



IGOR VINÍCIUS RESENDE DA MATA

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO TESTE DE
CURVA I-V E DO DESEMPENHO DE ARRANJOS
FOTOVOLTAICOS NA GERAÇÃO DE ENERGIA**

**LAVRAS – MG
2022**

IGOR VINÍCIUS RESENDE DA MATA

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO TESTE DE CURVA I-V POR MEIO
DO DESEMPENHO DE ARRANJOS FOTOVOLTAICOS NA GERAÇÃO DE
ENERGIA**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Engenharia Mecânica, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Márcio Montagnana Vicente Leme
Orientador

**LAVRAS – MG
2022**

IGOR VINÍCIUS RESENDE DA MATA

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO TESTE DE CURVA I-V POR MEIO
DO DESEMPENHO DE ARRANJOS FOTOVOLTAICOS NA GERAÇÃO DE
ENERGIA**

**ANALYSIS OF ECONOMIC FEASIBILITY OF THE I-V CURVE TEST THROUGH
THE PERFORMANCE OF PHOTOVOLTAIC ARRANGEMENTS IN ENERGY
GENERATION**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Engenharia Mecânica, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA EM 12 DE SETEMBRO DE 2022.

Dr. Márcio Montagnana Vicente Leme UFLA

Dr. Dimas José Rúa Orozco UFLA

Dr. Mateus Henrique Rocha UFRPE

Prof. Dr. Márcio Montagnana Vicente Leme
Orientador

**LAVRAS – MG
2022**

RESUMO

A energia elétrica tornou-se uma necessidade para nossa sociedade, o que ocasionou a busca por novas formas de se obter energia. A produção de energia através de fontes renováveis é uma questão relevante no mundo, e nos últimos anos a energia fotovoltaica teve um forte crescimento dentre as fontes renováveis em várias partes do mundo. No entanto, assim como qualquer outro sistema uma usina solar requer manutenção, uma vez que é composta por diversos tipos de equipamentos que requerem certos cuidados. A inspeção de usinas através do traçador de curva I-V faz parte da manutenção preventiva e tem como objetivo diagnosticar o estado de funcionamento dos módulos, passíveis de danos e falhas que ocasionam perdas de energia. Este trabalho teve como objetivo apresentar a metodologia do teste de curva I-V, fazer uma análise do desempenho de arranjos fotovoltaicos e um balanço econômico entre o investimento e o retorno financeiro. Foram levantadas as principais falhas encontradas e uma descrição sobre cada uma juntamente com o impacto causado. Os resultados econômicos encontrados foram satisfatórios comprovando as vantagens de implementação do teste, onde se obteve um retorno do valor investido em curto prazo, para a usina 1 o PAYBACK foi de 2,22 meses e para a usina 2 foi de 8,11 meses, o VPL encontrado também foi satisfatório, sendo para a usina 1 de 81950,92 e para a usina 2 de 11882,24 ambos maior que 0, e a TIR também teve resultados positivos onde o valor encontrado para a usina 1 foi de 35% e para a usina 2 de 5% sendo os dois valores maiores que a taxa de atratividade do mercado Selic de 0,83%. Conclui-se então que a realização do teste é muito importante para evitar o desperdício de energia e problemas futuros, além de economicamente viável.

Palavras-chave: Energia fotovoltaica. Curva I-V. Viabilidade econômica.

ABSTRACT

Electric energy has become a necessity for our society, which has led to the search for new ways of obtaining energy. The production of energy from renewable sources is a relevant issue in the world, and in recent years photovoltaic energy has had a strong growth among renewable sources in various parts of the world. However, just like any other system, a solar plant requires maintenance, since it is composed of different types of equipment that require certain care. The inspection of plants through the I-V curve tracer is part of preventive maintenance and aims to diagnose the working state of the modules, which are susceptible to damage and failures that cause energy losses. This work aimed to present the methodology of the I-V curve test, to analyze the performance of photovoltaic arrays and an economic balance between investment and financial return. The main faults found were raised and a description of each one together with the impact caused. The economic results found were satisfactory, proving the advantages of implementing the test, where a return on the amount invested in the short term was obtained, for plant 1 the PAYBACK was 2.22 months and for plant 2 it was 8.11 months, the NPV found was also satisfactory, being 81950.92 for plant 1 and 11882.24 for plant 2, both greater than 0, and the IRR also had positive results where the value found for plant 1 was 35% and for plant 2 of 5%, both values being higher than the attractiveness rate of the Selic market of 0.83%. It is then concluded that carrying out the test is very important to avoid energy waste and future problems, in addition to being economically viable.

Keywords: Photovoltaics. I-V curve. Economic viability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de radiação	12
Figura 2 – Módulos de célula inteira e meia célula.....	14
Figura 3 – Componentes do módulo fotovoltaico	14
Figura 4 – Módulo monofacial e bifacial	15
Figura 5 – Associação em série e paralelo	16
Figura 6 – Arranjo Fotovoltaico	16
Figura 7 – Pontos de atenção da curva I-V.....	19
Figura 8 – Influência da irradiação na curva I-V.....	20
Figura 9 – Influência da temperatura na curva I-V	21
Figura 10 – Possíveis deformações da curva I-V	22
Figura 11 – Conexão do Equipamento I-V no Barramento da SB	28
Figura 12 – Fixação do sensor.....	29
Figura 13 – Plotagem da curva I-V.	30
Figura 14 – Teste de Continuidade no Fusível.....	30
Figura 15 – Teste de VOC.....	31
Figura 16 – Sombreamento do poste	33
Figura 17 – Gráfico referente a figura 16.....	33
Figura 18 – Sombreamento causado por caixas de módulos.....	34
Figura 19 – Gráfico referente a figura 18.....	34
Figura 20 – Sombreamento causado pela vegetação elevada.....	35
Figura 21 – Gráfico referente a figura 20	35
Figura 22 – Sombreamento causado pela vegetação elevada.....	36
Figura 23 – Gráfico referente a imagem 22.....	36
Figura 24 – Módulo quebrado	37
Figura 25 – Gráfico referente a figura 23	38
Figura 26 – Módulo trincado sem danos nas células.....	38
Figura 27 – Gráfico referente a figura 26	39
Figura 28 – Módulo trincado com células danificadas.....	39
Figura 29 – Gráfico referente a figura 28	40
Figura 30 – Falha na conexão.....	41
Figura 31 – Fusível queimado	41
Figura 32 – Resultado do teste quando não há tensão no barramento.....	42

Figura 33 – Resultado do teste quando há polaridade invertida.....	42
Figura 34 – Acúmulo de poeira nos módulos.....	43
Figura 35 – Sujeira sobre o módulo	44
Figura 36 – Tracker em posição irregular	44
Figura 34 – Gráfico referente a figura 34	45
Figura 35 – Céu com presença de nuvens	46
Figura 36 – Gráfico referente a imagem 36.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Potência de cada string	47
Tabela 2 – Resultado dos leilões de energia.....	48
Tabela 3 – Quantidade de strings da usina 1 que foram diagnosticadas com alguma falha ou defeito que influencia na geração de energia.....	49
Tabela 4 – Custo total do teste da usina 1	49
Tabela 5 – Dados referentes a usina 1	50
Tabela 6 – Valor da energia perdida com as strings fora da geração da usina 1	51
Tabela 7 – Investimento e retorno do teste na usina 1.....	51
Tabela 8 – Parâmetros econômicos da usina 1	51
Tabela 9 – Quantidade de strings da usina 2 que foram diagnosticadas com alguma falha ou defeito que influencia na geração de energia.....	52
Tabela 10 – Custo total do teste da usina 2	52
Tabela 11 – Dados referentes a usina 2	53
Tabela 12 – Valor da energia perdida com as strings fora de geração da usina 2.....	53
Tabela 13 – Investimento e retorno do teste na usina 2.....	53
Tabela 14 – Parâmetros econômicos da usina 2	54

LISTA DE SIGLAS

CO2	Gás carbônico
I	Corrente elétrica
SB	String Box
STC	Standart Test Conditions
TIR	Taxa Interna de Retorno
V	Tensão elétrica
VPL	Valor Presente Líquido
W	Watts

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVO GERAL	10
2.1	Objetivos Específicos	10
3	REFERENCIAL TEÓRICO	11
3.1	Energia Solar	11
3.2	Módulo Fotovoltaico	12
3.3	Arranjo de Células e Módulos Fotovoltaicos	15
3.4	Fatores que Influenciam no Desempenho de Células Fotovoltaicas	17
3.5	Curva I-V	18
3.5.1	Influência da Irradiação e da Temperatura na Curva I-V	20
3.5.2	Diagnóstico de Falhas Através da Curva I-V	21
3.5.3	Parâmetros Utilizados na Curva I-V	24
3.6	Cálculos de viabilidade econômica	25
3.6.1	Valor Presente Líquido (VPL)	26
3.6.2	Taxa Interna de Retorno (TIR)	26
3.6.3	Payback	27
4	MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1	Teste	28
4.2	Viabilidade econômica	31
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
5.1	Sombreamento	32
5.2	Módulo trincado, quebrado ou queimado	37
5.3	Circuito Aberto e Fusível Queimado	40
5.4	Sujeira sobre os módulos	43
5.5	Tracker em Posição Incorreta	44
5.6	Presença de Nuvens	45
5.7	Usina fotovoltaica 1	47
5.8	Usina fotovoltaica 2	52
6	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica tornou-se uma necessidade para nossa sociedade, o que ocasionou a busca por novas formas de se obter energia. A produção de energia através de fontes renováveis é uma questão relevante no mundo e a energia solar se enquadra nesse contexto por atender a necessidade de ser instalada em pequenas produções e também em grandes usinas, além de ser renovável.

O sol como fonte de energia se tornou um recurso importante por apresentar vantagens em relação às demais fontes de energia, possibilitando a redução da utilização dos recursos fósseis preservando assim o meio ambiente. Dentre as vantagens, está o fato de ser renovável, inesgotável, de baixo impacto ambiental e sem emissão direta de CO₂ (VILALVA, 2019).

O efeito fotovoltaico é o responsável por converter a energia solar em eletricidade quando partículas de luz solar colidem com os átomos presentes no painel solar, gerando movimento dos elétrons e criando uma corrente elétrica contínua de baixa tensão. Essa corrente passa por um equipamento responsável por converter a corrente contínua em corrente alternada e posteriormente por um transformador para que possa ser distribuída na rede.

Como toda produção de energia tem algumas complicações, com a energia fotovoltaica não é diferente, pois está sujeita à apresentar falhas a qualquer momento. Para identificação de falhas nos módulos temos o teste de curva I-V, elemento indispensável, capaz de oferecer um rico conjunto de informações sobre o estado de funcionamento de um arranjo de módulos. O uso do traçador de curva I-V no comissionamento evita muitos problemas nas instalações que podem se agravar com o tempo.

A presente pesquisa se justifica pela necessidade de ampliar o estudo sobre a curva I-V e aprofundar os conhecimentos sobre os fatores que provocam falhas consideradas irreversíveis, causadas por problemas elétricos ou mecânicos, e falhas ou perdas de energia temporárias. Assim, é importante conhecer estes fatores para prevenir e examinar com cuidado as instalações já existentes.

Ao longo da pesquisa, é feita a análise relacionando as falhas às causas e as causas às consequências para o todo e, por fim, comprovar a importância da curva I-V.

O teste apresentado neste trabalho foi realizado pelo autor na usina solar localizada na região de Juazeiro – BA. Ela possui uma capacidade instalada de aproximadamente 187 megawatts (MW) com mais de 450 mil módulos e a quantidade de energia gerada é suficiente para atender uma cidade de 750 mil habitantes.

2 OBJETIVO GERAL

Fazer um diagnóstico das falhas e conseqüentemente uma análise de viabilidade econômica do teste de curva I-V por meio do desempenho de arranjos fotovoltaicos na geração de energia.

2.1 Objetivos Específicos

Este objetivo se desdobra em outros mais específicos que são:

- a) Avaliar a importância do teste de curva I-V em usinas fotovoltaicas.

- b) Apresentar uma análise dos dados aferidos e da curva gerada fazendo uma comparação com os dados informados pelo fabricante, associando aos defeitos e falhas identificados em campo que interferem na geração de energia.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

No presente capítulo é apresentado os trabalhos utilizados como base para esta pesquisa definindo os conceitos iniciais sobre energia solar, módulo fotovoltaico, arranjo de células/módulos, fatores que influenciam no desempenho dos módulos, a curva I-V e engenharia econômica.

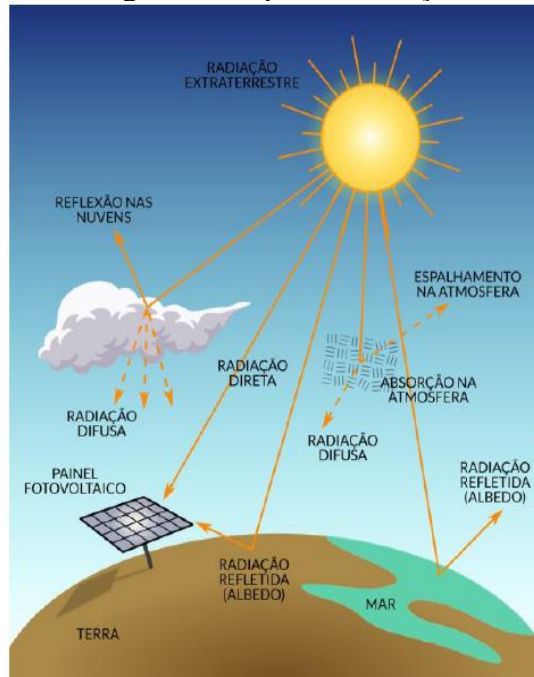
3.1 Energia Solar

A energia fotovoltaica consiste na geração de energia elétrica por meio de materiais semicondutores que apresentam o efeito fotovoltaico. Esse fenômeno químico/físico pode ser definido como a formação de tensão e corrente elétrica em um material que é exposto à luz do sol (DANTAS, 2018).

