



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

HALLISON LIMA AGUIAR

MODELAGEM DE SOMBREAMENTO DA PLANTA
FOTOVOLTAICA DO LEA – UFC

FORTALEZA

2018

HALLISON LIMA AGUIAR

**MODELAGEM DE SOMBREAMENTO DA PLANTA
FOTOVOLTAICA DO LEA – UFC**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A229m Aguiar, Hallison Lima.

Modelagem de sombreamento da planta fotovoltaica do LEA – UFC / Hallison Lima Aguiar. – 2018.
107 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho.

1. Sombreamento. 2. Módulo FV. 3. Diodo by-pass. 4. Modelagem matemática. 5. Simulação
computacional. I. Título.

CDD 621.3

HALLISON LIMA AGUIAR

MODELAGEM DE SOMBREAMENTO DA PLANTA
FOTOVOLTAICA DO LEA – UFC

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica

Aprovada em ____/____/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Kleber de Araújo Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. MSc. Ivonne Montero Dupont
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus

Ao meu pai, Antônio Portela

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde e disposição que me foram dados ao longo desses últimos anos.

Ao meu pai, que, apesar de tudo, sempre esteve ao meu lado estendendo-me a mão sempre que precisei.

À minha mãe e ao meu irmão, que sempre torceram por mim e que também fizeram parte desta caminhada.

À minha avó, pelo acolhimento durante o tempo da faculdade.

Ao meu tio Welton, que acreditou em mim e pagou de forma integral meu 3º ano do Ensino Médio, mostrando-se sempre prestativo e disposto a ajudar.

À minha querida namorada, Camila, que esteve ao meu lado durante todo este trabalho e também por todo o carinho.

Ao meu grande e melhor amigo Maurício, sem ele nada disso seria possível, pois foi com ele que peguei interesse pelo estudo, além do que sempre buscou me ajudar nos momentos de necessidade e de tribulações.

Aos meus amigos mais próximos de faculdade, os quais levarei para vida, Allan, Filipe, Jack, Jucelino, Mateus, Rafael e Vinícius, pelos momentos de descontração, ajuda e companheirismo, tornando esses anos de graduação bem mais leves.

Ao queridíssimo Paulo Victor, pela confiança e oportunidade a mim conferida no concernente ao emprego na Podium Engenharia, que estou até hoje, por meio do qual consegui estímulo e recursos para finalização do presente trabalho.

Ao amigo Diego, pelo companheirismo nessa etapa final do trabalho.

Ao professor Paulo Carvalho, pela disposição e orientação deste trabalho.

Aos compositores da banca, professor Kleber e Ivonne, pelas sugestões e contribuições.

“Vinde a mim, todos os que estais cansados e sobrecarregados, e eu vos aliviarei. Tomai sobre vós o meu jugo e aprendei de mim, porque sou manso e humilde de coração; e achareis descanso para a vossa alma. Porque o meu jugo é suave, e meu fardo é leve. ”

(Mateus 11:28-30)

“Faça o que tem de ser feito, onde você estiver, com o que você tiver e sem questionar quando isso precisar ser realizado. ”

(Autor desconhecido)

RESUMO

O impacto causado pelo sombreamento devido aos fatores urbanos em plantas fotovoltaicas (FV) com módulos conectados em série pode ser bastante danoso à captação de energia, haja vista o módulo mais sombreado limitar a capacidade de geração daqueles com menos sombreamento ou que recebem luz plena. Com o crescimento exponencial da capacidade instalada de geração FV no Brasil e no mundo, torna-se cada vez mais necessário que se conheça as premissas básicas das leis físicas dos módulos solares, tanto para que haja uma melhor compreensão dos sistemas FV, bem como também para que haja fomento à expansão tecnológica. A literatura, por sua vez, apresenta vários modelos físicos e matemáticos de células FV reais, sendo usado como parâmetro de comparação o modelo ideal. Neste trabalho, usa-se o modelo de célula de 1 diodo, o qual, além de ter menores números de parâmetros de modelagem, tem também suas curvas características I_xV e P_xV bastante precisas. Desse modo, através da ferramenta de software Simulink do MATLAB, é possível traduzir as equações matemáticas que descrevem o modelo em módulo computacional, de forma a poder parametrizá-lo de acordo com o catálogo do tipo de módulo que se queira estudar. Assim, utilizando-se do catálogo YL250P-29b é possível obter o modelo computacional do módulo FV presente no Laboratório de Energias Alternativas (LEA) do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal do Ceará (UFC). Com o modelo do LEA desenvolvido no computador, é possível, além da obtenção das curvas dos módulos individuais, bem como também das curvas da planta FV (6 módulos em série), obter um estudo da influência do sombreamento dos módulos no sistema. Desse modo, no presente trabalho, para fins de simplificação, considera-se que o módulo, quando sombreado, é atingido em toda a sua extensão e de forma uniforme, de modo que as análises de sombreamento com um ou mais diodos by-pass por módulo tornam-se semelhantes. Assim, no ambiente computacional de simulação construído, adota-se 1 diodo by-pass por módulo FV, sem qualquer prejuízo significativo na obtenção dos dados em análise. Dentro dessa perspectiva, foram observados para as mesmas situações específicas de simulação de sombreamento perdas de energia de 92,11% e 62,05% para situação sem e com diodo by-pass nos módulos FV, respectivamente.

Palavras-chave: Sombreamento. Módulo FV. Diodo by-pass. Modelagem matemática. Simulação computacional.

ABSTRACT

The impact caused by shading due to urban factors in photovoltaic (PV) plants with modules connected in series can be a quite harmful to energy absorption, once the most shaded module bounds the others modules which are less shaded or which receives full light. Due to the exponential growth of installed capacity of PV generation in Brazil and worldwide, it becomes increasingly necessary to understand the basics premises of physical laws about solar cells in order to understand better the photovoltaic systems, as well as to promote a technological expansion. The literature, in its turn, presents several physical and mathematical models for real solar cells, and the ideal model is used as a parameter of comparison. In the present work, it is used the single-diode model, which, in addition to having fewer modelling parameters, it presents very accurate characteristic curves I_xV and P_xV . Thus, through the MATLAB software tool Simulink, it is possible to transform the math equations that describe the model into a computational model in order to parametrize it according to the catalog of a module to be studied. Therefore, using the YL250P-29b catalog, it is possible to obtain the computational model of the PV array present at Alternative Energy Laboratory (LEA) of Department of Electrical Engineering (DEE), Federal University of Ceará (UFC). With the LEA model developed on the computer, it is possible, besides obtaining the curves from the single modules and the PV plant (6 modules in series), to obtain a study about the importance of the shadowing in the modules to the system. Thereby, in the present work, for simplifications purposes, it is considered that the module, when shaded, it is reached in all its extension and uniformly, so that the shadowing analyses with one or more by-pass diodes per module become similar. Therefore, in the computer simulation environment developed, it is adopted a single by-pass diode per PV module, without any meaning damage in obtaining data under analysis. From this perspective, the energy losses observed in the same specific situations, due to shadowing, were 92,11% and 62,05% to the condition without and with by-pass diode in the photovoltaic modules, respectively.

Keywords: Shadowing. Photovoltaic module. Bypass diode. Mathematical modeling. Computer simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Evolução da capacidade instalada de geração FV no mundo	18
Figura 1.2 – Oferta interna de energia elétrica no Brasil em 2017.....	19
Figura 1.3 – Projeção para geração distribuída FV até 2050	20
Figura 2.1 – Equivalência do diodo com junção pn	23
Figura 2.2 – Representação de célula FV por circuito elétrico equivalente ideal alimentando uma carga.....	23
Figura 2.3 – Modelo ideal curto circuitado	24
Figura 2.4 – Curva característica do diodo $V \times I$	25
Figura 2.5 – Modelo ideal com fonte em curto-circuito em série com o diodo	27
Figura 2.6 – Representação de célula FV por circuito elétrico equivalente real alimentando uma carga.....	28
Figura 2.7 – Curva característica $I \times V$ de uma célula FV de silício.....	30
Figura 2.8 – Curva característica $P \times V$ de uma célula FV de silício.....	30
Figura 2.9 – Curvas $I \times V$ geradas com a variação de irradiância para uma temperatura da célula fixa.....	31
Figura 2.10 – Curvas $I \times V$ geradas com a variação de temperatura da célula para uma irradiância fixa	31
Figura 2.11 – Ilustração simplificada dos formatos das curvas características de corrente do modelo FV da <i>Figura 2.6</i>	34
Figura 2.12 – Efeito da variação da resistência série de módulo solar com 72 células	36
Figura 2.13 – Efeito da variação da resistência paralela de módulo solar com 72 células	37
Figura 2.14 – Efeito da variação da resistência paralela de módulo solar com 72 células	37
Figura 2.15 – Corrente de saída pela tensão aplicada na célula solar sem e com sombreamento	39
Figura 2.16 – Células em série com diodo de by-pass para cada duas células.....	40
Figura 2.17 – Módulos solares e com diodos by-pass em série, sem sombreamento	41

Figura 2.18 – Curvas de I_xV e P_xV de dois módulos FV em série com diodo by-pass sem sombra	41
Figura 2.19 – Módulos solares e com diodos by-pass em série, com sombreamento	42
Figura 2.20 – Curvas de I_xV e P_xV de dois módulos FV em série com diodo by-pass com sombra	42
Figura 2.21 – Ilustração da explicação do formato de onda da curva de P_xV sem sombra.....	43
Figura 2.22 – Ilustração da explicação do formato de onda da curva de P_xV com sombra.....	44
Figura 2.23 – Curvas de I_xT e V_xT do módulo não sombreado	46
Figura 2.24 – Ampliação da curva de V_xT do módulo não sombreado	46
Figura 2.25 – Curvas de I_xT e V_xT do módulo sombreado	47
Figura 3.1 – Modelo Simulink da <i>Equação 3.1</i> (corrente FV gerada no módulo solar)	54
Figura 3.2 – Modelo Simulink da <i>Equação 3.4</i> (corrente do diodo).....	54
Figura 3.3 – Modelo Simulink da <i>Equação 3.8</i> (corrente de saturação reversa de referência)	55
Figura 3.4 – Modelo Simulink da <i>Equação 3.9</i> (corrente de saturação reversa)	56
Figura 3.5 – Modelo Simulink da <i>Equação 3.13</i> (corrente de saída do módulo).....	57
Figura 3.6 – Esquemático da Montagem para Obtenção das Curvas do Módulo FV	58
Figura 3.7 – Parametrização das constantes do modelo de módulo FV da <i>Figura 3.6</i> no Simulink para as condições STC e NOCT, respectivamente	59
Figura 3.8 – Características elétricas dos módulos solares usados no presente trabalho nas condições STC	61
Figura 3.9 – Características elétricas dos módulos solares usados no presente trabalho nas condições NOCT	61
Figura 3.10 – Características térmicas dos módulos solares usados no presente trabalho nas condições NOCT	61
Figura 3.11 – Janela de obtenção de R_s e R_p do software PV-Analysator	63
Figura 3.12 – Curvas I_xV da corrente fotogerada (<i>Equação 3.1</i>) e do diodo (<i>Equação 3.4</i>) que compõem o modelo de módulo FV nas condições STC ..	64

Figura 3.13 – Curva IxV da corrente de saída do módulo FV (<i>Equação 3.13</i>) nas condições STC	66
Figura 3.14 – Curva PxV da potência do módulo FV nas condições STC.....	67
Figura 3.15 – Características gerais dos módulos FV do presente trabalho.....	67
Figura 3.16 – Curvas IxV do módulo solar sob vários níveis de irradiância nas condições STC	68
Figura 3.17 – Curvas PxV do módulo solar sob vários níveis de irradiância nas condições STC	69
Figura 3.18 – Curvas IxV do módulo solar sob vários níveis de temperatura nas condições NOCT.....	70
Figura 3.19 – Curvas PxV do módulo solar sob vários níveis de temperatura nas condições NOCT.....	70
Figura 3.20 – Parametrização das constantes do modelo de célula solar da <i>Figura 3.7</i> no Simulink para as condições STC	73
Figura 3.21 – Curva IxV da corrente de saída da célula solar nas condições STC	74
Figura 3.22 – Curva PxV da potência da célula solar nas condições STC.....	75
Figura 3.23 – Características dos materiais dos módulos FV do presente trabalho ...	75
Figura 3.24 – Curvas IxV de 1-6 células solares em série nas condições STC.....	77
Figura 3.25 – Curvas PxV de 1-6 células solares em série nas condições STC.....	77
Figura 3.26 – Planta FV do LEA ligada em série.....	79
Figura 3.27 – Curva IxV da corrente de saída do sistema FV do LEA sem sombreamento nas condições STC	80
Figura 3.28 – Curva PxV da potência de saída do sistema FV do LEA sem sombreamento nas condições STC	81
Figura 3.29 – Curva IxV da corrente de saída do sistema FV do LEA com irradiância de 100 W/m ²	83
Figura 3.30 – Curva PxV da potência de saída do sistema FV do LEA com irradiância de 100 W/m ²	84
Figura 3.31 – Curva IxV da corrente de saída do sistema FV do LEA com diodo by-pass nas condições STC.....	86
Figura 3.32 – Curva PxV da potência de saída do sistema FV do LEA com diodo by-pass nas condições STC.....	87

Figura 3.33 – Curvas IxV do sistema FV com diodo by-pass sob vários níveis de temperatura nas condições NOCT	88
Figura 3.34 – Curvas PxV do sistema FV com diodo by-pass sob vários níveis de temperatura nas condições NOCT	89
Figura 3.35 – Curvas Ixt e Vxt do Módulo 1 (1000 W/m ²).....	92
Figura 3.36 – Curva Vxt do Módulo 1 ampliada.....	93
Figura 3.37 – Curvas Ixt e Vxt do Módulo 2 (800 W/m ²).....	94
Figura 3.38 – Curvas Ixt e Vxt do Módulo 3 (600 W/m ²).....	95
Figura 3.39 – Curvas Ixt e Vxt do Módulo 4 (400 W/m ²).....	96
Figura 3.40 – Curvas Ixt e Vxt do Módulo 5 (200 W/m ²).....	97
Figura 3.41 – Curvas Ixt e Vxt do Módulo 6 (100 W/m ²).....	98
Figura 3.42 – Curvas Ixt dos diodos by-pass dos Módulos 1 – 6 (1000 – 100 W/m ²)	99

LISTA DE SÍMBOLOS

k	Constante de Boltzmann, $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K
q	Carga do elétron, $1,60 \cdot 10^{-19}$ C
E_{g_0}	Energia de gap para o silício (Si), 1,12 eV
I	Corrente de saída da célula FV, A
I_f	Corrente FV, A
I_{CC}	Corrente de curto-circuito da célula, A
I_d	Corrente que atravessa o diodo, A
I_0	Corrente de saturação reversa, A
I_{0r}	Corrente de saturação reversa de referência, A
v_d	Tensão aplicada no diodo, V
v_{oc}	Tensão de circuito aberto, V
V_T	Tensão térmica, V
T	Temperatura do diodo ou de operação da célula, K
T_r	Temperatura ambiente ou de referência da célula, K
G	Intensidade da irradiância solar, W/m ²
$G_{máx}$	Intensidade da irradiância solar padrão, 1000 W/m ² ou 800 W/m ²
k_{CC}^i	Coefficiente de temperatura de corrente de curto-circuito, A/K
k_{OC}^v	Coefficiente de temperatura de tensão de circuito aberto da célula, V/K
R_s	Resistência série da célula, Ω
R_p	Resistência paralela da célula, Ω
η	Fator de idealidade do diodo, $1 \leq \eta \leq 2$
I_{eq}	Corrente de saída equivalente do módulo FV, A
$I_{f_{eq}}$	Corrente equivalente fotogerada pelo módulo FV, A
$I_{d_{eq}}$	Corrente que atravessa o diodo equivalente do módulo FV, A
I_{0req}	Corrente de saturação reversa de referência equivalente do módulo, A
$v_{d_{eq}}$	Tensão aplicada no diodo do módulo equivalente, V
$v_{oc_{eq}}$	Tensão de circuito aberto equivalente do módulo, V

$V_{T_{eq}}$	Tensão térmica equivalente do módulo, V
$k_{OC_{eq}}^v$	Coeficiente de temperatura de tensão de circuito aberto equivalente do módulo, V/K
$R_{s_{eq}}$	Resistência série equivalente do módulo, Ω
$R_{p_{eq}}$	Resistência paralela equivalente do módulo, Ω
N_p	Quantidade de células em paralelo do módulo
N_s	Quantidade de células em série do módulo

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	18
1.1.	Justificativa	20
1.2.	Objetivos Principal e Específicos.....	21
1.3.	Escopo	21
2.	DESCRIÇÃO MATEMÁTICA E GRÁFICA DA CÉLULA FOTO-VOLTAICA SEM E COM SOMBREAMENTO.....	23
2.1.	Modelagem da Célula FV	23
2.1.1.	Modelo Ideal	23
2.1.1.1.	Corrente FV	24
2.1.1.2.	Corrente no Diodo	25
2.1.2.	Modelo Real	28
2.2.	Curvas Características da Célula FV	29
2.3.	Influência das Resistências Série e Paralela e do Fator de Idealidade do Diodo nas Curvas do Modelo de Módulo Solar	35
2.3.1.	Resistência Série (R_s).....	35
2.3.2.	Resistência Paralela (R_p).....	36
2.3.3.	Fator de Idealidade (η)	37
2.4.	Sombreamento em Painéis ou em Módulos FV	38
2.4.1.	Polarização Inversa da Célula Solar Sombreada	38
2.4.2.	Importância do Diodo By-pass nos Módulos Sombreados	39
2.4.3.	Curvas Características de Módulos Série Sombreados	40
2.4.4.	Curvas Mais Específicas do Sombreamento	45
3.	MODELAGEM DE PAINEL FOTOVOLTAICO E ANÁLISES DE SOMBREAMENTO	48
3.1.	Equações Características dos Módulos FV	48

3.1.1.	Corrente FV Gerada no Módulo.....	49
3.1.2.	Corrente de Saturação Reversa de Referência do Módulo	49
3.1.3.	Corrente Paralela e de Saída do Módulo	52
3.2.	Modelando o Módulo FV Via Simulink no MATLAB	53
3.2.1.	Modelagem das Equações do Sistema FV	53
3.2.2.	Parametrização das Constantes do Módulo FV	58
3.2.3.	Curvas Características do Módulo FV Proposto	64
3.2.4.	Parametrização das Constantes da Célula do Módulo FV	72
3.2.5.	Curvas Características da Célula Solar do Módulo FV	74
3.3.	Sistema FV do LEA (6 Módulos em Série) – Análise de Sombreamen- to.....	78
3.3.1.	Curvas Características do Sistema FV do LEA sem Sombreamen- to.....	80
3.3.2.	Curvas Características da Planta FV do LEA com Sombreamen- to.....	81
3.3.2.1.	Sem Diodo By-Pass (Simulação de Falha)	82
3.3.2.2.	Com Diodo By-Pass (Simulação de Funcionamento)	84
3.3.3.	Curvas Mais Específicas de Sombreamento dos Módulos FV do LEA e com Diodos By-Pass	91
4.	CONCLUSÕES	103
	CONTRIBUIÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	105
	REFERÊNCIAS	106

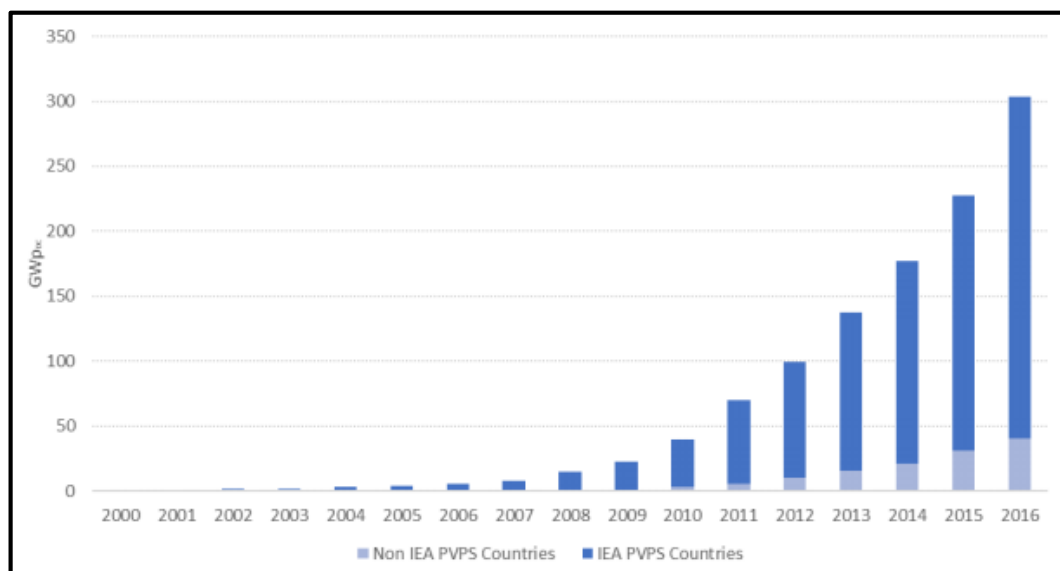
1. INTRODUÇÃO

A grande preocupação com a preservação ambiental, bem como a busca da diversificação da matriz energética, juntamente com o avanço da indústria, têm fomentado a geração de energia elétrica a partir das fontes renováveis.

Embora sejam inicialmente mais caras, as fontes renováveis ficam mais competitivas à medida em que se expandem, devido principalmente à redução dos custos com o aumento de escala bem como também aos avanços tecnológicos.

Dessa forma, tomando por base a energia solar, a qual é o objeto de estudo deste trabalho, tem-se que o mercado mundial fotovoltaico (FV) vem crescendo exponencialmente, como observado na *Figura 1.1*.

Figura 1.1 – Evolução da capacidade instalada de geração FV no mundo



Fonte: [1]

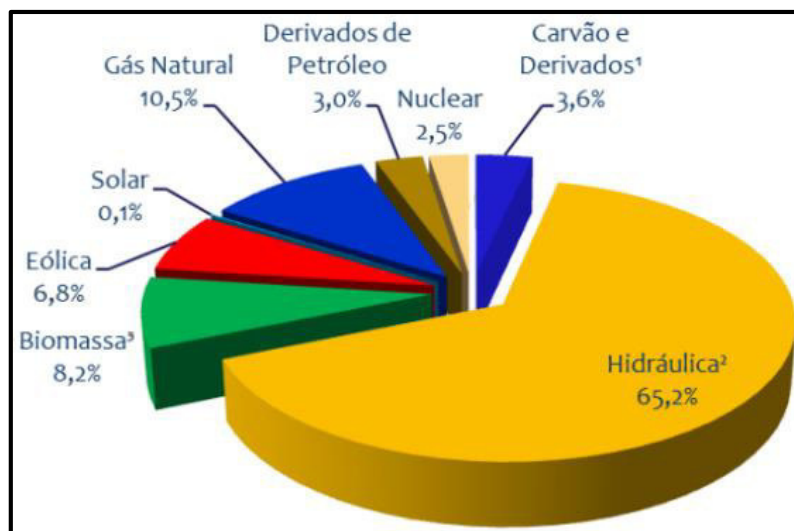
Entre os países com as maiores capacidades de geração FV instaladas em 2017, estão a China, a qual já conta com uma capacidade total instalada de 131 GWp, seguida pelos EUA com 51 GWp, Japão com 49 GWp, Alemanha com 42 GWp e Itália com 19,7 GWp [2].

Vale destacar o acréscimo de capacidade da China em 2017, a qual chegou a incríveis 53 GWp, vindo logo atrás os EUA com apenas 10,6 GWp [2]. Um dos fatores responsáveis pelo grande crescimento da energia solar no mercado chinês, deve-se ao fato da grande quantidade de fabricantes chineses de painéis FV, o que proporciona um baixo custo de implantação [3].

Com relação ao Brasil, em 2017, observou-se, em relação aos países citados, um t ne crescimento da energia solar, apenas 0,9 GWp. No que concerne   capacidade instalada no Brasil nesse mesmo ano, foi atingido 1,1 GWp [2].

No que se refere   oferta interna de energia elétrica no Brasil no ano de 2017, foi atingido pelo país uma oferta total de 624,3 TWh, da qual 407,3 TWh   proveniente da energia hidráulica [4].

Figura 1.2 – Oferta interna de energia elétrica no Brasil em 2017



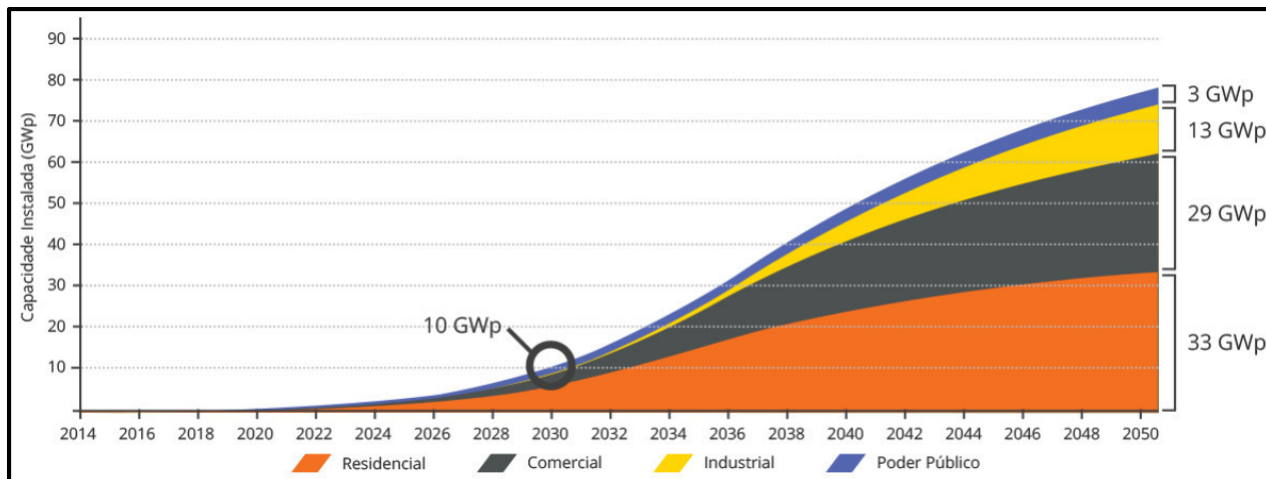
Fonte: [4]

Como pode-se observar pela *Figura 1.2*, a energia solar, se comparada a outras fontes, ainda ocupa um espaço bem t ne diante da oferta total de energia elétrica do país, chegando a aproximadamente 624 GWh de energia.

Vale ressaltar que o Brasil possui grande potencial para gera o de energia elétrica a partir de fonte solar, possuindo níveis de irradia o solar superiores aos de países em que projetos para aproveitamento de energia solar são amplamente disseminados, como Alemanha, França e Espanha [3].

Apesar dos altos níveis de irradia o solar no território brasileiro, o uso da fonte solar para gera o de energia elétrica não apresenta a mesma relevância que possui em outros países. Porém, o que   observado   que, assim como a evolu o da capacidade instalada FV cresce de forma exponencial no mundo, como observado na *Figura 1.1*, ocorre praticamente o mesmo no Brasil, pelo menos até 2038, como bem demonstra a *Figura 1.3*, a qual projeta um cenário até o ano de 2050.

Figura 1.3 – Projeção para geração distribuída FV até 2050



Fonte: [5]

Dessa forma, a ampliação dos estudos na área da geração FV torna-se cada vez mais fundamental à medida que esse tipo de geração cresce no país. Sendo assim, a importância da caracterização de medidas elétricas e mecânicas dos painéis/módulos FV através de ensaios em laboratório ou em campo é estritamente necessária, tendo em vista que para a expansão tecnológica é essencial o conhecimento das premissas básicas que regem um dado sistema.

1.1. Justificativa

Conforme observado, há grandes perspectivas para o crescimento de geração FV no Brasil e no mundo. Consequentemente à expansão tecnológica, há o aumento dos sistemas de módulos/painéis FV nas mais diversas topologias de ligação.

Dessa forma, para um conhecimento amplo do que seja um sistema FV, torna-se necessário que o operador conheça a fundo as particularidades dos painéis/módulos FV que o compõe. Assim, é imprescindível que se saiba quais as leis físicas que regem os fenômenos que ocorrem no painel, como também quais as equações matemáticas que caracterizam os modelos vigentes nas literaturas teóricas, bem como qual a lógica de caracterização das curvas das principais variáveis do painel/módulo FV.

Com a teoria de funcionamento, bem como dados elétricos e mecânicos do painel/módulo através das curvas características, o operador terá um conhecimento global, de modo que poderá fazer os testes do sistema FV de forma geral.

Dessa forma, a lógica de análise de vários problemas existentes nos sistemas FV torna-se bem mais simples de ser observada. Tem-se como exemplo o impacto do sombreamento no sistema FV, o qual pode ser analisado sob diversas perspectivas de temperatura, níveis de incidência de radiação solar, bem como sob os cenários da presença ou da ausência dos diodos de desvio nos painéis/módulos do sistema sombreado.

1.2. Objetivos Principal e Específicos

- Analisar as curvas I_xV e P_xV do sistema FV a sol pleno, bem como também para diversos níveis de sombreamento com a presença e logo depois com a ausência, simulando falha, do diodo by-pass nos módulos.
 - ✓ Para isso, será modelado matematicamente, através de cinco equações de corrente o módulo FV, implementando o sistema de equações do modelo matemático proposto na ferramenta de software Simulink do MATLAB de modo a criar um ambiente computacional propício à simulação;
 - ✓ Logo após, será parametrizado o modelo de módulo FV computacional com base no catálogo YL250P-29b, para analisar um sistema FV no Simulink com seis módulos em série, conforme a planta do Laboratório de Energia Alternativa (LEA) do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal do Ceará (UFC);

1.3. Escopo

A fim de apresentar um desenvolvimento progressivo e organizado, o presente trabalho foi subdividido em quatro capítulos.

No capítulo 1 é apresentado um breve panorama da evolução da geração FV no Brasil e no mundo, bem como as projeções futuras do uso dessa geração no país. Nesse mesmo capítulo, são apresentadas as motivações, as quais justificam a necessidade deste estudo, bem como também são expostos os principais objetivos e o modo de como se estrutura o presente trabalho.

O capítulo 2 é estritamente necessário para o embasamento e desenvolvimento do capítulo seguinte. Dessa forma, são apresentados os modelos de células FV ideal e real, ambos presentes na literatura. Assim, os modelos são apresentados juntamente com o

desenvolvimento progressivo das equações características de cada uma. Ao longo do capítulo são expostas as curvas características principais das células, buscando-se não apenas mostrá-las, mas também analisá-las de modo a entender a lógica das curvas dentro do modelo adotado. Por fim, é feito um estudo teórico de um sistema FV sombreado, analisando-se de acordo com a literatura o comportamento da célula sombreada, bem como as consequências que isso acarretará nas curvas características do sistema diante dos cenários com a presença ou ausência (devido à falha) dos diodos de desvio (by-pass).

O *capítulo 3* é considerado o cerne deste trabalho, tendo em vista que todos os capítulos convergem para o seu entendimento. Desse modo, todos os objetivos apresentados no *tópico 1.2* deste capítulo são desenvolvidos no *capítulo 3*. Ressaltando-se o fato de que são desenvolvidas as equações características para o módulo FV, uma vez que no capítulo anterior foi dada atenção apenas as equações das células.

No *capítulo 4*, por fim, é feita uma breve retrospectiva do que ocorreu em cada capítulo, sendo destacadas as principais conclusões obtidas com as simulações, bem como também a importância deste trabalho para trabalhos futuros.

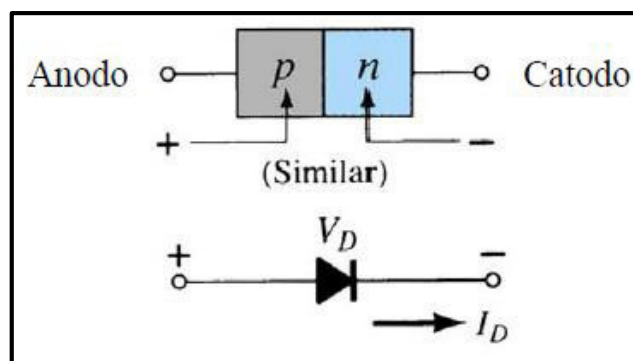
2. DESCRIÇÃO MATEMÁTICA E GRÁFICA DA CÉLULA FOTOVOLTAICA SEM E COM SOMBREAMENTO

2.1. Modelagem da Célula FV

2.1.1. Modelo Ideal

Sabendo-se das literaturas vigentes que a célula FV é uma junção pn, pode-se observar na *Figura 2.1* a seguir:

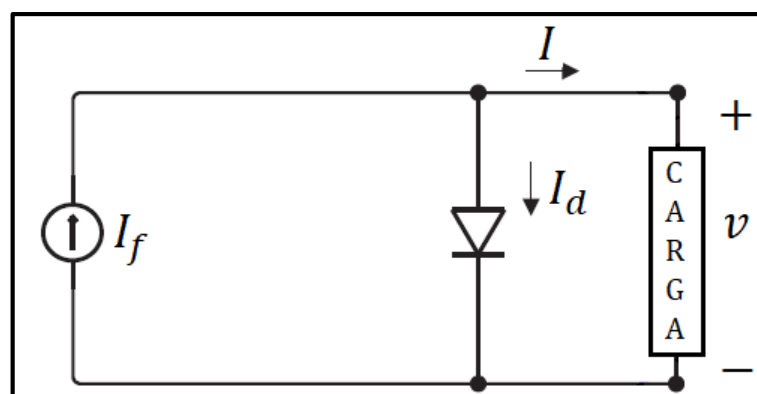
Figura 2.1 – Equivalência do diodo com junção pn



Fonte: [6]

Sabendo-se também que o diodo é um elemento elétrico de junção pn e de características não lineares, o modelo ideal de célula elétrica, segundo [10], pode ser representado pela *Figura 2.2* a seguir.

Figura 2.2 – Representação de célula FV por circuito elétrico equivalente ideal alimentando uma carga



Fonte: próprio autor

Sendo:

- I_f a corrente FV gerada pela irradiação solar na célula, que equivale à fonte de corrente;

- I_d a corrente que atravessa a junção pn na célula, que equivale a corrente do diodo;
- I a corrente de saída nos terminais da célula, que equivale a corrente de saída no circuito.

Logo, a corrente de saída do circuito ideal (I) será dada por:

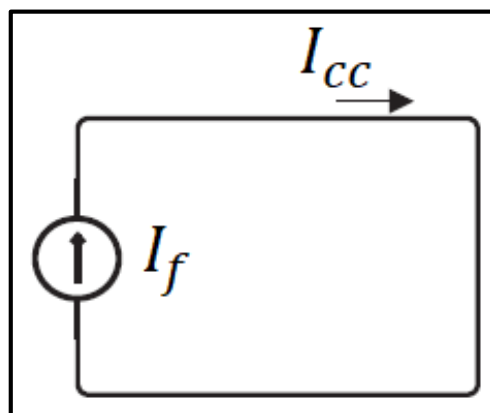
$$I = I_f - I_d \quad (2.1)$$

Pela *Equação 2.1* pode-se notar que a corrente de saída irá depender da corrente FV, bem como da corrente do diodo.

2.1.1.1. Corrente FV

Quanto a corrente FV, ela é característica do semicondutor da célula, sendo diretamente proporcional à irradiação solar. Vale destacar, que curto-circuitando a carga do circuito da *Figura 2.2*, tem-se que $I_f = I_{CC}$ (*Figura 2.3*), podendo-se perceber assim que a corrente de curto-circuito será maior tanto quanto maior for maior a corrente FV [13].

Figura 2.3 – Modelo ideal curto circuitado



Fonte: [10]

Como a corrente FV é diretamente proporcional ao nível de irradiação solar, sendo o valor da intensidade de irradiação solar normalizado pelo valor de intensidade de irradiação padrão ou de referência das literaturas teóricas, tem-se que [13]:

$$I_f' = I_{CC} \cdot \frac{G}{G_{máx}} \quad (2.2)$$

Como a corrente de curto-circuito causa um aumento de temperatura na célula, haverá, portanto, uma parcela a mais que contribuirá para o aumento da corrente FV. Dessa forma, quanto maior for a variação de temperatura devido à corrente de curto

circuito em relação à temperatura ambiente da célula, maior será a contribuição dessa parcela para a corrente FV [13].

