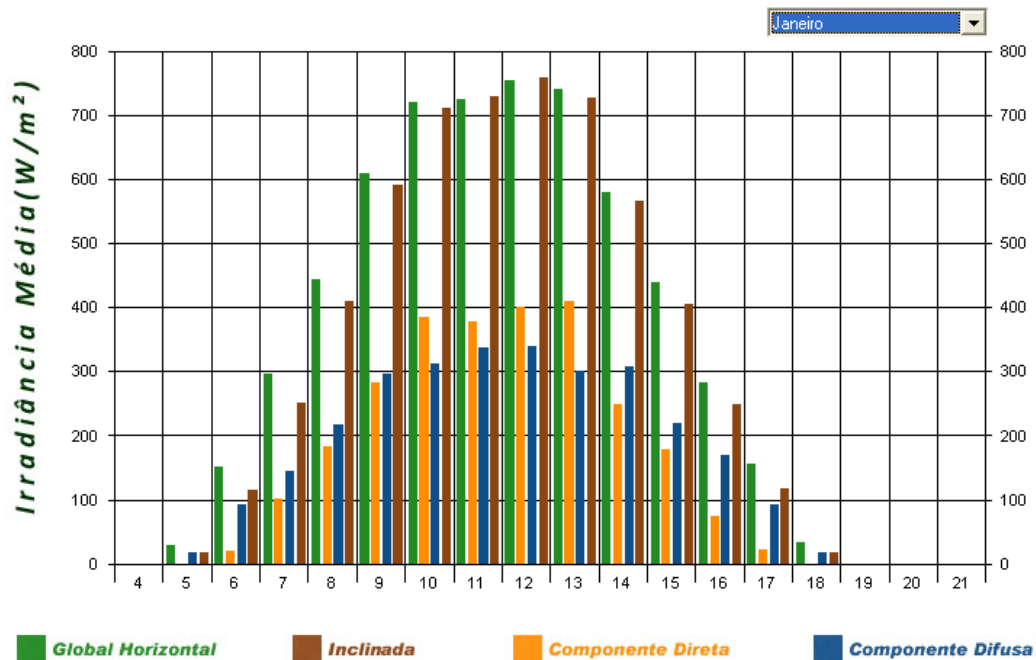
Considerando que a maioria dos painéis fotovoltaicos são instalados em cima de telhados, considerou-se um albedo de 0,39, que é para superfícies de telha de cimento-amianto nova. Na Figura 27 estão os dados de irradiação média diária para cada mês do ano obtidos com o *software*. Conforme descrito em [41], a superfície inclinada recebe a radiação direta do Sol e a radiação difusa, gerada pelos objetos próximos. Logo, será utilizada a curva “inclinada”. Na Figura 28 estão os dados de irradiação média por hora obtidos para o mês de janeiro, e na Figura 29 estão os mesmos dados obtidos para o mês de Junho. O *software* fornece dados para todos os meses, porém aqui só serão mostrados dois por efeito de comparação entre um dos meses de maior e menor incidência solar. Para simulação de desempenho, será estimada a geração em todos os meses do ano.

Figura 27 – Resultados para irradiação média mensal



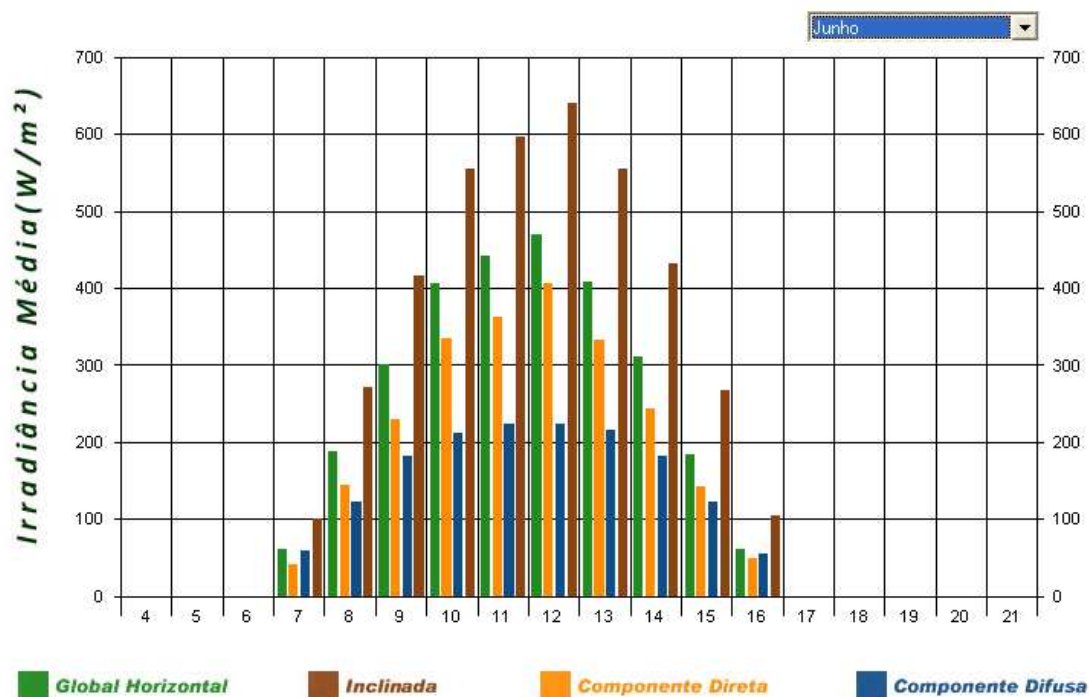
Fonte: programa RADIASOL 2.

Figura 28 – Resultados para irradiação média diária para o mês de Janeiro



Fonte: programa RADIASOL 2.

Figura 29 - Resultados para irradiação média diária para o mês de Junho



Fonte: programa RADIASOL 2.

Os valores de irradiação podem ser visto na Tabela 17.

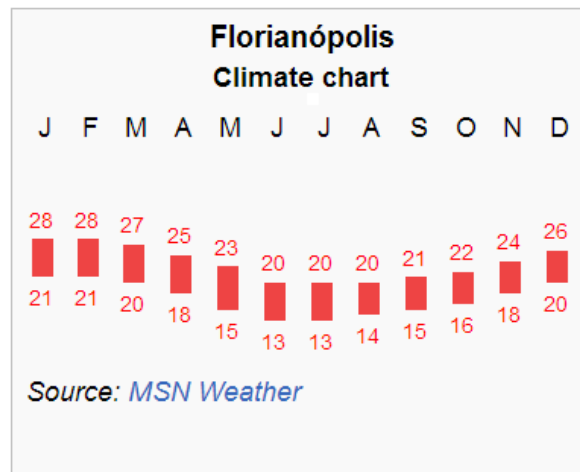
Tabela 17 – Irradiação Média (W/m^2) para o período das 4h às 19h

	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
Jan	0	29	147	312	444	563	670	776	763	703	596	481	294	149	33	0
Fev	0	10	134	260	422	567	656	765	738	659	555	432	264	111	13	0
Mar	0	0	66	213	366	511	617	698	693	621	500	349	217	70	0	0
Abr	0	0	22	134	293	458	575	589	579	537	429	279	149	26	0	0
Mai	0	0	3	93	213	365	437	518	521	451	344	224	90	5	0	0
Jun	0	0	0	60	184	318	398	452	443	411	303	194	68	0	0	0
Jul	0	0	0	77	178	311	436	470	481	384	295	188	72	0	0	0
Ago	0	0	12	123	260	374	501	516	531	472	395	252	110	15	0	0
Set	0	0	44	175	295	427	548	589	581	533	425	312	157	45	0	0
Out	0	3	94	228	391	499	612	654	636	612	494	379	244	100	4	0
Nov	0	21	136	296	463	552	697	708	735	676	577	438	301	131	25	0
Dez	0	37	158	318	494	579	725	767	744	760	558	493	297	177	42	0

Assim finaliza-se a entrada dos parâmetros de irradiação. Para cálculo da temperatura, utilizou-se a temperatura média mensal, isso porque as máximas e mínimas temperaturas médias de um mês não variam bruscamente, como pode ser visto na Figura 30.

Tabela 18 – Temperatura média mensal

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
T(°C)	25	25	24	22	19,5	17	16,5	17,5	18	20	22	24

Figura 30 – Temperaturas máximas e mínimas para a região de Florianópolis.**Fonte: MSN Weather.**

Porém, a temperatura na célula fotovoltaica não é a mesma que a temperatura ambiente: a equação (25) mostra uma relação entre a temperatura na célula fotovoltaica e a temperatura ambiente, em função da irradiação solar. T_{amb} é a temperatura ambiente, T_{NOCT} é a temperatura no ponto de operação NOCT, fornecida pelo fabricante (Normalmente 46°C). G é o nível de irradiação na superfície da célula.

$$T_{cell} = T_{amb} + \frac{G}{800} \cdot (T_{NOCT} - 20) \quad (25)$$

Assim termina-se a análise dos parâmetros meteorológicos necessários para o *software*. Para realizar o estudo dos módulos escolhidos, foram programados mais dois códigos em Matlab, que podem ser vistos nos Anexos III e IV, respectivamente. O anexo III é o programa responsável por criar as curvas $I \times V$ e $P \times V$, e o anexo IV mostra o programa responsável por calcular a energia gerada pelos módulos. Ambos os programas utilizam o método mostrado no capítulo 1 e por isso não serão explicados mais detalhadamente. Para cada painel será preenchido um formulário, onde estarão os parâmetros de *datasheet*, os parâmetros calculados, as curvas $I \times V$ e $P \times V$, além da curva de potência média mensal. Dificuldades encontradas também serão relatados no formulário.

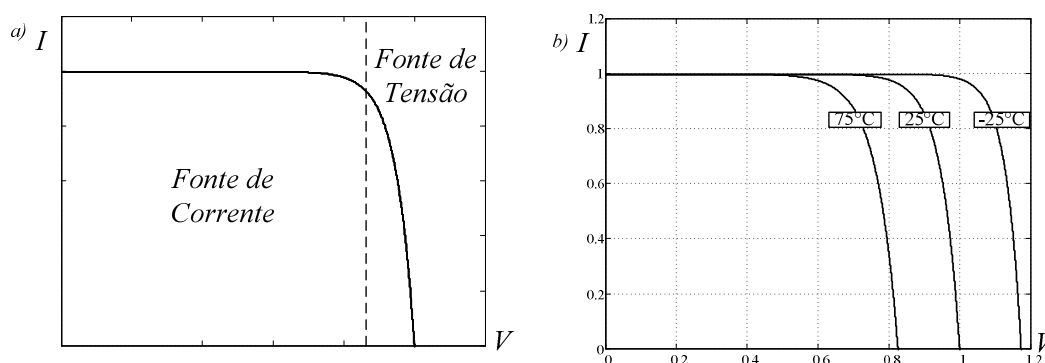
4.2 DADOS ECONÔMICOS E CONSIDERAÇÕES SOBRE O DATASHEET

Serão considerados dados econômicos as figuras de mérito que influenciam diretamente no preço final do painel. São eles: preço, área e peso unitário do módulo. A área e o peso estão relacionados com os custos de estrutura do arranjo fotovoltaico, e não serão o foco de estudo nem parâmetro relevante para escolha dos módulos fotovoltaicos.

Alguns fabricantes não fornecem dados de potência, tensão e corrente para as condições normais de operação (NOCT). Para estimar a potência gerada nesta condição, foram estimadas a variação da potência gerada a partir da variação da irradiação e da temperatura no módulo.

Sabe-se que o módulo fotovoltaico pode operar de duas formas: como fonte de corrente e fonte de tensão, como pode ser visto na Figura 31)a). Considerando que o ponto de máxima potência é o ponto de transição entre os dois modos de operação, a corrente de curto circuito terá pouca variação com a variação da temperatura, enquanto que a tensão de circuito aberto variará consideravelmente, como pode ser visto na Figura 31)b).

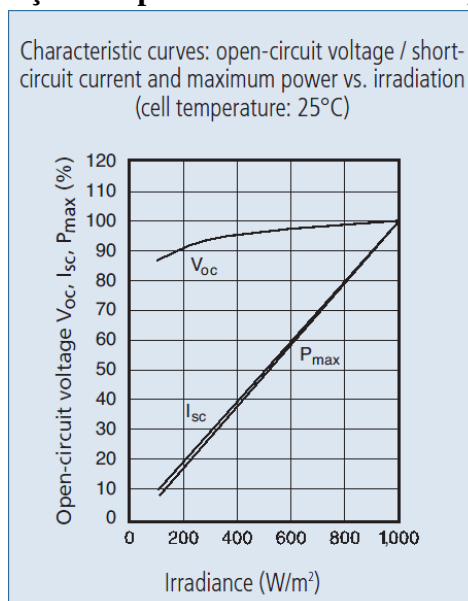
Figura 31 – Modos de operação de um módulo fotovoltaico. a) Modos de Operação. b) Comportamento do modelo com a variação de temperatura.



Fonte: do autor.

Assim pode-se assumir que a potência máxima varia linearmente com a variação da irradiação, uma vez que a variação da corrente de curto-circuito também possui variação linear. Isso pode ser visto na Figura 32.

Figura 32 – Variação dos parâmetros com a variação da irradiação



Fonte: catálogo do módulo NA135GK.

A Figura 32 está disponível no catálogo do módulo NA135GK, da SHARP. Percebe-se que, pelo fato de a tensão pouco variar com a irradiação, a potência segue uma tendência muito similar à corrente de curto circuito. Lembrando que este método de cálculo de variação é estimado.

O *datasheet* também fornece a variação da máxima potência em relação à temperatura: é o coeficiente de potência (K_P). Ele é dado em %/K, onde K = Kelvin. Logo, a potência na saída do módulo fotovoltaico pode ser corrigida através de (26).

$$P(G, T) = P_{mpp_{STC}} \cdot \frac{G}{G_n} + (K_P \cdot P_{mpp_{STC}} \cdot (T - T_{STC})) \quad (26)$$

Onde G é a irradiação e T a temperatura no painel. Assim é possível estimar a potência de saída de um módulo sem possuir os dados de *datasheet*. Os módulos que não possuírem dados no NOCT terão sua potência estimada através de (26).

O formulário dos módulos fornece a energia média gerada em um dia para dado painel. Tendo como dado de entrada a irradiação média por hora para certo mês, a energia gerada para cada hora pode ser escrita como a própria potência, já que para cada hora é calculado um novo valor de potência. Assim a energia gerada num dia é igual o somatório das potências de cada hora para o dia. Deixa-se claro que isto só é possível pois o intervalo de tempo de estudo é uma hora. ($E = P \cdot \Delta T$).

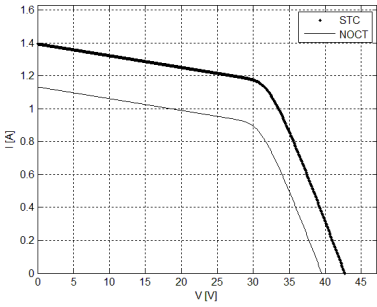
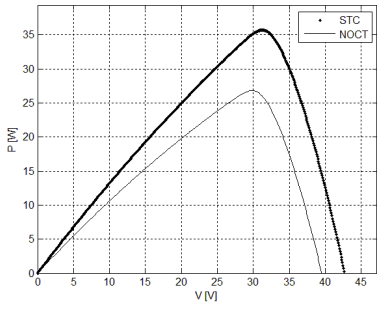
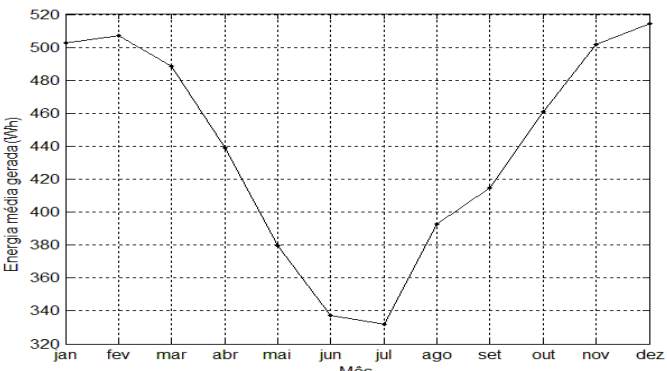
4.3 FORMULÁRIO

Os resultados obtidos via simulação dos módulos serão mostrados através de um formulário. Neste estarão contidos todos os parâmetros físicos obtidos, além dos dados fornecidos no catálogo do *datasheet*. Além disso, os valores de potência, tensão e corrente para o STC e NOCT fornecidos pelo fabricante e obtidos via simulação serão mostrados, além das curvas $I \times V$, $P \times V$ e energia média gerada por módulo. As duas primeiras foram obtidas através do código em Matlab disponível no Anexo III, e a terceira curva foi obtida através do código anexo IV. Ela é a soma das potências médias geradas por hora para um dado mês, com os valores de temperatura obtidos com a equação (25) e os valores de irradiação obtidos através da Tabela 17.

Os preços dos painéis mostrados nos formulários foram obtidos através de pesquisas na *internet*. Todos os valores foram pesquisados durante os dias 30 e 31 de Março de 2013, e os *links* com os preços estão disponíveis no anexo V.

A tabela 19 mostra o formulário resultante da simulação. As demais tabelas podem ser visualizadas no Anexo VI.

Tabela 19 – Formulário do módulo PROTECT ASI

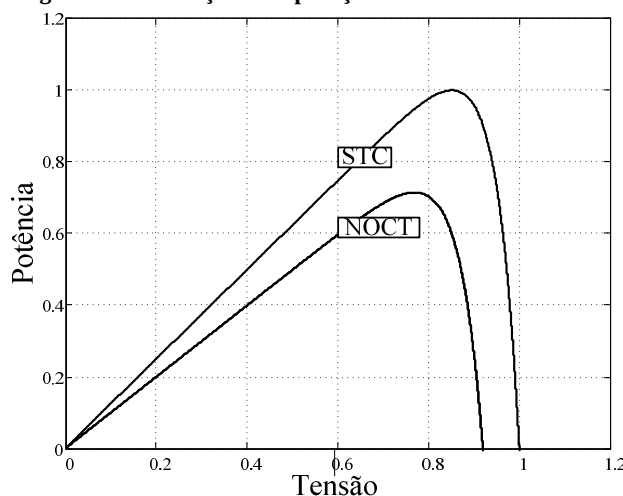
Tecn: a-Si		Modelo: PROTECT ASI		Fabricante: SCHOTT SOLAR						
I × V 		datasheet		Simulação						
		V _{oc,n} (V)		42,8		V _{oc,n} (V)		42,8		
		I _{sc,n} (A)		4,18		I _{sc,n} (A)		4,2		
		STC	P _{mpp} (W)		107		P _{mpp} (W)		107,1	
			V _{mpp} (V)		30,6		V _{mpp} (V)		31,2	
			I _{mpp} (A)		3,44		I _{mpp} (A)		3,42	
		NOCT	P _{mpp} (W)		81,9		P _{mpp} (W)		80,4	
			V _{mpp} (V)		28,7		V _{mpp} (V)		29,8	
			I _{mpp} (A)		2,85		I _{mpp} (A)		2,67	
		P × V 		N _s		3 × 24		N _s		3 × 24
K _V (%/K)				-0,33						
K _I (%/K)				0,08						
Dados Econômicos:				Parâmetros SDM						
Preço:				U\$265,00		R _p (Ω)		131,77		
Peso:				21kg		R _s (Ω)		8,01		
Área:				1,45m ²		a		1,0		
η:				7,38%		I _{pv} (A)		1,48		
						I ₀ (A)		9,9 × 10 ⁻³¹		
Energia Média Gerada:										
										

Observações:

Apesar de outros autores não garantirem o modelo *SDM* para painéis de silício amorfo, os resultados de simulação ficaram próximos dos de *datasheet* para todo o STC e NOCT.

Assim encerra-se o capítulo de simulação dos painéis fotovoltaicos. Percebe-se que, principalmente por motivos construtivos, muitos fabricantes não fornecem o número de células no arranjo do módulo. Esse problema foi contornado através do ajuste entre os dois pontos de máxima potência usualmente fornecidos pelos fabricantes - o STC e o NOCT, que podem ser vistos na figura abaixo, os parâmetros “ a ”, “ N_s ” e foram ajustados para que os valores de máxima potência obtidos em simulação fossem os mais próximos possíveis dos valores fornecidos pelo catálogo. Já alguns fabricantes não fornecem de forma direta os dados elétricos no NOCT, assim através da equação (26) foi possível obter uma estimativa da potência neste ponto.

Figura 33 – Condições de operação do módulo fotovoltaico



Fonte: autor.

Os painéis de silício amorfo e de micro-silício foram os que menos se aproximam do modelo matemático utilizado, pois as curvas ficaram diferentes do esperado pelo *datasheet*. Isso se deve ao fato do modelo ser aproximado para silício cristalino, que não é a tecnologia estudada nestes casos. Apesar das discrepâncias entre as curvas $I \times V$ e $P \times V$, os valores de máxima potência obtidos foram similares aos fornecidos pelos *datasheets*. Os problemas podem ser melhor compreendidos na seção 2.8.

O módulo PowerBond ePVL, da UNI-SOLAR, ficou com uma diferença de 10W entre a potência no NOCT fornecida pelo fabricante, simulada e calculada. Porém, o próprio fabricante garante uma variação de 5 a 10% da potência de catálogo.

As potências de saída dos módulos simulados se aproximaram das potências fornecidas no *datasheet*, assim como a tensão e corrente nesses pontos de operação, o que mostra que o modelo matemático *SDM* pode ser utilizado para simular módulos de outras tecnologias que não utilizam silício em sua composição.

5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Neste capítulo será feita a comparação entre os módulos simulados anteriormente. Primeiramente serão definidos os critérios de comparação, seguido pela comparação propriamente dita. Como definido no projeto inicial, serão seis os módulos escolhidos para o projeto da planta experimental: 1kWp para cada módulo, totalizando 6kWp de painéis instalados. Eles serão escolhidos através de três critérios: técnico, econômico e construtivo. Cada critério gerará um coeficiente, os quais serão somados para assim definir quais as melhores tecnologias a serem instaladas na planta experimental.

O critério técnico é o responsável por definir qual dos módulos entre as tecnologias gerará mais energia e terá menos variação da energia gerada com a variação da temperatura e irradiação. Isso será feito através de dois coeficientes. O primeiro coeficiente é a média das potências máximas geradas para cada mês estudado. E pode ser definido de acordo com a equação (27):

$$K_{T_1} = \frac{\sum_{\text{mês=janeiro}}^{\text{dezembro}} P_{mpp}(\text{mês})}{12 \cdot P_{mppSTC}} \quad (27)$$

Onde:

K_{T_1} – Coeficiente técnico 1;

P_{mppSTC} – Potência máxima na condição de operação padrão (STC);

$P_{mpp}(\text{mês})$ – Potência máxima média para um dado mês;

Esse coeficiente explicita a máxima potência que o módulo poderá fornecer na saída da planta, para um dado horário. Se o coeficiente for maior, significa que o painel fornece uma potência maior na saída. A equação (27) é a razão entre a média das potências máximas mensais com a potência máxima de saída do painel fotovoltaico. Essa razão se torna necessária pois não é possível ter exatos 1kWp

instalados para cada tecnologia. Por exemplo, o painel OP315-72 da SUNIVA possui 315Wp, logo, serão necessários 3 módulos, totalizando 945Wp, ao invés dos 1kWp de projeto.

Este coeficiente pode variar de 0 a 1, sendo que 1 significa que a média das potências máximas mensais é igual à potência máxima do painel, o que não ocorrerá em nenhum dos casos.

A equação (28) é a média da energia gerada para um dado mês. Já a equação (29) é a média anual das energias calculadas através da equação (28):

$$\bar{E}_{gerada_mês} = \frac{\sum_{hora=0}^{24} P_{mpp}(hora)}{24} \quad (28)$$

Como a potência difere de módulo para módulo, comparar a energia sem as parametrizar gerará um resultado incorreto. Por exemplo, um painel de 200Wp gerará mais energia que um painel de 100Wp, mas isso não significa que se tivermos 1000Wp instalados de cada tecnologia de módulo o de maior potência gerará mais energia. A parametrização é feita com a equação (29):

$$E_{gerada_ANO} = \frac{\sum_{mês=janeiro}^{dezembro} E_{gerada}(mês) \cdot 1kWp}{12 \cdot P_{mpp_{STC}}} \quad (29)$$

O segundo coeficiente será a energia encontrada através da equação (29) dividida pela energia base. Esse fator serve apenas para fazer com que a energia varie entre 0 e 1. O coeficiente é descrito através da equação (30):

$$K_{T_2} = \frac{\bar{E}_{gerada}(mês)}{1kWh} \quad (30)$$

Onde K_{T_2} - Coeficiente técnico 2.

O coeficiente técnico K_T pode ser definido então através da equação (31) como sendo a soma dos dois coeficientes anteriores. Os coeficientes K_{T_1} e K_{T_2} também terão que ser normalizados em relação ao maior valor obtido, para que ambos tenham o mesmo peso quando somados.

$$K_T = K_{T_1_par} + K_{T_2_par} \quad (31)$$

Através desses dois coeficientes o autor almejou comparar duas características do painel: a sua capacidade máxima de gerar potência na saída do módulo, para uma dada potência instalada, e a energia média que o painel entregará à rede por ano.

Os critérios econômicos basicamente se limitam ao preço do módulo. Ao invés do preço total, optou-se aqui pelo preço por watt instalado. A equação (32) mostra o coeficiente econômico utilizado:

$$K_E = 1 - \frac{\text{Preço}_{\text{US}}}{P_{\text{mpp}_{\text{STC}}} \cdot 10} \quad (32)$$

O preço por Watt foi dividido por 10 para que varie no máximo até 1, fazendo assim que K_E varie entre 0 e 1, e que, quanto menor o preço do módulo, maior o coeficiente econômico. O preço dos painéis foram pesquisados na *internet*, no período de 30 a 31 de março de 2013. Os links dos sites utilizados estão mostrados no anexo VI. Como o preço do dólar e do euro pode variar muito de mês para mês, optou-se por utilizar somente valores em dólar.

A área e o peso dos painéis não possuem a mesma importância que a energia gerada e o preço para este projeto, pelo motivo de não se saber o local e a forma na qual serão instalados os painéis. Apesar desses dois parâmetros não serem o foco, eles tem grande importância, pois definem o tamanho do terreno necessário, além do peso que toda a estrutura terá que aguentar.

Neste projeto a caracterização da área e peso dos painéis foi feita de forma diferente da caracterização da energia gerada e do preço – os dois últimos parâmetros foram tabelados, de acordo com a Tabela 20. Somados, eles formam o coeficiente K_C . A ponderação dos coeficientes pode ser vista na seção 5.1. O coeficiente K_C é a soma dos dois coeficientes - K_S e K_{Wt} . Conforme a Tabela 38.

Tabela 20 – Tabela de Coeficientes de área e peso.

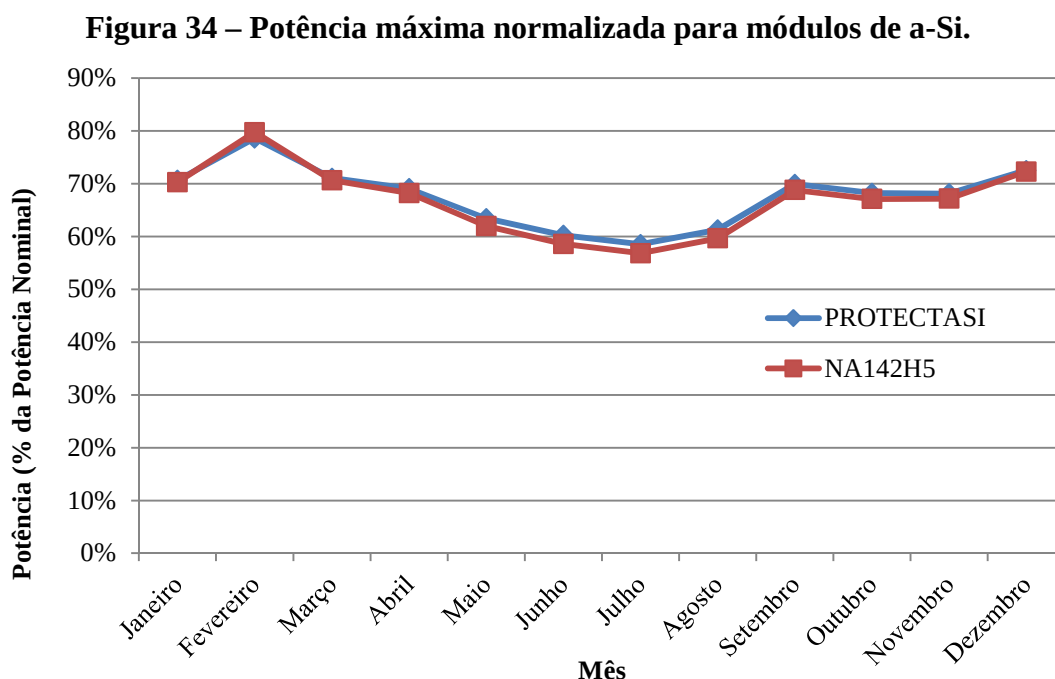
K_S – Coeficiente de Área		K_{Wt} – Coeficiente de Peso	
$S \leq 6\text{m}^2$	0,5	$Wt \leq 50\text{kg}$	0,5
$6\text{m}^2 < S \leq 8\text{m}^2$	0,4	$50\text{kg} < Wt \leq 80\text{kg}$	0,4
$8\text{m}^2 < S \leq 10\text{m}^2$	0,3	$80\text{kg} < Wt \leq 120\text{kg}$	0,3
$10\text{m}^2 < S \leq 12\text{m}^2$	0,2	$120\text{kg} < Wt \leq 180\text{kg}$	0,2
$12\text{m}^2 \leq S$	0,1	$180\text{kg} \leq Wt$	0,1

O peso dos coeficientes, assim como os intervalos, foram definidos pelo autor. Eles podem ser modificados de acordo com a necessidade de projeto. Como na planta proposta não foi levado em consideração a área e a estrutura necessária, ficou estipulado o peso do coeficiente de área e peso com pesos iguais.

Serão esses os coeficientes utilizados para comparação dos módulos. No decorrer do capítulo será feito o cálculo dos coeficientes de cada painel separadamente, e por fim será realizada a comparação em conjunto, para se definir quais módulos são mais vantajosos para a aplicação.

5.1.1 COEFICIENTES PARA OS PAINÉIS DE SILÍCIO AMORFO

A Figura 34 mostra a média mensal da potência máxima gerada para os painéis de silício amorfo estudados. Os valores foram obtidos através do código em Matlab disponível no Anexo IV. As potências estão em porcentagem – isso significa que, por exemplo para o mês de fevereiro, os módulos conseguem fornecer aproximadamente 80% da potência nominal (P_{mppSTC}) na saída do painel.



Fonte: do autor.

Os coeficientes K_{TI} obtidos para os dois painéis fora:

$$K_{T1_PROTECTASI} = 0,677$$

$$K_{T1_NA142H5} = 0,668$$

Como pode ser visto na figura acima, o painel PROTECT ASI, da SCHOTT fornece um pouco mais de potência para os meses de inverno, o que fez o coeficiente K_{T1} ser levemente maior. A Figura 35 e a Figura 36 mostra a energia gerada para os meses de Janeiro e Julho. Elas foram geradas a partir do código disponível no anexo IV.

Figura 35 – Potência gerada por hora para o mês de Janeiro

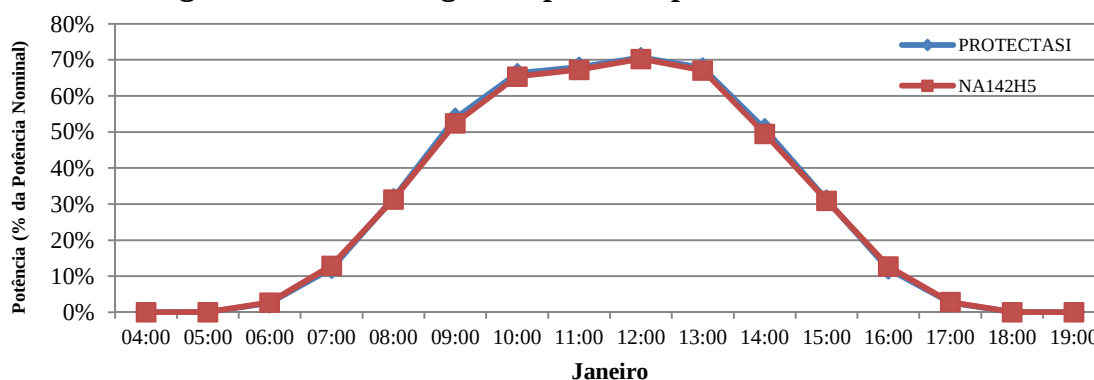
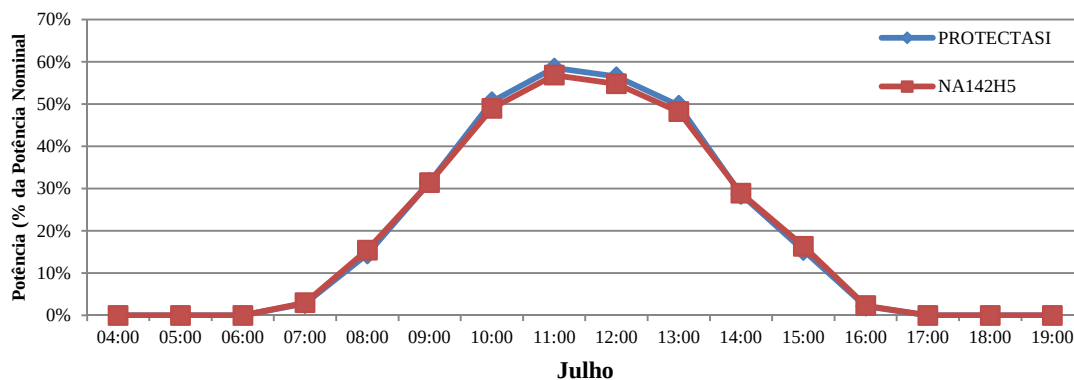


Figura 36 - Potência gerada por hora para o mês de Janeiro



Fonte: do autor.

A amostragem dos dados começam às quatro horas da manhã e terminam às dezenove horas. Os valores também estão em porcentagem da potência nominal. Percebe-se que em ambos os casos os módulos se comportam de maneira muito similar. Foram escolhidos apenas esses dois meses por demonstração do comportamento do painel durante o ano. Nas tabelas abaixo estão os resultados para todos os meses do ano. A hora de maior potência é sempre meio dia.

Tabela 21 – Potência de Saída – PROTECT ASI

	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0%	0%	3%	12%	32%	54%	66%	68%	71%	68%	51%	31%	12%	3%	0%	0%
fev	0%	0%	2%	9%	36%	49%	63%	73%	79%	68%	48%	34%	13%	2%	0%	0%
mar	0%	0%	1%	11%	34%	54%	65%	71%	67%	66%	52%	26%	9%	1%	0%	0%
abr	0%	0%	0%	6%	23%	46%	62%	68%	69%	66%	42%	22%	6%	0%	0%	0%
mai	0%	0%	0%	4%	17%	37%	54%	63%	62%	56%	36%	22%	4%	0%	0%	0%
jun	0%	0%	0%	2%	14%	32%	50%	55%	60%	50%	35%	14%	2%	0%	0%	0%
jul	0%	0%	0%	3%	14%	31%	51%	59%	56%	50%	29%	15%	2%	0%	0%	0%
ago	0%	0%	0%	5%	19%	43%	61%	58%	61%	54%	42%	20%	4%	0%	0%	0%
set	0%	0%	0%	6%	17%	48%	50%	69%	70%	57%	45%	19%	6%	0%	0%	0%
out	0%	0%	1%	8%	28%	46%	67%	67%	68%	60%	49%	27%	8%	1%	0%	0%
nov	0%	0%	2%	12%	32%	57%	61%	68%	68%	68%	54%	33%	13%	2%	0%	0%
dez	0%	0%	3%	14%	32%	56%	65%	70%	73%	65%	54%	34%	14%	3%	0%	0%

Tabela 22 - Potência de Saída – NA142H5

	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0%	0%	3%	13%	31%	52%	65%	67%	70%	67%	50%	31%	13%	3%	0%	0%
fev	0%	0%	2%	10%	35%	48%	61%	73%	80%	67%	46%	33%	13%	2%	0%	0%
mar	0%	0%	1%	12%	33%	52%	64%	71%	66%	65%	51%	26%	9%	1%	0%	0%
abr	0%	0%	0%	7%	24%	45%	60%	67%	68%	65%	40%	23%	6%	0%	0%	0%
mai	0%	0%	0%	4%	18%	36%	53%	62%	60%	55%	35%	23%	4%	0%	0%	0%
jun	0%	0%	0%	2%	15%	32%	49%	54%	59%	49%	34%	15%	2%	0%	0%	0%
jul	0%	0%	0%	3%	15%	31%	49%	57%	55%	48%	29%	16%	2%	0%	0%	0%
ago	0%	0%	0%	5%	20%	42%	60%	56%	60%	52%	41%	21%	5%	0%	0%	0%
set	0%	0%	0%	6%	18%	46%	49%	67%	69%	55%	44%	20%	7%	1%	0%	0%
out	0%	0%	1%	8%	28%	44%	66%	66%	67%	58%	48%	27%	9%	1%	0%	0%
nov	0%	0%	2%	13%	32%	55%	60%	67%	67%	67%	52%	33%	13%	2%	0%	0%
dez	0%	0%	3%	15%	32%	55%	63%	69%	72%	64%	52%	33%	15%	3%	0%	0%

Os coeficientes K_{T2} para os módulos foram:

$$K_{T2_PROTECTASI} = 0,171$$

$$K_{T2_NA142H5} = 0,169$$

Os preços dos módulos estão mostrados abaixo:

Tabela 23 – Preços dos módulos de a-Si

	Preço do Módulo	Preço por Watt Instalado
PROTECT ASI	US\$265,00	US\$2,48
NA142H5	US\$255,15	US\$1,80

Percebe-se uma diferença de quase US\$1,00 entre um módulo e outro. Logo, os coeficientes K_E ficam:

$$K_{E_PROTECTASI} = 0,752$$

$$K_{E_NA142H5} = 0,820$$

O coeficiente K_C caracteriza a planta fisicamente. Ele leva em consideração, como visto anteriormente, o peso e a área mínimos necessários para a obtenção de uma planta de 1kWp. Abaixo os coeficientes para os dois painéis.