O sol é uma fonte de energia inesgotável, sendo considerada uma das principais fontes com capacidade de suprimento das demandas atuais e futuras da humanidade. A transmissão de energia proveniente do sol é realizada por meio de radiação eletromagnética, composta por comprimentos de ondas de diferentes valores em decorrência da frequência e da energia transmitida. A célula fotovoltaica tem a capacidade de transformar a energia do sol em energia elétrica (CREMASCO, 2021).

A radiação solar incidente não chega integralmente à superfície terrestre devido ao fato de que ela sofre algumas modificações. A radiação solar efetiva que chega a um módulo solar pode ser de origem direta, difusa e albedo. A radiação direta, vinda diretamente do sol, não sofre desvios, a radiação difusa é decorrente do processo de espalhamento de luz na atmosfera e de reflexões nas nuvens, partículas de poeira e outros que possam refletir a radiação, além destas, também é possível existir uma radiação derivada da reflexão da luz solar pelo ambiente ou estrutura (PORTELA, 2020). A Figura 1 a seguir mostra os diferentes tipos de radiação.

Figura 1 – Tipos de radiação



Fonte: Cremasco (2021).

A radiação solar é um conceito genérico para referir-se ao fluxo de potência por unidade de área, a irradiância. Como nem toda superfície do planeta é perpendicular aos raios solares, a irradiação solar varia de acordo com a posição terrestre e o ângulo de incidência dos raios solares, regiões próximas à linha do equador possuem menor alteração de irradiação ao longo do ano quando comparadas a regiões em grandes latitudes, onde a energia anual total recebida é menor (PORTELA, 2020).

3.2 Módulo Fotovoltaico

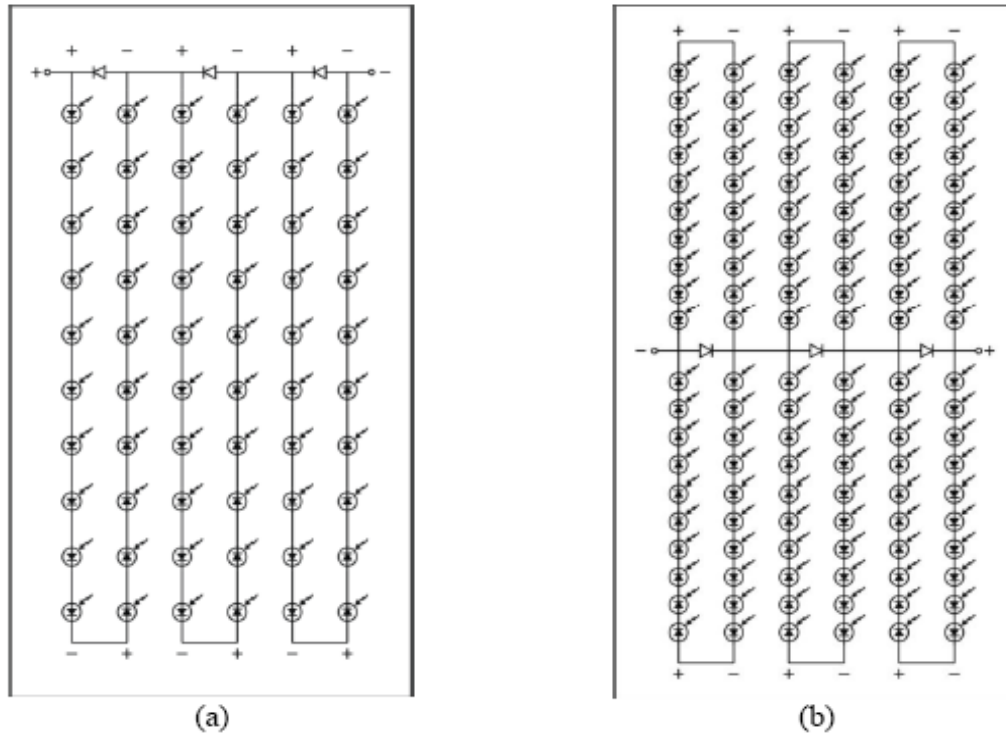
Uma célula fotovoltaica sozinha produz pouca energia, porém quando agrupada com outras e posicionadas, geralmente em série, dentro dos painéis solares em um sistema fotovoltaico, elas podem gerar quantidades significativas de energia elétrica (VILALVA, 2012).

A associação de células fotovoltaicas, arranjada em uma estrutura, recebe o nome de módulo fotovoltaico. Quando as células são associadas em série, a tensão resultante é a soma das tensões individuais de todas as células associadas, e a corrente é igual a corrente da célula que fornece o menor valor em uma dada condição, e quando associadas em paralelo a corrente é igual a soma das correntes individuais de cada célula (VILALVA, 2012).

Os módulos comercializados no Brasil devem ser etiquetados pelo INMETRO (Instituto Brasileiro de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial), conforme portaria nº 004 de 2011. O INMETRO implantou o grupo GT-FOT (grupo de trabalho de sistemas fotovoltaicos) constituído por representantes de órgãos governamentais, universidades, empresas e associações. Inicialmente a etiquetagem foi focada em módulos fotovoltaicos de células solares de silício cristalino, inversores, controladores de carga e baterias para sistemas fotovoltaicos autônomos. Em relação aos módulos fotovoltaicos, um dos mais importantes testes implementados é o teste onde é gerada a curva da corrente elétrica em função da tensão aplicada (curva I-V) em condições padrão de medição, conforme a norma IEC 61215 (ARAÚJO, et al., 2018).

Os módulos atualmente empregam-se configurações de células inteiras e meia células, mantendo os mesmos parâmetros elétricos devido à conexão utilizada. A maioria dos módulos são construídos de células de silício (policristalino ou monocristalino) e utilizam associação em série das células. Para módulos de células completas empregam-se 60 ou 72 células e os módulos de meia células resultam em 120 ou 144 células. A figura a seguir mostra em (a) a configuração de um módulo de célula inteira e em (b) a de um módulo de meia célula (OLIVEIRA, 2020).

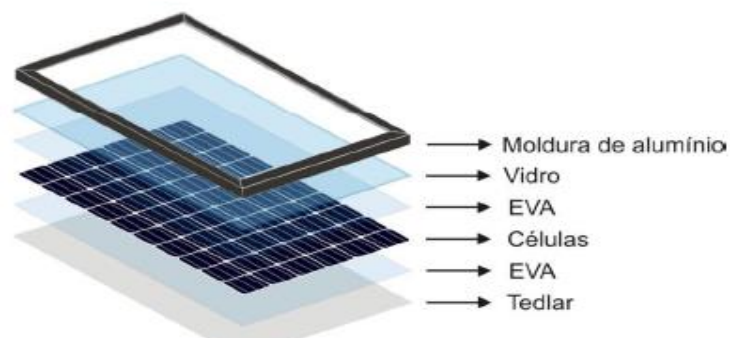
Figura 2 – Módulos de célula inteira e meia célula



Fonte: Oliveira (2020).

Além das células, existem outros componentes que constituem os módulos fotovoltaicos, que auxiliam na sua durabilidade quando expostos às condições ambientais diversas, além de promover a isolação elétrica entre as células e o meio externo. As células que compõem os módulos fotovoltaicos são frágeis, por isso são compostos por uma camada de vidro temperado para proteção mecânica e do meio ambiente. A figura 3 apresenta a estrutura típica de um módulo, porém, atualmente a construção de módulos com dupla camada de vidro se tornou necessária devido à grande inserção de módulos bifaciais no mercado (OLIVEIRA, 2020).

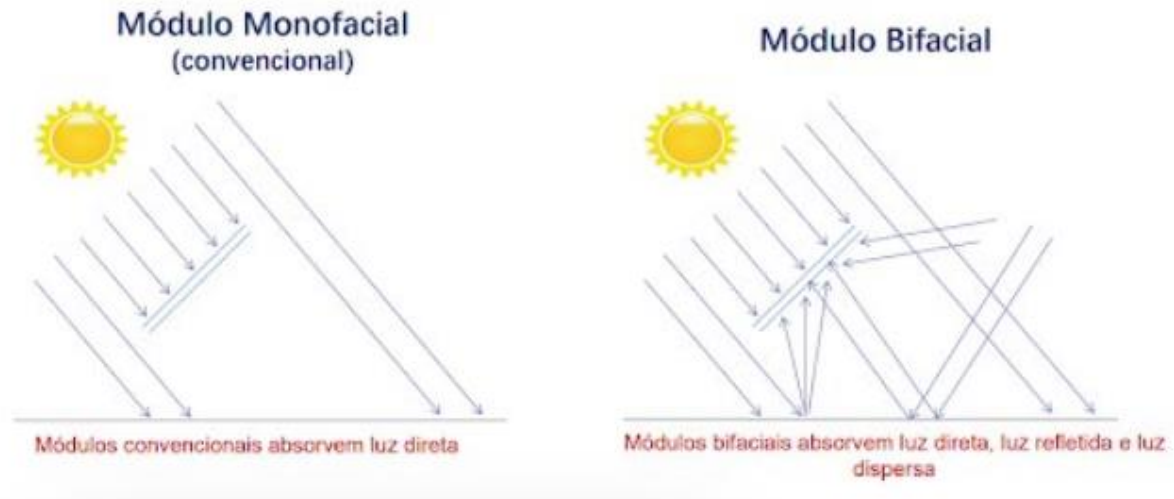
Figura 3 – Componentes do módulo fotovoltaico



Fonte: Oliveira (2020).

A figura 4 mostra a diferença de absorção de irradiação entre um módulo monofacial comum e um módulo bifacial, sendo que, o módulo bifacial é capaz de produzir até 25% a mais comparado com o monofacial.

Figura 4 – Módulo monofacial e bifacial



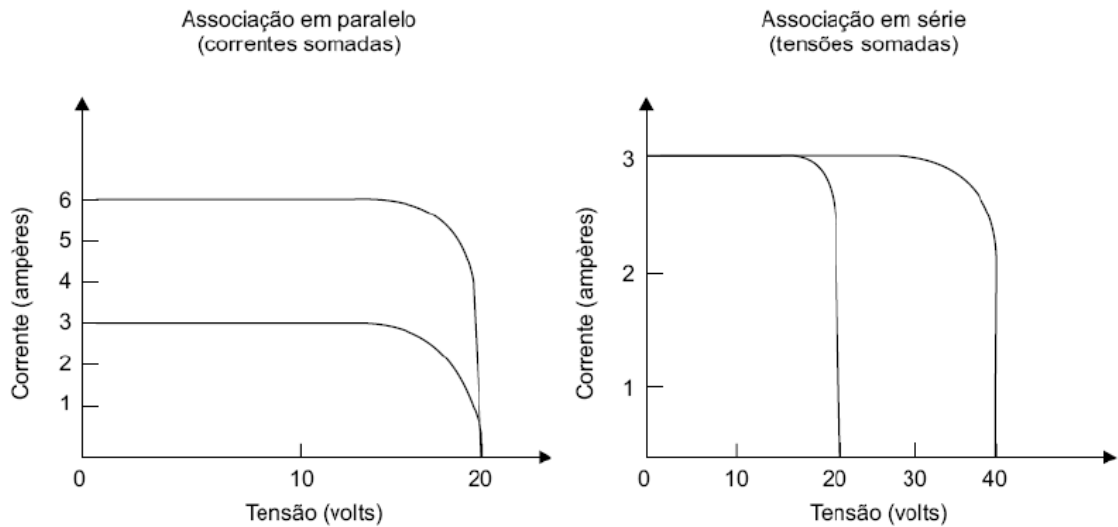
Fonte: Canal Solar.

Nos módulos também são empregados diodos de Bypass destinados à proteção dos módulos em caso de uma célula ou conjunto de células serem sombreadas ou apresentarem alguma falha. Esses dispositivos ficam alojados na parte posterior do módulo junto a caixa de conexão, geralmente são utilizados 3 diodos por módulo (OLIVEIRA, 2020).

3.3 Arranjo de Células e Módulos Fotovoltaicos

Os arranjos são formados por um conjunto de módulos associados eletricamente em série ou paralelo, essa associação é realizada com o objetivo de obter características elétricas desejadas (tensão, corrente e potência). Para um arranjo em série a corrente será a mesma e a tensão será o resultado da soma de cada elemento, já para o arranjo em paralelo, a tensão é mantida e a corrente é somada. Na prática a corrente resultante da associação será a que estiver estabelecida no módulo que apresentar o menor valor individual (SCUSSEL, 2020).

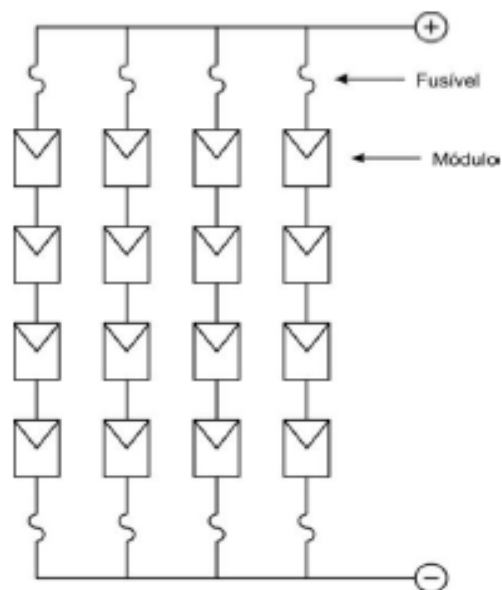
Figura 5 – Associação em série e paralelo



Fonte: Scussel (2020).

