

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL**

LUIZ EDUARDO DOGADO

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS QUANDO
CONECTADOS EM SÉRIE E PARALELO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2018

LUIZ EDUARDO DOGADO

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS QUANDO
CONECTADOS EM SÉRIE E PARALELO**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Tecnólogo em Automação Industrial, do Departamento Acadêmico de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Mendes Casaro

**PONTA GROSSA - PR
2018**



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Ponta Grossa
Diretoria de Graduação e Educação
Profissional Departamento Acadêmico de
Eletrônica
Tecnologia em Automação Industrial



TERMO DE APROVAÇÃO

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS QUANDO CONECTADOS EM
SÉRIE E PARALELO.**

por

LUIZ EDUARDO DOGADO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 23 de novembro de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel(a) em Tecnologia em Automação Industrial. O(A) candidato(a) foi arguido(a) pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr. Marcio Mendes Casaro
Orientador(a)

Prof(a). Dr. Josmar Ivanqui
Membro Titular

Prof(a). M.Eng. Percio Luiz Karam de Miranda
Membro Titular

Prof. Dr. Josmar Ivanqui
Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Felipe Mezzadri
Coordenador do Curso

Dedico este trabalho à Deus e minha
família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me concedido saúde e força para superar as dificuldades e alcançar meus objetivos, agradeço também ao Professor Dr. Márcio Mendes Casaro por me orientar, e pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Radiação solar global diária – média anual típica (Wh/m ² . dia).	13
Figura 2 - Velocidade média anual do vento a 50m de altura.	14
Figura 3 - Exemplo de um sistema de geração de energia solar.	15
Figura 4 - Empresas que fazem instalação fotovoltaica em Curitiba.	16
Figura 5 - Ligação série-paralelo em um inversor centralizado.	17
Figura 6 - Ligação dos painéis fotovoltaicos em micro inversores.	18
Figura 7 - Funcionamento de uma célula fotovoltaica de silício cristalizado.	27
Figura 8 - Construção do painel fotovoltaico.	24
Figura 9 - Sol a 48,2° com a perpendicular.	25
Figura 10 - Circuito elétrico equivalente.	26
Figura 11 - Curva característica I-V de uma célula fotovoltaica baseada na fotocorrente e na corrente de uma junção P-N.	28
Figura 12 - Características I-V e P-V para módulo fotovoltaico de 10 W considerando (a) diferentes irradiâncias e (b) diferentes temperaturas.	29
Figura 13 - Características I-V e P-V para módulo fotovoltaico de 20 W considerando (a) diferentes irradiâncias e (b) diferentes temperaturas.	30
Figura 14 - Características I-V e P-V para módulo fotovoltaico de 55 W considerando (a) diferentes irradiâncias e (b) diferentes temperaturas.	30
Figura 15 - Associação de fileiras em série com corrente de carga igual a zero.	32
Figura 16 - Associação de fileiras em série com fileiras fornecendo a mesma corrente de carga.	32
Figura 17 - Associação de fileiras em série configurando curto-circuito em uma fileira.	33
Figura 18 - Associação de fileiras em paralelo com corrente de carga igual a zero. ...	33
Figura 19 - Associação de fileiras em paralelo com corrente fornecida pela fileira de maior potência.	34
Figura 20 - Associação de fileiras em paralelo com carga recebendo a soma das correntes das fileiras.	34
Figura 21 - Simulação no MatLab de uma ligação em série dos módulos 10W, 20W e 55W.	35
Figura 22 - Curva característica para uma ligação em série dos módulos 10W, 20W e 55W.	35
Figura 23 Simulação no MatLab de uma ligação em paralelo dos módulos 10W, 20W e 55W.	36
Figura 24 Curva característica para uma ligação em paralelo dos módulos 10W, 20W e 55W.	37
Figura 25 - Bancada para exoerimentação de módulos de 10W, 20W e 55W conectados em série e paralelo.	38
Figura 26 - Instrumentos usados nas medições.	38
Figura 27 - Detalhe do resistor variável usado como carga.	39
Figura 28 - Curva gerada por interpolação dos pontos obtidos da ligação em paralelo dos módulos 10w, 20w e 55w.	40
Figura 29 - Curva gerada por interpolação dos pontos obtidos da ligação em série dos módulos 10w, 20w e 55w.	41

Figura 30 - Caixa de Junção do modulo 10W.	42
Figura 31 - Bancada para experimentação de módulos de 55W e 260W ligados em série.	43
Figura 32 - Curva gerada por interpolação dos pontos obtidos da ligação em série dos módulos 55W e 260W.	44

LISTA DE SÍMBOLOS

P_{sun}	Densidade de potência da radiação solar.
AM	Air Mass – massa de ar atmosférico atravessado pela radiação solar.
T	Temperatura de serviço das células solares fotovoltaicas.
I_{sc}	Corrente de curto-circuito da célula fotovoltaica em STC.
α	Coeficiente de temperatura da I_{sc} .
T_r	Temperatura de referência em STC.
I_0	Corrente de saturação.
q	Carga do elétron $1,6 \times 10^{-19}$ C.
k	Constante de Boltzman.
η	Fator de qualidade da junção p-n.
V_{cell}, I_{cell}	Tensão e corrente nos terminais de saída de uma célula solar.
I_{ph}	Fotocorrente.
R_s, R_p	Resistências série e paralela da célula.
I_{mpp}	Corrente nos terminais de saída de uma célula solar.
V_{mpp}	Tensão nos terminais de saída de uma célula solar.
V_{oc}	Tensão de circuito aberto.
I_D	Corrente no diodo.
D	Diodo.
R_s	Resistência série da célula.
R_p	Resistência paralela da célula.
V_{inv}	Tensão do inversor.
I_{inv}	Corrente do inversor.

LISTA DE SIGLAS

NREL	National Renewable Energy Laboratory
WER	World Resources Energy
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
STC	Standard Test Conditions
MPPT	Maximum Power Point Tracking

RESUMO

DOGADO, Luiz Eduardo. **Análise de comportamento de módulos fotovoltaicos quando conectados em série e paralelo.** 2018. 49f Trabalho de Conclusão de Curso Superior de Tecnologia em Automação Industrial – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

Neste trabalho, são estudados os módulos solares fotovoltaicos, especialmente no que se refere as associações dos mesmos em série e paralelo. Cada módulo possui um par de terminais de onde se extrai energia elétrica em corrente contínua quando este é submetido à irradiação solar, conforme o efeito fotovoltaico. Quanto maior a irradiância, maiores devem ser os níveis de tensão e corrente gerados. No entanto, normalmente os módulos são associados em série ou paralelo quando empregados comercialmente. Dependendo da forma como são associados e das condições de radiação nas quais operam, a geração de energia ocorre segundo um ponto de equilíbrio que pode se distanciar significativamente do otimizado, ou seja, a energia total gerada não corresponde à soma dos potenciais individuais. Demonstra-se, através de resultados de simulação e experimentais que associações de módulos podem importar negativamente a geração de energia se forem feitos sem critério. Para tanto, foram usados três módulos fotovoltaicos, com diferentes especificações, a saber: 10 Wp, 20 Wp e 55 Wp. Com isso, pode-se analisar o comportamento de associações contendo módulos que operam sob diferentes condições, mesmo que estes apresentem especificações iguais. Assim, o trabalho oferece subsídios que podem auxiliar o instalador de sistemas fotovoltaicos, contribuindo diretamente com a área comercial.

Palavras-chave: Geração distribuída. Rendimento em instalações fotovoltaicas. Conexão de módulo fotovoltaico em série e paralelo. Curvas características de arranjos fotovoltaicos.

ABSTRACT

DOGADO, Luiz Eduardo. **Analysis of the behavior of photovoltaic modules when connected in series and parallel.** 2018. 49f Conclusion Work of Higher Course of Technology in Industrial Automation - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

In this work, the solar photovoltaic modules are studied, especially with regard to their association in series and in parallel. Each module has a pair of extra power terminals when the energy is continuous when it is subjected to solar energy, depending on the photovoltaic effect. The higher the irradiance, the higher the voltage and current characteristics generated. However, modules are usually accompanied in series or in a file when commercially. The way they are associated and the radiation conditions operate us, the generation of energy is a second plane that can be distancing from the optimized one, that is, the generated energy does not correspond to the sum of the individual potentials. Demonstration, analysis of results and experimental that can be negatively realized by a generation of energy. For different types of photovoltaic, with different specifications: 10 Wp, 20 Wp and 55 Wp. With this, one can analyze the behavior of groups of compounds that are under control of different conditions, even if these gifts can be the same. The work is done with subsidies that can help the installer of photovoltaic systems, contributing directly to a commercial area.

Keywords: Distributed generation. Yield in photovoltaic installations. Serial and parallel photovoltaic module connection. Characteristic curves of photovoltaic arrangements.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	19
1.2 PROBLEMÁTICA.....	19
1.3 HIPÓTESE.....	19
1.4 OBJETIVO.....	20
1.4.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
1.5 JUSTIFICATIVA.....	21
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1 EFEITO FOTOVOLTAICO.....	22
2.2 CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	23
2.3 MODELAGEM DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.....	26
3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS ASSOCIADOS EM SÉRIE E PARALELO.....	31
3.1 ETAPAS DE OPERAÇÃO PARA ASSOCIAÇÕES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS LIGADOS EM SÉRIE.....	31
3.2 ETAPAS DE OPERAÇÃO PARA ASSOCIAÇÕES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS LIGADOS EM PARALELO.....	33
3.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÕES.....	34
3.4 RESULTADOS PRÁTICOS.....	37
4 METODOLOGIA.....	45
5 CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIAS.....	47

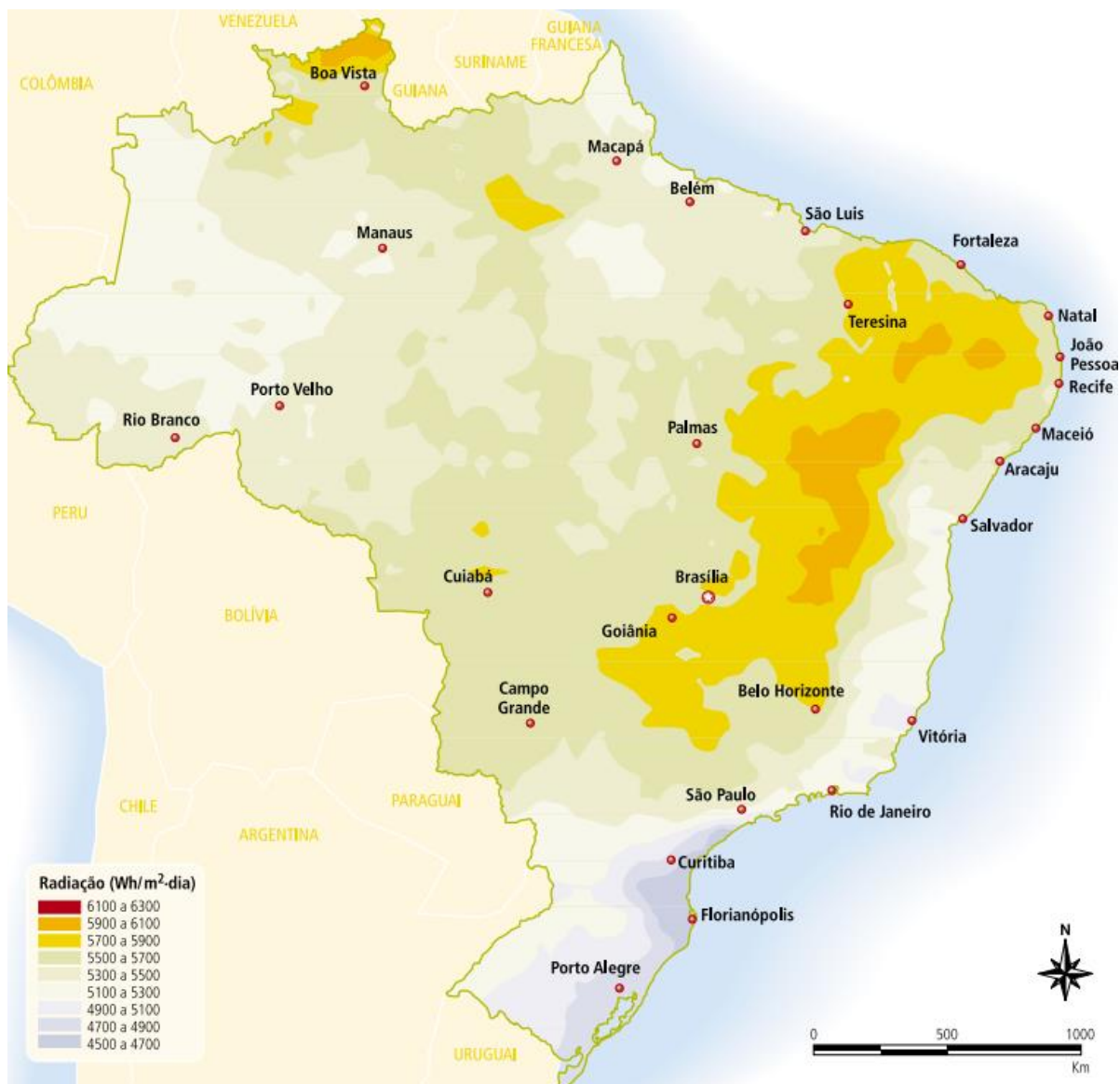
1 INTRODUÇÃO

Diferentes formas de energia são utilizadas pelo homem desde os tempos mais remotos. Antigamente, utilizava-se a energia térmica proveniente da queima de galhos de árvores para obter calor e iluminação nos períodos noturnos. Com o passar dos tempos a dependência do homem para com o uso da energia tem aumentado significativamente. Hoje somos muito dependentes de energia, seja ela utilizada para nos aquecer, para nos divertir, para nos movimentar ou para qualquer outro tipo de uso que dela façamos. (HECKTHEUER, 2001).