Assim, tem-se que:

$$I_f = [I_{CC} + k_{CC}^i(T - T_r)] \cdot \frac{G}{G_{máx}} \quad (2.3)$$

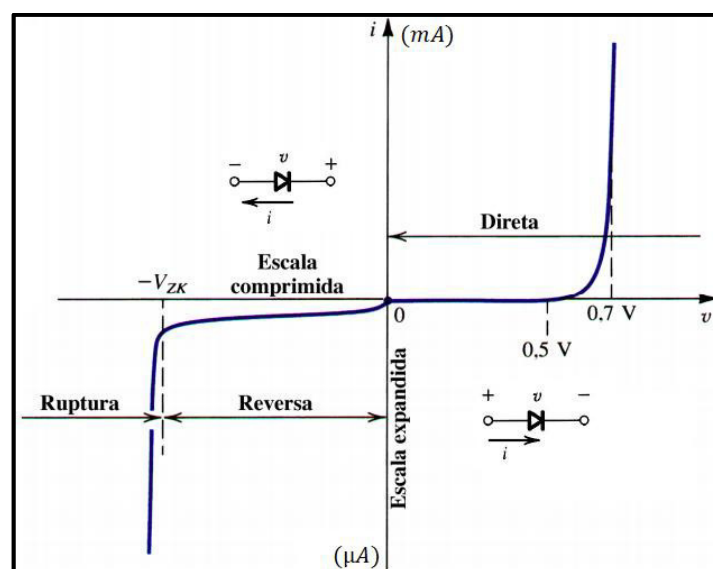
Sendo:

- I_f , a corrente FV, A;
- I_{CC} , a corrente de curto-circuito da célula, A;
- k_{CC}^i , o coeficiente de temperatura de corrente de curto-circuito, A/K;
- T , a temperatura do diodo ou de operação da célula, K;
- T_r , a temperatura ambiente ou de referência da célula, K;
- G , a intensidade da irradiância solar, W/m²;
- $G_{máx}$, a intensidade da irradiância solar padrão, W/m².

2.1.1.2. Corrente no Diodo

Quanto a corrente no diodo, ela estará de acordo com a curva do diodo, já pré-estabelecida nas literaturas teóricas vigentes, como mostra a *Figura 2.4*.

Figura 2.4 – Curva característica do diodo VxI



Fonte: [14]

Pela curva $i = f(v)$ da *Figura 2.4* observa-se quando o diodo está conduzindo durante a polarização direta, o comportamento entre tensão e corrente é não linear, mais precisamente, um comportamento exponencial. Dessa forma, o físico Willian Bradford Shockley, utilizando-se de conceitos da física do estado sólido, deduziu uma equação para modelar o comportamento do diodo no estado de condução direta de corrente [14].

Vale destacar que a equação de Shockley (*Equação 2.4*) também é válida, com um bom grau de precisão, para o diodo operando no terceiro quadrante, contanto que esteja abaixo, em módulo, da região de ruptura [14].

Dessa forma, tem-se que a corrente que circula no diodo da *Figura 2.4* pode ser dada por [15]:

$$I_d = I_0 \cdot \left(e^{\frac{v_d}{\eta V_T}} - 1 \right) \quad (2.4)$$

Com [15]:

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (2.5)$$

Sendo:

- I_d , a corrente que atravessa o diodo, A;
- I_0 , a corrente de saturação reversa, A;
- v_d , a tensão aplicada no diodo, V;
- η , o fator de idealidade do diodo, $1 \leq \eta \leq 2$;
- V_T , a tensão térmica, V;
- k , a constante de Boltzmann, $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K;
- T , a temperatura do diodo ou de operação da célula, K;
- q , a carga do elétron, $1,60 \cdot 10^{-19}$ C.

Substituindo-se a *Equação 2.5* na *2.4*, tem-se:

$$\boxed{I_d = I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot v_d}{\eta \cdot k \cdot T}} - 1 \right)} \quad (2.6)$$

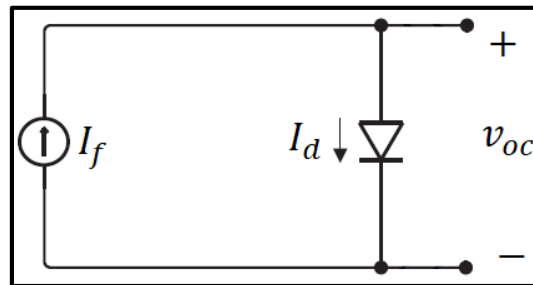
Isolando-se o termo I_0 :

$$I_0 = \frac{I_d}{\left(e^{\frac{q \cdot v_d}{\eta \cdot k \cdot T}} - 1 \right)} \quad (2.7)$$

Assim como foi de interesse estabelecer uma intensidade de irradiância solar máxima ou padrão, torna-se fundamental também estabelecer uma corrente de saturação reversa máxima ou de referência.

Dessa forma, tomando como situação a retirada da carga observada na *Figura 2.2*, haverá como consequência o curto-circuito da fonte de corrente em série com o diodo, sendo, portanto, a corrente no diodo igual a corrente FV ($I_f = I_d$), e ficando a tensão de circuito aberto sobre o diodo, como na *Figura 2.5* a seguir:

Figura 2.5 – Modelo ideal com fonte em curto-circuito em série com o diodo



Fonte: próprio autor

Da *Equação 2.7* e da *Figura 2.5* tem-se que [13]:

$$I_{0r} = \frac{I_f}{\left(e^{\frac{q \cdot v_{oc}}{\eta \cdot k \cdot T}} - 1 \right)} \quad (2.8)$$

Substituindo-se a *Equação 2.3* na *Equação 2.8* e sabendo-se que se busca o valor da corrente de saturação reversa de referência, tem-se que $G = G_{m\acute{a}x}$ (situação de maior corrente FV), portanto [13]:

$$I_{0r} = \frac{I_{CC} + k_{CC}^i (T - T_r)}{\left(e^{\frac{q \cdot [v_{oc} + k_{OC}^v (T - T_r)]}{\eta \cdot k \cdot T}} - 1 \right)} \quad (2.9)$$

Sendo:

- I_{0r} , a corrente de saturação reversa de referência, A;
- v_{oc} , a tensão de circuito aberto, V;
- k_{OC}^v , o coeficiente de temperatura de tensão de circuito aberto, V/K.

Posta a equação do valor de referência para a corrente de saturação reversa, torna-se necessário saber qual será o valor da corrente de saturação reversa para casos gerais. Dessa forma, a *Equação 2.10* informa de forma abrangente os valores de corrente de saturação reversa gerais baseados na corrente de saturação de referência [13]:

$$I_0 = I_{0_r} \cdot \left(\frac{T}{T_r}\right)^3 \cdot e^{\frac{q \cdot E_{g0} \cdot \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)}{\eta \cdot k}} \quad (2.10)$$

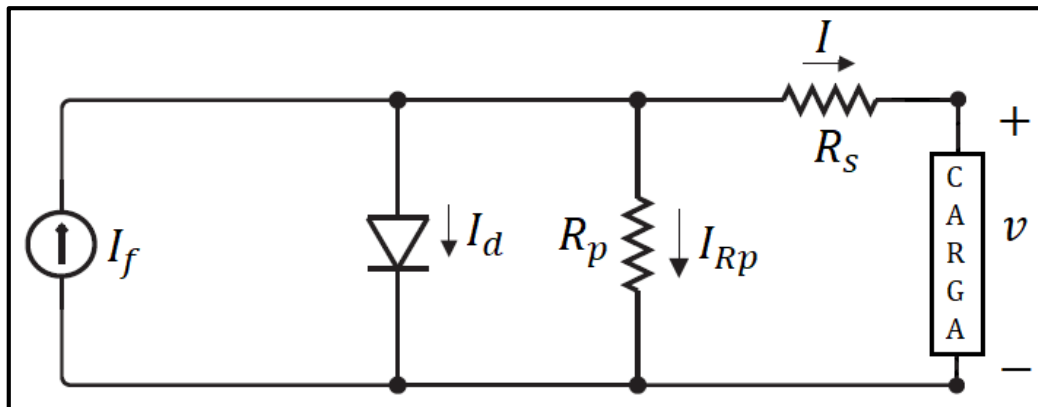
Sendo:

- E_{g0} , a energia de gap para o silício (Si), 1,12 eV;

2.1.2. Modelo Real

Sabendo-se que existem as perdas de condução nas células solares, torna-se necessário que se faça um modelo mais plausível com a realidade. Dessa forma, a *Figura 2.6* a seguir traz o modelo de célula ideal acrescida de duas resistências.

Figura 2.6 – Representação de célula FV por circuito elétrico equivalente real alimentando uma carga



Fonte: próprio autor

Vale destacar que a resistência série (R_s) representa as perdas de condução nos contatos metálicos da célula FV. No que concerne à resistência paralela (R_p), esta representa as perdas devido às correntes parasitas e de fuga que circulam na célula [10]. É importante frisar também que $R_p \gg R_s$.

Existe também em literaturas mais específicas o modelo de célula FV com 2 diodos em paralelo (um diodo de difusão e outro de recombinação), sendo, portanto, este modelo mais completo. Contudo, o modelo com dois diodos, é bem mais complicado para

modelar, tendo em vista o elevado número de parâmetros que precisam ser estimados [13]. Dessa forma, o presente trabalho adota o modelo explicitado na *Figura 2.6*.

Pela *Figura 2.6*, pode-se observar que a tensão na resistência paralela (R_p) será a soma da tensão na resistência série (R_s) com a tensão na carga (v), ou seja:

$$R_p \cdot I_{Rp} = I \cdot R_s + v \quad (2.11)$$

Da *Equação 2.11*, pode-se encontrar a corrente que passa pela resistência paralela:

$$I_{Rp} = \frac{v + I \cdot R_s}{R_p} \quad (2.12)$$

Pela *Figura 2.6*, pode-se observar que as correntes da célula FV se relacionam pela seguinte expressão:

$$I_f = I_d + I_{Rp} + I \quad (2.13)$$

Da *Equação 2.13*, pode-se obter a expressão simplificada da corrente de saída da célula:

$$I = I_f - I_d - I_{Rp} \quad (2.14)$$

Sabendo-se que no modelo real, a tensão no diodo é igual à tensão na resistência paralela ($v_d = v + I \cdot R_s$), tem-se das *Equações 2.6* e *2.14* a expressão da corrente de saída da célula FV para o modelo real:

$$I = I_f - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (v + I \cdot R_s)}{\eta \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - I_{Rp} \quad (2.15)$$

Dessa forma, vale destacar que o objetivo dos diagramas de circuito elétrico equivalentes ao painel solar observados anteriormente é o de descrever as curvas características através das equações matemáticas da forma mais fiel possível, aproximando-se ao máximo do modelo experimental, como será observado a seguir.

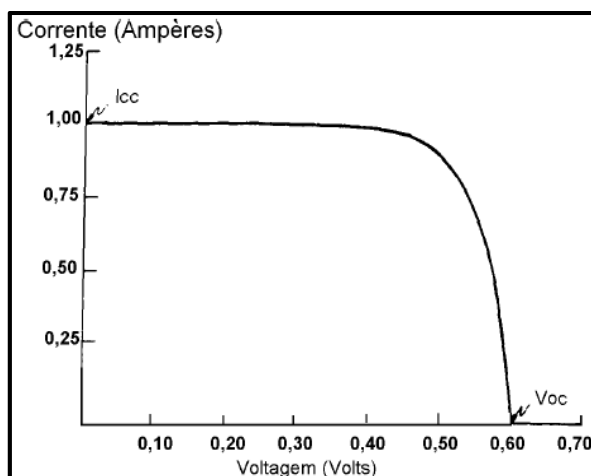
2.2. Curvas Características da Célula FV

Pode-se observar da *Equação 2.15* que não foi possível isolar a corrente de saída do módulo FV em um lado da expressão e, portanto, a equação não pode ser resolvida analiticamente, mas apenas de forma numérica. Assim, torna-se necessário que se

construa as curvas de $I \times V$ e $P \times V$ tomando como referência a própria tensão de saída da célula solar.

Sabendo-se que a saída de tensão (v) nos terminais da célula não é constante, sendo também a corrente (I) função da tensão ($I = f(v)$), bem como também a tensão de saída função da corrente ($v = f(I)$). Variando-se linearmente a tensão da carga, desde a tensão de curto-circuito ($I = I_{cc}$; $v = 0$) até a tensão de circuito aberto ($I = 0$; $v = v_{oc}$) da *Equação 2.15* é possível observar através da *Figura 2.7* (que pode ser obtida em um ensaio experimental com uma fonte de tensão variando em forma de rampa na saída da célula solar) como a corrente no terminal da célula irá se comportar.

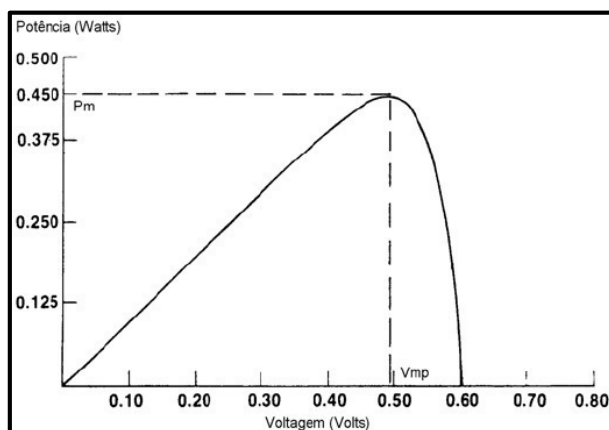
Figura 2.7 – Curva característica $I \times V$ de uma célula FV de silício



Fonte: [16]

Procedendo-se da mesma maneira, pode-se encontrar o comportamento da potência fornecida pela célula pela variação da tensão de saída ($P = f(v)$).

Figura 2.8 – Curva característica $P \times V$ de uma célula FV de silício

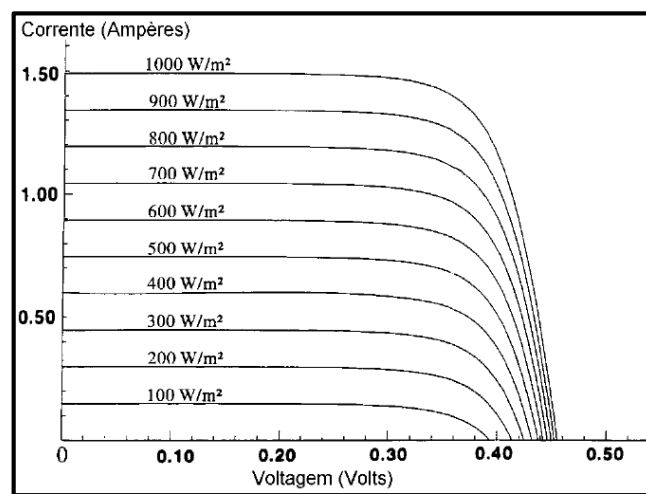


Fonte: [16]

Pelas *Figuras 2.7 e 2.8* é possível obter a corrente, bem como a tensão em que a célula deverá operar para que sua potência seja maximizada, como é observado no Ponto de Potência Máxima, do inglês *Maximum Power Point (MPP)*. Dessa forma, para fins de melhor aproveitamento da energia, utilizam-se algoritmos de rastreamentos do melhor ponto da curva da *Figura 2.8*, de modo que a potência extraída seja a maior possível.

Além das curvas já explicitadas, existem alguns fatores que influenciam nas características elétricas da célula solar, sendo a irradiância e a temperatura das células os principais [16]. As *Figuras 2.9 e 2.10* ilustram o exposto.

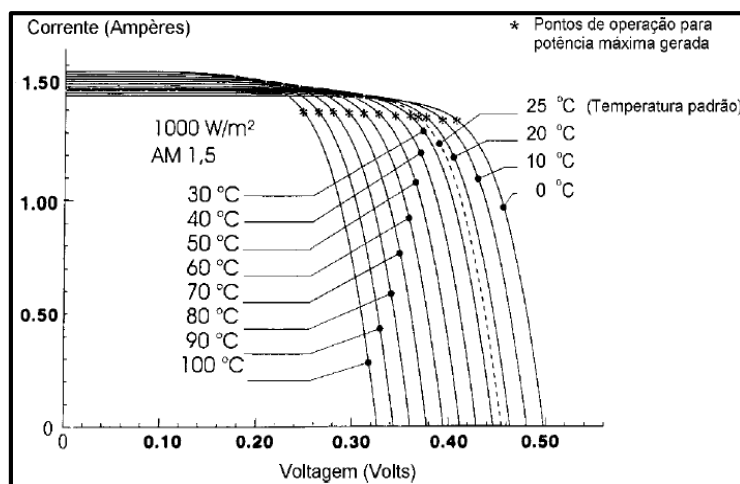
Figura 2.9 – Curvas IxV geradas com a variação de irradiância para uma temperatura da célula fixa



Fonte: [16]

Em que se pode observar da *Figura 2.9* que a corrente gerada pela célula será sempre maior com o aumento da intensidade luminosa, sofrendo a tensão de máxima potência (V_{mp}) pouca variação [16].

Figura 2.10 – Curvas IxV geradas com a variação de temperatura da célula para uma irradiância fixa



Fonte: [16]

Da *Figura 2.10*, pode-se observar que o Ponto de Potência Máxima (MPP) diminui à medida em que a temperatura da célula aumenta, diminuindo assim a eficiência. Pode-se perceber que a medida que a temperatura da célula aumenta, haverá uma diminuição da tensão de máxima potência (V_{mp}), mas também haverá um aumento da corrente de curto circuito e conseqüentemente da corrente de máxima potência (I_{mp}). No entanto, como o aumento de I_{mp} é bem menor do que a diminuição de V_{mp} , o ponto de potência máxima será menor.

Todas as curvas apresentadas nas *Figuras 2.7, 2.8, 2.9 e 2.10* são dadas pela condição padrão de teste (STC), a qual é para se obter as curvas características dos módulos, definida para irradiância de 1000 W/m^2 (radiação recebida na superfície da Terra em dia claro, ao meio dia), massa de ar (AM) de 1,5 e temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ na célula [16].

No entanto, vale destacar que curvas semelhantes às das figuras mencionadas no parágrafo anterior também podem ser geradas pela condição de temperatura de operação (NOCT), a qual definida para irradiância de 800 W/m^2 e temperatura da célula de $20 \text{ }^\circ\text{C}$, tendo em vista que a geração em campo, na grande maioria dos casos, não alcança as condições exigidas pelo padrão STC [17].

No que se refere à *Figura 2.10*, a qual é análoga para módulos FV, torna-se necessário para a plotagens das curvas dos módulos que se saiba os valores dos coeficientes, os quais geralmente vêm presentes nos catálogos dos mesmos.

Dessa forma, é importante frisar que o coeficiente de temperatura de curto-circuito (k_{CC}^i) é por definição a variação da corrente de curto-circuito (ΔI_{cc}) com a variação da temperatura ($\Delta T = T - T_r$), ou seja [18]:

$$k_{CC}^i = \frac{\Delta I_{cc}}{\Delta T} \rightarrow k_{CC}^i = \frac{\Delta I_{cc}}{T - T_r} \quad (2.16)$$

Como nos catálogos os coeficientes de temperatura sempre vêm em percentual, tem-se que [18]:

$$k_{CC}^i = \frac{1}{I_{cc}} \cdot \frac{\Delta I_{cc}}{T - T_r} \rightarrow k_{CC\%}^i = \frac{1}{I_{cc}} \cdot \frac{\Delta I_{cc}}{T - T_r} \cdot 100 \quad (2.17)$$

Substituindo a *Expressão 2.16* na *Expressão 2.17*, tem-se

$$k_{CC\%}^i = \frac{1}{I_{cc}} \cdot k_{CC}^i \cdot 100 \rightarrow \boxed{k_{CC}^i = I_{cc} \cdot \frac{k_{CC\%}^i}{100}} \quad (2.18)$$

Da mesma forma pode-se proceder para o coeficiente de temperatura de tensão circuito aberto (k_{oc}^v), que é por definição a variação da tensão de circuito aberto (Δv_{oc}) com a variação da temperatura ($\Delta T = T - T_r$), ou seja [18]:

$$k_{oc}^v = \frac{\Delta v_{oc}}{\Delta T} \rightarrow k_{oc}^v = \frac{\Delta v_{oc}}{T - T_r} \quad (2.19)$$

Como nos catálogos os coeficientes de temperatura sempre vêm em percentual, tem-se que [18]:

$$k_{oc}^v = \frac{1}{v_{oc}} \cdot \frac{\Delta v_{oc}}{T - T_r} \rightarrow k_{oc\%}^v = \frac{1}{v_{oc}} \cdot \frac{\Delta v_{oc}}{T - T_r} \cdot 100 \quad (2.20)$$

Substituindo a *Expressão 2.19* na *Expressão 2.20*, tem-se

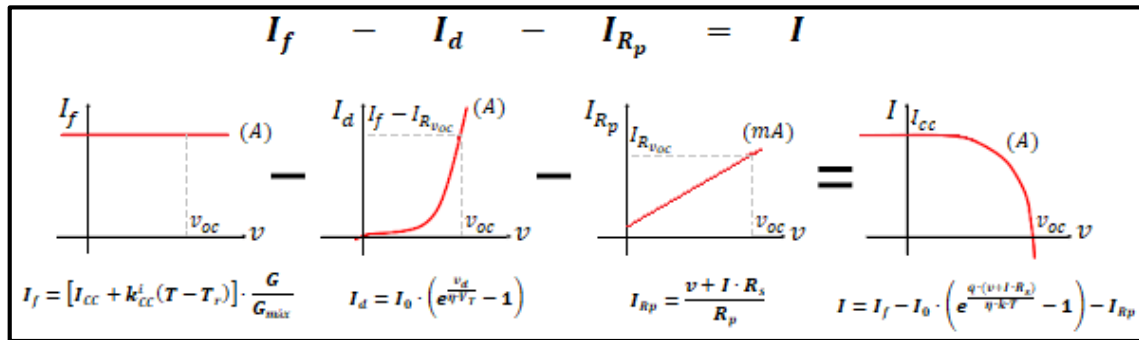
$$k_{oc\%}^v = \frac{1}{v_{oc}} \cdot k_{oc}^v \cdot 100 \rightarrow \boxed{k_{oc}^v = v_{oc} \cdot \frac{k_{oc\%}^v}{100}} \quad (2.21)$$

Em relação à *Figura 2.7*, é importante frisar do porquê seu formato de curva diminui a partir de determinada tensão. Como exposto na *Figura 2.11*, toda a corrente da célula FV tem origem na corrente FV gerada pela radiação solar (I_f). Dessa forma, essa corrente tenderá a redistribuir-se pelo circuito equivalente da *Figura 2.6*. A medida que a tensão aplicada na carga vai aumentando, a tensão no diodo também aumentará e como já se sabe, caso a tensão direta do diodo aumente, a tendência é que a corrente (I_d) sobre ele seja cada vez maior de modo que ele puxará para si cada vez mais a corrente FV gerada. Dessa forma, ocorrerá que a partir de uma certa tensão no diodo, a corrente de saída da célula (I) irá decrescer até chegar a zero, que é justamente o ponto de tensão em que o diodo puxa toda a corrente gerada. Como nesse ponto de tensão a corrente de saída é zero, é como se a célula estivesse em circuito aberto e, portanto, esta será a tensão de circuito aberto (v_{oc}), a qual estará de acordo com a *Figura 2.5*.

Da mesma forma, como pode-se observar na *Figura 2.11*, a corrente de curto-circuito (I_{cc}) se dará quando a tensão na carga for zero ($v = 0$) e conseqüentemente sendo a tensão do diodo zero também, de modo que a corrente do diodo também será nula, sendo dessa forma equivalente a uma situação de curto-circuito na carga.

Ainda em relação à *Figura 2.11*, pode-se verificar também, que assim como o diodo puxa parte da corrente FV, a resistência paralela ao diodo também o fará. Contudo, a corrente que percorre a resistência paralela (I_{R_p}) será muito menor do que a corrente que percorre o diodo, chegando a ser praticamente desprezível para influenciar na corrente de saída da célula solar.

Figura 2.11 – Ilustração simplificada dos formatos das curvas características de corrente do modelo FV da *Figura 2.6*



Fonte: próprio autor

Há ainda algumas observações pertinentes sobre a *Figura 2.11* no que se refere ao ponto de curto-circuito ($v = 0$). Caso os diagramas mostrados na *Figura 2.11* se referissem ao circuito ideal da célula solar (*Figura 2.2*), obviamente não iria existir a corrente I_{R_p} , uma vez que não existiria resistência paralela ao diodo. Dessa forma, a corrente de saída durante o curto-circuito seria igual à corrente FV ($I = I_f$), situação análoga a do circuito da *Figura 2.3*. Todavia, como a *Figura 2.11*, refere-se ao modelo real de célula solar, quando a carga entra em curto, haverá ainda uma resistência série, não sendo, portanto, um curto pleno. Dessa forma, a corrente FV tenderá a se dividir entre o diodo, a resistência paralela e a resistência série (que no curto fica em paralelo com os outros dois elementos). Assim, haverá, ainda que minimamente, na situação de curto-circuito corrente passando pela resistência paralela, como pode-se observar na *Figura 2.11*. Dessa maneira, no circuito real, a corrente de saída será um pouco menor do que a corrente FV, onde fazendo-se os ajustes e as compensações razoáveis (supondo, por exemplo, que no curto a corrente que passe pela resistência paralela seja bem aproximada da parcela de corrente térmica acrescida na corrente FV devido ao curto-circuito ($I_{R_p} \approx k_{cc}^i \cdot (T - T_r)$), chega-se a uma corrente de saída igual à corrente de curto-circuito da célula ideal ($I = I_{cc}$).

Por fim, vale destacar que o formato linear da forma de onda da corrente da resistência paralela se dá desta forma devido à tensão aplicada na saída da célula solar durante o ensaio ser em formato de rampa.

2.3. Influência das Resistências Série e Paralela e do Fator de Idealidade do Diodo nas Curvas do Modelo de Módulo Solar

Sabendo-se da literatura teórica que o módulo solar é composto por várias células FV, de modo tal que todas as curvas são análogas, sendo, dessa forma, os modelos de circuitos também semelhantes.

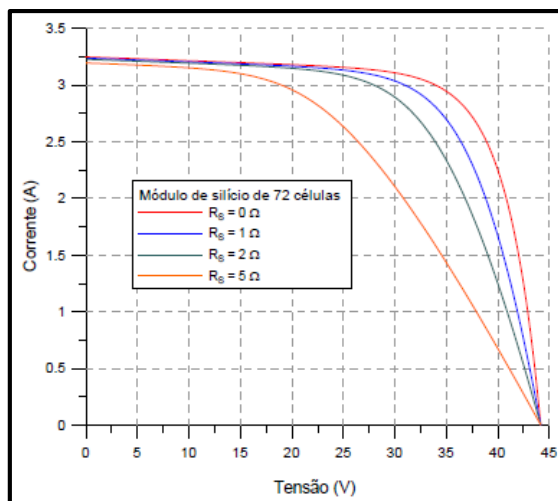
Desse modo, as análises a seguir, levam em consideração as resistências série (R_s) e paralela (R_p), bem como o fator de idealidade (η) do diodo do modelo módulo FV, o qual é análogo à *Figura 2.6*, podendo, portanto, os resultados serem usados também para as próprias células, bem como para painéis.

2.3.1. Resistência Série (R_s)

Como já exposto, sabe-se que a resistência série está ligada nas células solares a vários fatores, tais como, base das células, região do emissor, resistência de contato entre o metal e o semiconductor. No caso dos módulos ainda existe a resistência devida às ligações que compõem o arranjo [20].

Dessa forma, no caso dos módulos FV série, a resistência série tende a aumentar bastante, o que faz com que a corrente diminua e, portanto, sua potência também, como pode-se observar na *Figura 2.12*, para um módulo composto por 72 células, relativas a 4 valores diferentes de R_s [20].

Figura 2.12 – Efeito da variação da resistência série de módulo solar com 72 células



Fonte: [20]

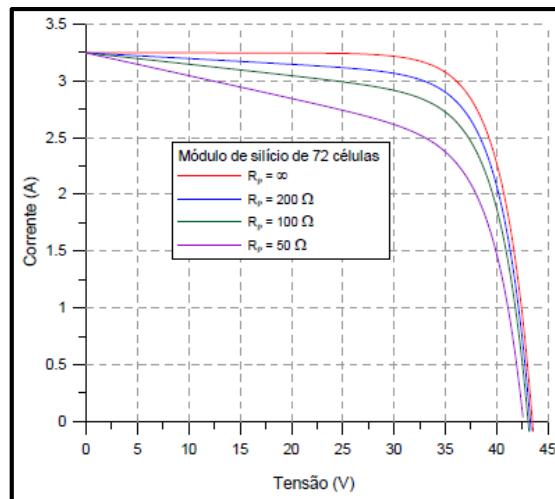
Como pode-se observar pela *Figura 2.12*, o aumento da resistência série (R_s) causa um achatamento do joelho da curva $I \times V$, de modo a aproximá-la cada vez mais de uma reta na medida em que a resistência aumenta, influenciando portanto negativamente na curva de potência do módulo.

2.3.2. Resistência Paralela (R_p)

No que tange a resistência paralela, sabe-se que a mesma está ligada às perdas de corrente pelo gerador FV. Dessa forma, caso a resistência paralela seja baixa, observar-se-á um caminho alternativo pelo qual parte da corrente será desviada, diminuindo, portanto, a potência do módulo [20].

Dessa forma, no caso dos módulos FV paralelos, a resistência paralela tende a diminuir bastante, o que faz com que a corrente diminua e, portanto, sua potência também, como pode-se observar na *Figura 2.13*, para um módulo composto por 72 células, relativas a 4 valores diferentes de R_p [20].

Figura 2.13 – Efeito da variação da resistência paralela de módulo solar com 72 células



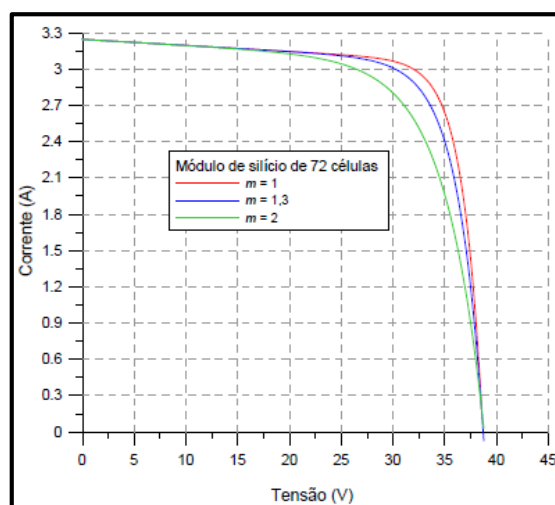
Fonte: [20]

Como pode-se observar pela *Figura 2.13*, a diminuição da resistência paralela (R_p) causa um declínio da curva IxV da região de curto-circuito até o joelho da mesma curva, podendo-se observar, portanto, que quanto menor for o valor da resistência, maior será o valor do declínio, o que influenciará de forma negativa na curva de potência.

2.3.3. Fator de Idealidade (η)

Sabendo-se que para o modelo de 1 diodo da célula ou do módulo FV, fator de idealidade estará ente 1 e 2 ($1 \leq \eta \leq 2$), tem-se a *Figura 2.14*, obtida a partir de um módulo composto por 72 células, relativas a 3 valores diferentes de η [20].

Figura 2.14 – Efeito da variação da resistência paralela de módulo solar com 72 células



Fonte: [20]

Como pode-se observar pela *Figura 2.14*, o aumento de η , implicará diretamente em um arredondamento do joelho da curva IxV, o que influencia na potência do módulo.

2.4. Sombreamento em Painéis ou em Módulos FV

Sabendo-se que o efeito do sombreamento tem impactos diretos nos painéis FV, tendo em vista a quantidade de energia que é desperdiçada anualmente devido ao referido efeito, pode-se observar que existem basicamente dois tipos deste fenômeno:

- ✓ Sombreamento Temporário: resultante da presença de folhas, dejetos de pássaros, bem como de outras sujidades no painel solar. Uma solução seria realizar a lavagem diária dos painéis, bem como também incliná-los com pelo menos 12° para que a água da chuva escorra de forma significativa de modo a limpar o painel [21].
- ✓ Sombreamento Devido à Localização: resultante da presença de edifícios, árvores, cabos de energia elétrica, antenas, bem como outros tipos de construções urbanas. Uma solução seria, se possível, mudar o local da instalação dos painéis de modo a achar um lugar em cima do edifício sem esse tipo de sombreamento [21].

2.4.1. Polarização Inversa da Célula Solar Sombreada

Sabendo-se que a corrente elétrica gerada em uma célula FV é diretamente proporcional à intensidade de luz que incide sobre ela, e havendo algum tipo de obstrução em alguma célula do módulo FV série, a corrente gerada no módulo série sombreado será menor que dos outros módulos não sombreados.

Dessa forma, estas células passarão a operar em condição de carga, consumindo potência do sistema ao invés de fornecer, uma vez que a corrente que passa em uma célula conectada em série conectada com as outras deverá ser a mesma, ficando assim a corrente de saída do arranjo FV limitada à célula sombreada.

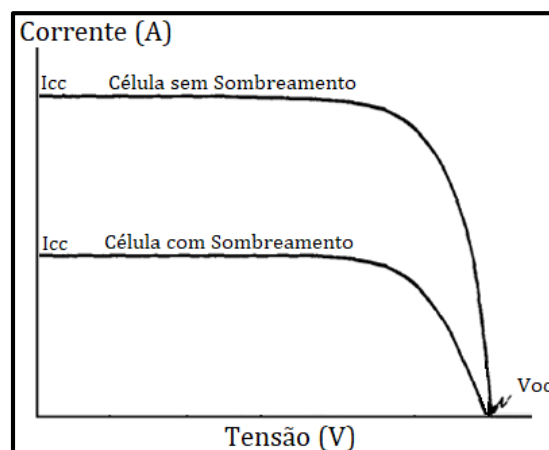
Desse modo, no caso de sombreamento da célula solar, a polaridade de tensão inverte e o fluxo de corrente continua no mesmo sentido, assemelhando-se assim ao comportamento de uma carga ou resistência, onde a corrente sai do polo positivo para o negativo.

Vale salientar que com a célula sombreada, a qual opera na condição de carga (tensão positiva e corrente positiva), a potência gerada não entregue ao consumo será dissipada no módulo afetado, convertida, portanto, em calor, fazendo com que a temperatura do módulo aumente, causando dessa maneira pontos quentes sobre o mesmo, podendo ocorrer ruptura do vidro, bem como fusão de polímeros e metais e por consequência danos permanentes ao módulo [17].

2.4.2. Importância do Diodo By-pass nos Módulos Sombreados

Como já se sabe, a corrente de saída do módulo FV será limitada pela corrente de saída da célula sombreada. Dessa forma, observando-se a *Figura 2.15*, pode-se notar que a corrente de saída da célula sombreada sofrerá drástica redução, tendo como consequência direta a redução significativa da potência gerada pela célula solar, implicando, portanto, na geração de energia entregue pelo módulo FV.

Figura 2.15 – Corrente de saída pela tensão aplicada na célula solar sem e com sombreamento



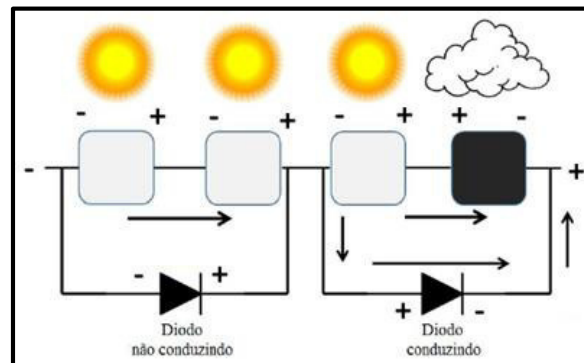
Fonte: próprio autor

Assim, para que toda a corrente de um módulo não seja limitada por uma célula de pior desempenho, é usado um diodo de passo em antiparalelo com a célula, ou diodo de by-pass, servindo como caminho alternativo para a corrente e limitando a dissipação de calor na célula defeituosa.

Observando-se a *Figura 2.16*, nota-se que quando não existe sombreamento na célula, o diodo de by-pass fica polarizado reversamente (tensão no catodo será maior que tensão no anodo), não permitindo que circule por ele corrente elétrica. Da mesma forma, caso exista sombreamento, a célula inverterá sua polaridade e, portanto, o diodo também,

de modo que este ficará diretamente polarizado (tensão no anodo será maior que tensão no catodo), fazendo com que parte da corrente passe agora por ele.

Figura 2.16 – Células em série com diodo de by-pass para cada duas células



Fonte: [22]

Ainda em relação à *Figura 2.16*, supondo que essas quatro células em série componha um módulo série, tem-se que, embora o módulo possua dois diodos by-pass, os mesmos só entrarão no modo condução ao mesmo tempo quando, além de ocorrer um nível de sombreamento semelhante nos dois grupos de células, o módulo estiver ligado a outros módulos. Pois, caso o módulo funcione em um sistema isolado, ou seja, não conectado a outros módulos, os diodos não possuirão diferença de potencial suficiente para entrar no modo condução [22]. No caso de o sombreamento ser diferente em ambos os grupos de células, os dois diodos irão entrar em modo de condução, mesmo não estando estas células conectadas com outras.

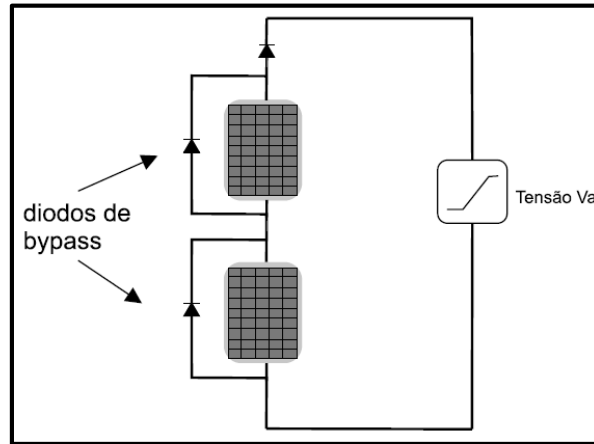
Devido ao alto custo que se teria caso houvesse um diodo de by-pass para cada célula do módulo FV, geralmente o diodo by-pass é posto em agrupamentos de células no módulo, ou até mesmo apenas um diodo para todo o módulo.