A associação em série de módulos fotovoltaicos (string) é caracterizada com o objetivo de estabelecer um valor superior de tensão. O arranjo fotovoltaico corresponde a ligação em paralelo das strings, e a partir desta associação é possível alcançar a capacidade de corrente com o objetivo de estabelecer a potência do sistema. Em um arranjo fotovoltaico são usados dispositivos de segurança (fusíveis) para proteger o sistema de surtos de corrente e tensão, além de evitar uma corrente reversa de um circuito para o outro (OLIVEIRA, 2020). A figura 6 a seguir mostra um arranjo fotovoltaico:

Figura 6 – Arranjo Fotovoltaico



Fonte: Oliveira (2020).

3.4 Fatores que Influenciam no Desempenho de Células Fotovoltaicas

Os módulos fotovoltaicos são avaliados de acordo com as características determinadas pelos fabricantes, denominado padrão STC (Standart Test Conditions). Nesta avaliação, o valor de irradiância é considerado como 1000 W/m^2 , a temperatura 25° C e a massa de ar 1,5 AM.

A avaliação das células fotovoltaicas é realizada em laboratório e em condições controladas, entretanto, quando expostas ao ambiente, estão sujeitas a divergências no comportamento devido a variação das condições de acordo com a região, com o horário do dia e com a estação do ano.

Visto que dificilmente as condições externas reais são semelhantes às condições utilizadas no padrão STC na determinação das características internas, surge a necessidade de análise do desempenho dos módulos nas condições externas do local de instalação (DUPONT, 2021).

O desempenho de diferentes tecnologias fotovoltaicas varia de acordo com diversos fatores, dentre eles estão a temperatura, irradiação, acúmulo de sujeira, massa de ar, sombreamento, nebulosidade, velocidade do vento e degradação do módulo.

Irradiação: A irradiação está ligada diretamente com a corrente de curto-circuito, e conseqüentemente com a geração de energia, sendo assim, baixos valores de irradiação ocasionam redução da eficiência do sistema fotovoltaico. A variação na produção de energia, devido a oscilação da irradiação, pode ser incompatível com os padrões de distribuição e causar variação de tensão na rede.

Temperatura: A temperatura afeta a tensão de circuito aberto e os módulos podem apresentar perdas de eficiência por aquecimento decorrentes de altos valores de irradiação. Além disso a variação de temperatura pode causar um estresse térmico no módulo.

Nebulosidade: As nuvens são moduladores de radiação solar tanto para ondas curtas quanto para ondas longas, em dias sem nebulosidade há predominância de radiação direta, enquanto em dias nublados há a predominância de radiação difusa proveniente de reflexão das nuvens. Sendo assim, em dias com maior quantidade de nuvens a produção de energia é reduzida, devido ao sombreamento das nuvens e alteração na temperatura do módulo.

Sujidade na superfície: O acúmulo de poeira sobre os módulos está relacionado com às perdas ópticas, térmicas e elétricas, além de causar degradação, a sujeira causa perdas por temperatura e dificuldades de absorção da irradiação, que resultam na redução da eficiência e da vida útil do módulo.

Sombreamento: O sombreamento nos módulos pode ser classificado como homogêneo, em todo o painel, ou não homogêneo, de forma parcial. O sombreamento de forma parcial pode gerar pontos quentes (*hotspots*) devido a uma eventual divergência de correntes elétricas nas células fotovoltaicas associadas em série, e que podem danificar o módulo e ocasionar uma redução na produção em função deste fator.

Degradação: O fenômeno da degradação está relacionado com a redução da capacidade do módulo fornecer a potência informada pelo fabricante após um determinado período de tempo. Os módulos fotovoltaicos são expostos a diferentes situações meteorológicas, com diversos valores de umidade, temperatura e radiação UV, além de fatores externos como poeira, sombreamento e falhas de componentes, todos esses parâmetros contribuem para a degradação dos módulos. Portanto, a vida útil e o desempenho dos painéis são influenciados pelos fatores com que eles interagem.

Umidade: A umidade afeta de forma indireta a eficiência dos módulos fotovoltaicos. Para altos valores de umidade relativa do ar, a superfície dos módulos se torna mais susceptível à deposição de poeira, dificultando na absorção de irradiação, afetando assim, a corrente, tensão e potência. Outra forma em que a umidade pode afetar a eficiência dos módulos, acontece quando a umidade entra para dentro do encapsulamento causando aumento da resistência das células e conseqüentemente, redução no rendimento.

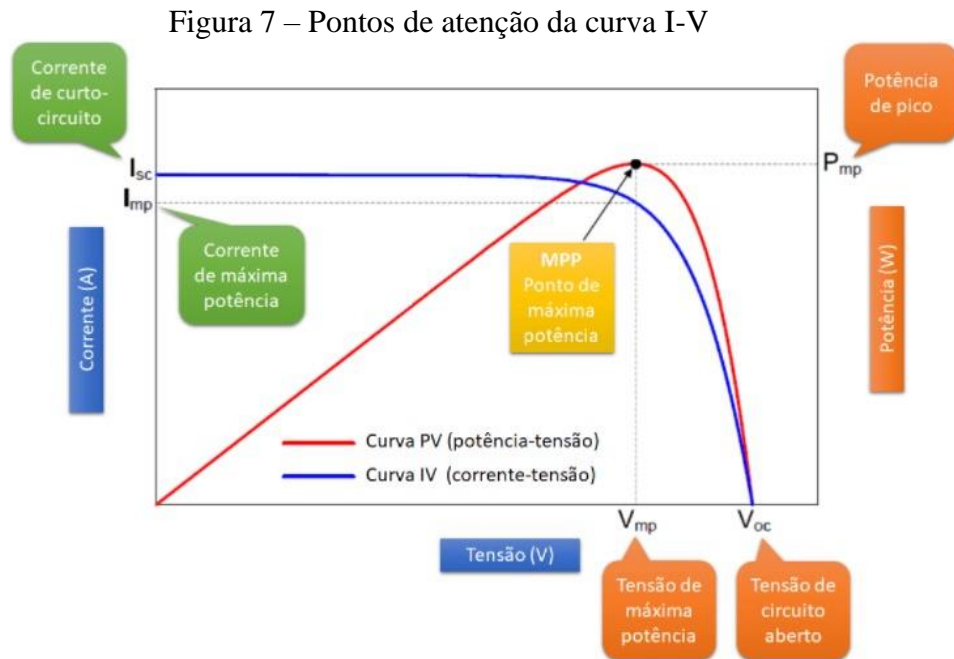
Velocidade do vento: A influência do vento no rendimento do módulo está relacionada principalmente com a alteração da temperatura. Outra forma indireta da influência do vento é por meio da deposição de sujidade na superfície do módulo.

Perdas na fiação: Os sistemas fotovoltaicos são considerados e projetados para operar em condições STC, porém, as condições às quais o sistema é exposto geralmente são diferentes. As perdas de energia na fiação são relacionadas a queda de tensão nos cabos e redução de desempenho do sistema.

3.5 Curva I-V

O teste de curva I-V é realizado através de um equipamento chamado traçador de curva I-V. A realização do teste depende das condições climáticas, com alguns pré-requisitos como o céu sem a presença de nuvens e com uma irradiância mínima de 700 W/m^2 . Os parâmetros de tensão do arranjo medido devem estar de acordo com as limitações do aparato da medição, para não danificar o equipamento. Oscilações em diferentes partes da trajetória da curva podem

representar diferentes tipos de falhas (ARAÚJO, 2020). A figura 7 mostra alguns pontos de atenção da curva.



Fonte: Canal solar.

Curva IV é o gráfico que relaciona a corrente (I) e a tensão de saída (V) e a curva PV é o gráfico que relaciona a potência (P) e a tensão de saída (T). A figura ilustrativa anterior, mostra o comportamento das curvas de um módulo fotovoltaico, em casos de arranjos de módulos as curvas possuem a mesma forma, porém, com valores diferentes.

As características dos módulos fotovoltaicos por meio das curvas IV e PV são:

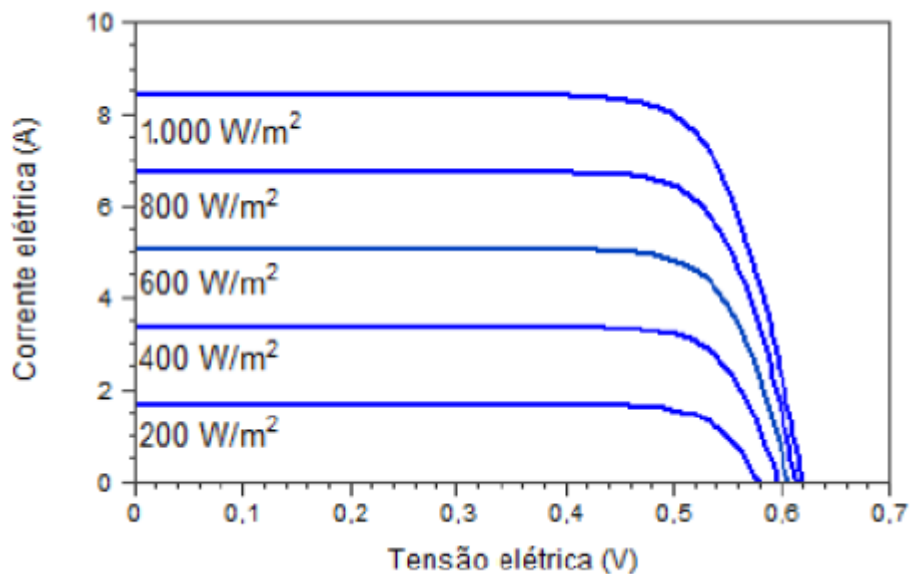
- I_{sc} (short circuit – corrente de curto-circuito) é a máxima corrente elétrica que o módulo pode fornecer.
- V_{oc} (open circuit – tensão de circuito aberto) é a máxima tensão que o módulo pode fornecer.
- I_{mp} (maximum power – corrente de máxima potência) é a corrente que o módulo fornece quando opera no seu ponto de máxima potência.
- V_{mp} (tensão de máxima potência) é a tensão que o módulo apresenta nos seus terminais quando opera no seu ponto de máxima potência.
- P_{mp} (potência de máxima potência) o nome redundante. Esta é a potência de pico do módulo fotovoltaico.
- MPP (maximum power point) é o ponto de máxima potência do módulo fotovoltaico. Encontra-se no joelho da curva IV e no pico da curva PV.

- Os valores de I_{sc} , V_{oc} , I_{mp} , V_{mp} e P_{mp} de um módulo são especificados nas folhas de dados do fabricante para uma irradiância de 1000 W/m^2 e uma temperatura operacional de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.5.1 Influência da Irradiação e da Temperatura na Curva I-V

A energia elétrica produzida por sistemas fotovoltaicos tem como fonte a irradiação solar, dessa forma com o aumento da irradiação a corrente da célula aumentará linearmente, enquanto a tensão de circuito aberto aumenta de forma logarítmica, se a temperatura for mantida. A figura 8 mostra o aumento da corrente de uma célula de silício mantida a $25 \text{ }^\circ\text{C}$, de acordo com o aumento da irradiação (SCUSSEL, 2020).

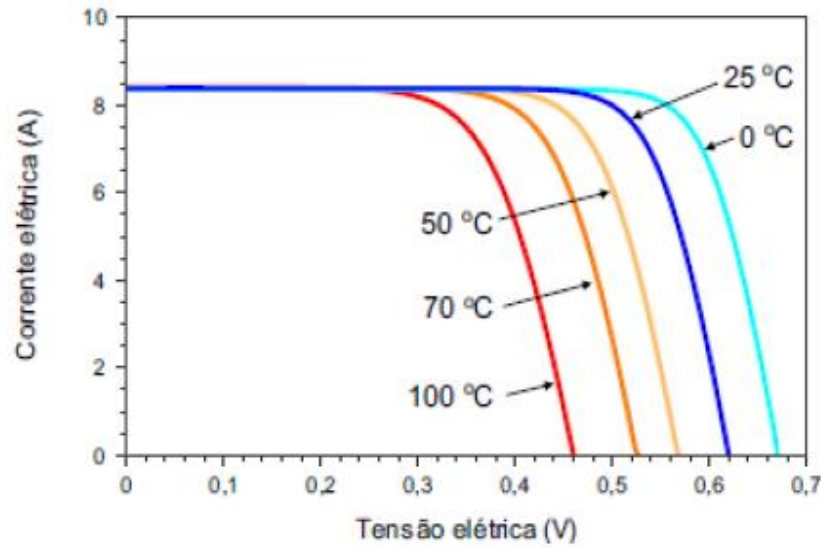
Figura 8 – Influência da irradiação na curva I-V



Fonte: Scussel (2020).

A temperatura é outro fator que afeta a produção de um sistema fotovoltaico, com o aumento da temperatura a eficiência tende a reduzir, isto ocorre devido a tensão da célula diminuir em função da temperatura. A figura 9 mostra a redução da tensão em função do aumento da temperatura (DUPONT, 2021).

Figura 9 – Influência da temperatura na curva I-V



3.5.2 Diagnóstico de Falhas Através da Curva I-V

As principais falhas encontradas nos módulos fotovoltaicos podem ser classificadas de duas maneiras: falhas irreversíveis, causadas por problemas elétricos ou mecânicos, e as falhas e perdas de energia temporárias. Ambas podem afetar a eficiência dos módulos e consequentemente a confiabilidade do sistema.

As falhas irreversíveis, geralmente são danos físicos, e se caracterizam como falhas intrínsecas dos módulos fotovoltaicos que estão diretamente ligadas ao seu estado de saúde, uma vez que o problema só é solucionado substituindo o equipamento.