A energia fóssil é a fonte de geração de 80% do consumo mundial de eletricidade, mas, de acordo com estimativas da Agência Mundial de Recursos Energéticos (WER), realizadas em 2013, estima-se que as fontes fósseis serão deslocadas em pelo menos 5% ao ano para as fontes de energia renováveis até 2020, o que é muito importante, dado que, num período inferior a 100 anos, está previsto o esgotamento das reservas de combustíveis fósseis. Portanto, é necessário continuar com a pesquisa de alternativas para geração de energia elétrica que, a curto ou médio prazo, possam substituir as fontes convencionais de geração e, ao mesmo tempo, permitir o suprimento de energia em áreas que não têm acesso à energia elétrica, geração *off-grid* (BORGES, SERA, GÁMEZ, 2015).

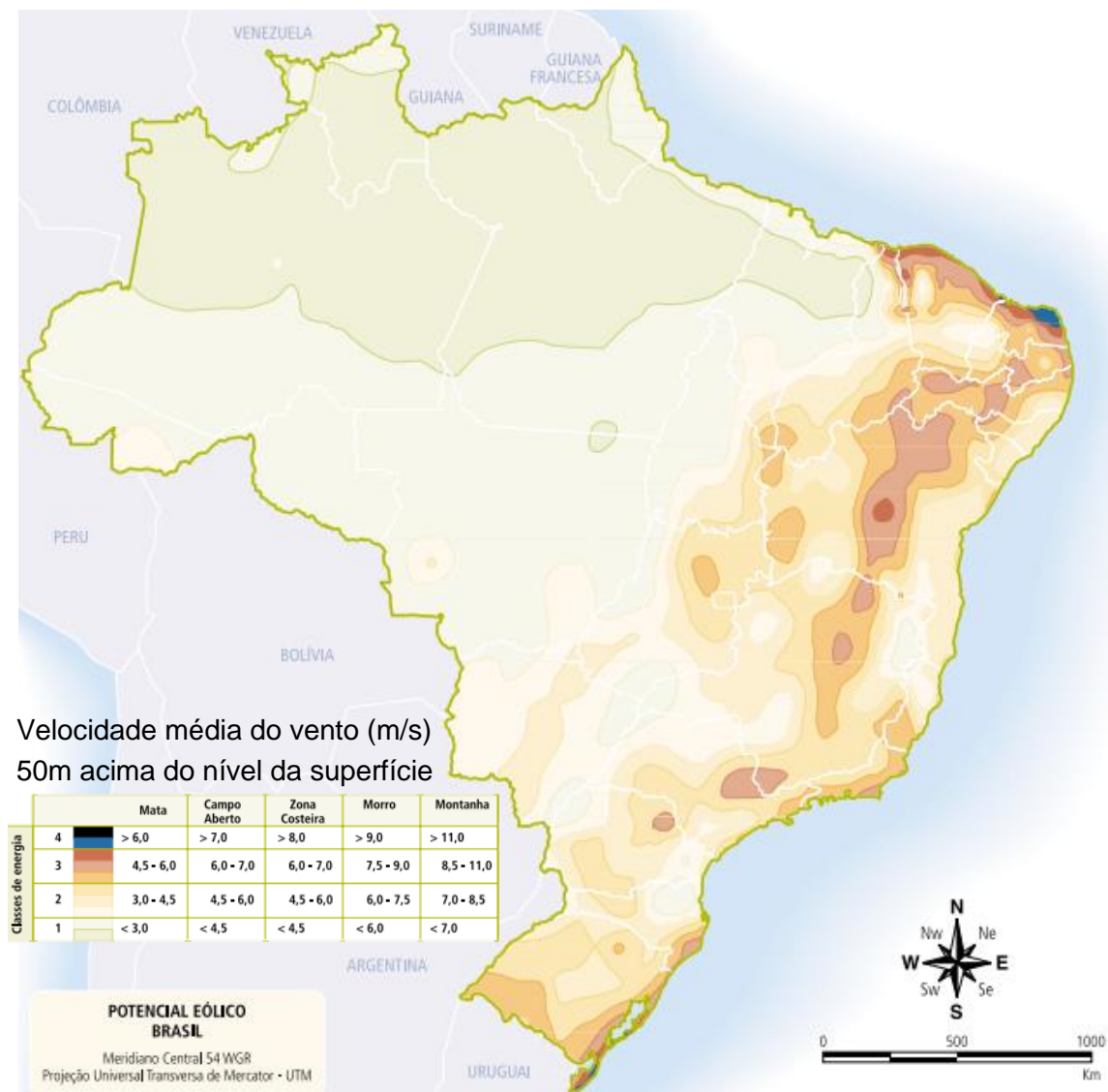
No Brasil, a matriz energética está predominantemente focada na geração hidráulica. Porém, 14 mil megawatts desta energia vêm de geradores termoelétricos, o equivalente a 25% da demanda total do país, que são acionados em períodos desfavoráveis para as hidrelétricas. Essa forma de geração, além de ter maior custo, inclusive para o consumidor, através das bandeiras tarifárias, também é poluente. Por isso mesmo, as termoelétricas só são acionadas quando necessário. Posto isso, destaca-se que o Brasil possui vocação natural para geração de energia elétrica por fontes que até alguns anos eram tratadas como alternativas. Geradores solares ou eólicos dispõem de grande potencial em nosso país, conforme mostra o gráfico da radiação solar, Figura 1, e Figura 2 da velocidade média do vento. Contam ainda com as vantagens de serem fontes não poluentes e um mercado de trabalho inovador para uma população com alto índice de desemprego.

Figura 1 - Radiação solar global diária – média anual típica (Wh/m². dia).



Fonte: Atlas de Energia Elétrica - Aneel - 2ª Edição

Figura 2 - Velocidade média anual do vento a 50m de altura.



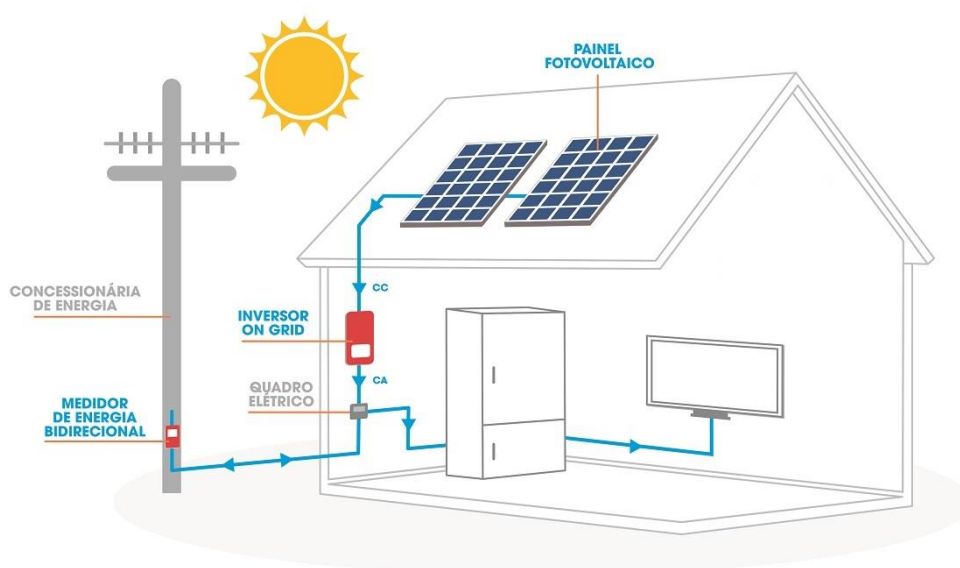
Fonte: Atlas de Energia Eólica - Aneel - 2ª Edição

Martins, Rütther, Pereira e Abreu (2008) estabelecem que os investimentos em energia distribuída são apresentados como alternativas viáveis para elevar a disponibilidade de energia elétrica. Países como Alemanha, Estados Unidos, Espanha, França, Itália e Japão desenvolveram mecanismos que reduzem a dependência de combustíveis fósseis com a introdução de opções renováveis em suas fontes primárias de energia e descentralizaram a geração de energia. Geração distribuída é entendida como aquela localizada perto de pequenos centros de carga, conectada ao sistema de distribuição ou na própria unidade consumidora, e não despachada pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). A fim de introduzir

mecanismos de fontes de energias renováveis na matriz energética brasileira, a Agência Nacional de Energia Elétrica, Aneel, publicou a Resolução Normativa n. 482/2012, que regulamenta os critérios para a aplicação da geração distribuída, por meio de micro e minigeração (ANEEL, 2012). A geração distribuída no setor energético brasileiro é implementada por meio de um sistema de compensação em termos de energia consumida e injetada. Este sistema, denominado “*net metering*”, consiste em medir o fluxo de energia em uma unidade consumidora equipada com geração própria, por meio de medidores bidirecionais. Haverá redução no consumo e na carga de alimentadores em regiões com alta densidade de carga, com redução de perdas e, em alguns casos, postergação de investimentos na expansão dos sistemas de distribuição.

Rodriguez e Jannuzzi (2002) relatam que a pesquisa e o uso da geração distribuída sempre foram mais evidentes em projetos fora da rede, com sistemas solares fotovoltaicos. O uso de energia solar fotovoltaica aumentou a taxas anuais em torno de 40%, segundo Watts, Valdés, Jara e Watson (2015). No Brasil, o índice de radiação solar varia de 1.500 a 2.200 kWh / m² / ano, sendo que o Estado do Ceará, em particular, possui uma radiação solar de 2.008,3 kWh / m² / ano (ANEEL, 2014). A Figura 3 ilustra o processo de geração de energia solar distribuída, de pequeno porte, que tem tido grande aderência comercial.

Figura 3 - Exemplo de um sistema de geração de energia solar.

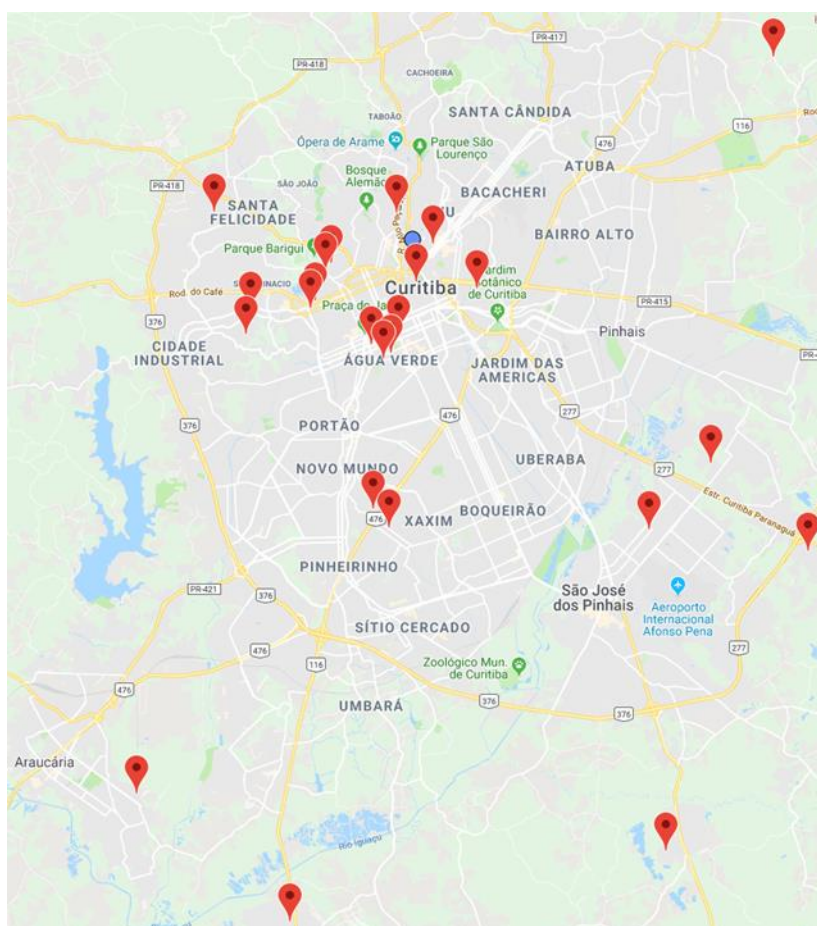


Fonte: Site Lenenergy.com.br 06/2018

Landau (2008) esclarece que a diversificação cumpre valioso requisito de segurança energética do sistema interligado. Jannuzzi e Melo (2013) defendem que o uso e a disseminação da tecnologia de geração de energia solar fotovoltaica são opções viáveis devido a três fatores: 1. altas tarifas residenciais; 2. grande disponibilidade de radiação solar; e 3. redução no preço de módulos solares e painéis. (CARVALHO, ABREU, 2017).