2.4.3. Curvas Características de Módulos Série Sombreados

Para ilustrar as curvas dos módulos séries FV sombreados, tomou-se por base teórica a modelagem realizada por [10], onde foi considerado o modelo de célula com dois diodos, que é o modelo mais completo e preciso da literatura, sendo suas curvas usadas como referências de dados para comparação, bem como para estimação de diversos parâmetros.

Para tomar como referência inicial, será considerado a situação em que os dois módulos genéricos em série, ambos com diodo by-pass em antiparalelo, como mostrado na *Figura 2.17*, recebam a mesma quantidade de radiação do Sol, em valores de exemplo, a mesma irradiância de 1000 W/m^2 , $I_{CC} = 3,31 \text{ A}$, $V_{OC} = 21,7 \text{ V}$ [10].

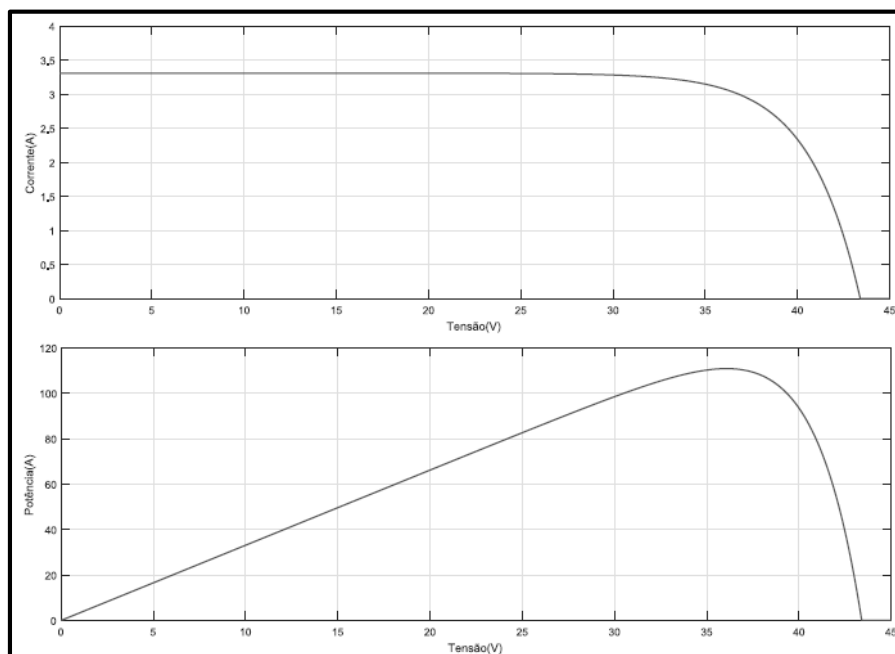
Figura 2.17 – Módulos solares e com diodos by-pass em série, sem sombreamento



Fonte: [10]

As curvas de corrente por tensão (curva IxV) e de potência por tensão (curva PxV) do arranjo nas condições mostradas na *Figura 2.17* são mostradas na *Figura 2.18* [10].

Figura 2.18 – Curvas de IxV e PxV de dois módulos FV em série com diodo by-pass sem sombra

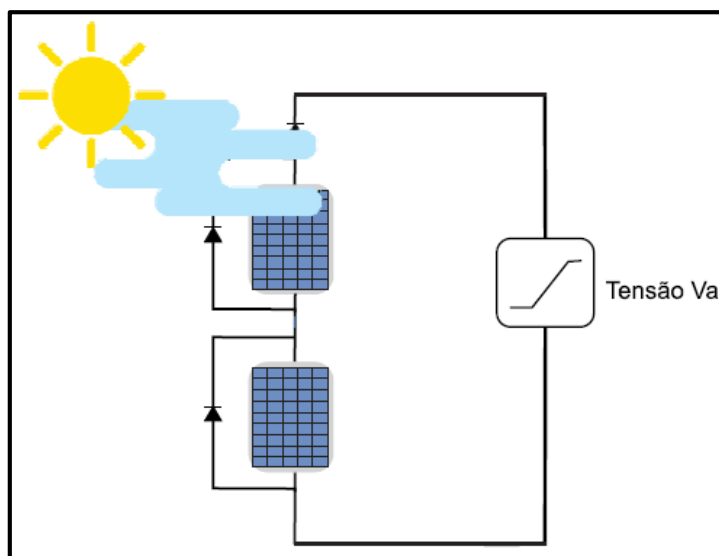


Fonte: [10]

Para visualizar o efeito do sombreamento, considera-se uma nova situação em que os dois módulos genéricos em série, ambos com diodo by-pass em antiparalelo, como

mostrado na *Figura 2.19*, recebem quantidades distintas de irradiância, em valores de exemplo, de 1000 W/m^2 e 500 W/m^2 , $I_{cc} = 3,31 \text{ A}$, $V_{oc} = 21,7 \text{ A}$ [10].

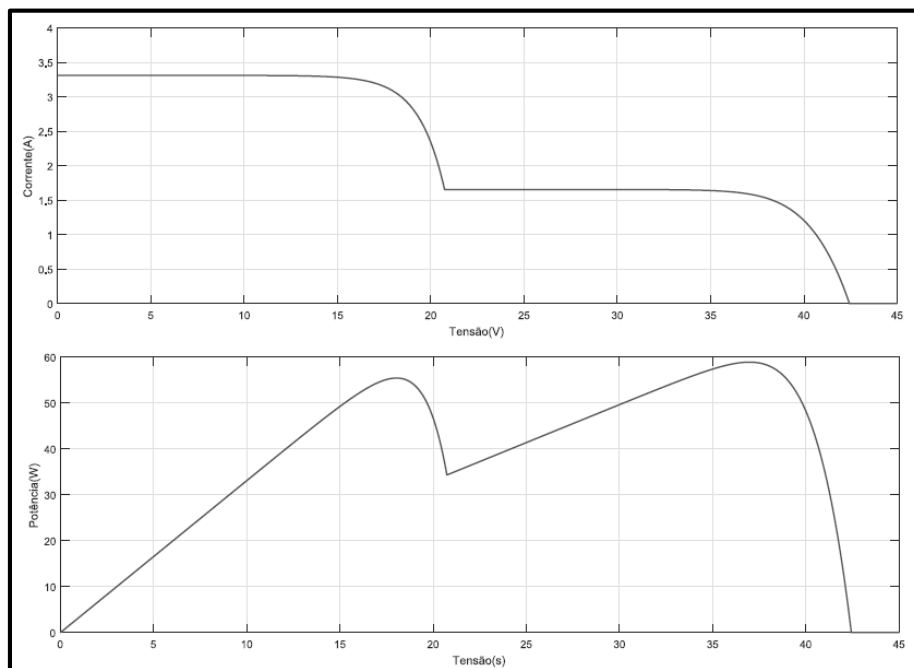
Figura 2.19 – Módulos solares e com diodos by-pass em série, com sombreamento



Fonte: [10]

As curvas de corrente por tensão (curva IxV) e de potência por tensão (curva PxV) do arranjo nas condições mostradas na *Figura 2.19* são mostradas na *Figura 2.20* a seguir [10].

Figura 2.20 – Curvas de IxV e PxV de dois módulos FV em série com diodo by-pass com sombra



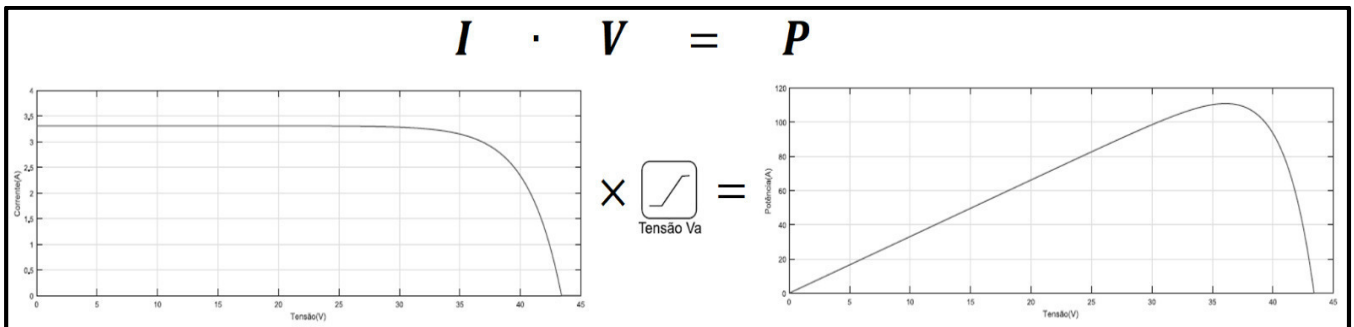
Fonte: [10]

Comparando-se as curvas da *Figura 2.20* (com sombreamento) com as curvas da *Figura 2.18* (sem sombreamento), existem algumas diferenças que precisam ser analisadas de maneira minuciosa.

No que se refere a curva IxV da *Figura 2.18* (sem sombreamento), pode-se observar dela tudo o que já foi constatado em outros pontos deste capítulo, ou seja, o porquê da curva ter este formato, o porquê da curva decrescer com o aumento da tensão aplicada, entre outros.

No que tange à curva PxV da *Figura 2.18* (sem sombreamento), pode-se observar que, como o formato de onda da tensão aplicada no ensaio é em rampa, e como $P = V \cdot I$, observa-se pela *Figura 2.21* que a curva da potência será em formato de rampa até o ponto em que a curva da corrente estiver constante. A partir do momento em que a curva de corrente passar a decrescer, a curva de potência cresce apenas um pouco mais, onde chegará em seu pico, passando a partir daí decrescer até chegar em zero.

Figura 2.21 – Ilustração da explicação do formato de onda da curva de PxV sem sombra



Fonte: próprio autor

No que concerne a curva IxV da *Figura 2.20* (com sombreamento), pode-se observar que haverá dois degraus na curva, sendo cada um referente à quantidade de módulos FV (com diodos by-pass) em série. Pode-se perceber que, fazendo-se uma comparação das curvas IxV das *Figuras 2.18* e *2.20*, observa-se que a corrente de curto-circuito ($v = 0$) do degrau mais elevado será igual a corrente de curto-circuito ($v = 0$) do módulo não sombreado (ou de maior irradiância). O que corresponde, portanto, a corrente de degrau maior ao módulo não sombreado do sistema, sendo assim a corrente de degrau menor correspondente ao módulo sombreado (ou de menor irradiância).

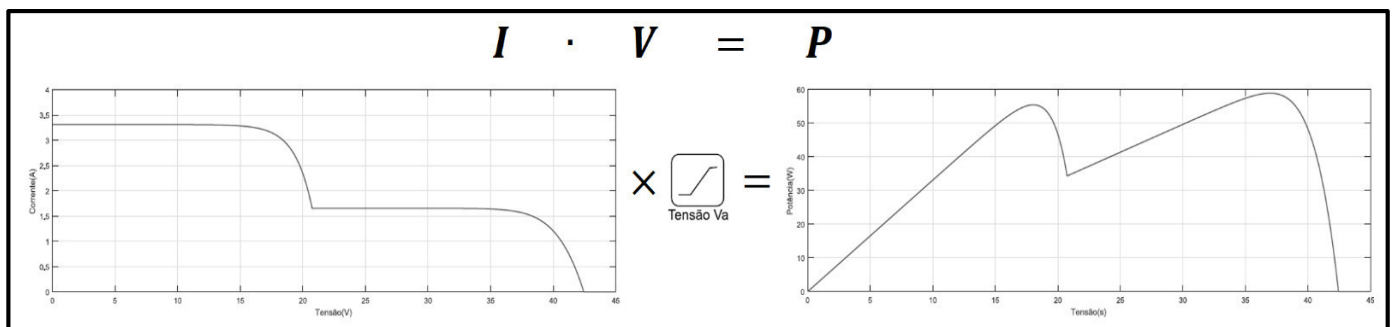
Isto posto, nota-se que até determinado nível de tensão aplicada, a corrente de saída será igual à corrente do módulo não sombreado, tendo em vista que, até determinada tensão, o diodo do módulo sombreado se encontrará diretamente polarizado, fazendo com

que parte da corrente contorne o módulo sombreado através do diodo de by-pass (a corrente de saída do sistema é igual a soma da corrente que passa pelo diodo by-pass com a corrente que sai do módulo sombreado). A partir de determinada tensão, quando a corrente de saída do módulo sombreado se iguala a corrente de saída do módulo não sombreado (*Figura 2.20*), o diodo do módulo sombreado entra em estado de polarização reversa, fazendo com que o diodo pare de conduzir e com que a corrente de saída se iguale à corrente do módulo sombreado (os dois módulos fornecem a mesma corrente). Como os módulos estão em série, não poderá passar pelo módulo sombreado corrente maior do que aquela que ele pode gerar, ficando dessa forma a corrente de saída limitada à geração do módulo afetado.

No que tange à curva PxV da *Figura 2.20* (com sombreadamento), pode-se observar que, como o formato de onda da tensão aplicada no ensaio é em rampa, e como $P = V \cdot I$, observa-se pela *Figura 2.22* que a curva da potência será em formato de rampa toda vez que a curva de corrente estiver constante. A partir do momento em que a curva de corrente passar a decrescer, a curva de potência cresce apenas um pouco mais, onde chegará em seu pico, passando a partir daí decrescer até chegar no ponto de transição (ponto onde o módulo sombreado passa a conduzir) ou em zero.

Ainda em relação à curva PxV, pode-se observar que a mesma terá duas regiões de picos, tendo em vista a curva da corrente possuir dois degraus.

Figura 2.22 – Ilustração da explicação do formato de onda da curva de PxV com sombra



Fonte: próprio autor

Vale destacar que todas essas curvas explicitadas na análise de sombreadamento são referentes a saída do sistema FV (conjunto total da associação em série dos módulos FV) e não dos módulos de forma isolada. A análise isolada de cada módulo é dada logo a seguir no *subtópico 2.4.4*, a qual é feita em função do tempo.

2.4.4. Curvas Mais Específicas do Sombreamento

Para um entendimento mais pleno sobre o comportamento do sistema FV com sombreamento, torna-se necessário ainda que se faça uma análise das curvas de corrente e tensão do módulo sombreado e não sombreado em função do tempo.

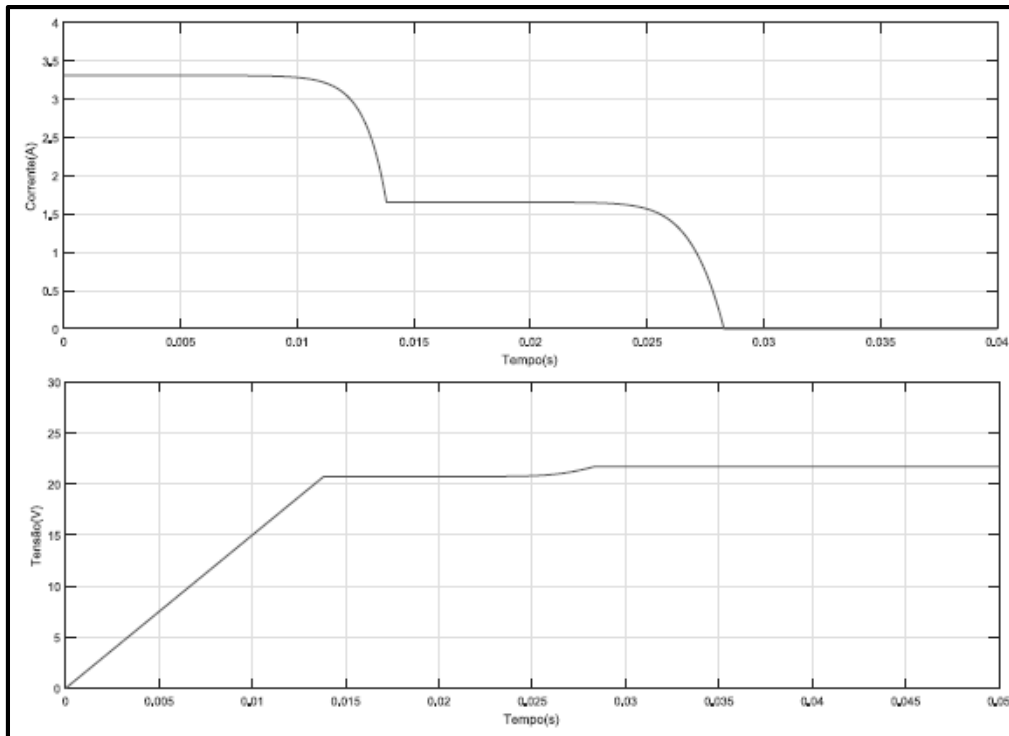
A *Figura 2.23* mostra a corrente e a tensão em função do tempo do módulo de maior irradiância, podendo-se notar que a curva da tensão tem uma forma bem diferente da de corrente, dado que a tensão aplicada no ensaio é em formato de rampa (*Figura 2.19*).

Observa-se pela *Figura 2.23* que até $t \approx 0,014$ s, o módulo não sombreado está conduzindo toda a corrente, sendo o módulo sombreado by-passado pelo diodo de modo que o mesmo conduzirá metade da corrente de saída. Dessa forma, a tensão resultante sobre o módulo de maior irradiância será muito próxima da tensão aplicada sobre o sistema FV, qual seja, a tensão em forma de rampa, como pode-se observar pela *Figura 2.23* na curva $V \times T$ até $t \approx 0,014$ s.

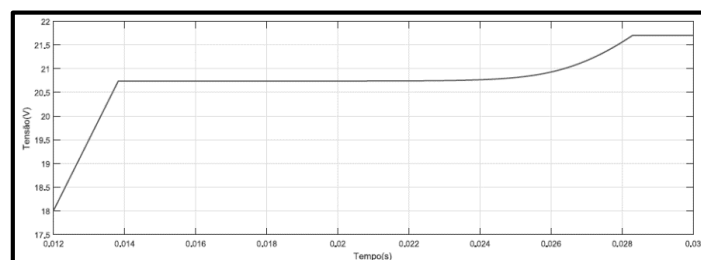
A partir de $t \approx 0,014$ s, o diodo do módulo em sombra entra em polarização reversa, fazendo com que o módulo afetado passe a conduzir junto com o módulo não afetado, ficando portanto a corrente de saída limitada a corrente gerada pelo módulo sombreado.

Ainda em relação à *Figura 2.23*, no que concerne à curva de tensão, até o instante de $t \approx 0,014$ s, pode-se observar que a tensão sobre o módulo não sombreado é muito semelhante a tensão rampa aplicada sobre o conjunto, uma vez que até esse momento o diodo do módulo sombreado está em período de condução, sendo a tensão sobre o módulo sombreado próxima de zero.

A partir de $t \approx 0,014$ s, sabe-se que o diodo em paralelo com módulo sombreado deixará de conduzir, possibilitando assim o crescimento de tensão no módulo sombreado, fazendo, dessa forma, com que a tensão aplicada ao conjunto divida-se entre os módulos. Assim, a tensão no módulo não afetado, que já estará quase em sua tensão máxima, continuará a crescer, muito embora de maneira bem sutil até atingir sua tensão máxima (tensão de circuito aberto) em $t \approx 0,028$ s, bem como ilustrado na *Figura 2.24*. A partir de então, a tensão sobre o módulo não sombreado permanecerá constante até que a tensão no módulo sombreado também chegue ao seu valor máximo.

Figura 2.23 – Curvas de I_{xT} e V_{xT} do módulo não sombreado

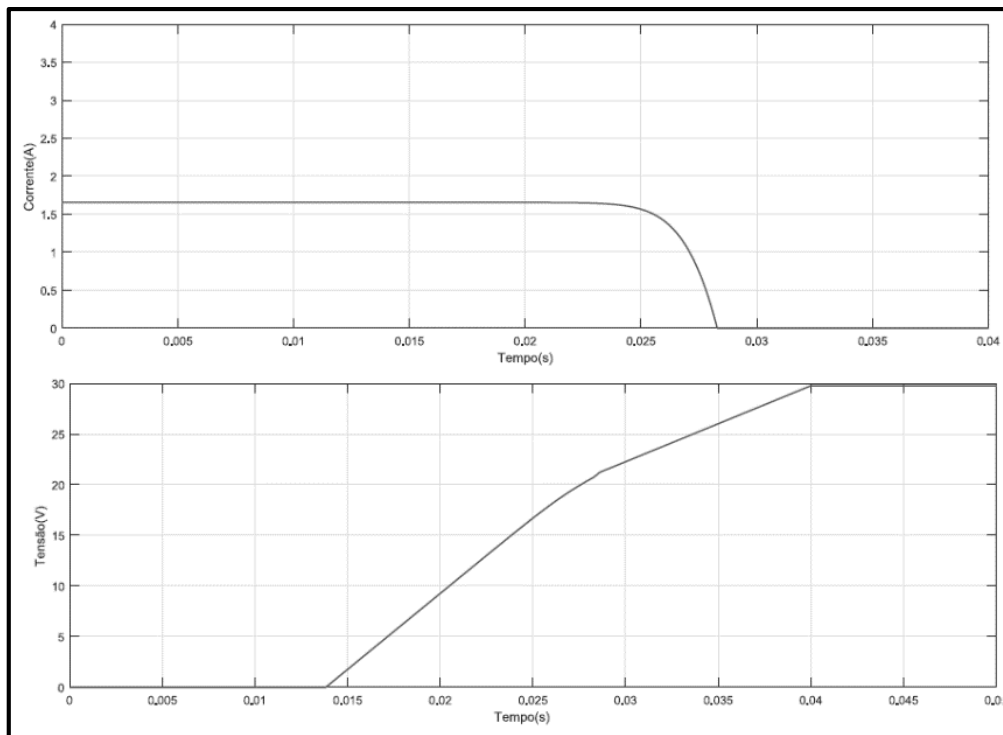
Fonte: [10]

Figura 2.24 – Ampliação da curva de V_{xT} do módulo não sombreado

Fonte: [10]

Como bem explicita a *Figura 2.25* a seguir, observa-se que até $t \approx 0,028$ s, o módulo sombreado está gerando corrente, porém com valor inferior (nesse caso, metade do valor) ao valor do módulo não sombreado, sendo o módulo sombreado by-passado pelo diodo até $t \approx 0,014$ s. Dessa forma, a tensão resultante sobre o módulo de menor irradiação será igual à tensão sobre o diodo, chegando, portanto, bem próxima de zero.

A partir de $t \approx 0,014$ s, sabe-se que o diodo by-pass do módulo sombreado deixará de conduzir, fazendo com que a tensão aplicada ao conjunto divida-se entre os módulos. Dessa forma, a tensão no módulo sombreado irá crescer na forma da rampa aplicada no conjunto até $t \approx 0,028$ s, que é justamente o período onde os dois módulos alcançam suas tensões máximas (tensão de circuito aberto).

Figura 2.25 – Curvas de I_{xT} e V_{xT} do módulo sombreado

Fonte: [10]

Por fim, outra observação importante a ser feita é em relação à corrente no diodo by-pass do módulo sombreado, que será dado pela diferença entre a corrente que passa pelo módulo não sombreado e o módulo sombreado. Desse modo, a corrente de saída do sistema será dada pela soma da corrente no diodo by-pass do módulo sombreado juntamente com a corrente que passa pelo próprio módulo sombreado.

3. MODELAGEM DE PAINEL FOTOVOLTAICO E ANÁLISES DE SOMBREAMENTO

O presente capítulo visa modelar matematicamente as equações dos módulos FV com base nas equações das células desenvolvidas no *capítulo 2*, bem como também transpor essas equações para o Simulink de modo a criar uma plataforma computacional adequada para a parametrização do módulo YL250P-29b, presente no LEA – UFC. Com o ambiente computacional estabelecido, serão feitas as plotagens das principais curvas características do módulo, bem como também análises de sombreamento sob condições específicas de irradiância nos módulos da planta FV do LEA.

3.1. Equações Características dos Módulos FV

Observando-se que todas as equações do *capítulo 2* se referem à célula FV, e como as simulações deste capítulo serão obtidas a partir da modelagem dos módulos FV, torna-se necessário que se expanda as equações da célula para os módulos.

O modelo de célula FV é semelhante ao modelo de módulo, bem como de painel FV, sendo que a única diferença entre os modelos estará no fato de que as equações do modelo de módulo devem incluir a quantidade de células em série (N_s), bem como a quantidade de células em paralelo (N_p) daquele módulo nas referidas equações que descrevem o sistema FV.

Isto posto, no caso de módulos série, sabe-se que o número de células irá influir diretamente na tensão do módulo, de modo que a tensão de saída do módulo será multiplicada pelo número total de células em série (N_s) que o compõem.

Da mesma maneira, em relação aos módulos paralelo, o número de células irá influir diretamente no valor da corrente gerada bem como na corrente de saída do módulo. Dito isto, a consequência para a corrente que circula sobre o diodo do módulo (que seria uma espécie de diodo equivalente das células em paralelo) sobre a corrente FV, bem como também sobre a corrente de saída, será a multiplicação da corrente que percorre os elementos de circuito das células pelo total de células em paralelo (N_p) que compõem o módulo.

No que se refere ao módulo série-paralelo, que é o caso geral, há de haver a multiplicação das correntes que circulam pelos elementos das células pela quantidade de células em paralelo (N_p), bem como a multiplicação da tensão das células pelas células em série (N_s), sendo portanto o modelo de equação de módulo mais abrangente.

3.1.1. Corrente FV Gerada no Módulo

Observando-se a *Equação 2.3*, pode-se perceber que para o caso de células arranjadas em paralelo, a corrente FV gerada no arranjo será maior tanto quanto maior for o número de células, ficando, portanto, a expressão multiplicada pelo número de células em paralelo (N_p).

Assim, tem-se que [13]:

$$I_{f_{eq}} = N_p \cdot [I_{CC} + k_{CC}^i(T - T_r)] \cdot \frac{G}{G_{máx}} \quad (3.1)$$

Sendo:

- $I_{f_{eq}}$, a corrente equivalente fotogerada pelo módulo FV, A;
- N_p , a quantidade de células em paralelo do módulo;
- I_{CC} , a corrente de curto-circuito da célula, A;
- k_{CC}^i , o coeficiente de temperatura de corrente de curto-circuito da célula, A/K;
- T , a temperatura do diodo ou de operação da célula, K;
- T_r , a temperatura ambiente ou de referência da célula, K;
- G , a intensidade da irradiância, W/m²;
- $G_{máx}$, a intensidade da irradiância padrão, W/m².

3.1.2. Corrente de Saturação Reversa de Referência do Módulo

Analisando-se o caso mais abrangente (módulo série-paralelo), o qual é formado por associação de células em paralelo, tem-se com base na *Equação 2.4* [13]:

$$I_{d_{eq}} = N_p \cdot I_0 \cdot \left(e^{\frac{v_{d_{eq}}}{\eta \cdot V_{T_{eq}}}} - 1 \right) \quad (3.2)$$

Seguindo-se o raciocínio para o módulo série-paralelo, o qual também é formado por associação de células em série, tem-se, observando-se a *Equação 2.5* [22]:

$$V_{T_{eq}} = N_s \cdot \frac{kT}{q} \quad (3.3)$$

Sendo:

- $I_{d_{eq}}$, a corrente que atravessa o diodo equivalente do módulo FV, A;
- I_0 , a corrente de saturação reversa da célula, A;
- $v_{d_{eq}}$, a tensão aplicada no diodo do módulo equivalente, V;
- η , o fator de idealidade do diodo, $1 \leq \eta \leq 2$;
- $V_{T_{eq}}$, a tensão térmica equivalente do módulo, V;
- N_s , a quantidade de células em série do módulo;
- k , a constante de Boltzmann, $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K;
- T , a temperatura do diodo ou de operação da célula, K;
- q , a carga do elétron, $1,60 \cdot 10^{-19}$ C;

Substituindo-se a *Equação 3.3* na *Equação 3.2* [22], [13]:

$$I_{d_{eq}} = N_p \cdot I_{0_{eq}} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot v_{d_{eq}}}{\eta \cdot N_s \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (3.4)$$

Isolando-se o $I_{0_{eq}}$:

$$I_{0_{eq}} = \frac{I_{d_{eq}}}{N_p \cdot \left(e^{\frac{q \cdot v_{d_{eq}}}{\eta \cdot N_s \cdot k \cdot T}} - 1 \right)} \quad (3.5)$$

Seguindo-se por analogia o mesmo raciocínio usado para a célula FV e que está explicitado na *Figura 2.5*, qual seja, na situação de retirada da carga observada na *Figura 2.2*, observar-se-á como consequência o curto-circuito da fonte de corrente em série com o diodo, ficando a corrente no diodo igual a corrente FV ($I_{f_{eq}} = I_{d_{eq}}$), e ficando a tensão de circuito aberto sobre o diodo.

Sabendo-se também da importância do estabelecimento de uma corrente de saturação reversa máxima ou de referência, da *Equação 3.5* e da *Figura 2.5* (que por analogia pode ser aplicada ao módulo FV), tem-se que [13]:

$$I_{0req} = \frac{I_{feq}}{N_p \cdot \left(e^{\frac{q \cdot v_{deq}}{\eta \cdot N_s \cdot k \cdot T}} - 1 \right)} \quad (3.6)$$

Substituindo-se a *Equação 3.1* na *Equação 3.6* e sabendo-se que se busca o valor da corrente de saturação reversa de referência, tem-se que $G = G_{m\acute{a}x}$ (situação de maior corrente FV) e portanto:

$$I_{0req} = \frac{N_p \cdot [I_{CC} + k_{CC}^i(T - T_r)]}{N_p \cdot \left(e^{\frac{q \cdot [v_{oc eq} + k_{OC eq}^v(T - T_r)]}{\eta \cdot N_s \cdot k \cdot T}} - 1 \right)} \quad (3.7)$$

Resultando em [13]:

$$I_{0req} = \frac{[I_{CC} + k_{CC}^i(T - T_r)]}{\left(e^{\frac{q \cdot [v_{oc eq} + k_{OC eq}^v(T - T_r)]}{\eta \cdot N_s \cdot k \cdot T}} - 1 \right)} \quad (3.8)$$

Sendo:

- I_{0req} , a corrente de saturação reversa de referência equivalente do módulo, A;
- $v_{oc eq}$, a tensão de circuito aberto equivalente do módulo, V;
- $k_{OC eq}^v$, o coeficiente de temperatura de tensão de circuito aberto equivalente do módulo, V/K.

Obviamente que, por analogia à célula, a corrente de saturação reversa (I_{0eq}) do módulo é dada por [13]:

$$I_{0eq} = I_{0req} \cdot \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \cdot e^{\frac{q \cdot E_{g0} \cdot \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right)}{\eta \cdot k}} \quad (3.9)$$

Sendo:

- E_{g0} , a energia de gap para o silício (Si), 1,12 eV;

3.1.3. Corrente Paralela e de Saída do Módulo

Da mesma maneira, utilizando-se da analogia entre célula e módulo FV, pode-se observar a *Figura 2.6* e aplicá-la ao módulo. Sabendo-se que as *Equações 2.12* e *2.15* são consequências diretas da referida figura, tem-se, portanto, que:

$$I_{Rp_{eq}} = \frac{v_{eq} + I_{eq} \cdot R_{s_{eq}}}{R_{p_{eq}}} \quad (3.10)$$

Pela *Figura 2.6* (que pode ser aplicada ao módulo), pode-se observar que as correntes do módulo FV se relacionam pela seguinte expressão:

$$I_{f_{eq}} = I_{d_{eq}} + I_{Rp_{eq}} + I_{eq} \quad (3.11)$$

Da *Equação 3.11*, pode-se obter a expressão simplificada da corrente de saída do módulo:

$$I_{eq} = I_{f_{eq}} - I_{d_{eq}} - I_{Rp_{eq}} \quad (3.12)$$

Sabendo-se que no modelo real, a tensão no diodo equivalente do módulo é igual a tensão em sua resistência paralela equivalente ($v_{d_{eq}} = v_{eq} + I_{eq} \cdot R_{s_{eq}}$), tem-se das *Equações 3.4*, *3.10* e *3.12* a expressão da corrente de saída do módulo FV para o modelo real:

$$I_{eq} = I_{f_{eq}} - N_p \cdot I_{0_{eq}} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (v_{eq} + I_{eq} \cdot R_{s_{eq}})}{\eta \cdot N_s \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{v_{eq} + I_{eq} \cdot R_{s_{eq}}}{R_{p_{eq}}} \quad (3.13)$$

Sendo:

- I_{eq} , a corrente de saída equivalente do módulo FV, A;
- v_{eq} , tensão de saída equivalente do módulo, V;
- $R_{s_{eq}}$, resistência série equivalente do módulo, Ω ;
- $R_{p_{eq}}$, resistência paralela equivalente do módulo, Ω ;

Dessa forma, todo o modelo computacional deste capítulo tomará por base de entrada e saída cinco grandes equações, as quais são os pilares fundamentais deste trabalho, quais sejam:

$$I_{f_{eq}} = N_p \cdot [I_{CC} + k_{CC}^i(T - T_r)] \cdot \frac{G}{G_{m\acute{a}x}} \quad (3.1)$$

$$I_{d_{eq}} = N_p \cdot I_{0_{eq}} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot v_d}{\eta \cdot N_s \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (3.4)$$

$$I_{0_{req}} = \frac{[I_{CC} + k_{CC}^i(T - T_r)]}{\left(e^{\frac{q \cdot [v_{oc} + k_{OC}^v(T - T_r)]}{\eta \cdot N_s \cdot k \cdot T}} - 1 \right)} \quad (3.8)$$

$$I_{0_{eq}} = I_{0_{req}} \cdot \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \cdot e^{\frac{q \cdot E_{g0} \cdot \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right)}{\eta \cdot k}} \quad (3.9)$$

$$I_{eq} = I_{f_{eq}} - N_p \cdot I_{0_{eq}} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (v_{eq} + I_{eq} \cdot R_{seq})}{\eta \cdot N_s \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{v_{eq} + I_{eq} \cdot R_{seq}}{R_{peq}} \quad (3.13)$$

3.2. Modelando o Módulo FV Via Simulink no MATLAB

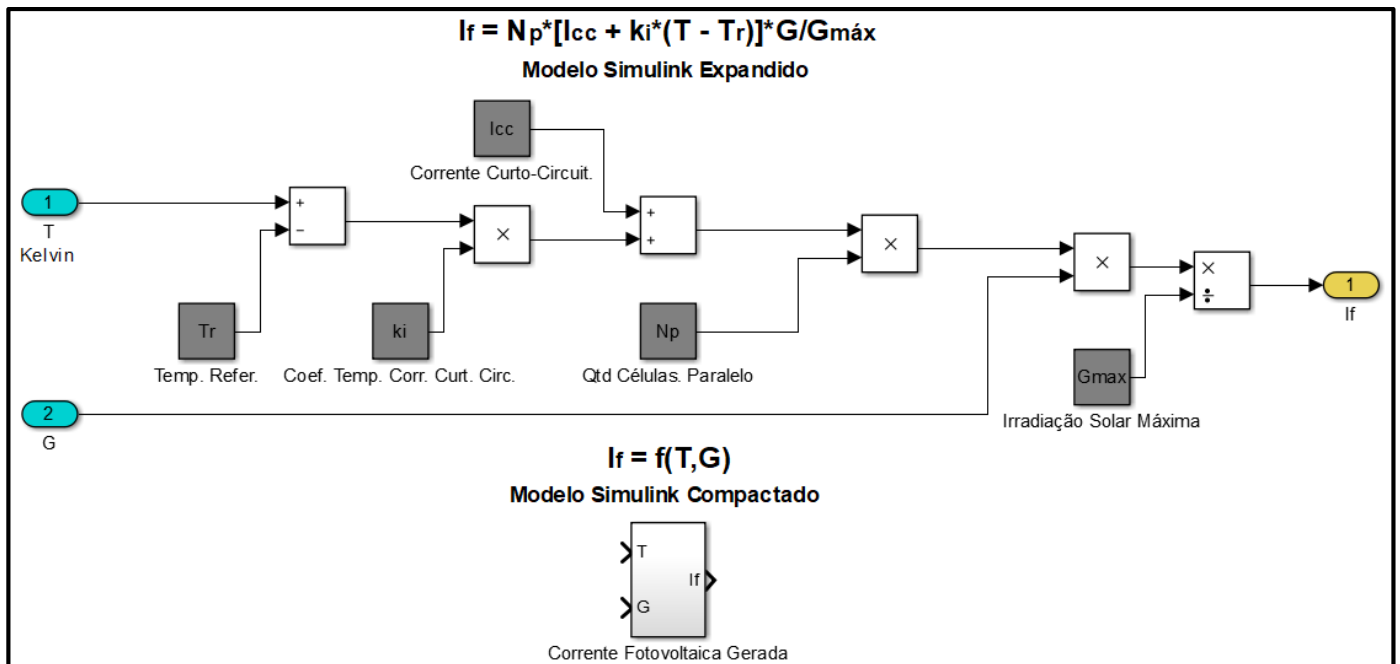
Para melhoria da didática, alguns blocos das *Figuras 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6*, foram coloridos a fim de fazer a separação de variáveis de entrada, constantes, variáveis de saída, funções algeblicas e de fontes. Dessa forma, tem-se que:

- ✓ Azul: Representa as variáveis de entrada da equação;
- ✓ Branco: Representa as funções algeblicas (soma, subtração, multiplicação, divisão, potenciação e exponencial);
- ✓ Cinza: Representa as constantes da equação;
- ✓ Dourado: Representa as variáveis de saída da equação (*Figuras 3.1-3.4*), saída de tensão (*Figura 3.5*) e de saída de gráficos (*Figura 3.6*);
- ✓ Laranja: Representa todos os osciloscópios;
- ✓ Verde: Representa as fontes de corrente e de tensão do sistema.

