

Capítulo III – Modelagem Matemática da Irradiação de Lâmpadas para Geração de Energia Fotovoltaica

Luis Gustavo Ferrareto Espontão¹⁰
Prof.^a Dra. Camila Fogaça de Oliveira¹¹

RESUMO

O presente artigo faz parte de um projeto desenvolvido na Faculdade de Tecnologia Senai Londrina que tem por objetivo desenvolver um kit didático solar para o aprendizado no período noturno de futuros profissionais da área de energias renováveis. Neste artigo em especial, serão feitas simulações com o módulo fotovoltaico disponível por meio de um software para observar o seu comportamento e, a fim de validar as simulações, um experimento em bancada será realizado. Os resultados visam a construção do kit didático solar noturno para compor aulas, o manuseio dos equipamentos e instrumentos de medições das grandezas elétricas que compõem o sistema.

Palavras-chave: Kit didático. Irradiação. Energias renováveis. Modelagem Matemática.

¹⁰ Graduando em Engenharia Elétrica. E-mail: luis.espontao@sesisenaipr.org.br

¹¹ Docente da Faculdade da Indústria Senai Londrina. E-mail: camila.oliveira@sistemafiep.org.br

MATHEMATICAL MODELING OF LAMP IRRADIATION FOR PHOTOVOLTAIC POWER GENERATION

ABSTRACT

The present article is part of a project developed at the Faculdade de Tecnologia Senai Londrina that aims to develop a solar didactic kit for nighttime learning for future professionals in the area of renewable energy. In this article in particular, simulations will be made with the photovoltaic module available through software to observe its behavior and, in order to validate the simulations, a bench experiment will be performed. The results aim at the construction of the night solar didactic kit to compose classes, the handling of the equipment and instruments for measuring the electrical quantities that compose the system.

Key-words: Teaching kit. Irradiation. Renewable energy. Mathematical model

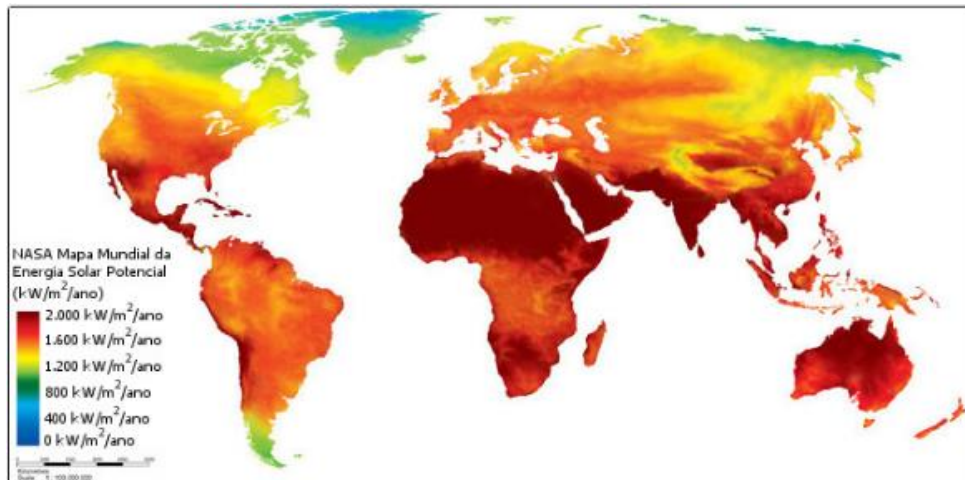
1. INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta um potencial muito grande em geração de energias renováveis, devido a abundância de diversos recursos naturais capazes de serem utilizados na geração de energias, tais como, recursos hídricos, ventos e irradiação solar, os quais, não foram muito explorados, abrindo espaço para as empresas brasileiras investirem em fontes renováveis (TRANNIN, 2016).

Nos últimos anos, a energia fotovoltaica no Brasil apresentou grandes crescimentos no mercado. Em 2019, foram instalados mais de 110 mil sistemas fotovoltaicos de mini e microgeração, correspondendo a 4,8 bilhões de reais e cerca de 15 mil profissionais trabalhando na área (DADOS, 2019).

Por ser um país com elevado índices de irradiação, pode-se esperar um desempenho considerável das usinas fotovoltaicas através dos fatores climáticos de exposição a energia solar, como ilustrado na Fig. 1.1, pois, dependendo da região da instalação da usina fotovoltaica, a eficiência pode ser muito satisfatória.

Figura 1.1 – Potencial de Energia Solar mundial



Fonte: NASA, 2020.

Como tem aumentado a demanda de mercado para profissionais capacitados para atuar em instalações de sistemas fotovoltaicos, a Faculdade de Tecnologia Senai Londrina se propôs, em conjunto com os alunos dos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica a desenvolver um kit didático solar fotovoltaico noturno, propiciando aplicar os conhecimentos teóricos ao mesmo tempo vivenciá-los na prática.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 IRRADIAÇÃO SOLAR

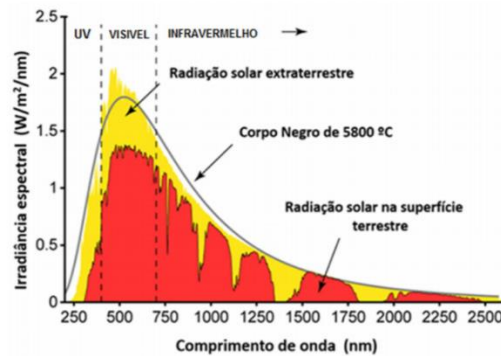
O Sol emite três tipos diferentes de radiações em formas de ondas eletromagnéticas, cada uma com seu respectivo comprimento de onda (Fig. 2.1). Segundo a International Organization for Standardization (2007, p. 6) podem ser denominados como:

- *Ultravioleta (UV)* com comprimento de onda entre 100nm e 400nm, onde grande parte é absorvida pela atmosfera terrestre. Ultravioleta A (UV-A) e ultravioleta B (UV-B) são parte de uma classe que ultrapassa a atmosfera terrestre, na faixa de entre 280nm e 315nm e são parcialmente absorvidos pela camada de ozônio, especialmente o UV-B.

- *Luz Visível (VIS)* é referente a forma de onda que nossos globos oculares captam em forma de cores. Seu espectro é formado do comprimento de 400nm até 700nm, onde dentro deste intervalo, estão todas as cores que conhecemos.
- *Infravermelho* são os comprimentos de onda acima de 760nm até 1mm, responsáveis por carregarem energia em forma de calor e dissipá-lo em nosso planeta.