A energia solar apresentada neste trabalho, é protagonista na geração de energia elétrica. Diversas empresas voltadas a instalação de micro ou minigeração têm se estabelecido nos últimos cinco anos. A Figura 4, dá uma ideia de como se encontra esse mercado na cidade de Curitiba.

Figura 4 - Empresas que fazem instalação fotovoltaica em Curitiba.

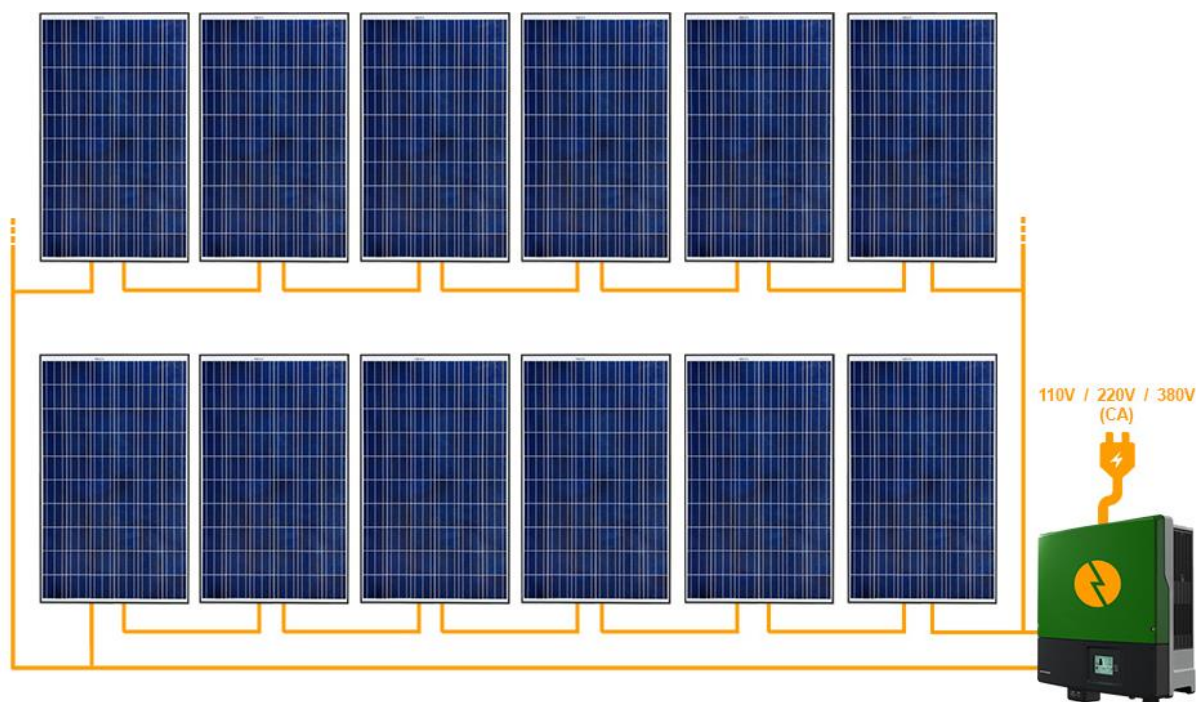


Fonte: Site do Portal Solar 05/2018

As empresas retratadas são especializadas em instalar painéis fotovoltaicos em telhados de consumidores que desejam reduzir suas faturas através do processo de compensação de energia. Os telhados nem sempre oferecem condições ideais

para tais instalações. Problemas como sombreamento parcial, direcionamento e inclinação das faces e a área disponível interferem na forma como as placas devem ser fixadas. Além disso, a disponibilidade de diferentes placas pode indicar a forma como essas devem ser interligadas. Basicamente, ligações em série e paralelo são adotadas em instalações comerciais, como mostra a Figura 5.

Figura 5 - Ligação Série-Paralelo em um inversor centralizado.



Fonte: Site do Portal Solar 05/2018

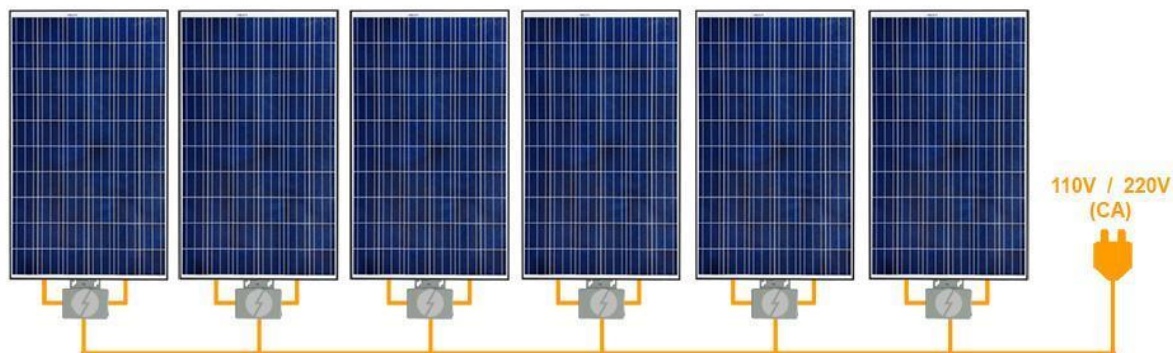
Em um inversor com duas entradas independentes, é possível obter duas fileiras de painéis solares conectadas em cada entrada e desta forma estas fileiras podem ter os painéis virados para duas direções diferentes. Em micro inversores, é possível ter painéis com orientações diversas sem que um painel afete a produção de energia do outro.

Quando os painéis são conectados em série, todos eles precisam ser instalados com a mesma orientação para produzirem a tensão correta e o inversor funcionar corretamente. Tradicionalmente, os sistemas que usam o inversor central precisam de uma tensão para funcionar bem, variando de 300 V até 800 V.

Embora não seja o foco do trabalho, registra-se que em instalações onde o telhado tem muito sombreamento ou diferentes orientações, tem-se utilizado o micro inversor, que geralmente é ligado individualmente em cada painel. Seu objetivo é

justamente impedir que um painel afete a produção de energia do outro. Na Figura 6, é ilustrada uma instalação utilizando micro inversores conectados individualmente por painel.

Figura 6 - Ligação dos painéis fotovoltaicos em micro inversores.



Fonte: Site do Portal Solar 05/2018

Como as saídas de energia são completamente independentes umas das outras, a sujeira nos painéis afeta apenas a produção de energia de um painel sem impactar nos outros. De acordo com o Laboratório Nacional de Energia Renovável dos EUA (NREL), este efeito pode fazer com que o seu sistema produza até 12% a mais de energia por ano.

É justamente para estabelecer critérios de ligação desses painéis que este trabalho é proposto. Para tanto, são levantadas as características individuais de diversos painéis fotovoltaicos e como estes se comportam quando conectados em arranjos séries e paralelos.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O trabalho visa analisar o comportamento elétrico de arranjos fotovoltaicos submetidos a diferentes configurações de operação, sendo que estas estão relacionadas a aplicações práticas vivenciadas na área comercial.

1.3 PROBLEMÁTICA

A montagem de um arranjo fotovoltaico, normalmente feita sobre uma cobertura, envolve aspectos práticos como direcionamento e inclinação dos módulos, especificações elétricas e mecânicas, capacidade de geração, possibilidade de expansão e a existência de regiões sombreadas. Cada um desses aspectos influencia na configuração do arranjo, ou seja, número de fileiras, quantidade de módulos por fileira e a disposição das mesmas. Dependendo de como os módulos são conectados em série ou paralelo, pode-se ter um impacto maior ou menor no rendimento do sistema.

Tradicionalmente, montagens práticas procuram adequar o arranjo de painéis fotovoltaicos à topologia disponível na cobertura, buscando o melhor aproveitamento da mesma. Assim, a questão estrutural da cobertura acaba tendo importância decisiva na montagem do arranjo. Eventuais perdas de rendimento são compensadas com acréscimos de painéis fotovoltaicos, encarecendo sensivelmente a instalação. A efetiva compreensão do comportamento elétrico das ligações pode levar a economias significativas, uma vez que se pode gerar a mesma quantidade de energia com arranjos menores, apenas evitando desperdícios.

1.4 HIPÓTESE

H0 - Módulos fotovoltaicos com diferentes capacidades de geração ligados em série devem levar a uma soma das tensões individuais, sendo que a maior corrente individual deve definir a corrente da fileira.

H1 - As correntes individuais dos módulos ligados em paralelo devem se somar. A tensão desta conexão deve ser limitada pelo módulo com maior capacidade.

H2 - As ligações série-paralelo devem resultar em uma capacidade de geração cuja potência total é diferente da soma das potências individuais dos módulos.

H3 - Arranjos constituídos com módulos exatamente iguais, sujeitos a sombreamentos parciais ou disposições diferentes, apresentarão diferentes características elétricas para cada módulo.

H4 – Os módulos numa ligação série, paralela ou série-paralela terão um ponto de operação definido pelo inversor, de modo que nenhum irá gerar a máxima potência que é capaz.

1.5 OBJETIVO

Estudar o comportamento de módulos fotovoltaicos comerciais conectados em série e em paralelo de modo que reflitam aspectos práticos vivenciados na montagem de arranjos fotovoltaicos sobre telhados. Esses aspectos práticos dizem respeito as diferenças das características elétricas que os módulos podem exibir em função de inclinações e direcionamentos diferentes, sujeira e sombreamentos parciais do arranjo.

Uma vez entendido como esses aspectos práticos interferem no rendimento global do sistema, naturalmente serão feitas considerações que servirão de orientação para montagem de arranjos usando as mais diversas formas de configurá-los.

1.5.1 Objetivos Específicos

- Consultar repositórios especializados na área de processamento de energia, especialmente sobre geração fotovoltaica;
- Especificar alguns módulos fotovoltaicos com características elétricas diferentes;
- Analisar o comportamento do arranjo em simulador computacional;
- Caracterizar arranjos em série e paralelo, especialmente em relação ao rendimento;

- Elaborar considerações técnicas para orientar a montagem de arranjos com módulos fotovoltaicos sujeitos a diferentes comportamentos elétricos.

1.6 JUSTIFICATIVA

Sistemas de geração de energia elétrica a partir da luz solar, fotovoltaicos, ganharam seu maior incentivo a partir de 2012, com a publicação da Resolução Normativa nº 482/2012 – ANEEL, que passou a difundir o acesso de geração distribuída às redes comerciais de distribuição de energia elétrica. Outros incentivos relacionados à isenção de impostos estaduais e federais tem sido concedido. Ainda assim, os geradores de energia solar fotovoltaica correspondem a um investimento significativo que, com certo otimismo, se paga em aproximadamente cinco anos. Assim, o próprio custo do sistema constitui preocupação natural com o rendimento do mesmo. Quanto menor for esse rendimento menor será a energia gerada e injetada na rede, aumentando o tempo de retorno financeiro.

Como a tecnologia envolvida no desenvolvimento dos equipamentos garante a operação com o máximo de rendimento, as decisões técnicas relacionadas a montagem do arranjo é que vão impactar no montante de energia gerada. Assim, o trabalho se justifica para que tais decisões sejam tomadas com consciência, principalmente quanto a repercussão que a montagem dos arranjos terá sobre o rendimento global do sistema.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

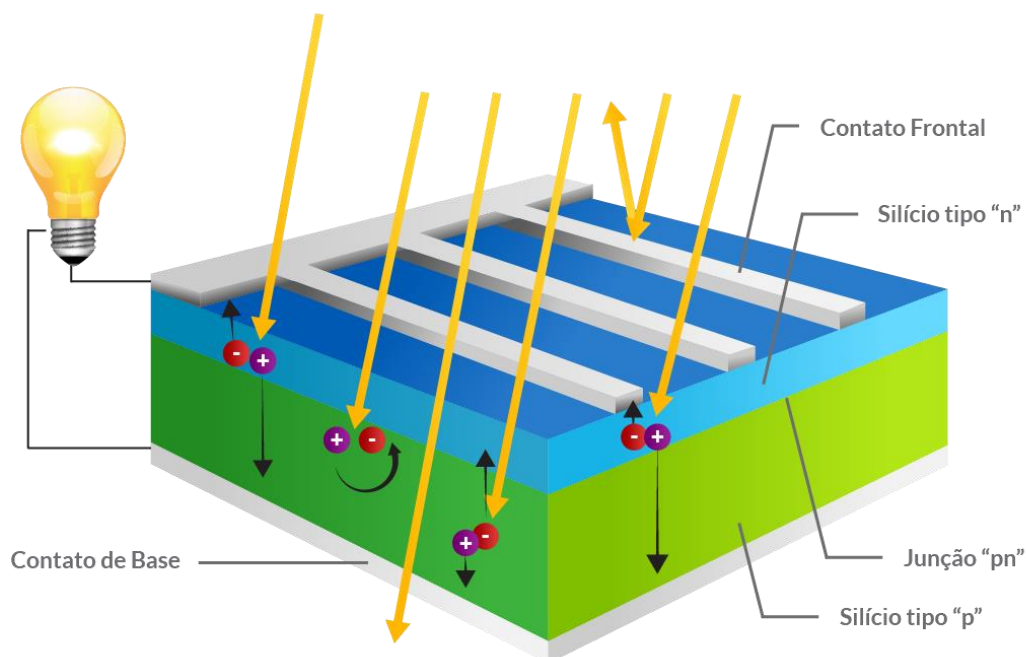
2.1 EFEITO FOTOVOLTAICO

O efeito fotovoltaico foi percebido no século XIX, quando em 1839 Becquerel demonstrou a possibilidade de conversão da radiação luminosa em energia elétrica mediante a incidência de luz em um eletrodo imerso em eletrólito. A primeira célula solar produzida foi em 1883 feita de selênio, com eficiência de conversão de aproximadamente 1%. Isso mudou em 1941 quando Ohl obteve a primeira fotocélula de silício monocristalino. Porém, apenas em 1954, surge uma fotocélula de silício com as características semelhantes às encontradas hoje com uma eficiência de 6%. Os painéis solares feitos com silício policristalino são os mais usados no mundo e hoje representam aproximadamente 80% do mercado, com eficiências que variam de 15% a 18% (AMARAL FADIGAS).