Tabela 24 – Coeficiente K_C para os módulos de a-Si

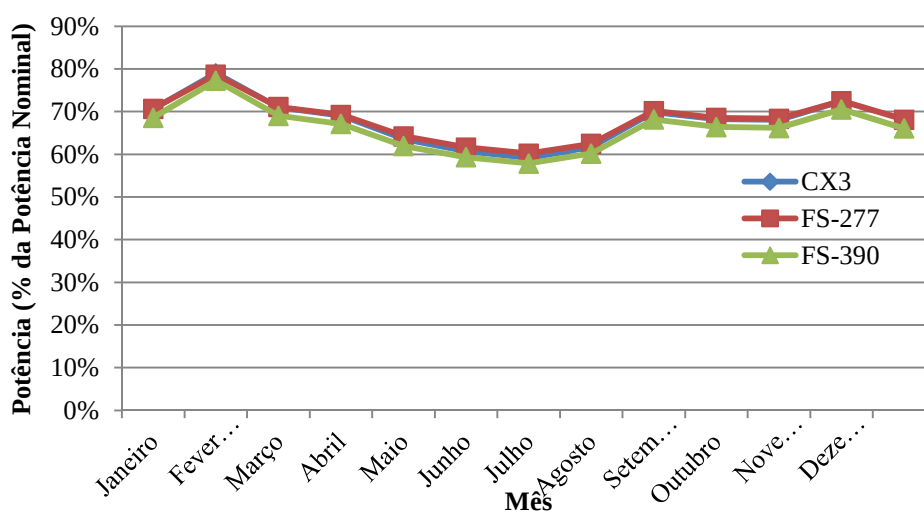
	Qtde	Área	Peso	K_S	K_{Wt}	K_C
PROTECT ASI	9	14m ²	196kg	0,1	0,1	0,2
NA142H5	7	10m ²	146kg	0,2	0,2	0,4

Conclui-se pelos coeficientes obtidos que para os dois módulos estudados o critério técnico não seria o motivo de escolha entre um e outro, pois ambos possuem comportamento muito similar. Porém, economicamente o painel fabricado pela SHARP é muito mais vantajoso se comparado com o módulo da SCHOTT, pois o preço do Watt instalado é quase U\$1,00 mais barato. Além disso, os painéis NA142H5 são mais leves e exigem uma menor área.

5.1.2 COEFICIENTES PARA OS PAINÉIS DE CdTe

Nesta seção serão calculados os coeficientes dos módulos de CdTe. Na Figura 37 estão mostradas as potências máximas médias geradas mensalmente, conforme visto para o silício amorfo.

Figura 37 - Potência máxima Normalizada para módulos de CdTe.



Fonte: do autor.

Os coeficientes K_{T1} obtidos para os dois painéis fora:

$$K_{T1_CX3} = 0,678$$

$$K_{T1_FS277} = 0,681$$

$$K_{T1_FS390} = 0,661$$

Percebe-se que ambos os módulos obtiveram potências similares. Isso pode ser melhor visualizado através das curvas de energia gerada por hora, disponíveis nas figuras abaixo:

Figura 38 - Potência gerada por hora para o mês de Janeiro

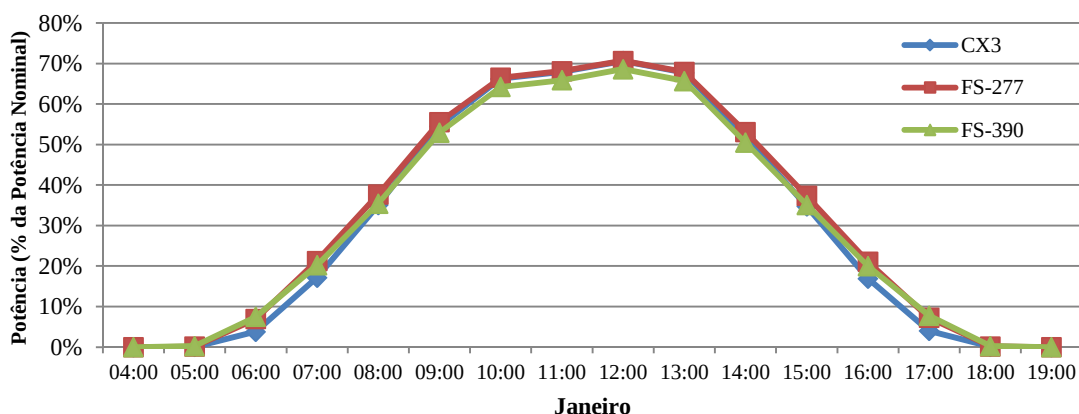
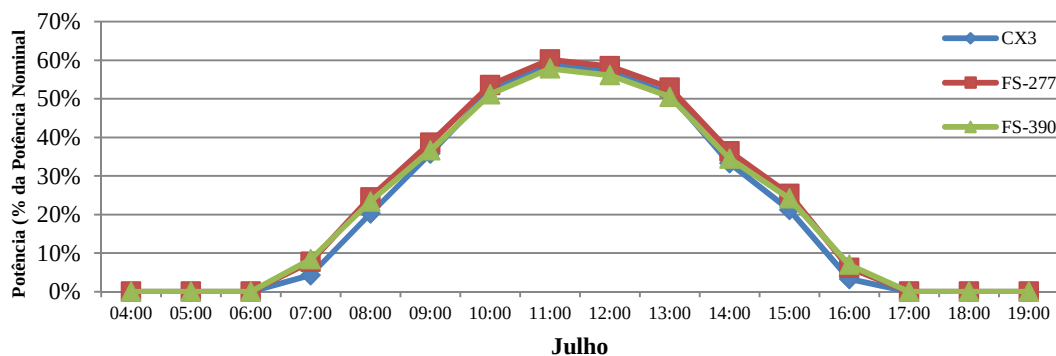


Figura 39 - Potência gerada por hora para o mês de Janeiro



Fonte: do autor.

Nas tabelas seguintes estão disponíveis os valores médios de potência na saída do painel por mês. Na sequência estão calculados os coeficientes K_{T2} para os módulos de CdTe.

Tabela 25 - Potência de Saída – CX-3

	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0%	0%	4%	17%	35%	55%	66%	68%	71%	68%	52%	35%	17%	4%	0%	0%
fev	0%	0%	3%	13%	39%	50%	63%	73%	79%	68%	49%	37%	18%	3%	0%	0%
mar	0%	0%	1%	16%	37%	54%	65%	71%	67%	66%	53%	31%	13%	1%	0%	0%
abr	0%	0%	0%	10%	28%	48%	62%	68%	69%	66%	44%	27%	9%	0%	0%	0%
mai	0%	0%	0%	6%	23%	40%	55%	64%	62%	57%	39%	27%	6%	0%	0%	0%
jun	0%	0%	0%	3%	20%	37%	52%	56%	61%	52%	38%	19%	3%	0%	0%	0%
jul	0%	0%	0%	4%	20%	36%	52%	59%	57%	51%	33%	21%	3%	0%	0%	0%
ago	0%	0%	0%	8%	24%	45%	62%	59%	62%	55%	44%	26%	7%	0%	0%	0%
set	0%	0%	1%	9%	23%	50%	52%	69%	70%	57%	47%	25%	9%	1%	0%	0%
out	0%	0%	2%	12%	32%	47%	67%	67%	68%	60%	50%	32%	13%	2%	0%	0%
nov	0%	0%	3%	17%	36%	57%	61%	68%	68%	68%	54%	37%	18%	3%	0%	0%
dez	0%	0%	4%	19%	36%	57%	65%	69%	72%	65%	54%	37%	20%	4%	0%	0%

Tabela 26 - Potência de Saída – FS-277

	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0%	0%	7%	21%	38%	56%	67%	68%	71%	68%	53%	37%	21%	7%	0%	0%
fev	0%	0%	6%	18%	41%	52%	63%	73%	79%	68%	50%	39%	22%	5%	0%	0%
mar	0%	0%	2%	20%	39%	55%	66%	71%	68%	66%	54%	34%	17%	2%	0%	0%
abr	0%	0%	0%	14%	31%	50%	63%	68%	69%	66%	46%	31%	13%	0%	0%	0%
mai	0%	0%	0%	10%	27%	42%	56%	64%	63%	58%	41%	31%	10%	0%	0%	0%
jun	0%	0%	0%	5%	24%	39%	53%	57%	62%	53%	41%	24%	6%	0%	0%	0%
jul	0%	0%	0%	8%	24%	39%	54%	60%	58%	53%	36%	25%	6%	0%	0%	0%
ago	0%	0%	0%	12%	28%	47%	62%	60%	62%	56%	47%	29%	11%	0%	0%	0%
set	0%	0%	1%	13%	27%	51%	53%	69%	70%	58%	49%	28%	14%	1%	0%	0%
out	0%	0%	3%	16%	35%	49%	68%	67%	69%	61%	52%	35%	17%	4%	0%	0%
nov	0%	0%	6%	21%	39%	58%	62%	68%	68%	68%	56%	39%	22%	5%	0%	0%
dez	0%	0%	7%	23%	38%	58%	65%	70%	72%	65%	55%	39%	24%	7%	0%	0%

Tabela 27 - Potência de Saída – FS-390

	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0%	0%	8%	20%	35%	53%	64%	66%	69%	66%	50%	35%	20%	8%	0%	0%
fev	0%	0%	7%	17%	39%	49%	61%	71%	77%	66%	48%	37%	21%	6%	0%	0%
mar	0%	0%	3%	19%	37%	53%	63%	69%	65%	64%	52%	32%	16%	3%	0%	0%
abr	0%	0%	0%	14%	30%	47%	60%	66%	67%	64%	43%	29%	13%	0%	0%	0%
mai	0%	0%	0%	10%	26%	40%	54%	62%	60%	56%	39%	29%	11%	0%	0%	0%
jun	0%	0%	0%	6%	23%	37%	51%	55%	59%	51%	39%	23%	7%	0%	0%	0%
jul	0%	0%	0%	8%	23%	37%	51%	58%	56%	50%	35%	24%	7%	0%	0%	0%
ago	0%	0%	0%	12%	27%	45%	60%	57%	60%	54%	44%	28%	11%	0%	0%	0%
set	0%	0%	2%	13%	26%	49%	51%	67%	68%	56%	47%	27%	14%	2%	0%	0%
out	0%	0%	4%	16%	33%	47%	66%	65%	66%	58%	50%	33%	17%	5%	0%	0%
nov	0%	0%	7%	20%	36%	56%	60%	66%	66%	66%	53%	37%	21%	6%	0%	0%
dez	0%	1%	8%	22%	36%	55%	63%	67%	71%	63%	53%	37%	22%	8%	1%	0%

Os coeficientes K_{T2} para os módulos foram:

$$K_{T2_CX3} = 0,180$$

$$K_{T2_FS277} = 0,190$$

$$K_{T2_FS390} = 0,183$$

Os preços dos módulos estão mostrados abaixo:

Tabela 28 - Preços dos módulos de CdTe.

	Preço do Módulo	Preço por Watt Instalado
CX-3	U\$88,90	U\$1,04
FS-277	U\$299,90	U\$3,84
FS-390	U\$299,90	U\$3,33

Os coeficientes K_E são mostrados abaixo:

$$K_{E_CX3} = 0,896$$

$$K_{E_FS277} = 0,616$$

$$K_{E_FS390} = 0,667$$

O coeficiente econômico deixa claro que o painel da CALYXO consegue, por um preço muito mais acessivo, gerar a mesma quantidade de energia por m² que os outros dois painéis de CdTe pesquisados.

O coeficiente K_C caracteriza a planta fisicamente. Ele leva em consideração, como visto anteriormente, o peso e a área mínima necessários para a obtenção de uma planta de 1kWp. Abaixo os coeficientes para os painéis de CdTe.

Tabela 29 - Coeficiente K_C para os módulos de CdTe.

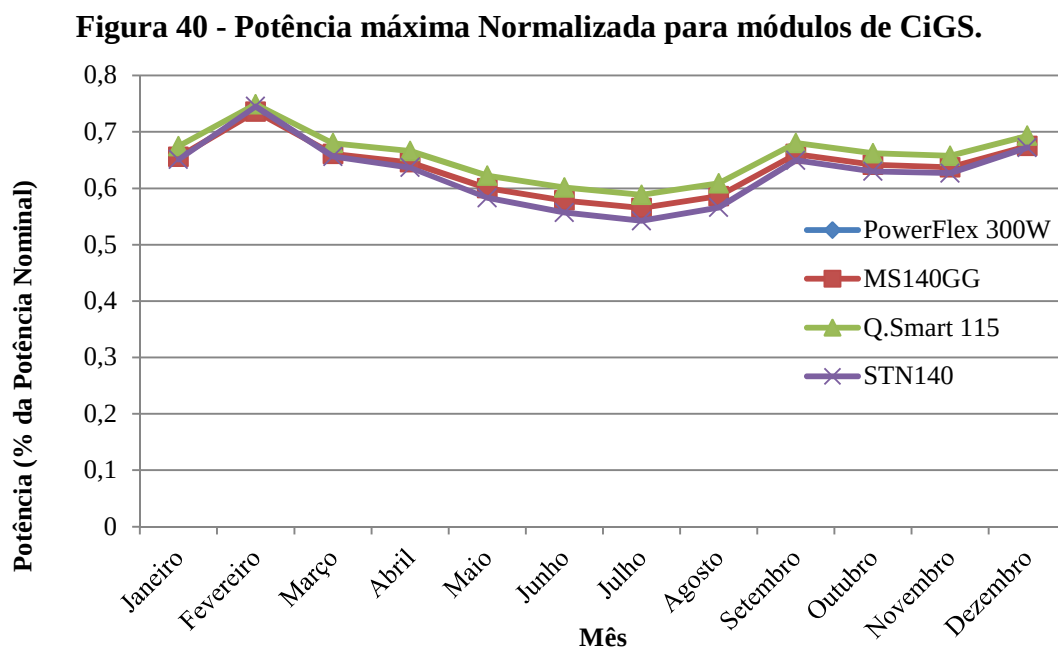
	Qtde	Área	Peso	K_S	K_{Wt}	K_C
CX3	12	8m ²	83kg	0,3	0,3	0,6
FS-277	13	10m ²	83kg	0,3	0,3	0,6
FS-390	11	9m ²	83kg	0,3	0,3	0,6

Conclui-se pelos coeficientes obtidos que para os módulos de CdTe o critério técnico não seria o motivo de escolha entre um e outro, pois ambos possuem comportamento muito similar. Porém, economicamente o painel fabricado pela CALYXO é muito mais vantajoso se comparado com os módulos da FIRST-SOLAR.

Os parâmetros construtivos para os módulos dessa tecnologia foram iguais uns aos outros.

5.1.3 COEFICIENTES PARA OS PAINÉIS DE CiGS

Nesta seção serão calculados os coeficientes dos módulos de CiGS. Na Figura 40 estão mostradas as potências máximas médias geradas mensalmente.



Fonte: do autor.

Pelo fato dessa tecnologia sofrer grande impacto sobre a tensão com a elevação de temperatura, elas possuem um K_{T1} menor se comparado com os módulos estudados até agora, como pode ser visto abaixo:

$$K_{T1_PowerFlex300} = 0,647$$

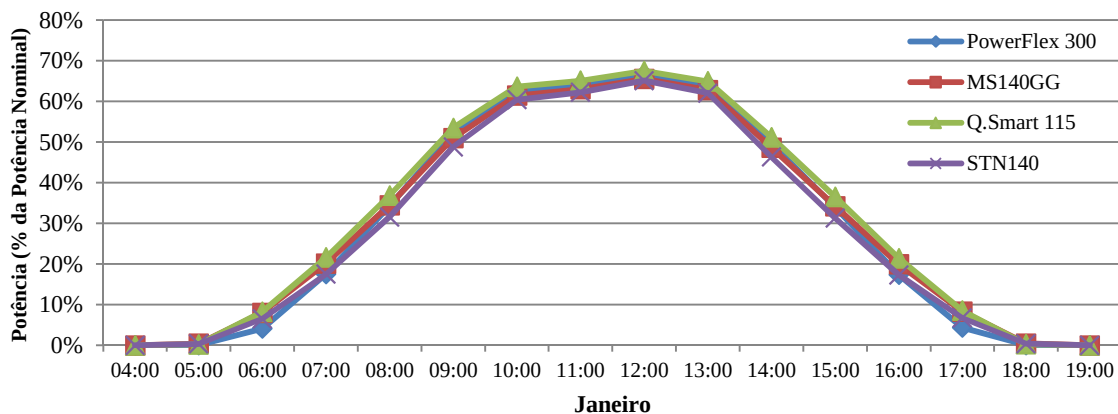
$$K_{T1_MS140GG} = 0,637$$

$$K_{T1_Q.Smart} = 0,657$$

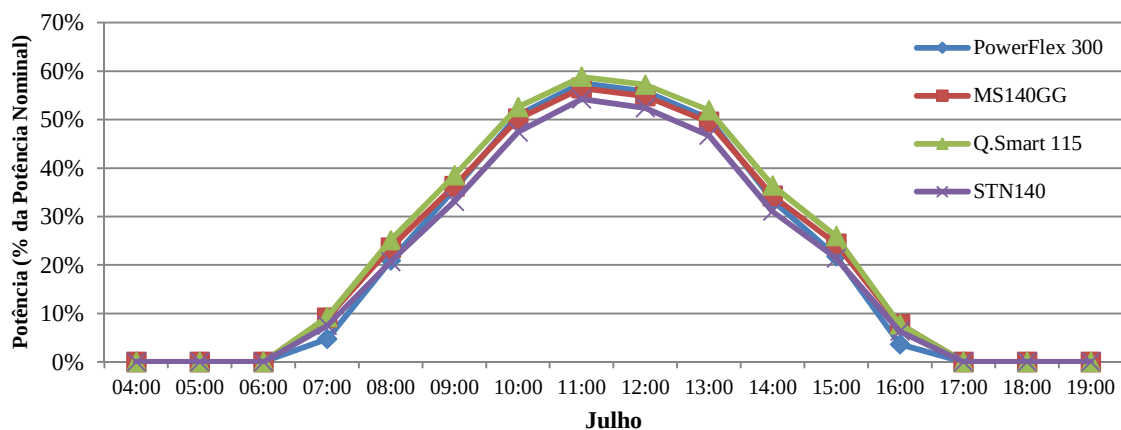
$$K_{T1_STN140} = 0,626$$

Como as tecnologias possuem comportamento similar em relação à elevação de temperatura e mudança na irradiação, é esperado que os coeficientes KT_1 e KT_2 sejam similares entre módulos de CiGS.

Figura 41 - Potência gerada por hora para o mês de Janeiro



Fonte: do autor.



Fonte: do autor.

Nas tabelas seguintes estão disponíveis os valores médios de potência na saída do painel por mês. Na sequência estão calculados os coeficientes K_{T2} para os módulos de CiGS.

Tabela 30 - Potência de Saída – PowerFlex 300W

	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0%	0%	4%	18%	34%	52%	63%	64%	67%	64%	50%	34%	17%	4%	0%	0%
fev	0%	0%	3%	14%	38%	48%	59%	68%	74%	64%	47%	36%	18%	3%	0%	0%
mar	0%	0%	1%	16%	36%	52%	62%	67%	64%	62%	51%	30%	13%	1%	0%	0%
abr	0%	0%	0%	10%	28%	46%	59%	65%	66%	63%	43%	27%	9%	0%	0%	0%
mai	0%	0%	0%	6%	23%	39%	53%	61%	60%	55%	38%	27%	7%	0%	0%	0%
jun	0%	0%	0%	3%	20%	36%	51%	55%	59%	51%	38%	20%	3%	0%	0%	0%

jul	0%	0%	0%	5%	21%	36%	51%	58%	56%	50%	33%	22%	4%	0%	0%	0%
ago	0%	0%	0%	8%	25%	45%	60%	57%	60%	53%	44%	26%	7%	0%	0%	0%
set	0%	0%	1%	10%	24%	48%	50%	66%	67%	56%	46%	25%	10%	1%	0%	0%
out	0%	0%	2%	13%	32%	46%	65%	64%	65%	58%	49%	32%	13%	2%	0%	0%
nov	0%	0%	3%	18%	35%	55%	59%	65%	65%	64%	52%	36%	18%	3%	0%	0%
dez	0%	0%	4%	19%	35%	54%	61%	66%	68%	62%	52%	36%	20%	4%	0%	0%

Tabela 31 - Potência de Saída – MS140GG

	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0%	0%	8%	20%	35%	51%	61%	63%	66%	63%	49%	34%	20%	8%	0%	0%
fev	0%	0%	7%	17%	38%	47%	58%	67%	74%	63%	46%	36%	21%	7%	0%	0%
mar	0%	0%	4%	19%	36%	51%	61%	66%	63%	61%	50%	31%	17%	4%	0%	0%
abr	0%	0%	0%	14%	29%	46%	58%	64%	65%	62%	42%	29%	13%	1%	0%	0%
mai	0%	0%	0%	10%	26%	39%	52%	60%	58%	54%	39%	29%	11%	0%	0%	0%
jun	0%	0%	0%	7%	23%	37%	50%	54%	58%	50%	38%	23%	8%	0%	0%	0%
jul	0%	0%	0%	9%	24%	36%	50%	57%	55%	50%	34%	24%	8%	0%	0%	0%
ago	0%	0%	0%	13%	27%	44%	58%	56%	59%	52%	43%	28%	12%	0%	0%	0%
set	0%	0%	2%	14%	26%	48%	50%	65%	66%	55%	46%	27%	14%	3%	0%	0%
out	0%	0%	5%	16%	33%	46%	63%	63%	64%	57%	48%	32%	17%	5%	0%	0%
nov	0%	0%	7%	21%	36%	54%	57%	64%	64%	63%	51%	36%	21%	7%	0%	0%
dez	0%	1%	8%	22%	35%	53%	60%	65%	67%	61%	51%	36%	22%	8%	1%	0%

Tabela 32 - Potência de Saída – Q.Smart 115

	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0%	0%	8%	22%	37%	53%	64%	65%	67%	65%	51%	37%	21%	9%	0%	0%
fev	0%	0%	7%	18%	40%	50%	61%	69%	75%	65%	49%	39%	22%	7%	0%	0%
mar	0%	0%	4%	21%	39%	53%	63%	68%	65%	63%	53%	33%	18%	3%	0%	0%
abr	0%	0%	0%	15%	31%	48%	60%	66%	67%	64%	45%	31%	14%	0%	0%	0%
mai	0%	0%	0%	11%	27%	42%	55%	62%	61%	57%	41%	31%	12%	0%	0%	0%
jun	0%	0%	0%	7%	25%	39%	52%	56%	60%	52%	41%	24%	8%	0%	0%	0%
jul	0%	0%	0%	9%	25%	38%	53%	59%	57%	52%	36%	26%	8%	0%	0%	0%
ago	0%	0%	0%	14%	29%	47%	61%	58%	61%	55%	46%	30%	12%	0%	0%	0%
set	0%	0%	2%	15%	28%	50%	52%	67%	68%	57%	48%	29%	15%	2%	0%	0%
out	0%	0%	5%	17%	35%	48%	66%	65%	66%	59%	51%	35%	18%	5%	0%	0%
nov	0%	0%	7%	22%	38%	56%	60%	66%	66%	65%	54%	39%	23%	7%	0%	0%
dez	0%	1%	8%	23%	38%	55%	62%	67%	69%	63%	53%	39%	24%	8%	1%	0%

Tabela 33 – Potência de Saída – STN140

	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0%	0%	7%	18%	32%	49%	60%	62%	65%	62%	46%	31%	17%	7%	0%	0%
fev	0%	0%	6%	15%	35%	45%	57%	67%	75%	62%	44%	33%	18%	5%	0%	0%
mar	0%	0%	3%	17%	33%	49%	59%	66%	62%	60%	48%	28%	14%	3%	0%	0%
abr	0%	0%	0%	12%	26%	43%	56%	63%	64%	60%	39%	26%	11%	1%	0%	0%
mai	0%	0%	0%	9%	23%	36%	50%	58%	57%	52%	35%	26%	9%	0%	0%	0%
jun	0%	0%	0%	6%	20%	34%	47%	51%	56%	47%	35%	20%	6%	0%	0%	0%
jul	0%	0%	0%	7%	21%	33%	47%	54%	52%	47%	31%	21%	6%	0%	0%	0%
ago	0%	0%	0%	11%	24%	41%	56%	54%	57%	50%	40%	25%	10%	0%	0%	0%
set	0%	0%	2%	12%	23%	45%	47%	64%	65%	52%	43%	24%	12%	2%	0%	0%

out	0%	0%	4%	14%	30%	43%	62%	62%	63%	55%	46%	29%	15%	4%	0%	0%
nov	0%	0%	6%	18%	33%	52%	56%	62%	63%	62%	49%	33%	18%	5%	0%	0%
dez	0%	1%	7%	19%	32%	51%	59%	64%	67%	59%	49%	33%	19%	7%	1%	0%

Os coeficientes K_{T2} estão calculados abaixo:

$$K_{T2_PowerFlex300} = 0,175$$

$$K_{T2_MS140GG} = 0,179$$

$$K_{T2_Q.Smart} = 0,187$$

$$K_{T2_STN140} = 0,169$$

Os preços dos módulos estão mostrados abaixo:

Tabela 34 - Preços dos módulos de CiGS.

	Preço do Módulo	Preço por Watt Instalado
PowerFlex 300W	U\$450,00	U\$1,50
MS140GG	U\$210,00	U\$1,50
Q.Smart 115	U\$159,00	U\$1,38
STN140	U\$279,00	U\$1,99

Os coeficientes K_E são mostrados abaixo:

$$K_{E_CX3} = 0,850$$

$$K_{E_FS277} = 0,850$$

$$K_{E_FS390} = 0,862$$

$$K_{E_FS390} = 0,801$$

O coeficiente econômico deixa claro que os painéis de CiGS possuem um preço médio menor que os anteriormente estudados.

O coeficiente K_C caracteriza a planta fisicamente. Ele leva em consideração, como visto anteriormente, o peso e a área mínima necessários para a obtenção de uma planta de 1kWp. Abaixo os coeficientes para os painéis de CiGS.

Tabela 35 - Coeficiente K_C para os módulos de CiGS.

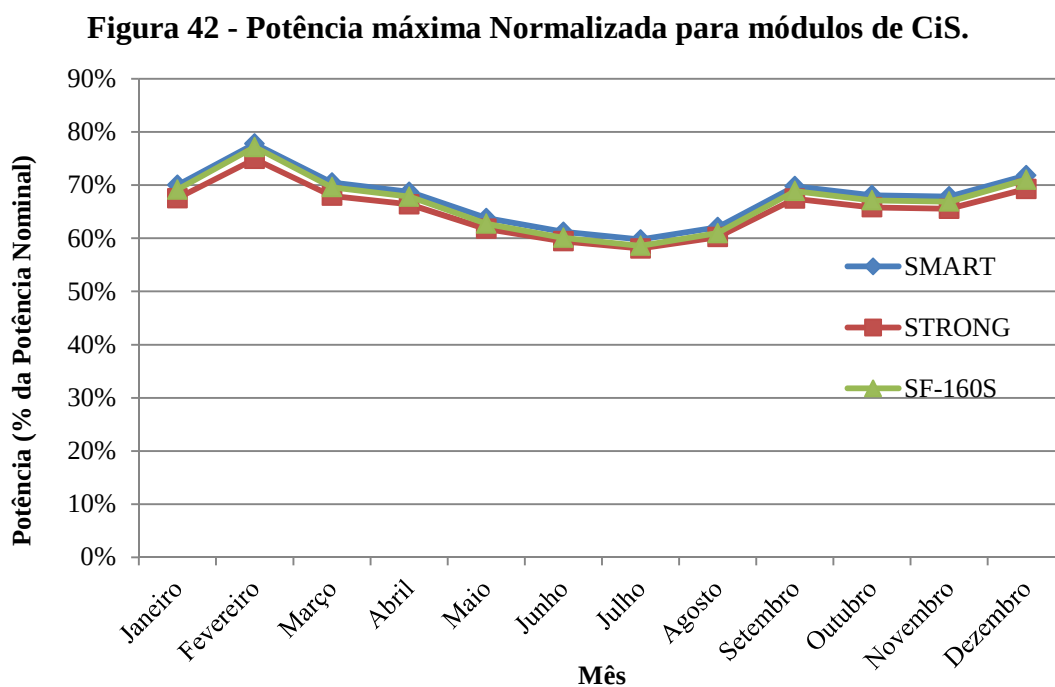
	Qtde	Área	Peso	K_s	K_{wt}	K_C
PowerFlex 300W	3	9m ²	33kg	0,3	0,5	0,8
MS140GG	7	8m ²	129kg	0,3	0,2	0,5
Q.Smart 115	9	8m ²	145kg	0,3	0,2	0,5
STN140	7	8m ²	120kg	0,3	0,3	0,6

Apesar de obter um índice ruim no critério técnico, o módulo flexível PowerFlex 300W obteve um dos melhores índices construtivos entre os módulos testados, isso porque ele é extremamente leve se comparado com os outros painéis.

De modo geral, os módulos de CiGS possuem um comportamento inferior aos outros módulos testados, porém possuem um preço mais acessível.

5.1.4 COEFICIENTES PARA OS PAINÉIS DE CiS

Nesta seção serão calculados os coeficientes técnicos e econômicos para os módulos de CiS. Na Figura 42 estão mostradas as potências máximas médias geradas mensalmente.



Fonte: do autor.

Os coeficientes K_{TI} obtidos para os dois painéis fora:

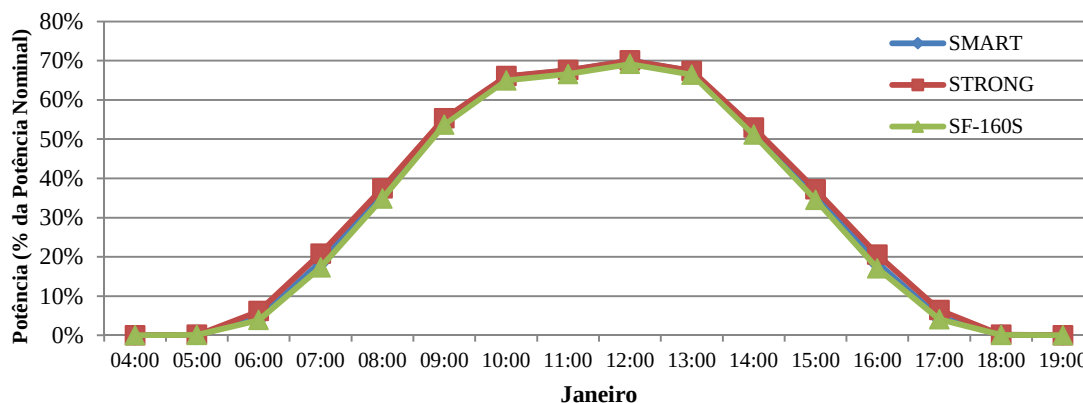
$$K_{TI_SMART} = 0,676$$

$$K_{TI_STRONG} = 0,654$$

$$K_{T1_SF-160S} = 0,667$$

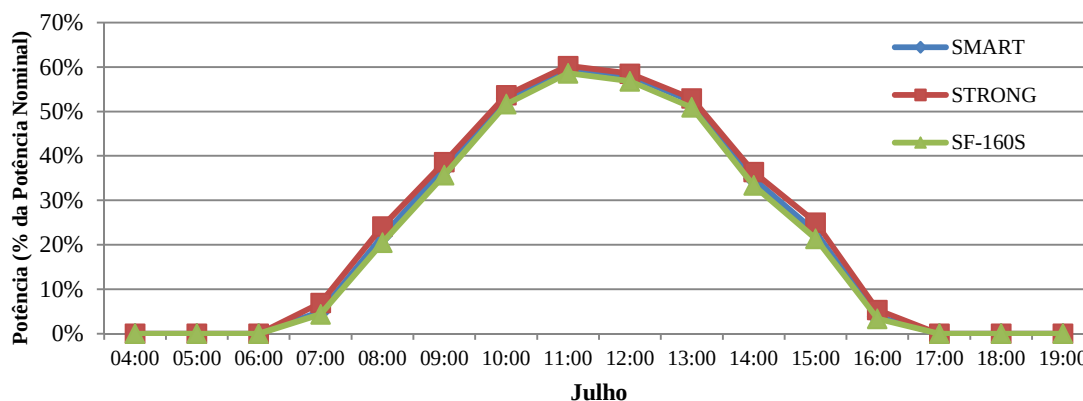
Percebe-se que ambos os módulos obtiveram potências similares. Isso pode ser melhor visualizado através das curvas de energia gerada por hora, disponíveis nas figuras abaixo:

Figura 43 – Energia gerada por hora para o mês de janeiro



Fonte: do autor.

Figura 44 – Energia gerada por hora para o mês de Julho



Fonte: do autor.

Nas tabelas seguintes estão disponíveis os valores de potência na saída do painel por hora e mês. Na sequência estão calculados os coeficientes K_{T2} para os módulos de CiS.

Tabela 36 - Potência de Saída – PowerMax SMART

	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0%	0%	4%	19%	36%	55%	66%	68%	70%	67%	52%	36%	18%	5%	0%	0%
fev	0%	0%	4%	15%	40%	51%	63%	72%	78%	67%	50%	38%	19%	3%	0%	0%
mar	0%	0%	1%	17%	38%	55%	65%	70%	67%	66%	54%	32%	14%	1%	0%	0%
abr	0%	0%	0%	11%	30%	49%	62%	68%	69%	66%	45%	29%	10%	0%	0%	0%
mai	0%	0%	0%	6%	25%	41%	56%	64%	62%	58%	40%	29%	7%	0%	0%	0%

jun	0%	0%	0%	3%	21%	38%	53%	57%	61%	53%	40%	21%	4%	0%	0%	0%
jul	0%	0%	0%	5%	22%	37%	53%	60%	58%	52%	35%	23%	4%	0%	0%	0%
ago	0%	0%	0%	9%	26%	47%	62%	59%	62%	56%	46%	27%	8%	0%	0%	0%
set	0%	0%	1%	10%	25%	51%	53%	69%	70%	58%	48%	26%	11%	1%	0%	0%
out	0%	0%	2%	13%	34%	48%	67%	67%	68%	60%	51%	33%	14%	2%	0%	0%
nov	0%	0%	4%	19%	37%	57%	61%	68%	68%	67%	55%	38%	20%	3%	0%	0%
dez	0%	0%	5%	21%	37%	57%	64%	69%	72%	65%	55%	38%	21%	4%	0%	0%

Tabela 37 - Potência de Saída – PowerMax STRONG

	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0%	0%	6%	21%	37%	55%	66%	68%	70%	67%	53%	37%	21%	6%	0%	0%
fev	0%	0%	5%	17%	41%	52%	63%	72%	78%	67%	50%	39%	21%	5%	0%	0%
mar	0%	0%	2%	20%	39%	55%	65%	70%	67%	66%	54%	33%	16%	2%	0%	0%
abr	0%	0%	0%	13%	31%	49%	62%	68%	69%	66%	46%	31%	12%	0%	0%	0%
mai	0%	0%	0%	9%	27%	42%	56%	64%	63%	58%	41%	30%	9%	0%	0%	0%
jun	0%	0%	0%	5%	24%	39%	53%	57%	62%	53%	41%	23%	5%	0%	0%	0%
jul	0%	0%	0%	7%	24%	39%	54%	60%	59%	53%	36%	25%	5%	0%	0%	0%
ago	0%	0%	0%	12%	28%	47%	62%	60%	62%	56%	47%	29%	10%	0%	0%	0%
set	0%	0%	1%	13%	27%	51%	53%	69%	70%	58%	49%	28%	13%	1%	0%	0%
out	0%	0%	3%	16%	35%	49%	68%	67%	68%	61%	52%	35%	17%	3%	0%	0%
nov	0%	0%	5%	21%	38%	58%	62%	68%	68%	67%	56%	39%	22%	4%	0%	0%
dez	0%	0%	6%	23%	38%	57%	65%	69%	72%	65%	55%	39%	23%	6%	0%	0%

Tabela 38 - Potência de Saída – PowerMax SF-160S

	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0%	0%	4%	17%	35%	54%	65%	67%	69%	66%	51%	34%	17%	4%	0%	0%
fev	0%	0%	3%	13%	38%	50%	62%	71%	77%	66%	48%	37%	18%	3%	0%	0%
mar	0%	0%	1%	16%	37%	54%	64%	70%	66%	65%	53%	30%	13%	1%	0%	0%
abr	0%	0%	0%	10%	28%	47%	61%	67%	68%	65%	43%	27%	9%	0%	0%	0%
mai	0%	0%	0%	6%	23%	40%	54%	63%	61%	56%	39%	27%	6%	0%	0%	0%
jun	0%	0%	0%	3%	20%	36%	51%	56%	60%	51%	38%	19%	3%	0%	0%	0%
jul	0%	0%	0%	4%	20%	36%	52%	59%	57%	51%	33%	21%	3%	0%	0%	0%
ago	0%	0%	0%	8%	25%	45%	61%	58%	61%	54%	44%	26%	7%	0%	0%	0%
set	0%	0%	1%	9%	23%	49%	51%	68%	69%	57%	47%	25%	10%	1%	0%	0%
out	0%	0%	2%	12%	32%	47%	66%	66%	67%	59%	50%	32%	13%	2%	0%	0%
nov	0%	0%	3%	17%	36%	56%	60%	67%	67%	66%	54%	36%	18%	3%	0%	0%
dez	0%	0%	4%	19%	36%	56%	63%	68%	71%	64%	53%	37%	20%	4%	0%	0%

Os coeficientes K_{T2} estão calculados abaixo:

$$K_{T2_SMART} = 0,184$$

$$K_{T2_STRONG} = 0,189$$

$$K_{T2_SF-160S} = 0,178$$

Os preços dos módulos estão mostrados abaixo, juntamente com os coeficientes.

Tabela 39 - Preços dos módulos de CiS.