3.2.1. Modelagem das Equaoes do Sistema FV

Partindo-se da *Equação 3.1*, observando-se que N_p , I_{CC} , k_i , T_r e $G_{m\acute{a}x}$ são todas constantes e que os valores de entrada são T e G , sendo o valor de saída dado por I_f , tem-se que a equação da corrente FV do módulo solar pode ser modelada pelo Simulink de acordo com a *Figura 3.1* a seguir.

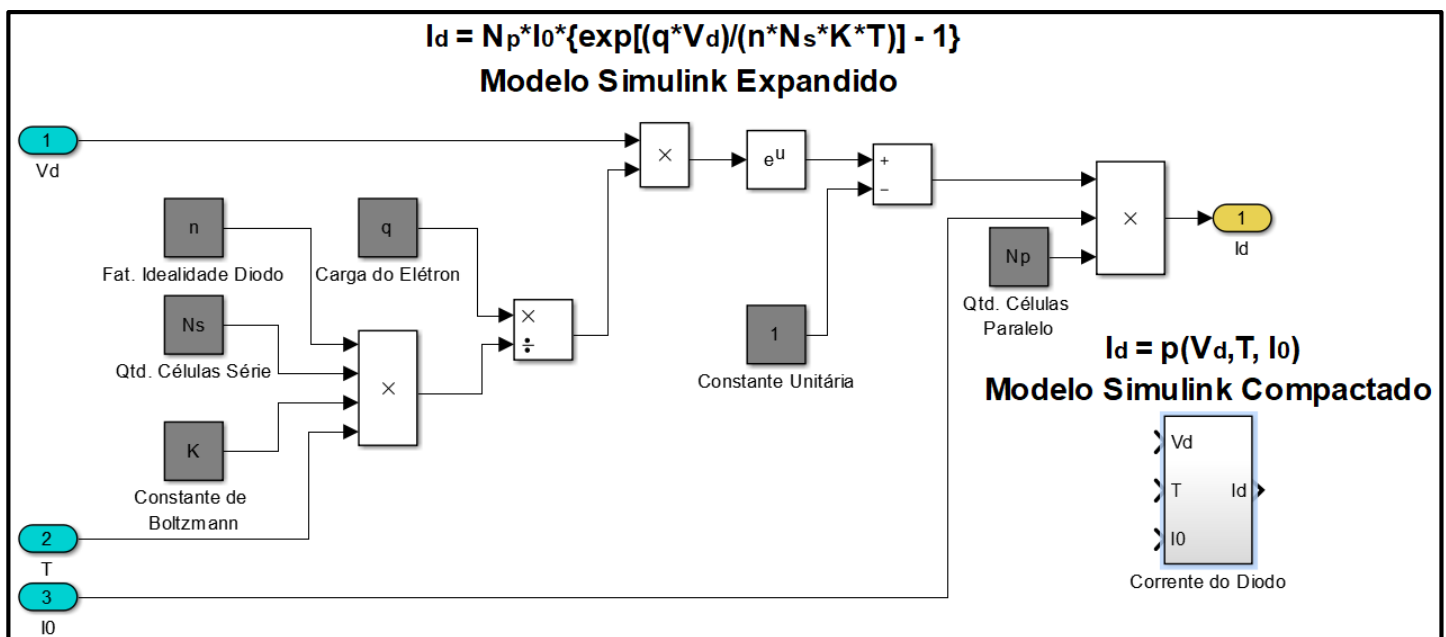
Figura 3.1 – Modelo Simulink da Equação 3.1 (corrente FV gerada no módulo solar)



Fonte: próprio autor

Partindo-se da Equação 3.4, observando-se que N_p , q , η , N_s e K são todas constantes e que os valores de entrada são V_d , T e I_0 , sendo o valor de saída dado por I_d , tem-se que a equação da corrente do diodo pode ser modelada pelo Simulink de acordo com a Figura 3.2 a seguir.

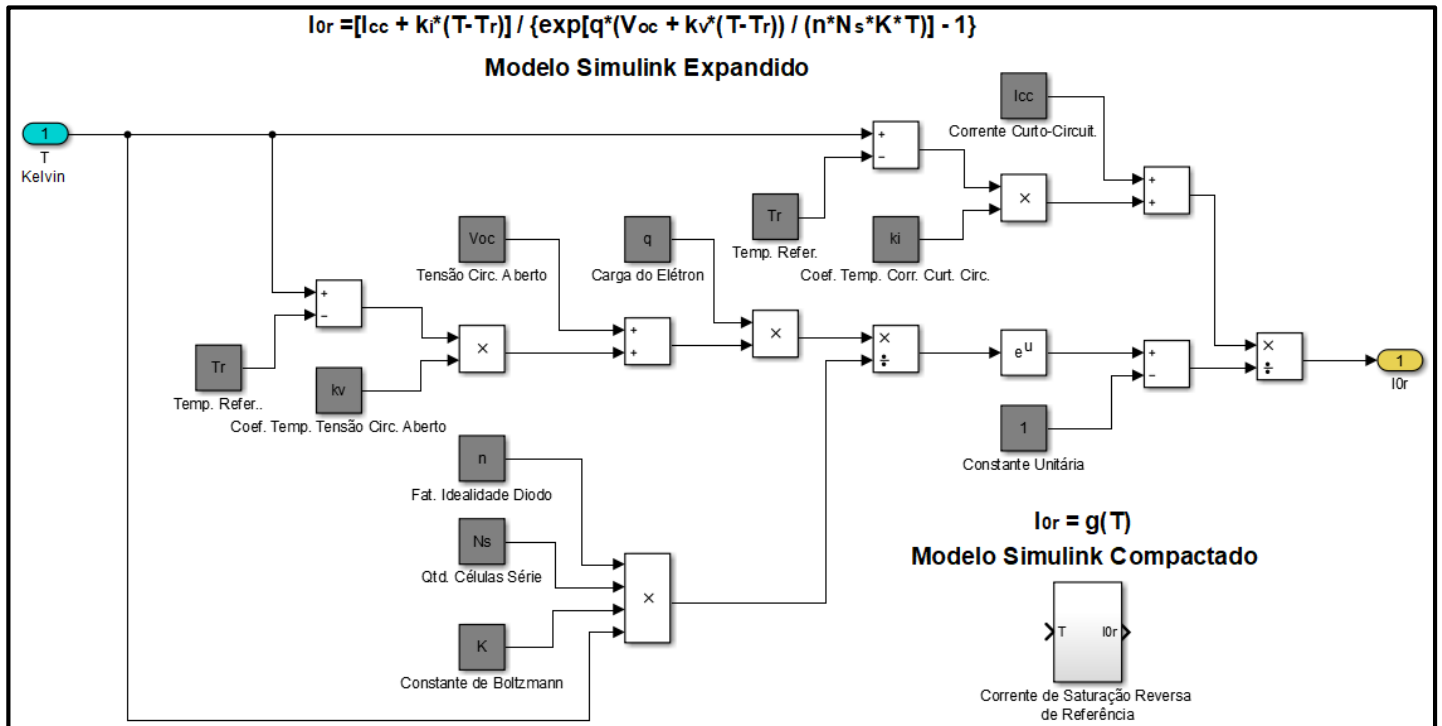
Figura 3.2 – Modelo Simulink da Equação 3.4 (corrente do diodo)



Fonte: próprio autor

Partindo-se da *Equação 3.8*, observando-se que I_{cc} , k_i , T_r , q , V_{oc} , k_v , η , N_s e K são todas constantes e que o valor de entrada é T , sendo o valor de saída dado por I_{0r} , tem-se que a equação da corrente de saturação reversa de referência do diodo pode ser modelada pelo Simulink de acordo com a *Figura 3.3* a seguir.

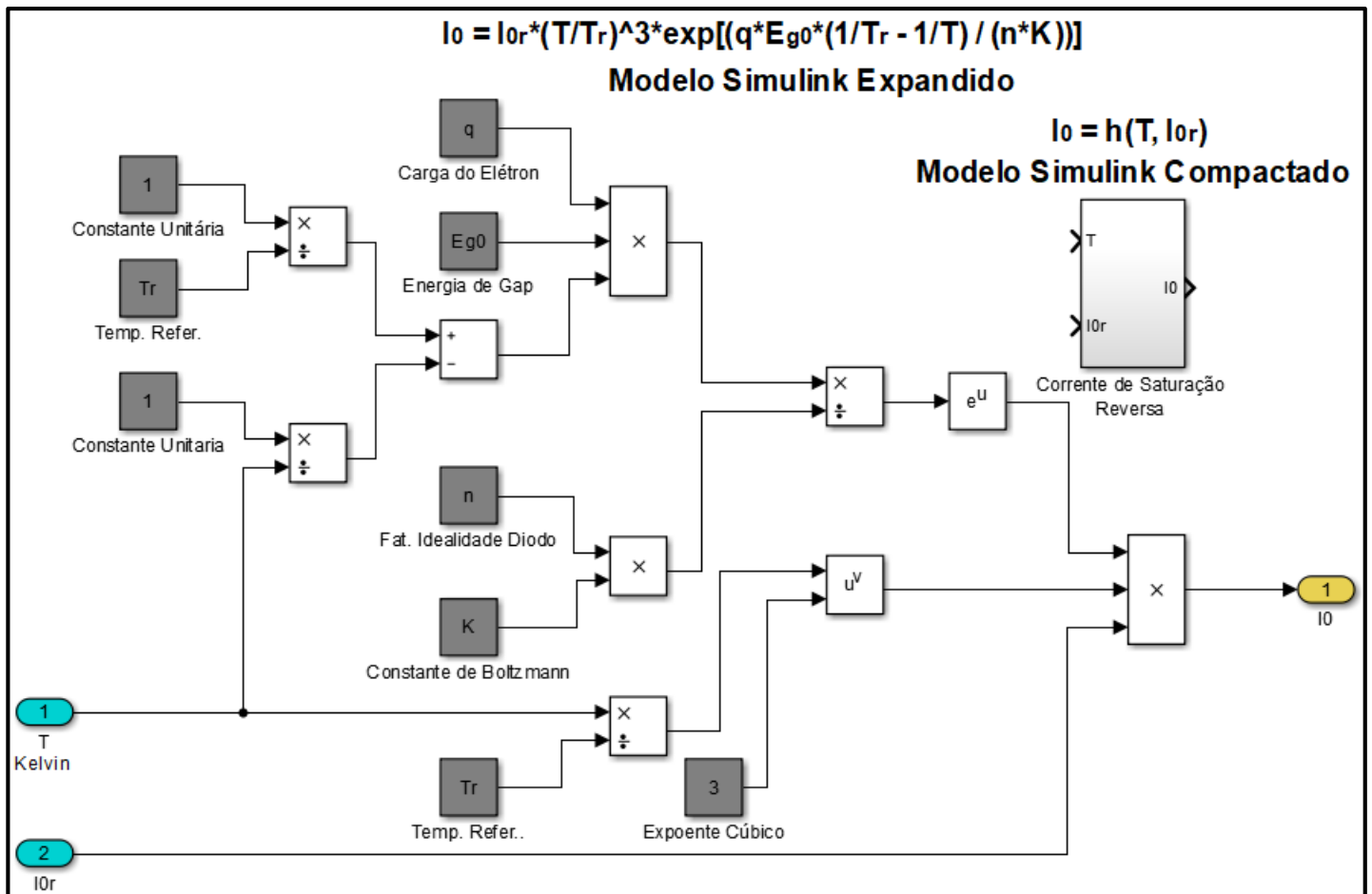
Figura 3.3 – Modelo Simulink da *Equação 3.8* (corrente de saturação reversa de referência)



Fonte: próprio autor

Partindo-se da *Equação 3.9*, observando-se que T_r , q , E_{g0} , η , e K são todas constantes e que os valores de entrada são T e I_{0r} , sendo o valor de saída dado por I_0 , tem-se que a equação da corrente de saturação reversa do diodo pode ser modelada pelo Simulink de acordo com a *Figura 3.4* a seguir.

Figura 3.4 – Modelo Simulink da Equação 3.9 (corrente de saturação reversa)



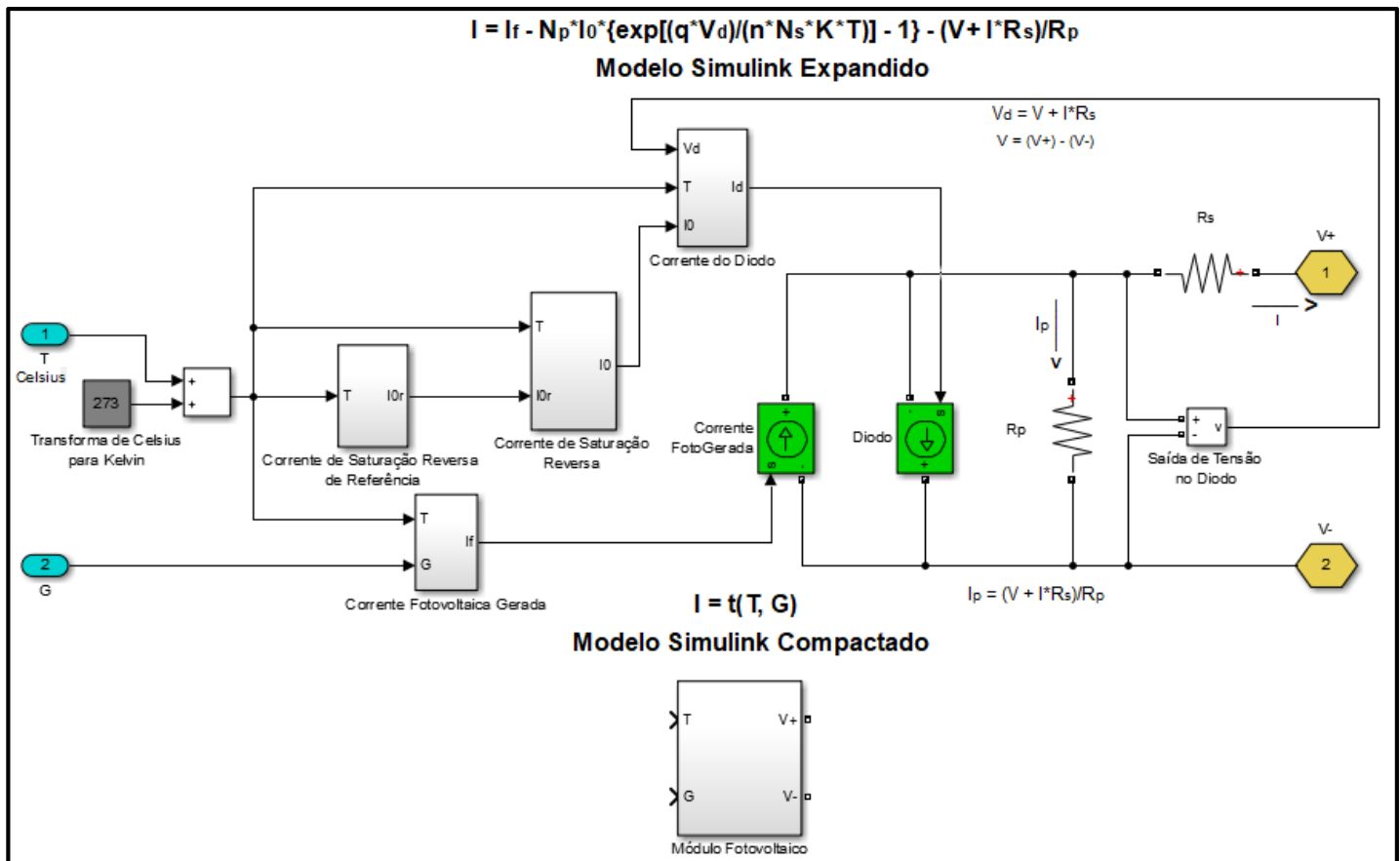
Fonte: próprio autor

Partindo-se da Equação 3.13, observando-se que R_s e R_p são todas constantes e que os valores de entrada são T e G , sendo o valor de saída dado por $V = V^+ - V^-$ o que implica em I , tem-se que a equação da corrente de saída do módulo pode ser modelada pelo Simulink de acordo com a Figura 3.5 a seguir.

Observa-se ainda na Figura 3.5 a existência de um circuito, o qual modela teoricamente o módulo FV real, como o observado na Figura 2.6. Pode-se notar a existência de duas fontes, sendo uma responsável pela corrente FV e a outra responsável pela corrente que circula pelo diodo, com a observação de que cada uma das fontes recebe um sinal advindo de um bloco compactado, sendo os sinais recebidos convertidos pelas fontes em corrente elétrica de acordo com os modelos matemáticos modelado por cada bloco.

Dessa forma, como observado na Figura 3.5, os blocos compactados interagem entre si e com as fontes, de modo a obedecer a Equação 3.13.

Figura 3.5 – Modelo Simulink da Equação 3.13 (corrente de saída do módulo)



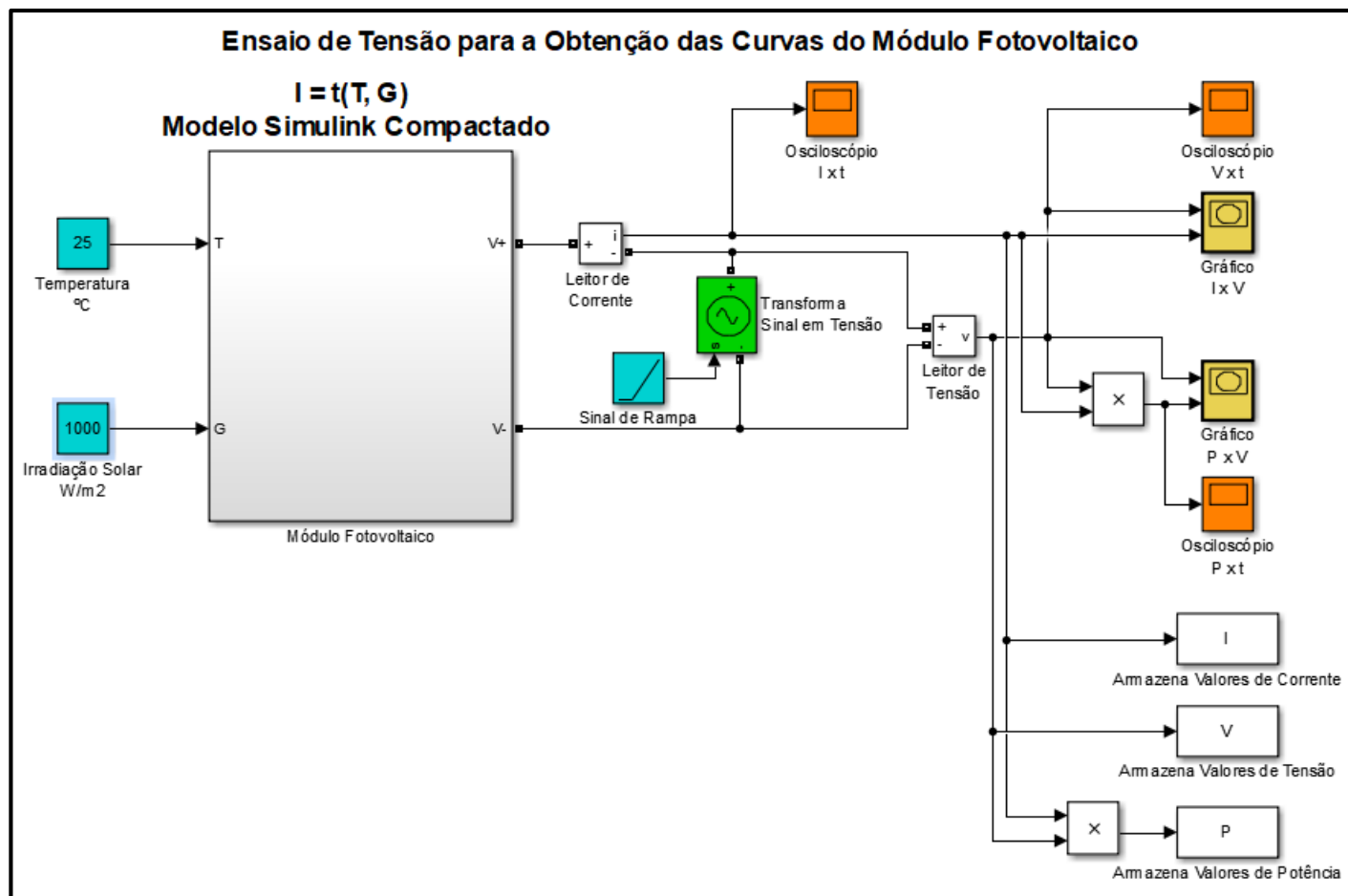
Fonte: próprio autor

Pela *Figura 3.6*, pode-se observar o ensaio de tensão realizado sob o módulo FV a fim de se obter as mais diversas curvas para caracterização do próprio módulo, bem como da célula e do sistema FV.

Observa-se também na *Figura 3.6* que a tensão aplicada na saída do módulo será em rampa, haja vista que a curva em rampa percorre de forma ascendente e gradativa todos os valores de domínio de tensão necessários para obtenção dos valores de imagens de corrente correspondentes de modo a obter-se as curvas $I \times V$ e $P \times V$ de forma completa.

Vale destacar, que o módulo proposto poderá ser reduzido também a uma célula, bastando para isso, no momento da parametrização das constantes, considerar $N_s = 1$, $N_p = 1$, $V_{ocCÉL.} = V_{ocMÓD.}/N_{sMÓD.}$, $I_{ccCÉL.} = I_{ccMÓD.}/N_{pMÓD.}$, $R_{sCÉL.} = R_{sMÓD.}/N_{sMÓD.}$, $R_{pCÉL.} = R_{pMÓD.}/N_{sMÓD.}$, $k_{OCÉL.}^v = k_{OCÉL.}^v/N_{sMÓD.}$ e $k_{CCÉL.}^i = k_{CCÉL.}^i/N_{pMÓD.}$. Dessa forma, além de poderem ser obtidas as curvas referentes ao módulo, pode-se obter as curvas das células individualizadas.

Figura 3.6 – Esquemático da Montagem para Obtenção das Curvas do Módulo FV



Fonte: próprio autor

3.2.2. Parametrização das Constantes do Módulo FV

Tendo em vista o fato de que a modelagem será feita de acordo com os módulos presentes no Laboratório de Energia Alternativa (LEA) do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal do Ceará (UFC), e que os 6 módulos ali presentes são módulos série de silício policristalino do modelo YL250P-29b, com 60 células e 250 Wp de potência de saída, todas as constantes serão parametrizadas de modo a atender o catálogo YGE 60 CÉLULAS SÉRIE 2.

Dessa forma, no próprio Simulink, foi parametrizado cada constante de acordo com os dados do catálogo em questão. A *Figura 3.7* ilustra o exposto.

Vale destacar, no entanto, algumas constantes como a carga elétrica do elétron (q), a constante de Boltzmann (K) e a energia de gap (E_{g_0}) que são constantes universais e podem ser obtidas em literaturas de Eletrônica, bem como de Física.

No caso das constantes como o coeficiente de temperatura de corrente de curto-circuito (k_{CC}^i), o coeficiente de temperatura de tensão de circuito aberto (k_{OC}^v), a temperatura ambiente ou de referência (T_r), a intensidade da radiação solar padrão ($G_{m\acute{a}x}$), a tensão de circuito aberto (v_{oc}), a corrente de curto-circuito (I_{cc}), quantidade de células em série (N_s) e a quantidade de células em paralelo (N_p), foram obtidas diretamente ou por inferência no próprio catálogo do módulo em questão.

No caso do fator de idealidade do diodo (η), observando-se o exposto na *Figura 2.14*, nota-se que o valor de $\eta = 1,3$ ajustará a curva IxV de modo intermediário entre os valores de idealidade extremos 1 e 2 ($1 \leq \eta \leq 2$). Outro fator importante para a escolha deste valor, refere-se ao fato de que a maioria dos trabalhos científicos, bem como das literaturas vigentes o utilizam para simulações de painéis, módulos e células de silício.

Figura 3.7 – Parametrização das constantes do modelo de módulo FV da *Figura 3.6* no Simulink para as condições STC e NOCT, respectivamente

Content of callback function: "InitFcn"	Content of callback function: "InitFcn"
<pre> q=1.6e-19, K=1.38e-23, Eg0=1.1, % _Condição STC_ % ki=0.0036, kv=-0.111, Tr=298, Gmax=1000, Voc=37.6, Icc=8,92, Ns=60, Np=1, n=1.3, </pre>	<pre> q=1.6e-19, K=1.38e-23, Eg0=1.1, % _Condição NOCT_ % ki=0.0036, kv=-0.111, Tr=293, Gmax=800, Voc=34.7, Icc=7,21, Ns=60, Np=1, n=1.3, </pre>

Fonte: próprio autor

Ainda em relação à *Figura 3.7*, observa-se, para a condição STC, que $T_r = 298 K$, que é equivalente a $T_r = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, bem como $G_{m\acute{a}x} = 1000 \text{ W/m}^2$, que são os parâmetros elétricos retirados da *Figura 3.8*, a qual informa os dados elétricos do módulo para esta condição térmica.

Da mesma forma, pode-se observar na *Figura 3.7*, para a condição NOCT, que $T_r = 293 K$, que é equivalente a $T_r = 20 ^\circ C$, bem como $G_{m\acute{a}x} = 800 W/m^2$, que são os parâmetros elétricos retirados da *Figuras 3.9 e 3.10*, a qual informa os dados elétricos do módulo para esta condição térmica.

No caso do módulo do LEA, o qual tem potência de 250 Wp, observa-se na *Figura 3.8*, nas condições STC, dados elétricos de $v_{oc} = 37,60$ e de $I_{cc} = 8,92 A$, os quais foram usados nas simulações das *Figuras 3.12, 3.13, 3.14, 3.16 e 3.17*, como bem exposto pela *Figura 3.7*.

Tendo em vista a necessidade dos coeficientes de temperatura para gerar as curvas do painel simulado em diversas temperaturas, e como no catálogo do fabricante os coeficientes estão nas condições NOCT, fez-se necessário o uso da *Figura 3.9* para a obtenção dos dados elétricos nessa condição, ou seja, $v_{oc} = 34,70$ e de $I_{cc} = 7,21 A$, os quais foram usados plotagem das curvas das *Figuras 3.18 e 3.19*, como bem exposto pela *Figura 3.7*.

Da *Figura 3.10*, extraiu-se os dados térmicos necessários para plotagem das mesmas *Figuras 3.18 e 3.19*, quais sejam, $k_{CC\%}^i = 0,05 \%/^\circ C$, $k_{oc\%}^v = -0,32 \%/^\circ C$, observando-se que, neste trabalho convencionou-se, $k_{CC\%}^i = \alpha_{Isc}$ e $k_{oc\%}^v = \beta_{Voc}$.

Contudo, observando-se as *Equações 3.1 e 3.8*, nota-se que ambas exigem os coeficientes em seus valores absolutos. Dessa forma, utilizando-se dos dados elétricos, obtidos nas condições NOCT, da *Figura 3.9* do módulo simulado ($v_{oc} = 34,70$, $I_{cc} = 7,21 A$), bem como das *Expressões 2.18 e 2.21*, pode-se obter $k_{CC}^i = 7,21 \cdot 0,05/100 \rightarrow \underline{k_{CC}^i = 0,0036 A/^\circ C}$ e $k_{oc}^v = 34,70 \cdot (-0,32)/100 \rightarrow \underline{k_{oc}^v = -0,111 V/^\circ C}$, como pode-se observar na *Figura 3.7*.

Figura 3.8 – Características elétricas dos módulos solares usados no presente trabalho nas condições STC

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS							
Parâmetros Elétricos para STC							
Tipo de módulo			YLxxxP-29b (xxx=P _{max})				
Potência de saída	P _{max}	W	260	255	250	245	240
Tolerância	ΔP _{max}	W	0 / + 5				
Eficiência do módulo	η _m	%	16,0	15,7	15,4	15,1	14,8
Tensão em P _{max}	V _{mpp}	V	30,3	30,0	29,8	29,6	29,3
Intensidade em P _{max}	I _{mpp}	A	8,59	8,49	8,39	8,28	8,18
Tensão em circuito aberto	V _{oc}	V	37,7	37,7	37,6	37,5	37,5
Corrente de curto-circuito	I _{sc}	A	9,09	9,01	8,92	8,83	8,75

STC: 1000 W/m² irradiância, temperatura do módulo de 25 ° C, AM1.5 distribuição espectral de acordo com a norma EN 60904-3. Redução média de 3,3% de eficiência relativa de 200 W/m² de acordo com EN 60904-1.

Fonte: [23]

Figura 3.9 – Características elétricas dos módulos solares usados no presente trabalho nas condições NOCT

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS							
Parâmetros Elétricos em Temperatura de Operação (NOCT)							
Potência de saída	P _{max}	W	189,7	186,0	182,4	178,7	175,1
Tensão em P _{max}	V _{mpp}	V	27,6	27,4	27,2	27,0	26,8
Corrente em P _{max}	I _{mpp}	A	6,87	6,79	6,71	6,62	6,54
Tensão em circuito aberto	V _{oc}	V	34,8	34,8	34,7	34,6	34,6
Corrente de curto-circuito	I _{sc}	A	7,35	7,28	7,21	7,14	7,07

NOCT: operação do módulo em condições de circuito aberto com irradiância de 800/m² e temperatura ambiente de 20 ° C e de velocidade de vento de 1m/s.

Fonte: [23]

Figura 3.10 – Características térmicas dos módulos solares usados no presente trabalho nas condições NOCT

CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS			
Temperatura nominal da célula	NOCT	°C	46 +/- 2
Coefficiente de temperatura para P _{max}	γ	%/°C	-0,42
Coefficiente de temperatura para V _{oc}	β _{Voc}	%/°C	-0,32
Coefficiente de temperatura para I _{sc}	α _{Isc}	%/°C	0,05
Coefficiente de temperatura para V _{mpp}	β _{Vmpp}	%/°C	-0,42

Fonte: [23]

Como foi observado, as constantes k_{CC}^i e k_{oc}^v foram obtidas em $A/^{\circ}C$ e $V/^{\circ}C$, respectivamente, sendo a simulação parametrizada de acordo com esses valores. Contudo, nota-se que os coeficientes nas *Equações 3.1* e *3.8* são dados em A/K e V/K .

A priori poderá parecer que os resultados obtidos serão errôneos, contudo, observando-se as *Equações 3.1* e *3.8*, nota-se que os coeficientes de temperatura sempre incidirão como produto de uma diferença de temperatura, ou seja, $k_{CC}^i \cdot (T - T_r)$ ou $k_{oc}^v \cdot (T - T_r)$. Como nas equações T e T_r são dados em Kelvin (K), sabendo-se também que a variação de temperatura na escala Kelvin é igual à variação de temperatura na escala Celsius ($\Delta K = \Delta^{\circ}C$) [24], pode-se fazer uma análise numérica com os coeficientes obtidos por intermédio da *Figura 3.10*, assim, tem-se que:

$$k_{CC}^i \cdot (T - T_r) \rightarrow \left| \frac{A}{^{\circ}C} \cdot \Delta K \right| = \left| \frac{A}{^{\circ}C} \cdot \Delta^{\circ}C \right| \quad (3.14)$$

$$\left| \frac{A}{\Delta^{\circ}C} \right| = \left| \frac{A}{\Delta K} \right| \leftrightarrow \boxed{\left| \frac{A}{^{\circ}C} \right| = \left| \frac{A}{K} \right|} \quad (3.15)$$

$$k_{oc}^v \cdot (T - T_r) \rightarrow \left| \frac{V}{^{\circ}C} \cdot \Delta K \right| = \left| \frac{V}{^{\circ}C} \cdot \Delta^{\circ}C \right| \quad (3.16)$$

$$\left| \frac{V}{\Delta^{\circ}C} \right| = \left| \frac{V}{\Delta K} \right| \leftrightarrow \boxed{\left| \frac{V}{^{\circ}C} \right| = \left| \frac{V}{K} \right|} \quad (3.17)$$

Dessa forma, os coeficientes obtidos da *Figura 3.10* podem ser substituídos sem conversão de escala nas *Equações 3.1* e *3.8* e consequentemente serem utilizados como parâmetros como bem explicitado na *Figura 3.7*.

No que concerne as constantes R_s e R_p , tendo em vista a não existência dessas resistências no catálogo, bem como também a alta complexidade de se obter esses valores de modo analítico, foi utilizado o software PV-Analysator para descoberta das resistências, como observado na *Figura 3.11*.

Figura 3.11 – Janela de obtenção de R_s e R_p do software PV-Analysator

Enter the I and V values of the module and click "calculate"

Select module from database

Module name: Yingli Green Energy Holding Co. Ltd. / YL 250 P-29b (poly)

U_{oc} : 37,60
 I_{sc} : 8,92
 U_{pmax} : 29,80
 I_{pmax} : 8,39

Calculate >>

Results:

R_s = 0,4 Ohm
 R_p = 216,7 Ohm
FF = 0,75 (75%)

Result into clipboard

Modules in serie: 1
Module parallel: 1

Close

Fonte: próprio autor

Como observado na *Figura 3.11*, buscou-se na biblioteca do software o módulo YL 250 P-29b policristalino, sendo possível obter $R_s = 0,4 \Omega$ e $R_p = 216,7 \Omega$.

Contudo, observou-se que nas simulações os dados elétricos diferiam de forma considerável dos dados do catálogo, de modo que a potência do módulo simulado ficou bem inferior à 250 Wp, assim, estipulou-se um valor de resistência série como sendo metade do valor encontrado no software, bem como fixou-se a resistência paralela em vinte e quatro unidades a mais, ou seja:

$$R_s = 0,2 \Omega \text{ e } R_p = 240 \Omega$$

A partir desses valores de resistência, foi possível obter de forma bastante precisa, todos os parâmetros elétricos explicitados na *Figura 3.8*.

Vale destacar que os motivos pelos quais levaram o autor deste trabalho a baixar o valor da resistência série, bem como de aumentar o valor da resistência paralela encontrados no software PV-Analysator a fim de aproximar a potência do módulo simulado com a potência do módulo YL250P-29b, observado no catálogo da *Figura 3.8*, estão explicitados de forma teórica no *tópico 2.3 do capítulo 2* deste trabalho.

Por fim, como o catálogo informa que os módulos são compostos por 60 células em série, apenas, tem-se que $N_s = 60$ e $N_p = 1$.

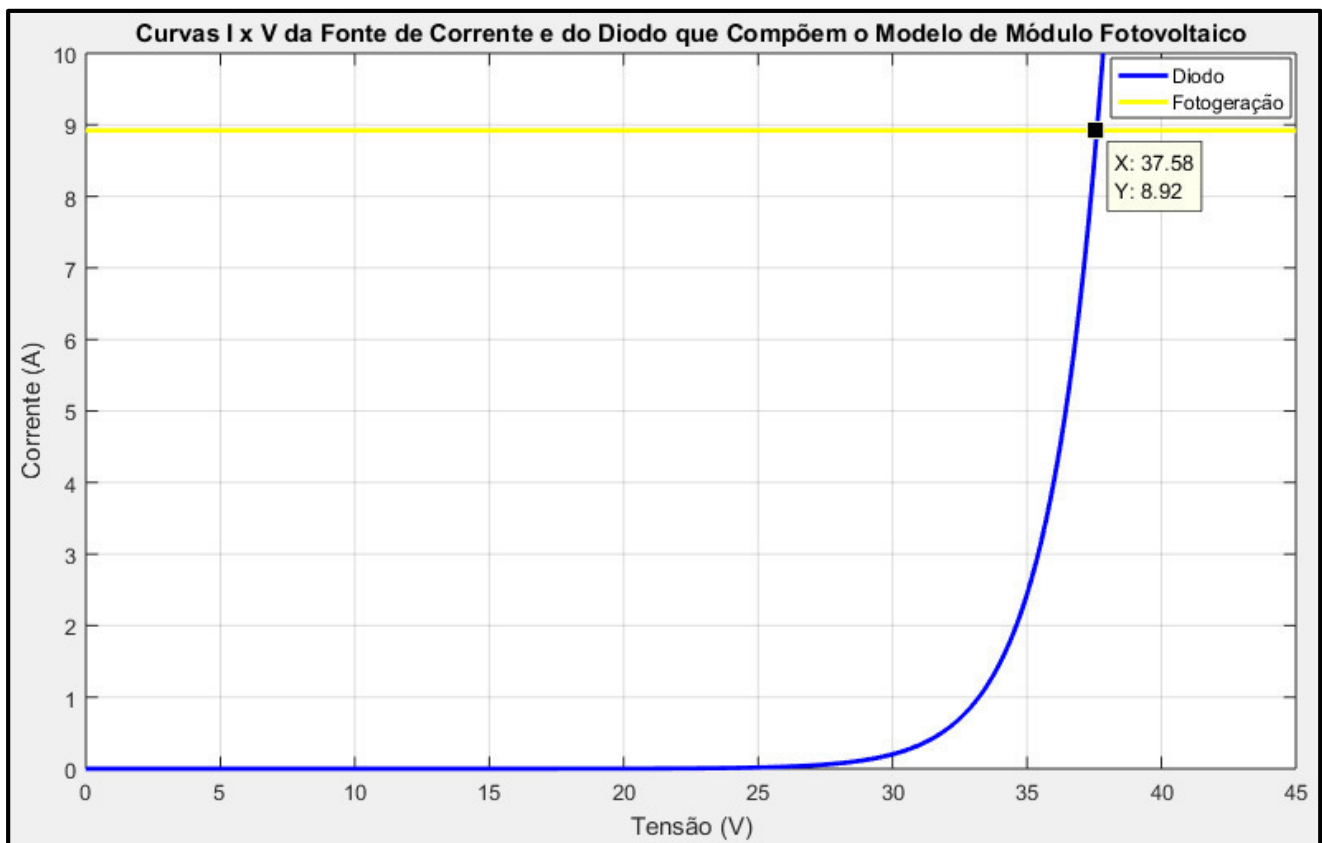
3.2.3. Curvas Características do Módulo FV Proposto

Parametrizado todo o módulo FV, foi feita a simulação do mesmo no Simulink e obtida as diversas curvas, sendo a primeira delas a observada na *Figura 3.12*, onde é possível observar a corrente fotogerada (*Equação 3.1*), bem como a corrente que circula sobre o diodo do módulo (*Equação 3.4*).