Na Fig. 2.1 também é possível vislumbrar a comparação entre o espectro extraterrestre e a superfície terrestre (PASIN, 2019).

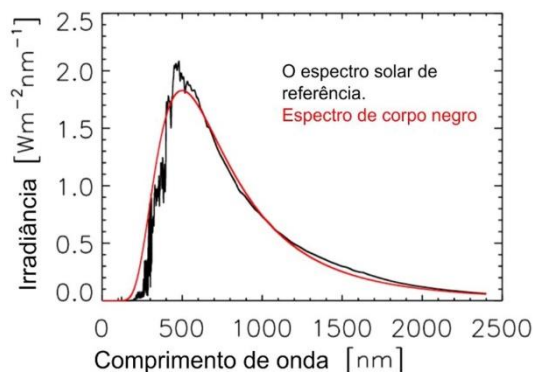
Figura 2.1 – Espectro de Irradiação Solar



Fonte: Física clássica (tradução nossa).

O Sol emite uma radiação térmica, no entanto seu espectro de radiação depende da composição deste corpo. Existem corpos que emitem espectros de radiações térmicas de forma universal, denominados como corpos negros, determinada por sua temperatura e comprimento de onda, conforme a lei de Planck. O espectro solar é um exemplo de corpo negro, devido a sua distribuição espectral, a uma temperatura de 5800 K, conforme é ilustrado na Figura 2.2, onde é realizada a aproximação da curva de radiação de referência a um espectro de corpo negro. (RODRÍGUEZ GÓMEZ, 2018).

Figura 2.2 – Radiação Solar de corpo negro



Fonte: Rodríguez Gómez (2018).

A energia eletromagnética emitida pelo Sol está em uma faixa de 200nm até cerca de 2500nm, compondo todo o espectro de irradiação solar discutido anteriormente. Como indica a Fig. 2.1, o comprimento de onda ultravioleta representa 8% do espectro solar, a luz visível representa cerca de 47% do espectro solar e o espectro infravermelho representa cerca de 45% do espectro solar.

Na próxima seção analisaremos a sensibilidade espectral das células fotovoltaicas tendo como intuito realizar simulações com o módulo fotovoltaico disponível.

2.2 CÉLULAS DE SILÍCIO

Células de silício em geral apresentam uma maior eficiência dentre os outros tipos comercializados mundialmente, possuindo eficiência em torno de 25% para células monocristalinas de silício e 20% para as células policristalinas de silício (pSi). Essa porcentagem é relativamente reduzida quando analisada nos módulos fotovoltaicos, cerca de 23% e 19%, respectivamente, devido a perdas internas do sistema (NEVES, 2016).

As células fotovoltaicas disponíveis são de silício policristalino (pSi), compostas por silício e algumas impurezas, são menos eficientes que as células monocristalinas, porém permitem um grau de impureza maior e com custo menor de produção.

A Fig. 2.3 ilustra um esquema das camadas de silício e outros materiais presentes na célula fotovoltaica. A Fig. 2.4 ilustra a sensibilidade dos espectros em comprimento de onda para vários tipos de células, em especial, para as células de silício.

Figura 2.3 – Esquema de uma célula de cristalina de silício

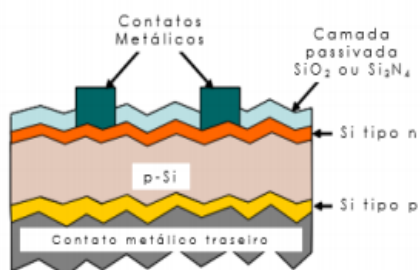
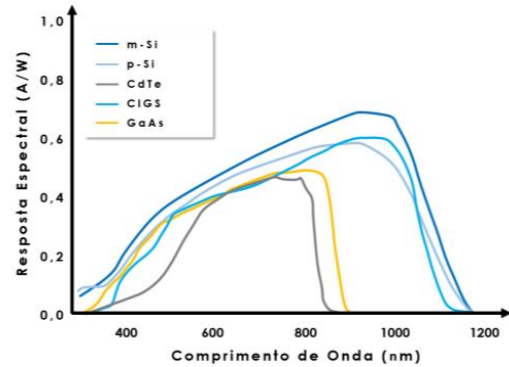


Figura 2.4 – Sensibilidade espectral de tecnologias fotovoltaicas

Fonte: Neves (2016).

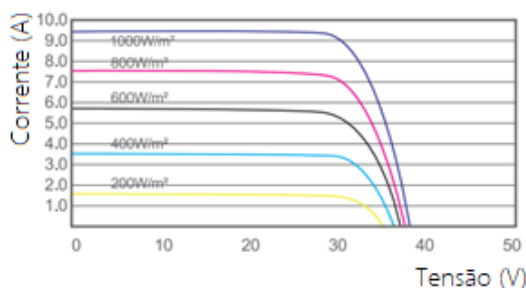


Fonte: Neves (2016).

De acordo com a Fig. 2.4 podemos analisar que as células policristalinas de silício (pSi) operam na faixa de 400nm até cerca de 1200nm, tendo a máxima operação entre 800nm e 1000nm. A partir destes aspectos é possível realizar um estudo para o modelo de iluminação artificial que propicie o melhor comprimento de onda em forma de irradiação que seja compatível com a sensibilidade do módulo fotovoltaico.

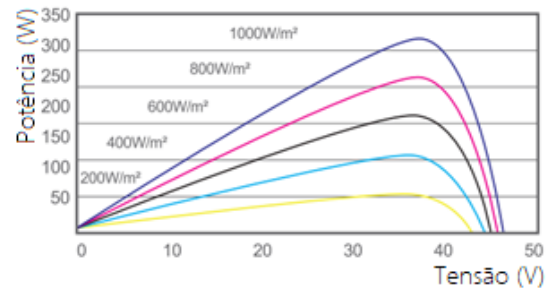
Assim será conduzida uma pesquisa relacionando a potência de saída no módulo, obtendo os dados através de um microcontrolador, gerando um gráfico de corrente por tensão ($I \times V$) e potência por tensão ($P \times V$) (Fig. 2.5 e Fig. 2.6).

Figura 2.5 – Exemplo de curva $I \times V$



Fonte: Adaptado de DAH Solar (Anexo A).

Figura 2.6 – Exemplo de curva $P \times V$



Fonte: Adaptado de DAH Solar (Anexo A).

As Figuras 2.5 e 2.6 foram retiradas diretamente das informações da folha de dados do fabricante e utilizaremos como modelo para nossa plotagem de dados para comparar a metodologia aplicada para a coleta e análise de dados.