	Preço do Módulo	Preço por Watt Instalado
PowerMax SMART	U\$276,00	U\$2,30
PowerMax STRONG	U\$190,00	U\$1,40
SF-160S	U\$240,00	U\$1,50

$$K_{E_SMART} = 0,770$$

$$K_{E_STRONG} = 0,859$$

$$K_{E_SF-160S} = 0,850$$

O coeficientes econômicos também mostram que os painéis de CiS possuem um preço médio baixo, chegando próximo dos U\$1,00 por watt gerado.

O coeficiente K_C caracteriza a planta fisicamente. Ele leva em consideração, como visto anteriormente, o peso e a área mínima necessários para a obtenção de uma planta de 1kWp. Abaixo os coeficientes para os painéis de CiS.

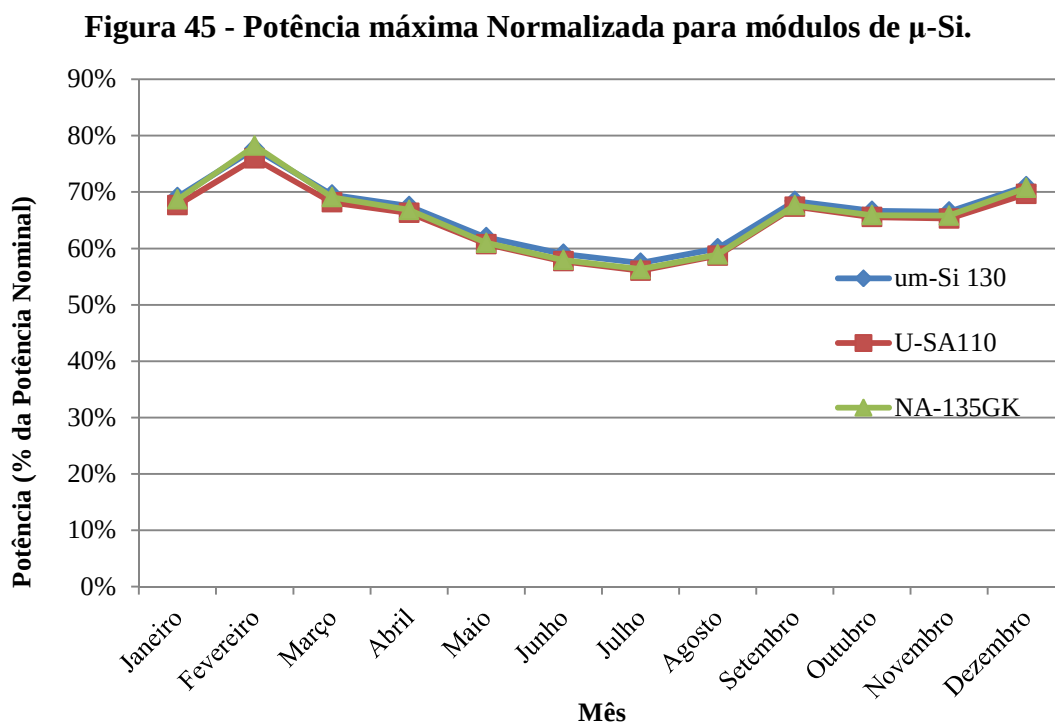
Tabela 40 - Coeficiente K_C para os módulos de CiS.

	Qtde	Área	Peso	K_S	K_{Wt}	K_C
PowerMax SMART	8	9m ²	133kg	0,3	0,2	0,5
PowerMax STRONG	7	8m ²	145kg	0,3	0,2	0,5
SF-160S	6	8m ²	125kg	0,3	0,2	0,5

De modo geral, os módulos de CiS possuem um comportamento similar aos outros módulos testados e possuem um preço considerado acessível. Como já era esperado, as curvas de potência ficaram similares, pois os painéis possuem características físicas muito semelhantes.

5.1.5 COEFICIENTES PARA OS PAINÉIS DE μ -SI.

Nesta seção serão calculados os coeficientes técnicos e econômicos para os módulos de CiS. Na estão mostradas as potências máximas médias geradas mensalmente.



Fonte: do autor.

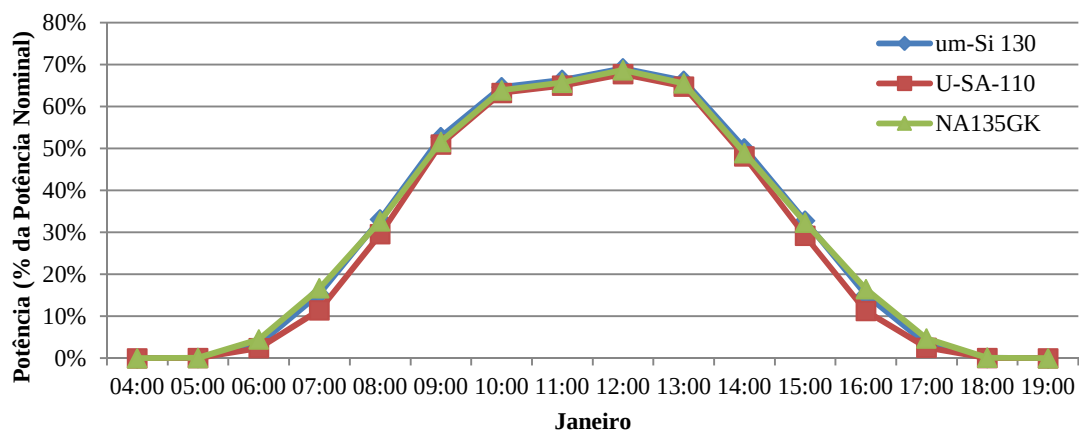
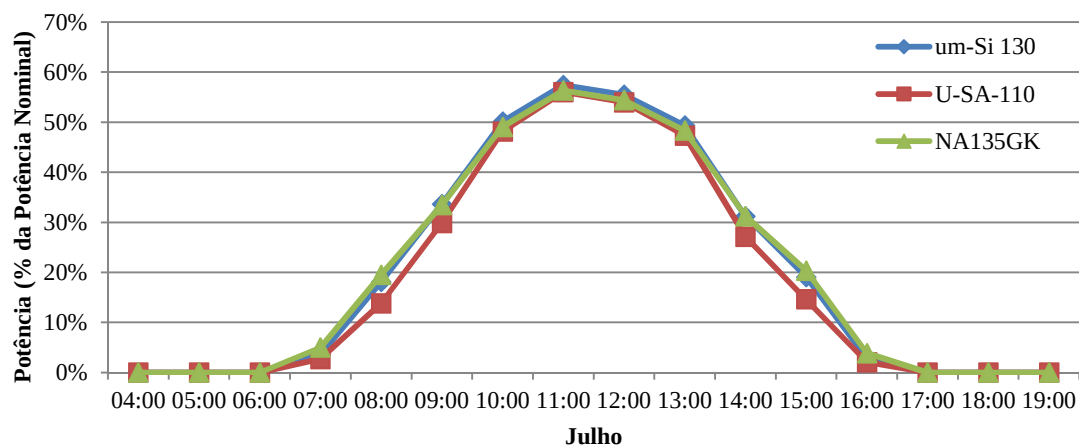
Os coeficientes K_{TI} obtidos para os dois painéis foram:

$$K_{TI_um-Si} = 0,662$$

$$K_{TI_USA110} = 0,649$$

$$K_{TI_NA-135GK} = 0,656$$

Percebe-se que ambos os módulos obtiveram potências similares. Isso pode ser melhor visualizado através das curvas de energia gerada por hora, disponíveis nas figuras abaixo:

Figura 46 - Energia gerada por hora para o mês de Janeiro**Figura 47 - Energia gerada por hora para o mês de Julho**

Fonte: do autor.

Nas tabelas seguintes estão disponíveis os valores de potência na saída do painel por hora e mês. Na sequência estão calculados os coeficientes K_{T2} para os módulos de micro-silício.

Tabela 41 - Potência de Saída – μ m-Si 130 Plus

	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0%	0%	3%	15%	33%	53%	65%	66%	69%	66%	50%	33%	15%	3%	0%	0%
fev	0%	0%	3%	12%	37%	49%	61%	71%	78%	66%	47%	35%	16%	2%	0%	0%
mar	0%	0%	1%	14%	35%	53%	64%	70%	66%	64%	51%	29%	11%	1%	0%	0%
abr	0%	0%	0%	8%	26%	46%	60%	66%	68%	64%	42%	25%	7%	0%	0%	0%
mai	0%	0%	0%	5%	21%	38%	53%	62%	60%	55%	37%	25%	5%	0%	0%	0%
jun	0%	0%	0%	2%	18%	34%	50%	54%	59%	50%	36%	17%	3%	0%	0%	0%
jul	0%	0%	0%	4%	18%	34%	50%	57%	56%	49%	31%	19%	3%	0%	0%	0%
ago	0%	0%	0%	7%	22%	43%	60%	57%	60%	53%	42%	24%	6%	0%	0%	0%
set	0%	0%	0%	7%	21%	48%	50%	67%	68%	55%	45%	23%	8%	1%	0%	0%
out	0%	0%	1%	10%	30%	46%	66%	65%	67%	58%	49%	30%	11%	2%	0%	0%

nov	0%	0%	3%	15%	34%	55%	60%	66%	67%	66%	53%	35%	16%	2%	0%	0%
dez	0%	0%	3%	17%	34%	55%	63%	68%	71%	63%	52%	35%	18%	3%	0%	0%

Tabela 42 - Potência de Saída – U-SA-110

	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0%	0%	2%	11%	30%	51%	63%	65%	68%	65%	48%	29%	11%	3%	0%	0%
fev	0%	0%	2%	8%	34%	47%	60%	70%	76%	65%	45%	32%	12%	2%	0%	0%
mar	0%	0%	1%	10%	32%	51%	62%	68%	64%	63%	50%	24%	8%	1%	0%	0%
abr	0%	0%	0%	6%	22%	44%	59%	65%	66%	63%	39%	21%	5%	0%	0%	0%
mai	0%	0%	0%	4%	16%	35%	52%	61%	59%	54%	34%	20%	4%	0%	0%	0%
jun	0%	0%	0%	2%	13%	31%	48%	53%	58%	48%	33%	13%	2%	0%	0%	0%
jul	0%	0%	0%	3%	14%	30%	48%	56%	54%	47%	27%	15%	2%	0%	0%	0%
ago	0%	0%	0%	5%	18%	41%	59%	55%	59%	51%	40%	19%	4%	0%	0%	0%
set	0%	0%	0%	6%	17%	46%	48%	66%	67%	54%	43%	18%	6%	0%	0%	0%
out	0%	0%	1%	8%	26%	43%	65%	64%	66%	57%	47%	26%	8%	1%	0%	0%
nov	0%	0%	2%	11%	30%	54%	58%	65%	65%	65%	51%	31%	12%	2%	0%	0%
dez	0%	0%	2%	13%	30%	53%	62%	67%	70%	62%	51%	32%	13%	2%	0%	0%

Tabela 43 - Potência de Saída – NA-135GK

	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0%	0%	4%	17%	33%	52%	64%	66%	69%	65%	49%	32%	17%	5%	0%	0%
fev	0%	0%	4%	13%	36%	47%	60%	71%	78%	65%	46%	35%	17%	3%	0%	0%
mar	0%	0%	2%	16%	35%	51%	63%	69%	65%	63%	50%	29%	13%	1%	0%	0%
abr	0%	0%	0%	10%	26%	45%	59%	66%	67%	63%	41%	26%	9%	0%	0%	0%
mai	0%	0%	0%	6%	22%	37%	52%	61%	59%	54%	36%	26%	7%	0%	0%	0%
jun	0%	0%	0%	3%	19%	34%	49%	53%	58%	49%	36%	19%	4%	0%	0%	0%
jul	0%	0%	0%	5%	20%	33%	49%	56%	54%	48%	31%	20%	4%	0%	0%	0%
ago	0%	0%	0%	9%	23%	43%	59%	56%	59%	52%	42%	24%	8%	0%	0%	0%
set	0%	0%	1%	10%	22%	47%	49%	66%	68%	54%	44%	23%	10%	1%	0%	0%
out	0%	0%	2%	12%	30%	45%	65%	65%	66%	57%	48%	30%	13%	2%	0%	0%
nov	0%	0%	4%	17%	33%	54%	59%	66%	66%	65%	52%	34%	17%	3%	0%	0%
dez	0%	0%	5%	18%	33%	54%	62%	67%	71%	63%	51%	34%	19%	5%	0%	0%

Os coeficientes K_{T2} estão calculados abaixo:

$$K_{T2_um-SI} = 0,173$$

$$K_{T2_USA110} = 0,163$$

$$K_{T2_NA-135GK} = 0,173$$

Os preços dos módulos estão mostrados abaixo, juntamente com os coeficientes.

Tabela 44 - Preços dos módulos de $\mu\text{m-Si}$.

	Preço do Módulo	Preço por Watt Instalado
$\mu\text{m-Si}$ 130 Plus	U\$173,00	U\$1,33
U-SA110	U\$239,00	U\$2,19
NA145GK	U\$240,00	U\$1,89

$$K_{E_SMART} = 0,867$$

$$K_{E_STRONG} = 0,781$$

$$K_{E_SF-160S} = 0,811$$

O coeficientes econômicos também mostram que os painéis de micro-silício possuem um preço médio baixo, sendo que o painel da BOSCH foi um dos módulos de menor valor entre os pesquisados.

O coeficiente K_C caracteriza a planta fisicamente. Ele leva em consideração, como visto anteriormente, o peso e a área mínima necessários para a obtenção de uma planta de 1kWp. Abaixo os coeficientes para os painéis de CiS.

Tabela 45 - Coeficiente K_C para os módulos de $\mu\text{m-Si}$.

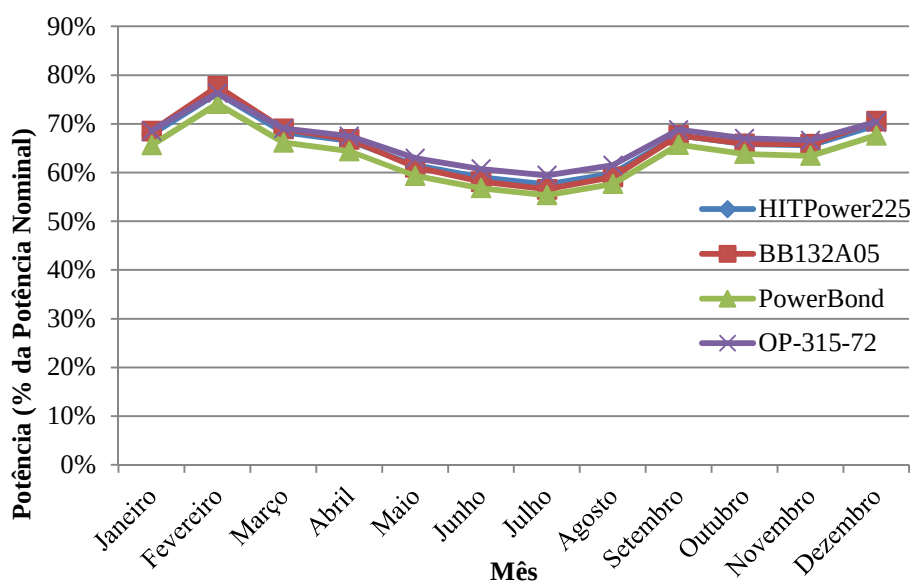
	Qtde	Área	Peso	K_S	K_{Wt}	K_C
$\mu\text{m-Si}$ 130 Plus	8	11m ²	192kg	0,2	0,1	0,3
U-SA110	9	11m ²	168kg	0,2	0,2	0,4
NA145GK	7	11m ²	102kg	0,2	0,3	0,5

De modo geral, os módulos de micro-silício possuem um comportamento similar aos outros módulos testados e possuem um preço considerado acessível. Como já era esperado, as curvas de potência ficaram similares, pois os painéis possuem características físicas muito semelhantes. Os módulos desta tecnologia pesquisados obtiveram de modo geral um coeficiente construtivo baixo, por serem pesados.

5.1.6 COEFICIENTES PARA OS PAINÉIS DE OUTRAS TECNOLOGIAS

Nesta seção serão calculados os coeficientes técnicos e econômicos para os módulos de outras tecnologias. Na estão mostradas as potências máximas médias geradas mensalmente.

Figura 48 - Potência máxima Normalizada para módulos de outras tecnologias.



Fonte: do autor.

Os coeficientes K_{T1} obtidos para os dois painéis foram:

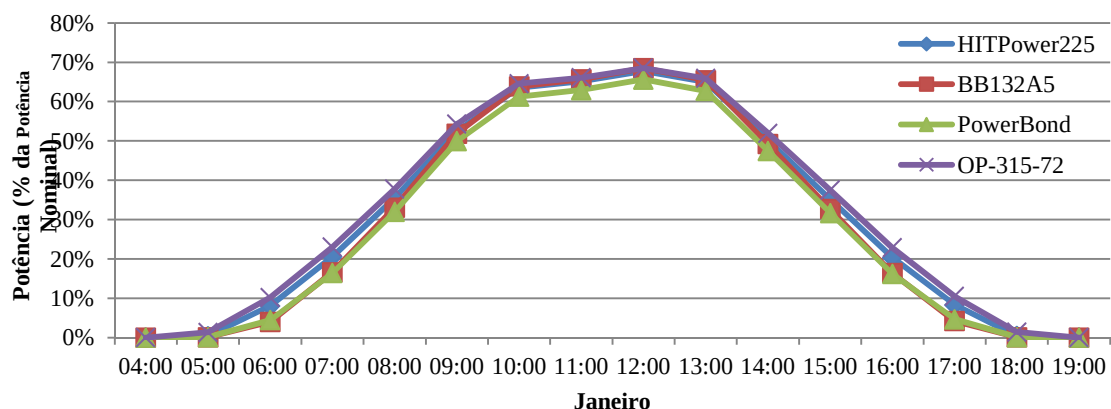
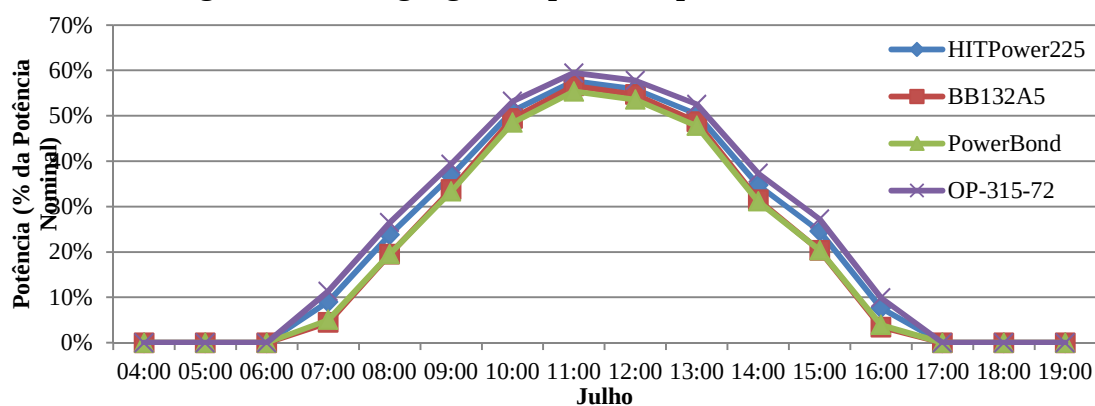
$$K_{T1_HITPower225} = 0,655$$

$$K_{T1_BB132A5} = 0,656$$

$$K_{T1_PowerBond} = 0,633$$

$$K_{T1_OP-315-72} = 0,680$$

Percebe-se que ambos os módulos obtiveram potências similares. Isso pode ser melhor visualizado através das curvas de energia gerada por hora, disponíveis nas figuras abaixo:

Figura 49 - Energia gerada por hora para o mês de Julho**Figura 50 - Energia gerada por hora para o mês de Julho**

Fonte: do autor.

Nas tabelas seguintes estão disponíveis os valores de potência na saída do painel por hora e mês. Na sequência estão calculados os coeficientes K_{T2} para os módulos.

Tabela 46 - Potência de Saída – HITPower 225

	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0%	0%	8%	21%	35%	53%	64%	65%	68%	65%	50%	35%	20%	8%	0%	0%
fev	0%	0%	7%	17%	39%	49%	60%	70%	76%	65%	48%	37%	21%	7%	0%	0%
mar	0%	0%	4%	20%	37%	52%	63%	68%	65%	63%	51%	32%	17%	4%	0%	0%
abr	0%	0%	0%	14%	30%	47%	60%	65%	66%	63%	43%	29%	14%	1%	0%	0%
mai	0%	0%	0%	10%	26%	40%	54%	61%	60%	55%	39%	29%	11%	0%	0%	0%
jun	0%	0%	0%	7%	23%	37%	51%	55%	59%	51%	39%	23%	7%	0%	0%	0%
jul	0%	0%	0%	9%	24%	37%	51%	58%	56%	50%	35%	25%	8%	0%	0%	0%
ago	0%	0%	0%	13%	27%	45%	60%	57%	60%	54%	44%	28%	12%	0%	0%	0%
set	0%	0%	2%	14%	26%	49%	51%	66%	68%	56%	47%	27%	15%	3%	0%	0%
out	0%	0%	5%	17%	34%	47%	65%	65%	66%	58%	49%	33%	17%	5%	0%	0%
nov	0%	0%	7%	21%	36%	55%	59%	65%	66%	65%	53%	37%	21%	7%	0%	0%
dez	0%	1%	8%	22%	36%	55%	62%	67%	70%	63%	52%	37%	23%	8%	1%	0%

Tabela 47 - Potência de Saída – BB132A5

	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0%	0%	4%	17%	33%	52%	64%	66%	69%	65%	49%	33%	16%	4%	0%	0%
fev	0%	0%	3%	13%	36%	48%	60%	71%	78%	65%	46%	35%	17%	3%	0%	0%
mar	0%	0%	1%	15%	35%	52%	63%	69%	65%	63%	51%	29%	13%	1%	0%	0%
abr	0%	0%	0%	10%	27%	45%	59%	66%	67%	63%	41%	26%	9%	0%	0%	0%
mai	0%	0%	0%	6%	22%	38%	52%	61%	59%	55%	37%	26%	6%	0%	0%	0%
jun	0%	0%	0%	3%	19%	34%	49%	54%	58%	49%	36%	19%	3%	0%	0%	0%
jul	0%	0%	0%	4%	19%	34%	49%	57%	55%	49%	31%	20%	3%	0%	0%	0%
ago	0%	0%	0%	8%	23%	43%	59%	56%	59%	52%	42%	24%	7%	0%	0%	0%
set	0%	0%	1%	9%	22%	47%	49%	66%	68%	55%	45%	23%	10%	1%	0%	0%
out	0%	0%	2%	12%	30%	45%	65%	65%	66%	57%	48%	30%	13%	2%	0%	0%
nov	0%	0%	3%	17%	34%	54%	59%	66%	66%	65%	52%	35%	17%	3%	0%	0%
dez	0%	0%	4%	18%	34%	54%	62%	67%	71%	63%	52%	35%	19%	4%	0%	0%

Tabela 48 - Potência de Saída – PowerBond ePVL

	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0%	0%	4%	16%	32%	50%	61%	63%	66%	63%	47%	32%	16%	5%	0%	0%
fev	0%	0%	4%	13%	35%	46%	58%	68%	74%	63%	45%	34%	17%	3%	0%	0%
mar	0%	0%	2%	15%	34%	50%	60%	66%	62%	61%	49%	28%	13%	1%	0%	0%
abr	0%	0%	0%	10%	26%	44%	57%	63%	64%	61%	40%	25%	9%	0%	0%	0%
mai	0%	0%	0%	6%	22%	37%	51%	59%	58%	53%	36%	25%	7%	0%	0%	0%
jun	0%	0%	0%	3%	19%	34%	48%	52%	57%	48%	36%	19%	4%	0%	0%	0%
jul	0%	0%	0%	5%	20%	33%	48%	55%	54%	48%	31%	20%	4%	0%	0%	0%
ago	0%	0%	0%	9%	23%	42%	58%	55%	58%	51%	41%	24%	8%	0%	0%	0%
set	0%	0%	1%	10%	22%	46%	48%	64%	66%	53%	44%	23%	10%	1%	0%	0%
out	0%	0%	2%	12%	30%	44%	63%	63%	64%	56%	47%	29%	13%	2%	0%	0%
nov	0%	0%	4%	17%	33%	53%	57%	63%	63%	63%	50%	34%	17%	3%	0%	0%
dez	0%	0%	5%	18%	33%	52%	60%	65%	68%	60%	50%	34%	19%	5%	0%	0%

Tabela 49 - Potência de Saída – OP-315-72

	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0%	1%	10%	23%	38%	54%	65%	66%	69%	66%	52%	37%	23%	10%	1%	0%
fev	0%	0%	9%	20%	41%	51%	61%	70%	76%	66%	49%	39%	23%	9%	0%	0%
mar	0%	0%	6%	22%	40%	54%	64%	69%	66%	64%	53%	34%	19%	5%	0%	0%
abr	0%	0%	1%	17%	32%	49%	61%	67%	67%	65%	45%	32%	16%	2%	0%	0%
mai	0%	0%	0%	13%	28%	42%	55%	63%	61%	57%	42%	32%	14%	0%	0%	0%
jun	0%	0%	0%	9%	26%	40%	53%	57%	61%	53%	41%	26%	10%	0%	0%	0%
jul	0%	0%	0%	11%	26%	39%	53%	59%	58%	53%	37%	27%	10%	0%	0%	0%
ago	0%	0%	0%	15%	30%	47%	61%	59%	61%	56%	47%	31%	14%	0%	0%	0%
set	0%	0%	4%	16%	29%	51%	53%	68%	69%	58%	49%	30%	17%	4%	0%	0%
out	0%	0%	7%	19%	36%	49%	66%	66%	67%	60%	51%	36%	20%	7%	0%	0%
nov	0%	1%	9%	23%	39%	57%	61%	66%	67%	66%	55%	39%	24%	9%	0%	0%
dez	0%	2%	10%	25%	39%	56%	63%	68%	70%	64%	54%	39%	25%	10%	2%	0%

Os coeficientes K_{T2} estão calculados abaixo:

$$K_{T2_HITPower225} = 0,183$$

$$K_{T2_BB132A5} = 0,173$$

$$K_{T2_PowerBond} = 0,169$$

$$K_{T2_OP-315-72} = 0,192$$

Os preços dos módulos estão mostrados abaixo, juntamente com os coeficientes.

Tabela 50 - Preços dos módulos de outras tecnologias.

	Preço do Módulo	Preço por Watt Instalado
HIT Power 225	U\$579,00	U\$2,57
BB132A5	U\$650,00	U\$4,48
PowerBond ePVL	U\$339,00	U\$2,33
OP-315-72	U\$399,00	U\$1,27

$$K_{E_HITPower225} = 0,743$$

$$K_{E_BB132A5} = 0,552$$

$$K_{E_PowerBond} = 0,767$$

$$K_{E_OP-315-72} = 0,873$$

Percebe-se que o painel OP-315-72 possui um ótimo custo-benefício, ao contrário do módulo translúcido BB132A5, que obteve um dos preços mais caros entre os módulos pesquisados.

O coeficiente K_C caracteriza a planta fisicamente. Ele leva em consideração, como visto anteriormente, o peso e a área mínima necessárias para a obtenção de uma planta de 1kWp. Abaixo os coeficientes para os painéis pesquisados.

Tabela 51 - Coeficiente K_C para os módulos estudados.

	Qtde	Área	Peso	K_s	K_{wt}	K_C
HIT Power 225	4	6m ²	71kg	0,4	0,4	0,8
BB132A5	7	11m ²	219kg	0,2	0,1	0,3
PowerBond ePVL	7	14m ²	51kg	0,1	0,4	0,5
OP-315-72	3	6m ²	69kg	0,4	0,4	0,8

De modo geral, os módulos possuem um comportamento similar aos outros módulos testados e possuem um preço considerado acessível. Os parâmetros construtivos dos módulos da SUNIVA e SANY estão entre os melhores pesquisados, principalmente por precisarem de pouco espaço e possuírem pouco peso pela energia que geram por painel. Já o módulo translúcido foi o módulo mais pesado entre os pesquisados. O PowerBond EPVL possui peso reduzido por ser flexível.

5.2 ESCOLHA DOS MÓDULOS PARA PROJETO DA PLANTA DE 6kWp

Na Tabela 52 estão mostrados os parâmetros obtidos para os módulos estudados. Eles estão organizados por tecnologia. Os coeficientes K_{T1} e K_{T2} já estão calculados.

Tabela 52 - Coeficientes para os módulos estudados

	K_{T1}	K_{T2}	K_E	K_C
PROTECT ASI	0,677	0,171	0,752	0,2
NA142H%	0,668	0,169	0,820	0,4
CX3	0,678	0,18	0,896	0,6
FS277	0,681	0,19	0,616	0,6
FS390	0,661	0,183	0,667	0,6
PowerFlex 300	0,647	0,175	0,85	0,8
MS140GG	0,637	0,179	0,85	0,5
Q.Smart	0,657	0,187	0,862	0,5
STN-140	0,626	0,169	0,801	0,6
PowerMax SMART	0,676	0,184	0,77	0,5
PowerMax STRONG	0,654	0,189	0,859	0,5
SF-160S	0,667	0,178	0,85	0,5
μm-Si 130 Plus	0,662	0,173	0,867	0,3
U-SA110	0,649	0,163	0,781	0,4
NA145GK	0,656	0,173	0,811	0,5
HIT Power 225	0,655	0,183	0,743	0,8
BB132A5	0,656	0,173	0,552	0,3
PowerBond ePVL	0,633	0,169	0,767	0,5
OP-315-72	0,680	0,192	0,873	0,8

A partir dos parâmetros acima pode-se calcular o coeficiente técnico (K_T), econômico (K_E) e construtivo (K_C) totais do módulo. O coeficiente técnico será a média dos coeficientes K_{T1} e K_{T2} normalizando em relação ao maior valor $K_{T1máx}$ e $K_{T2máx}$. Aqui se escolheu a média para que os dois parâmetros tenham pesos iguais dentro do coeficiente técnico. Os coeficientes foram então normalizados em relação ao maior valor obtido para cada um deles. O coeficiente construtivo não foi normalizado. Os resultados estão mostrados na tabela 53:

Tabela 53 - Tabela com os Coeficientes Normalizados

	FABRICANTE	KT	KE	KC
PROTECT ASI	SCHOTT SOLAR	0,942	0,752	0,2
NA142H5	SHARP	0,931	0,820	0,4
CX3	CALYXO	0,967	0,896	0,6
FS277	FIRST SOLAR	0,995	0,616	0,6
FS390	FIRST SOLAR	0,962	0,667	0,6
PowerFlex 300	GLOBAL SOLAR	0,931	0,85	0,8
MS140GG	MIASOLÉ	0,934	0,85	0,5
Q.Smart	Q.CELLS	0,969	0,862	0,5
STN-140	STION	0,900	0,801	0,6
PowerMax SMART	AVANCIS	0,975	0,77	0,5
PowerMax STRONG	AVANCIS	0,972	0,859	0,5
SF-160S	SOLAR FRONTIER	0,953	0,85	0,5
µm-Si 130 Plus	BOSCH	0,937	0,867	0,3
U-SA110	KANEKA	0,901	0,781	0,4
NA145GK	SHARP	0,932	0,811	0,5
HIT Power 225	SANYO	0,957	0,743	0,8
BB132A5	BEYOUND-PV	0,932	0,552	0,3
PowerBond ePVL	UNI-SOLAR	0,905	0,767	0,5
OP-315-72	SUNIVA	0,999	0,873	0,8

Na Tabela 54 estão mostrados os módulos organizados em ordem decrescente. Percebe-se que no topo da lista está o modulo OP-315-72, da SUNIVA. Esse módulo é tecnologia exclusiva da empresa. Outra tecnologia que ficou com bons coeficientes foi a de CdTe, com o módulo CX-3 e FS-277 entre os que mais geraram energia. Os módulos de CiGS também possuíram bons resultados. O módulo da BOSCH obteve vantagem principalmente no preço, sendo um dos mais baratos entre os painéis pesquisados. A tecnologia menos vantajosa foi a de silício amorfo. Os dois módulos não obtiveram resultados bons em nenhum dos critérios.

Tabela 54 – Módulos organizados em ordem decrescente para os três parâmetros.

	K_T		K_E		K_C
OP-315-72	1,000	CX3	1,000	PowerFlex 300	0,8
FS277	0,995	OP-315-72	0,974	HIT Power 225	0,8
PowerMax SMART	0,975	µm-Si 130 Plus	0,968	OP-315-72	0,8
PowerMax STRONG	0,972	Q.Smart	0,962	CX3	0,6
Q.Smart	0,969	PowerMax STRONG	0,959	FS277	0,6
CX3	0,967	PowerFlex 300	0,949	FS390	0,6
FS390	0,962	MS140GG	0,949	STN-140	0,6
HIT Power 225	0,957	SF-160S	0,949	MS140GG	0,5
SF-160S	0,953	NA142H5	0,915	Q.Smart	0,5
PROTECT ASI	0,942	NA145GK	0,905	PowerMax SMART	0,5
µm-Si 130 Plus	0,937	STN-140	0,894	PowerMax STRONG	0,5

MS140GG	0,934	U-SA110	0,872	SF-160S	0,5
NA145GK	0,932	PowerMax SMART	0,859	NA145GK	0,5
BB132A5	0,932	PowerBond ePVL	0,856	PowerBond ePVL	0,5
PowerFlex 300	0,931	PROTECT ASI	0,839	NA142H5	0,4
NA142H5	0,931	HIT Power 225	0,829	U-SA110	0,4
PowerBond ePVL	0,905	FS390	0,744	µm-Si 130 Plus	0,3
U-SA110	0,901	FS277	0,688	BB132A5	0,3
STN-140	0,900	BB132A5	0,616	PROTECT ASI	0,2

Para este projeto o parâmetro K_C foi desconsiderado pelos motivos relatados anteriormente. Já os parâmetros K_T e K_E foram considerados iguais, ou seja, o peso de cada um será 50%. Como a proposta é o projeto de uma planta experimental com diferentes tecnologias, serão escolhidos os seis painéis mais bem colocados com tecnologias diferentes. Os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 55.

Tabela 55 – Coeficientes obtidos

	K_T	K_E	K_T+K_E	Tecnologia
OP-315-72	0,500	0,487	0,987	ARTSUN
CX3	0,483	0,500	0,983	CdTe
Q.Smart	0,485	0,481	0,966	CiGS
PowerMax STRONG	0,486	0,479	0,966	CiS
µm-Si 130 Plus	0,468	0,484	0,952	um-Si
SF-160S	0,477	0,474	0,951	CiS
MS140GG	0,467	0,474	0,941	CiGS
PowerFlex 300	0,465	0,474	0,940	CiGS
NA142H5	0,465	0,458	0,923	a-Si
NA145GK	0,466	0,453	0,919	um-Si
PowerMax SMART	0,488	0,430	0,917	CiS
STN-140	0,450	0,447	0,897	um-Si
HIT Power 225	0,479	0,415	0,893	HIT
PROTECT ASI	0,471	0,420	0,891	a-Si
U-SA110	0,450	0,436	0,886	um-Si
PowerBond ePVL	0,452	0,428	0,880	m-junção
FS390	0,481	0,372	0,853	CdTe
FS277	0,497	0,344	0,841	CdTe
BB132A5	0,466	0,308	0,774	Translúcido

O parâmetro que mais influenciou na escolha dos módulos foi o critério econômico, pois tecnicamente os painéis tiveram resultados similares. Isso é esperado pelo fato dos parâmetros como o coeficiente de temperatura de tensão e corrente, que mostra o comportamento do módulo quando variada a temperatura, serem similares entre todas as tecnologias estudadas. Os módulos escolhidos estão na Tabela 56.

Apesar do módulo de silício amorfo ter obtido resultado inferior aos módulos SF-160S, MS140GG e PowerFlex 300, os últimos módulos foram retirados pois tiveram resultados inferiores à módulos da mesma tecnologia.