Na *Figura 3.12*, pode-se observar que a curva da corrente fotogerada ($I_{cc} = 8,92 A$) intercepta a curva de corrente do diodo no ponto de tensão de circuito aberto ($v_{oc} = 37,6 V$), o que significa dizer que nesse ponto, o diodo do modelo proposto está drenando toda a corrente gerada para si, fazendo com que a corrente de saída do módulo seja nula ($I = 0$), considerando-se que a corrente paralela seja próxima de zero ($I_{Rp} \approx 0$).

Observa-se ainda a consonância entre a *Figura 3.12* e a *Figura 2.4*, o que mostra que a simulação está de acordo com as previsões teóricas já pré-estabelecidas no *capítulo 2* deste trabalho.

Figura 3.12 – Curvas IxV da corrente fotogerada (*Equação 3.1*) e do diodo (*Equação 3.4*) que compõem o modelo de módulo FV nas condições STC



Fonte: próprio autor

Na *Figura 3.13* a seguir é possível observar a curva IxV da corrente de saída do módulo FV simulado, sendo possível notar que a curva atinge de forma bastante precisa as características elétricas no catálogo da *Figura 3.8*.

Dessa forma, observando-se a *Figura 3.13*, observa-se que $V_{mpp_{SIMUL}} = 30,4 V$ e $I_{mpp_{SIMUL}} = 8,23 A$.

Da *Figura 3.8* para o módulo de 250 Wp, tem-se que $V_{mpp_{REAL}} = 29,8 V$ e $I_{mpp_{REAL}} = 8,39 A$.

Sabendo-se que o erro percentual ($E_{\%}$) é dado pela divisão da subtração entre o valor exato (V_E) e o valor aproximado (V_A) pelo próprio valor exato, ou seja:

$$E_{\%} = \frac{|V_E - V_A|}{V_E} \cdot 100 \quad (3.18)$$

Dessa forma, tem-se que:

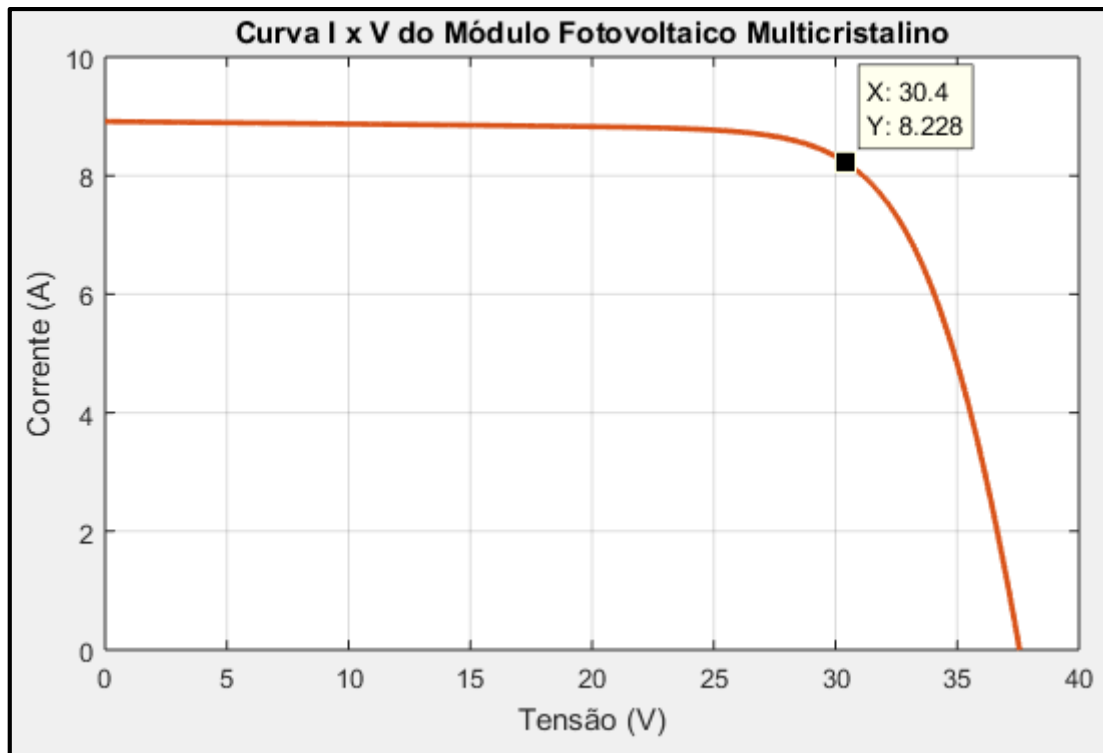
$$E_{\%V_{mpp}} = \frac{|29,8 - 30,4|}{29,8} \cdot 100 \rightarrow \boxed{E_{\%V_{mpp}} = 2,01 \%} \quad (3.19)$$

$$E_{\%I_{mpp}} = \frac{|8,39 - 8,23|}{8,39} \cdot 100 \rightarrow \boxed{E_{\%I_{mpp}} = 1,91 \%} \quad (3.20)$$

Dessa forma, no que tange os pontos de MPP, a curva do módulo simulado atende com bastante exatidão os valores observados no catálogo (*Figura 3.8*).

No que se refere ainda os pontos v_{oc} e I_{cc} , observa-se que o valor simulado será igual aos valores observados no catálogo ($v_{oc} = 37,6 V$ e $I_{cc} = 8,92 A$), tendo em vista que esses parâmetros são parametrizados como constantes, antes mesmo da simulação.

Figura 3.13 – Curva IxV da corrente de saída do módulo FV (Equação 3.13) nas condições STC



Fonte: próprio autor

Na *Figura 3.14*, observa-se a curva PxV da potência de saída do módulo FV simulado, sendo possível notar que a curva atinge de forma bastante precisa as características elétricas no catálogo da *Figura 3.8*.

Dessa forma, observando-se a *Figura 3.14*, nota-se que $P_{máx_{SIMUL}} = 250,1 \text{ W}$.

Da *Figura 3.8* para o módulo de 250 Wp, tem-se que $P_{máx_{REAL}} = 250,0 \text{ W}$.

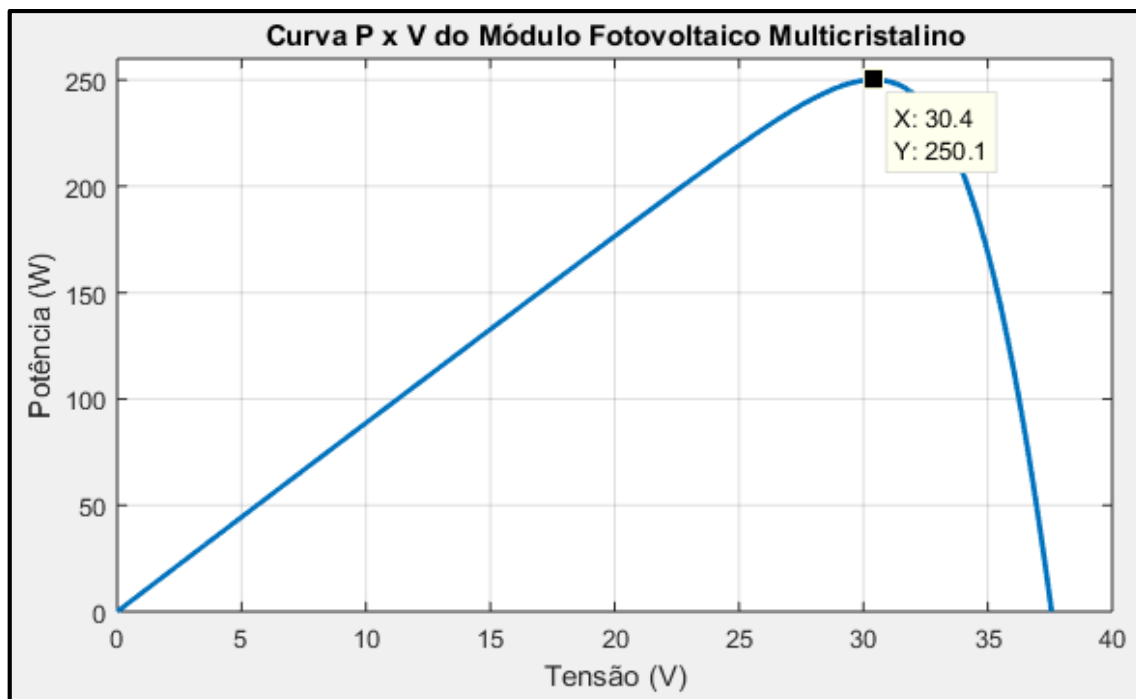
Dessa forma, tem-se que:

$$E_{\%P_{máx}} = \frac{|250,0 - 250,1|}{250,0} \cdot 100 \rightarrow \boxed{E_{\%P_{máx}} = 0,04 \%} \quad (3.21)$$

Observando-se a *Figura 3.8*, nota-se que a tolerância máxima de desvio de potência do módulo nas condições catalogadas é de 5 %. Pela *Expressão 3.21*, observa-se que o erro percentual da simulação em relação ao módulo real é bem inferior a esse valor, confirmando, dessa forma, a exatidão do modelo computacional proposto.

Observa-se ainda um valor de simulação $v_{oc} = 37,6 \text{ V}$, que é igual ao valor v_{oc} do catálogo, tendo em vista que esse parâmetro é parametrizado como constante, antes mesmo da simulação.

Figura 3.14 – Curva P x V da potência do módulo FV nas condições STC



Fonte: próprio autor

Figura 3.15 – Características gerais dos módulos FV do presente trabalho

CARACTERÍSTICAS GERAIS	
Dimensões (C / L / A)	1640mm / 990mm / 35mm
Peso	18.5kg

Fonte: [23]

Como bem constatado pela *Figura 3.14*, tem-se que $P_{m\acute{a}x_{SIMUL}} = 250,1 W$. Observando-se a *Figura 3.15*, pode-se notar que o comprimento (C) e a largura (L) do módulo solar são $C = 1,64 m$ e $L = 0,99 m$, sendo portanto sua área (A) igual a $A = 1,6236 m^2$.

Sabendo-se que as condições de simulação foram sob condições de irradiância máxima ($G_{m\acute{a}x}$) dadas por $G_{m\acute{a}x} = 1000 W/m^2$ (Condição STC), pode-se depreender que a potência de energia solar incidente no módulo (P_{SOLInc}) é dada por:

$$P_{SOLInc} = G_{m\acute{a}x} \cdot A \quad (3.22)$$

$$P_{SOLInc} = 1000 \cdot 1,6236 \rightarrow P_{SOLInc} = 1623,6 W \quad (3.23)$$

Considerando-se o rendimento (μ) como sendo a relação potência de pico do módulo ($P_{m\acute{a}x_{m\acute{o}d}}$) pela potência de energia incidente na superfície do mesmo módulo ($P_{SOL_{Inc}}$), tem-se que:

$$\mu = \frac{P_{m\acute{a}x_{m\acute{o}d}}}{P_{SOL_{Inc}}} \quad (3.24)$$

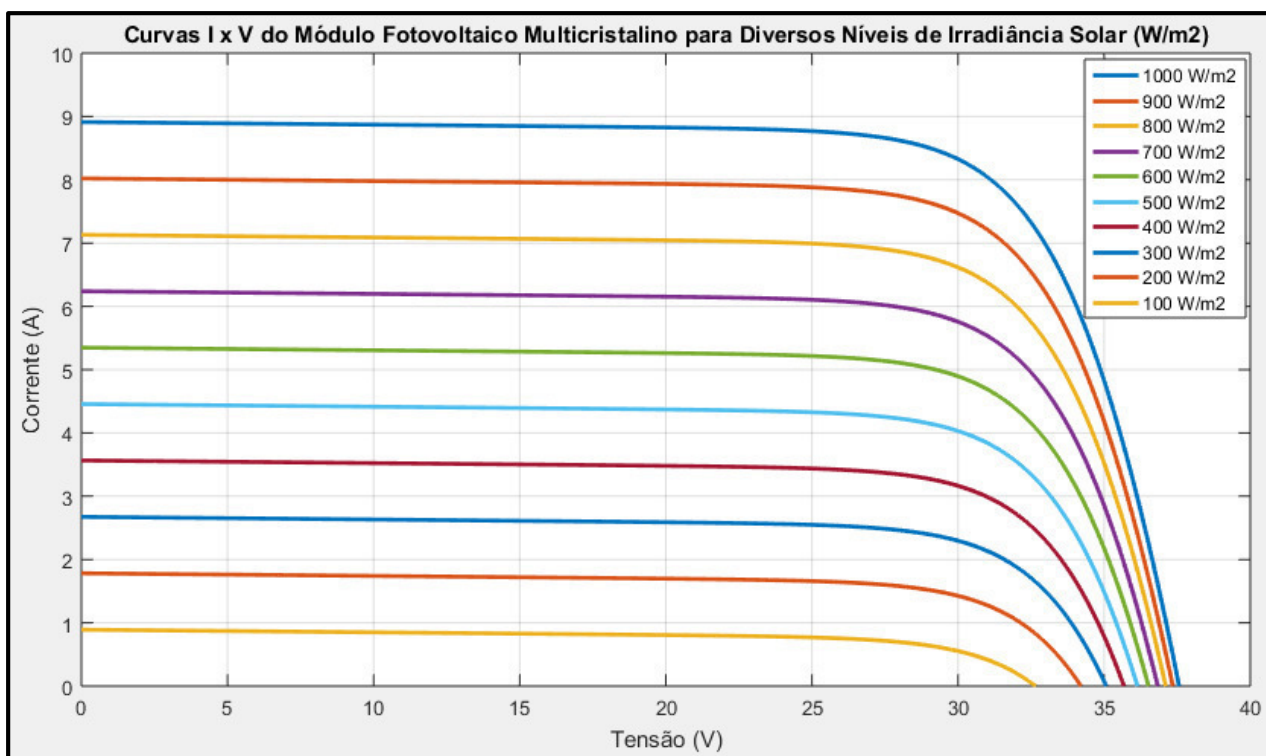
Sendo o rendimento do módulo simulado:

$$\mu = \frac{250,1}{1623,6} \cdot 100 \rightarrow \boxed{\mu = 15,40 \%} \quad (3.25)$$

De onde pode-se concluir da *Expressão 3.25* e da *Figura 3.8* que o valor de rendimento simulado deu igual ao valor do rendimento do catálogo, reforçando ainda mais a semelhança do modelo de módulo computacional proposto ao módulo real.

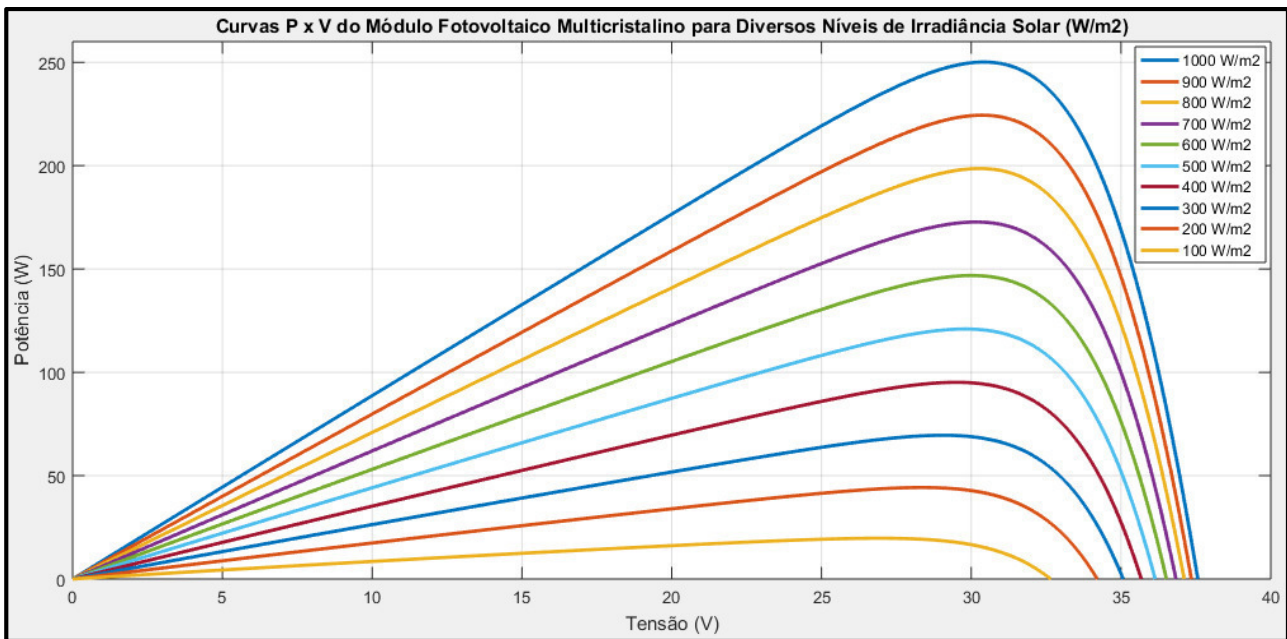
Seguindo a plotagem das curvas do módulo em questão, pode-se observar nas *Figuras 3.16* e *3.17*, as curvas IxV e PxV para diversos níveis de irradiância.

Figura 3.16 – Curvas IxV do módulo solar sob vários níveis de irradiância nas condições STC



Fonte: próprio autor

Figura 3.17 – Curvas P x V do módulo solar sob vários níveis de irradiância nas condições STC



Fonte: próprio autor

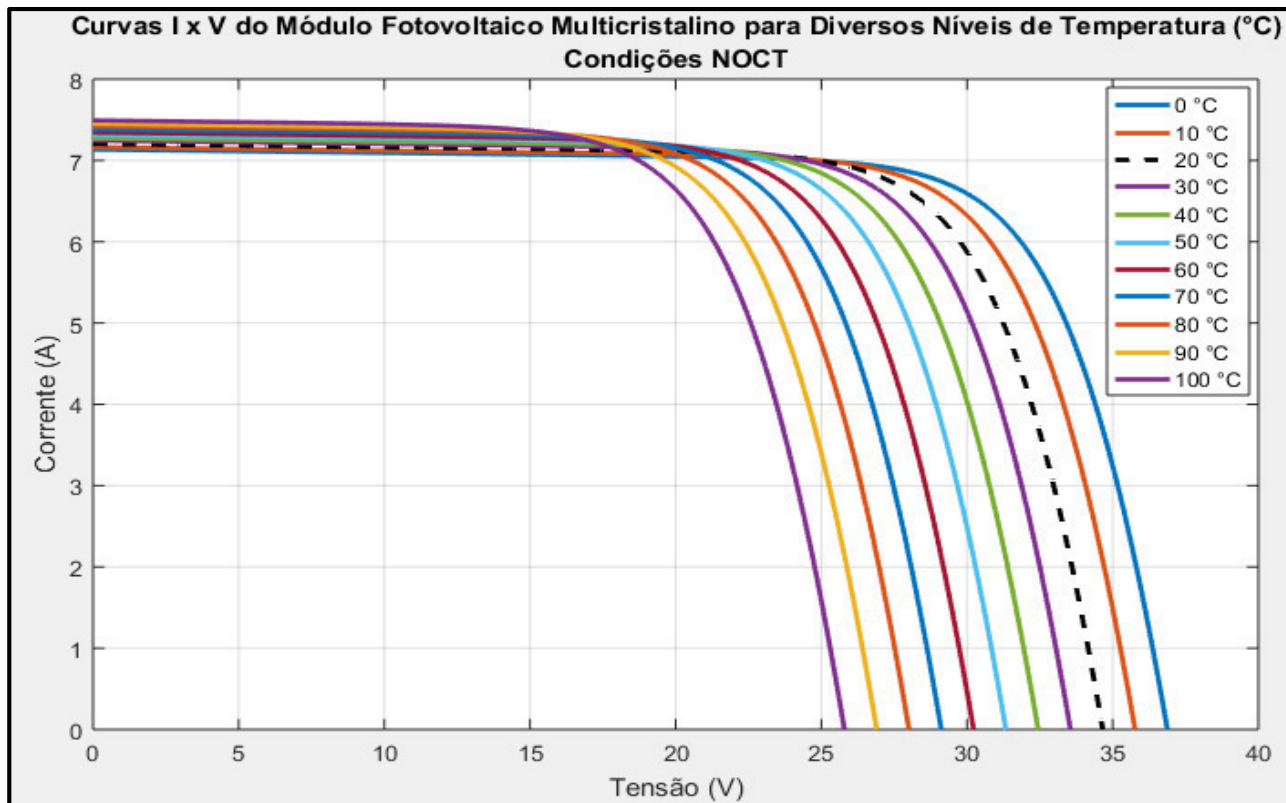
Comparando-se as *Figuras 3.16 e 3.17* com a *Figura 2.9*, pode-se observar a consonância do modelo computacional com a literatura teórica vigente, sendo possível notar a influência da intensidade luminosa em relação à corrente de saída e consequentemente em relação à potência do módulo FV, qual seja, a diminuição da corrente e da potência do módulo FV com a diminuição da irradiância.

É possível observar também que a tensão de circuito aberto de $v_{oc} = 37,6 V$ é preservada apenas sob as condições de $G = 1000 W/m^2$, diminuindo, portanto, com a diminuição da irradiância.

No concernente à tensão de máxima potência (V_{mpp}), observa-se que não há variação significativa da mesma durante a variação da irradiância.

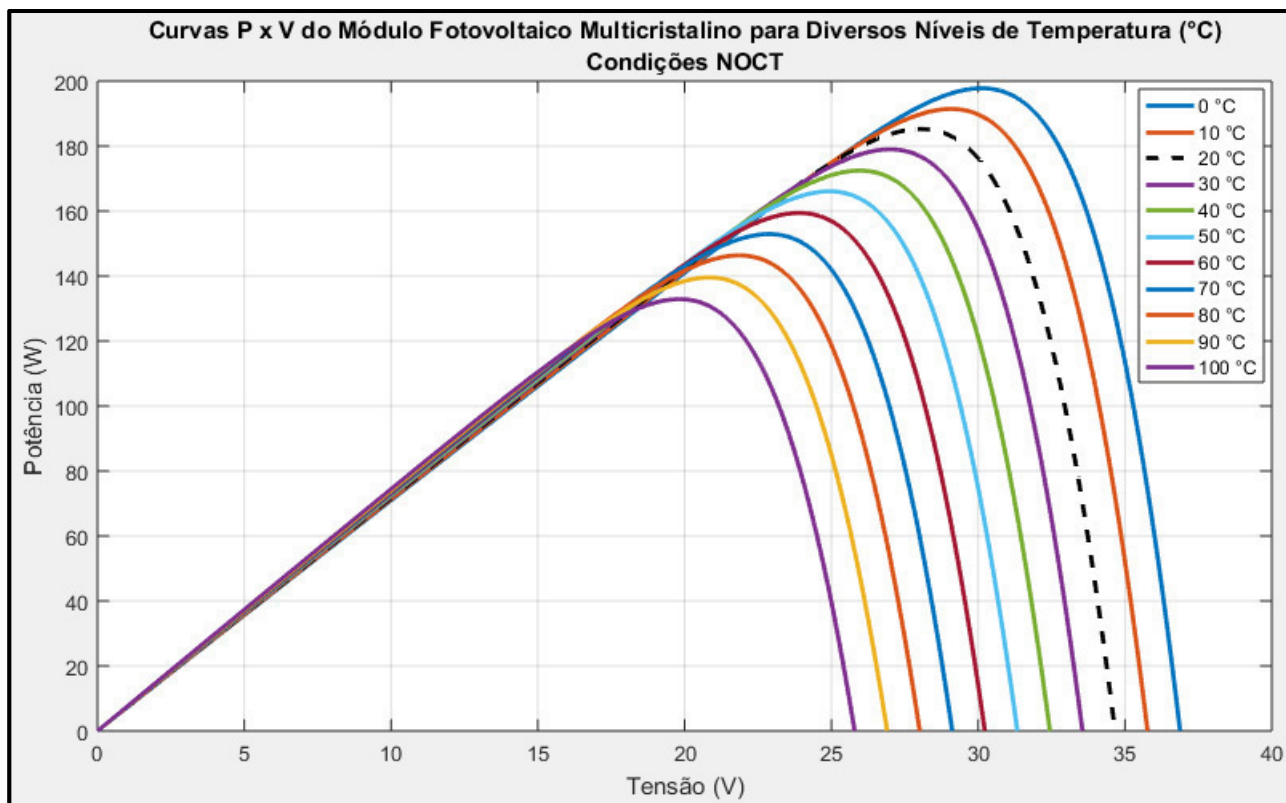
Prosseguindo na plotagem das curvas do módulo em questão, pode-se observar nas *Figuras 3.18 e 3.19*, as curvas I x V e P x V para diversos níveis de temperatura, em que foi utilizado $G = 800 W/m^2$, uma vez que as constantes de temperatura dadas na *Figura 3.10* foram obtidas pelo fabricante sob as condições NOCT.

Figura 3.18 – Curvas IxV do módulo solar sob vários níveis de temperatura nas condições NOCT



Fonte: próprio autor

Figura 3.19 – Curvas P x V do módulo solar sob vários níveis de temperatura nas condições NOCT



Fonte: próprio autor

Fazendo-se uma comparação entre as *Figuras 3.18 e 2.10*, observa-se a que a simulação seguiu os mesmos padrões da literatura vigente, quais sejam, diminuição da tensão de circuito aberto (v_{oc}) e conseqüentemente da tensão de máxima potência (V_{mpp}), bem como o aumento da corrente de curto-circuito com o aumento da temperatura.

Desse modo, pode-se observar a aplicação correta dos coeficientes de temperatura nos modelos propostos, tendo em vista que os coeficientes utilizados são dados por $k_{OC}^v = -0,111 V/^\circ C$ e $k_{CC}^i = 0,0036 A/^\circ C$, ou seja, a cada grau Celsius variado positivamente, a tensão de circuito aberto do módulo retrai em 0,111 V, bem como a corrente de curto-circuito aumenta em 0,0036 A, como bem observado nas curvas IxV da *Figura 3.18*.

Dessa forma, em um intervalo de 100 °C, tem-se uma retração de tensão de circuito aberto de 11,1 V, bem como um aumento de corrente de curto-circuito de 0,36 A. Pela *Figura 3.18*, observa-se justamente essas diferenças nas curvas IxV para 0 e 100 °C.

Observando-se a *Figura 3.19*, confirma-se de forma ainda mais categórica o exposto, uma vez que a potência do módulo tende a aumentar com a diminuição da temperatura, tendo em vista que com a variação negativa de temperatura, haverá aumento significativo da tensão de circuito aberto e conseqüentemente da tensão de potência máxima. Em contrapartida, com a variação negativa de temperatura, haveria também uma pequena retração na corrente de curto-circuito e conseqüentemente na corrente de potência máxima. Contudo, a potência tenderia a crescer, uma vez que o ganho de tensão com a variação negativa de temperatura seria 30,8 vezes maior ($0,111/0,0036$) do que a retração de corrente.

A lógica inversa pode ser também utilizada para o aumento de temperatura, em que a potência do módulo tende a diminuir, uma vez que, com a variação positiva de temperatura, haveria uma grande retração de tensão, bem como um ligeiro aumento de corrente, implicando de forma negativa no produto entre V_{mpp} e I_{mpp} .

3.2.4. Parametrização das Constantes da Célula do Módulo FV

Seguindo-se o mesmo raciocínio utilizado para a parametrização do módulo FV série de silício policristalino do modelo YL250P-29b, presente no LEA - UFC, parametrizou-se as constantes de uma célula solar presente no módulo.

Dessa forma, a *Figura 3.6*, concebida propriamente como módulo FV, pode ser reduzida ou acrescida à quantidade de células série ou paralela tanto quanto for necessário. Neste caso, como o objetivo é a obtenção das curvas características da célula individual, o módulo da *Figura 3.6* foi parametrizado de modo que atendessem as características de uma única célula.

Dessa maneira, no próprio Simulink, *Figura 3.20*, foi parametrizado cada constante de acordo com os dados do catálogo da *Figura 3.7*, sendo feito obviamente os ajustes necessários dos dados catalogados para a célula solar.

Dessa maneira, parametrizou-se as constantes universais, quais sejam, carga elétrica do elétron (q), constante de Boltzmann (K) e energia de gap (E_{g_0}), que por óbvio são iguais às do modelo do módulo anteriormente parametrizado.

No caso das constantes como o coeficiente de temperatura de corrente de curto-circuito (k_{CC}^i), o coeficiente de temperatura de tensão de circuito aberto (k_{OC}^v), a temperatura ambiente ou de referência (T_r), a intensidade da radiação solar padrão ($G_{máx}$), a tensão de circuito aberto (v_{oc}), a corrente de curto-circuito (I_{CC}), quantidade de células em série (N_s) e a quantidade de células em paralelo (N_p), foram obtidas diretamente ou por inferência no próprio catálogo, ajustando-se, no entanto, o coeficiente de temperatura de tensão de circuito aberto, bem como da própria tensão de circuito aberto, tornando-os 60 vezes menor do que no módulo, tendo em vista o módulo FV do LEA ser composto por 60 células em série.

No caso do fator de idealidade do diodo (η), procedeu-se da mesma maneira da escolha do valor para o módulo, em que foi observado na *Figura 3.14* que o valor de $\eta = 1,3$ ajustou-se à curva IxV de modo intermediário entre os valores de idealidade extremos 1 e 2 ($1 \leq \eta \leq 2$). Baseando-se também no critério do uso constante das literaturas vigentes desse valor no que concerne à célula de silício.

Figura 3.20 – Parametrização das constantes do modelo de célula solar da *Figura 3.7* no Simulink para as condições STC

```
Content of callback function: "InitFcn"

q=1.6e-19,
K=1.38e-23,
Eg0=1.1,

% _Condição STC_ %

ki=0.0036,
kv=-0.0019,
Tr=298,
Gmax=1000,
Voc=0.6267,
Icc=8,92,
Ns=1,
Np=1,

n=1.3,
```

Fonte: próprio autor

Ainda em relação à *Figura 3.20*, observa-se que $T_r = 298\text{ K}$, que é equivalente a $T_r = 25\text{ }^\circ\text{C}$, bem como $G_{m\acute{a}x} = 1000\text{ W/m}^2$, que são os parâmetros elétricos para STC, cujos quais foram utilizados para obtenção dos dados elétricos da célula da *Figura 3.8*.

No que concerne as constantes R_s e R_p , utilizou-se das resistências do módulo série para a descoberta das resistências da célula individual. Dessa maneira, como o módulo é composto por 60 células em série, tem-se que as resistências série e paralelo das células, serão 60 vezes menor, dessa forma, tem-se que:

$$R_s = 0,003\ \Omega \text{ e } R_p = 4\ \Omega$$

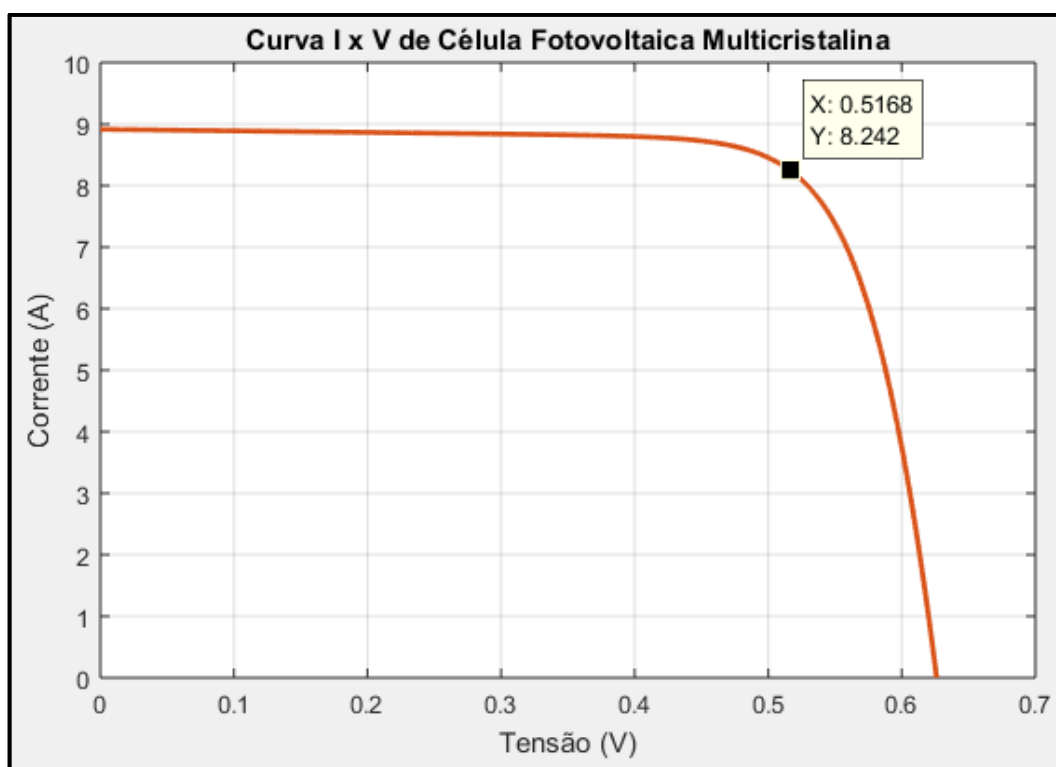
Por fim, como se trata da parametrização de uma única célula, tem-se que $N_s = 1$ e $N_p = 1$.

3.2.5. Curvas Características da Célula Solar do Módulo FV

Na *Figura 3.21* a seguir é possível observar a curva IxV da corrente de saída da célula FV simulada, sendo possível notar a coerência da curva, tendo em vista que a corrente de curto-circuito se mantém no valor igual ao do módulo $I_{cc} = 8,92 A$, sendo porém reduzida a tensão de circuito aberto, a qual fica em $v_{oc} \approx 0,63 V$.

Dessa forma, observando-se a *Figura 3.21*, nota-se que $V_{mpp_{SIMUL.}} = 0,5168 V$ e $I_{mpp_{SIMUL.}} = 8,24 A$.

Figura 3.21 – Curva IxV da corrente de saída da célula solar nas condições STC



Fonte: próprio autor

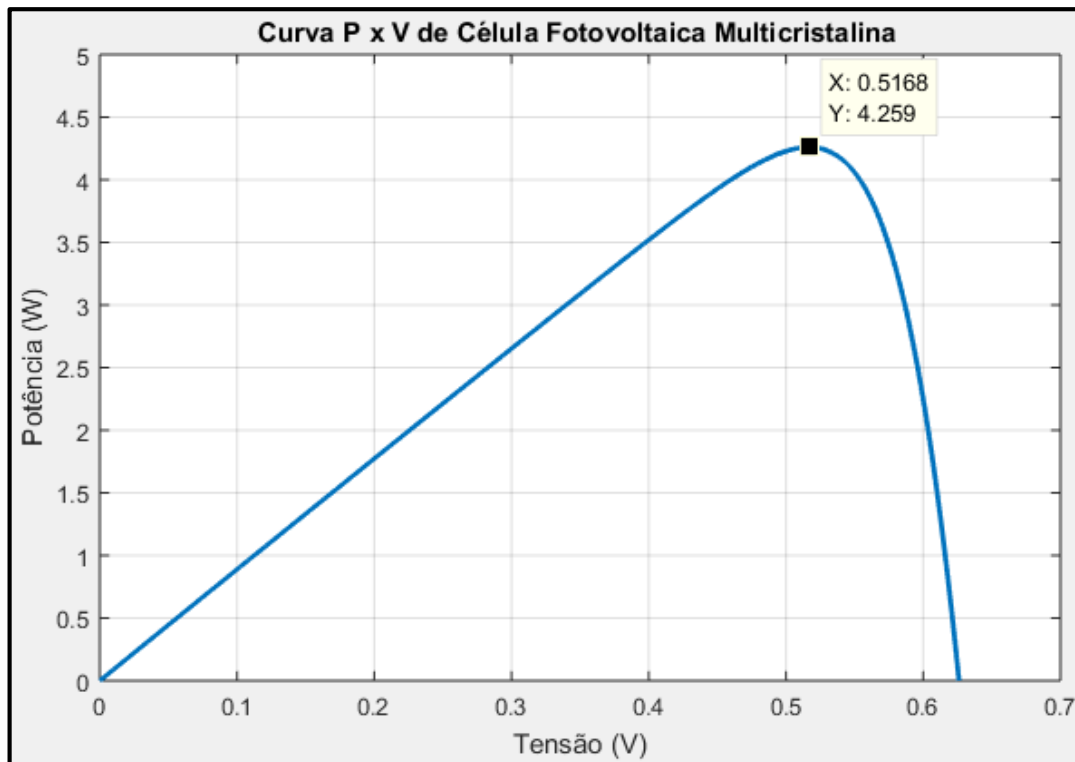
Na *Figura 3.22*, observa-se a curva PxV da potência de saída da célula FV simulada, sendo possível notar a compatibilidade desta curva com a curva apresentada na *Figura 3.21*, tendo em vista que a curva de potência confirma a tensão de circuito aberto $v_{oc} \approx 0,63 V$, bem como da tensão de máxima potência $V_{mpp_{SIMUL.}} = 0,5168 V$.