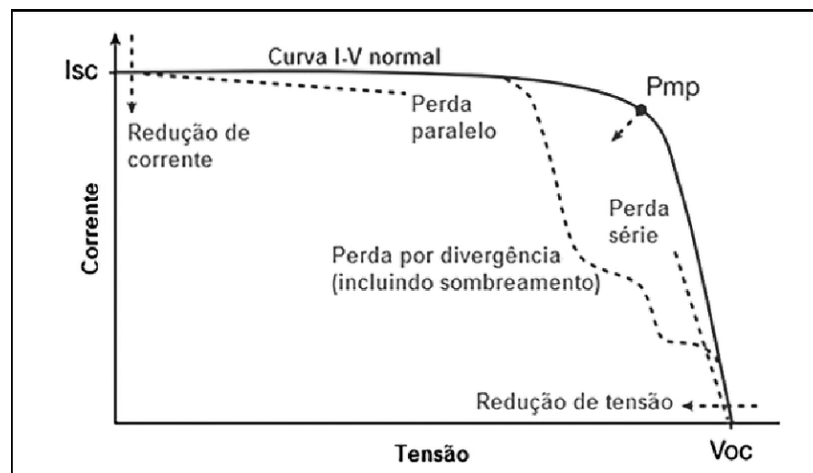
As falhas temporárias são decorrentes de fatores externos que podem diminuir a produção de energia, sendo geralmente ocasionada por algum fator relacionado ao ambiente, a instalação e a infraestrutura do local, e o problema pode ser solucionado sem a troca do equipamento. É importante ressaltar que as falhas temporárias ao longo do prazo podem ocasionar falhas permanentes, como é o caso do sombreamento que gera pontos quentes (hot-spots) no módulo e acelera seu envelhecimento, diminuindo assim, sua vida útil (URBANETZ, 2019).

Os módulos fotovoltaicos são considerados equipamentos frágeis e ficam expostos a condições climáticas adversas por longos períodos, entretanto, estão sujeitos a apresentar mais falhas e defeitos que o restante do sistema, razão pela qual o diagnóstico de avarias neste equipamento se torna importante.

A tensão e a corrente de um módulo são dependentes da quantidade de células existentes e de como elas se conectam, o número de células em série define o valor da tensão e o número de fileiras de células em paralelo define o valor da corrente. Os fatores externos que influenciam na tensão e na corrente são as condições ambientais em que os módulos estão inseridos, a temperatura de operação das células tem influência direta na tensão de saída do módulo, já a corrente gerada depende diretamente da quantidade de irradiação incidente sob a superfície da célula. Em um arranjo de módulos, o número de módulos conectados em série impacta diretamente na tensão de circuito aberto e o número de fileiras em paralelo define a corrente de curto circuito.

As deformações e variações da curva I-V são consequências de falhas que podem estar nos módulos e equipamentos testados ou módulos diferentes em um mesmo arranjo. Cada falha afeta a curva de uma maneira diferente, sendo que uma mesma curva pode apresentar mais de uma deformação. A figura 10 a seguir mostra as principais falhas detectadas pelo teste de curva I-V.

Figura 10 – Possíveis deformações da curva I-V



Fonte: Abe (2019).

A principal variável responsável pelo valor da corrente ser maior ou menor que o previsto é irradiação do sol, visto que a corrente produzida é proporcional a quantidade de irradiação sob o módulo, outros fatores que estão relacionados com a alteração do nível de corrente é a sujeira uniforme que dificulta na captação de irradiação. Quando a corrente é afetada, altera-se a altura do gráfico.

Alteração na inclinação da curva próxima ao ponto de Isc tem como causa a resistência shunt ou resistência paralela da fileira de células. A diminuição da resistência shunt causa uma maior inclinação nesse ponto, devido a falhas onde surge uma corrente de fuga. Essa corrente

é desviada e circula de maneira indevida sem produzir energia, curto circuitando parte do módulo ou célula, a mesma pode surgir pelos hotspots, defeitos nas células ou nas conexões.

A inclinação da curva diferente do previsto próximo ao ponto Voc, está relacionada com o aumento da resistência dos módulos em série, o aumento da resistência faz com que a curvatura do gráfico fique mais suave. Entre os fatores que influenciam no aumento da resistência, estão o mau dimensionamento da fiação do sistema e falhas nas conexões existentes no circuito.

Quando a curva apresenta “degraus” ou “dentes” em sua trajetória, esse comportamento indica que há corrente passando por um ou mais díodos de *bypass* nos módulos. A causa mais comum é o sombreamento, uma vez que as células sombreadas tem uma redução na corrente e isso limita o fluxo de corrente das outras células conectadas em série. Para evitar que as células afetadas pelo sombreamento limitem a produção do módulo em si, existe o diodo *bypass* que curto circuita essa fileira de células até que normalize. Para um único módulo o ponto da distorção do gráfico, é a corrente de polarização do diodo conectado as células sombreadas. Outro fator que causa essa falha é a presença de células danificadas devido a um módulo quebrado ou trincado, que podem gerar distorções na curva dependendo da gravidade do dano. Outra possível causa são os próprios díodos de *bypass* que quando apresentam defeitos que causam o mesmo efeito visível na curva.

Para valores fora do previsto de tensão de circuito aberto, Voc, o principal fator é a temperatura de operação das células, quanto maior for a temperatura, menor será a tensão resultante, e conseqüentemente menos energia será produzida. Alterações no Voc também pode ser consequência do sombreamento de uma ou mais células com alto nível de opacidade. Como já descrito anteriormente, um sombreamento mais leve pode causar degraus ou dentes no gráfico, no caso de sombreamento opaco, a corrente no ponto do degrau é nula e causa uma diminuição do Voc na curva. Falhas no diodo *bypass* também pode causar o mesmo efeito, nesse caso a curva não apresenta deformação, porém o valor do Voc é afetado, nessa situação o diodo fica polarizado em todos os pontos de operação do módulo, diferentemente do caso anterior (URBANETZ, 2019).

A degradação pode causar diversas deformações na curva e resultar em características aleatórias e inesperadas nos parâmetros, porém, é importante ressaltar que a degradação é um processo lento e mais identificado em módulos com maior tempo de uso, portanto é preciso verificar antes os outros parâmetros que afetam a curva, como a irradiação, temperatura, sujeira e exatidão das medidas, antes de concluir que o módulo está degradado.

3.5.3 Parâmetros Utilizados na Curva I-V

Para traçar a curva I-V são necessários alguns parâmetros fornecidos pelo fabricante dos módulos e alguns dados que são coletados com o módulo já em funcionamento. Os dados de tensão, corrente e potência que possuem a sigla (STC) são referentes aos parâmetros testados pelo fabricante em condições padrão de temperatura, irradiação e massa de ar.

As condições ambientais influenciam nos parâmetros de ajuste do modelo e consequentemente no comportamento da curva I-V. A irradiação que chega até a superfície da célula e a temperatura do módulo estão interligadas com a quantidade de corrente fotoelétrica gerada (I_{ph}), como mostra a Equação 1 a seguir:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{STC}} [I_{sc\ STC} + K_i (T - T_{STC})] \quad (1)$$

Onde:

- G – Irradiação
- G_{STC} – Irradiação nas condições STC ($1000/m^2$)
- T – Temperatura
- T_{STC} – Temperatura nas condições STC (25°C)
- K_i – Coeficiente de variação da corrente com a temperatura (A/K)

Para a corrente inversa do diodo (I_0) é determinada através da equação a seguir e é dependente da temperatura e dos coeficientes K_i e K_v :

$$I_0 = \frac{I_{sc\ STC} + K_i(T - T_{STC})}{e^{\alpha} - 1} \quad (2)$$

Onde:

- $\alpha = \left[\frac{V_{oc\ STC} + K_v(T - T_{STC})}{V_t} \right]$
- K_v – Coeficiente de variação da tensão com a temperatura (V/K)

A inclinação da curva é influenciada pelo parâmetro (R_{shunt}): quanto maior for seu valor maior será a inclinação da curva resultando em uma menor potência máxima disponível, P_{mpp} .

$$R_{\text{shunt}} = \frac{G_{\text{STC}}}{G} R_{\text{shunt STC}} \quad (3)$$

Mediante a equação apresentada anteriormente é possível observar, de forma empírica, que a resistência paralela ao diodo é inversamente proporcional à irradiação e consequentemente a corrente de curto circuito. Por outro lado, a resistência em série é influenciada pela temperatura, uma vez que seu valor altera a inclinação da curva I-V no ponto de circuito aberto e inversamente proporcional a irradiação como descreve a equação a seguir:

$$R_s = \frac{T}{T_{\text{STC}}} R_{s \text{ STC}} \left[1 - \beta \ln \left(\frac{G}{G_{\text{STC}}} \right) \right] \quad (4)$$

Onde β é uma constante e seu valor é de aproximadamente 0,217.

A tensão térmica é obtida através da equação a seguir e é diretamente proporcional à temperatura.

$$V_t = V_{t \text{ STC}} \frac{T}{T_{\text{STC}}} \quad (5)$$

A equação a seguir trata-se do cálculo do fator de forma (FF), ele é obtido com os valores de tensão e corrente no ponto de potência máxima e dos pontos críticos da curva ou através da proporção da potência máxima. Por ser um indicador de qualidade quando há alguma avaria nota-se uma diminuição do fator de forma.

$$FF = \frac{P_{\text{mpp}}}{I_{\text{sc}} V_{\text{oc}}} = \frac{I_{\text{mpp}} V_{\text{mpp}}}{I_{\text{sc}} V_{\text{oc}}} \quad (6)$$

3.6 Cálculos de viabilidade econômica

Ao realizar a análise de viabilidade econômica do teste em questão, tem-se como objetivo avaliar os custos de operação, manutenção e tempo de retorno do investimento. Para isso, foi selecionado neste trabalho os métodos de valor presente líquido (VPL) em conjunto com os métodos de taxa interna de retorno (TIR) e payback (ALMEIDA, 2017).

3.6.1 Valor Presente Líquido (VPL)

Calcula o valor presente dos fluxos de caixa gerados pelo projeto ao longo de sua vida útil, sendo obtido o valor do dinheiro no tempo, subtraindo-se o investimento inicial do valor presente de suas entradas de caixa, com as devidas correções relativas à taxa de juros (ALMEIDA, 2017). O cálculo do VPL é demonstrado a seguir:

$$\text{VPL}(n) = -FC + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad (7)$$

Onde:

t: é o período em anos.

n: é o período em que o VPL é calculado.

FC₀: investimento inicial do projeto.

FC_t: fluxo de caixa no período n.

i: taxa de inflação

A avaliação do VPL é de acordo com o valor resultante. Um valor de VPL maior que zero aprova o projeto e um valor igual a zero o projeto é economicamente indiferente. Já para um valor menor que zero, o projeto é rejeitado.

3.6.2 Taxa Interna de Retorno (TIR)

É responsável pelo desconto que torna o VPL nulo, de modo que o valor presente das entradas de caixa seja igualado ao investimento inicial, considerada como a taxa de retorno anual obtida por um dado investimento.

$$\sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} = FC_0 \quad (8)$$

A avaliação da TIR se dá comparando o seu valor com a taxa de juros. Se a TIR for maior o projeto é aprovado, caso contrário, o projeto é rejeitado.

3.6.3 Payback

É a quantidade de períodos para que o projeto acumule o valor de retorno igual ao valor investido inicialmente.

$$PB_s = \frac{I}{FC} \quad (9)$$

Onde:

PBs: Payback

I: Investimento inicial

FC: Fluxo de caixa

4 MATERIAL E MÉTODOS

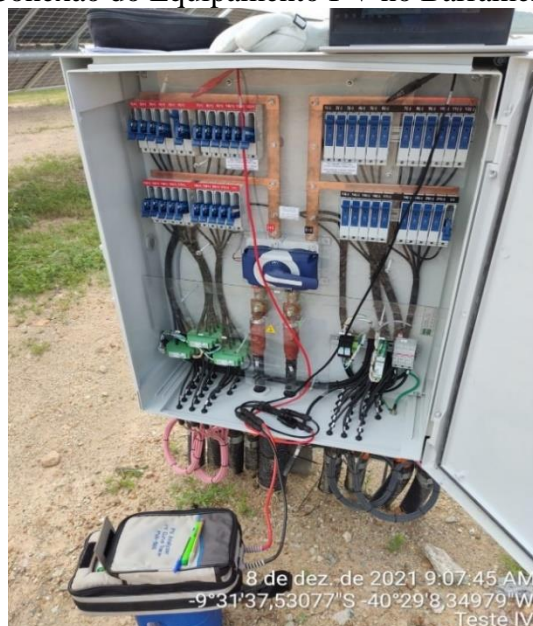
Este capítulo apresenta a metodologia utilizada no trabalho na qual foi dividida em duas partes, a primeira em 4.1 que descreve o passo a passo para a realização do teste e os equipamentos utilizados, e a segunda parte em 4.2 que trata-se da análise de viabilidade econômica do teste a partir dos dados coletados.

4.1 Teste

Para realizar os testes deve-se seguir alguns procedimentos de segurança, uma vez que se trata de uma área energizada com riscos de choque elétrico. Primeiramente, desliga-se o inversor, o próximo passo é abrir o circuito através de uma chave seccionadora localizada na string-box (SB), logo após é desconectado todos os fusíveis positivos e negativos da SB e, por último, realiza-se uma inspeção visual das condições dos cabos solares. Deve ser feita a identificação do modelo do módulo para utilizar seus parâmetros no software e determinar a condição padrão de ensaio. Feito tudo isso, o teste poderá ser iniciado.

O equipamento utilizado para o levantamento da curva I-V, também chamado de traçador de curva I-V, é o Solmetric da série 1500, ele possui duas entradas, positiva e negativa as quais são conectadas aos barramentos da SB, positivo e negativo, respectivamente através de um conector do tipo jacaré, conforme a figura 11. No momento do teste conecta-se apenas o fusível da string que se deseja mensurar

Figura 11 – Conexão do Equipamento I-V no Barramento da SB



Fonte: Do autor.