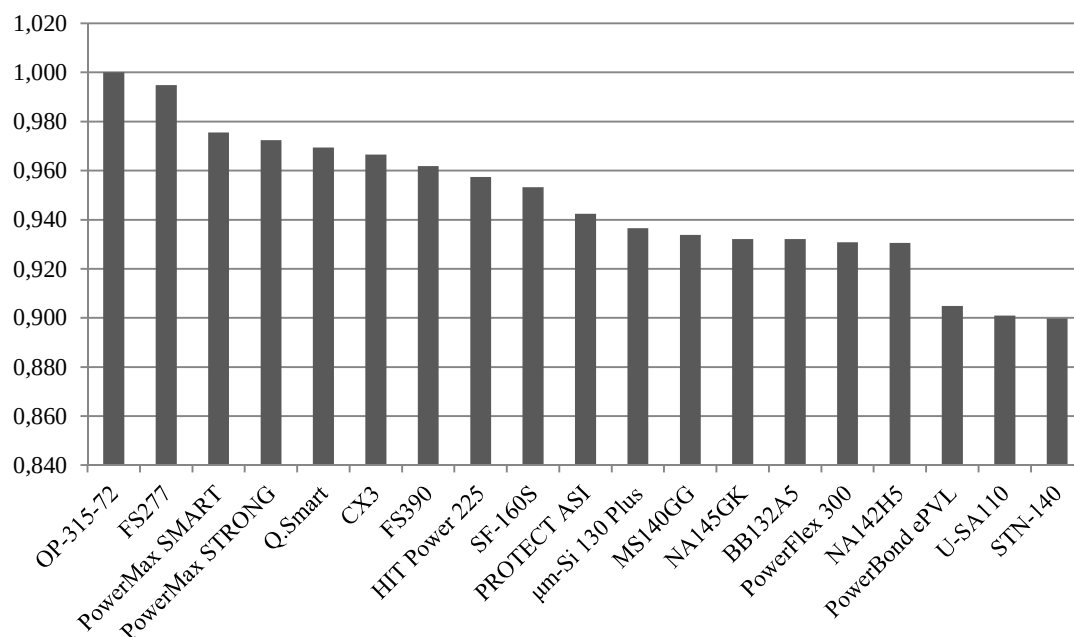
Tabela 56 – Módulos escolhidos

	Fabricante	K_T	K_E	$K_T + K_E$	Tecn.
CX3	CALYXO	0,490	0,500	0,990	CdTe
OP-315-72	SUNIVA	0,482	0,470	0,952	ARTSUN
Q.Smart UF L 115	Q.CELLS	0,490	0,456	0,945	CiGS
PowerMax Strong	AVANIS	0,483	0,454	0,937	CiS
um-Si plus 130	BOSCH	0,478	0,442	0,920	μ -Si
NA-142H5	SHARP	0,471	0,442	0,913	a-Si

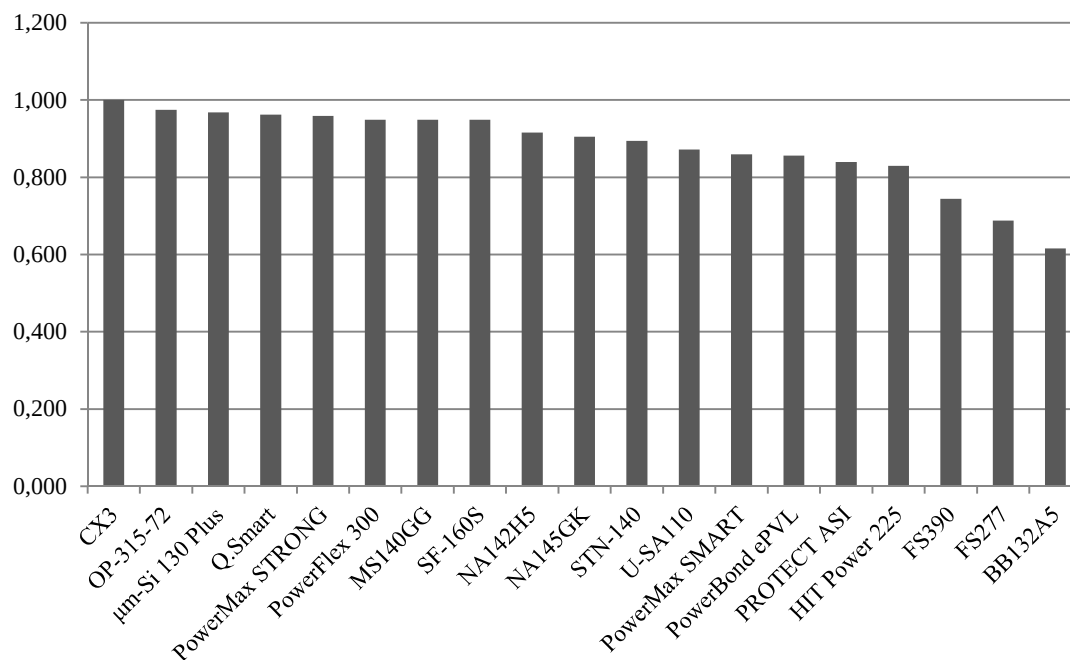
5.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E DO MÉTODO PROPOSTO

O objetivo desde trabalho era definir quais as tecnologias alternativas ao silício cristalino são mais vantajosas atualmente, além de fornecer ao leitor métodos sobre os quais ele pode, a partir de uma lista de módulos fotovoltaicos, escolher o mais vantajoso para sua aplicação. Para tal, primeiramente foi realizada a análise matemática do modelo, seguida pela definição das tecnologias a serem simuladas. Os resultados obtidos foram comparados através das figuras de mérito K_T , K_E e K_C .

Na Figura 51 estão mostrados os coeficientes técnicos obtidos através do método. A tecnologia que obteve melhor resultado foi a ARTSUn. As tecnologias CdTe, CiS e CiGS conseguiram resultados similares, com uma diferença de aproximadamente 4% comparada com o módulo OP-315-72. Os módulos com piores coeficientes foram os flexíveis e de micro-silício. Mesmo assim, a diferença máxima entre o módulo de melhor e pior coeficiente foi de 10%, o que significa que as tecnologias apresentaram comportamento similar para diferentes condições de temperatura e irradiação.

Figura 51 – Coeficientes K_T 

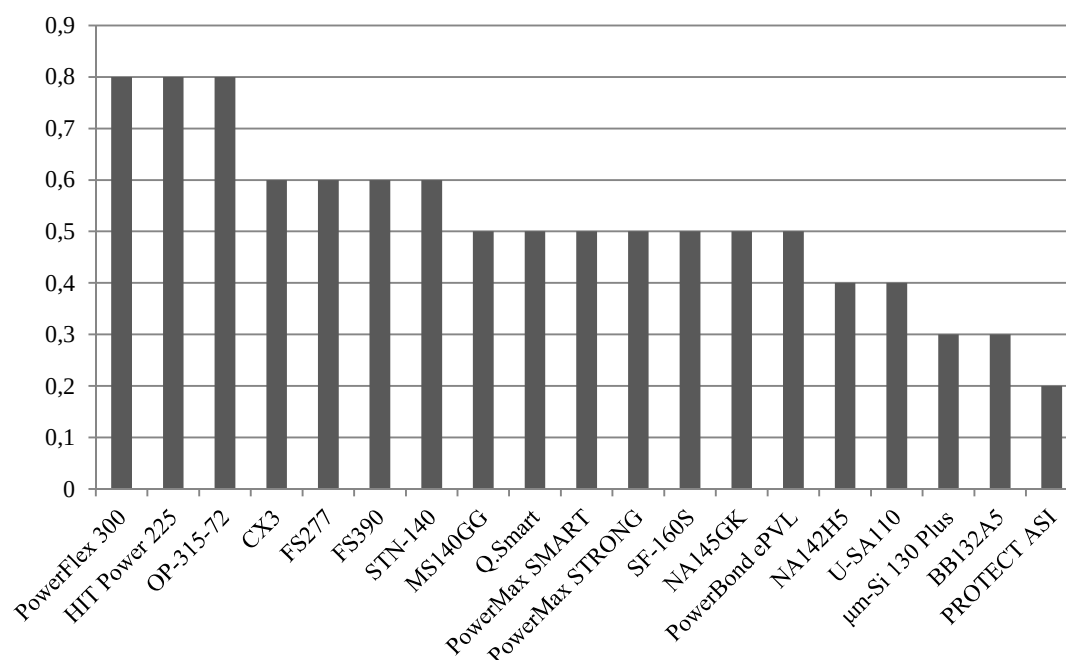
A Figura 52 mostra o coeficiente econômico para cada tecnologia estudada. Neste caso já há uma maior diferença entre os coeficientes obtidos, pois, dependendo do fabricante, os preços podem variar consideravelmente.

Figura 52 – Coeficientes K_E 

Os parâmetros construtivos são mostrados na Figura 53. Neste critério levam vantagem as tecnologias que possuem bom rendimento, como a HIT Power, a OP-315

e a CX-3, ou as tecnologias que são flexíveis. O módulo translúcido e de silício amorfo foram os de pior coeficiente construtivos, pois são pesados e grandes, devido à sua baixa eficiência.

Figura 53 - Coeficientes K_C



Os resultados obtidos através das figuras de mérito definidas pelo método auxiliaram na escolha dos módulos fotovoltaicos. Entre as vantagens desse método destaca-se a simplicidade, pois possui poucas etapas bem definidas, a adaptabilidade, pois pode ser facilmente modificado para simular outras condições de temperatura e irradiação solar. As desvantagens do método utilizado foram: o modelo matemático não funcionou corretamente para todas as tecnologias. O método ainda não obteve comprovação prática, além de não considerar efeitos de sombreamento.

Retifica-se que neste trabalho foram simuladas as condições climáticas de Florianópolis, porém o método pode ser utilizado para qualquer condição de irradiação e temperatura.

Sugestões de trabalhos futuros seria a utilização de outros modelos matemáticos que melhor se adequem à tecnologia utilizada; construção de uma usina experimental para validação do método.

Assim finaliza-se a escolha dos módulos fotovoltaicos. No decorrer deste trabalho, será escolhido o inversor e o esquema de ligação dos painéis.

6 ESCOLHA DO INVERSOR SOLAR

Escolhidos os módulos que serão utilizados, a próxima etapa é escolher os inversores. Conforme definido no capítulo introdutório, a planta terá inversores Grid-Tie, ou seja, conectados diretamente na rede. Segundo a *Green Tech Media*, o mercado mundial de inversores solares é definido conforme a Figura 54.

Figura 54 – Mercado mundial de inversores para geração solar



Fonte: Green Tech Media [42]

Para este projeto serão escolhidos inversores das marcas líderes de mercado: SMA, Power-One, Fronius, KACO e New Energy. Os parâmetros de escolha serão três: a eficiência do inversor, seu preço e a tensão de *startup*, que é o mínimo nível de tensão necessário nos terminais do inversor solar para que ele possa funcionar. Como cada um dos painéis escolhidos possui características elétricas distintas, serão necessários seis inversores de frequência, um para cada tecnologia. Os arranjos dos

módulos, assim como a quantidade de painéis necessários, poderão mudar de acordo com as especificações de tensão e corrente de entrada do inversor escolhido.

A Tabela 57 mostra os modelos de menor potência para cada um dos principais fabricantes. O valor inicial de potência comum para os inversores comerciais é de 2kWp. O rendimento dos produtos foram similares – em torno de 96%, assim como a tensão mínima e máxima de MPPT, além da corrente máxima. O rendimento do inversor foi considerado constante neste trabalho por não se conhecer a curva de rendimento.

Tabela 57 – Lista de Inversores Solares

Fabricante	Modelo	$P_{max}(W)$	η (%)	$V_{max}(V)$	$V_{mpp}(V)$	$V_{min}(V)$	$I_{max}(A)$	Preço
SMA	SB2000	2500	96,0	600	480	175	15,0	U\$1.567,00
KACO	BP1502	2000	95,9	500	400	125	13,0	U\$1.250,00
FRONIUS	IG2000	2000	95,2	500	450	150	13,6	U\$1.350,00
Power-One	Uno-2.0	2000	96,6	520	470	170	15,0	U\$1.052,00

A tensão mínima diz respeito ao nível mínimo de potencial elétrico que deve existir nos terminais do inversor para que o mesmo entre em funcionamento. Lembrando que a tensão nos terminais do painel é máxima quando não há circulação de corrente (de acordo com a figura $I \times V$) e que é necessário que o arranjo fotovoltaico garanta o nível de tensão mínimo de operação do inversor em seus terminais.

É necessário tomar o devido cuidado para que o arranjo de módulos fotovoltaicos fique com a tensão e corrente dentro dos limites dos inversores. Nas próximas seções serão realizado os estudos de comportamento da tensão para as condições de temperatura e irradiação obtidas no capítulo 2 para os módulos escolhidos, e então escolhidos os inversores que menos influência no funcionamento de cada módulo.

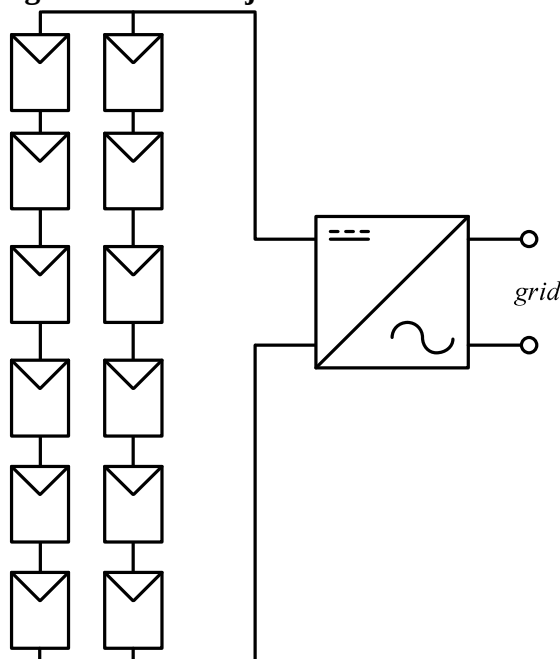
6.1 ESCOLHA DO INVERSOR PARA O MÓDULO CX-3

Antes de escolher o inversor, é necessário definir como será o arranjo para os módulos de CdTe. O arranjo foi definido para manter a tensão de circuito aberto e a corrente de curto circuito dentro dos limites estipulados pelos inversores. Na Figura 55

é mostrado o arranjo resultante. Foram adicionados módulos em série para aumentar a tensão de saída linearmente. Como são necessários doze módulos para se obter uma potência resultante próximos de 1kWp, foram definidos dois arranjos em paralelo, cada um composto por seis módulos em série.

Adicionando poucas linhas de programação ao programa utilizado para simular o comportamento do módulo para diferentes condições de operação, podemos obter as tabelas de tensão de máxima potência e tensão de circuito aberto para o arranjo para as mesmas condições simuladas anteriormente.

Figura 55 – Arranjo dos módulos de CdTe.



Fonte: do autor.

Na tabela 76 estão mostradas as tensões de circuito aberto, enquanto que na Tabela 77 estão mostradas as tensões de máxima potência para o módulo CX-3.

Tabela 58 – Tensão de Circuito Aberto para os módulos CX-3

Tensão de Circuito Aberto (V)																	
	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	
jan	0	50	312	348	353	355	354	354	353	354	355	353	348	315	53	0	
fev	0	0	294	345	354	355	354	353	353	354	355	354	348	282	0	0	
mar	0	0	189	348	355	356	355	354	355	355	356	354	346	178	0	0	
abr	0	0	53	343	355	357	357	356	356	357	357	355	342	67	0	0	
mai	0	0	0	334	356	359	359	359	359	359	359	357	337	0	0	0	
jun	0	0	0	285	357	361	362	362	362	362	362	357	298	0	0	0	

jul	0	0	0	326	358	362	363	363	363	363	361	358	302	0	0	0
ago	0	0	0	344	359	362	361	362	361	362	362	359	341	0	0	0
set	0	0	130	346	357	361	361	360	360	361	361	358	347	147	0	0
out	0	0	224	349	358	359	359	359	359	359	359	358	350	235	0	0
nov	0	21	297	351	356	357	357	356	356	356	357	356	351	277	19	0
dez	0	79	315	350	355	356	355	355	354	355	356	355	350	314	79	0

Tabela 59 - Tensão de Máxima Potência para os módulos CX-3

Tensão de Máxima Potência (V)																
	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0	24	163	286	291	284	278	277	275	277	285	291	286	168	26	0
fev	0	0	148	278	290	286	280	274	269	277	286	291	287	141	0	0
mar	0	0	94	285	292	285	279	276	279	279	285	292	277	89	0	0
abr	0	0	26	257	295	290	283	280	279	282	292	295	245	33	0	0
mai	0	0	0	198	296	295	289	285	286	288	295	297	208	0	0	0
jun	0	0	0	142	296	298	294	292	289	294	298	296	149	0	0	0
jul	0	0	0	173	297	299	294	291	292	295	300	298	152	0	0	0
ago	0	0	0	233	298	296	288	290	288	292	296	298	218	0	0	0
set	0	0	64	248	298	294	293	284	283	290	295	298	256	73	0	0
out	0	0	111	276	296	292	282	283	282	287	291	296	279	117	0	0
nov	0	10	150	289	294	286	284	280	280	280	287	294	290	138	8	0
dez	0	38	166	289	292	284	280	277	275	279	285	292	289	165	38	0

Para melhor aproveitamento da energia, foi escolhido o inversor da KACO, por causa da baixa tensão de *startup* (125V) e pelo fato da tensão de circuito aberto ser menor que a tensão máxima permitida pelo inversor. A escolha de um inversor com baixa tensão de *startup* fará com que o módulo possa gerar energia nas primeiras horas do dia e ao entardecer. Os manuais dos inversores aconselham não utilizar um arranjo fotovoltaico com a tensão de circuito aberto nominal equivalente maior do que a tensão máxima do inversor.

Fabricante	Modelo	$P_{max}(W)$	η (%)	$V_{max}(V)$	$V_{mpp}(V)$	$V_{min}(V)$	$I_{max}(A)$	Preço
KACO	BP1502	2000	95,9	500	400	125	13,0	US\$1.250,00

Abaixo, na Tabela 60, está mostrada a energia resultante na saída do inversor, considerando a não geração quando $V_{mpp} < V_{startup}$ e o rendimento de 95,9% constante.

Tabela 60 – Potência do Sistema com Inversor – CX3

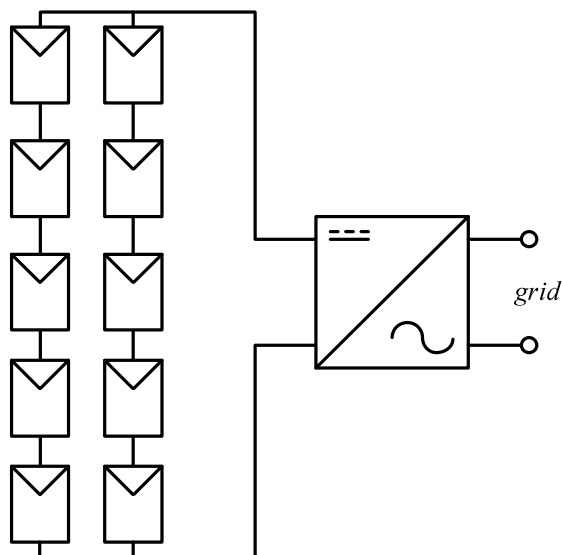
Máxima Potência Fornecida (W)																
	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0	0	37	168	343	533	647	665	690	663	507	339	166	39	0	0
fev	0	0	31	129	379	493	613	711	773	663	479	363	173	28	0	0
mar	0	0	0	154	363	532	638	694	658	644	521	299	124	0	0	0
abr	0	0	0	94	275	468	606	665	675	643	429	269	84	0	0	0

mai	0	0	0	55	226	390	539	622	606	559	382	266	59	0	0	0
jun	0	0	0	28	192	357	507	550	595	507	375	189	31	0	0	0
jul	0	0	0	42	199	350	509	579	561	502	326	207	32	0	0	0
ago	0	0	0	76	239	444	602	573	603	537	434	252	66	0	0	0
set	0	0	0	86	227	485	506	670	684	560	463	242	92	0	0	0
out	0	0	17	116	316	464	660	655	667	586	494	311	124	19	0	0
nov	0	0	31	169	351	558	599	664	666	661	533	359	175	27	0	0
dez	0	0	38	186	350	553	631	679	709	637	531	362	192	37	0	0

6.2 ESCOLHA DO INVERSOR PARA O MÓDULO Q.SMART UF L 115

Antes de escolher o inversor, é necessário definir como será o arranjo para os módulos de CiGS. O arranjo foi definido para manter a tensão de circuito aberto e a corrente de curto circuito dentro dos limites estipulados pelos inversores. Como a quantidade mínima necessária – 9 módulos – não pode ser em série por causa da tensão de circuito aberto nominal (próxima dos 1000V), foi adicionado mais um módulo Q.SMART UF L 115, para então fazer um arranjo misto de painéis. A associação ficou a seguinte: dois arranjos em paralelo, cada um com cinco módulos em série – conforme mostrado na Figura 56.

Figura 56 - Arranjo dos módulos de CiGS.



Fonte: do autor.

Na tabela 79 estão mostradas as tensões de circuito aberto, enquanto que na Tabela 80 estão mostradas as tensões de máxima potência para o módulo CX-3.

Tabela 61 - Tensão de Circuito Aberto para os módulos Q.SMART UF L 115

Tensão de Circuito Aberto (V)																	
	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	
jan	0	227	411	425	429	428	425	425	424	425	428	429	425	411	241	0	
fev	0	0	408	423	429	428	426	423	421	425	428	429	425	407	0	0	
mar	0	0	396	427	431	430	427	426	427	427	430	431	425	393	0	0	
abr	0	0	241	426	434	434	432	430	430	431	435	434	425	300	0	0	
mai	0	0	0	426	437	439	437	437	437	437	439	438	427	0	0	0	
jun	0	0	0	422	441	444	443	442	441	443	444	441	424	0	0	0	
jul	0	0	0	429	442	445	444	442	443	444	445	443	425	0	0	0	
ago	0	0	0	433	442	442	440	441	440	441	443	442	432	0	0	0	
set	0	0	390	434	440	441	441	437	437	440	441	441	434	397	0	0	
out	0	0	409	432	438	437	435	435	434	436	437	438	433	411	0	0	
nov	0	99	415	431	435	433	432	430	430	431	433	435	432	412	86	0	
dez	0	331	413	428	431	429	427	426	425	427	430	431	428	413	331	0	

Tabela 62 – Tensão de Máxima Potência Para os Módulos Q.SMART UF L 115

		Tensão de Máxima Potência (V)															
	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	
jan	0	110	336	349	349	342	336	335	334	335	343	349	349	337	116	0	
fev	0	0	333	348	348	343	338	332	328	335	344	348	350	331	0	0	
mar	0	0	314	351	350	344	339	336	338	339	344	352	350	310	0	0	
abr	0	0	116	352	356	351	344	340	340	342	352	356	351	148	0	0	
mai	0	0	0	352	360	358	352	348	349	351	359	360	353	0	0	0	
jun	0	0	0	347	365	363	359	357	355	359	363	365	349	0	0	0	
jul	0	0	0	354	366	365	359	357	358	359	365	366	350	0	0	0	
ago	0	0	0	359	364	360	353	355	353	357	360	364	358	0	0	0	
set	0	0	279	359	363	358	357	348	348	354	359	363	359	300	0	0	
out	0	0	331	358	359	355	345	345	344	349	354	359	358	333	0	0	
nov	0	46	339	355	354	346	344	341	340	341	348	354	356	337	39	0	
dez	0	175	339	352	350	343	339	336	335	339	344	350	352	339	175	0	

Como esse painel possui uma tensão de máxima potencia maior, pode-se utilizar um inversor com tensão de startup maior e com maior rendimento. Por isso foi escolhido o inversor da Power One.

Fabricante	Modelo	$P_{max}(W)$	η (%)	$V_{max}(V)$	$V_{mpp}(V)$	$V_{min}(V)$	$I_{max}(A)$	Preço
Power-One	Uno-2.0	2000	96,6	520	470	170	15,0	U\$1.052,00

Na tabela 81 está a potência entregue à rede após ser condicionada pelo inversor.

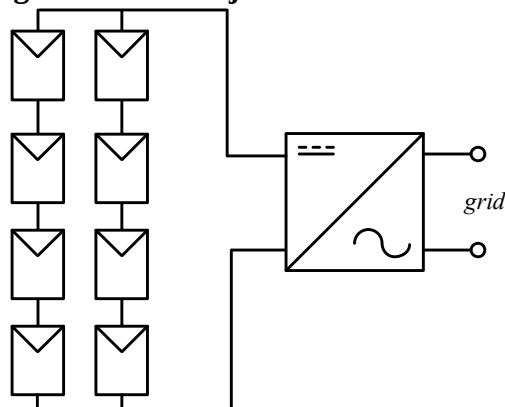
Tabela 63 - Potência do Sistema com Inversor – Q.SMART UF L 115

	Máxima Potência Fornecida (W)															
	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0	0	89	232	394	571	678	694	719	692	546	391	230	93	0	0
fev	0	0	78	195	427	533	645	738	798	692	520	412	236	73	0	0
mar	0	0	40	220	413	571	670	725	690	677	560	354	191	36	0	0
abr	0	0	0	163	335	514	644	700	710	680	477	329	152	0	0	0
mai	0	0	0	117	292	445	584	664	648	604	437	329	125	0	0	0
jun	0	0	0	76	263	417	559	599	641	559	434	260	82	0	0	0
jul	0	0	0	100	269	411	561	628	610	554	389	278	84	0	0	0
ago	0	0	0	145	306	498	648	621	649	586	489	318	133	0	0	0
set	0	0	20	157	295	536	556	713	725	607	515	308	164	26	0	0
out	0	0	52	187	375	514	699	694	706	629	541	370	195	57	0	0
nov	0	0	80	235	405	599	638	699	701	696	575	412	242	72	0	0
dez	0	7	92	250	402	591	664	710	739	670	570	412	255	91	7	0

6.3 ESCOLHA DO INVERSOR PARA O MÓDULO POWERMAX STRONG

Assim como o módulo de CiGS, o módulo de CiS também necessitará do acréscimo de um painel para que o arranjo possa ser realizado. A quantidade mínima de módulos são 7, logo serão utilizado 8 painéis, num arranjo contendo 2 associações em paralelo, cada uma com 4 painéis em série, como pode ser visto na figura abaixo.

Figura 57 - Arranjo dos módulos de CiS.



Fonte: do autor.

Na Tabela 64 estão mostradas as tensões de circuito aberto, enquanto que na Tabela 65 estão mostradas as tensões de máxima potência para os módulos de CiS.

Tabela 64 - Tensão de Circuito Aberto para os módulos PowerMax Strong

Tensão de Circuito Aberto (V)																
	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0	54	215	224	226	226	225	225	224	225	226	226	224	216	58	0
fev	0	0	213	223	226	226	225	224	223	225	226	226	224	212	0	0
mar	0	0	196	224	227	226	226	225	225	226	226	226	223	189	0	0
abr	0	0	58	223	228	228	227	227	227	227	228	228	223	73	0	0
mai	0	0	0	222	229	230	230	229	229	229	230	229	223	0	0	0
jun	0	0	0	218	230	232	232	231	231	232	232	230	219	0	0	0
jul	0	0	0	222	231	232	232	232	232	232	232	231	220	0	0	0
ago	0	0	0	226	231	231	231	231	231	231	231	231	225	0	0	0
set	0	0	142	226	230	231	231	230	230	231	231	230	226	161	0	0
out	0	0	208	226	229	230	228	228	228	229	229	229	226	210	0	0
nov	0	23	216	226	228	228	227	227	227	227	228	228	226	214	20	0
dez	0	86	216	225	227	226	226	225	225	226	226	227	225	216	86	0

Tabela 65 - Tensão de máxima potência para os módulos PowerMax Strong

Tensão de Máxima Potência (V)																
	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0	27	170	187	186	181	176	176	175	176	182	186	187	171	28	0
fev	0	0	160	187	185	182	178	174	172	176	182	186	187	153	0	0
mar	0	0	104	188	186	182	178	175	177	177	182	188	187	97	0	0
abr	0	0	28	187	189	185	180	178	178	179	186	189	186	36	0	0
mai	0	0	0	183	192	189	185	182	183	184	189	191	184	0	0	0
jun	0	0	0	156	194	192	188	186	185	188	191	194	163	0	0	0
jul	0	0	0	178	194	192	188	186	187	188	193	194	165	0	0	0
ago	0	0	0	189	193	189	184	185	184	187	190	193	187	0	0	0
set	0	0	70	189	193	188	187	181	181	185	188	193	190	80	0	0
out	0	0	122	190	190	187	180	180	180	183	186	190	190	129	0	0
nov	0	11	162	190	188	182	181	178	178	178	183	188	190	151	9	0
dez	0	43	171	188	187	181	178	176	175	178	182	186	188	171	43	0

Pela baixa tensão de operação, esse painel também utilizará o inversor da KACO.

Fabricante	Modelo	$P_{max}(W)$	η (%)	$V_{max}(V)$	$V_{mpp}(V)$	$V_{min}(V)$	$I_{max}(A)$	Preço
KACO	BP1502	2000	95,9	500	400	125	13,0	US\$1.250,00

Na tabela abaixo está a potência entregue à rede, após ser condicionada pelo inversor.

Tabela 66 - Potência do Sistema com Inversor – PowerMax Strong

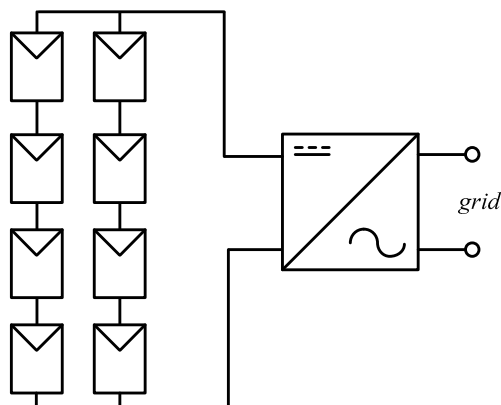
Máxima Potência Fornecida (W)																
	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0	0	64	216	388	573	684	700	725	698	548	385	213	67	0	0
fev	0	0	53	176	423	534	650	744	805	698	520	407	220	48	0	0
mar	0	0	0	203	407	573	675	730	695	681	562	346	171	0	0	0

abr	0	0	0	140	324	512	646	703	713	682	473	317	129	0	0	0
mai	0	0	0	90	276	438	583	664	648	602	429	315	98	0	0	0
jun	0	0	0	49	244	407	554	595	638	554	424	240	54	0	0	0
jul	0	0	0	72	250	400	556	624	606	549	377	259	56	0	0	0
ago	0	0	0	119	290	492	646	618	647	582	482	303	107	0	0	0
set	0	0	0	132	279	531	552	712	725	605	510	292	139	0	0	0
out	0	0	30	165	365	510	700	695	707	628	538	359	173	33	0	0
nov	0	0	54	218	398	599	639	702	704	699	575	405	224	0	0	0
dez	0	0	66	234	396	594	669	715	744	674	572	406	240	0	0	0

6.4 ESCOLHA DO INVERSOR PARA O MÓDULO UM-SI 130 PLUS

A quantidade mínima de módulos necessários para os módulos de micro-silício são 8. Eles serão arranjados conforme os módulos de CiS, e podem ser vistos na Figura 58.

Figura 58 - Arranjo dos módulos de μ -Si.



Fonte: do autor.

Na Tabela 67 estão mostradas as tensões de circuito aberto, enquanto que na Tabela 68 estão mostradas as tensões de máxima potência para os módulos de micro-silício.

Tabela 67 - Tensão de Circuito Aberto para os módulos μ -Si 130 Plus

	Tensão de Circuito Aberto (V)															
	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0	41	268	323	326	325	323	323	322	323	325	326	322	274	43	0
fev	0	0	244	320	326	325	324	322	320	323	325	326	323	232	0	0
mar	0	0	155	323	328	326	325	323	324	324	326	327	320	146	0	0
abr	0	0	43	319	329	329	328	326	326	327	330	329	317	55	0	0
mai	0	0	0	305	331	333	331	330	330	331	333	332	310	0	0	0

jun	0	0	0	233	333	335	335	335	334	335	335	333	245	0	0	0
jul	0	0	0	283	334	336	335	335	335	335	336	334	249	0	0	0
ago	0	0	0	319	334	335	333	333	333	334	335	334	315	0	0	0
set	0	0	105	322	333	334	334	331	331	333	334	333	323	120	0	0
out	0	0	182	324	332	332	329	329	329	330	331	332	325	192	0	0
nov	0	18	246	326	330	328	328	326	326	326	328	330	326	227	16	0
dez	0	64	272	324	328	326	325	323	323	325	326	328	325	271	64	0

Tabela 68 - Tensão de máxima potência para os módulos $\mu\text{-Si}$ 130 Plus

Tensão de Máxima Potência (V)																
	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0	20	134	263	273	266	261	260	258	260	268	273	263	137	21	0
fev	0	0	121	247	272	268	263	257	253	260	268	272	264	115	0	0
mar	0	0	77	261	273	268	263	259	261	262	268	274	244	72	0	0
abr	0	0	21	213	276	273	267	263	263	265	274	276	201	26	0	0
mai	0	0	0	162	277	278	273	269	270	273	278	278	169	0	0	0
jun	0	0	0	116	276	282	278	276	274	278	282	275	122	0	0	0
jul	0	0	0	141	277	283	278	276	276	279	283	278	124	0	0	0
ago	0	0	0	190	280	280	273	274	273	276	280	281	177	0	0	0
set	0	0	52	203	278	278	277	268	268	274	278	280	210	59	0	0
out	0	0	90	236	278	276	266	267	266	271	275	278	244	95	0	0
nov	0	8	122	266	276	269	267	263	263	264	271	276	268	112	7	0
dez	0	31	136	268	273	267	263	260	258	263	268	273	268	135	31	0

Pela baixa tensão de operação, esse painel também utilizará o inversor da KACO.

Fabricante	Modelo	$P_{max}(W)$	η (%)	$V_{max}(V)$	$V_{mpp}(V)$	$V_{min}(V)$	$I_{max}(A)$	Preço
KACO	BP1502	2000	95,9	500	400	125	13,0	US\$1.250,00

Na tabela abaixo está a potência entregue à rede, após ser condicionada pelo inversor.

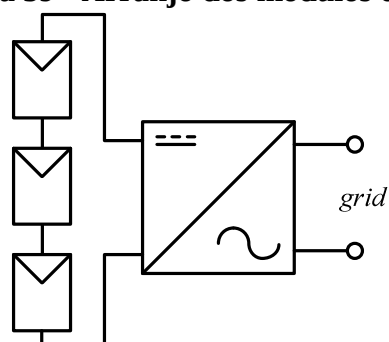
Tabela 69 - Potência do Sistema com Inversor – $\mu\text{-Si}$ 130 Plus

Máxima Potência Fornecida (W)																
	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0	1	32	153	330	526	644	662	689	660	499	327	151	34	1	0
fev	0	0	27	115	367	485	608	710	775	660	470	350	157	24	0	0
mar	0	0	11	140	350	524	634	693	655	641	513	285	110	9	0	0
abr	0	0	1	82	261	459	601	663	673	640	417	254	73	1	0	0
mai	0	0	0	47	210	378	531	618	601	552	369	250	52	0	0	0
jun	0	0	0	24	175	343	498	542	589	498	361	172	27	0	0	0
jul	0	0	0	36	181	335	500	573	554	492	311	190	28	0	0	0
ago	0	0	0	65	223	433	597	567	598	529	423	236	57	0	0	0
set	0	0	5	75	211	475	497	668	682	554	452	225	80	6	0	0
out	0	0	15	102	302	454	657	652	665	580	485	296	109	16	0	0
nov	0	0	27	153	338	551	594	662	664	658	525	346	159	23	0	0
dez	0	2	34	171	338	547	627	677	708	633	523	349	176	33	2	0

6.5 ESCOLHA DO INVERSOR PARA O MÓDULO OP-315-72

Como esse módulo é de maior potência, serão necessários somente 3 painéis em série para se obter a potência de projeto, conforme mostrado na Figura 59.

Figura 59 - Arranjo dos módulos de μ -Si.



Fonte: do autor.

Na Tabela 70 estão mostradas as tensões de circuito aberto para o arranjo, enquanto que na Tabela 71 estão mostradas as tensões de máxima potência para os módulos de micro-silício.

Tabela 70 - Tensão de Circuito Aberto para os módulos OP-315-72

		Tensão de Circuito Aberto (V)															
		4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0	107	120	124	125	125	124	124	124	124	125	125	124	120	107	0	
fev	0	0	119	123	125	125	125	124	124	124	125	125	124	119	0	0	
mar	0	0	117	124	126	125	125	125	125	125	125	125	123	116	0	0	
abr	0	0	109	124	126	126	126	126	126	126	126	126	124	111	0	0	
mai	0	0	0	124	127	128	128	127	127	128	128	127	124	0	0	0	
jun	0	0	0	123	128	129	129	129	129	129	129	128	124	0	0	0	
jul	0	0	0	125	128	129	129	129	129	129	129	128	124	0	0	0	
ago	0	0	0	126	128	129	128	128	128	129	129	128	125	0	0	0	
set	0	0	118	126	128	128	128	128	128	128	128	128	126	118	0	0	
out	0	0	120	125	127	128	127	127	127	127	128	127	126	120	0	0	
nov	0	102	121	125	126	126	126	126	126	126	126	126	125	120	101	0	
dez	0	111	120	124	125	125	125	125	124	125	125	125	124	120	111	0	

Tabela 71 - Tensão de máxima potência para os módulos OP-315-72

		Tensão de Máxima Potência (V)															
		4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0	88	99	102	102	101	100	100	100	100	102	102	102	99	88	0	
fev	0	0	99	102	102	102	101	100	99	100	102	102	102	98	0	0	
mar	0	0	97	102	103	102	101	100	101	101	102	103	102	96	0	0	
abr	0	0	90	103	104	103	102	102	102	102	104	104	102	91	0	0	
mai	0	0	0	103	105	105	104	103	104	104	105	105	103	0	0	0	
jun	0	0	0	103	106	106	105	105	105	105	106	106	103	0	0	0	
jul	0	0	0	104	107	107	106	105	105	106	107	107	103	0	0	0	
ago	0	0	0	105	106	106	105	105	104	105	106	106	104	0	0	0	
set	0	0	98	105	106	105	105	104	104	105	105	106	105	99	0	0	
out	0	0	100	104	105	104	103	103	103	103	104	105	104	100	0	0	
nov	0	83	100	104	104	103	102	102	102	102	103	104	104	100	82	0	
dez	0	91	100	103	103	102	101	101	100	101	102	103	103	100	91	0	

Esse painel, ao contrário dos outros estudados, possui uma baixa tensão de entrada, com a tensão de máxima potência próximo dos 100V para todo o espectro simulado. Por isso, foi utilizado um inversor da SMA, o SUNNY BOY 1200, cujas especificações encontram-se abaixo. Ele possui um preço reduzido, se comparado com os demais, porém também possui um menor rendimento, o que ocasiona menos energia gerada para a rede.

Fabricante	Modelo	$P_{max}(W)$	η (%)	$V_{max}(V)$	$V_{mpp}(V)$	$V_{min}(V)$	$I_{max}(A)$	Preço
SMA	SB1200	1320	92,1%	400V	320V	100V	12,6	US\$767,00

Na tabela abaixo está a potência entregue a rede, após ser condicionada pelo inversor.

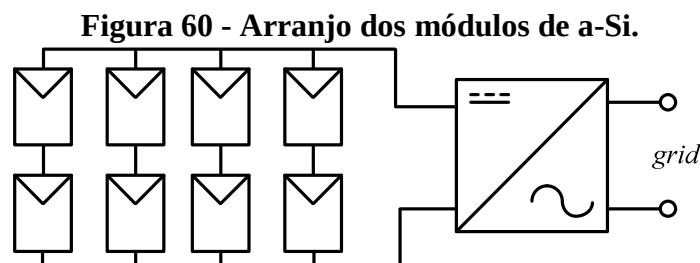
Tabela 72 - Potência do Sistema com Inversor – OP-315-72

		Máxima Potência Fornecida (W)															
		4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0	11	89	200	328	471	560	574	595	572	451	326	199	91	12	0	
fev	0	0	80	171	354	440	533	611	662	572	430	342	203	76	0	0	
mar	0	0	49	191	343	471	554	599	570	559	463	297	168	46	0	0	
abr	0	0	12	147	282	425	531	578	586	560	395	277	138	16	0	0	
mai	0	0	0	111	248	369	482	547	534	497	362	277	117	0	0	0	
jun	0	0	0	80	225	347	460	493	528	460	360	223	84	0	0	0	
jul	0	0	0	99	230	342	462	516	502	456	324	237	86	0	0	0	
ago	0	0	0	134	259	412	533	511	534	482	404	269	125	0	0	0	

set	0	0	34	143	250	442	458	587	597	500	425	260	148	39	0	0
out	0	0	60	166	313	424	576	572	582	518	447	309	172	64	0	0
nov	0	4	82	203	337	494	526	577	578	574	474	343	208	75	4	0
dez	0	19	91	214	335	488	548	587	611	553	470	343	218	90	19	0

6.6 ESCOLHA DO INVERSOR PARA O MÓDULO NA-142H5

A quantidade mínima de módulos necessário para se alcançar 1kWp são sete painéis. Para construir o arranjo, serão utilizados então 8 módulos. Como esse módulo tem uma alta tensão de circuito aberto (249V), será feito um arranjo de quatro associações em paralelo, cada qual composta por dois módulos em série, conforme a figura abaixo.