Além disso, fazendo-se uma comparação entre as curvas de potência do módulo (*Figura 3.14*) e da célula FV (*Figura 3.22*) observa-se uma redução de potência na célula da ordem de 58,72 vezes com relação ao módulo. O que traz bastante coerência com o

modelo, tendo em vista que o número de células foi reduzido em 60 vezes, o que tem como implicação direta a redução da potência em 60 vezes.

Dessa forma, observando-se a *Figura 3.22*, nota-se que $P_{m\acute{a}x_{SIMUL}} = 4,26 W$.

Figura 3.22 – Curva P x V da potência da célula solar nas condições STC



Fonte: próprio autor

Figura 3.23 – Características dos materiais dos módulos FV do presente trabalho

MATERIAIS	
Proteção frontal (material / espessura)	O vidro temperado contém baixo teor de ferro / 3.2 mm
Célula solar (número / tipo / tamanho / número de busbar)	60 / Silício Multicristalino / 156mm x 156mm / 2 ou 3
Quadro (material / cor / anodização / bordas de vedação)	Alumínio anodizado / prata / claro/ adesivo
Caixa de junção (grau de proteção)	≥ IP65
Cabo de ligação (comprimento / seção) (tipo / grau de proteção)	1000mm / 4mm ²
Conector (tipo/grau de proteção)	MC4 / IP67 ou YT08-1 / IP67 ou Amphenol H4 / IP68

Fonte: [23]

Como bem constatado pela *Figura 3.22*, tem-se que $P_{m\acute{a}x_{SIMUL}} = 4,26 W$. Observando-se a *Figura 3.23*, pode-se notar que o comprimento (C) e a largura (L) da célula solar são $C = 0,156 m$ e $L = 0,156 m$, sendo portanto sua área (A) igual a $A = 0,02434 m^2$.

Sabendo-se que as condições de simulação foram sob condições de irradiância máxima ($G_{m\acute{a}x}$) dadas por $G_{m\acute{a}x} = 1000 \text{ W/m}^2$ (Condição STC), e que a potência de energia solar incidente na célula ($P_{SOL_{Inc}}$) pode ser dada pela *Expressão 3.22*, tem-se que:

$$P_{SOL_{Inc}} = 1000 \cdot 0,02434 \rightarrow P_{SOL_{Inc}} = 24,34 \text{ W} \quad (3.26)$$

Sabendo-se que o rendimento (μ) da célula pode ser dado pela *Expressão 3.24*, tem-se que:

$$\mu = \frac{4,26}{24,34} \cdot 100 \rightarrow \boxed{\mu = 17,50 \%} \quad (3.27)$$

Do catálogo, onde pode-se observar o rendimento da célula de 17,7 %, bem como do resultado da *Expressão 3.27*, pode-se calcular o erro percentual do rendimento simulado. Dessa forma, da *Expressão 3.18*, tem-se que:

$$E_{\% \mu} = \frac{|17,7 - 17,5|}{17,7} \cdot 100 \rightarrow \boxed{E_{\% \mu} = 1,13 \%} \quad (3.28)$$

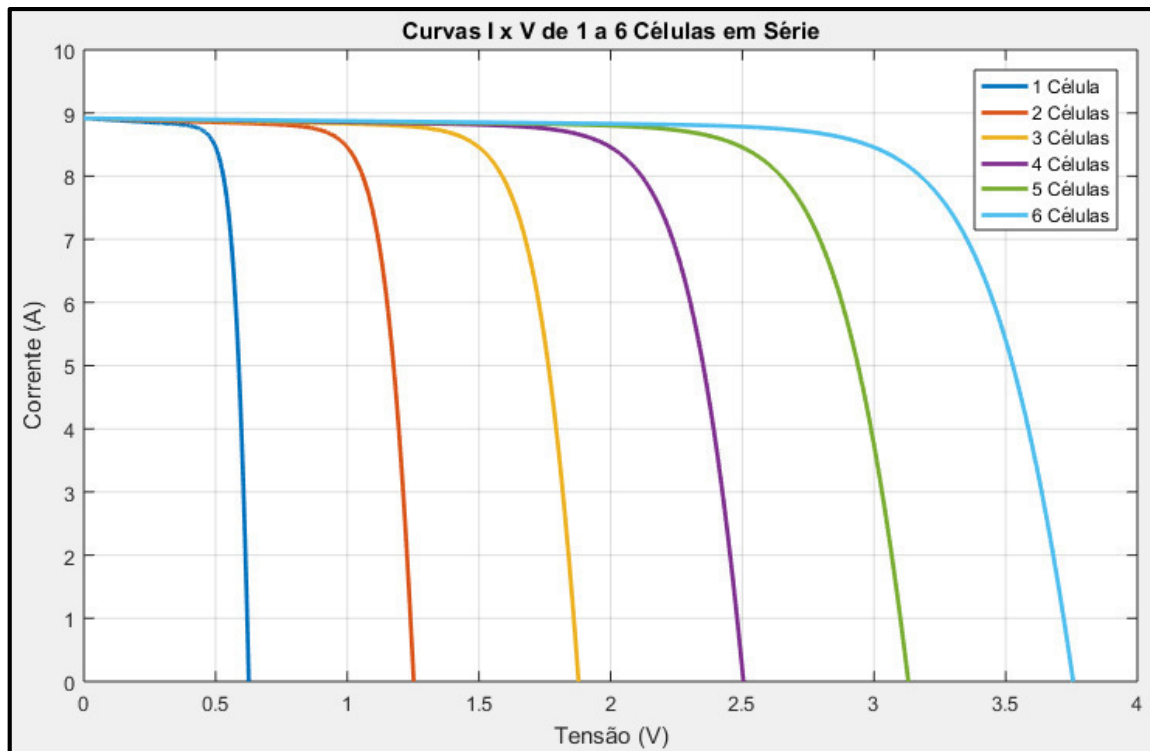
Dessa forma, no que tange à eficiência da célula, as curvas da célula simulada atendem com bastante exatidão o valor de 17,7 % observado catálogo.

Prosseguindo na plotagem das curvas da célula solar do módulo FV proposto, pode-se observar nas *Figuras 3.24 e 3.25*, as curvas IxV e PxV para diversas células em série.

Observando-se as *Figuras 3.24 e 3.25* da esquerda para a direita, tem-se respectivamente as curvas para:

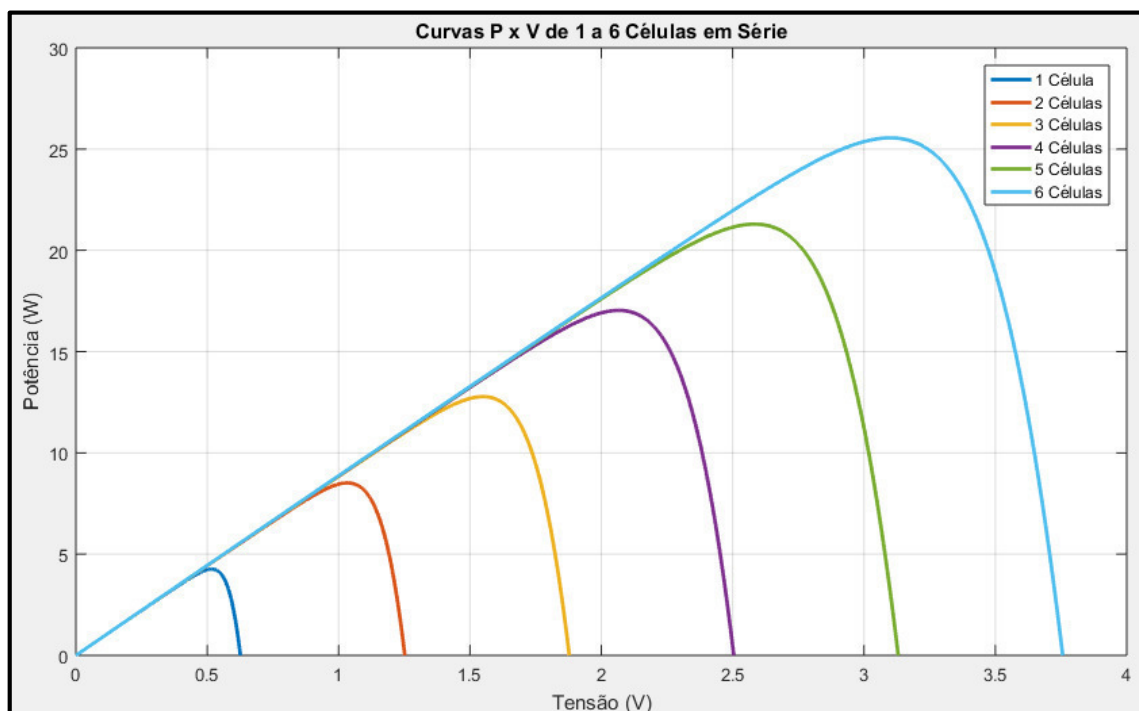
- ✓ Uma única célula;
- ✓ Duas células em série;
- ✓ Três células em série;
- ✓ Quatro células em série;
- ✓ Cinco células em série;
- ✓ Seis células em série.

Figura 3.24 – Curvas IxV de 1-6 células solares em série nas condições STC



Fonte: próprio autor

Figura 3.25 – Curvas P x V de 1-6 células solares em série nas condições STC



Fonte: próprio autor

Observando-se as curvas da *Figura 3.24*, nota-se a tensão de circuito aberto da curva (v_{oc}) é diretamente proporcional ao número de células em série, de modo que o

somatório das tensões de circuito aberto de todas as células que compõem o módulo FV série será muito próximo da tensão de circuito aberto do próprio módulo, podendo-se observar grande coerência com a literatura vigente, como ilustra a *Figura 3.9*.

Ainda em relação à *Figura 3.24*, observa-se que, à medida em que o número de células em série aumenta, cresce também o achatamento do joelho da curva IxV. Isso também é coerente com a literatura vigente, como bem observa a *Figura 2.12*, tendo em vista que o aumento da resistência série, causada pelo arranjo das células em série, implica diretamente no achatamento do joelho da curva em questão.

A *Figura 3.25* reitera o fato de que o acréscimo de células em série no sistema implica no aumento da potência entregue. No caso das células simuladas da figura em questão observa-se um acréscimo de $P_{mpp} = 4,26 W$ por célula acrescentada.

Dessa forma, tudo o que foi exposto até o presente momento do capítulo mostra a exatidão dos dados obtidos das curvas simuladas do módulo e da célula com os dados fornecidos pelo fabricante do módulo real presente no laboratório do LEA, bem como mostra também que as conclusões e implicações teóricas a respeito de todas essas curvas estão de acordo com a literatura teórica vigente.

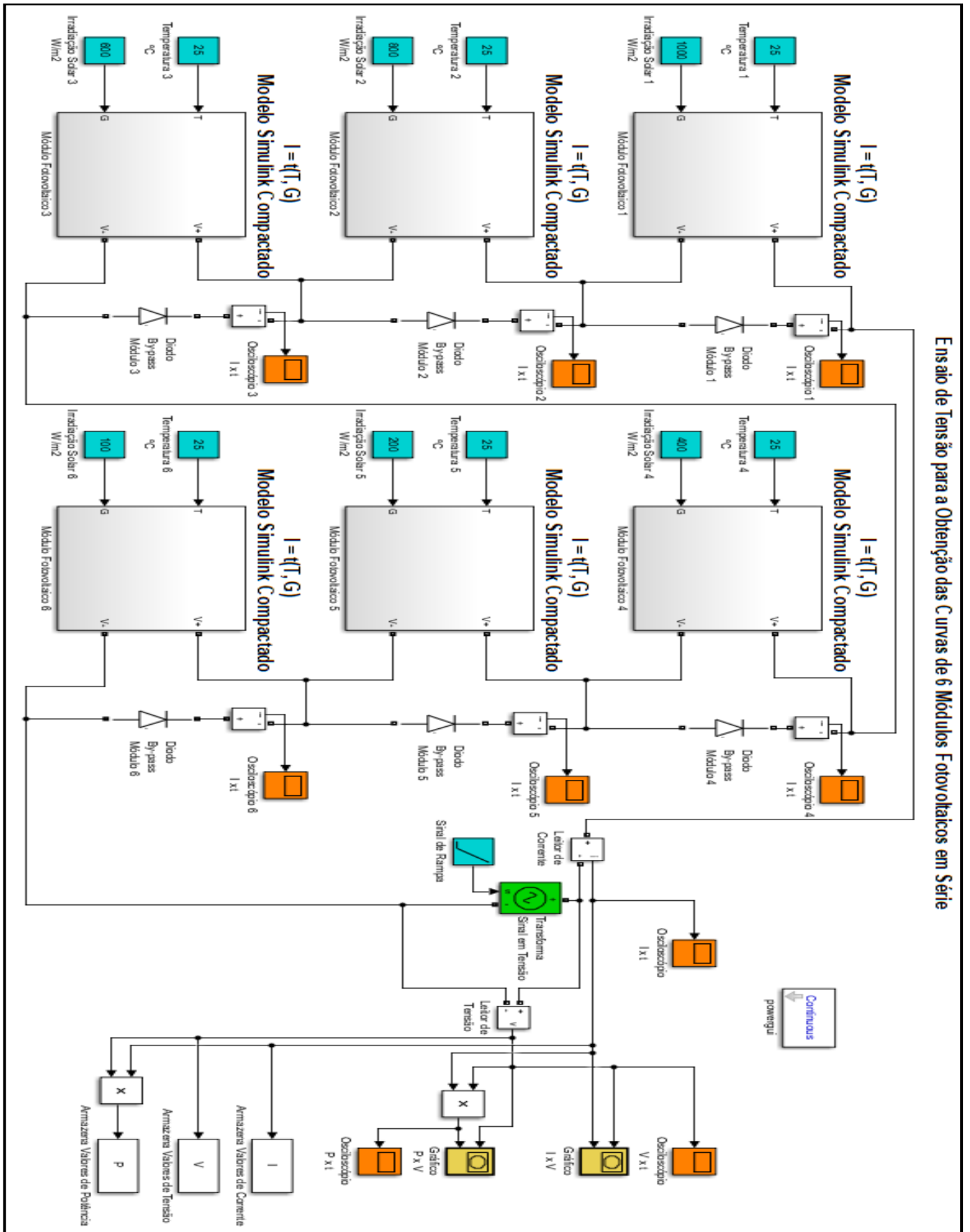
Dessa maneira, conclui-se que o modelo de módulo computacional proposto se encontra apto para realizar os testes de simulação com o efeito do sombreamento dos módulos presentes no laboratório LEA.

3.3. Sistema FV do LEA (6 Módulos em Série) – Análise de Sombreamento

Sabendo-se que a planta FV do LEA – UFC é composto de 6 módulos de silício policristalinos do modelo YL250P-29b ligados em série, tem-se na *Figura 3.26* o sistema FV computacional proposto.

Vale destacar que foi considerado no sistema a presença de 1 diodo by-pass para cada módulo, tendo em vista que, além de tornar as simulações e as análises das simulações mais simples, tem-se também que as conclusões teóricas são análogas para módulos com 2, 3, 4 ou mais diodos by-pass e com nível de sombreamento uniforme ao longo de um módulo.

Figura 3.26 – Planta FV do LEA ligada em série



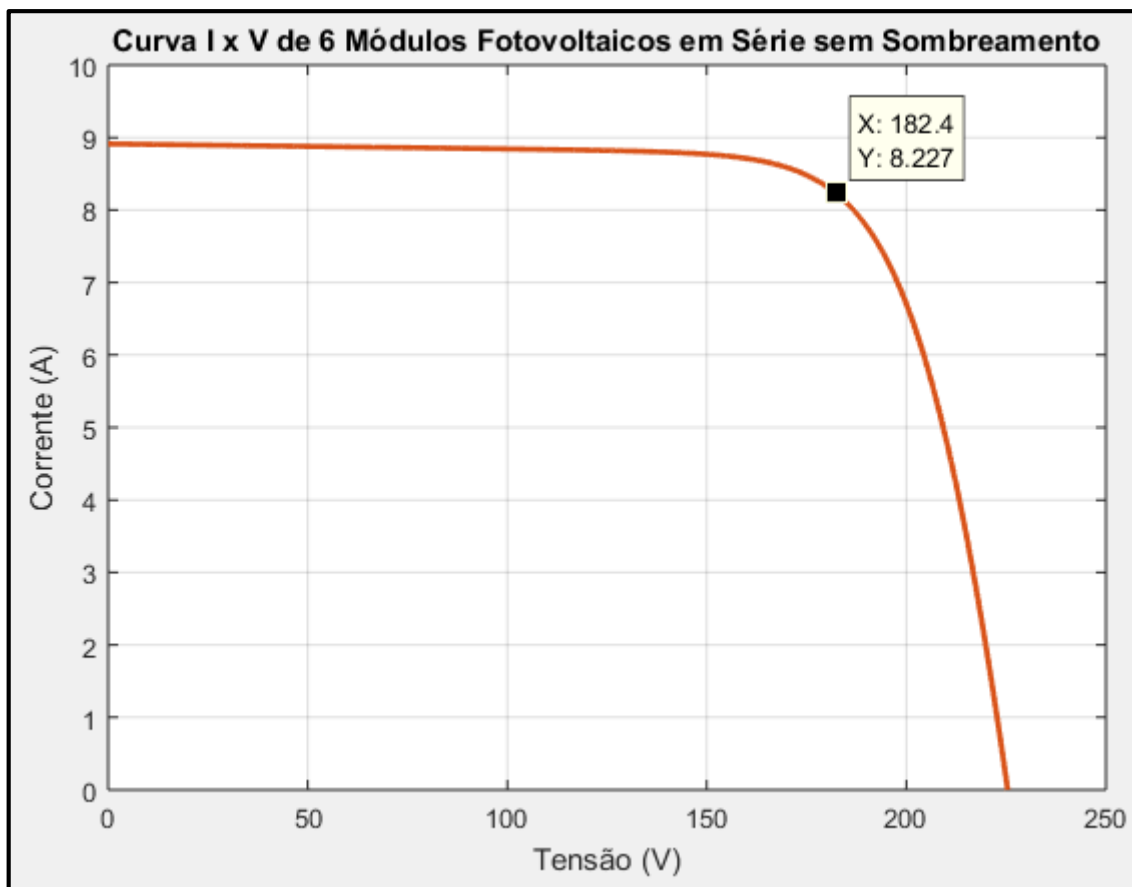
Fonte: próprio autor

3.3.1. Curvas Características do Sistema FV do LEA sem Sombreamento

Considerando-se uma irradiância plena, ou seja, $G_{m\acute{a}x} = 1000 \text{ W/m}^2$, bem como uma temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ em todos os 6 m\u00f3dulos do sistema FV, \u00e9 poss\u00edvel plotar as curvas observadas nas *Figuras 3.27 e 3.28*.

Observando-se a *Figura 3.27*, pode-se constatar o que j\u00e1 vem exposto na literatura te\u00f3rica. Ou seja, para uma associa\u00e7\u00e3o em s\u00e9rie de c\u00e9lulas ou de m\u00f3dulos, a corrente de curto circuito de sa\u00edda do sistema permanece a mesma, bem como a tens\u00e3o de circuito aberto do sistema ser\u00e1 igual \u00e0 tens\u00e3o de circuito aberto de cada elemento associado multiplicada pelo n\u00famero de elementos da associa\u00e7\u00e3o. A *Figura 3.27* confirma justamente isso, ou seja, $I_{cc} = 8,92 \text{ A}$ e $v_{oc} = 225,6 \text{ V}$ ($= 37,6 \cdot 6$)

Figura 3.27 – Curva IxV da corrente de sa\u00edda do sistema FV do LEA sem sombreamento nas condi\u00e7\u00f5es STC

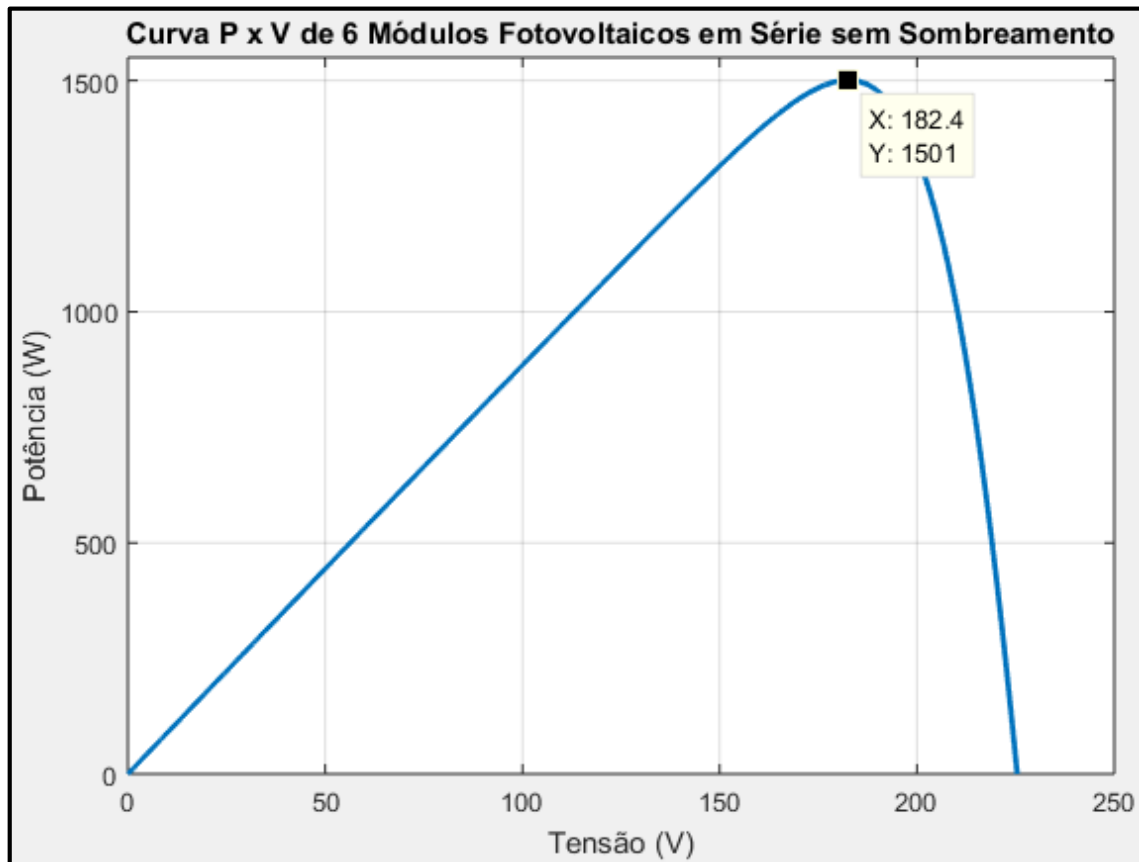


Fonte: pr\u00f3prio autor

No que se refere \u00e0 *Figura 3.28*, observa-se $v_{oc} = 225,6 \text{ V}$, estando em conson\u00e2ncia com a curva da *Figura 3.27*. No que concerne \u00e0 pot\u00eancia m\u00e1xima do sistema, nota-se que \u00e9 atingido $P_{mpp} = 1501 \text{ W}$ ($\approx 250,1 \cdot 6$), o que \u00e9 bastante coerente, uma vez

que a potência máxima de um módulo simulado deu 250,1 W_p, como observado na *Figura 3.14*.

Figura 3.28 – Curva PxV da potência de saída do sistema FV do LEA sem sombreamento nas condições STC



Fonte: próprio autor

3.3.2. Curvas Características da Planta FV do LEA com Sombreamento

Observando-se a *Figura 3.26*, a fim de obter a situação mais geral possível, nota-se que cada módulo FV recebe um nível de irradiância diferente a uma mesma temperatura, ou seja:

- ✓ Módulo 1: 1000 W/m², 25 °C;
- ✓ Módulo 2: 800 W/m², 25 °C;
- ✓ Módulo 3: 600 W/m², 25 °C;
- ✓ Módulo 4: 400 W/m², 25 °C;
- ✓ Módulo 5: 200 W/m², 25 °C;
- ✓ Módulo 6: 100 W/m², 25 °C.

Vale destacar que, nas condições STC, considera-se em sombreamento todos os módulos com níveis de irradiância abaixo de 1000 W/m^2 , tendo em vista que essa é condição padrão adotada na plotagem das curvas IxV e PxV na temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Analisando tecnicamente o exposto no parágrafo anterior, observando-se a *Equação 3.1*, nota-se que o valor da corrente FV gerada pelo módulo (I_f) depende diretamente da relação $G/G_{m\acute{a}x}$, sendo G a condição de irradiância incidente no momento do ensaio e $G_{m\acute{a}x}$ a condição de irradiância máxima ou padrão. Como nesse caso adotou-se $G_{m\acute{a}x} = 1000 \text{ W/m}^2$ (condição STC), então, se $G = G_{m\acute{a}x}$, logo, I_f será máximo, simulando a condição de geração plena. Ou, se $G < G_{m\acute{a}x}$, tem-se I_f menor, tanto quanto G o seja, o que simula a condição do nível de sombreamento parcial, fazendo com que a potência entregue seja reduzida. Por fim, se $G = 0$, tem-se $I_f = 0$, significando na simulação um sombreamento absoluto, fazendo com que a potência entregue seja zero.

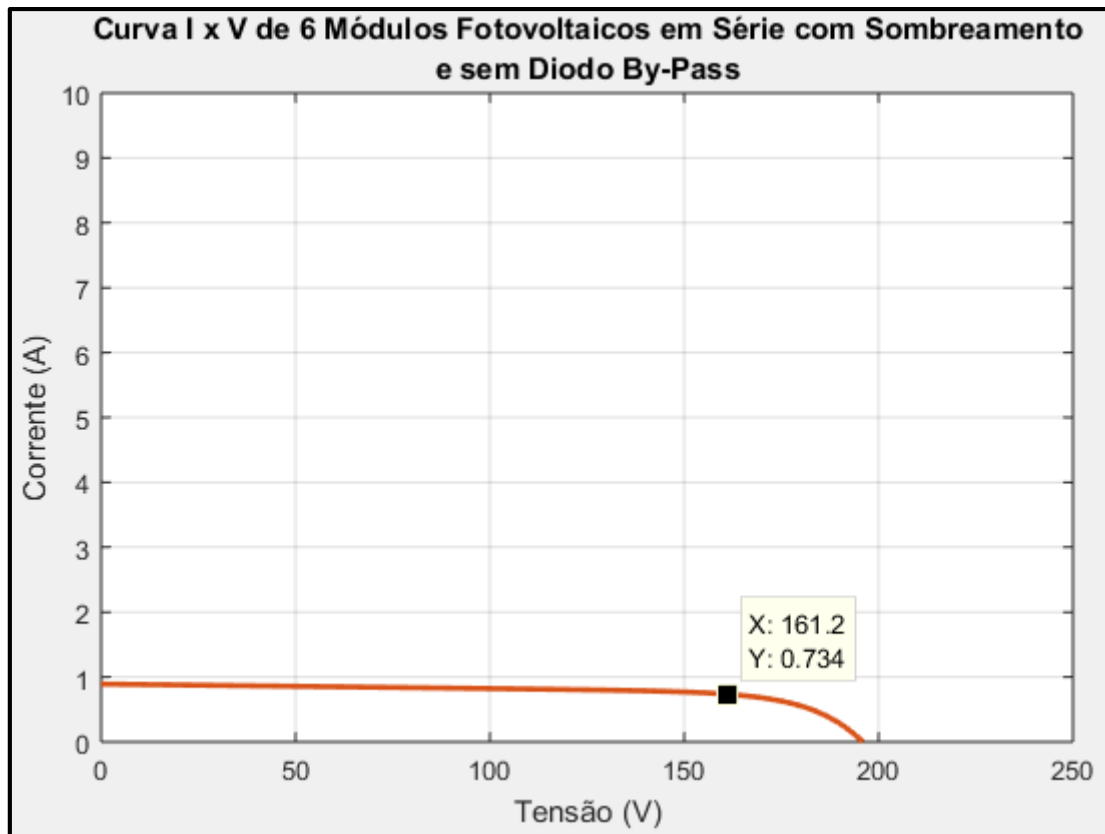
3.3.2.1. Sem Diodo By-Pass (Simulação de Falha)

Em caso de falha dos diodos by-pass da *Figura 3.26* e fazendo-se as simulações dentro das condições apresentadas na introdução do *tópico 3.3.2*, pode-se constatar o que já foi anteriormente constatado teoricamente no *tópico 2.4.2*, mais especificamente na *Figura 2.15*, onde pode-se observar que em uma associação em série de células ou módulos FV, a corrente de saída do sistema será limitada à corrente da célula ou do módulo mais afetado ou com sombreamento máximo.

Dessa forma, a *Figura 3.29* ilustra exatamente o exposto, tendo em vista que sua corrente de curto-circuito caiu em 10 vezes, mostrando que a corrente do sistema ficou limitada à corrente do módulo 6, o qual recebe uma irradiância 10 vezes menor do que o módulo 1.

Observando-se ainda a *Figura 3.29*, observa-se que a tensão de circuito aberto (v_{oc}) é inferior quando comparado a *Figura 3.27*, o que mostra a coerência da simulação do sistema, se comparado com as curvas observadas na *Figura 3.16*, a qual informa, entre outros, que v_{oc} decresce com a diminuição da irradiância (G).

Figura 3.29 – Curva IxV da corrente de saída do sistema FV do LEA com irradiância de 100 W/m²



Fonte: próprio autor

A consequência dessa queda brusca da corrente de curto-circuito no sistema FV, está exposta na *Figura 3.30*, ou seja, uma elevada queda da potência de pico do mesmo sistema.

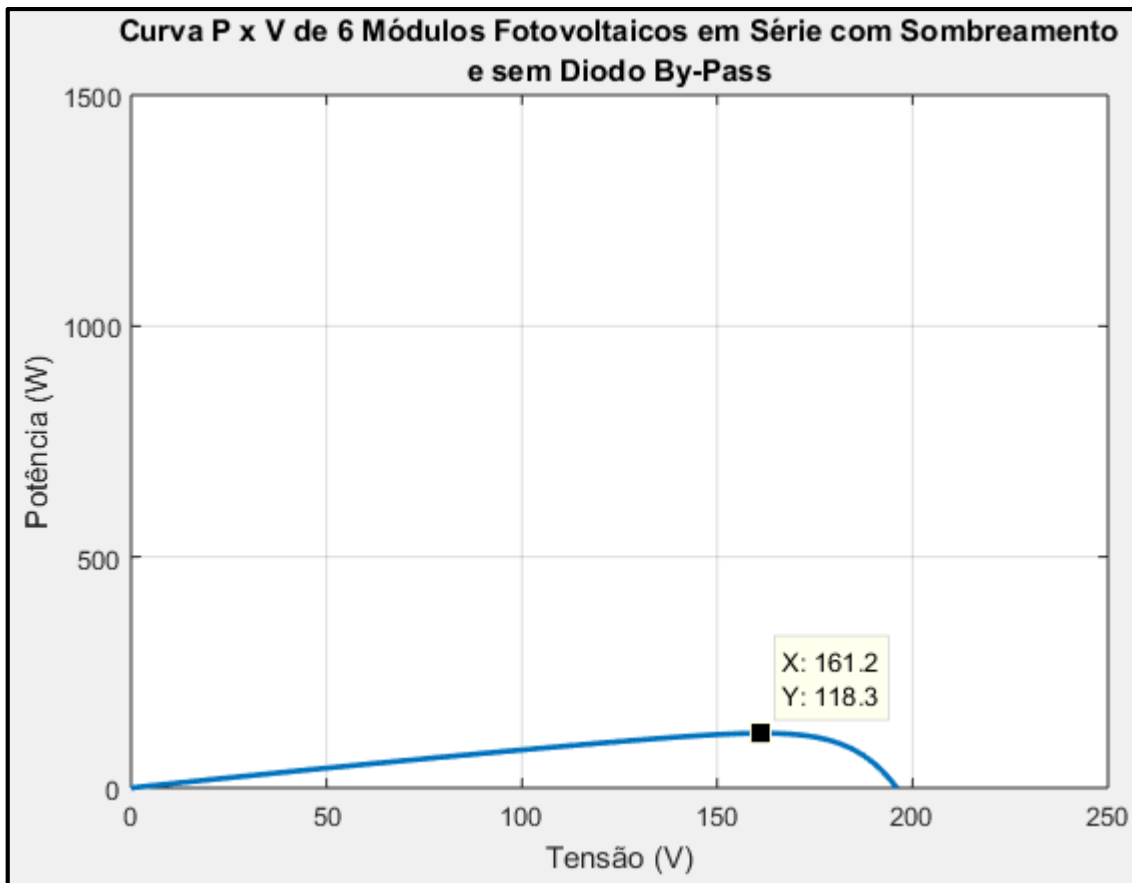
É possível que se faça em termos quantitativos a significação das perdas. Dessa maneira, adotando-se $R_{p\%}$ como a redução de potência percentual, P_s como potência entregue pelo sistema com sombreamento, P_p como a potência entregue pelo sistema de forma plena, tem-se:

$$R_{p\%} = \frac{|P_s - P_p|}{P_p} \cdot 100 \quad (3.29)$$

Fazendo-se a comparação do sistema FV a irradiância plena de energia (*Figura 3.28*) com o sistema com irradiância variável entre os módulos, porém sem diodo by-pass (*Figura 3.30*), tem-se da *Expressão 3.29*:

$$R_{p\%} = \frac{|118,3 - 1500|}{1500} \cdot 100 \rightarrow \boxed{R_{p\%} = 92,11 \%} \quad (3.30)$$

Figura 3.30 – Curva P x V da potência de saída do sistema FV do LEA com irradiância de 100 W/m²



Fonte: próprio autor

Da *Expressão 3.30*, observa-se uma redução altíssima de potência do sistema FV, 92,11 %, para as condições simuladas, mostrando que um sistema de módulos FV configurados em série e sem diodo by-pass fica extremamente limitado as condições de irradiância mínimas nos módulos, não aproveitando, portanto, aqueles módulos contemplados com maior nível de insolação.

3.3.2.2. Com Diodo By-Pass (Simulação de Funcionamento)

Em caso de funcionamento dos diodos de cada módulo, como explicitado na *Figura 3.26* e fazendo-se as simulações dentro das condições apresentadas na introdução do *tópico 3.3.2*, pode-se constatar de forma muito mais abrangente o que já foi anteriormente observado teoricamente no *tópico 2.4.3*, onde pode-se notar que em uma associação em série de células ou módulos FV com diodo by-pass, a corrente de saída do sistema não ficará limitada a corrente da célula ou do módulo mais afetado ou com sombreamento máximo.