3 METODOLOGIA

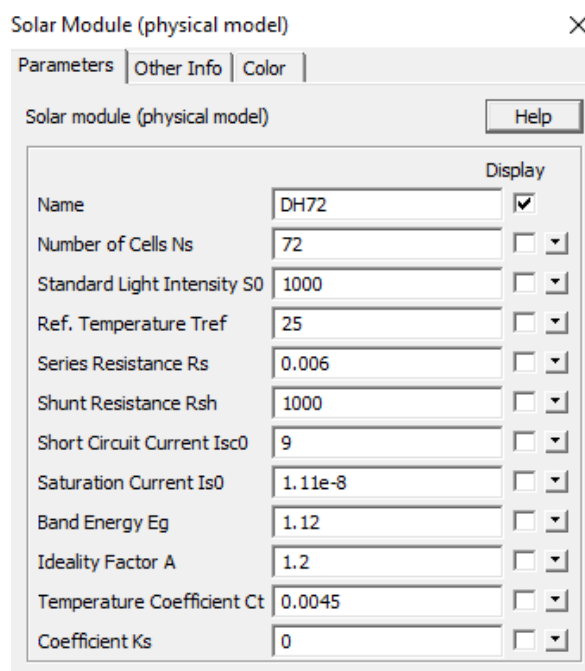
3.1 Coleta de dados utilizando o simulador PSIM

O módulo fotovoltaico que temos disponível é o modelo DHP72-315W (Anexo A) do fabricante DAH Solar, constituído de células policristalinas de silício (pSi). Conhecendo as características do fabricante desse modelo, temos os dados da potência de geração testados em laboratório com diferentes situações de irradiações:

- STC (Standard Test Conditions), espectro padrão utilizado para testes laboratoriais com a irradiância de 1000 W/ m^2 , temperatura de 25° C , espectro AM1.5G;
- Noct (Normal Operating Cell Temperature) realizado com a operação do módulo em circuito aberto, temperatura de 20° e com a irradiância de 800 W/ m^2 .

Para validação dos dados coletados foi utilizado o software de circuitos PSIM, que possibilita a simulação de curvas dos módulos fotovoltaicos utilizando parâmetros reais. Utilizando o espectro padrão com a irradiância de 1000 W/ m^2 e temperatura de 25° C , o software retorna os valores calculados de potência, tensão e corrente e as respectivas curvas, conforme indica a Fig. 3.1.

Figura 3.1 – Parâmetros de Simulação utilizando software PSIM

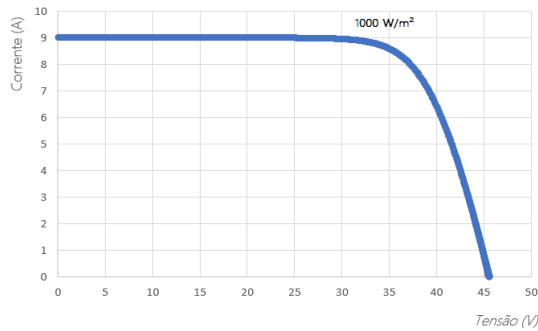


Fonte: Dos Autores.

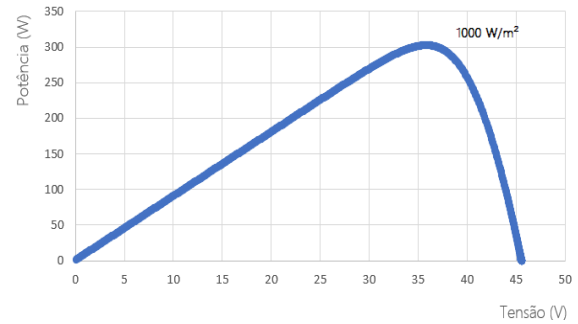
Os dados obtidos pelo software PSIM foram exportados para o software Excel. Ao plotarmos as curvas de (i) corrente e tensão e (ii) potência e tensão, por meio destes pontos coletados, temos os modelos representados pela Fig. 3.2 e Fig. 3.3.

Figura 3.2 – Curva I x V

Figura 3.3 – Curva P x V



Fonte: Dos Autores.



Fonte: Dos Autores.

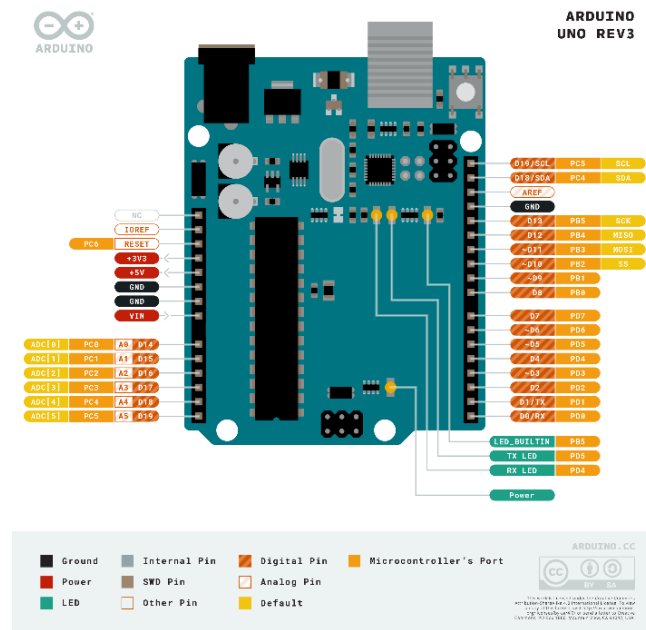
Obtidos os dados simulados, foi possível comparar com os dados que o fabricante fornece em sua folha de dados. Nota-se que as curvas simuladas (Fig. 3.2 e Fig. 3.3) se assemelham às curvas que o fabricante fornece (Fig. 2.5 e Fig. 2.6).

No caso da simulação utilizando o software PSIM são desconsiderados fatores físicos do ambiente, o que leva a essa diferença de valores, principalmente ao ponto de potência máxima da curva. Dessa forma o resultado da simulação se torna satisfatório para nossa comparação com os dados de laboratório, a fim de definir a potência e irradiação incidente da geração forçada.

3.2 Coleta de dados utilizando Arduino

Para a coleta dos dados de geração forçada foi utilizada a plataforma de desenvolvimento Arduino (Fig. 3.4), que possui um microcontrolador embarcado, constituído de entradas e saídas digitais e analógicas. O Arduino é uma plataforma de prototipagem de sistemas de controle e será utilizado para realizar a coleta de dados de tensão e corrente do módulo fotovoltaico.