A transmissão da energia do Sol para a Terra se dá através da radiação eletromagnética. Para a análise da radiação na superfície terrestre é importante o conhecimento da intensidade da radiação e de sua composição espectral. A radiação solar que incidente no limite superior da atmosfera sofre uma série de reflexões, dispersões e absorções durante o seu percurso até o solo.

A conversão direta de energia solar em energia elétrica é realizada nas células solares através do efeito fotovoltaico, que consiste na geração de uma diferença de potencial elétrico através da radiação. O efeito fotovoltaico ocorre quando fótons (a luz solar) incidem sobre átomos (no caso átomos de silício), provocando a liberação de elétrons, gerando corrente elétrica. Este processo não depende da quantidade de calor, pelo contrário, o rendimento da célula solar cai quando sua temperatura aumenta (GUERRINI, 2001). A Figura 7 ilustra este processo no qual se tem uma base homogênea de silício dopada com materiais trivalentes, representando a região tipo "P", e uma camada superior dopada com material pentavalente, representando a região tipo "N". Entre essas camadas, tem-se a junção "PN" por onde não circula corrente elétrica, pela formação de uma barreira de potencial. Essa situação se reverte quando um circuito externo é conectado entre as regiões P e N.

Figura 7 - Funcionamento de uma célula fotovoltaica de silício cristalizado.



Fonte: Célula Fotovoltaica – O Guia Técnico Absolutamente Completo – Blue Sol

Os campos elétricos que mantinham a barreira de potencial são anulados de modo que um par elétron-lacuna possa se recombinar atravessando a junção. Isso é o que acontece quando um fóton atinge a região tipo N liberando um elétron. Esse elétron atravessa o circuito elétrico externo e se recombina na região P com uma lacuna gerada pelo mesmo processo e que atravessou a junção. Enquanto houver incidência de luz solar sobre a célula fotovoltaica, esse processo se mantém, de modo que a energia elétrica é gerada e fornecida ao circuito externo pelo fluxo de elétrons.

2.2 CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

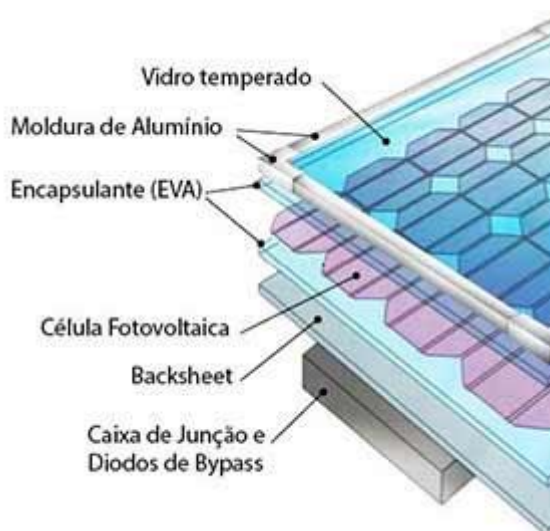
As células fotovoltaicas representam a menor unidade em um sistema fotovoltaico. Em geral, são fabricadas de silício monocristalino, policristalino ou amorfo. São classificadas como células cristalinas ou de filme fino. As células monocristalinas comerciais têm eficiência em torno de 18%. As policristalinas são as mais populares com uma eficiência média de 14%. As células de filme fino têm um custo de fabricação potencialmente mais baixo que as cristalinas, porém sua eficiência varia de 7 a 13% (CASARO, MARTINS, 2008).

A energia destinada a fabricação de cada tipo de célula define seu custo. A célula monocristalina é a que possui o maior grau de pureza. A policristalina possui imperfeições na sua estrutura por ser construída a partir da fusão de blocos de silício puro em moldes especiais, tornando o processo menos dispendioso. A célula de silício amorfo é obtida pela deposição do semicondutor em estado gasoso sobre um substrato, que pode ser até de plástico. A potência necessária para depositar uma película de silício amorfo é bastante baixa. São células semitransparentes (CASARO, MARTINS, 2008).

Os módulos fotovoltaicos são produzidos com potências de 50 Wp até pouco mais de 300 Wp. Dispostos na forma de um arranjo fotovoltaico podem integrar construções, estruturados em fachadas ou telhados.

Módulos fotovoltaicos são construídos a partir da conexão de células fotovoltaicas individualmente conectadas, normalmente em série. A tensão nominal do módulo é dada pelo produto do número de células em série que o compõem pela tensão de cada célula, entre 0,5 V e 0,7 V. A estrutura típica de um módulo fotovoltaico comercial é apresentada na Figura 8.

Figura 8 - Construção do painel fotovoltaico.



Fonte: Site do Portal Solar. 06/2018

As células fotovoltaicas individuais são conectadas usando uma faixa condutora extremamente fina. Esta tira é tecida de cima para baixo de cada célula, de modo que todas as células fotovoltaicas do painel solar fotovoltaico estejam ligadas, assim criando um circuito.

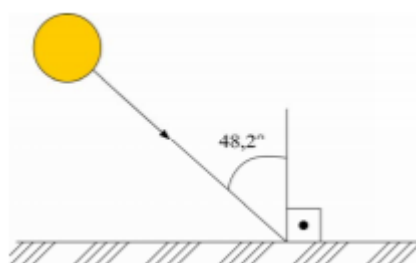
Essa série de células fotovoltaicas é então coberta com uma lâmina de vidro temperado, tratado com uma substância antiaderente e antirreflexo e emoldurado usando um quadro de alumínio.

Na parte de trás do painel fotovoltaico solar, há dois condutores provenientes de uma pequena caixa (caixa de junção). Esses cabos são usados para ligar os painéis solares fotovoltaicos em conjunto, formando um arranjo de painéis fotovoltaicos. Esse conjunto de painéis fotovoltaicos é então conectado através de cabos de corrente contínua ao conversor solar (PORTAL SOLAR, 2018).

As especificações de um painel fotovoltaico são obtidas a partir das condições padronizadas de teste. É o chamado “*standard test conditions*” (STC):

- $P_{sun} = 1\text{kW/m}^2$. Esta é a densidade de potência padrão da radiação solar. É observada em dia de equinócio, no mês de março ou de setembro, ao meio dia de céu claro sob a linha do equador.
- AM 1.5. Esta é a referência de radiação de massa de ar 1,5. Representa a quantidade de atmosfera atravessada pela luz do sol. Seu valor aproximado é obtido calculando-se $1/\cos\theta$, onde θ corresponde à inclinação do sol. Este parâmetro define a composição espectral da luz do sol. O valor de 1,5 de massa de ar corresponde a uma inclinação do sol de $48,2^\circ$ em relação à perpendicular, conforme Figura 9.
- $T = 25^\circ\text{C}$.

Figura 9 Sol a $48,2^\circ$ com a perpendicular.



Fonte: Casaro; Martins 2008

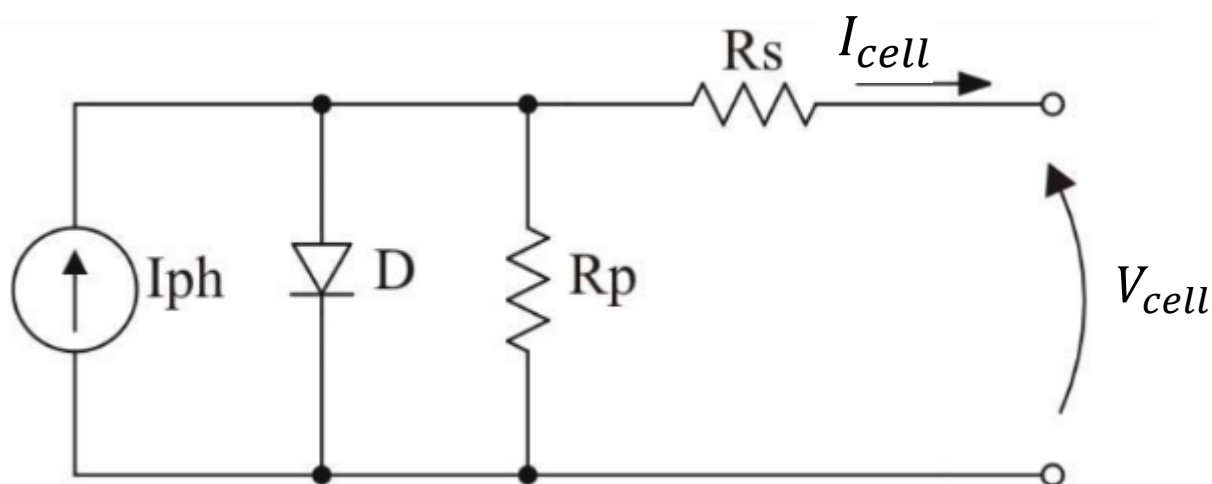
A energia proveniente de arranjos fotovoltaicos é aproveitada em sistemas independentes ou conectados à rede elétrica. Em ambos os casos essa energia normalmente requer processamento eletrônico. Para se desenvolver um processador

de energia solar fotovoltaica, o uso de um programa simulador é imprescindível, bem como um modelo computacional que reflita o comportamento do arranjo fotovoltaico de maneira precisa, incluindo respostas a variações de temperatura e radiação. Se uma técnica de “*Maximum Power Point Tracking*” MPPT estiver envolvida no desenvolvimento do sistema fotovoltaico, a precisão do modelo passa a ser um requisito indispensável (CASARO, MARTINS, 2008).

2.3 MODELAGEM DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Para entender melhor o comportamento de um módulo fotovoltaico é necessário estudar o comportamento de uma única célula, já que o módulo é composto por um conjunto de células conectadas em série. Esse estudo é baseado no circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica, composto basicamente por uma fonte de corrente em paralelo com um diodo. Para dar mais precisão ao modelo, são adicionados ao circuito dois resistores, um série e um paralelo, conforme Figura10.

Figura - 10 Circuito elétrico equivalente



Fonte: Casaro; Martins 2008

A fotocorrente (I_{ph}) é produzida a partir da energia solar incidente sobre a célula (irradiância), ou seja, pela intensidade da radiação solar por unidade de área. A temperatura também influencia na capacidade de geração da célula.

$$I_{ph} = [I_{sc} + \alpha \cdot (T - T_r)] \cdot \frac{P_{sun}}{1000} \quad (1)$$

Onde:

- I_{sc} – Corrente de curto-circuito da célula fotovoltaica em STC.
- α – Coeficiente de temperatura da I_{sc} .
- T_r – Temperatura de referência em STC.
- P_{sun} – Irradiância.
- T – Temperatura em celsius de operação da célula fotovoltaica.

A característica da tensão de saída, V_{cell} , e da corrente de saída, I_{cell} , é influenciada basicamente pelo diodo D, que se encontra no modelo.

Esse diodo é fruto da composição da célula fotovoltaica, construída a partir de uma junção semicondutora P-N. Seu comportamento é dado pela equação:

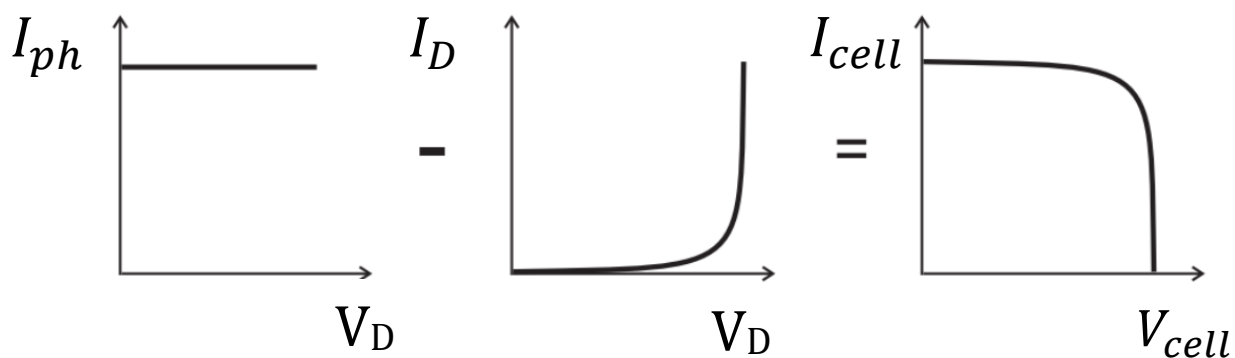
$$I_D = I_o \cdot [\exp(q \cdot V_d / \eta \cdot K \cdot T) - 1] \quad (2)$$

Onde:

- I_o - Corrente de saturação.
- q - Carga do elétron $1,6 \times 10^{-19}$ C.
- k - Constante de Boltzman.
- η - Fator de qualidade da junção p-n.
- T - Temperatura ambiente.