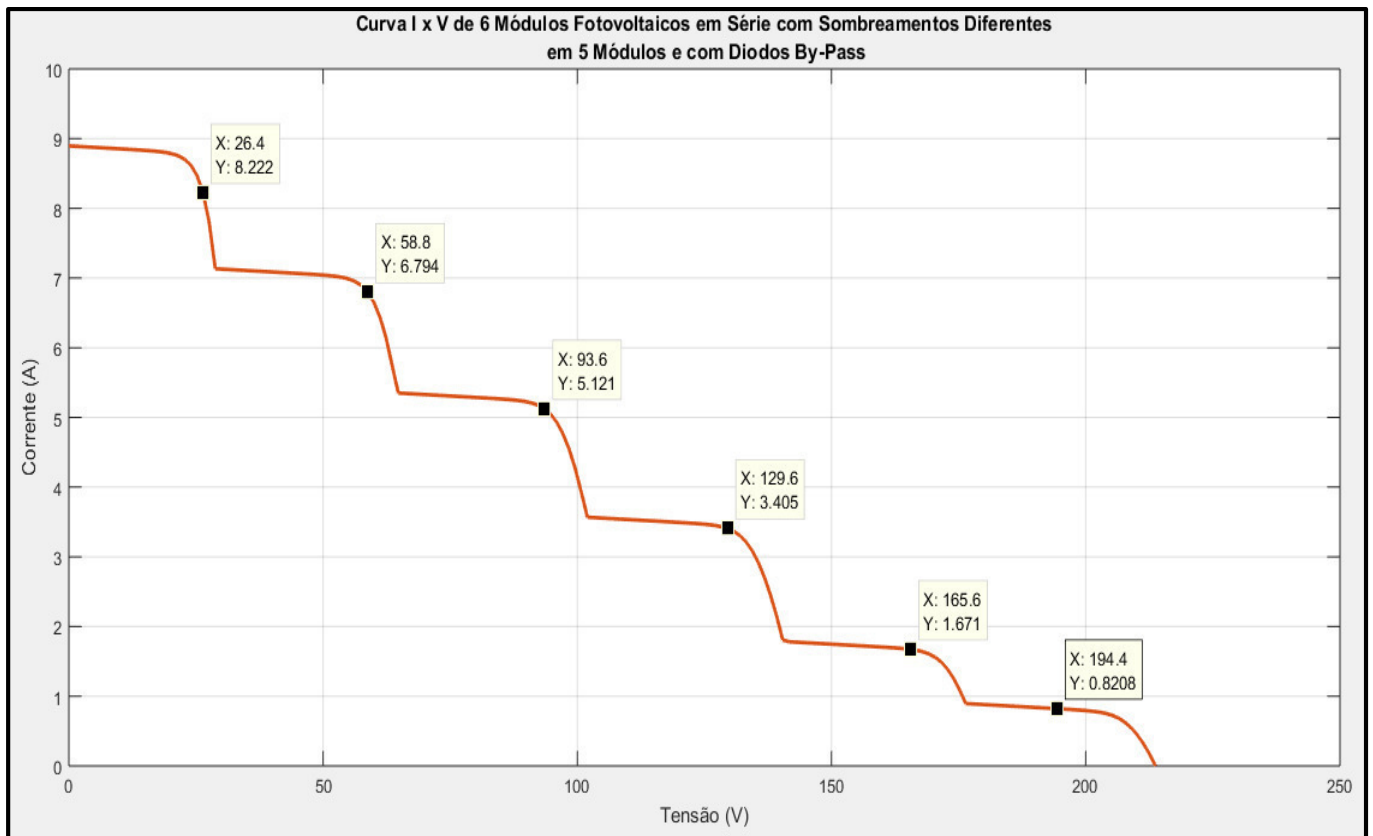
Dessa forma, observando-se a *Figura 3.31*, nota-se que para cada intervalo de tensão, haverá um intervalo diferente de corrente de curto-circuito decrescendo em forma de degrau de escada. Fazendo-se a comparação da *Figura 3.31* com a *Figura 3.16*, pode-se observar que cada degrau corresponde ao nível de corrente de curto-circuito correspondente a cada nível de irradiância em um dos 6 módulos.

Assim, tem-se que:

- ✓ Módulo 1 ($G = 1000 \text{ W/m}^2$) $\xrightarrow{\text{Corresponde}}$ Degrau 1 ($I_{CC} = 8,92 \text{ A}$);
- ✓ Módulo 2 ($G = 800 \text{ W/m}^2$) $\xrightarrow{\text{Corresponde}}$ Degrau 2 ($I_{CC} = 7,13 \text{ A}$);
- ✓ Módulo 3 ($G = 600 \text{ W/m}^2$) $\xrightarrow{\text{Corresponde}}$ Degrau 3 ($I_{CC} = 5,35 \text{ A}$);
- ✓ Módulo 4 ($G = 400 \text{ W/m}^2$) $\xrightarrow{\text{Corresponde}}$ Degrau 4 ($I_{CC} = 3,57 \text{ A}$);
- ✓ Módulo 5 ($G = 200 \text{ W/m}^2$) $\xrightarrow{\text{Corresponde}}$ Degrau 5 ($I_{CC} = 1,79 \text{ A}$);
- ✓ Módulo 6 ($G = 100 \text{ W/m}^2$) $\xrightarrow{\text{Corresponde}}$ Degrau 6 ($I_{CC} = 0,89 \text{ A}$).

Entenda-se degrau 1 como sendo o mais a esquerda do gráfico, bem como degrau 6 como sendo o mais a direita do gráfico, podendo, portanto, a corrente do sistema FV sombreado e com diodo by-pass ser utilizada com diversos valores de I_{CC} em contrapartida ao sistema sombreado e sem diodo by-pass, o qual fica limitado ao valor da corrente do módulo de menor irradiância.

Figura 3.31 – Curva IxV da corrente de saída do sistema FV do LEA com diodo by-pass nas condições STC



Fonte: próprio autor

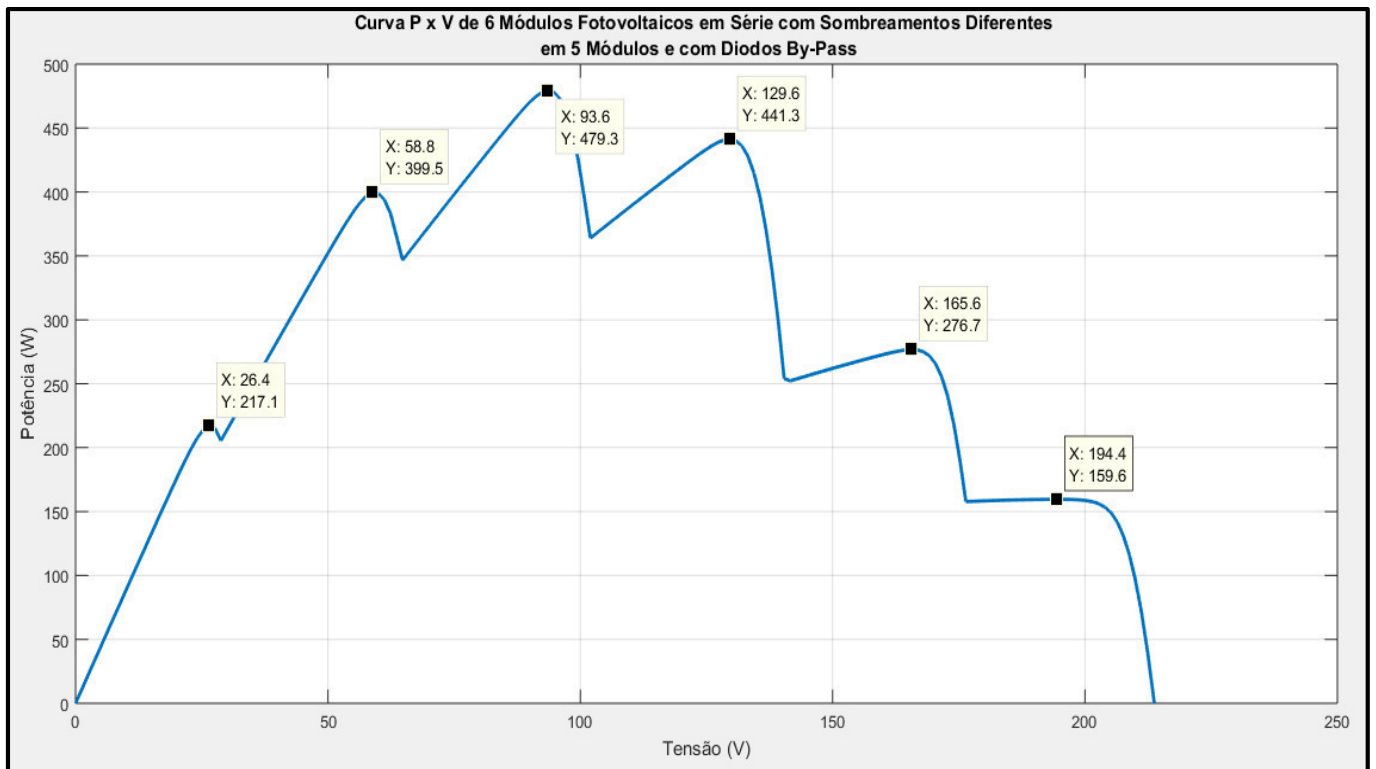
Como existem vários degraus na curva de corrente, espera-se, como observado no tópico 2.4.3, que haja vários picos de potência, que é justamente bem notado na Figura 3.32.

Observando-se a Figura 3.32, nota-se que, caso a planta FV seja dotada de um bom sistema de rastreamento de máxima potência (MPPT), tem-se uma potência máxima de 479,3 W.

Dessa maneira, fazendo-se a comparação da planta FV a irradiância plena (Figura 3.28) com a planta com irradiância variável entre os módulos e com diodo by-pass (Figura 3.32), tem-se da Expressão 3.29:

$$R_{P\%} = \frac{|479,3 - 1500|}{1500} \cdot 100 \rightarrow \boxed{R_{P\%} = 68,05 \%} \quad (3.31)$$

Figura 3.32 – Curva PxV da potência de saída do sistema FV do LEA com diodo by-pass nas condições STC



Fonte: próprio autor

Da *Expressão 3.31*, observa-se uma redução alta de potência do sistema FV, 68,05 %, para as condições simuladas, porém a redução se mostra bem menor do que aquela sem diodo by-pass.

Para a quantificação do ganho de potência entre as configurações com e sem diodo by-pass, adotou-se $G_{P\%}$ como o ganho de potência percentual, $P_{S_{sd}}$ como potência entregue pelo sistema com sombreamento sem diodo by-pass, $P_{S_{cd}}$ como potência entregue pelo sistema com sombreamento com diodo by-pass e P_P como a potência entregue pelo sistema de forma plena, tem-se:

$$G_{P\%} = \frac{|P_{S_{cd}} - P_{S_{sd}}|}{P_P} \cdot 100 \quad (3.32)$$

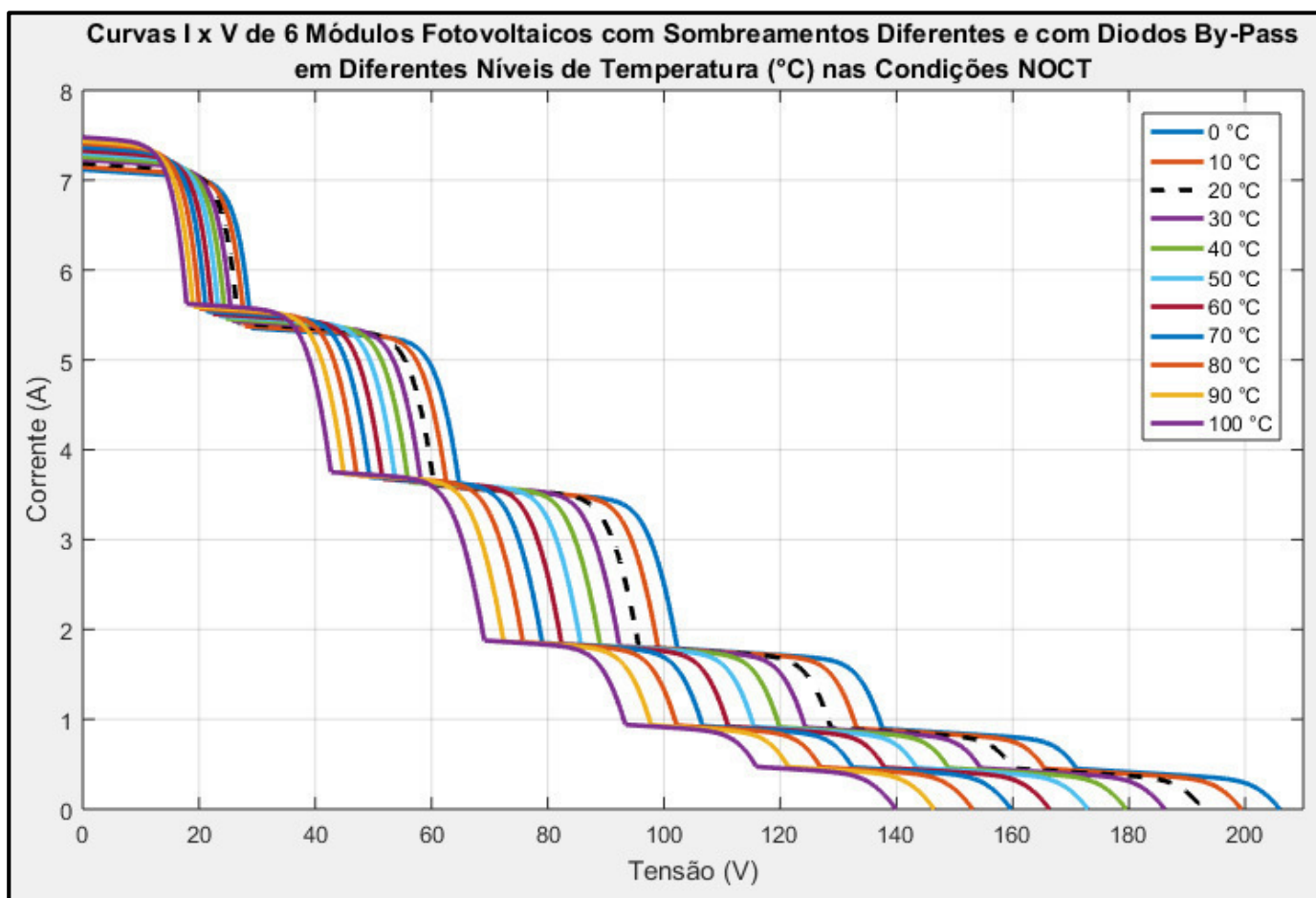
Fazendo-se a comparação da planta FV a com irradiância variável entre os módulos e sem diodo by-pass (*Figura 3.30*) com o sistema com irradiância variável entre os módulos e com diodo by-pass (*Figura 3.32*), tem-se da *Expressão 3.32*:

$$G_{P\%} = \frac{|479,3 - 118,3|}{1500} \cdot 100 \rightarrow \boxed{G_{P\%} = 24,07\%} \quad (3.33)$$

Pelo resultado da *Expressão 3.33*, mostra-se que uma planta de módulos FV configurados em série e com diodo by-pass obterá um ganho considerável de potência, 24,07 %, em relação ao sistema de módulos configurados em série sem diodo by-pass. Dessa maneira, a configuração com os diodo by-pass não se limitará as condições de irradiância mínimas nos módulos, podendo aproveitar, portanto, aqueles módulos contemplados com maior nível de insolação.

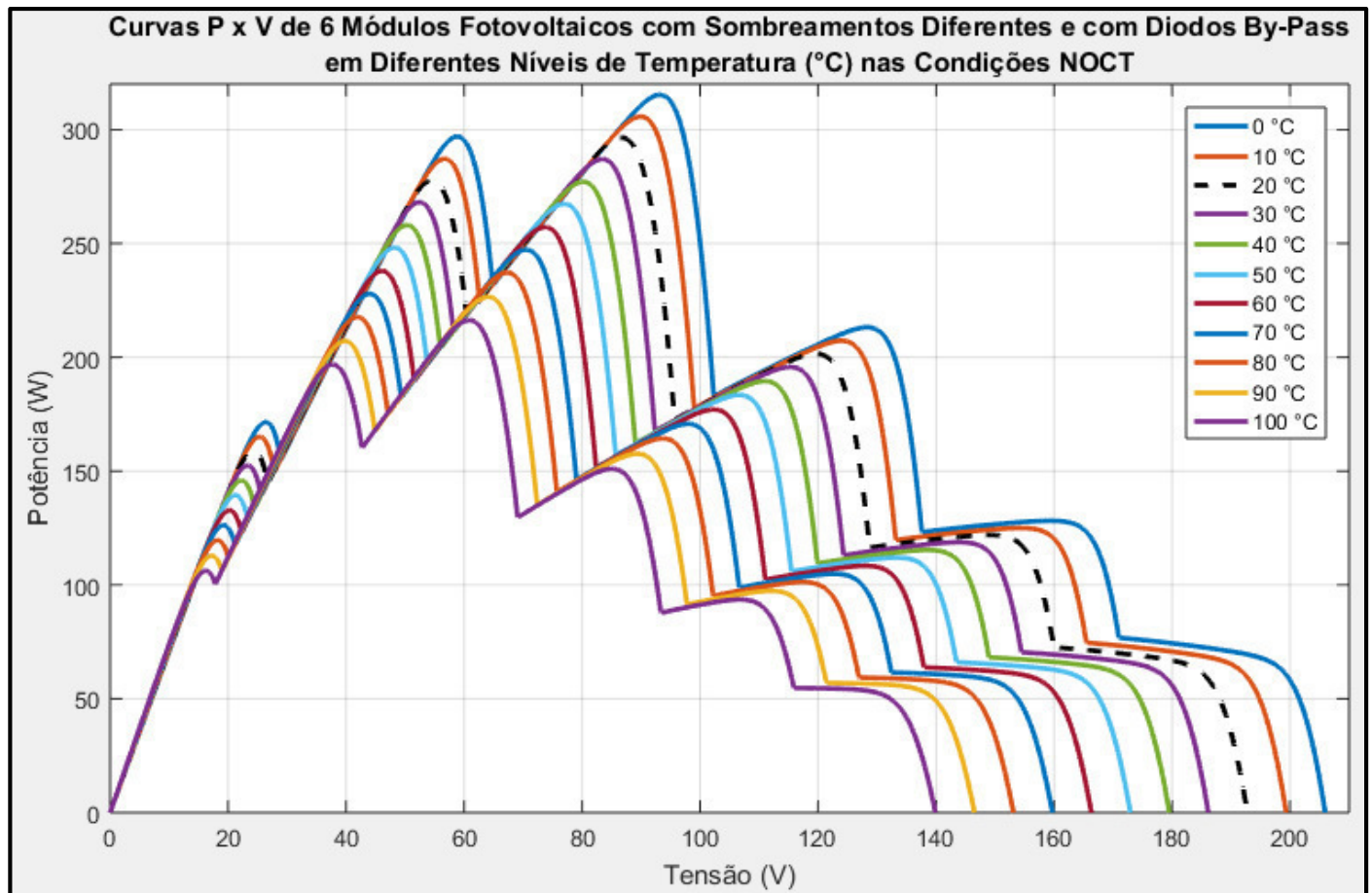
Prosseguindo na plotagem das curvas do sistema FV em questão, pode-se observar nas *Figuras 3.33 e 3.34*, as curvas IxV e PxV para diversos níveis de temperatura nos módulos nas condições NOCT.

Figura 3.33 – Curvas IxV do sistema FV com diodo by-pass sob vários níveis de temperatura nas condições NOCT



Fonte: próprio autor

Figura 3.34 – Curvas P x V do sistema FV com diodo by-pass sob vários níveis de temperatura nas condições NOCT



Fonte: próprio autor

Para a plotagem das curvas das *Figuras 3.33 e 3.34*, utilizou-se de irradiância de $G \leq 800 \text{ W/m}^2$, tendo em vista que as constantes de temperatura dadas na *Figura 3.10* foram obtidas pelo fabricante sob as condições NOCT. Dessa forma, tem-se que:

- ✓ Módulo 1 $\xrightarrow{\text{Sol Pleno (NOCT)}} (G = 800 \text{ W/m}^2)$;
- ✓ Módulo 2 $\xrightarrow{\text{Sombreamento A}} (G = 600 \text{ W/m}^2)$;
- ✓ Módulo 3 $\xrightarrow{\text{Sombreamento B}} (G = 400 \text{ W/m}^2)$;
- ✓ Módulo 4 $\xrightarrow{\text{Sombreamento C}} (G = 200 \text{ W/m}^2)$;
- ✓ Módulo 5 $\xrightarrow{\text{Sombreamento D}} (G = 100 \text{ W/m}^2)$;
- ✓ Módulo 6 $\xrightarrow{\text{Sombreamento E}} (G = 50 \text{ W/m}^2)$.

Fazendo-se uma comparação das *Figuras 3.33 e 3.34* com as *Figuras 3.18 e 3.19* observa-se a que a simulação da planta FV seguiu os mesmos padrões da simulação dos módulos individuais e por consequência da literatura vigente. Ou seja, diminuição da

tensão de circuito aberto (v_{oc}) e conseqüentemente da tensão de máxima potência (V_{mpp}), bem como o aumento da corrente de curto-circuito com o aumento da temperatura.

Dessa forma, as conseqüências do aumento ou da diminuição de temperatura sobre os gráficos das *Figuras 3.33 e 3.34* são análogas às conseqüências dos gráficos das *Figuras 3.18 e 3.19*. Deve-se atentar, no entanto, ao fato de que o coeficiente de tensão de circuito aberto equivalente do sistema torna-se 6 vezes superior ao coeficiente de circuito aberto do módulo individual. Já o coeficiente de curto-circuito do sistema permanece no mesmo valor do coeficiente de curto-circuito do módulo, tendo em vista serem 6 módulos em série.

$$\text{Dessa forma, tem-se que } k_{OC_{Equiv_{SISTEMA}}}^v = -0,666 \text{ V}/^{\circ}\text{C} (-0,111 \cdot 6)$$

$$\text{Da mesma forma, tem-se que } k_{CC_{Equiv_{SISTEMA}}}^i = 0,0036 \text{ A}/^{\circ}\text{C}$$

Desse modo, pode-se observar a aplicação correta dos coeficientes de temperatura nos modelos propostos, tendo em vista que, pelos coeficientes de temperatura equivalentes, a cada grau Celsius variado positivamente, a tensão de circuito aberto do sistema retrai em 0,666 V, bem como a corrente de curto-circuito aumenta em 0,0036 A, como bem observado nas curvas IxV da *Figura 3.33*.

Dessa forma, em um intervalo de 100 °C, tem-se uma retração de tensão de circuito aberto do sistema de 66,6 V, bem como um aumento de corrente de curto-circuito de 0,36 A. Pela *Figura 3.33*, observa-se justamente essas diferenças nas curvas IxV para 0 e 100 °C.

Observando-se a *Figura 3.34*, nota-se que a potência da planta tende a aumentar com a diminuição da temperatura, uma vez que com a variação negativa de temperatura, deverá haver aumento significativo da tensão de circuito aberto e conseqüentemente da tensão de potência máxima. Em contrapartida, com a variação negativa de temperatura, haveria também uma pequena retração na corrente de curto-circuito e conseqüentemente na corrente de potência máxima. Todavia, a potência tenderia a crescer, uma vez que o ganho de tensão com a variação negativa de temperatura seria 185 vezes maior (0,666/0,0036) do que a retração de corrente.

O raciocínio oposto também pode ser utilizado para o aumento de temperatura, em que a potência do sistema tende a diminuir, uma vez que, com a variação positiva de

temperatura, haveria uma grande retração de tensão, bem como um ligeiro aumento de corrente, trazendo como consequência a diminuição da máxima potência ($\downarrow\downarrow\downarrow V_{mpp}$ e $\uparrow I_{mpp} \rightarrow \downarrow\downarrow P_{mpp}$).

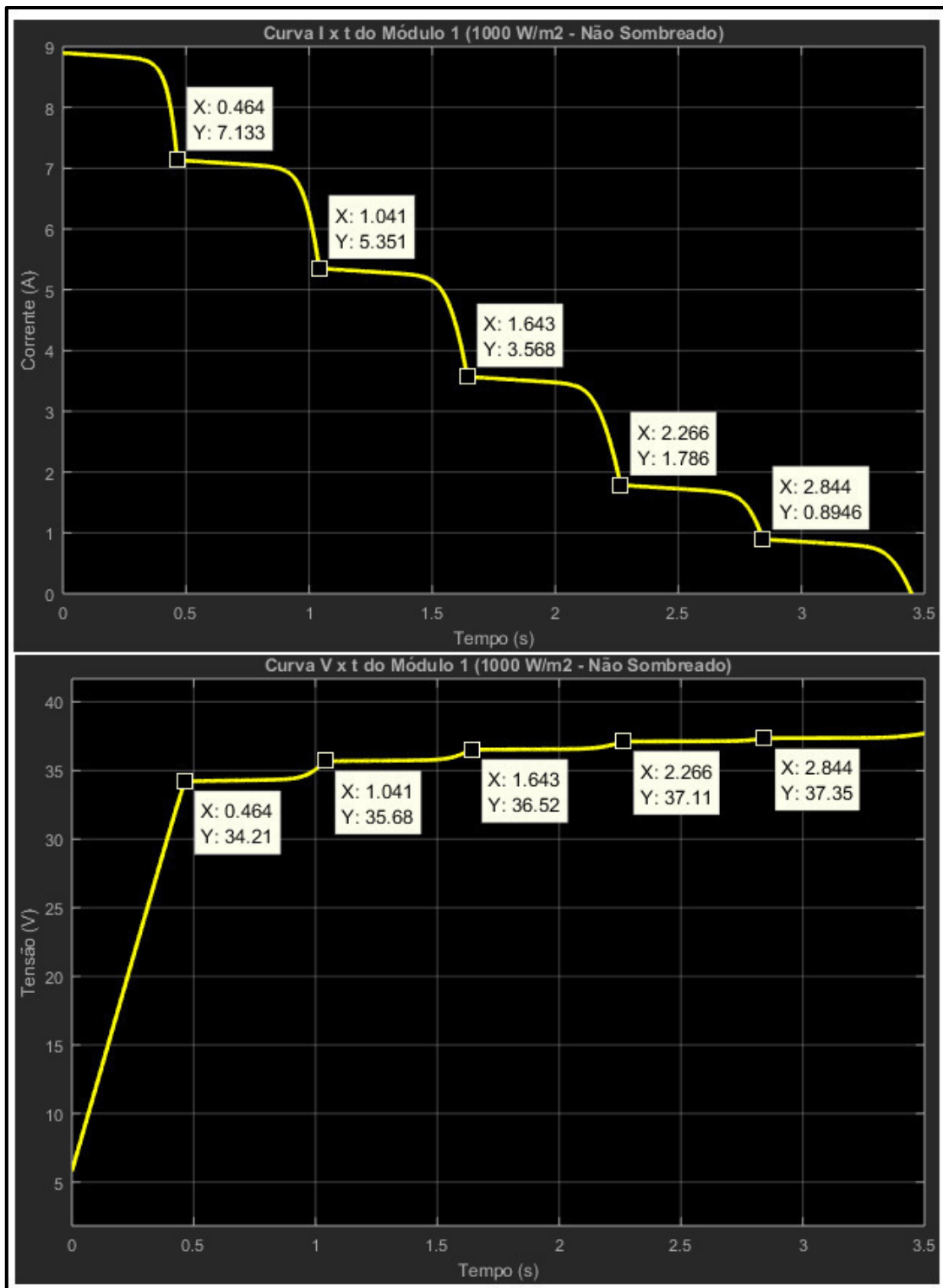
3.3.3. Curvas Mais Específicas de Sombreamento dos Módulos FV do LEA e com Diodos By-Pass

Nos *subtópicos* 3.3.1 e 3.3.2 deste capítulo, observou-se o comportamento das curvas na saída da planta FV do LEA. Porém, para um entendimento pleno sobre o sistema, necessita-se ainda de uma análise do comportamento das curvas em cada módulo FV, bem como também em cada diodo by-pass durante a mesma situação de sombreamento do *subtópico* 3.3.2.2, para a qual qualquer valor de irradiância abaixo do valor STC é considerado como sombreado.

Analisando-se as *Figuras* 3.35, 3.37, 3.38, 3.39, 3.40 e 3.41 de forma conjunta e comparando-se as curvas V_{xt} e I_{xt} , pode-se observar que a tensão aplicada ao sistema FV no ensaio de tensão divide-se de forma progressiva entre os módulos com o tempo. Dessa forma, pode-se observar que a tensão aplicada começa a distribuir-se do módulo de maior irradiância para o de menor irradiância.

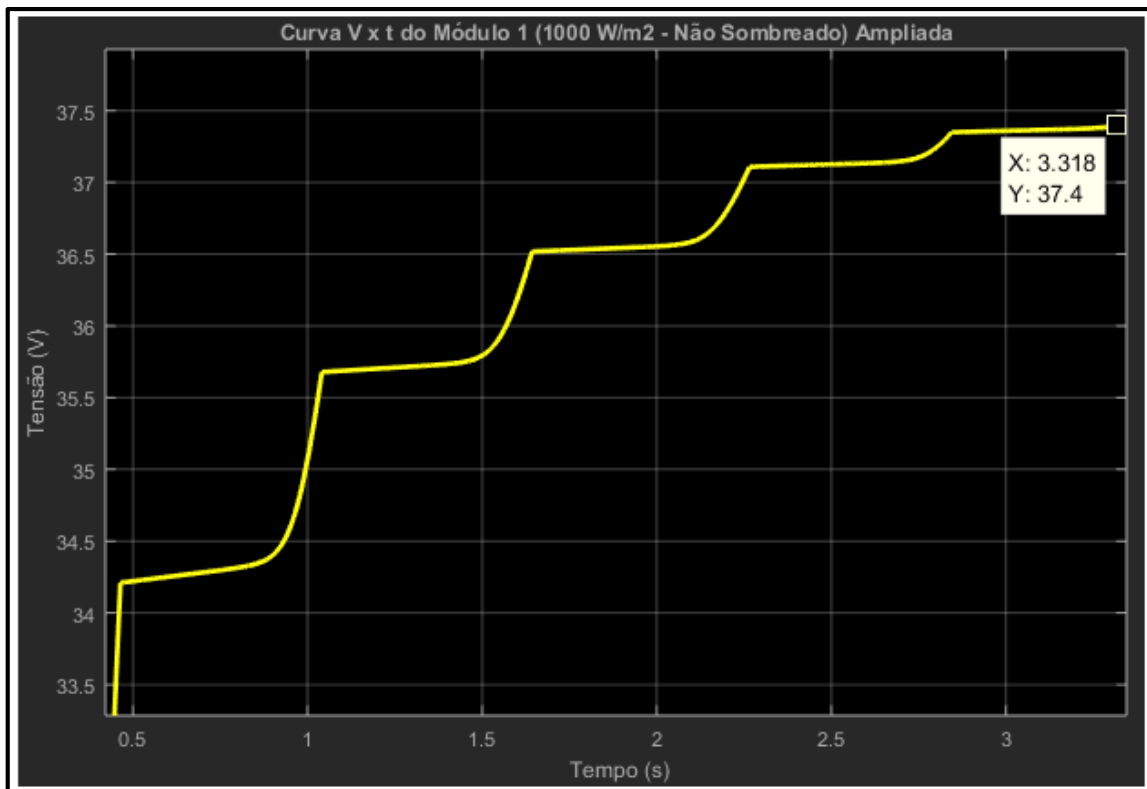
Ou seja:

- ✓ $0 s < t \leq 0,464 s \rightarrow$ Módulo 1 eleva sua tensão para 34,21 V;
- ✓ $0,464 s < t \leq 1,041 s \rightarrow$ Módulo 2 eleva sua tensão para 34,21 V;
- ✓ $1,041 s < t \leq 1,643 s \rightarrow$ Módulo 3 eleva sua tensão para 34,21 V;
- ✓ $1,643 s < t \leq 2,266 s \rightarrow$ Módulo 4 eleva sua tensão para 34,20 V;
- ✓ $2,266 s < t \leq 2,844 s \rightarrow$ Módulo 5 eleva sua tensão para 32,65 V;
- ✓ $2,844 s < t \leq 3,447 s \rightarrow$ Módulo 6 eleva sua tensão para 32,65 V.

Figura 3.35 – Curvas Ixt e Vxt do Módulo 1 (1000 W/m²)