Um equipamento contendo alguns sensores é utilizado para medir a irradiação solar, a temperatura e a angulação dos módulos. O aparelho é instalado no módulo mais próximo a SB. Para aquisição da temperatura é fixado um sensor termopar através de um adesivo transparente na face frontal do módulo; Figura 12.

Figura 12 – Fixação do sensor



Fonte: Do autor.

Após a conexão do traçador no circuito e do sensor no módulo, é iniciado o ensaio da curva através de um software próprio do aparelho, que através de uma conexão via Wi-Fi com os equipamentos é capaz de fazer a aquisição dos dados e em poucos segundos gerar a curva. A figura 13 mostra a curva sendo gerada no momento do teste.

Figura 13 – Plotagem da curva I-V.



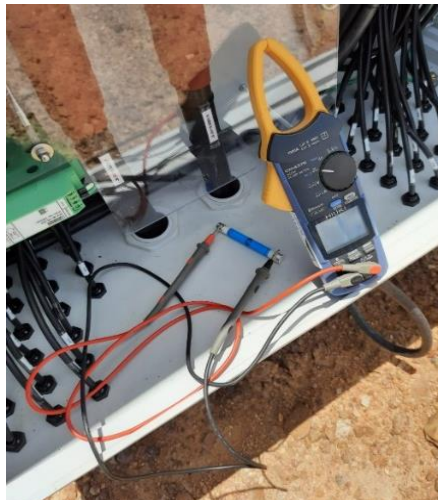
Fonte: Do autor.

Com o ensaio efetuado, os dados coletados são salvos para a primeira string e este processo é repetido para as próximas até que todas sejam devidamente testadas.

Os ensaios são realizados caso não haja presença de nuvem e a irradiação esteja acima de 700 W/m^2 segundo a norma IEC 61215, porém, como a irradiação não é constante uma mesma medida pode apresentar resultados diferentes devido ao momento da medição. Caso seja verificada alguma anomalia na Curva IV o teste é refeito para confirmação do resultado.

Caso haja alguma irregularidade apresentada no teste, é realizada uma inspeção visual com o objetivo de identificar a causa. Em casos de ausência de tensão e não identificação visual da falha é realizado testes com um multímetro. Primeiramente, é realizado um teste de continuidade no fusível com objetivo de verificar se o mesmo está queimado, figura 14.

Figura 14 – Teste de Continuidade no Fusível



Fonte: Do autor.

Logo após, é realizado um teste de VOC, figura 15, que consiste em medir a diferença de tensão entre o positivo e o negativo da string. Esse teste possibilita identificar alguma fuga de tensão para o cabo de aterramento ou erro de conexão.

Figura 15 – Teste de VOC



Fonte: Do Autor.

4.2 Viabilidade econômica

Através de um levantamento dos dados obtidos no teste é realizado uma análise de viabilidade econômica, essa análise é dividida em etapas.

Etapa 1: Fazer um levantamento do custo dos principais danos identificados no teste, como a energia perdida com as strings foram de geração e da quantidade de módulos quebrados.

Etapa 2: Calcular os parâmetros econômicos utilizando como investimento o custo total do teste e dos módulos quebrados e como retorno o valor da energia que está sendo perdida.

Etapa 3: Fazer uma análise dos resultados obtidos na etapa 2 e verificar a viabilidade do teste.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através da análise do comportamento da curva característica corrente-tensão (I-V), do gráfico potência-tensão (P-V) e dos valores obtidos de irradiação e temperatura, é possível identificar diversos tipos de danos e verificar o desempenho do sistema. Oscilações em diferentes partes da trajetória da curva podem representar diferentes tipos de falhas.

Os resultados dos testes que serão apresentados a seguir foram realizados em uma usina fotovoltaica onde cada medição representa uma string e cada string é composta por 30 módulos em série.

Ao fazer os testes em campo foi identificado alguns fatores que afetam diretamente a geração de energia e conseqüentemente causam um impacto financeiro. A seguir serão apresentados alguns deles.

Os dados de uma outra usina (usina 2) localizada na região de Jaíba – MG, foram utilizados com o intuito de fazer uma comparação com os resultados referentes a usina 1 localizada na região de Juazeiro – BA.

5.1 Sombreamento

O sombreamento nos módulos é um problema recorrente nas usinas fotovoltaicas, seja por vegetação elevada, alguma estrutura/equipamento próximo ou até mesmo devido a outros módulos dependendo do momento do dia. O caso mais comum é a vegetação elevada que causa um sombreamento nos módulos e a partir disso faz com que a produção de energia diminua. Além disso, um ponto quente é gerado no módulo quando se tem um sombreamento.

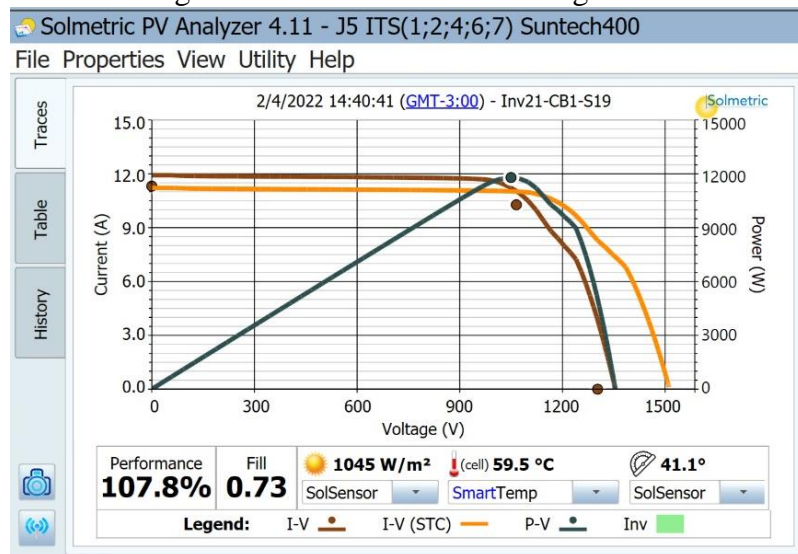
As figuras a seguir mostram o sombreamento sobre os módulos e o gráfico resultante:

Figura 16 – Sombreamento do poste



Fonte: Do autor.

Figura 17 – Gráfico referente a figura 16



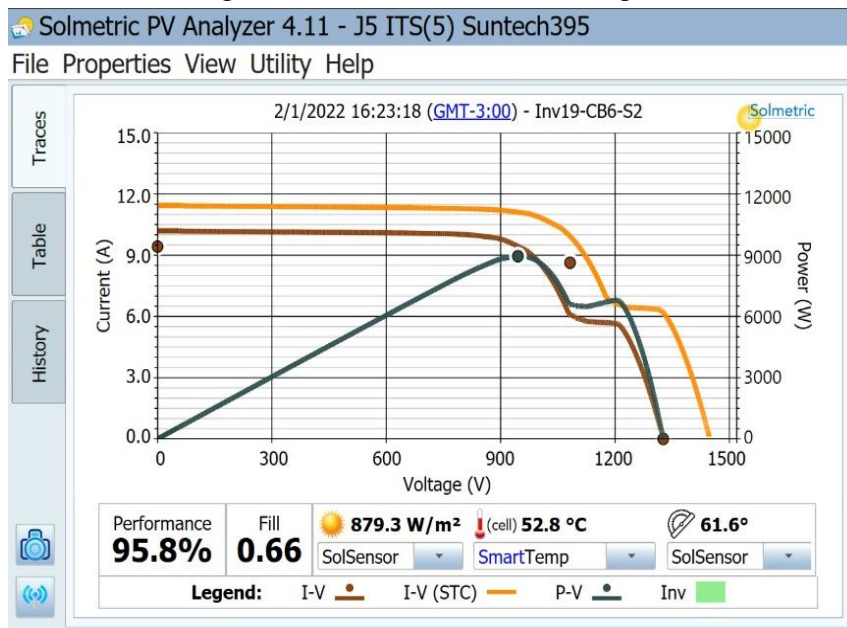
Fonte: Do Autor.

Figura 18 – Sombreamento causado por caixas de módulos



Fonte: Do Autor.

Figura 19 – Gráfico referente a figura 18



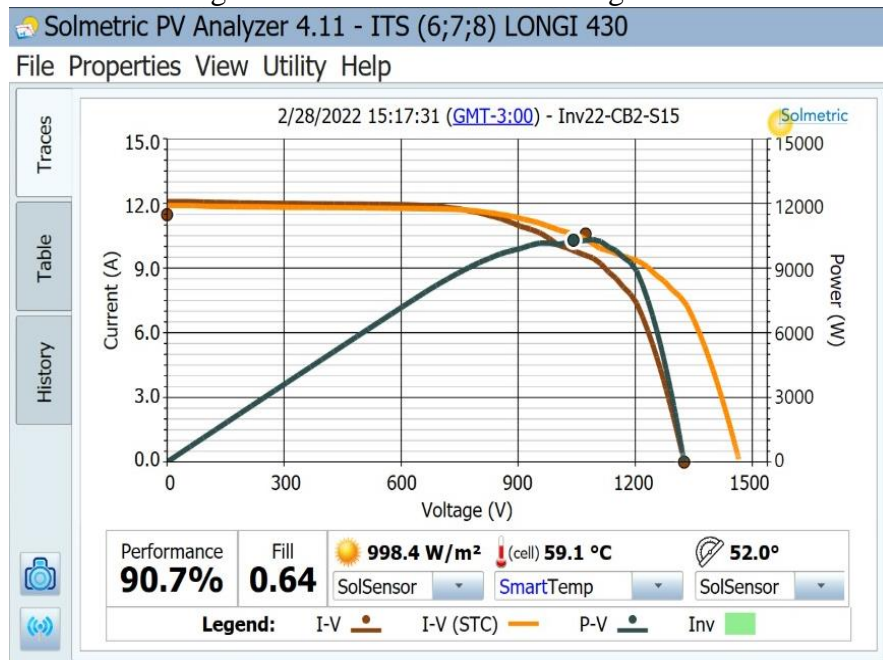
Fonte: Do Autor.

Figura 20 – Sombreamento causado pela vegetação elevada



Fonte: Do autor.

Figura 21 – Gráfico referente a figura 20



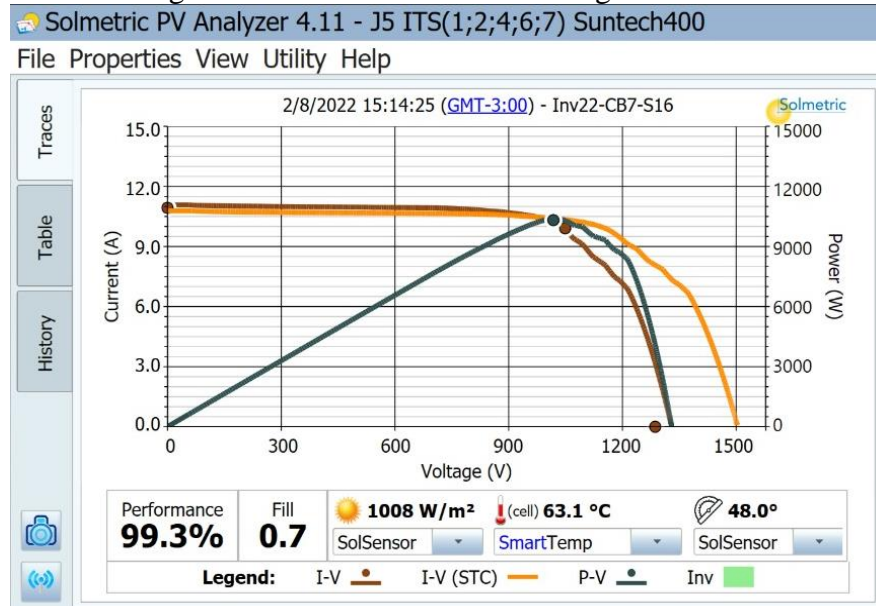
Fonte: Do autor.

Figura 22 – Sombreamento causado pela vegetação elevada



Fonte: Do autor.

Figura 23 – Gráfico referente a imagem 22



Fonte: Do autor.

Através das figuras anteriores, podemos observar que o sombreamento causa uma oscilação no gráfico e essa oscilação varia de acordo com a quantidade de módulos atingidos e a área afetada.

Quando a falha é causada por sombreamento devido a vegetação elevada, é simples e de fácil correção: basta manter a vegetação sempre aparada como parte de um plano de

manutenção e se atentar aos meses com maiores incidências de chuva em que a vegetação possui um maior desenvolvimento. Embora seja um problema de fácil solução, se não for feita a correção, ao longo do tempo o problema pode se agravar e o simples sombreamento pode levar a pontos quentes no módulo que futuramente se tornam defeitos irreversíveis sendo necessário fazer a troca do equipamento.