Fonte: do autor.

Na Tabela 91 estão mostradas as tensões de circuito aberto, enquanto que na Tabela 92 estão mostradas as tensões de máxima potência para os módulos de micro-silício.

Tabela 73 - Tensão de circuito aberto para os módulos NA-142H5

		Tensão de Circuito Aberto (V)															
		4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0	58	294	450	460	462	461	461	461	461	462	460	449	302	60	0	
fev	0	0	268	442	461	462	462	460	459	461	462	461	450	256	0	0	
mar	0	0	175	449	462	463	463	462	462	463	463	460	442	166	0	0	
abr	0	0	60	430	462	466	465	465	465	465	465	462	420	72	0	0	
mai	0	0	0	352	462	468	469	468	469	469	468	464	368	0	0	0	
jun	0	0	0	257	462	471	472	472	472	472	471	462	269	0	0	0	
jul	0	0	0	310	463	471	473	472	472	473	470	464	274	0	0	0	
ago	0	0	0	407	465	471	471	471	471	471	471	466	383	0	0	0	
set	0	0	125	424	464	471	471	470	470	471	471	465	431	138	0	0	
out	0	0	204	444	466	468	467	467	467	468	468	466	446	214	0	0	
nov	0	0	270	453	464	466	465	465	465	465	466	464	454	250	31	0	
dez	0	82	299	453	462	463	463	462	462	463	463	462	454	297	82	0	

Tabela 74 - Tensão de máxima potência para os módulos NA-142H5

		Tensão de Máxima Potência (V)															
		4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0	21	139	304	384	384	379	378	376	378	385	384	302	142	22	0	
fev	0	0	125	262	386	385	381	375	372	378	386	385	309	120	0	0	
mar	0	0	80	290	387	385	381	378	380	380	386	382	255	75	0	0	
abr	0	0	22	221	379	390	385	382	382	383	390	378	209	28	0	0	
mai	0	0	0	167	359	393	391	388	389	391	393	379	176	0	0	0	
jun	0	0	0	121	327	395	396	394	393	396	396	323	126	0	0	0	
jul	0	0	0	146	333	395	396	394	395	396	393	342	128	0	0	0	
ago	0	0	0	197	368	396	392	393	392	394	396	374	184	0	0	0	
set	0	0	54	211	360	395	394	387	387	393	395	370	218	61	0	0	
out	0	0	94	246	388	392	385	386	385	389	392	387	255	99	0	0	
nov	0	8	126	304	388	387	385	382	382	382	388	389	311	117	7	0	
dez	0	33	141	323	386	385	381	378	377	381	386	387	329	140	33	0	

Por ter uma tensão de circuito aberto nominal relativamente alta (498V), optou-se por utilizar o inversor SB2000, da SMA, pois este possui uma tensão máxima de entrada de 600V. Abaixo as especificações do inversor:

Fabricante	Modelo	$P_{max}(W)$	η (%)	$V_{max}(V)$	$V_{mpp}(V)$	$V_{min}(V)$	$I_{max}(A)$	Preço
SMA	SB2000	2500	96,0	600	480	175	15,0	US\$1.567,00

Na está mostrada a potência de saída na entrada da rede, após passar pelo inversor.

Tabela 75 - Potência do Sistema com Inversor – NA-142H5

		Máxima Potência Fornecida (W)															
		4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0	0	0	131	328	564	711	732	767	730	531	324	129	0	0	0	
fev	0	0	0	97	371	513	666	793	876	730	496	352	135	0	0	0	
mar	0	0	0	119	351	561	696	771	723	705	547	274	92	0	0	0	
abr	0	0	0	69	246	479	653	729	743	701	430	238	62	0	0	0	
mai	0	0	0	0	187	380	565	671	650	590	370	232	44	0	0	0	
jun	0	0	0	0	151	338	522	576	632	522	360	148	0	0	0	0	
jul	0	0	0	0	157	329	524	612	589	515	301	166	0	0	0	0	
ago	0	0	0	55	201	445	643	606	644	560	433	215	48	0	0	0	
set	0	0	0	63	188	496	522	731	748	590	468	203	67	0	0	0	
out	0	0	0	86	291	472	720	714	730	625	509	285	92	0	0	0	
nov	0	0	0	131	335	592	645	728	731	723	560	344	137	0	0	0	
dez	0	0	0	148	336	589	688	751	790	695	560	349	154	0	0	0	

Percebe-se que o a inserção do inversor na planta acarreta numa diminuição da energia gerada, principalmente para as primeiras horas do dia e ao entardecer. Porém, essas são as horas de menor geração de energia.

6.7 RESUMO DOS INVERSORES UTILIZADOS

Na Tabela 76 está mostrado o resumo dos inversores utilizados, assim como a corrente e tensão máxima para os arranjos. O inversor mais utilizado foi o BP1502, da KACO, pelo fato de possuir uma baixa tensão de *startup*.

Tabela 76 – Resumo dos inversores utilizados

Módulo				Inversor			
Modelo	Qtde	I_{sc_n}	V_{oc_n}	Modelo	$V_{máx}$	$I_{máx}$	$\eta_{máx}$
CX3	12	4,2A	382V	BP1502	500V	13A	95,9%
Q.SMART UF L 115	10	3,4A	476V	UNO-2,0	520V	15A	96,6%
PowerMax Strong	8	6,5A	245V	BP1502	500V	13A	95,9%
um-Si 130 Plus	8	4,4A	356V	BP1502	500V	13A	95,9%
OP-315-72	3	9,1A	138V	SB1200	400V	12,6A	92,1%
NA-142H5	8	3,56	498V	SB2000	600V	15A	96,0%

Assim finaliza-se a escolha dos componentes de potência do projeto. No capítulo anterior, foi estipulado um método para a escolha dos módulos solares, já neste, foi estipulado um método para a escolha dos inversores. Relés de proteção, disjuntores e circuitos de medição não serão escolhidos neste estudo.

7 ESTUDO DE CUSTO E ENERGIA GERADA DA PLANTA FOTOVOLTAICA

Finalizando todo o estudo realizado no decorrer deste projeto, que começou com a escolha do modelo matemático, a análise do *software*, a simulação dos módulos fotovoltaicos, assim como um método de escolha entre os mais vantajosos, neste capítulo será realizada uma breve análise da energia que será gerada pela planta de 6kWp com os módulos escolhidos. Primeiramente um breve resumo dos componentes da planta será mostrado, onde será feita uma análise econômica dos impostos de importação dos módulos, seguido então por gráficos mostrando a energia gerada por hora da planta solar.

Na Tabela 77 está mostrado um resumo da planta estudada neste projeto. A potência instalada total ficou 6,2% acima do estipulado inicialmente por causa dos rearranjos necessários na associação dos módulos. O módulo mais barato de ser implantado foi o OP-315-72. O custo total do conjunto, contando os módulos e o inversor, foi de U\$1.964,00. O baixo preço deve-se ao fato de ele ser feito de uma tecnologia similar ao silício cristalino, porém melhorada pela empresa detentora da tecnologia. O segundo conjunto mais barato foi o CX-3, feito de células de CdTe. Os módulos de CiGS, CiS e micro-silício tiveram preços similares, próximos de U\$2700,00 pelo conjunto de 1kWp. A tecnologia mais cara foi a de silício amorfo, com um preço de U\$3608,00, correspondendo por 22% do custo de instalação.

Tabela 77 – Resumo da planta experimental de 6kWp

Modelo	Tecn	Qtde	$P_{INSTALADA}$	Custo módulos		Custo inversor		Custo total
CX3	CdTe	12	1020W	U\$	1.066,80	U\$	1.250,00	U\$ 2.316,80
Q.SMART UF L 115	CiGS	10	1150W	U\$	1.590,00	U\$	1.052,00	U\$ 2.642,00
PowerMax Strong	CiS	8	1080W	U\$	1.520,00	U\$	1.250,00	U\$ 2.770,00
um-Si 130 Plus	u-Si	8	1040W	U\$	1.384,00	U\$	1.250,00	U\$ 2.634,00
OP-315-72	ARTSun	3	945W	U\$	1.197,00	U\$	767,00	U\$ 1.964,00
NA-142H5	a-Si	8	1136W	U\$	2.041,20	U\$	1.567,00	U\$ 3.608,20
TOTAL	49	49	6371W	U\$	8.799,00	U\$	7.136,00	U\$ 15.935,00

A Tabela 78 mostra o custo por Watt instalado das diferentes tecnologias, incluindo o preço do inversor, e o custo por Watt instalado da planta.

Tabela 78 – Custo por Watt instalado da planta fotovoltaica

Modelo	Pinstalada	Custo	U\$/Watt
CX3	1020W	U\$ 2.316,80	U\$ 2,27
Q.SMART UF L 115	1150W	U\$ 2.642,00	U\$ 2,30
PowerMax Strong	1080W	U\$ 2.770,00	U\$ 2,56
um-Si 130 Plus	1040W	U\$ 2.634,00	U\$ 2,53
OP-315-72	945W	U\$ 1.964,00	U\$ 2,08
NA-142H5	1136W	U\$ 3.608,20	U\$ 3,18
TOTAL	6371W	U\$ 15.935,00	U\$ 2,50

7.1 ANÁLISE DE IMPORTAÇÃO

Até agora trabalhou-se com os custos dos módulos e inversores com o preço em dólar. Isso facilita a análise de preço, pois exclui a variação monetária e os custos de importação. Nesta seção será feita um estudo de quanto custaria a importação destes módulos para Santa Catarina. A análise do custo de importação dos módulos foi realizada com o auxílio da *BECOMEX CONSULTING*, empresa especializada em comércio exterior, situada em Joinville, Santa Catarina.

Para o cálculo de impostos de importação, é necessário saber o frete total e o seguro internacional. Foi estimado o frete total em U\$1.500,00 (aproximadamente 10% do valor total da mercadoria) e o seguro internacional foi estimado em U\$100,00. A soma do produto, do frete e do seguro resultam no preço CIF, que é valor base utilizado para cálculo dos impostos de importação.

O Governo Federal Brasileiro define as alíquotas de importação de acordo com o produto que se deseja importar. Eles são definidos pela NCM – Nomenclatura Comum do Mercosul. A NCM dos módulos fotovoltaicos é 8501.30.20, e dos inversores solares é 8504.40.29. Ambas as designações podem ser encontradas em <http://www.comexdata.com.br>. A partir da NCM, do custo da mercadoria, frete e seguro internacional, se pode definir os tributos que serão cobrados. Na Tabela 79 estão os resultados obtidos. A taxa monetária utilizada para a base de cálculo dos impostos foi U\$1,00 para R\$2,1438 (16/06/2013).

Tabela 79 – Custos de Importação

	Custo	Frete	Seguro	Preço Dólar	Valor CIF	Impostos	Custo Total
Módulos Solares	U\$8.799,00	U\$828,27	U\$ 50,00	R\$ 2,14	R\$ 20.746,13	R\$ 10.919,72	R\$ 31.665,85
Inversores	U\$7.136,00	U\$671,73	U\$ 50,00		R\$ 16.845,40	R\$ 11.211,33	R\$ 28.056,73
						TOTAL:	R\$ 59.722,58

Os encargos tributários aumentaram o preço do Watt instalado para R\$9,37. Na Tabela 80 estão os valores dos impostos de maneira detalhada para os módulos fotovoltaicos. Já na Tabela 81 está a mesma análise, mas para os inversores solares.

Tabela 80 – Cálculo de tributos para os painéis fotovoltaicos

Painel Fotovoltaico - NCM: 8501.31.20					
		Moeda Estrangeira		Moeda Nacional	
Valor da merc. no local de embarque		US\$	8.799,00	R\$	18.863,30
Frete marítimo		US\$	825,00	R\$	1.768,64
Seguro internacional		US\$	50,00	R\$	107,19
Valor aduaneiro		US\$	9.674,00	R\$	20.739,12
Alíquota		Base de Cálculo		Valor do Tributo	
II	18,00%	R\$	20.739,12	R\$	3.733,04
IPI	0,00%	R\$	0,00	R\$	0,00
PIS	1,65%	R\$	23.524,17	R\$	388,15
COFINS	8,60%	R\$	23.524,17	R\$	2.023,08
SIEX				R\$	40,00
ICMS	17,00%	R\$	28.090,88	R\$	4.775,45
Total de tributos devidos				R\$	10.959,72

Tabela 81 – Cálculo de tributos para os inversores solares

Inversor - NCM: 8504.40.29					
		Moeda Estrangeira		Moeda Nacional	
Valor da merc. no local de embarque		US\$	7.136,00	R\$	15.298,16
Frete marítimo		US\$	669,00	R\$	1.434,20
Seguro internacional		US\$	50,00	R\$	107,19
Valor aduaneiro		US\$	7.855,00	R\$	16.839,55
Alíquota		Base de Cálculo		Valor do Tributo	
II	18,00%	R\$	16.839,55	R\$	3.031,12
IPI	0,00%	R\$	19.870,67	R\$	993,53
PIS	1,65%	R\$	23.524,17	R\$	388,15
COFINS	8,60%	R\$	23.524,17	R\$	2.023,08
SIEX				R\$	40,00
ICMS	17,00%	R\$	28.090,88	R\$	4.775,45
Total de tributos devidos				R\$	11.251,33

7.2 ENERGIA GERADA

Nesta seção será realizada uma análise da energia gerada. Na Tabela 82 mostra-se participação dos módulos fotovoltaicos sobre a energia média gerada por mês no sistema – foram consideradas as perdas devido ao rendimento do inversor.

O sistema que mais gera energia é o Q.Smart, com 18,33% da energia gerada em média. Isso não significa que ele é o de melhor rendimento, ou o com o melhor comportamento para a variação da radiação ou temperatura – foi visto anteriormente que o painel que melhor se comporta é o OP-315-72. A potência instalada é o diferencial desse módulo aos demais. Já o módulo da SUNIVA teve uma potência instalada menor, e além disso o inversor conectado aos módulos dessa tecnologia acarretaram numa perda de aproximadamente 8%, o dobro da perda dos outros inversores.

Tabela 82 – Porcentagem do módulo sobre a energia total gerada anualmente

	CX-3	Q.Smart	Strong	u-Si 130	OP-315	NA-142
Energia (%)	16,15%	18,45%	17,94%	15,76%	15,45%	16,25%

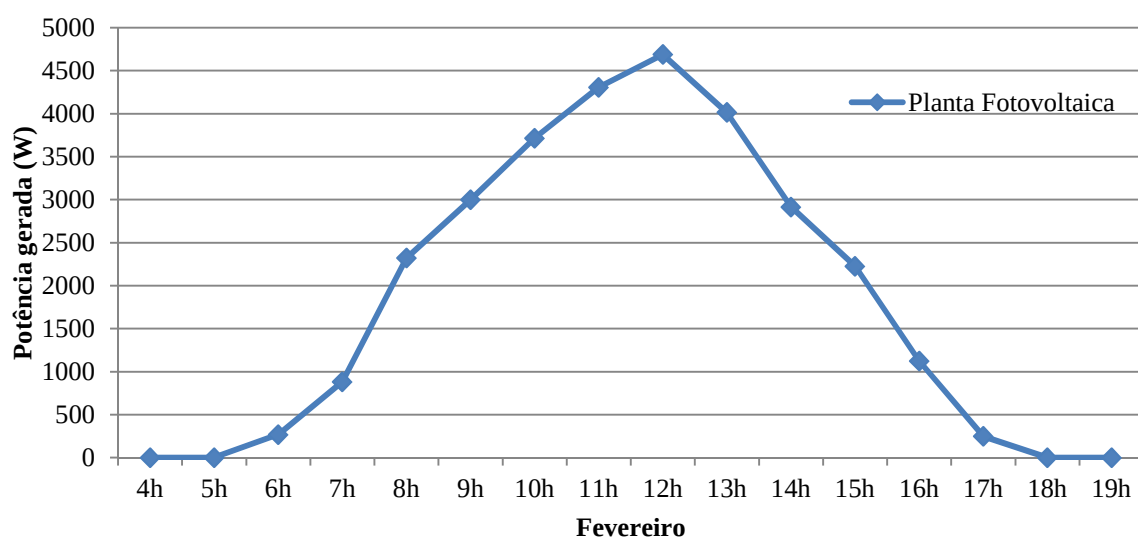
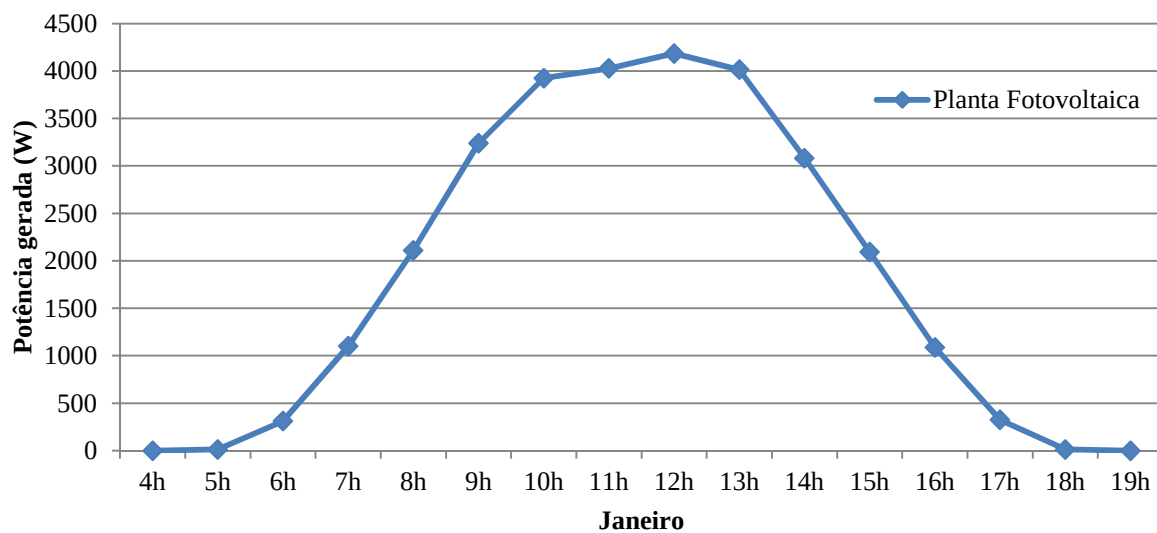
A Tabela 101 mostra a potência máxima por hora de todo o arranjo fotovoltaico. A máxima energia gerada foi no mês de fevereiro, ao meio dia. O menor pico diário relatado foi em julho, também ao meio dia. O sistema conseguiu um rendimento máximo de 74% de energia gerada em relação ao total instalado.

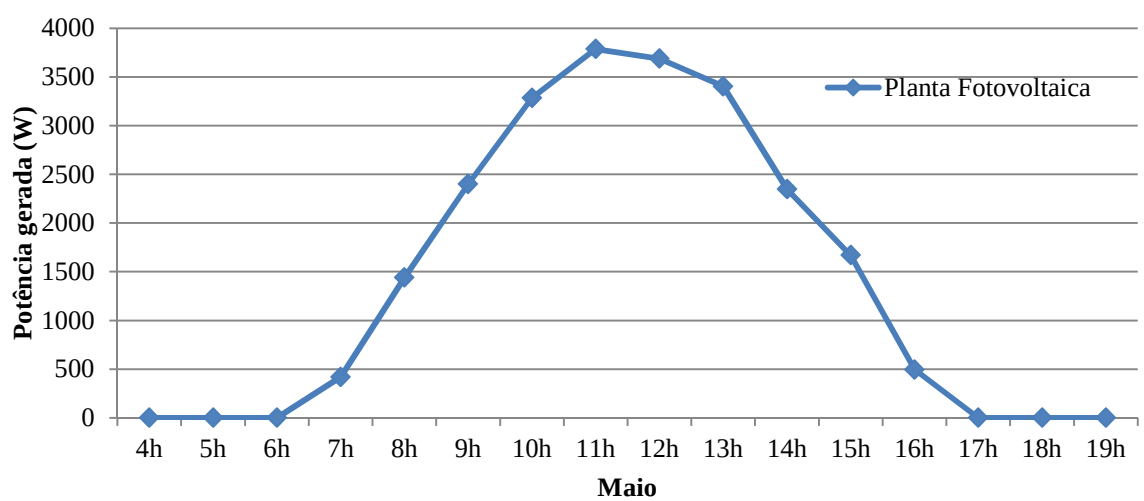
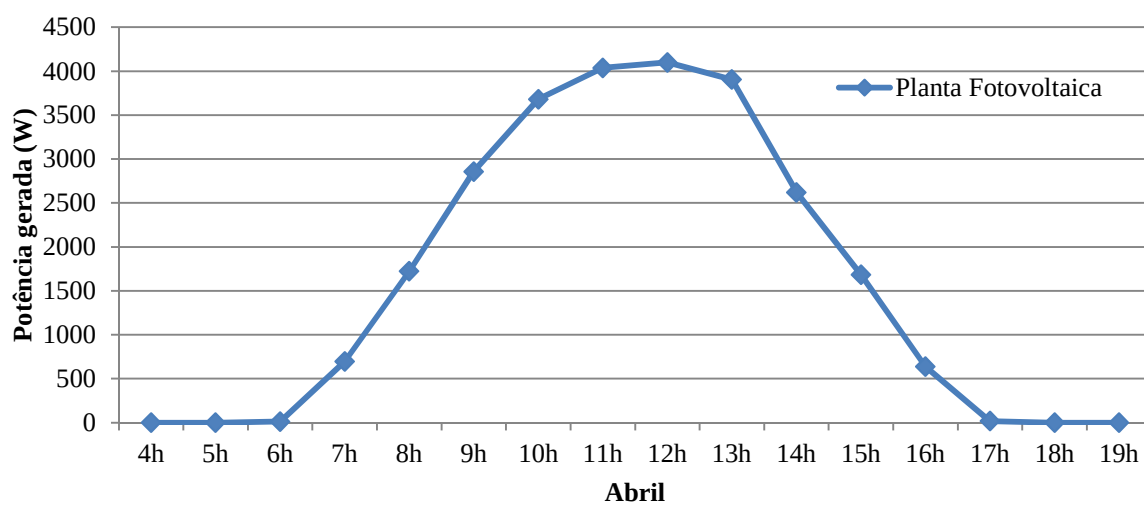
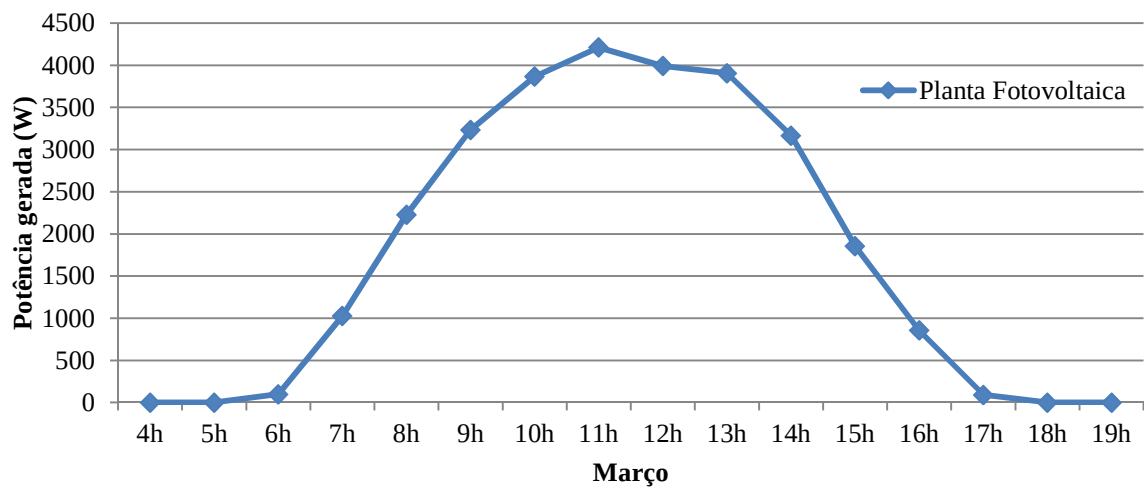
Tabela 83 – Máxima potência fornecida pela planta fotovoltaica

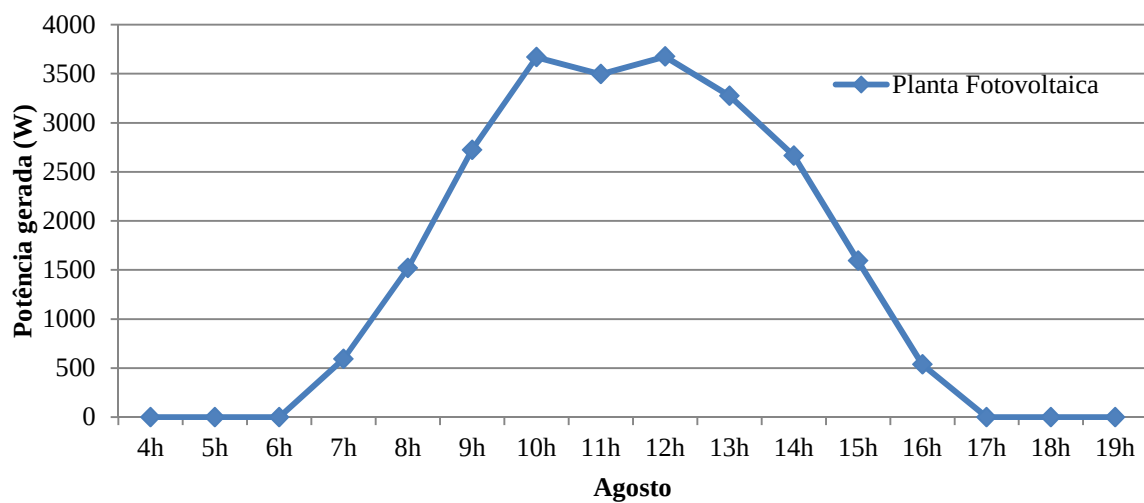
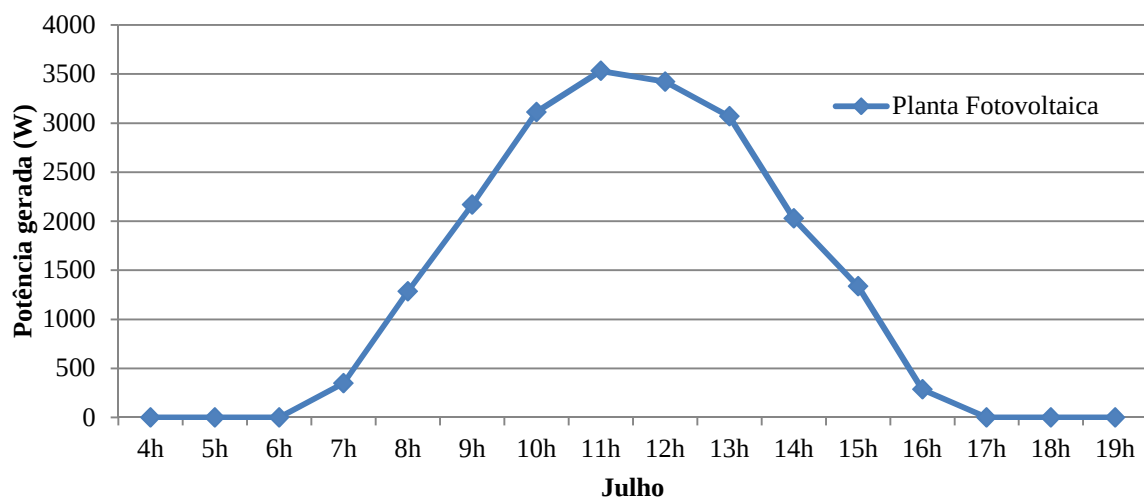
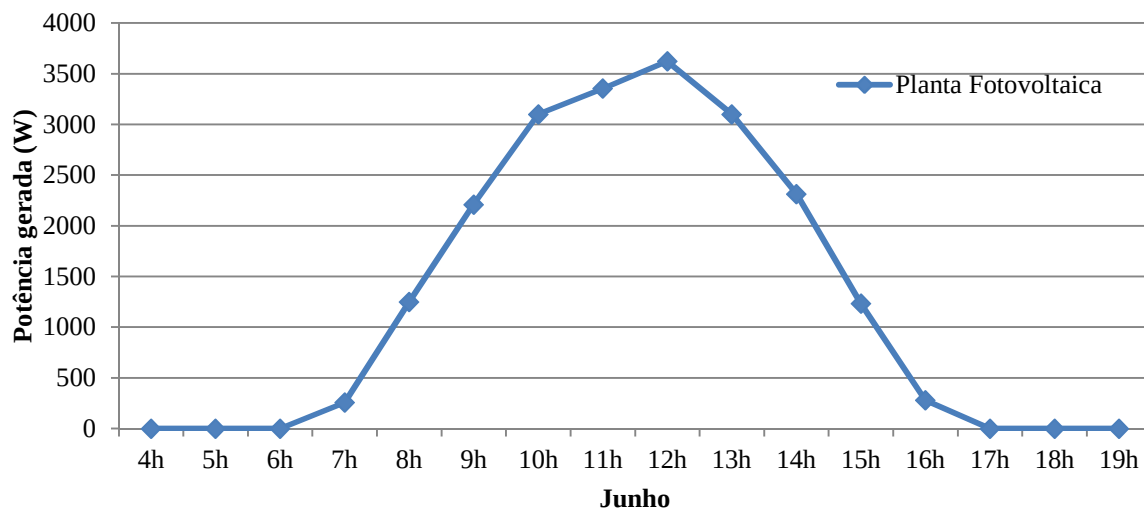
Máxima Potência Fornecida (W)																
	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h
jan	0	12	311	1100	2111	3238	3924	4027	4185	4015	3082	2092	1088	324	13	0
fev	0	0	269	883	2321	2998	3715	4307	4689	4015	2915	2226	1124	249	0	0
mar	0	0	100	1027	2227	3232	3867	4212	3991	3907	3166	1855	856	91	0	0
abr	0	0	13	695	1723	2857	3681	4038	4100	3906	2621	1684	638	17	0	0
mai	0	0	0	420	1439	2400	3284	3786	3687	3404	2349	1669	495	0	0	0
jun	0	0	0	257	1250	2209	3100	3355	3623	3100	2314	1232	278	0	0	0
jul	0	0	0	349	1286	2167	3112	3532	3422	3068	2028	1337	286	0	0	0
ago	0	0	0	594	1518	2724	3669	3496	3675	3276	2665	1593	536	0	0	0
set	0	0	59	656	1450	2965	3091	4081	4161	3416	2833	1530	690	71	0	0
out	0	0	174	822	1962	2838	4012	3982	4057	3566	3014	1930	865	189	0	0
nov	0	4	274	1109	2164	3393	3641	4032	4044	4011	3242	2209	1145	197	4	0
dez	0	28	321	1203	2157	3362	3827	4119	4301	3862	3226	2221	1235	251	28	0

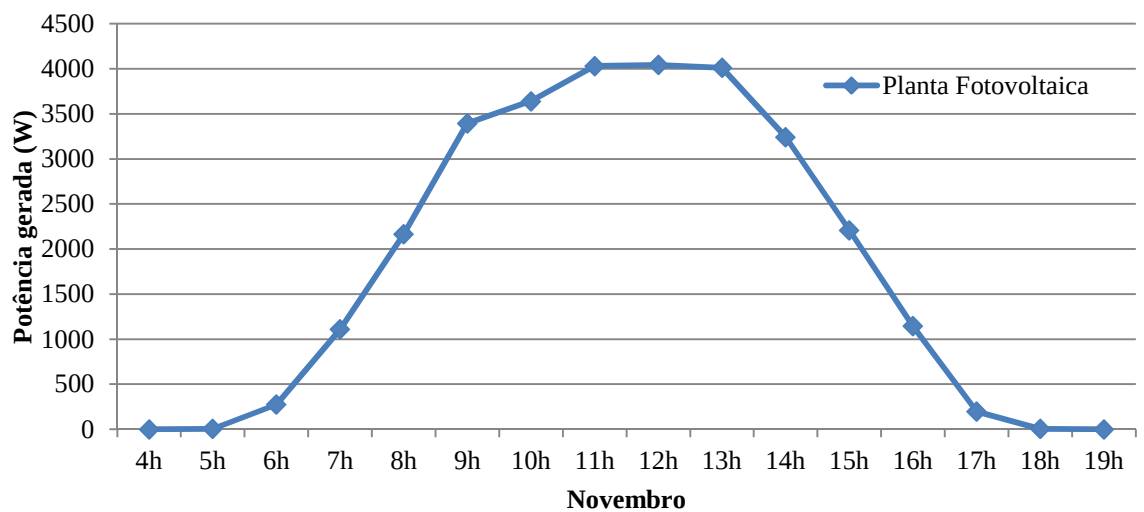
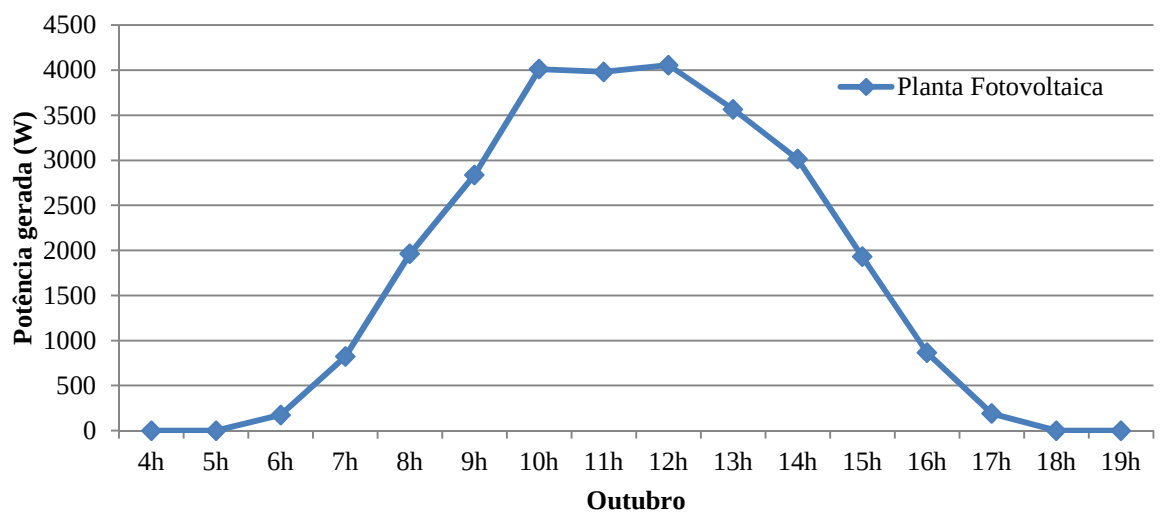
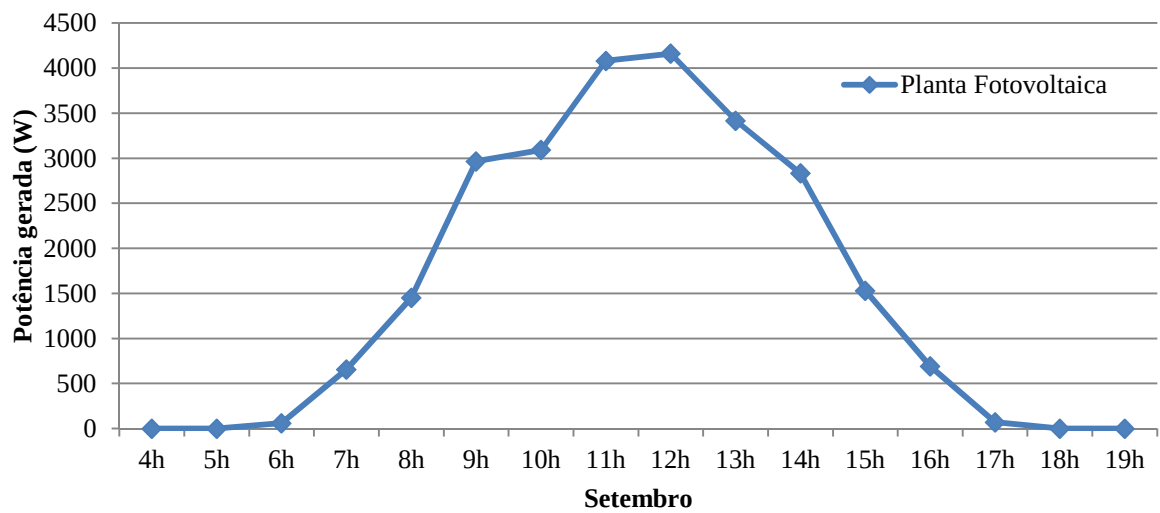
Nas figuras abaixo estão mostradas as curvas médias mensais de potência máxima gerada. O pico sempre ocorre próximo ao meio dia, pelo fato de ser a hora de maior insolação.