Supondo que o circuito da figura 10 seja encarado de maneira idealizada, as resistências R_s e R_p seriam desprezadas. Assim, a curva característica I-V de uma célula solar fotovoltaica fica descrita unicamente pelo comportamento do diodo D, submetido à fotocorrente I_{ph} , conforme figura 11.

Figura 11- Curva característica I-V de uma célula fotovoltaica baseada na fotocorrente e na corrente de uma junção P-N.



Fonte: M. G. Villalva, J. R. Gazoli, E. Ruppert F.

Considerando as perdas no circuito elétrico equivalente da figura 11, impostas por R_s e R_p , a relação entre tensão e corrente nos terminais de saída da célula fotovoltaica é dada por (3).

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D - \frac{V_{cell} + I_{cell} \cdot R_s}{R_p} \quad (3)$$

Onde:

- V_{cell} , I_{cell} – Tensão e corrente nos terminais de saída de uma célula solar.
- I_{ph} – Fotocorrente.
- R_s , R_p – Resistências série e paralela da célula.

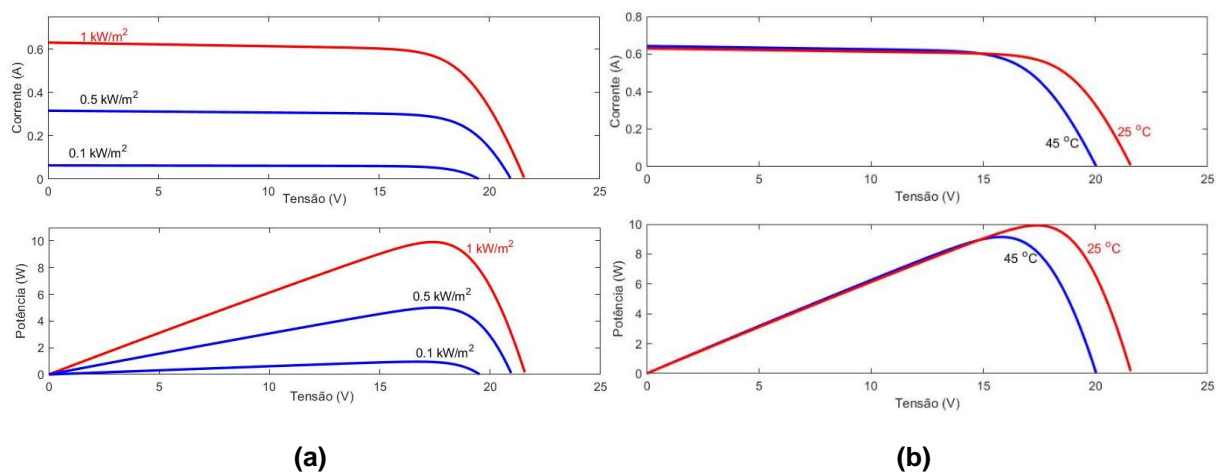
As figuras 12, 13 e 14 geradas conforme (3), apresentam as características I-V para três módulos distintos, cujos dados obtidos dos respectivos *datasheets* são relacionados na tabela 1.

Tabela 1 - Especificações para Módulos Estudados, em STC

Especificações em STC:	P = 10Wp	P = 20Wp	P = 55Wp
Voc [V]	21,6	21,6	22,1
Isc [A]	0,63	1,29	3,28
Vmpp [V]	17,4	18	17,8
Impp [A]	0,57	1,14	3,08
Coeficiente de temperatura de Isc [%/°C]	0,05	0,105	0,06
Coeficiente de temperatura de Voc [%/°C]	-0,34	-0,36	-0,37

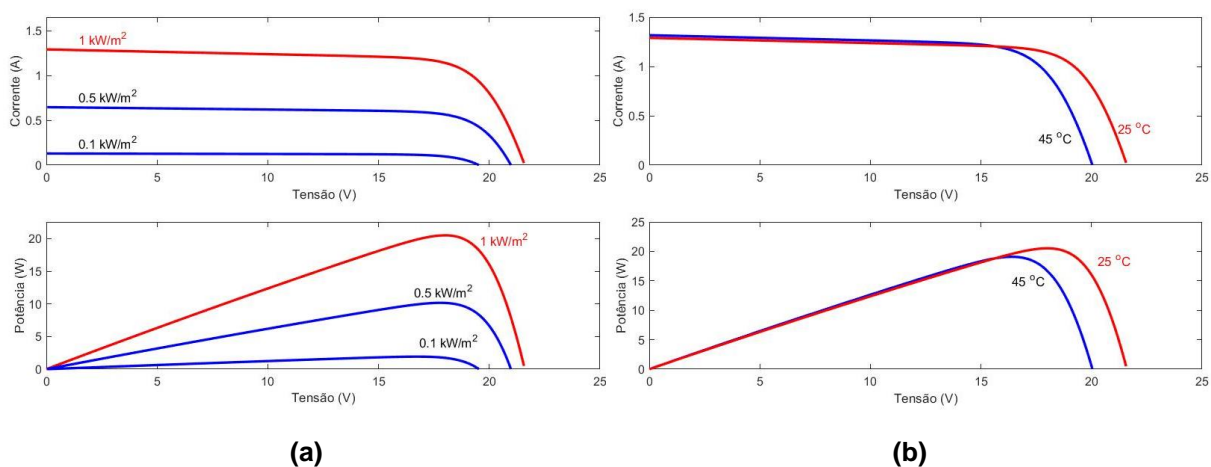
Fonte: Dados obtidos dos respectivos datasheets.

Figura 12 - Características I-V e P-V para módulo fotovoltaico de 10 W considerando (a) diferentes irradiâncias e (b) diferentes temperaturas.



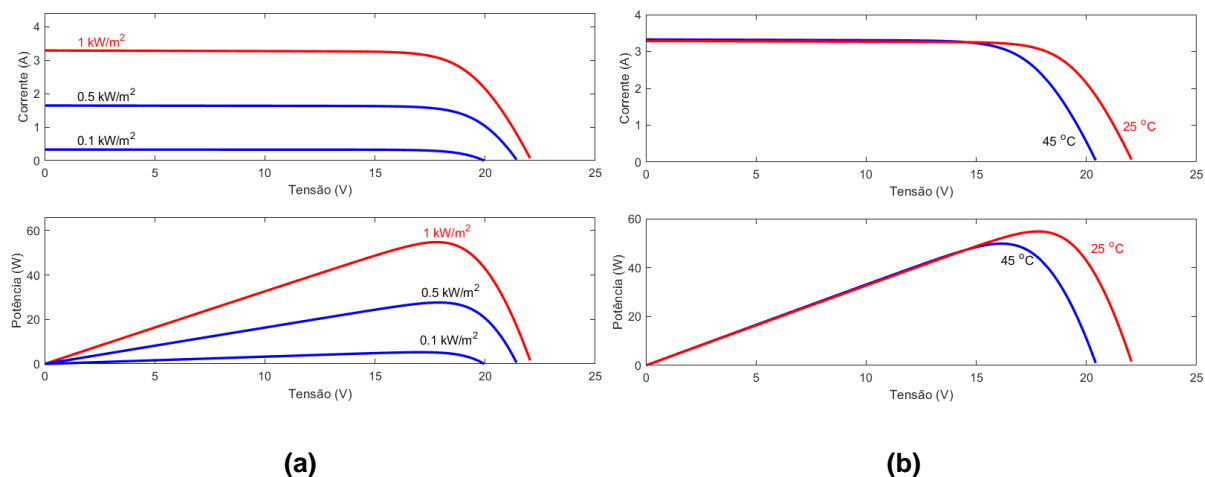
Fonte: Autoria própria.

Figura 13 - Características I-V e P-V para módulo fotovoltaico de 20 W considerando (a) diferentes irradiâncias e (b) diferentes temperaturas.



Fonte: Autoria própria.

Figura 14 - Características I-V e P-V para módulo fotovoltaico de 55 W considerando (a) diferentes irradiâncias e (b) diferentes temperaturas.



Fonte: Autoria própria.

Como se verifica nas figuras 12, 13 e 14, os módulos fotovoltaicos reagem significativamente mediante variações de radiação solar e temperatura. A radiação solar interfere na fotocorrente produzida e a temperatura influencia a tensão de saída do módulo. Ambas as condições impactam na potência que o módulo é capaz de gerar.

3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS ASSOCIADOS EM SÉRIE E PARALELO

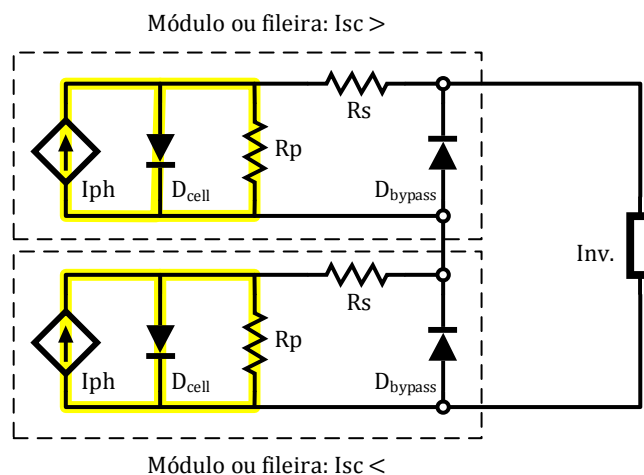
Neste capítulo, são realizadas simulações utilizando o software MatLab e experimentos práticos com módulos fotovoltaicos, cujos dados estão especificados na Tabela 1. São verificados os comportamentos das tensões e correntes resultantes das associações dos três módulos conectados em série e em paralelo. Esses comportamentos são apresentados em gráficos I-V para cada associação. Tanto no simulador quanto na prática, a tensão dos terminais de saída do arranjo é variada e a corrente monitorada. Para se obter esse efeito na parte experimental, cargas resistivas variáveis foram usadas na obtenção dos mais diversos pontos de operação.

Para que os resultados sejam adequadamente interpretados, são apresentadas inicialmente as etapas de operação que esclarecem o funcionamento dos módulos quando associados em série e paralelo. Esses módulos são representados por circuitos elétricos equivalentes de células fotovoltaicas conectados ao respectivo diodo de *bypass*. Supõem-se dois módulos com diferentes características elétricas conectados a um inversor de frequência que, por sua vez, inicia sua operação por uma tensão superior à tensão V_{oc} da associação. Essa tensão é reduzida até zero, de modo que todas as etapas se estabeleçam. As partes energizadas das associações são destacadas, bem como o trajeto assumido pela corrente.

3.1 ETAPAS DE OPERAÇÃO PARA ASSOCIAÇÕES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS LIGADOS EM SÉRIE.

Etapa 1 ($I_{sc1} < I_{sc2}$ e $I_{inv} = 0$): antes que o inversor comece a drenar corrente, o efeito fotovoltaico produz pares elétrons-lacunas que acabam se recombinando através da junção P-N da célula solar. A tensão sobre o inversor é dada pela soma das tensões dos módulos que compõem a associação série. A figura 15 ilustra esta etapa.

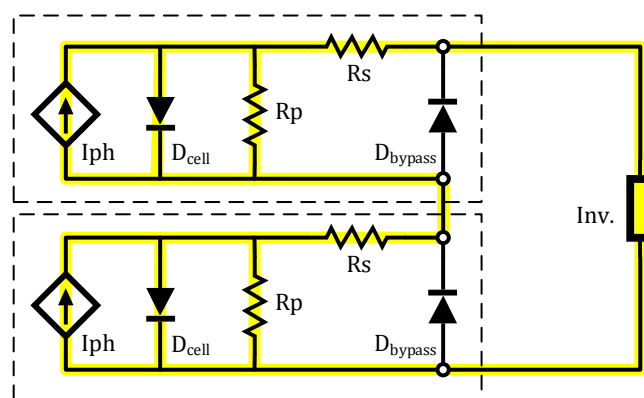
Figura 15 Associação de fileiras em série com corrente de carga igual a zero.



Fonte: Autoria própria.

Etapa 2 ($I_{sc1} < I_{sc2}$ e $I_{Inv} < I_{sc1}$): o inversor drena corrente igualmente das duas fileiras, à medida que vai reduzindo a tensão do barramento. Nesta etapa, o inversor encontra um ponto de máxima potência e, provavelmente, interromperá o rastreamento, drenando a menor corrente individual da associação série.

Figura 16 Associação de fileiras em série com fileiras fornecendo a mesma corrente de carga.

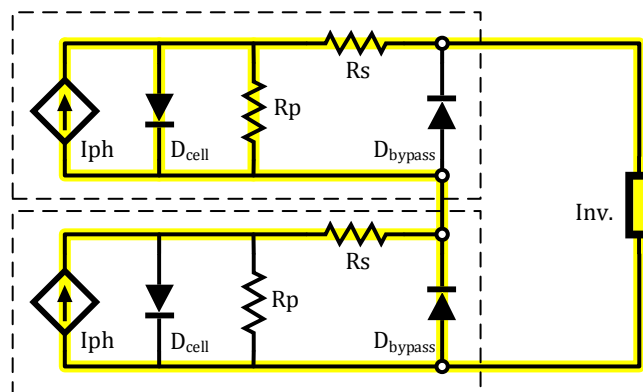


Fonte: Autoria própria.