5.2 Módulo trincado, quebrado ou queimado

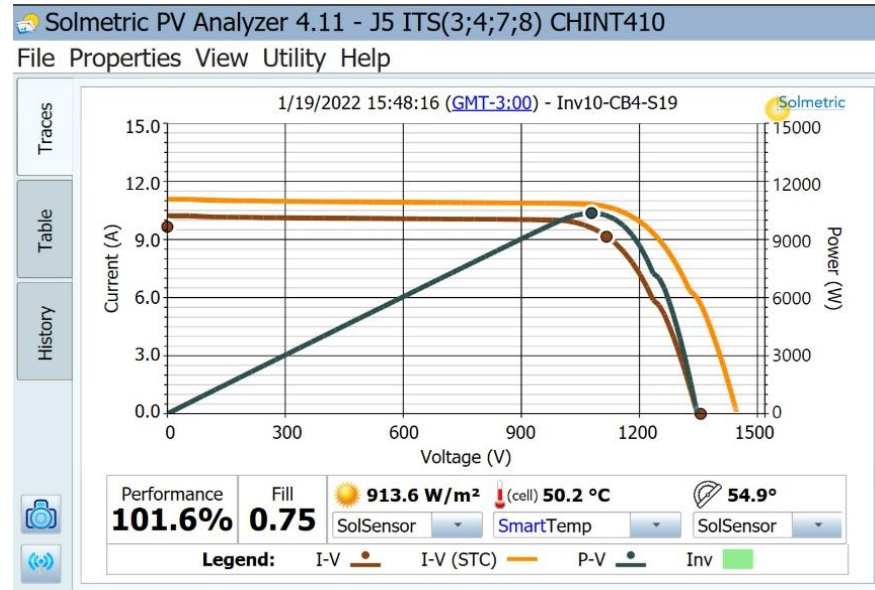
Quando um módulo sofre algum tipo de impacto seja durante o transporte ou na instalação, ocorre uma redução do desempenho devido as células afetadas e, conseqüentemente, uma maior degradação do módulo com o tempo. Um impacto no módulo pode ocasionar uma trinca na camada de proteção mecânica e/ou causar microfissuras nas células. Em alguns casos, as microfissuras nas células não são visíveis, sendo assim, são necessários testes de termografia e de eletroluminescência (EL) para que possa ser detectado. Em um módulo trincado, a umidade atinge as células provocando a oxidação e aumento da degradação. O teste realizado é capaz de detectar módulos quebrados/trincados quando as células afetadas sofrem um dano maior. A figura 24 mostra um módulo quebrado e a figura 25 o gráfico resultante.

Figura 24 – Módulo quebrado



Fonte: Do autor.

Figura 25 – Gráfico referente a figura 23



Fonte: Do autor.

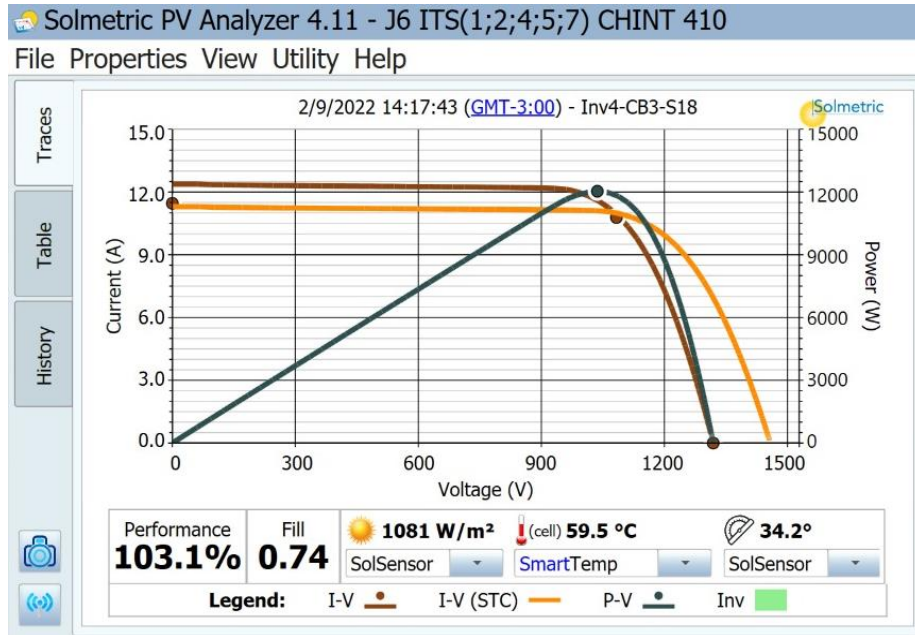
A figura a seguir mostra um módulo trincado, porém, as células não foram atingidas. A figura 27 mostra o gráfico resultante, e como não houve danos nas células, a curva não sofreu nenhuma alteração.

Figura 26 – Módulo trincado sem danos nas células



Fonte: Do autor.

Figura 27 – Gráfico referente a figura 26



Fonte: Do autor.

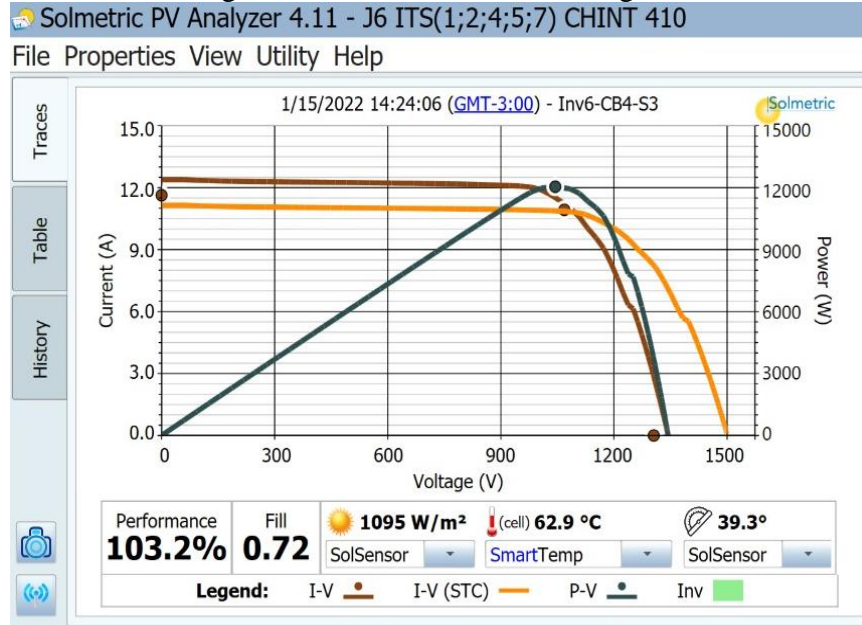
A figura 28 a seguir mostra um módulo trincado em que as células foram atingidas. A figura 29 mostra o gráfico resultante e como as células sofreram danos, houve uma distorção da curva.

Figura 28 – Módulo trincado com células danificadas



Fonte: Do autor.

Figura 29 – Gráfico referente a figura 28



Fonte: Do autor

Através das figuras apresentadas anteriormente, podemos observar que quando se tem um módulo quebrado o gráfico da string apresenta uma distorção. Quando o módulo trinca, mas não afeta as células ou causa apenas microfissuras, o teste não é capaz de identificar. Em casos de módulos trincados/quebrados é necessário realizar a troca do equipamento o mais breve possível.

5.3 Circuito Aberto e Fusível Queimado

Os conectores dos cabos dos módulos e dos fios ligam até a string-boxer, são chamados também de conectores MC4 e quando mal conectados podem gerar um ponto quente e aquecer consideravelmente ao ponto de derreter e abrir um arco elétrico. Quando isso acontece, o circuito se abre e a string para de produzir energia. A figura 30 a seguir ilustra o que foi descrito anteriormente.

Figura 30 – Falha na conexão



Fonte: Do autor.

O fusível é um equipamento de segurança e toda vez que houver algum fusível queimado é sinal que houve um surto de corrente ou tensão da string. Dessa forma, ele atua para que o problema não seja agravado. Em casos de fusível queimado, deve-se fazer uma inspeção a fim de identificar a causa que levou o fusível a atuar. A figura 31 a seguir mostra um fusível queimado com sinais de aumento de temperatura.

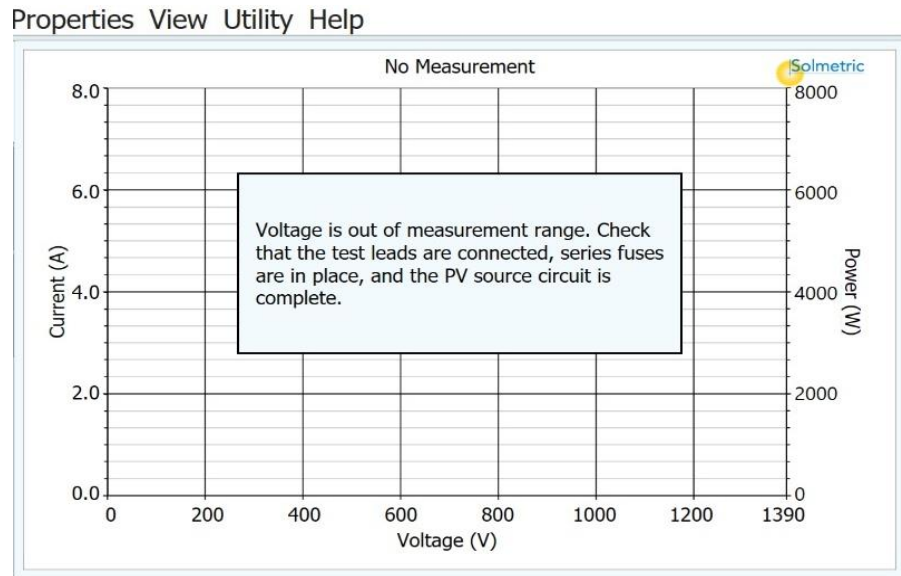
Figura 31 – Fusível queimado



Fonte: Do autor.

Em ambos os casos a tensão não chega até o barramento, sendo assim, não é possível realizar o teste, uma vez em que o circuito se encontra aberto. Quando isso acontece o programa emite uma mensagem que é apresentada na figura 32 a seguir:

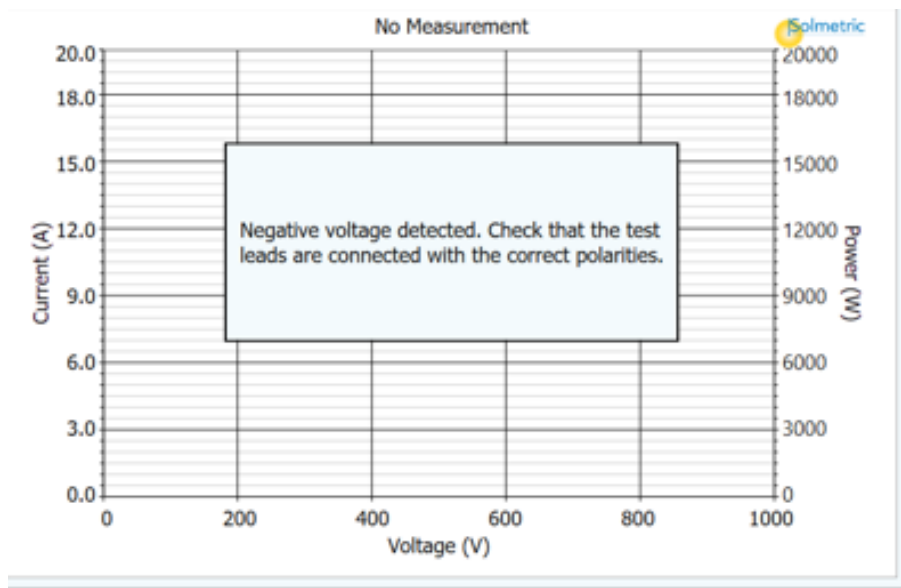
Figura 32 – Resultado do teste quando não há tensão no barramento



Fonte: Do autor.

Em casos de conexões trocadas em que as polaridades das strings ficam invertidas, o programa emite a mensagem descrita na imagem a seguir.

Figura 33 – Resultado do teste quando há polaridade invertida.



Fonte: Do autor.

5.4 Sujeira sobre os módulos

A sujeira sobre os módulos diminui a capacidade que o equipamento tem para absorver a irradiação do sol e converter em energia elétrica e conseqüentemente a produção de energia é reduzida. Nos períodos de chuva, a própria água da chuva ajuda no controle da sujeira, limpando a poeira retida na superfície dos módulos, porém, em alguns períodos do ano o volume de chuva é reduzido sendo necessário fazer a limpeza dos mesmos.

Figura 34 – Acúmulo de poeira nos módulos



Fonte: Do autor.

Em casos de sujeiras pontuais como apresentado na figura 35 a seguir resulta em pontos quentes, e caso essa sujeira permaneça por muito tempo essa falha pode se agravar e tornar irreversível.

Figura 35 – Sujeira sobre o módulo



Fonte: Do autor.

5.5 Tracker em Posição Incorreta

Alguns trackers com problemas mecânicos ou de comunicação ficam em posição diferente do restante e isso faz com que a irradiação naquela posição seja menor e conseqüentemente produza menos energia. A figura 36 a seguir mostra um tracker em posição diferente do restante.

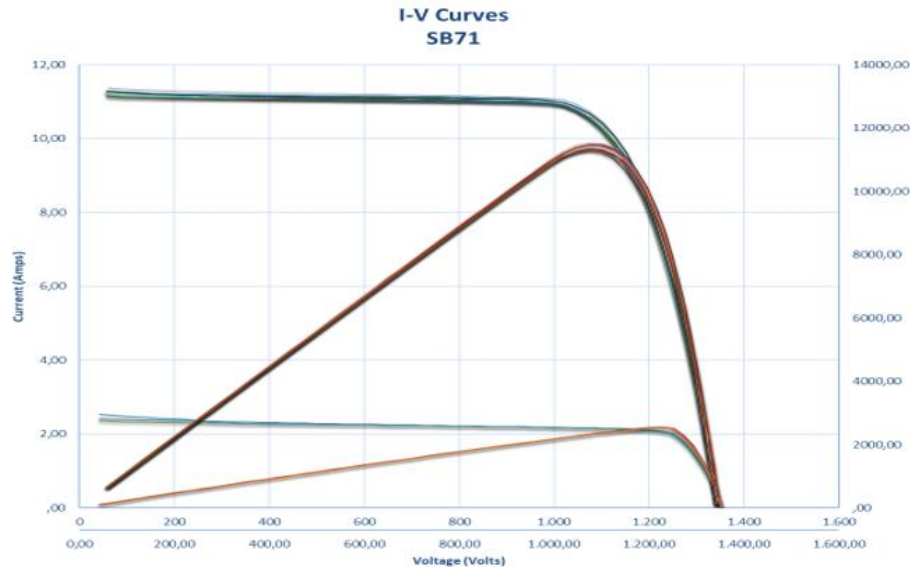
Figura 36 – Tracker em posição irregular



Fonte: Do autor.