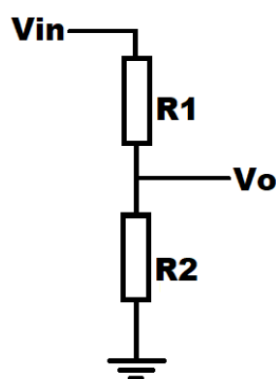
Figura 3.4 – Diagrama Arduino UNO



Fonte: Arduino Uno (2020).

Os dados serão coletados por meio de circuitos projetados estrategicamente para enviar o sinal necessário para o algoritmo do hardware compreender e retornar o valor desejado. O circuito responsável pela coleta do sinal referente a tensão elétrica (V) é constituído de um divisor de tensão (Fig. 3.5), constituído de dois resistores com uma queda de tensão estratégica para que a divisão entre eles resulte na tensão desejada.

Figura 3.5 – Divisor de Tensão



Fonte: Dos Autores.

O divisor de tensão é expresso pelas equações (1), (2) e (3), onde V_{in} é a tensão do módulo (V), V_o é a tensão lida pelo Arduino (V), R1 e R2 são os valores dos resistores (Ω):

$$V_o = V_{in} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

$$R_2 = V_{ou} \times \frac{R_1}{V_{in} - V_o} \quad (2)$$

$$V_{in} = V_o \times \frac{(R_1 + R_2)}{R_2} \quad (3)$$

Por meio da equação (2) podemos calcular o valor de R2, arbitrando um valor bem alto para R1 para não haver uma corrente elevada circulando no circuito, para se adequar a potência nominal dos resistores e para não danificar o Arduino. Dessa forma o microcontrolador irá ler a tensão Vo do divisor, respeitando o máximo de tensão que a porta analógica do Arduino suporta e irá relacionar utilizando a equação (3) para calcular a tensão de entrada.

O circuito para a coleta de corrente elétrica é composto por um Shunt resistor, de forma que é ligado em série com a carga para a terra. Assim, se não houver carga acoplada, o Shunt não irá conduzir corrente elétrica.

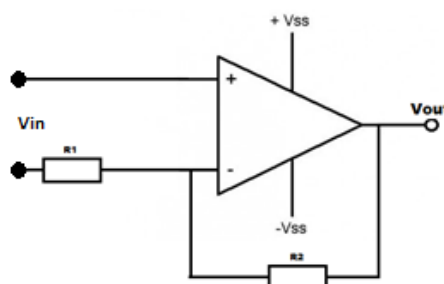
O Shunt é dimensionado com uma queda de tensão estratégica para ser relacionada na lei de Ohm. Nesse caso foi escolhido um resistor de 0.1Ω com potência de 5W para suportar a corrente máxima do módulo e estima-se que a cada 100 mV de queda no resistor, temos 1A de corrente na carga, conforme expressado pela equação (4):

$$I = \frac{V}{R} \quad (4)$$

onde V é a tensão (V), R é a resistência (Ω) e I a corrente (A).

Para o microcontrolador realizar uma leitura mais precisa da tensão e estimar a corrente, é necessário um circuito de amplificação desta tensão para um nível analógico de até 5V. Será utilizado um amplificador-operacional como um circuito de conversão de corrente para tensão, seguindo a topologia ilustrada na Fig. 3.6.

Figura 3.6 – Divisor de Tensão



Fonte: Dos Autores.

Nesta topologia o amplificador atua como um não inversor, onde o ganho de tensão é expresso pela equação (5):

$$V_{out} = \frac{R2}{R1} \times V_{in} \quad (5)$$

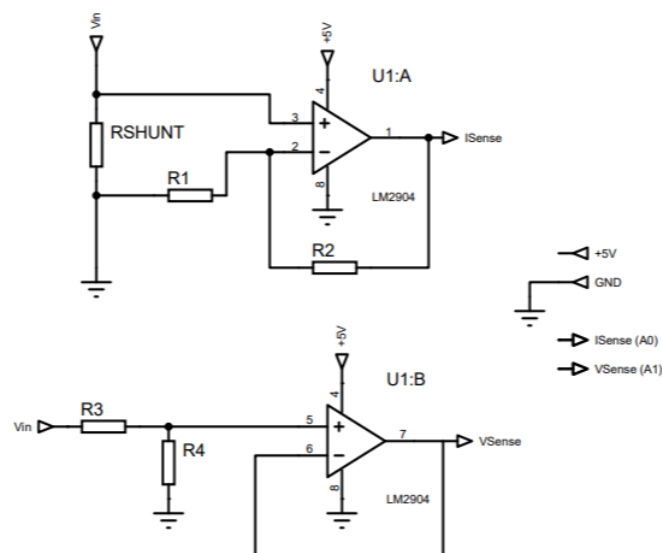
$$R2 = \frac{R1}{V_{in}} \times V_{out} \quad (6)$$

$$V_{in} = \frac{R1}{R2} \times V_{out} \quad (7)$$

onde V_{out} é a tensão de saída do amplificador (V), V_{in} é a tensão de entrada (V) e $R1$ e $R2$ são os valores de resistores (Ω). Da mesma forma que o divisor de tensão podemos calcular o valor de $R2$ utilizando a equação (6), definindo um valor para $R1$, geralmente na ordem de $k\Omega$.

A Fig. 3.7 ilustra o diagrama do circuito, onde o amplificador operacional U1:B foi inserido no circuito de aquisição de tensão com a aplicação de buffer com o objetivo de garantir uma maior segurança e não gerar danos a entrada analógica do Arduino, devido ao isolamento ocasionado pela alta impedância de entrada do amplificador operacional.

Figura 3.7 – Sensores de corrente e tensão

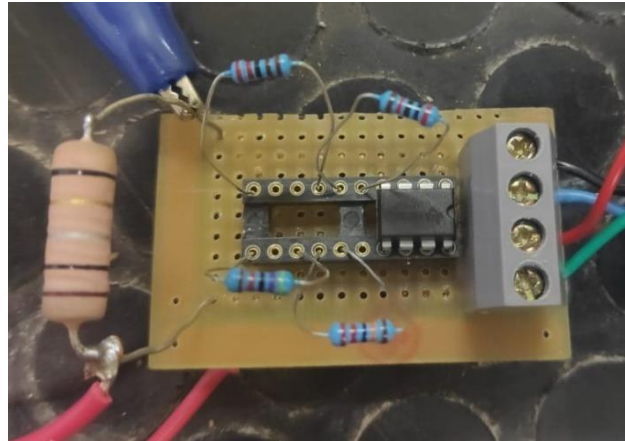


Fonte: Dos Autores.