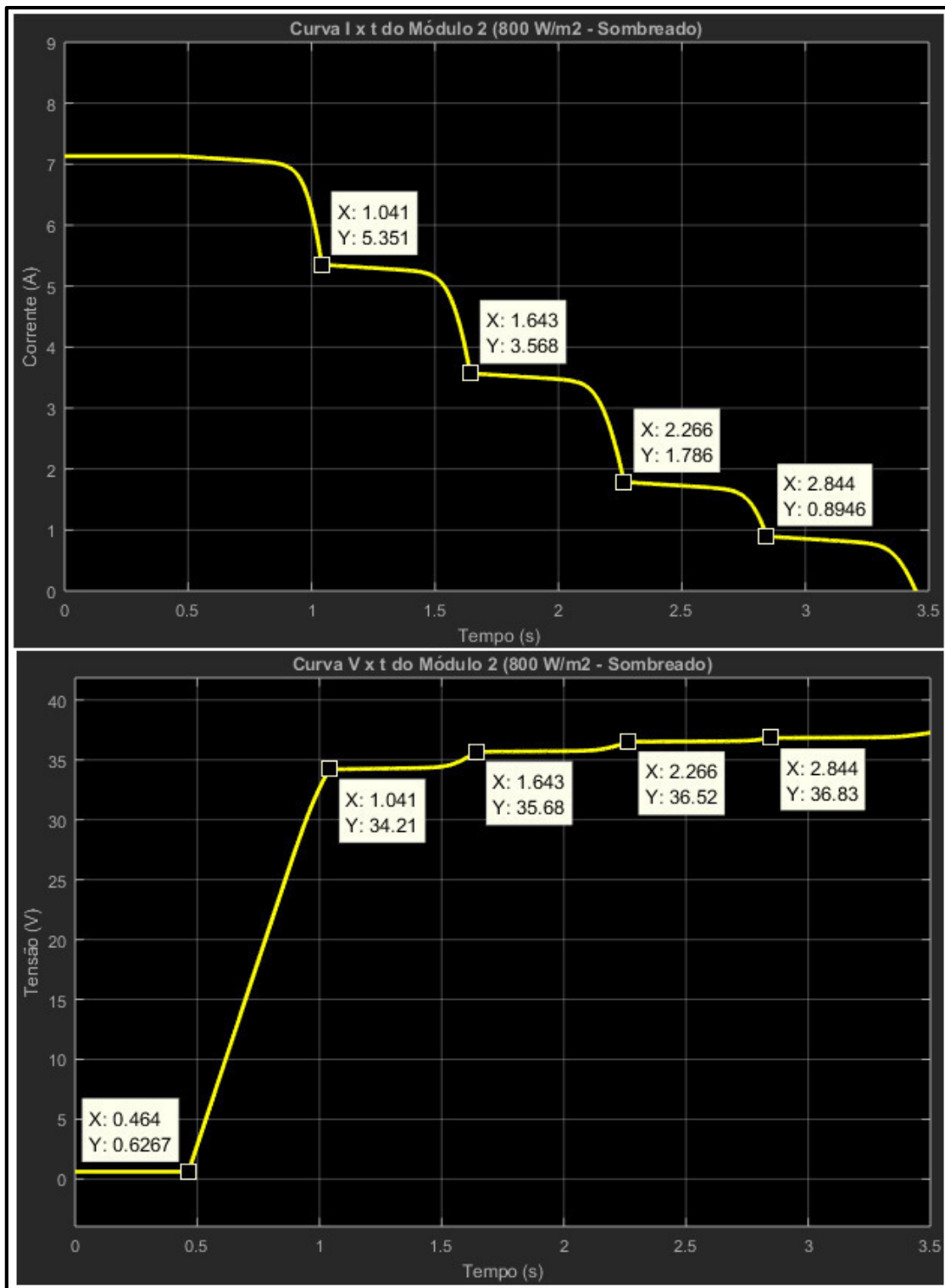
Fonte: próprio autor

Figura 3.36 – Curva Vxt do Módulo 1 ampliada

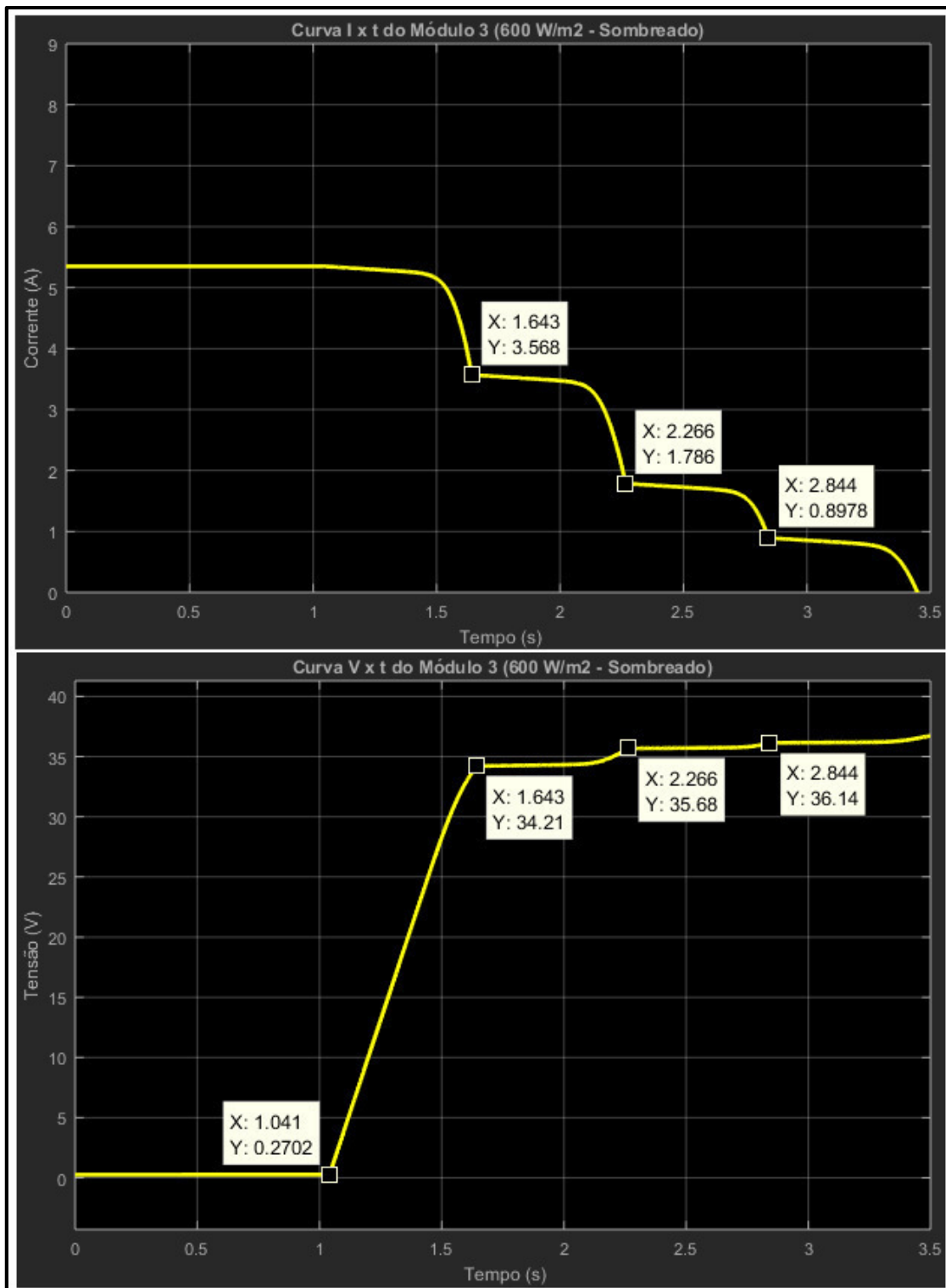


Fonte: próprio autor

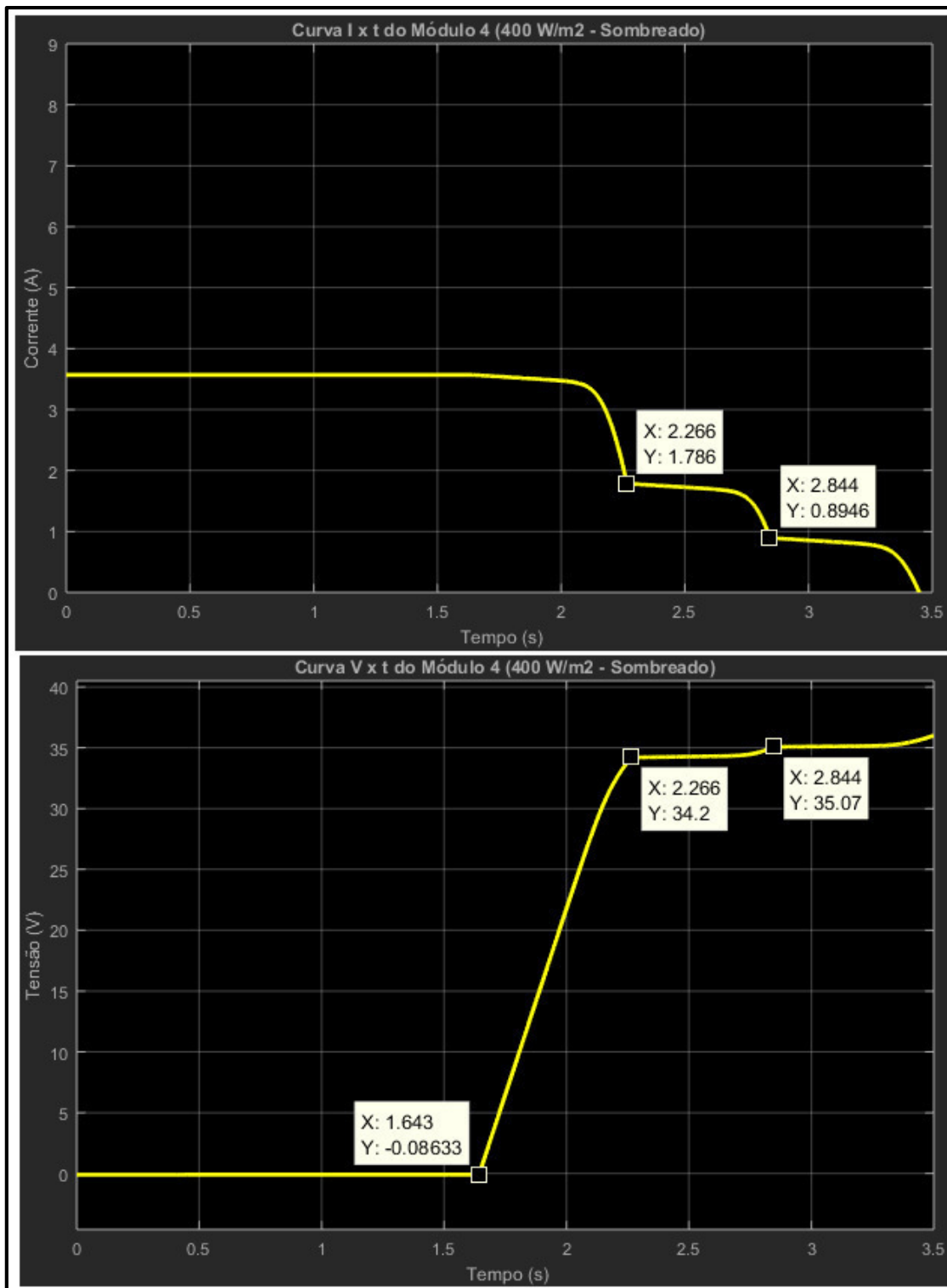
Vale frisar, como observado nas figuras, que a tensão cresce em forma de rampa até o momento dos intervalos destacados, momento no qual cada módulo está conduzindo corrente em seu maior degrau. A partir de então, a medida a corrente de cada módulo decresce, ou seja, cai de degrau, a tensão de cada módulo cresce de maneira sutil até o momento em que suas correntes chegam a zero, que é justamente o ponto de maior tensão dos módulos, qual seja, a tensão de circuito aberto ($v_{oc} = 37,6 V$). Ver *Figura 3.36*.

Figura 3.37 – Curvas Ixt e Vxt do Módulo 2 (800 W/m²)

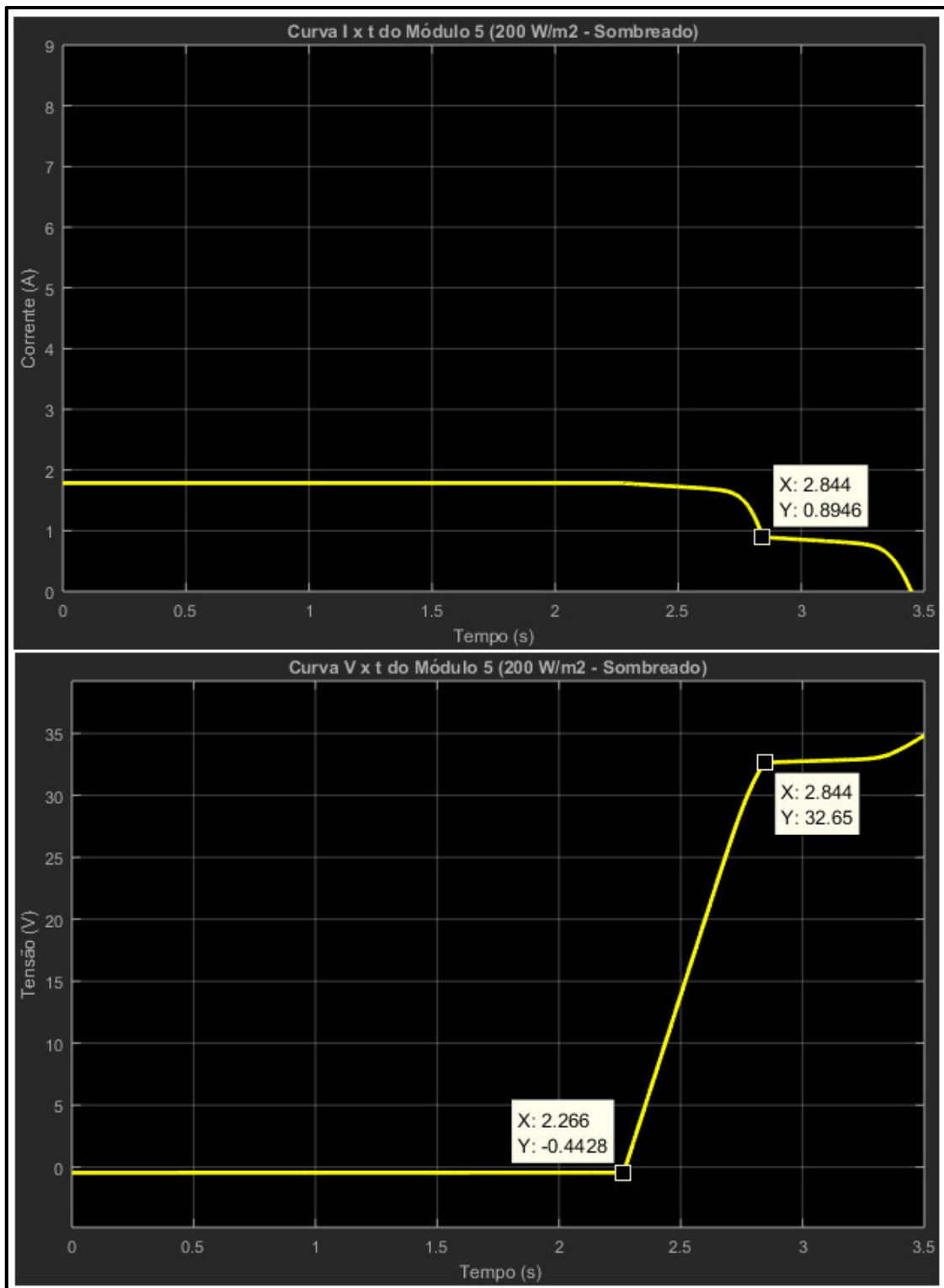
Fonte: próprio autor

Figura 3.38 – Curvas Ixt e Vxt do Módulo 3 (600 W/m²)

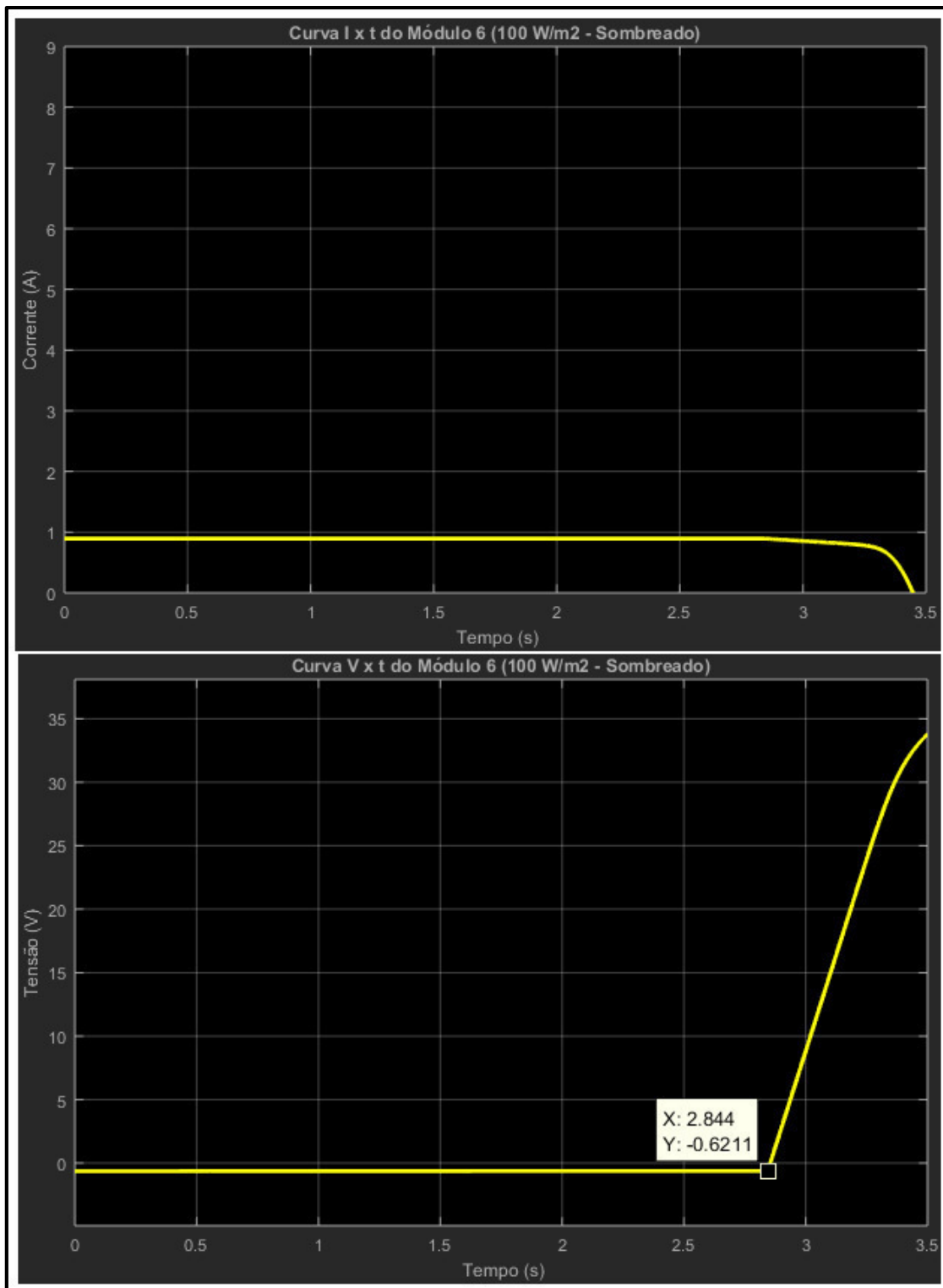
Fonte: próprio autor

Figura 3.39 – Curvas Ixt e Vxt do Módulo 4 (400 W/m²)

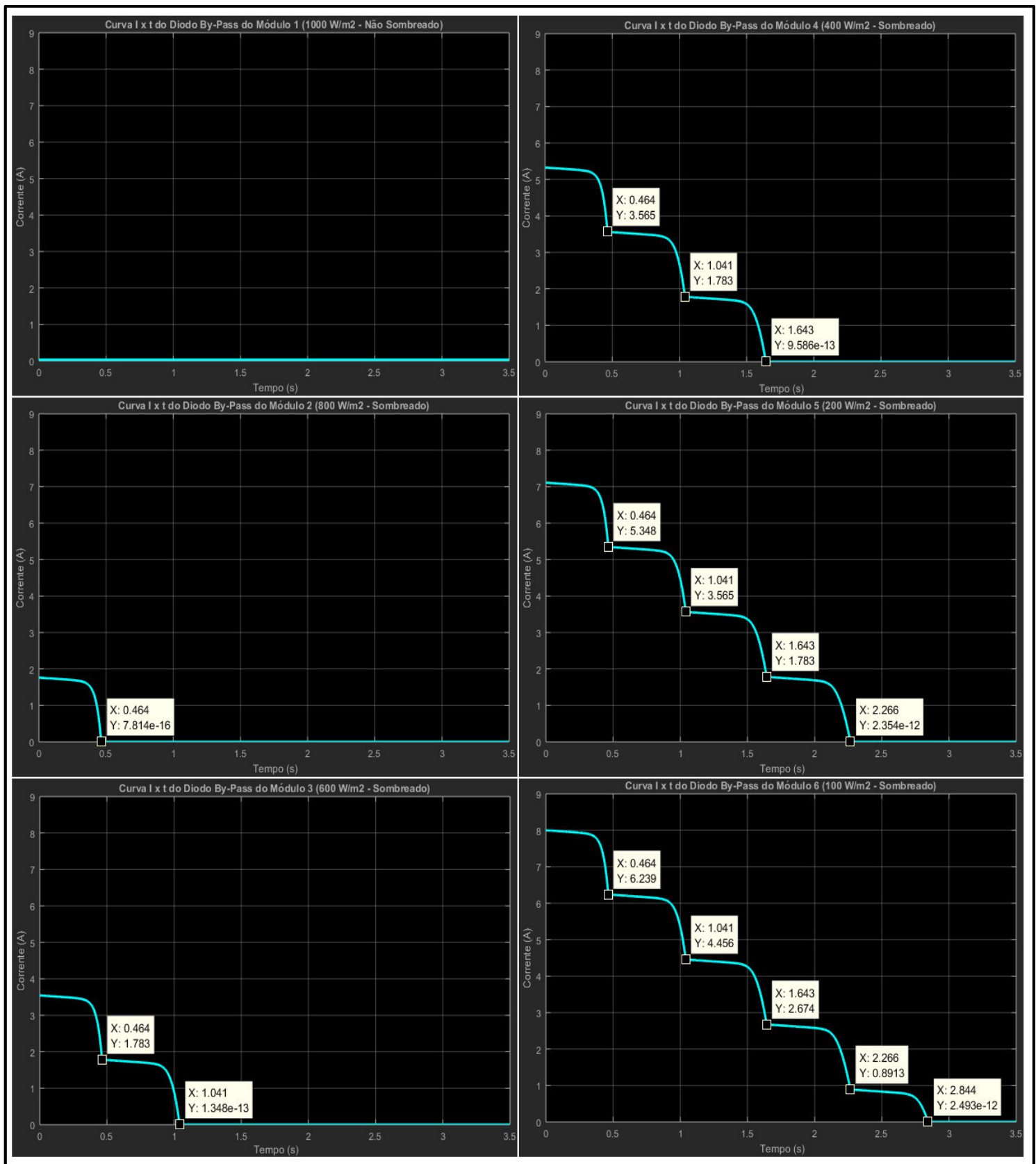
Fonte: próprio autor

Figura 3.40 – Curvas Ixt e Vxt do Módulo 5 (200 W/m²)

Fonte: próprio autor

Figura 3.41 – Curvas Ixt e Vxt do Módulo 6 (100 W/m²)

Fonte: próprio autor

Figura 3.42 – Curvas I x t dos diodos by-pass dos Módulos 1 – 6 (1000 – 100 W/m²)

Fonte: próprio autor

De imediato, da comparação das *Figuras 3.35, 3.37, 3.38, 3.39, 3.40 e 3.41* com a *Figura 3.42*, pode-se observar que a corrente de saída do sistema (I_{SIST}) é dada pela soma da corrente no diodo by-pass do módulo (I_{DIOD_n}) com a corrente que passa pelo mesmo módulo ($I_{MÓD_n}$), como bem observado no último parágrafo do *subtópico 2.4.4* do *capítulo 2*.

Ou seja:

$$\boxed{I_{SIST} = I_{MÓD_n} + I_{DIOD_n}} \quad (3.34)$$

A seguir destacam-se os intervalos de tempo de condução dos elementos que compõem cada conjunto do sistema FV simulado. Define-se CONJUNTO N como sendo a composição do Módulo N em antiparalelo com o Diodo N, com $N \in \mathbb{N} \mid N = \{1,2,3,4,5,6\}$.

➤ CONJUNTO 1

• Módulo 1

- ✓ $0 s \leq t < 0,464 s \rightarrow$ Conduz $I_{CC_{Degrau1}} = 8,92 A$;
- ✓ $0,464 s \leq t < 1,041 s \rightarrow$ Conduz $I_{CC_{Degrau2}} = 7,13 A$;
- ✓ $1,041 s \leq t < 1,643 s \rightarrow$ Conduz $I_{CC_{Degrau3}} = 5,35 A$;
- ✓ $1,643 s \leq t < 2,266 s \rightarrow$ Conduz $I_{CC_{Degrau4}} = 3,57 A$;
- ✓ $2,266 s \leq t < 2,844 s \rightarrow$ Conduz $I_{CC_{Degrau5}} = 1,79 A$;
- ✓ $2,844 s \leq t < 3,447 s \rightarrow$ Conduz $I_{CC_{Degrau6}} = 0,89 A$.

• Diodo 1

- ✓ $0 s \leq t < 3,447 s \rightarrow$ Conduz $I_{CC} = 0 A$.

➤ CONJUNTO 2

• Módulo 2

- ✓ $0 s \leq t < 1,041 s \rightarrow$ Conduz $I_{CC_{Degrau2}} = 7,13 A$;
- ✓ $1,041 s \leq t < 1,643 s \rightarrow$ Conduz $I_{CC_{Degrau3}} = 5,35 A$;
- ✓ $1,643 s \leq t < 2,266 s \rightarrow$ Conduz $I_{CC_{Degrau4}} = 3,57 A$;
- ✓ $2,266 s \leq t < 2,844 s \rightarrow$ Conduz $I_{CC_{Degrau5}} = 1,79 A$;
- ✓ $2,844 s \leq t < 3,447 s \rightarrow$ Conduz $I_{CC_{Degrau6}} = 0,89 A$.

- **Diodo 2**
 - ✓ $0 s \leq t < 0,464 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC_{\text{Degrau1}}} = 1,78 A;$
 - ✓ $0,464 s \leq t < 3,447 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC} = 0 A.$

➤ **CONJUNTO 3**

- **Módulo 3**
 - ✓ $0 s \leq t < 1,643 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC_{\text{Degrau3}}} = 5,35 A;$
 - ✓ $1,643 s \leq t < 2,266 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC_{\text{Degrau4}}} = 3,57 A;$
 - ✓ $2,266 s \leq t < 2,844 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC_{\text{Degrau5}}} = 1,79 A;$
 - ✓ $2,844 s \leq t < 3,447 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC_{\text{Degrau6}}} = 0,89 A.$
- **Diodo 3**
 - ✓ $0 s \leq t < 0,464 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC_{\text{Degrau1}}} = 3,56 A;$
 - ✓ $0,464 s \leq t < 1,041 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC_{\text{Degrau2}}} = 1,78 A;$
 - ✓ $1,041 s \leq t < 3,447 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC} = 0 A.$

➤ **CONJUNTO 4**

- **Módulo 4**
 - ✓ $0 s \leq t < 2,266 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC_{\text{Degrau4}}} = 3,57 A;$
 - ✓ $2,266 s \leq t < 2,844 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC_{\text{Degrau5}}} = 1,79 A;$
 - ✓ $2,844 s \leq t < 3,447 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC_{\text{Degrau6}}} = 0,89 A.$
- **Diodo 4**
 - ✓ $0 s \leq t < 0,464 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC_{\text{Degrau1}}} = 5,35 A;$
 - ✓ $0,464 s \leq t < 1,041 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC_{\text{Degrau2}}} = 3,56 A;$
 - ✓ $1,041 s \leq t < 1,643 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC_{\text{Degrau3}}} = 1,78 A;$
 - ✓ $1,643 s \leq t < 3,447 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC} = 0 A.$

➤ **CONJUNTO 5**

- **Módulo 5**
 - ✓ $0 s \leq t < 2,844 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC_{\text{Degrau5}}} = 1,79 A;$
 - ✓ $2,844 s \leq t < 3,447 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC_{\text{Degrau6}}} = 0,89 A.$
- **Diodo 5**
 - ✓ $0 s \leq t < 0,464 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC_{\text{Degrau1}}} = 7,13 A;$

- ✓ $0,464 s \leq t < 1,041 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC_{\text{Degrau}2}} = 5,35 A;$
- ✓ $1,041 s \leq t < 1,643 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC_{\text{Degrau}3}} = 3,56 A;$
- ✓ $1,643 s \leq t < 2,266 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC_{\text{Degrau}4}} = 1,78 A;$
- ✓ $1,643 s \leq t < 3,447 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC} = 0 A.$

➤ CONJUNTO 6

- **Módulo 6**

- ✓ $0 s \leq t < 3,447 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC_{\text{Degrau}6}} = 0,89 A.$

- **Diodo 6**

- ✓ $0 s \leq t < 0,464 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC_{\text{Degrau}1}} = 8,03 A;$
- ✓ $0,464 s \leq t < 1,041 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC_{\text{Degrau}2}} = 6,24 A;$
- ✓ $1,041 s \leq t < 1,643 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC_{\text{Degrau}3}} = 4,46 A;$
- ✓ $1,643 s \leq t < 2,266 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC_{\text{Degrau}4}} = 2,67 A;$
- ✓ $2,266 s \leq t < 2,844 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC_{\text{Degrau}5}} = 0,89 A;$
- ✓ $2,844 s \leq t < 3,447 s \rightarrow \text{Conduz } I_{CC} = 0 A.$

De todos os conjuntos observados, pode-se verificar a veracidade da *Equação 3.34*, a qual informa que a corrente em um módulo somada com seu respectivo diodo é igual a corrente de saída do sistema.

Da própria *Equação 3.34* e da *Figura 3.42*, depreende-se que:

$$I_{SIST} = I_{MÓD_1} + I_{DIOD_1} \rightarrow I_{SIST} = I_{MÓD_1} + 0 \quad (3.35)$$

$$\boxed{I_{SIST} = I_{MÓD_1}} \quad (3.36)$$

Das *Equações 3.34* e *3.36*, tem-se que:

$$\boxed{I_{MÓD_1} = I_{MÓD_n} + I_{DIOD_n}} \quad (3.37)$$

Ou seja, a corrente de saída do sistema é igual a corrente que passa pelo Módulo 1 (módulo de maior incidência de radiação solar). Como o sistema é composto por conjuntos em série, essa mesma corrente que passa pelo Módulo 1 deve ser a mesma corrente que atravessa cada conjunto do sistema, confirmando assim todas as análises observadas.

4. CONCLUSÕES

Seguindo-se a proposta do trabalho, foi realizada a modelagem matemática dos esquemas de célula solar presentes na literatura vigente, de modo que foi feito um desenvolvimento progressivo das equações, partindo-se do modelo ideal para o real de célula, a qual tem como diferença precípua a presença das resistências série e paralela. Buscou-se trazer as principais curvas características, I_xV e P_xV , tanto de forma individualizada, como também para diversos cenários de temperatura e irradiância solar. Utilizando-se da corrente de saída da célula solar, pôde-se obter observações acerca do formato da curva I_xV . Desse modo, feitos todos os embasamentos necessários para a compreensão básica do trabalho, definiu-se os tipos de sombreamentos existentes em sistemas FV, destacando-se, por conseguinte os problemas da polarização inversa da célula solar sombreada, a importância do diodo by-pass nos módulos sombreados, bem como as curvas características de um sistema FV com dois módulos em série, em que foram observados os cenários de sombreamento com e sem a utilização dos diodos by-pass.

Consolidada todas as bases teóricas, buscou-se expandir as equações características que descreviam a célula solar para as equações que descrevem o módulo FV. Dessa forma, foi modelado a partir das equações obtidas um módulo FV na plataforma Simulink do MATLAB, a partir do qual foi parametrizado de acordo com o catálogo do módulo YL250P-29b. Desse modo, foram geradas diversas curvas do módulo FV computacional. Observou-se também que o módulo desenvolvido atendeu com bastante exatidão as principais características elétricas presentes no referido catálogo. Foram traçadas também para o mesmo módulo as curvas para diversos valores de irradiância solar, bem como também de temperatura, observando-se, no entanto, as condições STC e NOCT expostas respectivamente para cada condição no catálogo. Após todas as comparações das curvas geradas pelo módulo com a literatura vigente, reduziu-se o modelo computacional para uma célula, em que foi possível obter, um rendimento com erro percentual extremamente pequeno. Logo após, foram traçadas as curvas I_xV e P_xV para a associação série de até 6 células. Dessa forma, diante dos erros diminutos dos dados elétricos obtidos na simulação (2,01 %, 1,91 %, 0,04 %, 0 % e 1,13 %, respectivamente para $V_{mpp_{MÓD}}$, $I_{mpp_{MÓD}}$, $P_{máx_{MÓD}}$, $\mu_{MÓD}$ e $\mu_{CÉL}$), bem como da semelhança das curvas geradas com as curvas da literatura vigente, concluiu-se que a

modelagem proposta cumpriu fielmente com os propósitos de descrever o módulo FV do LEA.

Diante disso, dentro da própria plataforma do Simulink, foram postos em série 6 módulos FV, de modo a assemelhar-se com o cenário do sistema FV do LEA. A partir de então, foi feita uma análise dos impactos gerados pelo sombreamento do sistema, sob as perspectivas de falha e de funcionamento dos diodos by-pass. Dessa maneira, traçou-se as curvas I_xV e P_xV do sistema a sol pleno, bem como também com nível especificado de sombreamento (subtópico 3.3.2) e sem diodo by-pass. Pôde-se observar uma redução de potência, 92,11 %, mostrando o comprometimento do sistema FV. Com a adição do diodo by-pass, mantendo-se o mesmo nível de sombreamento especificado, pôde-se perceber que a redução de potência cai para 68,05 %, o que informa que houve um ganho de 24,07 % de potência com o diodo by-pass, notando-se, portanto, um ganho de potência da configuração com diodo em face da configuração com sua ausência. Da mesma forma como foi traçado para o módulo, foram também geradas para o sistema FV sombreado diversas curvas de I_xV e P_xV para vários níveis de temperatura, observando-se, no entanto, a condição NOCT, exposta no catálogo para este tipo de ensaio.

Por fim, buscou-se traçar para cada módulo as curvas I_{xt} e V_{xt} , bem como também para cada diodo a curva I_{xt} . Desse modo, é possível observar pela análise das curvas geradas que a corrente que sai do sistema FV é a soma da corrente que passa pelo módulo FV com a corrente que passa pelo seu diodo correspondente. Analisando-se as curvas de forma ainda mais cuidadosa, pôde-se perceber que a corrente de saída do sistema será sempre igual a corrente gerada pelo módulo de menor sombreamento (ou de maior irradiação solar), mostrando, portanto, que em um sistema FV sombreado e ligado em série, a corrente gerada pelo módulo de menor sombreamento será a soma da corrente em qualquer módulo com o seu diodo correspondente.

CONTRIBUIÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante da exposição teórica e da quantidade de dados elétricos gerados a partir das simulações deste trabalho, foi construído um embasamento para ensaios experimentais no sistema FV do LEA. Dessa forma, o aluno/pesquisador que esteja operando nos módulos citados terá consigo as principais curvas características, que traduzem o funcionamento tanto dos módulos, como também do sistema FV em questão para diversos níveis de irradiância solar e de temperatura.

Dessa forma, o estudante poderá, como continuação deste trabalho, buscar traçar de forma experimental, através de ensaios de tensão, as curvas características reais dos módulos FV do LEA de modo a tentar perseguir sempre as curvas simuladas obtidas neste trabalho. Obtidas as curvas dos módulos, pode ser feito também em campo as análises de sombreamento, juntamente com as comparações dos cenários com a presença ou ausência dos diodos by-pass, analisando-se os impactos reais causados pela falha do diodo, buscando-se sempre fazer as comparações com o presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] PANORAMA COMERC. **Energia Solar Teve Queda de 50% no Custo de Instalação de Equipamentos**. Disponível em: <<http://panorama.comerc.com.br/2018/02/energia-solar-teve-queda-de-50-no-custo-de-instalacao-de-equipamentos/>> Acesso em 08/09/2018 às 20:32.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR: ABSOLAR. **Energia Solar Fotovoltaica: Panorama, Oportunidades e Desafios**. Rio de Janeiro, junho de 2018. Disponível em: <<http://ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/02-Setor-Dr.RodrigoLopesSuaia-Absolar.pdf>>. Acesso em 09/09/2018 às 09:05.
- [3] CONSULTORIA LEGISLATIVA. **Energia Solar no Brasil: Situação e Perspectivas**. Estudo Técnico. Câmara dos Deputados, mar. 2017.
- [4] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA: EPE. **Balço Energético Nacional – 2018**. Relatório Síntese, Ano Base 2017. Rio de Janeiro, mai. 2018. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-397/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%202018-ab%202017vff.pdf>>. Acesso em 08/09/2018 às 17:43.
- [5] EMPRESA BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR: EBES. **International Engineering Conference**. Disponível em: <<http://www.confes.org.br/media/AndreNadai.pdf>>. Acesso em 09/09/2018 às 16:10.
- [6] PASTOR, R. Oliveira; SHIGUEMOTO, G. Roteiro de Aulas Práticas Nº 01 – **Curva Característica do Diodo**. Universidade Federal do Ceará – DEE, 2014.
- [7] BOYLESTAD, Robert L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. 11ª ed. São Paulo : Pearson Education do Brasil, 2013.
- [8] PORTAL ENERGIA: ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Principais Tipos de Células Fotovoltaicas Constituintes de Painéis Solares**. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/principais-tipos-de-celulas-fotovoltaicas-constituintes-de-paineis-solares//>> Acesso em 04/06/2018 às 23:31.
- [9] ARAMIZU, Juliana. **Modelagem e Análise de Desempenho de um Sistema**

- Fotovoltaico em Operação Isolada e em Paralelo com uma Rede de Distribuição de Energia Elétrica.** 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, 2010.
- [10] FAGUNDES HERINGER, Netalianne Mitchell. **Modelagem de Arranjo Fotovoltaico com Sombreamento Parcial para Referência de Emuladores Estáticos.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.
- [11] WENDLING, Marcelo. **Diodo Semicondutor.** Série Eletrônica: Sistema SENAI, 2011.
- [12] GUALTER; NEWTON; HELOU. **Tópicos de Física 3: Eletricidade, Física Moderna e Análise Dimensional.** 15ª ed., ref. e ampl., 2001.
- [13] COSTA, Marques Vanessa. **Modelagem de Painel Fotovoltaico Submetido a Sombreamento e Conectado à Rede Elétrica Monofásica.** 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal da Paraíba, 2017.
- [14] CREPALDI, Paulo C. **Diodos Semicondutores.** Slides de Aula de Eletrônica Analógica I para Engenharia da Computação, Universidade Federal de Itajubá.
- [15] SEDRA, Adel. S. **Microeletrônica,** 5ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.
- [16] CEPEL: SISTEMA ELETROBRÁS. **Energia Solar: Princípios e Aplicações - CRESESB.** Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_20-06.-pdf> Acesso em 29/05/2018 às 21:38.
- [17] GRUPO DE TRABALHO DE ENERGIA SOLAR: GTES, CEPEL, DTE E CRESESB. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/downloads/livro-manual-de-engenharia-sistemas-fotovoltaicos-2014.-pdf>> Acesso em 29/05/2018 às 22:38.
- [18] GASPARIN, F.; KREZINGER, A. **Comparação entre Coeficientes Térmicos de Módulos Fotovoltaicos Determinados com Simulador Solar e com Iluminação Natural.** Revista Brasileira de Energia Solar, v. 6, n. 2, p. 102-111, dez. 2015.
- [19] SANTOS SERRÃO, M. A. **Dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico para uma Casa de Veraneio em Pouso da Cajaíba-Paraty.** 2010. Monografia (Graduação em

- Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.
- [20] JOSÉ BÜHLER, Alexandre. **Determinação de Parâmetros Fotovoltaicos a Partir de Ensaio de Curvas Características sem Iluminação**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.
- [21] PORTAL ENERGIA: ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Energia Fotovoltaica – Manual sobre Tecnologias, Projecto e Instalação**. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/downloads/guia-tecnico-manual-energia-fotovoltaica.pdf>> Acesso em 10/07/2018 às 18:43.
- [22] COUTINHO, Carlos Roberto. **O Efeito do Sombreamento e Diodos de Bypass em Módulos Fotovoltaicos**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.
- [23] YINGLE SOLAR. **Catálogo YGE 60 CÉLULAS SÉRIE 2: Qualidade Comprovada em uma Nova Dimensão**. Mai. 2015. Disponível em: <http://d9no22y7yqre8.cloudfront.net/assets/uploads/products/downloads/DS_YGE60Cell-29b_35mm_BR_May%202015-_YBS.pdf> Acesso em 01/08/2018 às 18:43.
- [24] GUALTER; NEWTON; HELOU. **Tópicos de Física 2: Termologia, Ondulatória e Óptica**. 16ª ed., ref. e ampl., 2001.
- [25] GREENER TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS. **Análise do Mercado Fotovoltaico de Geração Distribuída 2º Semestre de 2018**, São Paulo, p.1-144, jul. 2018. Disponível em: <<https://www.greener.com.br/pesquisas-de-mercado/estudo-estrategico-mercado-fotovoltaico-de-geracao-distribuida-2o-semester-2018/>>. Acesso em 01/09/2018 às 18:36.
- [26] VITORIANO, Camila Tavares. **Análise da Viabilidade de Instalação de Plantas Fotovoltaicas no Brasil pelo Critério de Área Ocupada**. 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, 2017.
- [27] TÁVORA, Virgílio. **Monitoramento de Temperatura de Pannel Fotovoltaico Instalado no Laboratório de Energias Alternativas da UFC**. 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, 2017.

- [28] ASSUNÇÃO, Hélio. **Degradação de Módulos Fotovoltaicos de Silício Cristalino Instalados no DEE – UFC.** 2014. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, 2014.
- [29] PAULINO, Edir. **Eficiência de Sistemas Fotovoltaicos Considerando Curva de Carga.** 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade de Brasília, 2010.
- [30] CARVALHO, Paulo; RANGEL B., Manuel. **Geração de Energia Elétrica: Fundamentos.** 1ª ed., 3ª reimp. São Paulo: Érica Ltda, 2014.