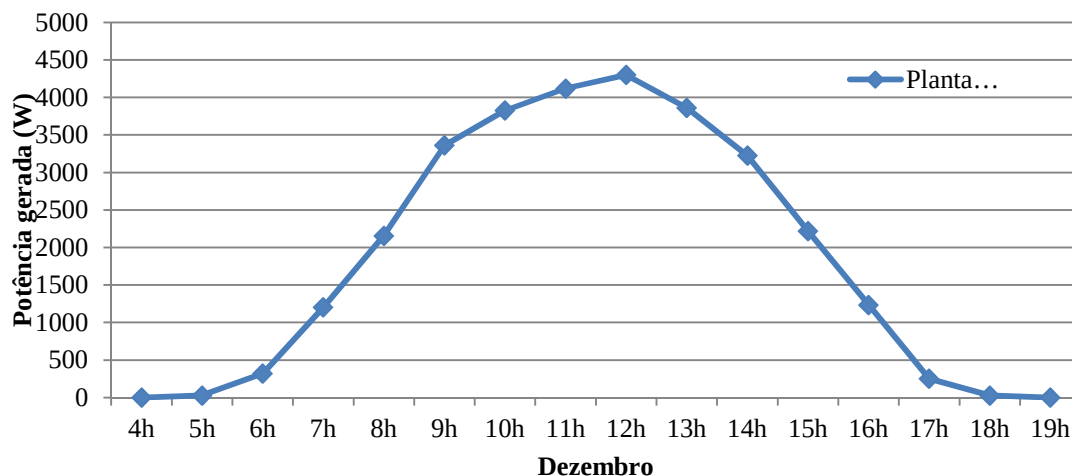
Figura 61 – Energia gerada mensal da planta fotovoltaica







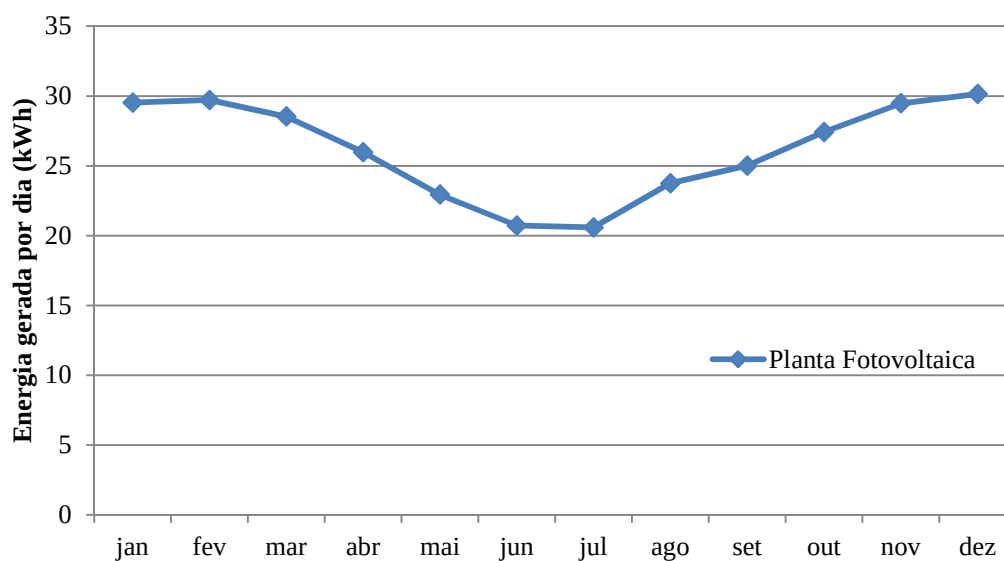




Fonte: do autor.

Para finalizar, um gráfico mostrando a energia em kWh gerada pela planta. A energia média máxima gerada por dia da planta fotovoltaica é de 30kWh, enquanto que a mínima é de 25kWh.

Figura 62 – Energia média gerada (kWh)



Fonte: do autor.

Assim finaliza-se o estudo da energia gerada pela planta e toda a análise deste projeto. Na conclusão geral serão abordados novamente os resultados obtidos, de onde serão retiradas as conclusões finais sobre o projeto desenvolvido neste trabalho de conclusão de curso.

8 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma metodologia com a qual é possível definir quais módulos são mais vantajosos para a implementação de uma planta experimental de 6kWp. Definida a metodologia de projeto e o modelo matemático, as análises matemáticas necessárias foram realizadas. A partir da programação de um código em MatLab, foram realizadas simulações e comparações a partir do método proposto para definir quais tecnologias utilizar na planta proposta.

No capítulo 3 definiu-se qual o modelo matemático do módulo fotovoltaico que mais se adequa ao objetivo da planta experimental. Foi escolhido o *Single Diode Model*. A variação dos resultados de simulação com a variação paramétrica foi realizada, e os resultados obtidos ficaram dentro do aceitável ($\pm 10\%$ - tolerância dos parâmetros de *datasheet* dos módulos fotovoltaicos). Apesar do modelo se comportar bem para a maioria dos módulos, o *software* não obteve curvas $I \times V$ satisfatórias para os módulos de silício amorfo e módulos multi-junção. Mesmo assim, a potência convergiu para um próximo ao valor de *datasheet* para os pontos testados.

No quarto capítulo realizou-se a simulação da energia gerada para as diferentes tecnologias escolhidas. Utilizou-se o *software* RADIASOL 2 para aquisição de dados de irradiação solar. A temperatura da célula foi estimada com o auxílio de uma equação matemática e a temperatura média mensal em Florianópolis. A maioria dos fabricantes não fornece parâmetros da célula no NOCT, bem como a quantidade de células que compõem o módulo. Esses problemas foram resolvidos com o ajuste fino das variáveis de simulação.

No capítulo 5 foi realizada a comparação dos resultados obtidos no capítulo anterior. A diferença de capacidade de geração elétrica entre as tecnologias é pequena – cerca de 10% entre a com maior rendimento e a menor. A tecnologia que obteve melhores resultados foi a ARTSUN, da SUNIVA. Ela é um aprimoramento dos módulos de silício, e é comercializada por uma única empresa. Os módulos de CdTe

também obtiveram ótimos resultados, bem como os módulos de CiS. Os painéis que obtiveram piores resultados foram os flexíveis, os de multi-junções e os de silício amorfo.

Como o rendimento entre os módulos foi similar, o fator que mais pesou para a escolha das tecnologias foi o econômico. O módulo mais barato entre os pesquisados foi o CX-3, de CdTe, seguido pelo OP-315-72, da SUNIVA. Os módulos de CiS e CiGS também obtiveram preços baixos. Os módulos mais caros foram os de silício amorfo, os flexíveis e o módulo translúcido.

No sexto capítulo foram definidos os arranjos fotovoltaicos e escolhidos os inversores. Através da análise da tensão de máxima potência e tensão de circuito aberto, foi possível definir o inversor que melhor se enquadrava nas especificações.

Definido os módulos e os inversores, no capítulo 8 foi simulada a capacidade de geração do sistema, formado pelos módulos e pelos inversores. Na melhor das hipóteses, o sistema é capaz de gerar 75% da potência nominal de projeto. Isso ocorre pois a potência nominal de projeto é definida num ponto de operação no qual o módulo nunca irá operar se instalado em Florianópolis. O ponto de operação nominal considera uma irradiação de 1kW/m^2 e uma temperatura de 20°C na célula, enquanto que a irradiação e temperatura usuais de operação na célula é de 800W/m^2 e 46°C , respectivamente.

As contribuições deste trabalho foram ferramentas computacionais para cálculo de parâmetros do *SDM*, os quais podem ser utilizados para estimar a geração do módulo fotovoltaico ou para simulações em circuitos elétricos. Além disso, as figuras de mérito para escolha de um módulo fotovoltaico foram definidas, além de todo o procedimento.

Para aprimorar os resultados obtidos neste trabalho, possíveis soluções seriam: obter dados reais de potência, tensão e corrente e compará-los com os dados obtidos na simulação. Utilizar diferentes modelos matemáticos dependendo da tecnologia. Obter dados meteorológicos, como irradiação e temperatura do local de instalação, para assim melhorar os resultados de simulação numérica. Além de um método de cálculo variação da eficiência do inversor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FRAAS, L. PARTAIN, L. *Solar Cells and Their Application*, Segunda Edição, Editora Winley, Londres, 2002.
- [2] GWEC, *Global Wind Statistics 2011*. Maio de 2012. Disponível em: https://energypedia.info/images/4/43/Global_Wind_Statistics-2011.pdf.
- [3] WIKIPEDIA, *PV*. Disponível em: [http:// em.wikipedia.org/wiki/Photovoltaics](http://em.wikipedia.org/wiki/Photovoltaics)
- [4] SECOM, *Tocantins Pode Receber Usina de Energia Solar*, Outubro 2012. Disponível em: [http://secom.to.gov.br/noticia/2012/10/3/tocantins-pode-receber-usina-de- energia-solar/](http://secom.to.gov.br/noticia/2012/10/3/tocantins-pode-receber-usina-de-energia-solar/)
- [5] MARTIFER SOLAR, *Martifer Solar Assina Acordo com General Motors Para Construção de Projecto em Joinville*. Disponível em: http://www.martifersolar.com/pt/ns/news_releases/martifer_solar_assina_acordo-com_general_motors
- [6] LUQUE, A. HEGEDUS, S. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, Editora Winley, Londres, 2003.
- [7] TEODORESCU, R. SERA, D, RODRIGUEZ, P. *PV panel model based on datasheet values. IEEE International Symposium in Industrial Electronics*, 2007.
- [8] NAVE, R. *Abundances of the Elements in the Earth`s Crost*. Georgia State University, disponível em: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/tables/elabund.html>.
- [9] SOLAR MARKET, *Thin-Film Technology About to Make Its Breakthrough*, disponível em: <http://www.solarserver.com/solar-magazine.html>

- [10] TIWARI, G, N. DUBEY, S. *Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Application*, RSC Publishing, Cambridge, 2010.
- [11] BIRNIE , D, B. *Amorphous Silicon Solar Cells*, 2004. Disponível em: <http://www.rci.rutgers.edu/~dbirnie/solarclass/amorphousSi.pdf>.
- [12] SCHOTT SOLAR, Datasheet do módulo fotovoltaico *Schott Protect ASI 100-107*, disponível em: www.schottsolar.com/global/products/photovoltaics/schott-protect-asi/.
- [13] CAPPER, P. *Propertiers of Narrow Gap Cadmiun-Based Compounds*, IET, pp 39, 1994.
- [14] SEMICONDUCTOR. *CdTe PV Project in New Mexico*. Disponível em: http://www.semiconductor-today.com/news_items/2011/SEPT/FIRSTSOLAR_010911.html.
- [15] DURGADEVI, A. ARULSEVI, S. NATARAJAN, S.P. *Photovoltaic Modeling and Its Characteristics*. ICETECT, 2011.
- [16] NREL, *Best Research-Cell Efficiency*, Outubro de 2012. Disponível em: [en.wikipedia.org/wiki/File:PVeff\(rev121015b\).jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:PVeff(rev121015b).jpg).
- [17] NREL, *Characterization of 19,9% Efficient CiGS Absorbers*, Maio de 2008. Disponível em: <http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/42539.pdf>.
- [18] PV-Magazine. “*World`s Biggest CiGS Power Plant Completed*”. Disponível em: http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/worlds-biggest-cis-cigs-power-plant-completed_100006903/#axzz2XSkFfYUu.
- [19] KANEKA SOLAR, Datasheet do módulo fotovoltaico *E-UA type*. Disponível em: <http://www.kaneka-solar.com/products/pdf/U-EA.pdf>.
- [20] CNET, *Solar Junction Claims Cells Efficiency Record*, Abril de 2011. Disponível em: http://news.cnet.com/8301-11128_3-20053851-54.html.
- [21] SHARP SOLAR, Datasheet do modulo fotovoltaico *NA-Series*. Disponível em: http://files.sharppusa.com/Downloads/Solar/Products/sol_dow_NSF135G5.pdf.

- [22] SOLFOCUS, Datasheet do módulo fotovoltaico SF 1136SX, disponível em: <http://www.solfocus.com/en/downloads/sf-1136sx-cpv-system-fact-sheet.pdf>.
- [23] NASA. “*Spread Your Wings, it’s Time to Fly*” Disponível em: http://www.nasa.gov/mission_pages/station/behindscenes/truss_segment.html
- [24] NREL. “*Conversion efficiencies of best research solar cells worldwide from 1976 through 2013 for various photovoltaic technologies*”. Disponível em: [http://en.wikipedia.org/wiki/File:PVEff\(rev130621\).jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:PVEff(rev130621).jpg)
- [25] SEDRA, A, S. SMITH, K. *Microeletrônica*, Editora Prentice Hall, 5ª Edição. São Paulo.
- [26] GREEN TRANSLATION SERVICE, *Photovoltaic Effect*, disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=1gta2ICarDw>.
- [27] WIKIPEDIA, *Air Mass*, disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/Air_mass
- [28] HELGRENN, Tobias. *Thin Film Solar Cell*, Master of Science Thesis in Energy Engineering. Suécia 2004.
- [29] VILLALVA, M, G. GAZOLI, J, R. FILHO, E, R. *Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009.
- [30] FARRET, F. A, LENZA, J. M. TRAPP, J. G. “*New Methodology to Determine Photovoltaic Parameters of Solar Cells*” IEEE, 2011.
- [31] SEYEDMAHMOUDIAN, M. “*Analytical Modeling of Partially Shaded Photovoltaic Systems*”. Energies 2013, Kuala Lumpur, 2013.
- [32] PROROK, M. WERNER. B. ZDANOWICS, T.. *Applicability of Equivalent Diode Models to Modeling Various Thin-Film Photovoltaic (PV) Modules in a Wide Range of Temperature and Irradiance Conditions*. Electron Technology Internet Journal, Polônia, 2006.
- [33] ALEXANDER, C, K. SADIKU, M, N. *Fundamentos de Circuitos Elétricos*, Editora McGrill-Hill, 3ª Edição. São Paulo.

- [34] IEC International Standard for Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic (PV) Modules – Design Qualifications and Type Approval. IEC61215. 2ª Edição, 2005.
- [35] IEC International Standard for Thin-Films Terrestrial Photovoltaic (PV) Modules – Design Qualification and Type Approval. IEC 61646. 2ª Edição, 2008.
- [36] RUGGIERO, M. LOPES, V. *Cálculo Numérico – Aspectos Teóricos e Computacionais*. Editora Makron, 2ª Edição, São Paulo.
- [37] GREENTECH MEDIA. “*Rest in Peace – The list of Deceased Solar Companies*”. Disponível em: <http://www.greentechmedia.com/articles/read/Rest-in-Peace-The-List-of-Deceased-Solar-Companies>
- [38] PV TECH. “*Solar Shakeout*”. Disponível em: www.pv-tech.org/topics/solar__shakeouts_2012
- [39] Projeto SWERA, disponível em: http://www.ccst.inpe.br/wp-content/themes/ccst-2.0/pdf/atlas_solar-reduced.pdf
- [40] ZOMER, C. *MEGAWATT SOLAR*, Editora da UFSC. Florianópolis, 2010.
- [41] SALAMONI, I. *Metodologia para Cálculo de Geração Fotovoltaica em Áreas Urbanas Aplicada a Florianópolis e Belo Horizonte*. Editora da UFSC. Florianópolis, 2004.
- [42] GREENTECH MEDIA. “*Market and Technology Competition Increases as Solar Inverter Demand Peaks*”, 2011. Disponível em: <http://www.greentechmedia.com/content/images/reports/5-1-web.jpg>

ANEXO I – DATASHEET MÓDULO SCHOTT PROTECT ASI

Technical Data

Data at standard test conditions (STC)*

Module type		SCHOTT PROTECT™ ASI							
		stabilised value	initial value	stabilised value	initial value	stabilised value	initial value	stabilised value	initial value
Nominal power [Wp]	P_{mpp}	≥ 100	122.0	≥ 103	125.6	≥ 105	128.0	≥ 107	130.5
Voltage at nominal power [V]	U_{mpp}	30.4	33.7	30.4	33.8	30.5	33.9	30.5	33.9
Current at nominal power [A]	I_{mpp}	3.29	3.62	3.39	3.72	3.44	3.78	3.50	3.85
Open-circuit voltage [V]	U_{oc}	40.9	42.6	41.1	42.8	41.1	42.8	41.3	43.0
Short-circuit current [A]	I_{sc}	3.93	4.05	4.00	4.12	4.05	4.18	4.10	4.23
Module efficiency (%)	η	6.9		7.1		7.2		7.4	

STC (1,000 W/m²; AM 1.5; cell temperature 25°C)

Power tolerance (as measured by flasher): -0 W / +1.99 W / +2.99 W

Data at normal operating cell temperature (NOCT)*

Nominal power [Wp]	P_{mpp}	78.0	80.3	81.9	83.5
Voltage at nominal power [V]	U_{mpp}	28.5	28.6	28.7	28.7
Open-circuit voltage [V]	U_{oc}	37.3	37.5	37.5	37.6
Short-circuit current [A]	I_{sc}	3.14	3.20	3.24	3.28
Temperature [°C]	T_{NOCT}	49.0	49.0	49.0	49.0

NOCT (800 W/m², AM 1.5, wind speed 1 m/s, ambient temperature 20°C)

Data at low irradiation

Nominal power [Wp]	P_{mpp}	20.0	20.6	21.0	21.4
Voltage at nominal power [V]	U_{mpp}	30.4	30.4	30.5	30.5
Current at nominal power [A]	I_{mpp}	0.66	0.68	0.69	0.70
Open-circuit voltage [V]	U_{oc}	36.8	37.0	37.0	37.2
Short-circuit current [A]	I_{sc}	0.75	0.76	0.77	0.78
Module efficiency (%)	η	6.9	7.1	7.2	7.4

Irradiance 200 W/m², spectrum AM 1.5, cell temperature 25°CMeasurement accuracy at irradiance of 200 W/m²: ±10 %

Temperature coefficients

Power [%/K]	P_{mpp}	-0.20
Open-circuit voltage [%/K]	U_{oc}	-0.33
Short-circuit current [%/K]	I_{sc}	+0.08

Characteristic data

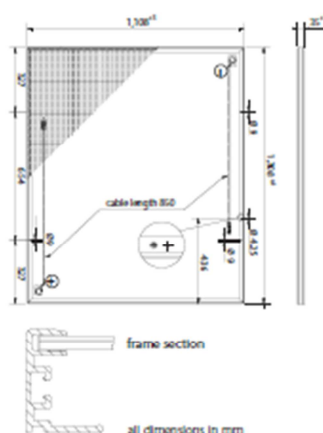
Solar cells per module	72 (3 x 24)
Cell type	a-Si/a-Si tandem (amorphous silicon)
Junction box	2 x IP65 by Lumberg, without bypass diode, single-pole, sealed with 2K silicon; 2.5 mm ² solar cable
Connector	LC4 connector
Dimensions junction box [mm]	40.1 x 54.4 x 10.5
Front panel	thermally treated float glass 1.8 mm
Backside panel	hardened back glass 3.2 mm
Frame material	aluminium, black

Dimensions and weight

Dimensions [mm]	1,308 x 1,108
Thickness [mm]	35
Weight [kg]	20.8

Limits

Maximum system voltage [V _{DC}]	1,000
Maximum reverse current I_R [A]**	10
Operating module temperature [°C]	-40 ... +85
Maximum load (to IEC 61646)	pressure: 5,400 N/m ² or 550 kg/m ² suction: 2,400 N/m ² or 245 kg/m ²
Application classification (to IEC 61730)	A
Fire classification (to IEC 61730)	C

** No external voltage in excess of U_{oc} shall be applied to the module.

The **Installation manual** contains additional information on installation and operation. SCHOTT Solar AG reserves the right to make specification changes in this datasheet without notice. All information complies with the requirements of the standard EN 50380.

ANEXO II – SOFTWARE DE CÁLCULO DOS PARÂMETROS

```

%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% MODELAGEM - PAINÉL FOTOVOLTAICO %%
%%% nPEE - NÚCLEO DE PESQUISA EM ENERGIA ELÉTRICA %%
%%% ANGELO FILLIPI DE PAIVA %%
%%% MODELO PAINÉL: SOLAR WORLD SW 130 POLY/R6A %%
%%% CÁLCULOS BASEADOS NO ARTIGO: "COMPREHENSIVE APPROACH TO MODELING AND%%
%%% SIMULATION OF PHOTOVOLTAIC ARRAYS", Marcello Gradella Villalva. %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc
clear all

%% Parâmetros do Datasheet (STC)

Pmaxe=315; %Potência máxima do painel
Vocn=45.9; %Tensão de circuito aberto.
Iscn=9.1; %Corrente de curto circuito

Vmp=36.5; %Tensão de máxima potência
Imp=8.62; %Corrente de máxima potência

KI=0.05/100*Iscn; %Coeficiente de corrente
KV=-0.34/100*Vocn; %Coeficiente de tensão
KP=-0.624; %Coeficiente de potência.
a=1.35; %Constante do diodo. valor pode ser 1.0<a<2.0
Ns=72; %Numero de células em série

%% Constantes físicas e condições ambientais

%Condições ambientais
Tn=25; %Temperatura de operação no STC
T=25; %Temperatura de operação do painel.
dT=T-Tn; %Variação de temperatura
Tkn=Tn+273.15; %Temperatura nominal em Kelvin
Tk=T+273.15; %Temperatura em Kelvin
G=1000; %Irradiação utilizada nos testes
Gn=1000; %Irradiação STC

%Parâmetros físicos

k = 1.3806503e-23; %Boltzmann [J/K]
q = 1.60217646e-19; %Electron charge [C]
Vtn=k*Tkn/q; %Tensão térmica nominal
Vt=k*Tq/q; %Tensão térmica

%% Considerações iniciais

Rs = 0; %Valor inicial de Rs
Rs_max = (Vocn - Vmp)/ Imp; %Valor máximo de Rs
Rp_min = Vmp/(Iscn-Imp) - Rs_max; %Valor mínimo de Rp
Rp = Rp_min; %Valor inicial de Rp

%Cálculo de Io
Io=(Iscn+KI*dT)/(exp((Vocn+KV*dT)/(Ns*a*Vt))-1); %Para dT=0, temos Ion

erro = inf; %Diferença entre Pmaxc e Pmaxe
tol = .6; %Tolerância entre Pcalc e Pmaxe
n = 0; %Iteração 0
nv = 500; %Step do vetor V
Rs_inc = 0.01; %Incremento de Rs por iteração

%% Começo da iteração:

while (erro>tol) && (Rp > 0)

    n = n + 1; %incremento iteração
    Ipv = (Rs+Rp)/Rp * Iscn; %Corrente Ipc nominal
    Ipv = (Ipv + KI*dT) *G/Gn; %Corrente Ipv atual
    Isc = (Iscn + KI*dT) *G/Gn; %Corrente de curto circuito atual
    Io=(Iscn+KI*dT)/(exp((Vocn+KV*dT)/(Ns*a*Vt))-1);

    Rp_ant = Rp; %Salva Rp anterior.

    Rs = Rs + Rs_inc; %Incremento em Rs

```

```

    Rp = Vmp*(Vmp+Imp*Rs)/(Vmp*Ipv-Vmp*Io*exp((Vmp+Imp*Rs)/Vtn/Ns/a)+Vmp*Io-Pmaxe);    %Calcula
    novo Rp

    clear V                                %Cria vetor V
    clear I                                %Cria vetor I

    V = 0:Vocn/nv:Vocn;                    %Vetor de tensão
    I = zeros(1,size(V,2));                %Vetor de corrente

    %Calcula g = I - f(I,V) = 0 através do método de Newton-Raphson

    for j = 1 : size(V,2)

        g(j) = Ipv-Io*(exp((V(j)+I(j)*Rs)/Vt/Ns/a)-1)-(V(j)+I(j)*Rs)/Rp-I(j);    %Função g = I -
f(I,V)

        while (abs(g(j)) > 0.0001)

            g(j) = Ipv-Io*(exp((V(j)+I(j)*Rs)/Vt/Ns/a)-1)-(V(j)+I(j)*Rs)/Rp-I(j);
            glin(j) = -Io*Rs/Vt/Ns/a*exp((V(j)+I(j)*Rs)/Vt/Ns/a)-Rs/Rp-1;    %Derivada de g
            I_(j) = I(j) - g(j)/glin(j);
            I(j) = I_(j);

        end

        end
        P = (Ipv-Io*(exp((V+I.*Rs)/Vt/Ns/a)-1)-(V+I.*Rs)/Rp).*V;    %Calcula P através da
curva I-V
        Pmaxc = max(P);    %Acha maior ponto de
P
        erro = (Pmaxc-Pmaxe)    %calcula erro entre
Pmax e Pmaxe

    end

    %% Consideração Caso Rp < 0
    if (Rp<0) Rp = Rp_ant    %Caso Rp fique negativo.
        disp(sprintf('RP negativo\n\n'));
    end

    %% Cálculo Imp_calc e Vmp_calc

    b = 1;    %Variável incremental
    while P(b) ~= max(P)
        b = b+1;
    end
    Imp_calc = I(b);
    Vmp_calc = V(b);

    %% Variáveis:

    disp(sprintf('Model info:\n'));
    disp(sprintf('Rp = %f',Rp));
    disp(sprintf('Rs = %f',Rs));
    disp(sprintf('a = %f',a));
    disp(sprintf('T = %f',T));
    disp(sprintf('G = %f',G));
    disp(sprintf('Ipv_n = %f',Ipv));
    disp(sprintf('Isc = %f',Isc));
    disp(sprintf('Io_n = %g',Io));
    disp(sprintf('KI = %g',KI));
    disp(sprintf('KV = %g',KV));
    disp(sprintf('Vocn = %g',Vocn));
    disp(sprintf('Ns = %g',Ns));
    disp(sprintf('Rsmax = %g', (Vocn-Vmp)/Imp));

    disp(sprintf('Pmax = %f (calculado), Pmax = %f (experimental)',Pmaxc, Pmaxe));
    disp(sprintf('Imp = %f (calculado), Imp = %f (experimental)',Imp_calc, Imp));
    disp(sprintf('Vmp = %f (calculado), Vmp = %f (experimental)',Vmp_calc, Vmp));

    %% Plot I-V e P-V
    plot(V,I)
    grid on
    xlim([0 Vocn*1.1]);
    ylim([0 Isc*1.1]);

    figure
    plot(V,P)
    grid on
    xlim([0 Vocn*1.1]);
    ylim([0 Pmaxe*1.1]);

    %%THE END
    %%

```

ANEXO III – SOFTWARE PARA CÁLCULO PV E IV

```

%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% GERAÇÃO DAS CURVAS PV E IV
%% nPEE - NÚCLEO DE PESQUISA EM ENERGIA ELÉTRICA
%% ANGELO FILLIPI DE PAIVA
%% MODELO PAINÉL: SOLAR WORLD SW 130 POLY/R6A
%% CÁLCULOS BASEADOS NO ARTIGO: "COMPREHENSIVE APPROACH TO MODELING AND
%% SIMULATION OF PHOTOVOLTAIC ARRAYS", Marcello Gradella Villalva.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc
clear all

%% Parâmetros Simulação

Rp = 23509.682784
Rs = 0.232000
a = 1.350000
Ipv_n = 9.100089
Io_n = 9.48073e-008
KI = 0.004277
KV = -0.153765
Vocn = 45.9
Ns = 72

%% Constantes físicas e condições ambientais

%Condições ambientais
G=301; %Irradiação utilizada nos testes
Gn=1000; %Irradiação STC
Tn=25; %Temperatura de operação no STC
Tamb=-2
T=Tamb+G*32.5e-3; %Temperatura de operação do painel.
dT=T-Tn; %Variação de temperatura
Tkn=Tn+273.15; %Temperatura nominal em Kelvin
Tk=T+273.15; %Temperatura em Kelvin

%% Parâmetros físicos

q=1.602176e-19; %Carga do elétron
Eg=1.12; %Bandgap energy
k=1.380650e-23; %constante de Boltzmann
Vtn=k*Tkn/q; %Tensão térmica nominal
Vt=k*Tk/q; %Tensão térmica

%% Correção das constantes

Ipv = (Ipv_n + KI*dT)*G/Gn; %Corrente Ipv atual
Io_n
Io=(Ipv_n+KI*dT)/(exp((Vocn+KV*dT)/(Ns*a*Vt))-1)

%% Começo da iteração caso nominal

%clc

nv = 500
clear V %Cria vetor V
clear I_n %Cria vetor I

V = 0:Vocn/nv:(Vocn); %Vetor de tensão
I_n = zeros(1,size(V,2)); %Vetor de corrente

%Calcula g = I - f(I,V) = 0 através do método de Newton-Raphson

for j = 1 : size(V,2)

    g_n(j) = Ipv_n-Io_n*(exp((V(j)+I_n(j)*Rs)/Vtn/Ns/a)-1)-(V(j)+I_n(j)*Rs)/Rp-I_n(j);
%Função g = I - f(I,V)

    while (abs(g_n(j)) > 0.001)

        g_n(j) = Ipv_n-Io_n*(exp((V(j)+I_n(j)*Rs)/Vtn/Ns/a)-1)-(V(j)+I_n(j)*Rs)/Rp-I_n(j);
        g_lin_n(j) = -Io_n*Rs/Vtn/Ns/a*exp((V(j)+I_n(j)*Rs)/Vtn/Ns/a)-Rs/Rp-1;
%Derivada de g
        I_n(j) = I_n(j) - g_n(j)/glin_n(j);
        I_n(j) = I_n(j);

    end
end

```

```

    P_n = (Ipv_n-Io_n*(exp((V+I_n.*Rs)/Vtn/Ns/a)-1)-(V+I_n.*Rs)/Rp).*V;    %Calcula P através da
    curva I-V
    Pmax_n = max(P_n)

%% Calcula Ponto específico a partir de Gn e T

    clear V                %Cria vetor V
    clear I                %Cria vetor I

    V = 0:Vocn/nv:(Vocn);    %Vetor de tensão
    I = zeros(1,size(V,2));    %Vetor de corrente

    %Calcula g = I - f(I,V) = 0 através do método de Newton-Raphson

    for j = 1 : size(V,2)

        g(j) = Ipv-Io*(exp((V(j)+I(j)*Rs)/Vt/Ns/a)-1)-(V(j)+I(j)*Rs)/Rp-I(j);    %Função g = I -
f(I,V)

        while (abs(g(j)) > 0.001)

            g(j) = Ipv-Io*(exp((V(j)+I(j)*Rs)/Vt/Ns/a)-1)-(V(j)+I(j)*Rs)/Rp-I(j);
            glin(j) = -Io*Rs/Vt/Ns/a*exp((V(j)+I(j)*Rs)/Vt/Ns/a)-Rs/Rp-1;    %Derivada de g
            I_(j) = I(j) - g(j)/glin(j);
            I(j) = I_(j);

        end
    end

    P = (Ipv-Io*(exp((V+I.*Rs)/Vt/Ns/a)-1)-(V+I.*Rs)/Rp).*V;    %Calcula P através
da curva I-V
    Pmaxc = max(P);

%% Plot I-V e P-V
Ipv_n=Ipv_n;
I=I;
I_n=I_n;
P_n=P_n;
P=P;
Pmax_n=Pmax_n;

plot(V,I_n,'k.',V,I,'k- ')
grid on
xlim([0 Vocn*1.1]);
ylim([0 Ipv_n*1.1]);
set(gca,'XTick',0:ceil(Vocn*1.1/10):Vocn*1.1);
set(gca,'YTick',0:roundn(Ipv_n*1.1/8):Ipv_n*1.1);
xlabel('V [V]');
ylabel('I [A]');
legend('STC','NOCT');

figure
plot(V,P_n,'k.',V,P,'k- ')
grid on
xlim([0 Vocn*1.1]);
ylim([0 Pmax_n*1.1]);
set(gca,'XTick',0:round(Vocn*1.1/10):Vocn*1.1);
set(gca,'YTick',0:round(Pmax_n*1.1/8):Pmax_n*1.1);
xlabel('V [V]');
ylabel('P [W]');
legend('STC','NOCT');
%% Calcula Vmpp e Imp para ponto de operacao

b = 1;    %NOMINAL Variável incremental
while P_n(b) ~= max(P_n)
    b = b+1;
end
Imp_calc_n = I_n(b);
Vmp_calc_n = V(b);

b = 1;    %NAO NOMINAL Variável incremental
while P(b) ~= max(P)
    b = b+1;
end
Imp_calc = I(b);
Vmp_calc = V(b);

%% Display

disp(sprintf('Pmax_STC = %f (calculado), Pmax_NOCT = %f (experimental)',Pmax_n, max(P)));
disp(sprintf('Imp_calc_STC = %f (calculado), Imp_NOCT = %f (experimental)',Imp_calc_n,
Imp_calc));
disp(sprintf('Vmp_calc_STC = %f (calculado), Vmp_NOCT = %f (experimental)',Vmp_calc_n,
Vmp_calc));

%%THE END

```

ANEXO IV – SOFTWARE PARA CÁLCULO DA ENERGIA GERADA

```

%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% CALCULA ENERGIA GERADA POR ANO
%% nPEE - NÚCLEO DE PESQUISA EM ENERGIA ELÉTRICA
%% ANGELO FILLIPI DE PAIVA
%% MODELO PAINÉL: SOLAR WORLD SW 130 POLY/R6A
%% CÁLCULOS BASEADOS NO ARTIGO: "COMPREHENSIVE APPROACH TO MODELING AND
%% SIMULATION OF PHOTOVOLTAIC ARRAYS", Marcello Gradella Villalva.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc
clear all

%% Parâmetros Simulação

Rs=1,7595; %Potência máxima do painel
Rp=85,0495; %Tensão de circuito aberto.
%a=2; %Corrente de curto circuito
Ipv_n=2,06414;
%Io_n= 0.0000453781;
%Ns=124;

Rp = 9271.372580
Rs = 0.240000
a = 1.350000
Ipv_n = 9.100226
Io_n = 9.48073e-008
KI = 0.00455
KV = -0.15606
Vocn = 45.9
Ns = 72

%% Constantes físicas e condições ambientais

%Condições ambientais
Tn=25; %Temperatura de operação no STC
Tamb=[25 25 24 22 19.5 17 16.5 17.5 18 20 22 24]; %Temperatura media mensal em Florianopolis

G(1,:)= [0 17 115 251 409 592 711 729 758 727 566 406 249 118 18 0]; %jan - 4h->19h
G(2,:)= [0 0 104 216 442 552 674 780 852 727 538 427 255 99 0 0]; %fev - 4h->19h
G(3,:)= [0 0 66 239 426 589 698 760 720 705 578 368 211 62 0 0]; %mar - 4h->19h
G(4,:)= [0 0 18 183 346 524 661 723 734 700 486 340 173 23 0 0]; %abr - 4h->19h
G(5,:)= [0 0 0 139 301 448 589 673 656 609 440 336 146 0 0 0]; %mai - 4h->19h
G(6,:)= [0 0 0 100 271 416 555 596 640 555 432 268 105 0 0 0]; %jun - 4h->19h
G(7,:)= [0 0 0 122 276 409 556 624 606 549 388 284 107 0 0 0]; %jul - 4h->19h
G(8,:)= [0 0 0 164 312 496 649 620 650 584 487 323 153 0 0 0]; %ago - 4h->19h
G(9,:)= [0 0 45 175 302 535 555 720 734 608 514 314 181 51 0 0]; %set - 4h->19h
G(10,:)= [0 0 78 204 381 518 713 708 721 637 546 376 211 82 0 0]; %out - 4h->19h
G(11,:)= [0 7 105 251 414 612 654 722 724 718 587 421 257 97 6 0]; %nov - 4h->19h
G(12,:)= [0 27 117 267 415 611 691 743 776 697 588 425 272 116 27 0]; %dez - 4h->19h

Gn=1000; %Irradiação STC
nv = 500; %vetor de tensao
for mes=1:1:12
    for hora=1:1:16
        T(mes, hora)=Tamb(mes)+G(mes, hora)*32.5e-3;
    end
end

dT=T-Tn; %Variação de temperatura
Tkn=Tn+273.15; %Temperatura nominal em Kelvin
Tk=T+273.15; %Temperatura em Kelvin

%% Parâmetros físicos
q=1.602176e-19; %Carga do elétron
k=1.380650e-23; %constante de Boltzmann
Vtn=k*Tkn/q; %Tensão térmica nominal
Vt=k.*Tk/q; %Tensão térmica

%% Correção das constantes

for mes=1:1:12;
    for hora=1:1:16
        Ipv(mes, hora) = (Ipv_n + KI.*dT(mes, hora)).*G(mes, hora)./Gn; %Corrente Ipv atual
        Io(mes, hora)=(Ipv_n+KI.*dT(mes, hora))./(exp((Vocn+KV.*dT(mes, hora))./(Ns.*a.*Vt(mes))))-1);
    end
end
%% Calcula Ponto específico a partir de G e T

```

```

for mes=1:1:12
    for hora=1:1:16;
        clear V                %Cria vetor V
        clear I                %Cria vetor I

        V = 0:Vocn/nv:Vocn;    %Vetor de tensão
        I = zeros(1,size(V,2)); %Vetor de corrente

        var_controle_Voc = 1;

        %Calcula g = I - f(I,V) = 0 através do método de Newton-Raphson

        for j = 1 : size(V,2)

            g(j) = Ipv(mes, hora)-Io(mes, hora).*(exp((V(j)+I(j).*Rs)./Vt(mes)./Ns./a)-1)-
            (V(j)+I(j).*Rs)./Rp-I(j); %Função g = I - f(I,V)

            while (abs(g(j)) > 0.001)

                g(j) = Ipv(mes, hora)-Io(mes, hora).*(exp((V(j)+I(j).*Rs)./Vt(mes)./Ns./a)-1)-
                (V(j)+I(j).*Rs)./Rp-I(j);
                glin(j) = -Io(mes, hora).*Rs./Vt(mes)./Ns./a.*exp((V(j)+I(j).*Rs)./Vt(mes)./Ns./a)-
                Rs./Rp-1; %Derivada de g
                I_(j) = I(j) - g(j)/glin(j);
                I(j) = I_(j);

            end

            if (I(j)< 0) && (var_controle_Voc == 1) %Cakculo de Voc
                Voc(mes, hora)=V(j);
                var_controle_Voc = 0;
            end

        end

        P = (Ipv(mes, hora)-Io(mes, hora).*(exp((V+I.*Rs)/Vt(mes)/Ns/a)-1)-(V+I.*Rs)/Rp).*V;
        %Calcula P através da curva I-V
        Pmax_hora(mes, hora) = max(P);

        %% Calcula Vmpp e Impp para ponto de operacao

        b = 1; %Calcula Vmpp
        while P(b) ~= max(P)
            b = b+1;
        end
        Vmpp(mes, hora)=V(b);
    end
end

for mes=1:1:12
    Pmax_media(1,mes)=mean(Pmax_hora(mes,:))
end
%bar(Pmax_hora(5,:))
for mes=1:1:12
    Energia(mes)=sum(Pmax_hora(mes,:));
end

mes=1:1:12
figure
plot(mes,Energia,'k-',mes,Energia,'k.')
xlim([1 12]);
grid on
set(gca,'XTick',1:1:12)
%ylim([min(Energia)-20 max(Energia)+20]);
set(gca,'XTickLabel',{'jan' 'fev' 'mar' 'abr' 'mai' 'jun' 'jul' 'ago' 'set' 'out' 'nov' 'dez'})
xlabel('Mês');
ylabel('Energia média gerada (Wh)');

%%THE END

```

ANEXO V – CATÁLOGO DO MÓDULO U-SA-110

U-SA type

The HYBRID cell structure is shadow tolerant.