A partir do esquema da Fig. 3.7 foi montado um protótipo para a coleta de dados em uma placa de circuitos universal (Fig. 3.8), utilizando o amplificador operacional

LM2904 com dois amplificadores operacionais internos, o que permite a montagem do circuito de forma bem compacta.

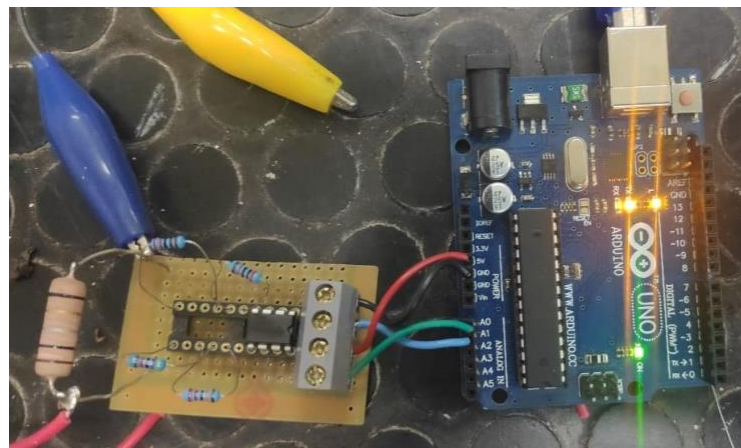
Figura 3.8 – Protótipo de coleta de dados



Fonte: Dos Autores.

Na montagem do protótipo foram inseridos conectores do tipo borne com quatro terminais, sendo dois terminais conectados para a alimentação do circuito, utilizando a própria fonte de alimentação do Arduino, e os outros dois terminais para os sinais de tensão e corrente que irão para as entradas analógicas do Arduino (Fig. 3.9).

Figura 3.9 – Montagem com Arduino



Fonte: Dos Autores.

Para realizar a leitura dos sinais de tensão e corrente foram utilizadas as portas analógicas A0 e A1 do Arduino para retornar valores entre 0 e 255 bits, em função da tensão das portas analógicas.

Por meio da equação (8) foi possível obter a tensão de entrada das portas analógicas e aplicar o resultado nas equações (3), (6) e (4) para obter a tensão e corrente de entrada do sensor:

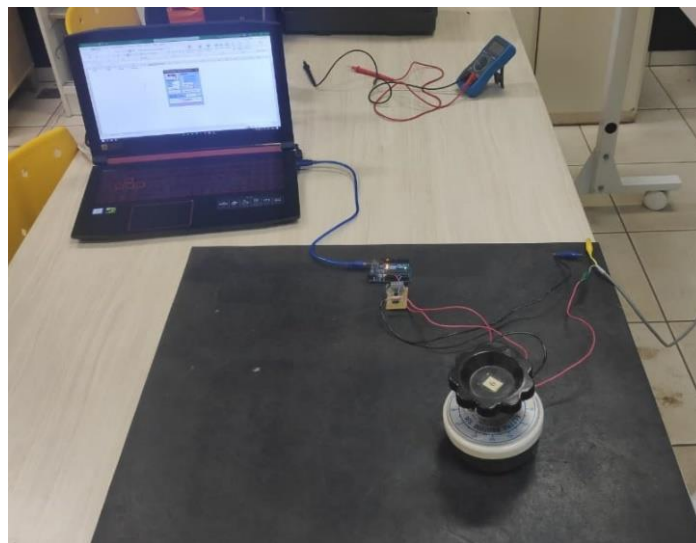
$$V_{analog} = \frac{AnalogRead \times 5}{1023} \quad (8)$$

onde V_{analog} é o valor de tensão (V) lido na entrada analógica do Arduino, AnalogRead é o valor em bits de 0 a 255.

Utilizando as equações (3), (7) e (8), foi realizado a programação do microcontrolador, utilizando a interface de programação em C++ do Arduino.

Para coletar diferentes níveis de potência que o módulo fornece, foi utilizado um Reostato de 100 Ω e 250 W, pois assim podemos variar a resistência de carga do módulo fotovoltaico (Fig. 3.10).

Figura 3.10 – Montagem completa da coleta de dados



Fonte: Dos Autores.

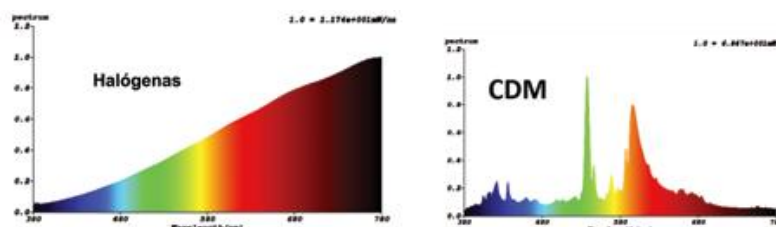
Além disso foi utilizado o software PLX DAQ, que permite realizar uma comunicação serial para inserir os dados de forma automática na planilha Excel.

3.3 Geração Forçada

Após estudar a sensibilidade espectral do módulo e a potência máxima, e compreender os espectros de emissão de irradiação, se torna necessário escolher as lâmpadas mais promissoras para geração forçada.

Procurando pelos equipamentos na instituição, foi encontrado dois tipos de lâmpadas: halógena e vapor metálico. Sendo assim, foi pesquisado que tipo de espectros essas lâmpadas emitem, conforme ilustrado na Fig. 3.11.

Figura 3.11 – Emissão espectral das lâmpadas Halógenas e Vapor Metálico (CDM)



Fonte: Adaptado de SCOPACASA (2018).

Se compararmos estas curvas descritas na Fig. 3.11 com a da Fig. 2.4 referentes a sensibilidade espectral das tecnologias fotovoltaicas, podemos concluir que as lâmpadas halógenas tem um grande potencial como fonte de luz, apresentando um espectro favorável a sensibilidade do nosso módulo, diferentemente das lâmpadas de vapor metálico, que apenas apresentam picos em pontos específicos.

A fim de comprovar esse resultado, as lâmpadas de vapor metálico foram testadas da mesma forma que as halógenas: as lâmpadas foram montadas em uma bancada a 50cm de distância do módulo fotovoltaico, onde foram ligadas três lâmpadas de cada modelo, para ser possível alternar a fonte de geração luminosa.