Etapa 3 ($I_{sc1} < I_{sc2}$ e $I_{Inv} > I_{sc1}$): quando a menor corrente de curto-circuito é superada, os diodos de *bypass* da fileira 1 são polarizados diretamente e passam a conduzir a corrente excedente da fileira 2. A fileira 1 passa a funcionar como se estivesse em curto-circuito, com a tensão em seus terminais definida pela queda de tensão dos diodos de *bypass*, o que é muito menor que a tensão no “*Maximum Power Point*” MPP. A tensão sobre o inversor é praticamente igual a tensão sobre a fileira 2.

Se esta etapa ocorrer, o inversor encontrará um segundo ponto de máxima potência que, no caso, é o MPP global da associação.

Figura 17 Associação de fileiras em série configurando curto-circuito em uma fileira.

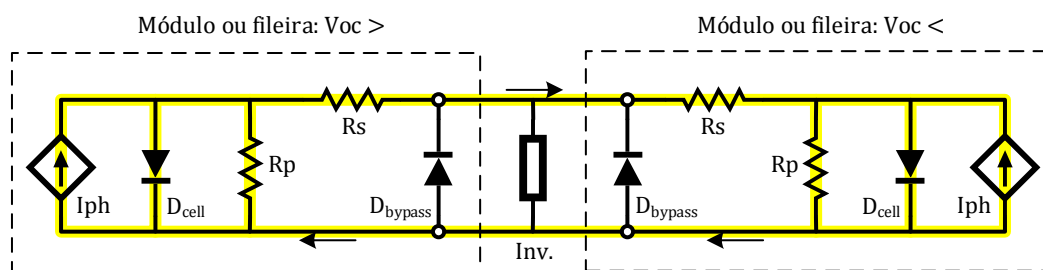


Fonte: Autoria própria.

3.2 ETAPAS DE OPERAÇÃO PARA ASSOCIAÇÕES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS LIGADOS EM PARALELO: $V_{oc1} > V_{oc2}$

Etapa 1 ($I_{Inv} = 0$; $V_{Inv} = V_{oc2} + V_{Rs2}$): a fileira com menor V_{oc} estabelece a tensão do barramento, que resultará superior à V_{oc2} , porém muito próxima desse valor. A corrente vinda da fileira 1 circula pela 2, provocando uma queda de tensão sobre R_s . Essa queda de tensão se soma à V_{oc2} .

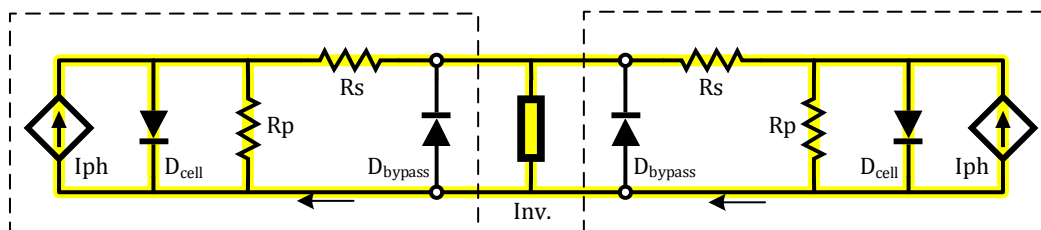
Figura 18 Associação de fileiras em paralelo com corrente de carga igual a zero.



Fonte: Autoria própria.

Etapa 2 ($I_{Inv} > 0$; $V_{oc2} < V_{Inv} < V_{oc2} + V_{Rs2}$): o inversor assume parte da corrente que circula pela fileira 2.

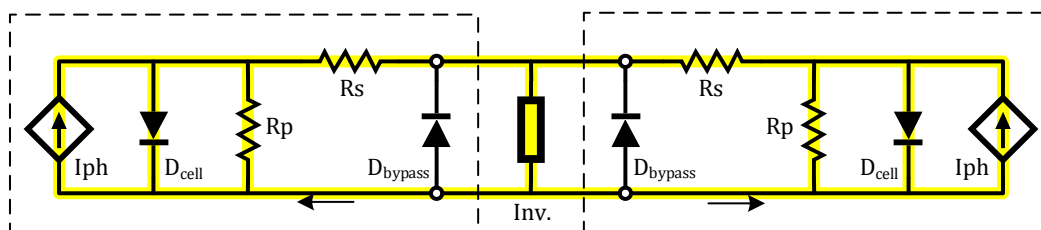
Figura 19 Associação de fileiras em paralelo com corrente fornecida pela fileira de maior potência.



Fonte: Autoria própria.

Etapa 3 ($I_{Inv} < I_{sc1} + I_{sc2}$; $V_{Inv} < V_{oc2}$): as fileiras 1 e 2 passam a fornecer corrente para o inversor. O MPPT posiciona a tensão do barramento próximo ao V_{MPP} da fileira 2, de modo que esta opera otimizada. A corrente injetada pela fileira 1 está próxima ao seu I_{sc} , porém, com tensão significativamente inferior à sua V_{MPP} .

Figura 20 Associação de fileiras em paralelo com carga recebendo a soma das correntes das fileiras.

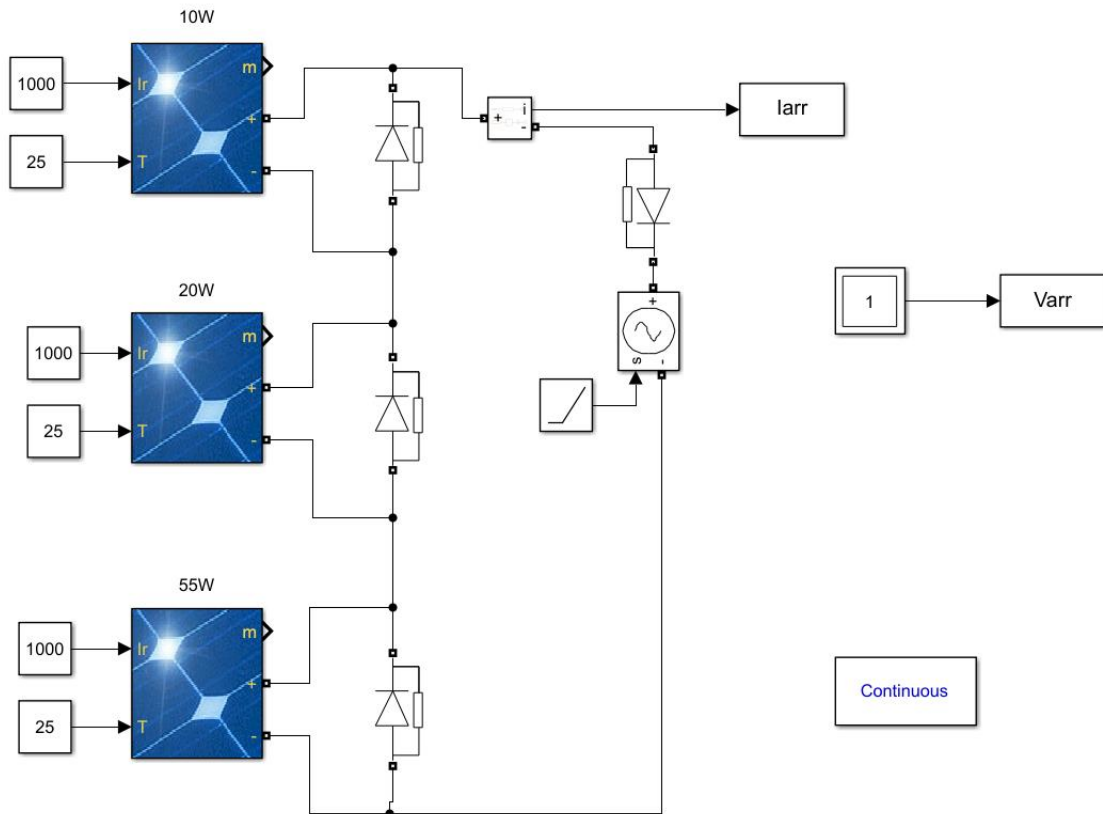


Fonte: Autoria própria.

3.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

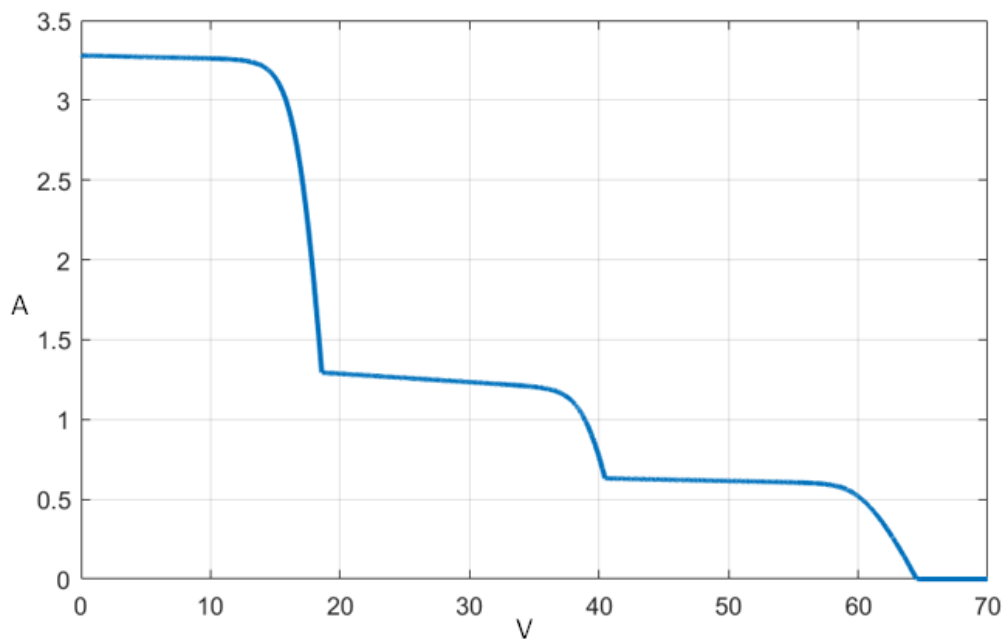
Nesta seção se busca antecipar os resultados a serem obtidos na prática. Para tanto, são realizadas simulações no *software MatLab*, capaz de reproduzir o comportamento elétrico dos módulos de 10W, 20W e 55W, cujos dados estão na Tabela 1. Assim, a Figura 21 mostra a configuração do simulador e a Figura 22, o resultado de tensão e corrente gerados pela associação.

Figura 21 - Simulação no MatLab de uma ligação em série dos módulos 10W, 20W e 55W.



Fonte: Autoria propria.

Figura 22 - Curva característica para uma ligação em série dos módulos 10W, 20W e 55W.

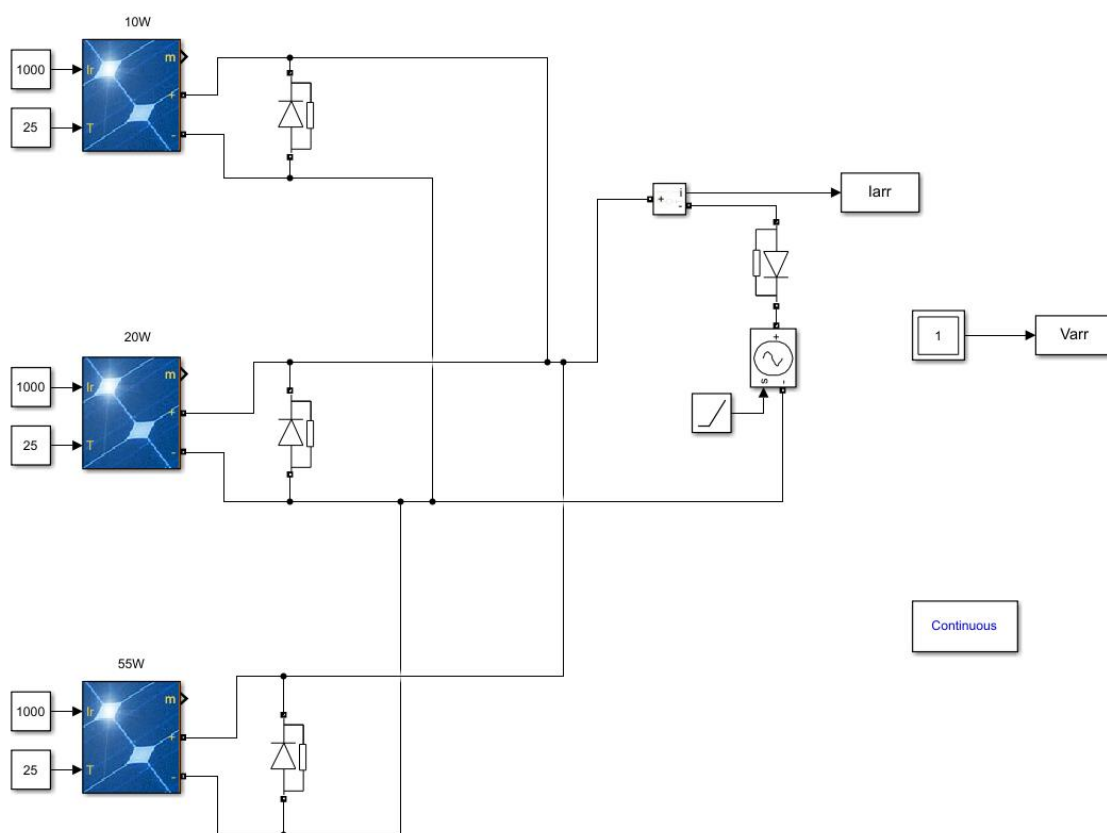


Fonte: Autoria propria.