The HYBRID panel measures 1,210x1,008 mm. Unlike traditional crystalline panels, the HYBRID cells allow it to perform even if part of the panel is shaded*.

*the cell configuration allows it to prevent power output deterioration under shadow dropped conditions like picture below.

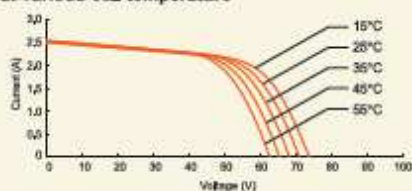
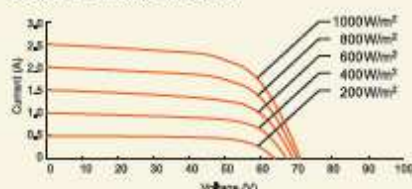


HYBRID provides design flexibility for various applications

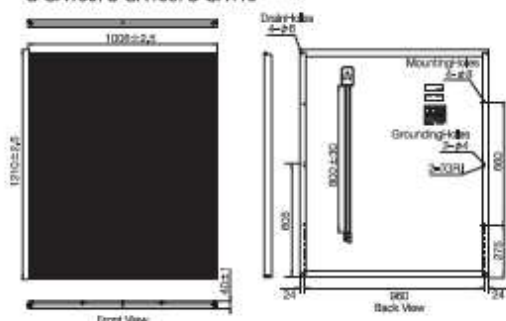
The HYBRID panel's versatile design can be used for various applications. It's aesthetically pleasing and can be easily integrated into the building envelope.



beam jointed folded plate roof, flat roof, slope roof, installation for face of a wall, installation for ground

Electrical characteristics
U-SA110 typeCurrent-Voltage characteristics
at various cell temperatureCurrent-Voltage characteristics
at various irradiance levels

U-SA100/U-SA105/U-SA110



Products		U-SA100	U-SA105	U-SA110
Electrical Data (Standard Test Condition) ^{*1}	Maximum Power (P _{max}) [W]	100	105	110
	Tolerance	-3%/+10%	-3%/+10%	-3%/+10%
	Minimum value of P _{max} [W]	95.0	99.75	104.5
	Open circuit voltage (V _{oc}) [V]	71	71	71
	Short circuit current (I _{sc}) [A]	2.25	2.40	2.50
	Voltage at P _{max} (V _{mpp}) [V]	54.0	53.5	53.5
	Current at P _{max} (I _{mp}) [A]	1.87	1.96	2.04
	Module Efficiency (η) [%]	8.2	8.6	9.0
	Efficiency reduction at 200W/m²	<5%	<5%	<5%
	Temperature (T _{NOCT})	45	45	45
Data at normal operating cell temperature (NOCT) ^{*2}	Maximum Power (P _{max}) [W]	74.4	78.1	81.8
	Open circuit voltage (V _{oc}) [V]	65.5	65.5	65.5
	Short circuit current (I _{sc}) [A]	1.82	1.94	2.02
	Voltage at P _{max} (V _{mpp}) [V]	48.8	48.8	49.2
	Current at P _{max} (I _{mp}) [A]	1.53	1.60	1.66
Temperature coefficients	Power [%/K]	-0.3%		
	Open circuit voltage [%/K]	-0.38		
	Short circuit current [%/K]	0.056		
Mechanical characteristic Data	Cell Type	Thin film (amorphous Si / thin film micro crystalline Si)		
	No. of cells	10E (53 in series / 2 in parallel)		
	Dimension [mm]	W1,210 × L1,008 × T40 (W47.6 × L33.7 × T1.6 in.)		
	Weight [kg]	18.3 (40.3 lbs)		
	Junction box (Dimension) [mm]	W73 × L86 × T15.5 (W2.9 × L3.4 × T0.6 in.)		
	Output cable	14 AWG cable with Multi-Contact PV-KST and KST 4/6 3-UR connectors		
	Front panel	low iron glass with 5.0mm thickness		
Limits and Others	Frame material	anodized aluminum		
	Maximum system voltage [V]	600		
	Limiting reverse current [A]	5.0		
	Fuse rating [A]	5.0		
	Operating module temperature [°C]	-10 ~ +60 (module temperature)		
	Maximum load [Pa]	2400 (50.2 psf)		
	UL file classification	Class C		

*1 Irradiance 1000 W/m², spectrum Air Mass 1.5 and cell temperature 25°C

*2 Irradiance 800 W/m², wind speed 1m/s and air temperature 20°C



Certification : UL 1703, UL/CORD-C-1703-01 Manufactured in ISO 9001 certified factories.

ANEXO VI – LINK DE PREÇOS DOS MÓDULOS

AMORPHOUS

SCHOTT ASI PROTECT (DIA 30/03/2013)

<http://www.motto-engineering.eu/en/products/solar/schott-solar/>

SHARP NA-V142H5 (DIA 30/03/2013)

<http://www.sunenergyelements.com/product/sharp-135w-thin-film-pv-module-amorpho-siliconmicrocrystalline-silicon-188v-cec-na-v135h1>

CiGS:

POWERFLEX 300W (30/03/2013)

<http://www.freecleansolar.com/300W-solar-panel-Global-FG-1BTM-300-CIGS-p/fg-1btm-300.htm>

Cigs 150:

<http://www.freecleansolar.com/150W-solar-panel-GE-SOLAR-GE-CIGS150-CIGS-p/ge-cigs150.htm>

MS140CG MIASOLE (30/03/2013):

<http://www.freecleansolar.com/140W-solar-panel-MiaSole-MS140GG-02-CIGS-p/ms140gg-02.htm>

Q.Smart UF L 115:

<http://www.freecleansolar.com/SearchResults.asp?Search=Q.Smart+UF+L+115&Submit=Go>

STN 140:

<http://www.freecleansolar.com/Solar-Panels-Thin-Film-140W-Stion-p/stn-140.htm>

Heliovolt:

HVC190X:

<http://www.freecleansolar.com/SearchResults.asp?Search=HVC+190X&Submit=Go>

CiS

PowerMax SMART: (31/03/2013)

<http://www.solostocks.com.br/venda-produtos/energia-meio-ambiente/energias-renovaveis/painel-solar-fotovoltaico-powermax-smart-120wp-1142510>

PowerMax STRONG:

<http://www.freecleansola.com/130W-solar-panel-Avancis-PowerMax-STRONG-130-CIGS-p/powermax-strong-130.htm>

SF160-S (30/03/2013):

<http://www.freecleansolar.com/160W-module-Solar-Frontier-SF160-S-CIGS-p/sf160-s.htm>

CdTE

FS-390 (30/03/2013)

<http://www.freecleansolar.com/90W-solar-panel-First-Solar-FS-390-CdTe-p/fs-390.htm>

FS-277

<http://www.freecleansolar.com/First-Solar-Panel-Thin-Film-FS-277-p/fs-277.htm>

calyxo (30/03/2013)

<http://www.shop.calyxo.com/epages/es970242.sf/sec287d3eb0b8/?ObjectPath=/Shops/es970242/Products/CX3>

um-SI

BOSCH (115W) (30/03/2013)

<http://www.freecleansolar.com/115W-solar-panel-Bosch-um-Si-plus-115-thin-film-p/um-si-plus-115.htm>

SHARP (NA-135W) (30/03/2013):

<http://www.sunenergyelements.com/product/sharp-135w-thin-film-pv-module-amorpho-siliconmicrocrystalline-silicon-188v-cec-na-v135h1>

OUTRAS TECNOLOGIAS:

SANYO HIT (31/03/2013)

<http://www.freecleansolar.com/Sanyo-Solar-Panel-HIT-N225A01-225-watt-pallet-p/sanyo-hit-n225a01-p.htm>

Beyond PV: (31/03/2013)

<http://www.dmsolar.com/solar-module-111.html>

SUNIVA OP-315-72 (31/03/2013)

<http://www.solartown.com/store/product/suniva-315w-solar-panel/>

<http://www.freecleansolar.com/315W-solar-panels-Suniva-OPT315-72-4-100-mono-p/opt315-72-4-100.htm>

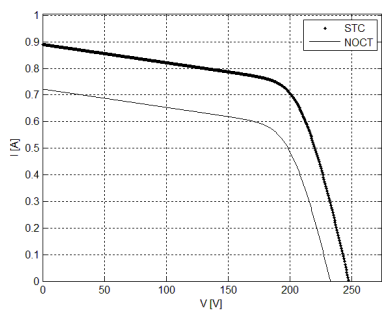
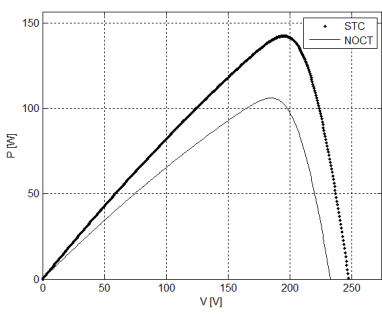
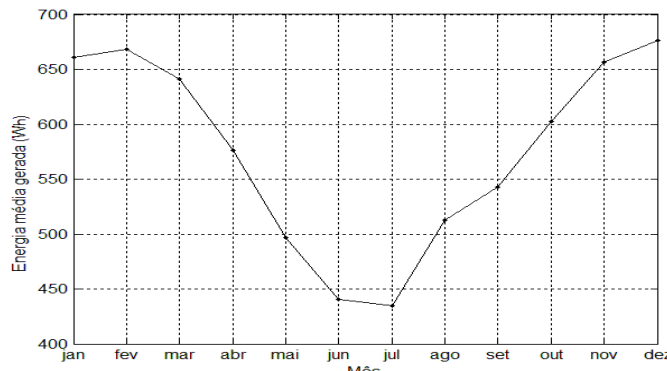
UNI-SOLAR PowerBond ePVL (31/03/2013)

<http://pvdepot.com/uni-solar-144-watt-epvl-144-solar-panel.html>

http://my-n-ergy.com/index.php?page=shop.product_details&flypage=&product_id=98&category_id=8&option=com_virtuemart&Itemid=10

<http://www.simpleray.com/Unisolar-144-Watt-Solar-Laminate-ePVL-144-p/1200-014.htm>

Tabela 84 – Formulário do módulo NA-V142H5

Tecn: a-Si		Modelo: NA-V142H5		Fabricante: SHARP						
I×V 		datasheet		Simulação						
		V _{oc,n} (V)		249		V _{oc,n} (V)		249		
		I _{sc,n} (A)		0,89		I _{sc,n} (A)		0,89		
		STC	P _{mpp} (W)		142		P _{mpp} (W)		142,3	
			V _{mpp} (V)		192		V _{mpp} (V)		195	
			I _{mpp} (A)		0,74		I _{mpp} (A)		0,73	
		NOCT	P _{mpp} (W)		NC		P _{mpp} (W)		106	
			V _{mpp} (V)		NC		V _{mpp} (V)		185	
			I _{mpp} (A)		NC		I _{mpp} (A)		0,57	
		P×V 		N _s		*		N _s		**
K _V (%/K)				-0,24						
K _I (%/K)				0,07						
Dados Econômicos:				Parâmetros SDM						
Preço:				U\$255,15		R _p (Ω)		8499,02		
Peso:				19kg		R _s (Ω)		231,22		
Área:				1,42m ²		a		1,6		
η:				10%		I _{pv} (A)		0,915		
						I ₀ (A)		3,6×10 ⁻¹⁶		
Energia Média Gerada:										
										

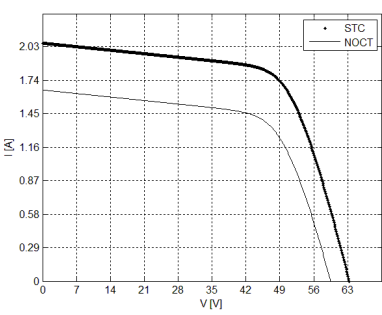
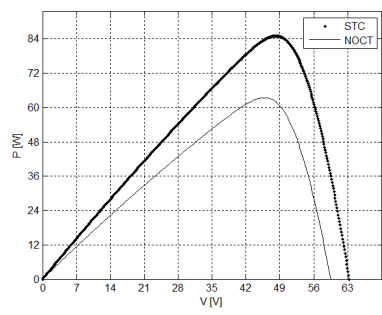
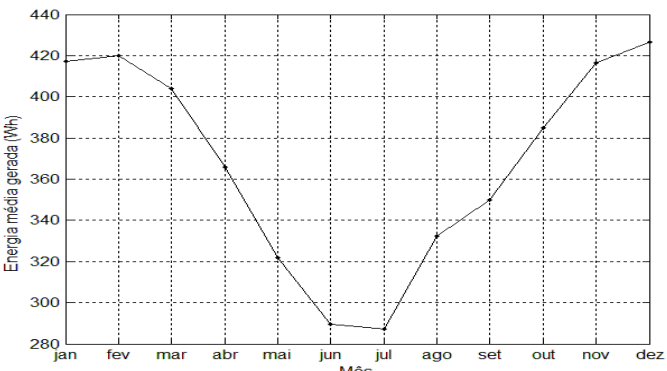
Observações:

* 45 células em série por 6 em paralelo por quadrante. Quatro quadrantes em série.

** Na simulação foram utilizados: 180 células em série, 6 em paralelo.

Não há no *datasheet* dados de operação no NOCT.

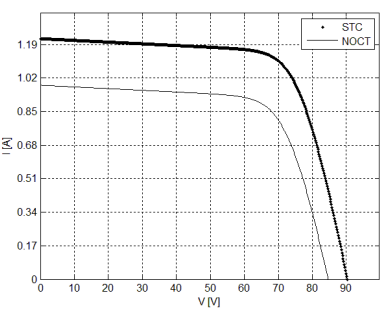
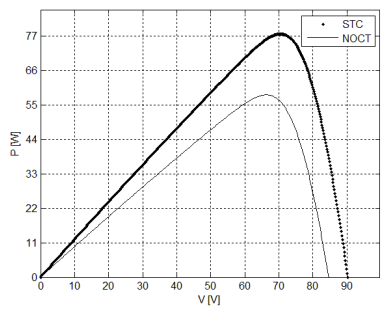
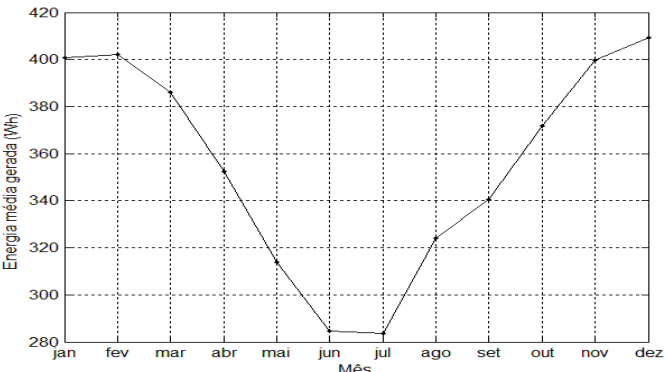
Tabela 85 – Formulário do módulo CX-3

Tecn: CdTe		Modelo: CX-3		Fabricante: CALYXO				
I × V 		datasheet		Simulação				
		V _{oc,n} (V)		63,6	V _{oc,n} (V)		46,3	
		I _{sc,n} (A)		2,06	I _{sc,n} (A)		2,1	
		STC	P _{mpp} (W)		85	P _{mpp} (W)		85,05
			V _{mpp} (V)		47,8	V _{mpp} (V)		48,2
			I _{mpp} (A)		1,78	I _{mpp} (A)		1,77
		NOCT	P _{mpp} (W)		63,6	P _{mpp} (W)		63,5
			V _{mpp} (V)		44,5	V _{mpp} (V)		45,7
			I _{mpp} (A)		1,66	I _{mpp} (A)		1,39
		P × V 		N _s		NC	N _s	
K _V (%/K)				-0,24	Dados Econômicos: Preço: U\$88,90 Peso: 12kg Área: 0,72m² η: 11,8%			
K _I (%/K)				0,02				
				Parâmetros SDM R_p(Ω) 225,26 R_s(Ω) 4,87 a 1,4 I_{pv}(A) 2,10 I₀(A) 3,3 × 10⁻¹³				
Energia Média Gerada:								
								

Observações:

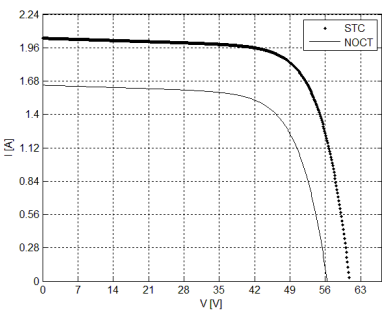
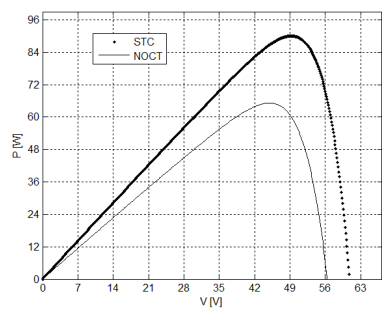
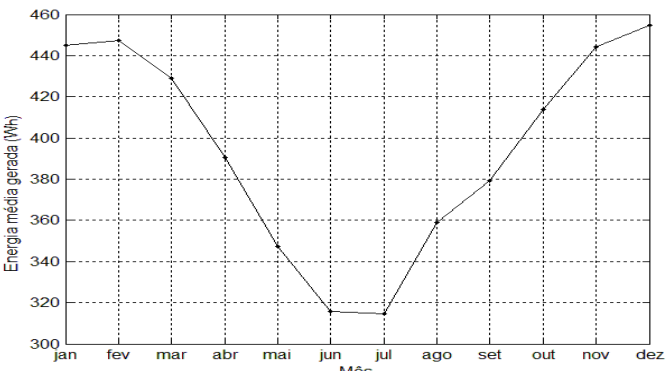
No *datasheet* não havia o número de células em série. Logo, estimou-se o número para que a energia gerada nos pontos STC e NOCT fosse o mais próximos possíveis do catálogo.

Tabela 86 - Formulário do módulo FS-277

Tecn: CdTe		Modelo: FS-277		Fabricante: FIRST SOLAR	
I × V 		<i>datasheet</i>		<i>Simulação</i>	
		$V_{oc,n}(V)$	90,5	$V_{oc,n}(V)$	90,5
		$I_{sc,n}(A)$	1,22	$I_{sc,n}(A)$	1,22
		$P_{mpp}(W)$	77,5	$P_{mpp}(W)$	77,55
		$V_{mpp}(V)$	69,9	$V_{mpp}(V)$	70,4
		$I_{mpp}(A)$	1,11	$I_{mpp}(A)$	1,10
P × V 		$P_{mpp}(W)$	58,1	$P_{mpp}(W)$	58,15
		$V_{mpp}(V)$	65,4	$V_{mpp}(V)$	66,4
		$I_{mpp}(A)$	0,89	$I_{mpp}(A)$	0,88
		N_s	116	N_s	116
		$K_V(\%/K)$	-0,25		
		$K_I(\%/K)$	0,04		
		Dados Econômicos:		Parâmetros SDM	
		Preço:	US\$299,90	$R_p(\Omega)$	1151,1
		Peso:	12kg	$R_s(\Omega)$	8,78
		Área:	0,72m ²	a	1,15
		η :	10,8%	$I_{pv}(A)$	1,22
				$I_0(A)$	$4,2 \times 10^{-12}$
Energia Média Gerada:					
					

Observações:

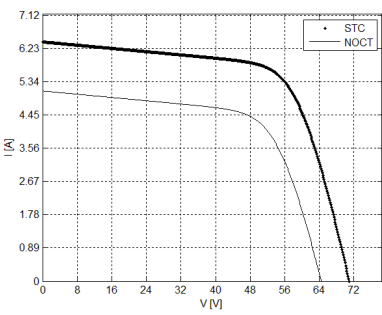
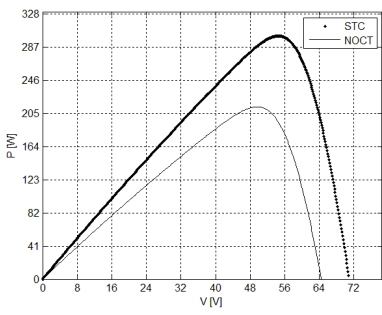
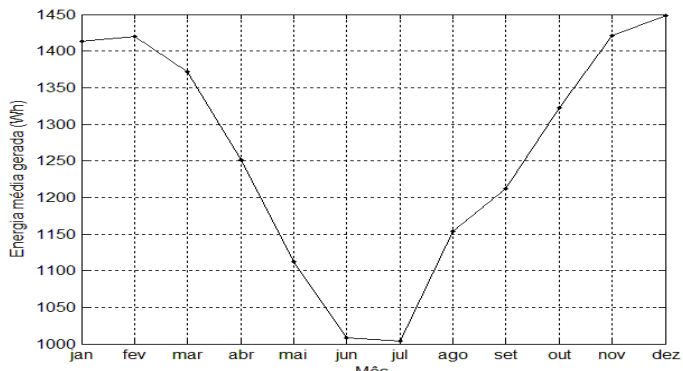
Tabela 87 - Formulário d módulo FS-390

Tecn: CdTe		Modelo: FS-390		Fabricante: FIRST SOLAR	
I × V 		datasheet		Simulação	
		V_{oc,n}(V) 61		V_{oc,n}(V) 61	
		I_{sc,n}(A) 2,04		I_{sc,n}(A) 2,04	
		STC	P_{mpp}(W) 90,0	P_{mpp}(W) 90,0	
			V_{mpp}(V) 49,2	V_{mpp}(V) 49,2	
			I_{mpp}(A) 1,83	I_{mpp}(A) 18,3	
		NOCT	P_{mpp}(W) 67,5	P_{mpp}(W) 65,2	
			V_{mpp}(V) 46,2	V_{mpp}(V) 44,9	
			I_{mpp}(A) 1,54	I_{mpp}(A) 1,45	
		P × V 		N_s 154	
K_V(%/K) -0,27					
K_I(%/K) 0,04					
Dados Econômicos:				Parâmetros SDM	
Preço:	US\$299,90			R_p(Ω)	740,51
Peso:	12kg			R_s(Ω)	0,724
Área:	0,72m²			a	1,0
η:	12,5%			I_{pv}(A)	2,04
				I₀(A)	4,1 × 10⁻⁷
Energia Média Gerada:					
					

Observações:

A potência ficou 2W abaixo do estimado pelo *datasheet*. O *software* não conseguiu chegar mais próximo da potência. Isso deve-se ao fato do modelo matemático utilizado ser aproximado.

Tabela 88 – Formulário do módulo PowerFLEX 300W

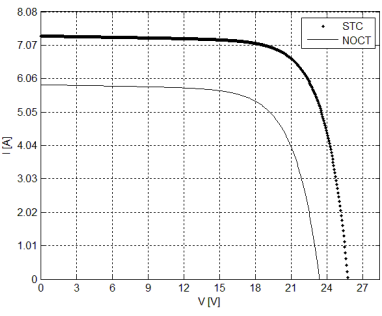
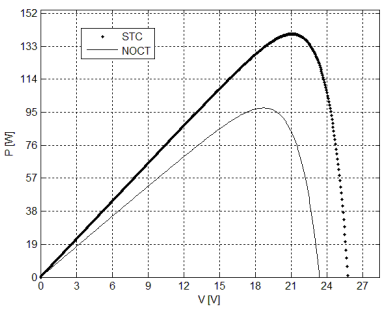
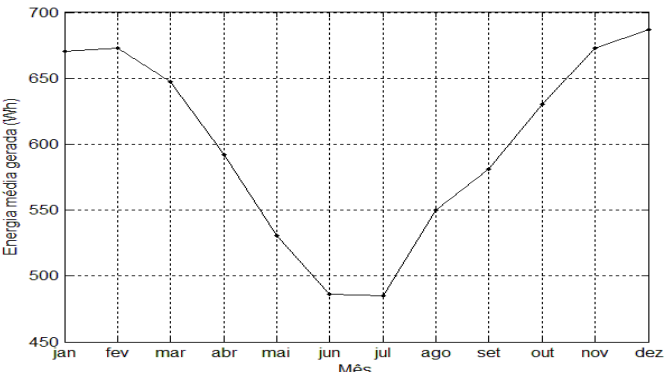
Tecn: CiGS		Modelo: PowerFLEX 300W		Fabricante: GLOBAL SOLAR																																												
I×V 		datasheet <table><tr><td rowspan="2"></td><td>$V_{oc,n}(V)$</td><td>71,2</td></tr><tr><td>$I_{sc,n}(A)$</td><td>6,4</td></tr><tr><td rowspan="3">STC</td><td>$P_{mpp}(W)$</td><td>300W</td></tr><tr><td>$V_{mpp}(V)$</td><td>53,9</td></tr><tr><td>$I_{mpp}(A)$</td><td>5,6</td></tr><tr><td rowspan="3">NOCT</td><td>$P_{mpp}(W)$</td><td>NC</td></tr><tr><td>$V_{mpp}(V)$</td><td>NC</td></tr><tr><td>$I_{mpp}(A)$</td><td>NC</td></tr></table>			$V_{oc,n}(V)$	71,2	$I_{sc,n}(A)$	6,4	STC	$P_{mpp}(W)$	300W	$V_{mpp}(V)$	53,9	$I_{mpp}(A)$	5,6	NOCT	$P_{mpp}(W)$	NC	$V_{mpp}(V)$	NC	$I_{mpp}(A)$	NC	Simulação <table><tr><td></td><td>$V_{oc,n}(V)$</td><td>71,2</td></tr><tr><td></td><td>$I_{sc,n}(A)$</td><td>6,5</td></tr><tr><td></td><td>$P_{mpp}(W)$</td><td>300,5</td></tr><tr><td></td><td>$V_{mpp}(V)$</td><td>54,5</td></tr><tr><td></td><td>$I_{mpp}(A)$</td><td>5,50</td></tr><tr><td></td><td>$P_{mpp}(W)$</td><td>212,9</td></tr><tr><td></td><td>$V_{mpp}(V)$</td><td>49,5</td></tr><tr><td></td><td>$I_{mpp}(A)$</td><td>4,3</td></tr></table>			$V_{oc,n}(V)$	71,2		$I_{sc,n}(A)$	6,5		$P_{mpp}(W)$	300,5		$V_{mpp}(V)$	54,5		$I_{mpp}(A)$	5,50		$P_{mpp}(W)$	212,9		$V_{mpp}(V)$	49,5		$I_{mpp}(A)$	4,3
	$V_{oc,n}(V)$	71,2																																														
	$I_{sc,n}(A)$	6,4																																														
STC	$P_{mpp}(W)$	300W																																														
	$V_{mpp}(V)$	53,9																																														
	$I_{mpp}(A)$	5,6																																														
NOCT	$P_{mpp}(W)$	NC																																														
	$V_{mpp}(V)$	NC																																														
	$I_{mpp}(A)$	NC																																														
	$V_{oc,n}(V)$	71,2																																														
	$I_{sc,n}(A)$	6,5																																														
	$P_{mpp}(W)$	300,5																																														
	$V_{mpp}(V)$	54,5																																														
	$I_{mpp}(A)$	5,50																																														
	$P_{mpp}(W)$	212,9																																														
	$V_{mpp}(V)$	49,5																																														
	$I_{mpp}(A)$	4,3																																														
P×V 		<table><tr><td></td><td>N_s</td><td>108*</td></tr><tr><td></td><td>$K_V(\%/K)$</td><td>-0,38</td></tr><tr><td></td><td>$K_I(\%/K)$</td><td>-0,03</td></tr></table>			N_s	108*		$K_V(\%/K)$	-0,38		$K_I(\%/K)$	-0,03	<table><tr><td colspan="2">Dados Econômicos:</td><td colspan="2">Parâmetros SDM</td></tr><tr><td>Preço:</td><td>U\$450,00</td><td>$R_p(\Omega)$</td><td>90,74</td></tr><tr><td>Peso:</td><td>9,9kg</td><td>$R_s(\Omega)$</td><td>1,49</td></tr><tr><td>Área:</td><td>2,84m²</td><td>a</td><td>1,0</td></tr><tr><td>η:</td><td>10,6%</td><td>$I_{pv}(A)$</td><td>6,5</td></tr><tr><td></td><td></td><td>$I_0(A)$</td><td>$1,9\times 10^{-3}$</td></tr></table>		Dados Econômicos:		Parâmetros SDM		Preço:	U\$450,00	$R_p(\Omega)$	90,74	Peso:	9,9kg	$R_s(\Omega)$	1,49	Área:	2,84m²	a	1,0	η :	10,6%	$I_{pv}(A)$	6,5			$I_0(A)$	$1,9\times 10^{-3}$										
	N_s	108*																																														
	$K_V(\%/K)$	-0,38																																														
	$K_I(\%/K)$	-0,03																																														
Dados Econômicos:		Parâmetros SDM																																														
Preço:	U\$450,00	$R_p(\Omega)$	90,74																																													
Peso:	9,9kg	$R_s(\Omega)$	1,49																																													
Área:	2,84m²	a	1,0																																													
η :	10,6%	$I_{pv}(A)$	6,5																																													
		$I_0(A)$	$1,9\times 10^{-3}$																																													
Energia Média Gerada: 																																																

Observações:

O *datasheet* não diz respeito sobre o arranjo interno do módulo. Considerou-se 108 células em série.

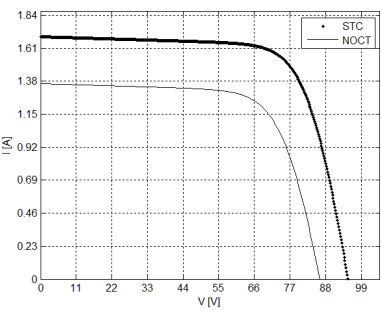
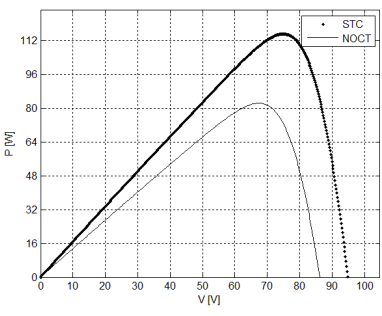
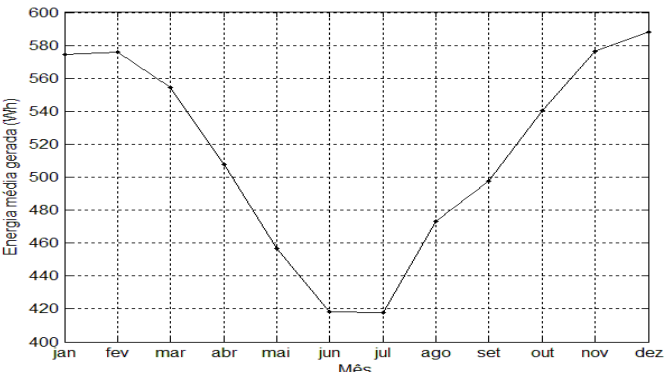
Fabricante não fornece dados para NOCT. Utilizou-se equação (26) para contornar o problema.

Tabela 89 - Formulário do módulo MS140GG

Tecn: CiGS	Modelo: MS 140GG	Fabricante: MIA SOLÉ				
I × V 		<i>datasheet</i>		<i>Simulação</i>		
		$V_{oc,n}(V)$	25,8	$V_{oc,n}(V)$	25,8	
		$I_{sc,n}(A)$	7,35	$I_{sc,n}(A)$	7,35	
		STC	$P_{mpp}(W)$	140	$P_{mpp}(W)$	140
			$V_{mpp}(V)$	21,0	$V_{mpp}(V)$	21,1
			$I_{mpp}(A)$	6,67	$I_{mpp}(A)$	6,65
		NOCT	$P_{mpp}(W)$	97,3	$P_{mpp}(W)$	97,5
			$V_{mpp}(V)$	18,5	$V_{mpp}(V)$	18,7
			$I_{mpp}(A)$	5,26	$I_{mpp}(A)$	5,22
		P × V 		N_s	NC	N_s
$K_V(\%/K)$	-0,36					
$K_I(\%/K)$	-0,003					
Dados Econômicos:				Parâmetros SDM		
Preço:	US\$210,00			$R_p(\Omega)$	158,43	
Peso:	18kg			$R_s(\Omega)$	0,001	
Área:	1,07m ²			a	1,0	
η :	13%			$I_{pv}(A)$	7,35	
				$I_0(A)$	$6,4 \times 10^{-6}$	
Energia Média Gerada: 						

Observações:

Tabela 90 – Formulário do módulo Q.Smart UF L 115

Tecn: CiGS	Modelo: Q.Smart UF L 115	Fabricante: Q.CELLS				
I × V 		<i>datasheet</i>		<i>Simulação</i>		
		$V_{oc,n}(V)$	95,1	$V_{oc,n}(V)$	95,1	
		$I_{sc,n}(A)$	1,69	$I_{sc,n}(A)$	1,69	
		STC	$P_{mpp}(W)$	115	$P_{mpp}(W)$	115
			$V_{mpp}(V)$	74,7	$V_{mpp}(V)$	74,5
			$I_{mpp}(A)$	1,54	$I_{mpp}(A)$	1,53
		NOCT	$P_{mpp}(W)$	83,1	$P_{mpp}(W)$	82,2
			$V_{mpp}(V)$	67,8	$V_{mpp}(V)$	67,3
			$I_{mpp}(A)$	1,22	$I_{mpp}(A)$	1,22
		P × V 		N_s	NC	N_s
$K_V(\%/K)$	-0,38					
$K_I(\%/K)$	0,04					
Dados Econômicos:				Parâmetros SDM		
Preço:	US\$159,00			$R_s(\Omega)$	1451,77	
Peso:	16,5kg			$R_p(\Omega)$	4,55	
Área:	0,94m ²			a	2,0	
η :	12,2%			$I_{pv}(A)$	1,69	
				$I_0(A)$	$3,1 \times 10^{-9}$	
Energia Média Gerada: 						

Observações:

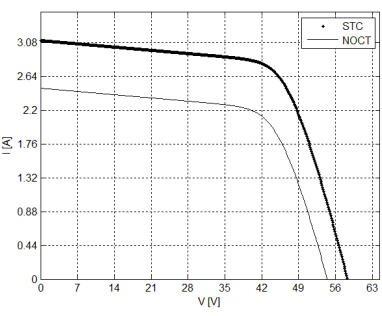
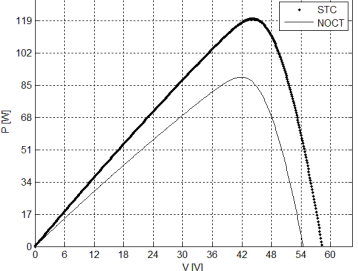
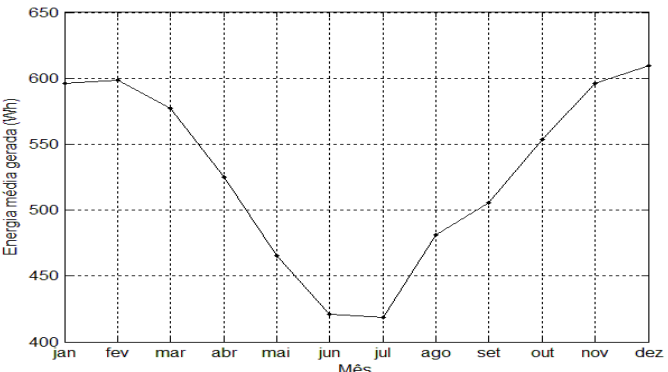
Tabela 91 – Formulário do módulo STN-140

Tecn: CiGS	Modelo: STN-140	Fabricante: STION				
I × V 		<i>datasheet</i>		<i>Simulação</i>		
		$V_{oc,n}(V)$	60	$V_{oc,n}(V)$	60	
		$I_{sc,n}(A)$	3,42	$I_{sc,n}(A)$	3,42	
		STC	$P_{mpp}(W)$	140	$P_{mpp}(W)$	140
			$V_{mpp}(V)$	45,5	$V_{mpp}(V)$	45,6
			$I_{mpp}(A)$	3,08	$I_{mpp}(A)$	3,07
		NOCT	$P_{mpp}(W)$	NC	$P_{mpp}(W)$	101,0
			$V_{mpp}(V)$	NC	$V_{mpp}(V)$	41,8
			$I_{mpp}(A)$	NC	$I_{mpp}(A)$	2,42
		P × V 		N_s	NC	N_s
$K_V(\%/K)$	-0,38					
$K_I(\%/K)$	0,04					
Dados Econômicos:				Parâmetros SDM		
Preço:	US\$279,00			$R_p(\Omega)$	366450	
Peso:	16,8kg	$R_s(\Omega)$	1,179			
Área:	1,09m ²	a	2,0			
η :	12,9%	$I_{pv}(A)$	3,42			
		$I_0(A)$	$1,1 \times 10^{-5}$			
Energia Média Gerada: 						

Observações:

Fabricante não fornece dados para NOCT. Os valores foram estimados através da equação (26).