Figura 3.12 – Montagem das lâmpadas



Fonte: Dos Autores.

Após montar toda a estrutura para a coleta de dados, cada conjunto de lâmpadas foi ligado separadamente e, em tempo real, os dados de tensão e corrente foram enviados ao Excel por meio do software PLX DAQ (Fig. 3.13).

Figura 3.13 – Montagem das lâmpadas com coleta de dados



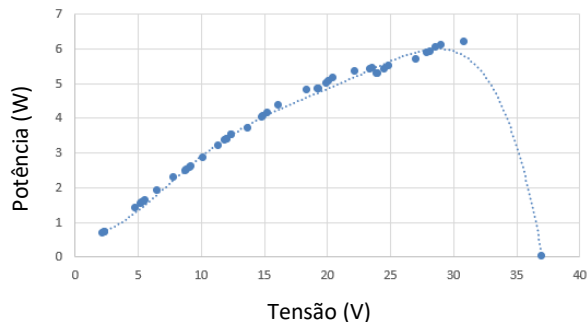
Fonte: Dos Autores

Após o término da coleta de dados, foi realizada uma análise matemática das curvas geradas com os valores coletados, por meio do uso do próprio Excel e outros softwares matemáticos como o GeoGebra, para obter uma conclusão sobre o experimento.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

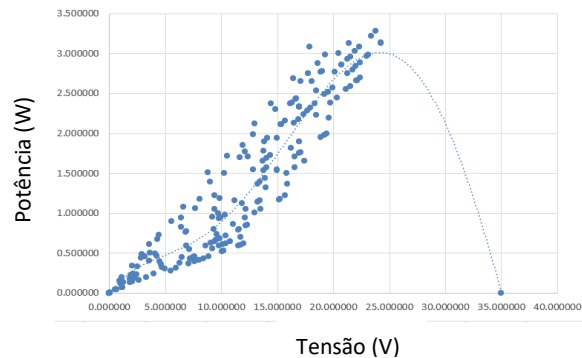
Utilizando a metodologia descrita na seção anterior foram obtidas as curvas de potência de geração por meio da luminosidade aplicada no módulo (Fig. 4.1 e Fig. 4.2). Será realizada apenas a análise das curvas de potência (W) por tensão (V) das lâmpadas halógenas e vapor metálico. Essa análise elimina a necessidade de realizarmos o estudo da curva de corrente (A) e tensão (V), pois os valores de corrente podem ser extraídos do modelo matemático da potência.

Figura 4.1 – Curva P x V Lâmpadas Halógenas



Fonte: Dos Autores.

Figura 4.2 – Curva P x V Lâmpadas CDM



Fonte: Dos Autores.

As linhas de tendência presentes na Fig. 4.1 e na Fig 4.2 são referentes a uma função polinomial de 5º grau e indicam quão bem essas funções se ajustam ao conjunto de dados. O modelo matemático (9) se refere a Fig. 4.1 e o modelo matemático (10) se refere a Fig. 4.2.

$$H(x) = -0.000003147480x^5 + 0.000257537709x^4 - 0.007716148839x^3 + 0.098024143089x^2 - 0.231260880270x + 0.860026917210 \quad (9)$$

$$V(x) = 0.000001239566x^5 - 0.000117191745x^4 + 0.003400553792x^3 - 0.034262994598x^2 + 0.198788568601x - 0.017646736981 \quad (10)$$

A partir dos modelos matemáticos (9) e (10) será possível obter o ponto de máxima potência, máxima tensão e máxima corrente gerada no módulo fotovoltaico, tanto para as lâmpadas halógenas quanto para as lâmpadas de vapor metálico. Além disso, será possível comparar com os dados simulados a fim de chegar em uma aproximação de valor que irradiação que o conjunto de lâmpadas emitiu nos testes de laboratório.

As funções (11) e (12) indicam a primeira derivada das funções (9) e (10):

$$H'(x) = -0.0000157374 x^4 + 0.001030150836 x^3 - 0.023148446517 x^2 + 0.196048286178x - 0.23126088027 \quad (11)$$

$$V'(x) = -0.0000157374 x^4 + 0.001030150836 x^3 - 0.023148446517 x^2 + 0.196048286178x - 0.23126088027 \quad (12)$$

Para determinar as raízes da primeira derivada das funções, foi utilizado o método de Newton–Raphson (13), sendo x_n um valor inicial aproximado para a raiz da função:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (13)$$

Neste caso, adotaremos os valores mínimos e máximos obtidos através das curvas (Fig. 4.1 e 4.2) para utilizar o método de aproximação, onde neste caso, $x_0 = 0$ para calcular a primeira raiz, $x_0 = 37$ para calcular a segunda raiz e $f'(x_n)$ será a segunda derivada das funções (11) e (12):

$$H''(x) = -0.0000629496 x^3 + 0.003090452508 x^2 - 0.046296893034 x + 0.196048286178 \quad (14)$$

$$V''(x) = 0.00002479132x^3 - 0.00140630094x^2 + 0.020403322752x - 0.068525989196 \quad (15)$$

As raízes das funções (11) e (12) estão descritas na Tabela 1 (Anexo B).

Tabela 1 – Raízes das funções $H'(x)$ e $V'(x)$

Raiz de $H'(x)$	Raiz de $V'(x)$
$x^1 = 1.39561195$	$x^1 = 24.1373139839$
$x^2 = 28.7481403923$	$x^2 = 42.8073127027$

Fonte: Dos autores.

Substituindo o valor destas raízes nas funções (9) e (10), obtemos que o ponto de potência máxima para a função $H(x)$ é de 5,998 W, fornecendo cerca de 28,74 V e aproximadamente de 208 mA. Para a função $V(x)$ o ponto de máxima potência foi de 3,016 W, fornecendo cerca de 24,14 V e aproximadamente 125,14 mA.