Cada tracker possui 3 strings e, quando feita a medição em uma string-boxer que contém algum trackers em posição irregular, os dados obtidos das 3 strings referentes ao tracker apresentam uma curva menor comparadas ao restante devido à diferença de irradiação, como mostra a figura a seguir:

Figura 37 – Gráfico referente a figura 34



Fonte: Do autor.

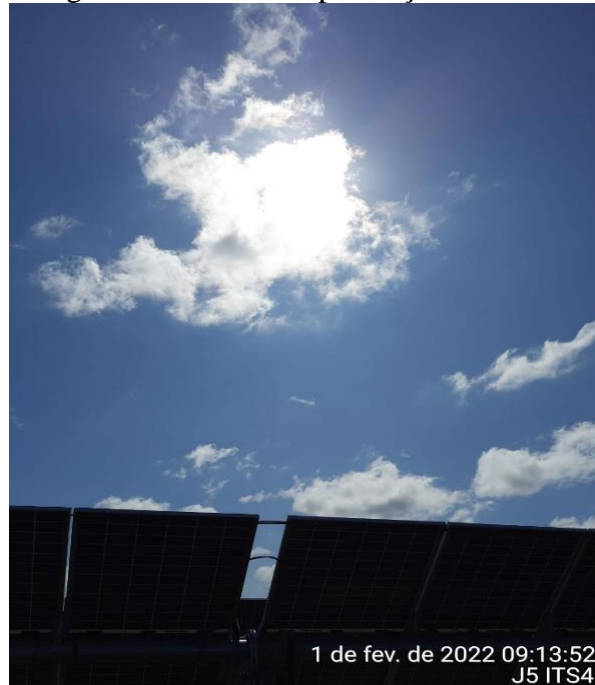
Esse resultado é considerando o momento em que o teste foi realizado. Como os trackers se movimentam durante o dia, em algum momento o tracker que está parado se alinha com o restante. Quando há problemas na movimentação dos trackers, a produção de energia irá ter seu máximo desempenho no momento do dia em que o sol estiver perpendicular aos módulos, a geração de energia vai aumentando até que chegue na posição de maior incidência de irradiação e depois vai diminuindo.

5.6 Presença de Nuvens

O teste é dependente da incidência de irradiação no módulo e da temperatura da superfície do mesmo no momento do teste, sendo assim, é importante que o teste seja realizado em um dia em que o céu esteja limpo. As nuvens fazem com que a irradiação solar varie e consequentemente a temperatura do módulo. Quando há presença de nuvens ocorre o fenômeno da deflexão dos raios solares que causam um pico de irradiação superando a irradiação normal, o que reduz a confiabilidade do teste. Quando alguma nuvem encobre o sol, o recomendado é aguardar até que ela saia totalmente da direção do sol e esperar alguns minutos até que a

irradiação estabilize. A figura a seguir mostra como a luz do sol fica difusa na presença de nuvens.

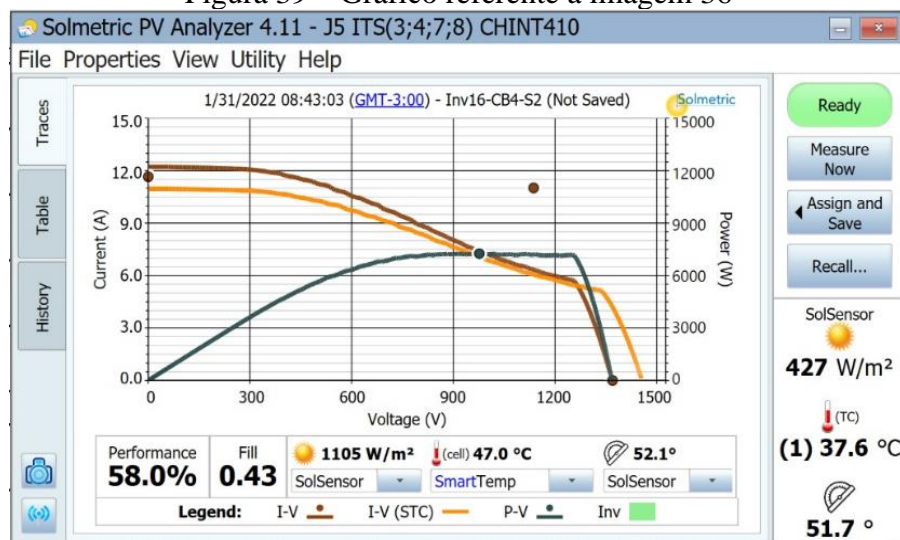
Figura 38 – Céu com presença de nuvens



Fonte: Do autor.

Quando há presença de nuvem no momento do teste, a irradiação diminui imediatamente. Como a corrente gerada no módulo é dependente da quantidade de irradiação, o gráfico apresenta uma oscilação brusca na curva como pode ser observado na figura a seguir.

Figura 39 – Gráfico referente a imagem 36



Fonte: Do autor.

Através do comportamento do gráfico apresentado na figura anterior é possível observar que a corrente tem uma redução brusca, isso se dá pelo fato de que a corrente está relacionada com a irradiação, além disso, é possível observar que a temperatura diminui com a redução da irradiação. Quando uma nuvem densa se aproxima da direção do sol, acontece um pico de irradiação causado pela reflexão dos raios solares, se no momento do teste acontecer este fenômeno o teste deve ser refeito quando o céu estiver ausente de nuvens.

5.7 Usina fotovoltaica 1

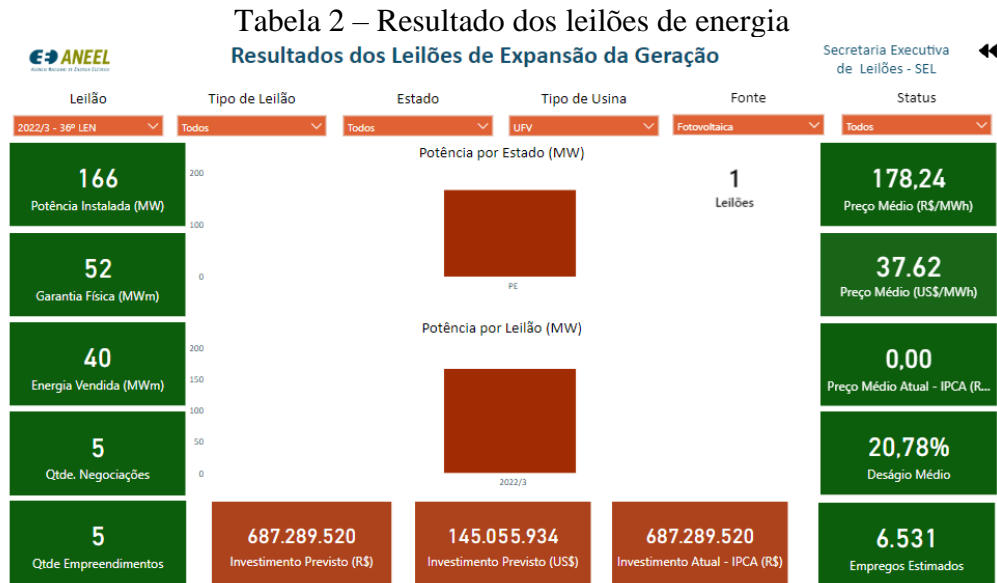
A usina fotovoltaica onde foi realizado o teste utiliza módulos de 3 fabricantes diferentes e de potências distintas, sendo elas de 395, 400, 410, 415 e 430 Watts. Cada string é composta por 30 módulos. A tabela a seguir mostra o valor da potência de cada string e a potência instalada. Para realizar os cálculos sobre o impacto causado por falhas e danos nos módulos, foi feito uma média dos valores da potência de cada string.

Tabela 1 – Potência de cada string

Potência de cada módulo (Watts)	Quantidade de módulos	Potência de cada string (Watts)	Quantidade de string	Potência (MW)
395	21780	11850	726	8,6031
400	127800	12000	4260	51,12
410	133740	12300	4458	54,8334
415	16830	12450	561	6,98445
430	37620	12900	1254	16,1766
435	112950	13050	3765	49,13325
Total	450720	Média = 1245	15024	186,8508

Fonte: Do autor.

Segundo o site da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), a energia produzida em grandes usinas conectadas à rede de distribuição, também chamadas de geração centralizada, antes contavam com um incentivo do governo, porém, nos últimos meses o governo vetou alguns benefícios fiscais que impactou diretamente no preço da energia. O preço comercial da energia se dá através de leilões realizados pela ANEEL. A tabela 2 a seguir mostra o preço médio do último leilão.



Fonte: ANEEL.

Com o resultado do teste, foi possível identificar algumas anomalias nas curvas obtidas, mencionadas anteriormente. A tabela 3 a seguir mostra a quantidade de strings que foram diagnosticadas com alguma falha ou defeito que influenciam na geração de energia.

Tabela 3 – Quantidade de strings da usina 1 que foram diagnosticadas com alguma falha ou defeito que influencia na geração de energia

Parque	Subcampo	Total de strings	Circuito aberto	Fusível queimado	Strings com sombreamento	Strings em posição irregular	Módulo quebrado	Total de strings com defeito
J5	1	636	-	-	-	-	-	0
	2	621	3	1	4	-	-	4
	3	624	1	-	8	9	-	1
	4	627	1	-	3	6	-	1
	5	582	4	3	4	3	-	7
	6	312	1	2	51	3	-	3
	7	627	4	-	5	3	-	4
	8	618	1	-	-	3	1	1
J6	1	606	3	3	9	-	-	6
	2	597	-	-	3	-	2	0
	3	624	7	-	-	3	-	7
	4	600	1	3	28	12	-	4
	5	600	1	1	10	15	-	2
	6	336	3	-	-	5	-	3
	7	594	6	-	33	3	-	6
	8	588	1	-	48	6	-	1
J7	1	288	-	-	4	-	-	0
	2	576	-	-	4	3	1	0
	3	576	1	-	81	3	-	1
	4	576	-	1	32	-	-	1
	5	591	1	-	37	-	1	1
	6	603	1	-	129	-	-	1
	7	528	2	-	92	-	-	2
	8	582	1	-	103	-	-	1
J8	1	573	3	-	-	-	-	3
	2	615	5	2	-	3	-	7
	3	324	3	-	-	3	-	3
Total		15024	54	16	688	83	5	70

Fonte: Do autor.

De acordo com a tabela anterior, somando o total de strings com circuito aberto e fusível queimado, o valor total é de 70 strings que estavam sem gerar energia, ou seja, 0,4659%, aproximadamente 0,5% do total.

O teste em questão trata-se de um dos parâmetros de manutenção preventiva da usina. O custo do teste é calculado por string-box (SB) e sabendo que o parque possui 798 SB's o custo total é representado na tabela a seguir:

Tabela 4 – Custo total do teste da usina 1		
Custo por SB	Quantidade SB	Custo total
R\$ 80,00	798	R\$ 63.840,00

Fonte: Do autor.

A tabela a seguir apresenta os dados utilizados para uma análise de viabilidade do teste em questão. O valor da energia foi retirado do resultado de leilões publicados no site da ANEEL, o fator de capacidade foi de 25,80% segundo o site da ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) e as taxas de juros foram obtidas através do site do Banco Central do Brasil.

Tabela 5 – Dados referentes a usina 1

Potência instalada	186850800 Watts
vida útil	25 anos
juros de mercado ao ano	13,15% a.a
juros de mercado ao mês	0,83% a.m
custo do teste	63840 R\$
custo unitário do módulo	950 R\$
quantidade de módulos	450720 unid
Fator de capacidade	25,80%
Energia produzida	1156980,15 KWh/dia
custo da eletricidade	0,178 KWh
valor da energia	205942,47 R\$/dia
quantidade de módulos quebrados	5 unid
energia perdida em 0,5% das strings	933366 Wp
eletricidade perdida	5779,40 KWh/dia
valor de energia perdida	1028,73 R\$/dia
valor dos módulos	4750 R\$

Fonte: Do autor.

Segundo (Yamasoe, 2006) sobre a linha do Equador a duração da luz do dia é a mesma ao longo de todo o ano, ou seja, 12 horas. Embora ao longo do território brasileiro esse período de luz do sol possa variar, foi considerado um período de 10 horas para os cálculos visto que a localização da usina onde foi realizado o estudo de caso é próxima à linha do equador, ainda que, no início e no fim do dia, a irradiação é menor e consequentemente a produção de energia.

Para o cálculo da energia perdida foi considerado uma média da potência de cada string e 0,5% da potência total através dessa média. Sabendo que o valor de venda da energia é de 0,178 R\$/KWh, pôde-se calcular o custo da energia levando em consideração o fator de capacidade de 25,80%, e assim chegar a um valor referente as strings fora de geração. A Tabela a seguir mostra o impacto financeiro.

Tabela 6 – Valor da energia perdida com as strings fora da geração da usina 1

0,5% do total de strings				
	Dia	Semana	Mês	Ano
Total	R\$ 1.028,73	R\$ 7.201,14	R\$ 30.862,01	R\$ 375.487,77

Fonte: Do autor.

Para uma análise de viabilidade do teste temos como investimento inicial o valor do teste e o custo dos módulos quebrados e, em contrapartida, temos a energia perdida com as strings fora de operação durante um mês. A figura a seguir mostra o investimento inicial e o retorno nos meses seguintes.