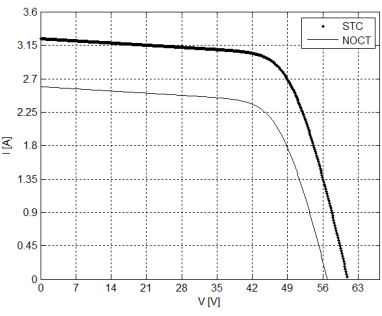
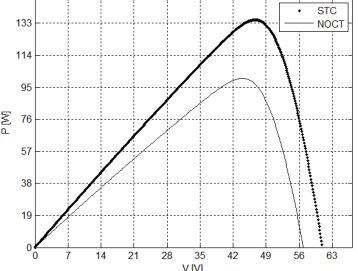
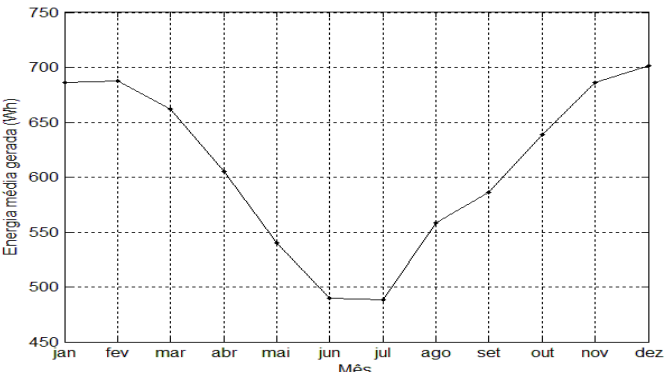
Tabela 92 – Formulário do modelo PowerMax Smart

Tecn: CiS	Modelo: PowerMax Smart	Fabricante: AVANCIS				
I × V 		<i>datasheet</i>		<i>Simulação</i>		
		$V_{oc,n}(V)$	58,5	$V_{oc,n}(V)$	58,3	
		$I_{sc,n}(A)$	3,11	$I_{sc,n}(A)$	3,11	
		STC	$P_{mpp}(W)$	120	$P_{mpp}(W)$	120
			$V_{mpp}(V)$	43,9	$V_{mpp}(V)$	44,2
			$I_{mpp}(A)$	2,73	$I_{mpp}(A)$	2,71
		NOCT	$P_{mpp}(W)$	89,5	$P_{mpp}(W)$	89,2
			$V_{mpp}(V)$	41,0	$V_{mpp}(V)$	41,9
			$I_{mpp}(A)$	2,48	$I_{mpp}(A)$	2,13
		P × V 		N_s	NC	N_s
$K_V(\%/K)$	-0,28					
$K_I(\%/K)$	0,003					
Dados Econômicos:				Parâmetros SDM		
Preço:	US\$276,00			$R_p(\Omega)$	162,6	
Peso:	16 kg			$R_s(\Omega)$	3,11	
Área:	1,05m ²			a	1,0	
η :	11,4%			$I_{pv}(A)$	3,17	
				$I_0(A)$	$5,7 \times 10^{-14}$	
Energia Média Gerada: 						

Observações:

Fabricante não fornece número de células em série. Ele foi utilizado como parâmetro de ajuste fino, ou seja, foi estipulado para que os valores da condição NOCT obtidos na simulação fossem Os mais próximos possíveis dos valores fornecidos pelo *datasheet*.

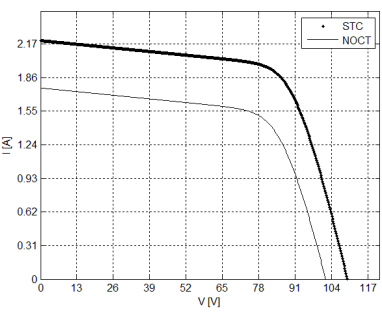
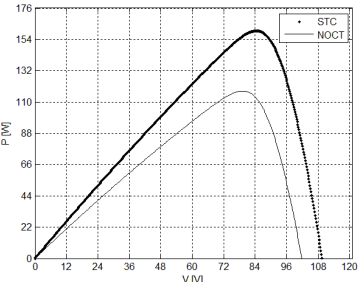
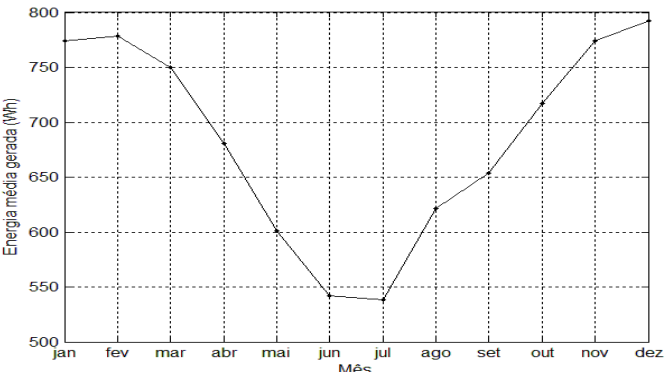
Tabela 93 – Formulário do módulo PowerMax Strong

Tecn: CiS	Modelo: PowerMax Strong	Fabricante: AVANCIS					
I × V 		datasheet		Simulação			
		$V_{oc,n}(V)$ $I_{sc,n}(A)$	61,1 3,24	$V_{oc,n}(V)$ $I_{sc,n}(A)$	60,9 3,24		
P × V 		STC	$P_{mpp}(W)$ $V_{mpp}(V)$ $I_{mpp}(A)$	135 46,6 2,90	Simulação	$P_{mpp}(W)$ $V_{mpp}(V)$ $I_{mpp}(A)$	135,2 47,3 2,85
		NOCT	$P_{mpp}(W)$ $V_{mpp}(V)$ $I_{mpp}(A)$	100,7 43,6 2,51	Simulação	$P_{mpp}(W)$ $V_{mpp}(V)$ $I_{mpp}(A)$	100,0 44,5 2,25
N_s K_V(%/K) K_I(%/K)		NC -0,28 0,003	N_s 88				
		Dados Econômicos:		Parâmetros SDM			
Preço: Peso: Área: η:		U\$190,00 19,6 kg 1,09m ² 12,6%	R_p(Ω) R_s(Ω) a I_{pv}(A) I₀(A)	238,5 2,67 1,0 3,28 $3,2 \times 10^{-12}$			
		Energia Média Gerada: 					

Observações:

Fabricante não fornece número de células em série. Contornou-se este problema conforme o Método descrito na seção 2.6.2

Tabela 94 – Formulário do módulo SF160-S

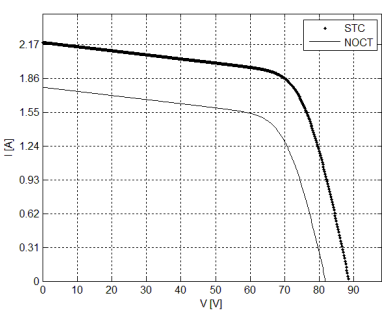
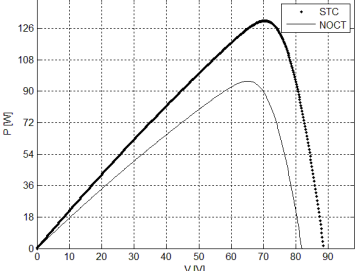
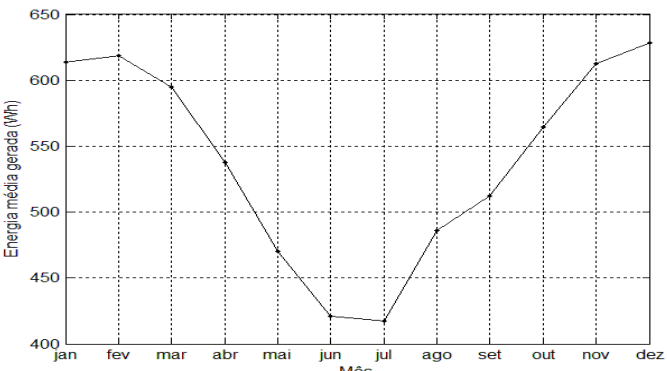
Tecn: CîS	Modelo: SF160-A	Fabricante: SOLAR FRONTIER																								
I × V 		datasheet <table border="1"> <tr> <td>$V_{oc,n}(V)$</td> <td>110</td> </tr> <tr> <td>$I_{sc,n}(A)$</td> <td>2,20</td> </tr> <tr> <td>$P_{mpp}(W)$</td> <td>160</td> </tr> <tr> <td>$V_{mpp}(V)$</td> <td>84</td> </tr> <tr> <td>$I_{mpp}(A)$</td> <td>1,91</td> </tr> </table>	$V_{oc,n}(V)$	110	$I_{sc,n}(A)$	2,20	$P_{mpp}(W)$	160	$V_{mpp}(V)$	84	$I_{mpp}(A)$	1,91														
$V_{oc,n}(V)$	110																									
$I_{sc,n}(A)$	2,20																									
$P_{mpp}(W)$	160																									
$V_{mpp}(V)$	84																									
$I_{mpp}(A)$	1,91																									
		Simulação <table border="1"> <tr> <td>$V_{oc,n}(V)$</td> <td>109,9</td> </tr> <tr> <td>$I_{sc,n}(A)$</td> <td>2,20</td> </tr> <tr> <td>$P_{mpp}(W)$</td> <td>160</td> </tr> <tr> <td>$V_{mpp}(V)$</td> <td>84,5</td> </tr> <tr> <td>$I_{mpp}(A)$</td> <td>1,90</td> </tr> </table>	$V_{oc,n}(V)$	109,9	$I_{sc,n}(A)$	2,20	$P_{mpp}(W)$	160	$V_{mpp}(V)$	84,5	$I_{mpp}(A)$	1,90														
$V_{oc,n}(V)$	109,9																									
$I_{sc,n}(A)$	2,20																									
$P_{mpp}(W)$	160																									
$V_{mpp}(V)$	84,5																									
$I_{mpp}(A)$	1,90																									
		<table border="1"> <tr> <td>$P_{mpp}(W)$</td> <td>119</td> <td>$P_{mpp}(W)$</td> <td>117,8</td> </tr> <tr> <td>$V_{mpp}(V)$</td> <td>78,8</td> <td>$V_{mpp}(V)$</td> <td>79,2</td> </tr> <tr> <td>$I_{mpp}(A)$</td> <td>1,51</td> <td>$I_{mpp}(A)$</td> <td>1,49</td> </tr> </table>	$P_{mpp}(W)$	119	$P_{mpp}(W)$	117,8	$V_{mpp}(V)$	78,8	$V_{mpp}(V)$	79,2	$I_{mpp}(A)$	1,51	$I_{mpp}(A)$	1,49												
$P_{mpp}(W)$	119	$P_{mpp}(W)$	117,8																							
$V_{mpp}(V)$	78,8	$V_{mpp}(V)$	79,2																							
$I_{mpp}(A)$	1,51	$I_{mpp}(A)$	1,49																							
		<table border="1"> <tr> <td>N_s</td> <td>NC</td> <td>N_s</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>$K_V(\%/K)$</td> <td>-0,31</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>$K_I(\%/K)$</td> <td>0,01</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	N_s	NC	N_s	100	$K_V(\%/K)$	-0,31			$K_I(\%/K)$	0,01														
N_s	NC	N_s	100																							
$K_V(\%/K)$	-0,31																									
$K_I(\%/K)$	0,01																									
P × V 		<table border="1"> <tr> <td>Dados Econômicos:</td> <td></td> <td>Parâmetros SDM</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Preço:</td> <td>US\$240,00</td> <td>$R_p(\Omega)$</td> <td>238,5</td> </tr> <tr> <td>Peso:</td> <td>20,0 kg</td> <td>$R_s(\Omega)$</td> <td>2,67</td> </tr> <tr> <td>Área:</td> <td>1,23 m²</td> <td>a</td> <td>1,0</td> </tr> <tr> <td>η:</td> <td>13,0 %</td> <td>$I_{pv}(A)$</td> <td>3,28</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>$I_0(A)$</td> <td>$3,2 \times 10^{-12}$</td> </tr> </table>	Dados Econômicos:		Parâmetros SDM		Preço:	US\$240,00	$R_p(\Omega)$	238,5	Peso:	20,0 kg	$R_s(\Omega)$	2,67	Área:	1,23 m ²	a	1,0	η :	13,0 %	$I_{pv}(A)$	3,28			$I_0(A)$	$3,2 \times 10^{-12}$
Dados Econômicos:		Parâmetros SDM																								
Preço:	US\$240,00	$R_p(\Omega)$	238,5																							
Peso:	20,0 kg	$R_s(\Omega)$	2,67																							
Área:	1,23 m ²	a	1,0																							
η :	13,0 %	$I_{pv}(A)$	3,28																							
		$I_0(A)$	$3,2 \times 10^{-12}$																							
Energia Média Gerada: 																										

Observações:

Fabricante não fornece número de células em série. Contornou-se este problema conforme o

Método descrito na seção 2.6.2

Tabela 95 – Formulário do módulo $\mu\text{-Si Plus 130}$

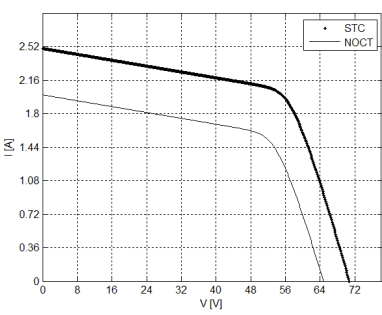
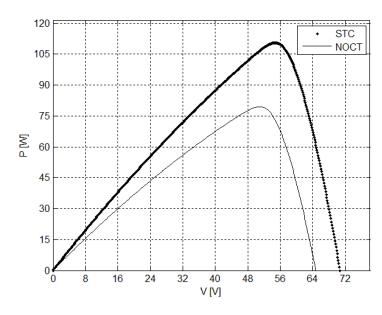
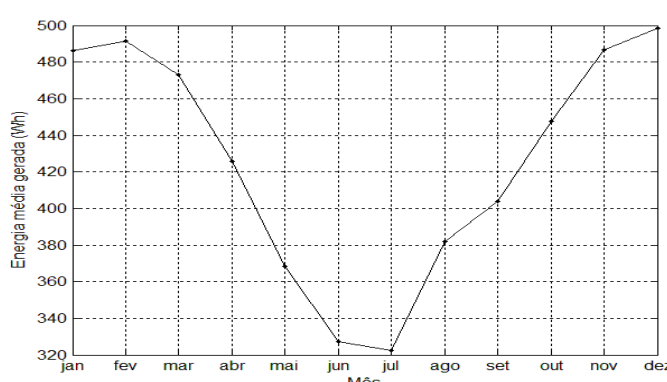
Tecn: $\mu\text{-Si}$		Modelo: $\mu\text{-Si Plus 130}$		Fabricante: BOSCH				
$I \times V$ 		datasheet		Simulação				
		$V_{oc,n}(V)$		89	$V_{oc,n}(V)$		88,5	
		$I_{sc,n}(A)$		2,19	$I_{sc,n}(A)$		2,19	
		STC	$P_{mpp}(W)$	130	$P_{mpp}(W)$		130,2	
			$V_{mpp}(V)$	70	$V_{mpp}(V)$		70,3	
			$I_{mpp}(A)$	1,88	$I_{mpp}(A)$		1,85	
		NOCT	$P_{mpp}(W)$	98	$P_{mpp}(W)$		95,7	
			$V_{mpp}(V)$	64	$V_{mpp}(V)$		65,1	
			$I_{mpp}(A)$	1,53	$I_{mpp}(A)$		1,47	
		$P \times V$ 		N_s		NC	N_s	
$K_V(\%/K)$				-0,33				
$K_I(\%/K)$				0,08				
Dados Econômicos:				Parâmetros SDM				
Preço:	US\$173,00			$R_p(\Omega)$	260,4			
Peso:	25,0 kg			$R_s(\Omega)$	4,92			
Área:	1,43 m ²			a	1,0			
η :	9,3 %			$I_{pv}(A)$	2,23			
				$I_0(A)$	$4,6 \times 10^{-14}$			
Energia Média Gerada:								
								

Observações:

Fabricante não fornece número de células em série. Contornou-se este problema conforme o

Método descrito na seção 2.6.2

Tabela 96 – Formulário do módulo U-SA110

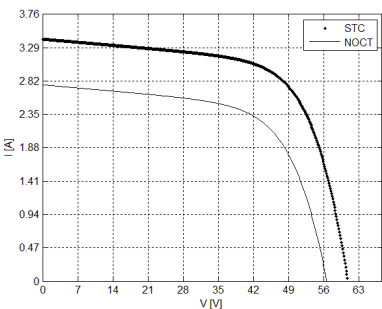
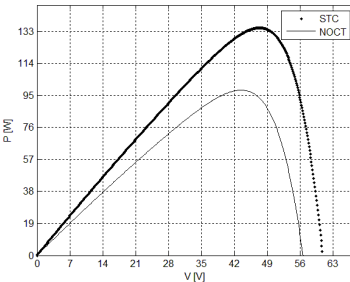
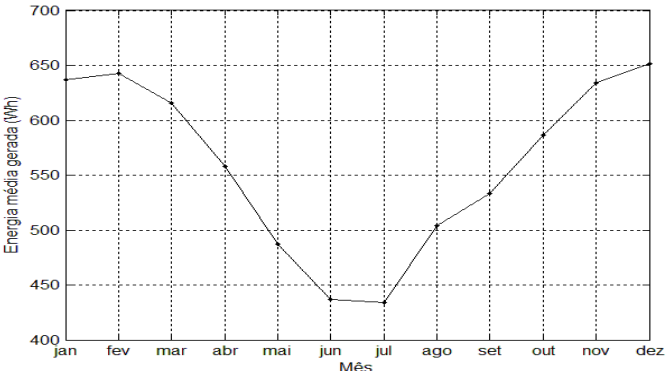
Tecn: μ -Si		Modelo: U-SA110		Fabricante: KANEKA		
I $\times$ V 		datasheet		Simulação		
		$V_{oc,n}(V)$	71,0	$V_{oc,n}(V)$	70,8	
		$I_{sc,n}(A)$	2,5	$I_{sc,n}(A)$	2,5	
		STC	$P_{mpp}(W)$	110	$P_{mpp}(W)$	110,4
			$V_{mpp}(V)$	53,5	$V_{mpp}(V)$	54,7
			$I_{mpp}(A)$	2,04	$I_{mpp}(A)$	2,02
		NOCT	$P_{mpp}(W)$	81,8	$P_{mpp}(W)$	79,5
			$V_{mpp}(V)$	49,2	$V_{mpp}(V)$	51,0
			$I_{mpp}(A)$	1,67	$I_{mpp}(A)$	1,56
		P $\times$ V 		N_s	2×53	N_s
$K_V(\%/K)$	-0,33					
$K_I(\%/K)$	0,08					
Dados Econômicos:				Parâmetros SDM		
Preço:	US\$239,00			$R_p(\Omega)$	242,3	
Peso:	18,3 kg			$R_s(\Omega)$	10,90	
Área:	1,22 m ²			a	1,0	
η :	9,0 %			$I_{pv}(A)$	1,3	
				$I_0(A)$	$2,8 \times 10^{-23}$	
Energia Média Gerada:						
						

Observações:

O programa não conseguiu simular com exatidão a curva $I \times V$. O catálogo está disponível no anexo V. Esse problema foi melhor estudado na seção 2.8

ANEXO VI

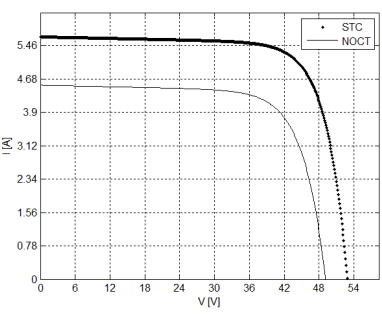
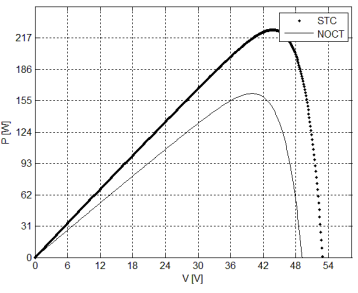
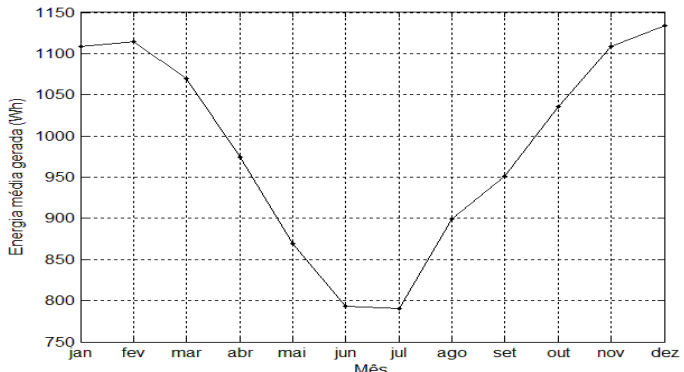
Tabela 97 – Formulário do módulo NA-F135GK

Tecn: μ -Si		Modelo: NA-F135GK		Fabricante: SHARP	
I × V 		datasheet		Simulação	
		$V_{oc,n}(V)$ 61,3		$V_{oc,n}(V)$ 61,3	
		$I_{sc,n}(A)$ 3,41		$I_{sc,n}(A)$ 3,41	
		STC	$P_{mpp}(W)$ 135	$P_{mpp}(W)$ 135	
			$V_{mpp}(V)$ 47,0	$V_{mpp}(V)$ 47,3	
			$I_{mpp}(A)$ 2,88	$I_{mpp}(A)$ 2,85	
		NOCT	$P_{mpp}(W)$ NC	$P_{mpp}(W)$ 98,12	
			$V_{mpp}(V)$ NC	$V_{mpp}(V)$ 43,4	
			$I_{mpp}(A)$ NC	$I_{mpp}(A)$ 2,26	
		P × V 		N_s 180	N_s 180
$K_V(\%/K)$ -0,30					
$K_I(\%/K)$ 0,07					
Dados Econômicos: Preço:US\$255,15 Peso:18,0 kg Área:1,42 m² η:9,5 %				Parâmetros SDM $R_p(\Omega)$159,43 $R_s(\Omega)$0,74 a1,0 $I_{pv}(A)$3,43 $I_0(A)$$5,9 \times 10^{-6}$	
Energia Média Gerada: 					

Observações:

Apesar do fabricante não fornecer dados no NOCT explicitamente, fornece curvas de correção para diferentes temperaturas e irradiações, assim pôde-se estimar a potência máxima no NOCT próximo aos 100W.

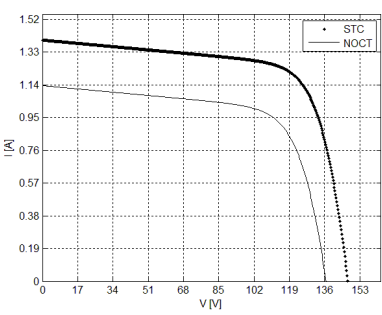
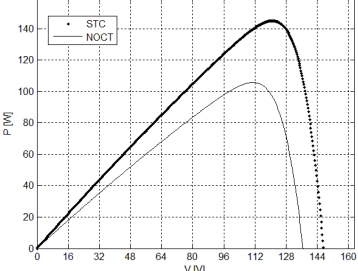
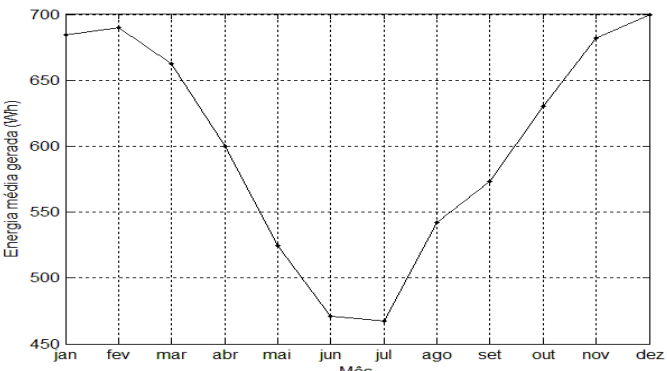
Tabela 98 – Formulário do módulo HIT Power 225A

Tecn: HIT	Modelo: HIT Power 225A	Fabricante: SANYO			
I × V 		datasheet $V_{oc,n}(V)$ 53 $I_{sc,n}(A)$ 5,66		Simulação $V_{oc,n}(V)$ 52,9 $I_{sc,n}(A)$ 5,66	
		STC $P_{mpp}(W)$ 225 $V_{mpp}(V)$ 43,4 $I_{mpp}(A)$ 5,21		$P_{mpp}(W)$ 225 $V_{mpp}(V)$ 43,8 $I_{mpp}(A)$ 5,15	
		NOCT $P_{mpp}(W)$ NC $V_{mpp}(V)$ NC $I_{mpp}(A)$ NC		$P_{mpp}(W)$ 162,1 $V_{mpp}(V)$ 4,06 $I_{mpp}(A)$ 40,00	
P × V 		N_s 72 $K_V(\%/K)$ -0,28 $K_I(\%/K)$ 0,004			
		Dados Econômicos: Preço: US\$579,00 Peso: 16,0 kg Área: 1,26m ² η : 17,8 %		Parâmetros SDM $R_p(\Omega)$ 340,1 $R_s(\Omega)$ 0,06 a 1,8 $I_{pv}(A)$ 5,66 $I_0(A)$ $6,9 \times 10^{-7}$	
Energia Média Gerada: 					

Observações:

O fabricante não fornece potência, tensão e corrente no NOCT. Utilizou-se equação (26) para contornar o problema.

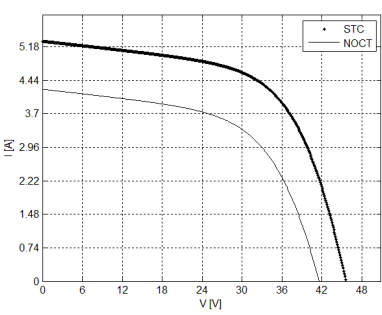
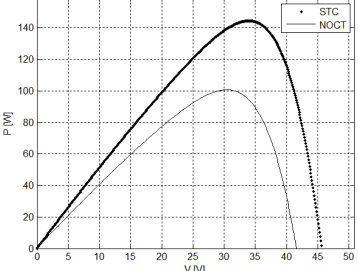
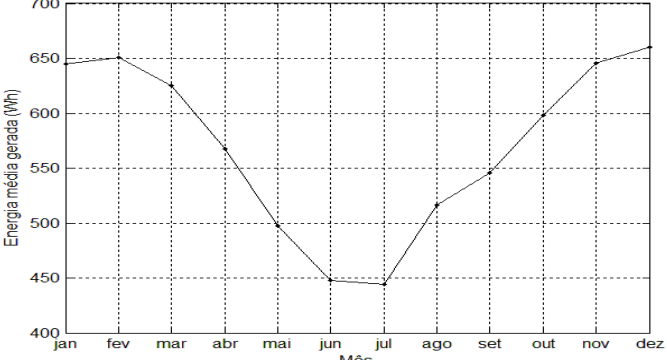
Tabela 99 – Formulário do módulo BB132A05

Tecn: Trans.		Modelo: BB132A05		Fabricante: BEYOND-PV																																												
I × V 		datasheet <table><tr><td rowspan="2"></td><td>$V_{oc,n}(V)$</td><td>148,1</td></tr><tr><td>$I_{sc,n}(A)$</td><td>1,4</td></tr><tr><td rowspan="3">STC</td><td>$P_{mpp}(W)$</td><td>145</td></tr><tr><td>$V_{mpp}(V)$</td><td>120,3</td></tr><tr><td>$I_{mpp}(A)$</td><td>1,2</td></tr><tr><td rowspan="3">NOCT</td><td>$P_{mpp}(W)$</td><td>NC</td></tr><tr><td>$V_{mpp}(V)$</td><td>NC</td></tr><tr><td>$I_{mpp}(A)$</td><td>NC</td></tr></table>			$V_{oc,n}(V)$	148,1	$I_{sc,n}(A)$	1,4	STC	$P_{mpp}(W)$	145	$V_{mpp}(V)$	120,3	$I_{mpp}(A)$	1,2	NOCT	$P_{mpp}(W)$	NC	$V_{mpp}(V)$	NC	$I_{mpp}(A)$	NC	Simulação <table><tr><td></td><td>$V_{oc,n}(V)$</td><td>147,2</td></tr><tr><td></td><td>$I_{sc,n}(A)$</td><td>1,4</td></tr><tr><td></td><td>$P_{mpp}(W)$</td><td>145</td></tr><tr><td></td><td>$V_{mpp}(V)$</td><td>120,8</td></tr><tr><td></td><td>$I_{mpp}(A)$</td><td>1,20</td></tr><tr><td></td><td>$P_{mpp}(W)$</td><td>105,8</td></tr><tr><td></td><td>$V_{mpp}(V)$</td><td>111,8</td></tr><tr><td></td><td>$I_{mpp}(A)$</td><td>0,95</td></tr></table>			$V_{oc,n}(V)$	147,2		$I_{sc,n}(A)$	1,4		$P_{mpp}(W)$	145		$V_{mpp}(V)$	120,8		$I_{mpp}(A)$	1,20		$P_{mpp}(W)$	105,8		$V_{mpp}(V)$	111,8		$I_{mpp}(A)$	0,95
	$V_{oc,n}(V)$	148,1																																														
	$I_{sc,n}(A)$	1,4																																														
STC	$P_{mpp}(W)$	145																																														
	$V_{mpp}(V)$	120,3																																														
	$I_{mpp}(A)$	1,2																																														
NOCT	$P_{mpp}(W)$	NC																																														
	$V_{mpp}(V)$	NC																																														
	$I_{mpp}(A)$	NC																																														
	$V_{oc,n}(V)$	147,2																																														
	$I_{sc,n}(A)$	1,4																																														
	$P_{mpp}(W)$	145																																														
	$V_{mpp}(V)$	120,8																																														
	$I_{mpp}(A)$	1,20																																														
	$P_{mpp}(W)$	105,8																																														
	$V_{mpp}(V)$	111,8																																														
	$I_{mpp}(A)$	0,95																																														
P × V 		<table><tr><td>N_s</td><td>NC</td></tr><tr><td>$K_V(\%/K)$</td><td>-0,28</td></tr><tr><td>$K_I(\%/K)$</td><td>0,004</td></tr></table>		N_s	NC	$K_V(\%/K)$	-0,28	$K_I(\%/K)$	0,004	<table><tr><td>N_s</td><td>154</td></tr></table>		N_s	154																																			
N_s	NC																																															
$K_V(\%/K)$	-0,28																																															
$K_I(\%/K)$	0,004																																															
N_s	154																																															
		Dados Econômicos: Preço: U\$650,00 Peso: 19,0 kg Área: 1,26m² η: 9,9 %		Parâmetros SDM $R_p(\Omega)$ 890,7 $R_s(\Omega)$ 4,54 a 1,8 $I_{pv}(A)$ 1,41 $I_0(A)$ $1,3 \times 10^{-9}$																																												
Energia Média Gerada: 																																																

Observações:

O fabricante não fornece potência, tensão e corrente no NOCT. Os valores foram estimados através da equação (26).

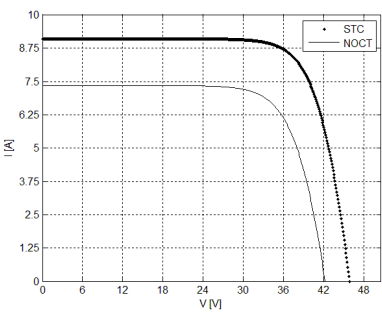
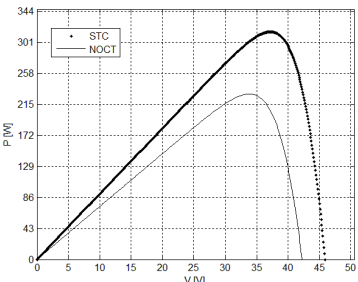
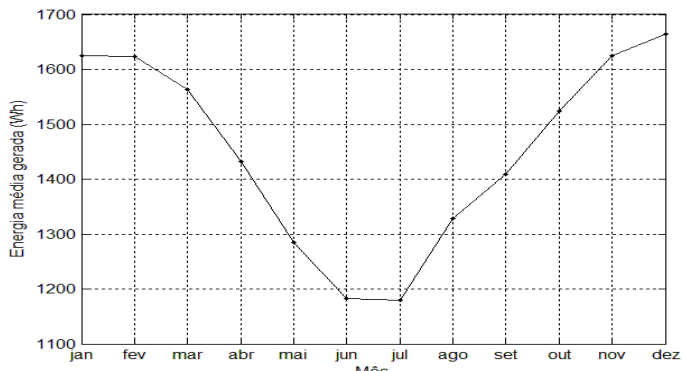
Tabela 100 – Formulário módulo PowerBond ePVL

Tecn: multi-junction		Modelo: PowerBond ePVL		Fabricante: UNI-SOLAR				
I × V 		datasheet		Simulação				
		V _{oc,n} (V)		46,2	V _{oc,n} (V)		46,2	
		I _{sc,n} (A)		5,3	I _{sc,n} (A)		5,3	
		STC	P _{mpp} (W)		144	P _{mpp} (W)		144,2
			V _{mpp} (V)		33,0	V _{mpp} (V)		33,9
			I _{mpp} (A)		4,4	I _{mpp} (A)		4,3
		NOCT	P _{mpp} (W)		111	P _{mpp} (W)		100,7
			V _{mpp} (V)		30,8	V _{mpp} (V)		30,4
			I _{mpp} (A)		3,6	I _{mpp} (A)		3,3
		P × V 		N _s		22	N _s	
K _V (%/K)				-0,31				
K _I (%/K)				0,004				
				Dados Econômicos:		Parâmetros SDM		
Preço:				U\$339,00		R _p (Ω)		59,7
Peso:				7,6 kg		R _s (Ω)		0,6
Área:				2,02 m²		a		1,8
η:				7,2 %		I _{pv} (A)		5,35
						I ₀ (A)		6,2 × 10 ⁻⁵
Energia Média Gerada:								
								

Observações:

Não foi possível convergir o valor de potência no NOCT para o valor de catálogo. Isso se deve ao fato do modelo matemático utilizado ser aproximado.

Tabela 101 – Formulário do módulo OP-315-72

Tecn: Art-Sun m-Si		Modelo: OP 315-72		Fabricante:SUNIVA																																												
I×V 		datasheet <table><tr><td rowspan="2"></td><td>$V_{oc,n}(V)$</td><td>45,9</td></tr><tr><td>$I_{sc,n}(A)$</td><td>9,1</td></tr><tr><td rowspan="3">STC</td><td>$P_{mpp}(W)$</td><td>315</td></tr><tr><td>$V_{mpp}(V)$</td><td>36,5</td></tr><tr><td>$I_{mpp}(A)$</td><td>8,62</td></tr><tr><td rowspan="3">NOCT</td><td>$P_{mpp}(W)$</td><td>NC</td></tr><tr><td>$V_{mpp}(V)$</td><td>NC</td></tr><tr><td>$I_{mpp}(A)$</td><td>NC</td></tr></table>			$V_{oc,n}(V)$	45,9	$I_{sc,n}(A)$	9,1	STC	$P_{mpp}(W)$	315	$V_{mpp}(V)$	36,5	$I_{mpp}(A)$	8,62	NOCT	$P_{mpp}(W)$	NC	$V_{mpp}(V)$	NC	$I_{mpp}(A)$	NC	Simulação <table><tr><td></td><td>$V_{oc,n}(V)$</td><td>45,9</td></tr><tr><td></td><td>$I_{sc,n}(A)$</td><td>9,1</td></tr><tr><td></td><td>$P_{mpp}(W)$</td><td>315,6</td></tr><tr><td></td><td>$V_{mpp}(V)$</td><td>37,2</td></tr><tr><td></td><td>$I_{mpp}(A)$</td><td>8,5</td></tr><tr><td></td><td>$P_{mpp}(W)$</td><td>229,4</td></tr><tr><td></td><td>$V_{mpp}(V)$</td><td>33,8</td></tr><tr><td></td><td>$I_{mpp}(A)$</td><td>6,79</td></tr></table>			$V_{oc,n}(V)$	45,9		$I_{sc,n}(A)$	9,1		$P_{mpp}(W)$	315,6		$V_{mpp}(V)$	37,2		$I_{mpp}(A)$	8,5		$P_{mpp}(W)$	229,4		$V_{mpp}(V)$	33,8		$I_{mpp}(A)$	6,79
	$V_{oc,n}(V)$	45,9																																														
	$I_{sc,n}(A)$	9,1																																														
STC	$P_{mpp}(W)$	315																																														
	$V_{mpp}(V)$	36,5																																														
	$I_{mpp}(A)$	8,62																																														
NOCT	$P_{mpp}(W)$	NC																																														
	$V_{mpp}(V)$	NC																																														
	$I_{mpp}(A)$	NC																																														
	$V_{oc,n}(V)$	45,9																																														
	$I_{sc,n}(A)$	9,1																																														
	$P_{mpp}(W)$	315,6																																														
	$V_{mpp}(V)$	37,2																																														
	$I_{mpp}(A)$	8,5																																														
	$P_{mpp}(W)$	229,4																																														
	$V_{mpp}(V)$	33,8																																														
	$I_{mpp}(A)$	6,79																																														
P×V 		<table><tr><td></td><td>N_s</td><td>72</td></tr><tr><td></td><td>$K_V(\%/K)$</td><td>-0,34</td></tr><tr><td></td><td>$K_I(\%/K)$</td><td>0,05</td></tr></table>			N_s	72		$K_V(\%/K)$	-0,34		$K_I(\%/K)$	0,05	Dados Econômicos: <table><tr><td>Preço:</td><td>U\$399,00</td></tr><tr><td>Peso:</td><td>23 kg</td></tr><tr><td>Área:</td><td>1,94 m²</td></tr><tr><td>η:</td><td>16,5 %</td></tr></table> Parâmetros SDM <table><tr><td>$R_p(\Omega)$</td><td>23509,7</td></tr><tr><td>$R_s(\Omega)$</td><td>0,232</td></tr><tr><td>a</td><td>1,35</td></tr><tr><td>$I_{pv}(A)$</td><td>9,1</td></tr><tr><td>$I_0(A)$</td><td>$9,5\times10^{-9}$</td></tr></table>		Preço:	U\$399,00	Peso:	23 kg	Área:	1,94 m²	η :	16,5 %	$R_p(\Omega)$	23509,7	$R_s(\Omega)$	0,232	a	1,35	$I_{pv}(A)$	9,1	$I_0(A)$	$9,5\times10^{-9}$																
	N_s	72																																														
	$K_V(\%/K)$	-0,34																																														
	$K_I(\%/K)$	0,05																																														
Preço:	U\$399,00																																															
Peso:	23 kg																																															
Área:	1,94 m²																																															
η :	16,5 %																																															
$R_p(\Omega)$	23509,7																																															
$R_s(\Omega)$	0,232																																															
a	1,35																																															
$I_{pv}(A)$	9,1																																															
$I_0(A)$	$9,5\times10^{-9}$																																															
Energia Média Gerada: 																																																

Observações:

O fabricante não fornece potência, tensão e corrente no NOCT. O problema foi contornado utilizando-se a equação (26).