Obtendo estes dados é possível afirmar o ponto de máxima de potência, e realizar o rastreamento do ponto de máxima potência.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

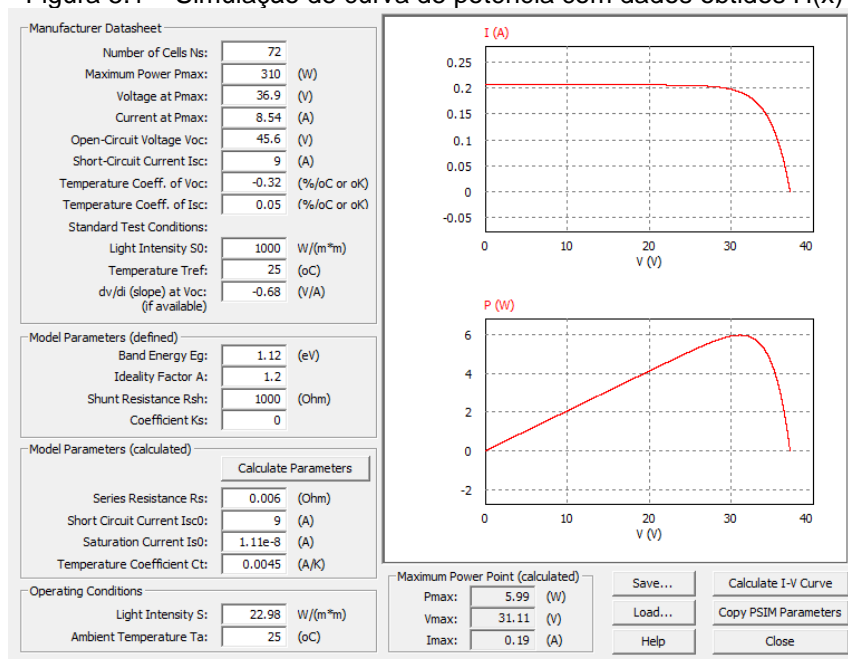
Por meio da análise dos resultados obtidos pode-se concluir que existe uma relação intrínseca entre o comprimento de onda e potência gerada em um módulo

fotovoltaico. Dessa forma, é possível analisar formas de se extrair a melhor potência possível de uma geração, o que é muito buscado atualmente por conta dos baixos índices de eficiência de usinas fotovoltaicas.

É possível relacionar os resultados da simulação para obter o valor de irradiação gerado pelas lâmpadas, que posteriormente se transforma em potência elétrica. Desta forma, pode-se validar que o espectro de luz que a lâmpada incide no módulo está diretamente ligado a potência que o mesmo é capaz de gerar, como segue os resultados da simulação utilizando os valores obtidos pelos métodos demonstrados neste trabalho.

Na Fig. 5.1 está o resultado da simulação com os dados do módulo fotovoltaico e com os dados obtidos para a modelagem das lâmpadas halógenas, onde P_{max} é o valor de potência máxima calculado e o valor de *Ligh Intensity* é referente a irradiação incidente no módulo para gerar este nível de potência, ao qual podemos relacionar diretamente a irradiação gerada pelas lâmpadas halógenas, onde neste conjunto obtivemos cerca de 22.98 W/mm².

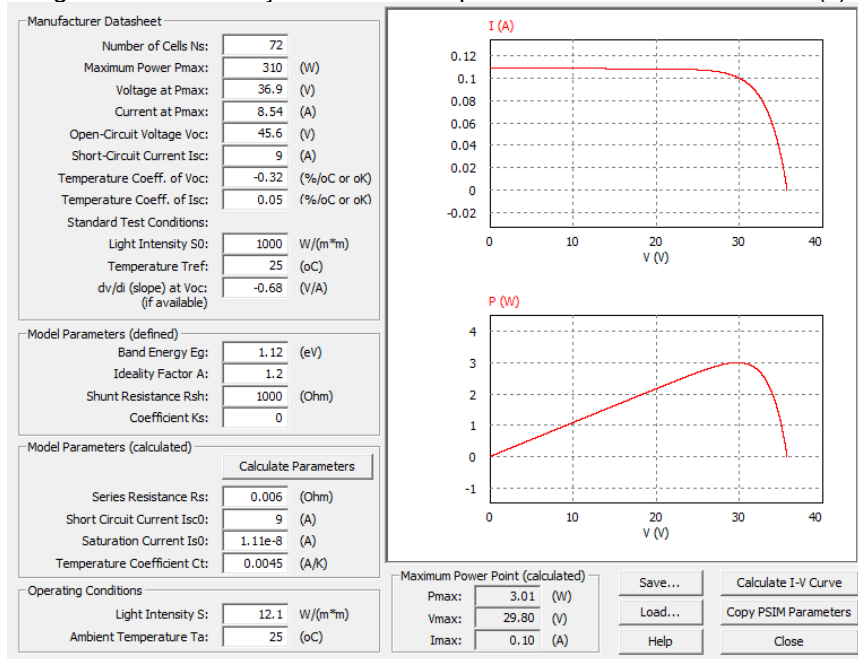
Figura 5.1 – Simulação de curva de potência com dados obtidos H(x)



Fonte: Dos autores.

Na Fig. 5.2 vemos o mesmo modelo de simulação, com os valores obtidos da modelagem das lâmpadas vapor metálico.

Figura 5.2 – Simulação de curva de potência com dados obtidos V(x)



Fonte: Dos autores.

É possível notar que o valor de *Light Intensity* é quase a metade do valor obtido com a lâmpada halógena, o que comprova a fundamentação da emissão espectral destes tipos de lâmpadas ao analisar a Fig. 3.11. Outro detalhe também a ser notado, está relacionado ao valor *Pmax* ser a metade do que obtido pela lâmpada halógena, o que leva a conclusão de que o valor de irradiação é proporcional ao valor de potência que é gerado pelo módulo.

Sendo assim, ao aplicar esta modelagem em um sistema embarcado, é possível realizar o rastreamento da curva de máxima potência de geração, buscando sempre manter a entrega da potência máxima a carga. Método que, em teoria, eleva a eficiência da geração, pois sempre estará sendo entregue 100% da energia disponível convertida pelo módulo fotovoltaico.

Devido a diferença entre as tecnologias disponíveis das células fotovoltaicas, onde cada uma apresenta uma diferença na sensibilidade espectral, é notório que cada tecnologia irá apresentar uma curva característica diferente da outra, se relacionado a sua sensibilidade espectral.

Neste caso os resultados foram satisfatórios para a determinação de qual será a melhor opção de geração de luz forçada para utilizar no projeto, que será as lâmpadas halógenas, por gerarem cerca do dobro de potência em relação as lâmpadas de vapor metálico.

REFERÊNCIAS

ARDUINO Uno. **Arduino**, 2020. Disponível em: <https://www.arduino.cc>. Acesso em: 25 ago. 2020.

DADOS do Mercado de Energia Solar no Brasil. **Portal Solar**, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/mercado-de-energia-solar-no-brasil.html>. Acesso em: 25 ago. 2020.