Na Figura 21, os diodos colocados em paralelo com cada módulo atuam como diodos de *bypass*, uma vez que essa função não foi implementada no modelo computacional.

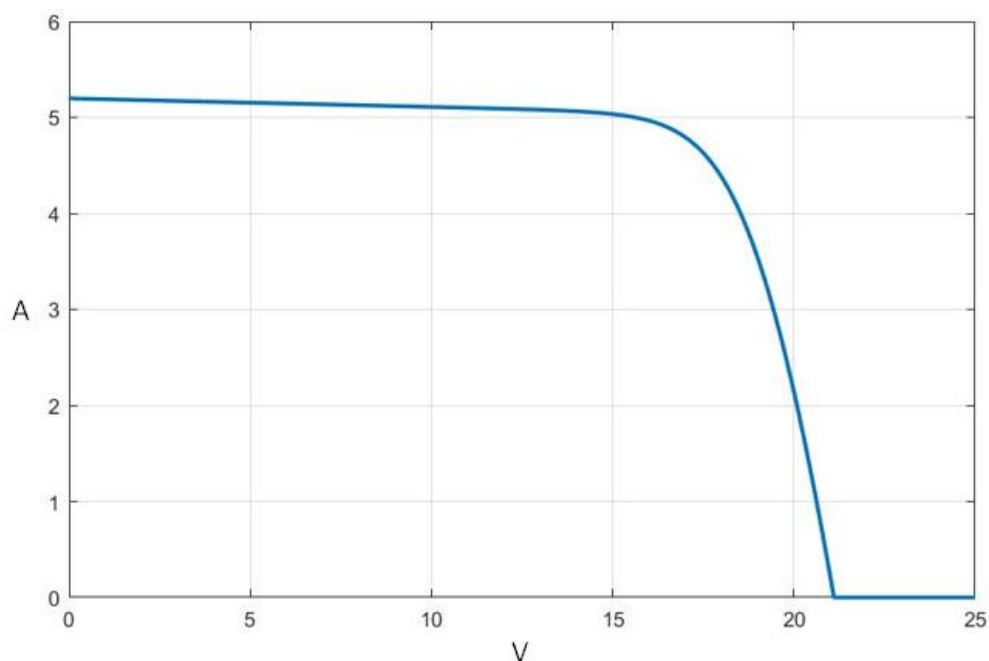
Para a figura 23, os módulos são conectados em paralelo. Da mesma forma como na ligação em série, a associação é conectada à fonte de tensão variável, capaz de abranger toda a gama de funcionamento dos módulos. A curva característica resultante é apresentada na Figura 24.

Figura 23 - Simulação no MatLab de uma ligação em paralelo dos módulos 10W, 20W e 55W.



Fonte: Autoria propria.

Figura 24 - Curva característica para uma ligação em paralelo dos módulos 10W, 20W e 55W.



Fonte: Autoria própria.

A partir desses resultados de simulação, pode-se esperar que numa ligação em série de três módulos a maior corrente será a corrente de curto-circuito do módulo de 55W e a maior tensão resultará da soma das tensões de circuito aberto dos três módulos.

Para a ligação em paralelo, a maior corrente resultará das somas das correntes de curto-circuito e a maior tensão será a tensão de circuito aberto do módulo de 10W. Ressalta-se que a tensão de circuito aberto deste módulo é a menor dentre os módulos associados.

3.4 RESULTADOS PRÁTICOS

Na obtenção dos resultados práticos, foi montada uma bancada contendo os módulos, medidores e carga variável, conforme ilustram as Figuras 25, 26 e 27.

Figura 25 - Bancada para experimentação de módulos de 10W, 20W e 55W conectados em série e paralelo.



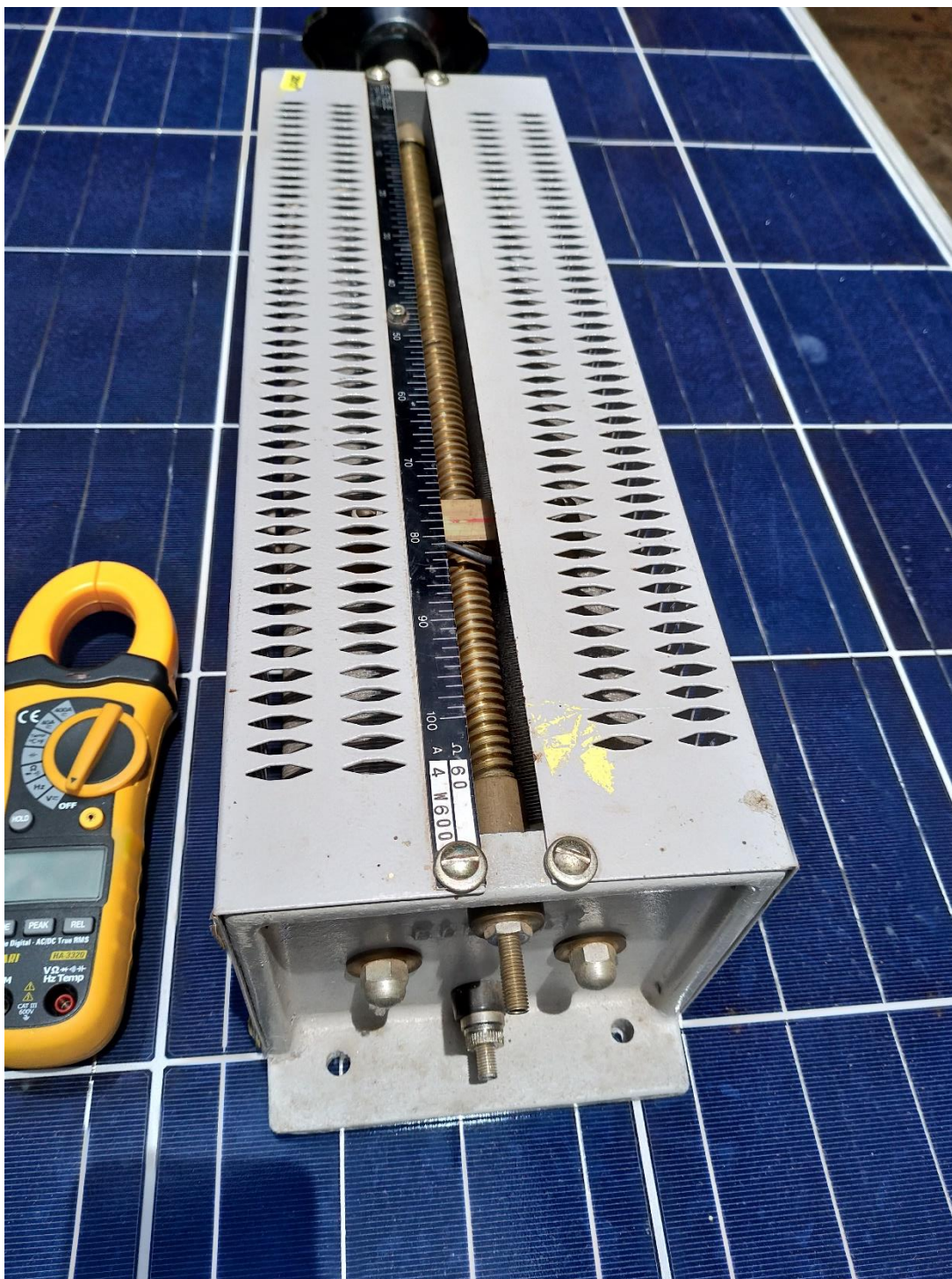
Fonte: Autoria propria.

Figura 26 - Instrumentos usados nas medições.



Fonte: Autoria propria

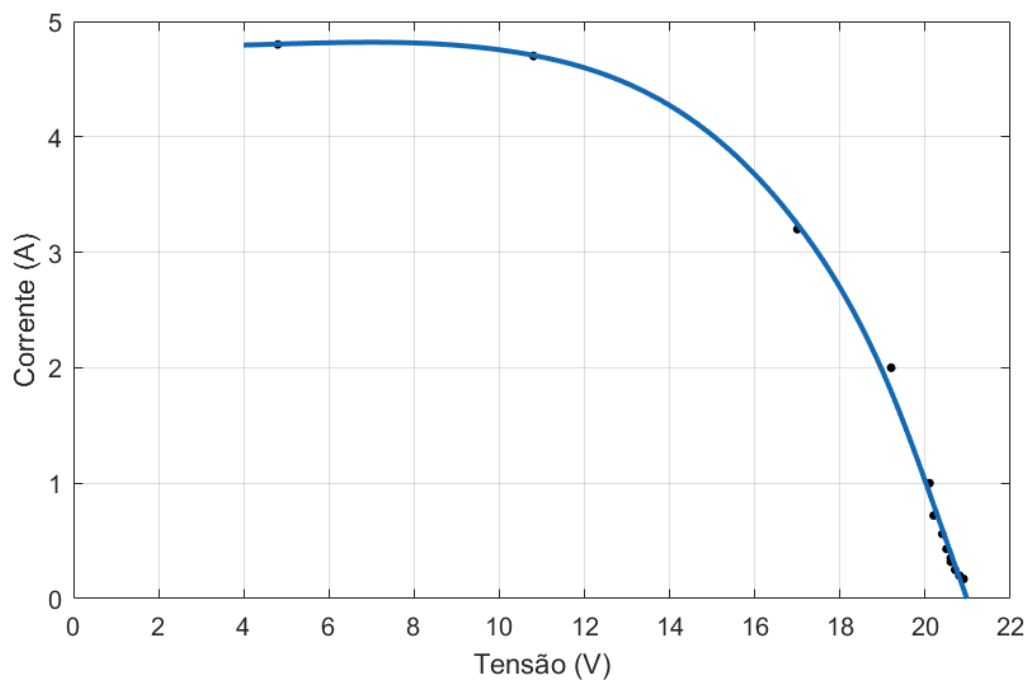
Figura 27 - Detalhe do resistor variável usado como carga.



Fonte: Autoria própria.

No experimento inicial, os módulos foram ligados em paralelo e diversos pontos de operação foram obtidos. A figura 28 retrata o comportamento obtido.

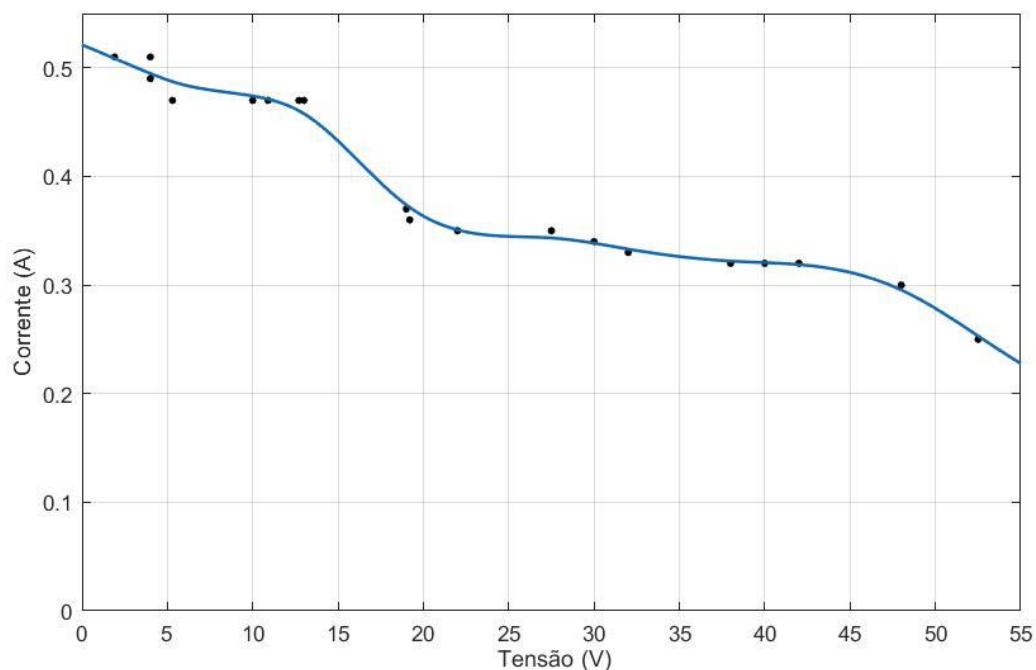
Figura 28 - Curva gerada por interpolação dos pontos obtidos da ligação em paralelo dos módulos 10w, 20w e 55w.



Fonte: Autoria própria.

Alcançado um resultado coincidente com o esperado para a ligação paralela, a conexão em série do módulo de 10W, 20W e 55W foi realizada. O resultado é apresentado na figura 29.