FÍSICA CLASSICA. *In*: Wikipedia: L'enciclopedia libera. Disponível em: https://it.wikipedia.org/wiki/Fisica_classica. Acesso em: 25 ago. 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 21348**: Space environment (natural and artificial): process for determining solar irradiances. 2007.

NASA. Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço. Disponível em: <https://www.nasa.gov>. Acesso em: 25 ago. 2020.

NEVES, G. M. **Influência do espectro da radiação solar em módulos fotovoltaicos**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3LKTTU8>. Acesso em: 30 ago. 2020.

PASIN, D. G. **Resposta espectral e caracterização elétrica de célula solar de tripla junção**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3TAC9DL>. Acesso em: 30 ago. 2020.

RODRÍGUEZ GÓMEZ, J. M. *et al.* A irradiância solar: conceitos básicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São José dos Campos, v. 40, n. 3, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0342>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/DfZGpdWH53yHvvj9kwjMqqt/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 25 ago. 2020.

SCOPACASA, V. Qualidade de luz: estão os Leds prontos para substituir as fontes de luz tradicionais? **O setor elétrico**, 2018. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/qualidade-de-luz>. Acesso em: 21 out. 2020.

TRANNIN, M. T. Desafios e oportunidades para a geração de energia elétrica por fontes renováveis no Brasil: estudo de caso sobre a Usina híbrida de Tacaratu (PE). **FGV Energia: caderno opinião**, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10438/19210>. Acesso em: 21 out. 2020.

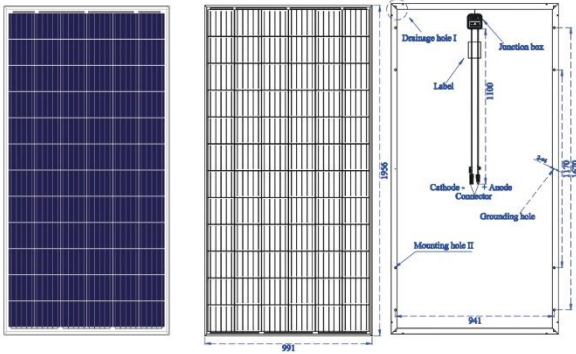
ANEXO A – DATASHEET MÓDULO FOTOVOLTAICO DAH SOLAR

Less area covering

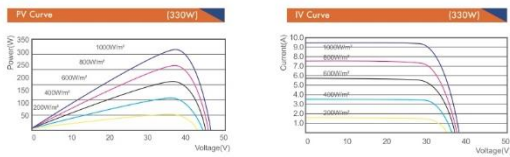
DAH Solar
Smart PV Module Pioneer. Transform More Sunlight Into Energy.

DHP72 ^{SBB} 315W-330W

Poly crystalline PV Module



Function parameter



Mechanical Specification

Cells Type	Poly 156.75×156.75mm		
Weight	22.5kg		
Dimension (L×W×T)	1956×991×40mm		
Output Cables	TUV, Length 900mm, 4.0mm ²		
No. of Cells	72 (6×12)		
Front Glass	3.2mm High Transmission, Low Iron Tempered Glass		
Frame	Anodised Aluminium		
Junction box	IP67, 3 Bypass Diodes		
Connector	MC4 or MC4 Compatible		

Packing Configuration

Container	20GP	40GP	40HC
PCS per pallet	27	27	27
PLT per container	10	24	24
PCS per container	270	648	696

Operating Parameters

Maximum system voltage	DC1000V
Operating Temperature [°C]	-40 ~ +85 °C
Maximum series fuse rating	15A
Snow load, frontside	5400Pa
Wind load, backside	2400Pa
Nominal operating cell temperature [NOCT]	45 °C ±2 °C
Application level	Class A

Electrical Characteristics (Standard Test Conditions)

Module Type	DHP72-315	DHP72-320	DHP72-325	DHP72-330
Maximum Power (Pmax)	315W	320W	325W	330W
Open-circuit Voltage (Voc)	45.6V	45.8V	45.9V	46.1V
Maximum Power Voltage (Vmp)	36.9V	37.1V	37.2V	37.3V
Short-circuit Current (Isc)	9.00A	9.10A	9.25A	9.38A
Maximum Power Current (Imp)	8.54A	8.63A	8.76A	8.85A
Module Efficiency (%)	16.25%	16.51%	16.77%	17.02%
Power Tolerance	0 ~ +5W			
Temperature Coefficient of Isc	0.05%/°C			
Temperature Coefficient of Voc	-0.32%/°C			
Temperature Coefficient of Pmax	-0.41%/°C			
Standard Test Environment	Irradiance 1000W/m ² , Ambient temperature 25 °C, Spectrum AM1.5			

Electrical Characteristics (Noct)

Module Type	DHP72-315	DHP72-320	DHP72-325	DHP72-330
Maximum Power (Pmax)	234W	238W	242W	246W
Open-circuit Voltage (Voc)	42.4V	42.5V	42.6V	42.7V
Maximum Power Voltage (Vmp)	34.3V	34.4V	34.5V	34.6V
Short-circuit Current (Isc)	7.25A	7.35A	7.47A	7.57A
Maximum Power Current (Imp)	6.82A	6.92A	7.02A	7.11A
Standard Test Environment	Irradiance 800W/m ² , Ambient temperature 20 °C, Spectrum AM1.5, Wind speed 1m/s			

ANEXO B – CÁLCULO NEWTON-RAPHSON

- **Lâmpadas Halógenas**

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

Ponto de menor valor: $x_0 = 0$

Ponto de maior valor: $x_0 = 37$

$$x_{n+1} = x_0 - \frac{-0.0000157374 x^4 + 0.001030150836 x^3 - 0.023148446517 x^2 + 0.196048286178 x - 0.23126088027}{(-0.0000629496 x^3 + 0.003090452508 x^2 - 0.046296893034 x + 0.196048286178)}$$

$$x_4 = 1.39561195, \text{ com } x_0 = 0$$

$$x_6 = 28.7481403923, \text{ com } x_0 = 37$$

- **Lâmpadas CDM (Vapor Metálico)**

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

Ponto de menor valor: $x_0 = 0$

Ponto de maior valor: $x_0 = 35$

$$x_{n+1} = x_0 - \frac{(0.00000619783x^4 - 0.00046876698x^3 + 0.010201661376x^2 - 0.068525989196x + 0.198788568601)}{(0.00002479132x^3 - 0.00140630094x^2 + 0.020403322752x - 0.068525989196)}$$

$$x_{49} = 42.8073127027, \text{ com } x_0 = 0$$

$$x_{39} = 24.1373139839, \text{ com } x_0 = 35$$