Figura 29 - Curva gerada por interpolação dos pontos obtidos da ligação em série dos módulos 10w, 20w e 55w.



Fonte: Autoria própria.

Tendo em vista que a figura 29 não retratou o comportamento desejado, as caixas de junção das placas de 10W e de 20W foram abertas. A caixa do módulo de 55W é lacrada e não foi aberta. A figura 30 apresenta em detalhe o interior da caixa de junção, semelhante para ambas as placas.

Figura 30 - Caixa de Junção do módulo 10W.



Fonte: Autoria própria.

Observa-se pela figura 30 que o diodo de bypass está conectado incorretamente, não exercendo qualquer função. Assim, o experimento série foi realizado com o módulo de 55W e uma nova placa, de 260W, cujos dados estão apresentados na tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Dados de placa de módulo fotovoltaico de 260W.

Especificações em STC:	P=260W
Voc [V]	37,7
Isc [A]	9,09
Vmpp [V]	30,3
Impp [A]	8,59
Coeficiente de temperatura de Isc [%/°C]	0,05
Coeficiente de temperatura de Voc [%/°C]	-0,32

Fonte: Dados obtidos do respectivo datasheet.

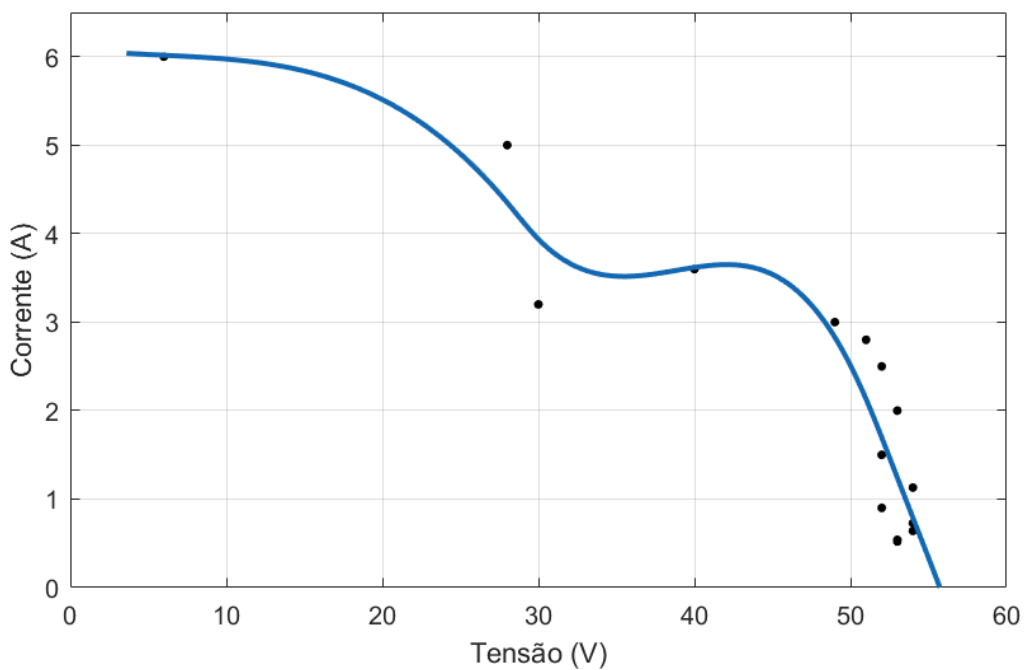
A figura 31 ilustra a nova configuração da bancada e o resultado da associação série é apresentado na figura 32.

Figura 31 - Bancada para experimentação de módulos de 55W e 260W ligados em série.



Fonte: Autoria própria.

Figura 32 - Curva gerada por interpolação dos pontos obtidos da ligação em série dos módulos 55W e 260W.

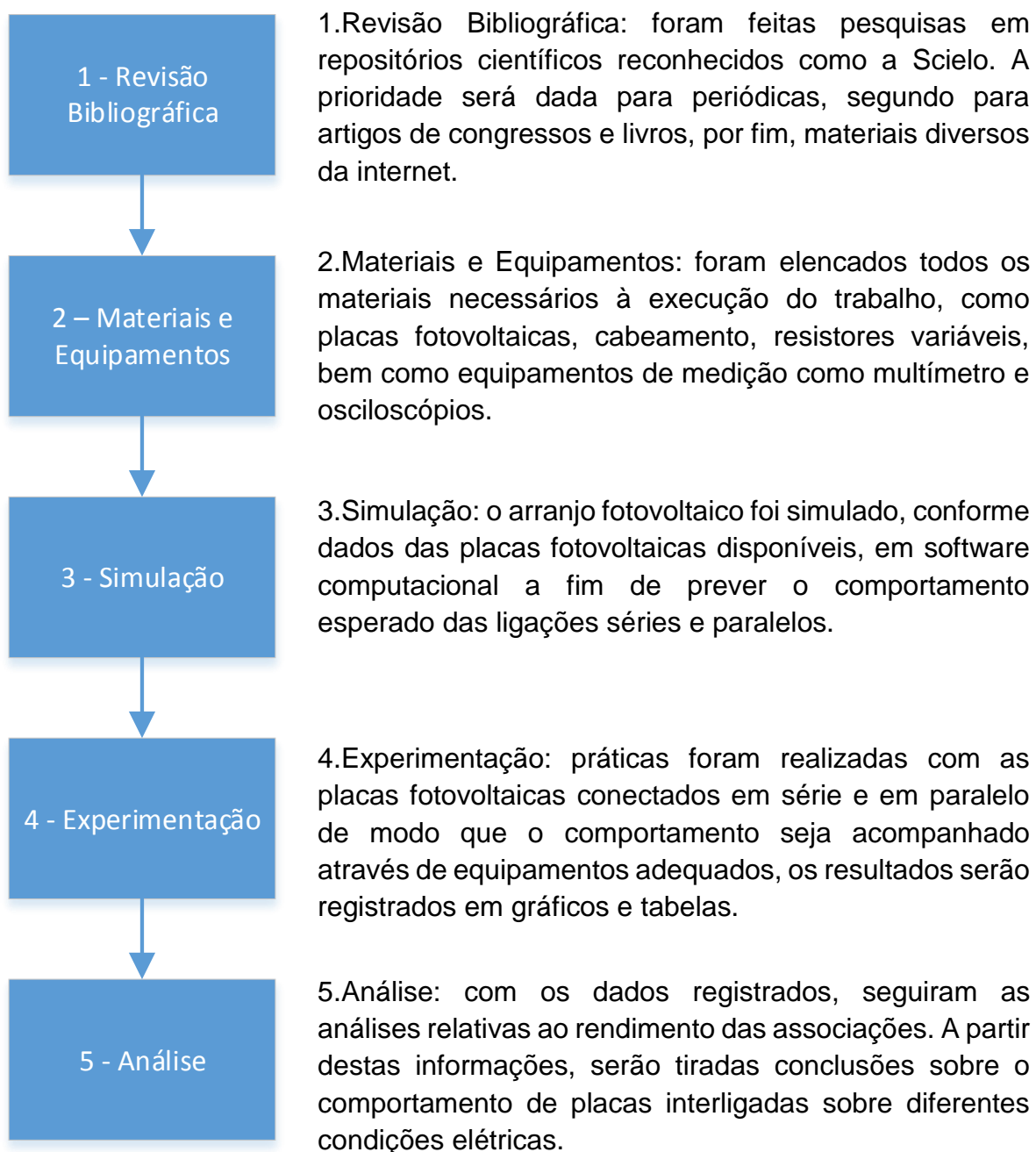


Fonte: Autoria própria.

Verificou-se que os diodos de *bypass* são fundamentais numa ligação em série com módulos operando em diferentes condições.

4 METODOLOGIA

O trabalho proposto apresenta-se como uma pesquisa aplicada de caráter experimental com abordagens qualitativas em função dos estudos em torno das formas de onda características de cada módulo e das possibilidades de configurações para um arranjo fotovoltaico, assim como quantitativas, resultantes de medições e análises das tensões, correntes e rendimentos obtidos das mais diversas associações entre módulos fotovoltaicos. Segue fluxograma detalhando as etapas do trabalho.



5 CONCLUSÃO

Em uma visão geral, o trabalho apresentou resultados satisfatórios, tanto na parte de simulação no *MatLab* quanto nas experiências com os módulos. Associações em série e paralelo tem suas vantagens e desvantagens, terá que levar em conta essas condições de instalação.

A associação de módulos em série pode levar uma parte dos diodos de bypass a conduzirem a corrente da fileira. Em geral, cada módulo possui dois ou três diodos de *bypass*. Se alguns módulos da fileira forem submetidos a uma condição de menor produção de energia, o que se reflete na fotocorrente gerada, reduz a corrente que circula por toda a fileira. Caso a fotocorrente gerada por alguns módulos seja completamente comprometida, são os diodos de *bypass* desses módulos que darão vazão à corrente da fileira. Em geral, numa fileira onde módulos operam sob diferentes condições, a tensão resultante da associação é a soma das tensões dos módulos e prevalece a menor corrente individual. Assim, numa associação série não devem ser incluídos módulos com diferentes valores de corrente no ponto de máxima potência. Neste aspecto, a tensão específica de cada módulo é irrelevante, desde que as correntes especificadas sejam iguais para todos os módulos.

Na associação de módulos em paralelo, os diodos de bypass não entram em condução, mas as próprias células fotovoltaicas podem operar como diodos, dando vazão a corrente produzida por outros módulos. Isso ocorre se os módulos tiverem diferentes tensões de circuito aberto e de MPP. Uma vez que a associação é exposta ao sol, a tensão que se estabelecerá estará muito próxima da menor tensão de circuito aberto. Esse módulo ou fileira pode se danificar uma vez que os demais módulos injetarão corrente no mesmo. Além do diodo formado pela junção P-N das células fotovoltaicas, o resistor série, R_s , também estará no caminho da corrente, por isso, a tensão resultante é pouco maior que V_{oc} .

Concluimos que nas ligações série, os módulos devem ter as mesmas especificações de corrente de curto circuito e de corrente no MPP, enquanto que na ligação paralela, os módulos devem ter especificações iguais para a tensão de circuito aberto e no MPP. Assim, na ligação série, as tensões se somarão e a corrente circulará igualmente por todos os módulos. Já, na ligação paralela, as correntes se

somarão enquanto que a tensão de operação nominal atenderá o requisito de todos os módulos igualmente.

Em um telhado onde todos os módulos são iguais, mal instalados com direções e inclinações diferentes, é melhor segmentar a instalação em fileiras contendo os módulos que vão operar sob as mesmas condições. No caso de um único MPPT, é melhor conectar essas fileiras em paralelo. O impacto sobre a energia gerada será menor do que ligar módulos com diferentes capacidades de geração em série. Se isso for feito, a corrente a se estabelecer será a menor, derrubando sensivelmente a geração de energia global. Na ligação paralela, uma redução significativa na radiação solar de uma fileira, não afetará proporcionalmente a tensão de operação desta fileira, minimizando o prejuízo. No entanto, se os módulos de uma fileira sofrerem sombreamento parcial, a redução da tensão de operação da fileira será reduzida e puxará a produção global de energia do sistema para baixo.

REFERÊNCIAS

BORGES, Ciaddy Gina Rodríguez; SERA Antonio Sarmiento; GÁMEZ, María Rodríguez. **ALTERNATIVAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA PARA HOTELES EN VENEZUELA.** Corporación Eléctrica Nacional, Venezuela, março 2015.

CARVALHO, Francisco Ivanhoel Aguiar; ABREU, Mônica Cavalvanti Sá; NETO, Jocildo Figueiredo Correia. **FINANCIAL ALTERNATIVES TO ENABLE DISTRIBUTED MICROGENERATION PROJECTS.** REV. ADM. MACKENZI, p. 120-147, São Paulo, jan/feb. 2017.

CASARO, Marcio Mendes; MARTINS, Denizar Cruz. **MODELO DE ARRANJO FOTOVOLTAICO DESTINADO A ANÁLISES EM ELETRÔNICA DE POTÊNCIA VIA SIMULAÇÃO.** Instituto de Eletrônica de Potência, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina; Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, agosto de 2008.

FARIA AMARAL FADIGAS, Eliane Aparecida (Org.). **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica.** Escola Politécnica Universidade de São Paulo

GUERRINI, Iria Müller. **FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA.** CDCC. USP. São Carlos. Disponível em: http://fisica.cdcc.sc.usp.br/olimpiadas/01/artigo1/fontes_eletrica.html Acesso em: 15 de maio 2018.

HECKETHEUER, Lúcio Almeida. **ANÁLISE DE ASSOCIAÇÕES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.** Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, junho de 2001.

M. G. Villalva, J. R. Gazoli, E. Ruppert F. **MODELING AND CIRCUIT-BASED SIMULATION OF PHOTOVOLTAIC ARRAYS**. University of Campinas - UNICAMP, Brazil

PORTAL SOLAR. **COMO FUNCIONA O PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO – PLACAS FOTOVOLTAICAS**. Disponível em :< <https://www.portalsolar.com.br/como-funciona-o-painel-solar-fotovoltaico.html>>. Acesso em: 19 junho 2016.

TUDO SOBRE A EFICIÊNCIA DO PAINEL SOLAR. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/>>. Acesso em: 05 maio 2018.