Tabela 7 – Investimento e retorno do teste na usina 1

Custo do teste	R\$ 63.840,00					
Custo dos módulos	R\$ 4.750,00					
Custo de energia perdida	R\$ 30.862,01					
Resultado	Mês 1	Mês 2	Mês 3	Mês 4	Mês 5	Mês 6
	-R\$ 68.590,00	R\$ 30.862,01	R\$ 30.862,01	R\$ 30.862,01	R\$ 30.862,01	R\$ 30.862,01

Fonte: Do autor.

Para saber se o teste é viável, foram calculados os valores de VPL, TIR e PAYBACK, através do software EXCEL que contém as formulas inseridas no programa. Utilizou-se a taxa de juros de mercado mensal para o cálculo do VPL e comparação com a TIR. Os resultados encontrados são apresentados na figura a seguir.

Tabela 8 – Parâmetros econômicos da usina 1

VPL	81950,92	
TIR	35%	
PAYBACK	2,22	meses

Fonte: Do autor.

Para que um projeto seja aprovado, o valor do VPL terá que ser maior que 0, caso seja igual a 0 o projeto é economicamente indiferente e menor que 0 o projeto é rejeitado. Visto que o valor obtido do VPL foi de 81950,92 o teste é ideal. Outro parâmetro de avaliação é a TIR, segundo ele para que um investimento seja economicamente satisfatório, a taxa de retorno deverá ser maior que a taxa de juros de mercado. Comparando os valores, a TIR apresentou um valor de 35%, ou seja, maior que a taxa Selic de 0,83%. Visto que o PAYBACK, quantidade de períodos necessário para acumular o valor de retorno igual ao custo inicial, foi de apenas 2,22 meses e que as análises anteriores foram satisfatórias, podemos chegar a uma conclusão de que o teste é viável.

5.8 Usina fotovoltaica 2

O mesmo teste foi realizado em uma outra usina de menor capacidade na região do norte de Minas Gerais, a figura a seguir mostra o resultado do teste contendo o quantitativo e a descrição das falhas e interferências na geração de energia.

Tabela 9 – Quantidade de strings da usina 2 que foram diagnosticadas com alguma falha ou defeito que influencia na geração de energia

Subcampo	Total de strings	Circuito aberto	Fusível queimado	Strings com sombreamento	Strings em posição irregular	Módulo trincado/quebrado	Total de strings com defeito
1	792	2	-	14	4	-	2
2	788	3	-	13	26	-	3
3	776	-	-	-	-	-	0
4	787	-	-	-	4	3	0
5	840	-	-	-	8	2	0
6	836	1	-	4	20	-	1
7	822	1	1	-	16	-	2
8	683	1	-	14	8	-	1
9	672	1	-	1	32	-	1
10	824	1	-	2	4	1	1
11	824	2	-	-	-	-	2
TOTAL	8644	12	1	48	122	6	13

Fonte: Do autor.

Através da figura anterior é podemos verificar que a soma das strings com circuito aberto e fusível queimado resultam em 0,15% do total, ou seja, essa é a porcentagem das strings que estavam fora de geração.

Sabendo a quantidade de string box e o valor do teste de cada uma é possível calcular o custo total do teste que é apresentado na figura a seguir.

Tabela 10 – Custo total do teste da usina 2

Custo por SB	Quantidade SB	Custo total
R\$ 80,00	440	R\$ 35.200,00

Fonte: Do autor.

A tabela a seguir apresenta os dados utilizados para a análise de viabilidade do teste em questão. O valor da energia, do fator de capacidade e das taxas de juros foram os mesmos já apresentados para os cálculos da usina 1.

Tabela 11 – Dados referentes a usina 2

Potência instalada	101630000 Watts
vida útil	25 anos
juros de mercado ao ano	13,15% a.a
juros de mercado ao mês	0,83% a.m
custo do teste	35200 R\$
custo unitário do módulo	950 R\$
quantidade de módulos	259320 unid
Fator de capacidade	25,80%
Energia produzida	629292,96 KWh/dia
custo da eletricidade	0,178 KWh
valor da energia	112014,15 R\$/dia
quantidade de módulos quebrados	6 unid
energia perdida em 0,15% das strings	152445 Wp
eletricidade perdida	943,94 KWh/dia
valor de energia perdida	168,02 R\$/dia
valor dos módulos	5700 R\$

Fonte: Do autor.

Para o cálculo da energia perdida foi considerado 0,15% do total da potência instalada na usina. Sabendo que o valor de venda da energia é de 0,178 R\$/KWh, pôde-se calcular o custo da energia levando em consideração o fator de capacidade de 25,80%, e assim chegar a um valor referente as strings fora de geração. A Tabela a seguir mostra o impacto financeiro.

Tabela 12 – Valor da energia perdida com as strings fora de geração da usina 2

0,15% do total de strings				
	Dia	Semana	Mês	Ano
Total	R\$ 168,02	R\$ 1.176,15	R\$ 5.040,64	R\$ 61.327,75

Fonte: Do autor.

Para uma análise de viabilidade do teste temos como investimento inicial o valor do teste e o custo dos módulos quebrados e, em contrapartida, temos a energia perdida com as strings fora de operação durante um mês. A figura a seguir mostra o investimento inicial e o retorno nos meses seguintes.

Tabela 13 – Investimento e retorno do teste na usina 2

Custo do teste	R\$ 35.200,00					
Custo dos módulos	R\$ 5.700,00					
Custo de energia perdida	R\$ 5.040,64					
Resultado	Mês 1	Mês 2	Mês 3	Mês 4	Mês 5	Mês 6
	-R\$ 40.900,00	R\$ 5.040,64	R\$ 5.040,64	R\$ 5.040,64	R\$ 5.040,64	R\$ 5.040,64
	Mês 7	Mês 8	Mês 9	Mês 10	Mês 11	Mês 12
	R\$ 5.040,64	R\$ 5.040,64	R\$ 5.040,64	R\$ 5.040,64	R\$ 5.040,64	R\$ 5.040,64

Fonte: Do autor.

Para saber se o teste é viável, foram calculados os valores de VPL, TIR e PAYBACK, através do software EXCEL que contém as formulas inseridas no programa. Utilizou-se a taxa de juros de mercado mensal para o cálculo do VPL e comparação com a TIR. Os resultados encontrados são apresentados na figura a seguir.

Tabela 14 – Parâmetros econômicos da usina 2

VPL	11882,24	
TIR	5%	
PAYBACK	8,11	meses

Fonte: Do autor.

Para que um projeto seja aprovado, o valor do VPL terá que ser maior que 0, caso seja igual a 0 o projeto é economicamente indiferente e menor que 0 o projeto é rejeitado. Visto que o valor obtido do VPL é de 11882,24 o teste é ideal. Outro fator de avaliação é a TIR, segundo ele para que um investimento seja economicamente satisfatório, a taxa de retorno deverá ser maior que a taxa de juros de mercado. Comparando os valores, a TIR apresentou um valor de 5%, ou seja, maior que a taxa Selic de 0,83%. Visto que o PAYBACK, quantidade de períodos necessário para acumular o valor de retorno igual ao custo inicial, foi de apenas 8,11 meses e que as análises anteriores foram satisfatórias, podemos chegar a uma conclusão de que o teste é viável.

Para os cálculos realizados anteriormente, não foram considerados os custos com mão de obra, fusíveis queimados, conectores danificados e perdas por sombreamentos e sujeiras identificadas no momento do teste. Essas falhas por sombreamento são complexas de serem mensuradas por acontecerem em certo período do dia e de acordo com a angulação dos módulos. Mesmo não considerando esses fatos os cálculos apresentaram resultados positivos e isso mostra a importância da realização do teste.

O intuito do teste além de identificar as falhas é verificar se os módulos estão gerando conforme a informação do fabricante. Como se trata de usinas construídas recentemente com todos os módulos novos não houve divergências, porém, pelo fato de ficarem expostos a diversas condições climáticas, os módulos ficam sujeitos a uma degradação natural, sendo assim, é recomendado que o teste seja refeito com uma certa periodicidade como forma de um plano de manutenção.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma metodologia para determinação de danos e falhas em módulos fotovoltaicos por meio do teste de curva I-V, assim como o retorno financeiro desta aplicação. O teste realizado é capaz de fornecer informações importantes sobre o real estado de funcionamento dos módulos, e por se tratar de uma verificação das condições de operação e da garantia de um bom desempenho do sistema, este trabalho teve como intuito ressaltar a importância de realizar o teste de curva I-V capaz de fornecer informações detalhadas para detectar perdas de energia e evitar problemas futuros.

Partindo das falhas e dos danos identificados no teste, foi realizado um diagnóstico de forma eficiente com diferentes abordagens através de uma inspeção visual, da análise da curva e de seus principais parâmetros e, com isso, foi possível relatar a real situação do sistema com robustez comprovando a eficácia desse tipo de manutenção preventiva. As principais interferências identificadas na geração de energia foram o sombreamento, módulo trincado/quebrado, circuito aberto, fusível queimado, sujeira sobre os módulos e tracker em posição irregular.

Conforme apresentado no trabalho, para a usina 1 teve como investimento inicial o custo do teste de R\$ 63.840,00 somado com o custo dos módulos de R\$ 4.750,00 e como retorno financeiro o valor da energia perdida de R\$ 30.862,01 das strings sem geração. Ao analisar economicamente o teste foi possível verificar um VPL de 81950,92 maior que 0, a TIR de 35% sendo maior que a taxa de mercado Selic de 0,83% e um PAYBACK com um retorno 2,22 meses, desta forma conclui-se então que o investimento é satisfatório.

Para a usina 2 teve como investimento inicial o custo do teste de R\$ 35.200,00 somado com o custo dos módulos de R\$ 5.700,00 e como retorno financeiro o valor da energia perdida de R\$ 5.040,64 das strings sem geração. Ao analisar economicamente o teste foi possível verificar um VPL de 11882,24 maior que 0, a TIR de 5% sendo maior que a taxa de mercado Selic de 0,83% e um PAYBACK com um retorno 8,11 meses, desta forma conclui-se então que o investimento é satisfatório.

A utilização do teste I-V em usinas fotovoltaicas é importante e necessária uma vez que ele faz parte de um plano de manutenção para identificação da degradação dos módulos ao longo de sua vida útil. Além contribuir para evitar o desperdício de energia e problemas futuros, ele também proporciona informações detalhadas sobre o estado de funcionamento de um módulo ou uma string.

REFERÊNCIAS

ABE, C.F.; DIAS, J. B. **Avaliação de sombreamentos parciais em um sistema fotovoltaico com microinversor**. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. 2019.

ALMEIDA, R. R. G. et al. Proposição de uma metodologia para análise de viabilidade econômica de uma usina fotovoltaica. **Rev Principia**, v. 1, n. 34, p. 84-92, 2017. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/206052839.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br>. Acesso em: 29 jul. 2022.

ARAÚJO, Guilherme Pereira et al. Comparação e análise de módulos fotovoltaicos com células de silício cristalino. In: **Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2018, Brasil**. 2018. Disponível em: https://repositorio.pucrs.br/dspace/bitstream/10923/12374/2/Comparacao_e_analise_de_modulos_fotovoltaicos_com_celulas_de_silicio_cristalino.pdf. Acesso em: 16 jul. 2022

ARAÚJO, A. L. P. L. et al. **Topologias em traçador de curva I-V para módulos fotovoltaicos**. Universidade Federal de Uberlândia. 2020.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. Taxas de juros básicas. Banco Central Do Brasil. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>. Acesso em: 13 ago. 2022.

CREMASCO, N. P. **Estudo dos fatores que reduzem o desempenho de sistemas fotovoltaicos com diferentes tecnologias no estado do Paraná**. 2021. 215 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2021. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/26271/1/fatoresreduzemdesempenhofotovoltaicos.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2022

DANTAS, S. G.; POMPERMAYER, F. M. **Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos no Brasil e possíveis efeitos no setor elétrico**. Texto para Discussão, n. 2388. Ipea, 2018. Disponível em: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/211339/1/1024301222.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2022

DUPONT, I. M. **Metodologia para identificação de condições não ideais de operação de plantas fotovoltaicas**. 2021. 66 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/57005/3/2021_tese_imdupont.pdf. 28 jun. 2022.

OLIVEIRA, F. S. de. **Metodologia e instrumentação para ensaios de séries e arranjos fotovoltaicos de grande porte**. 2020. 111p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020. Disponível em: https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=Metodologia+e+instrumenta%C3%A7%C3%A3o+para+ensaios+de+s%C3%A9ries+e+arranjos+fotovoltaicos+de+grande+porte&btnG=. Acesso em: 23 jun. 2022.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Fator de Capacidade. **Operador Nacional Do Sistema Elétrico**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/fator-capacidade.aspx>. Acesso em: 10 ago. 2022.

PORTELA, J. P. G. **Análise financeira e de desempenho de planta solar fotovoltaica de 244,15 kWp conectada à rede**. 2020. 91 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/56372>. Acesso em: 15 jun. 2022.

SCUSSEL, E. **Análise dos impactos oriundos de sombreamento e microfissura sobre a geração de energia elétrica em painéis solares**. 2020. 70 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) - Universidade de Caxias do Sul, Bento Gonçalves, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/8804/TCC%20Evandro%20Scussel.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 15 jun. 2022

URBANETZ, I. V. **Diagnóstico de falhas em módulos fotovoltaicos**. 2019. 110 p. Dissertação (Mestrado em Energias renováveis e eficiência energética) – Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2019. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/39513e2e56b7e1b166adf984f2545caa/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>. Acesso em: 22 jul. 2022.

VILLALVA, M. Entendendo as curvas IV e PV dos módulos fotovoltaicos: Entenda as características dos módulos fotovoltaicos através das curvas IV e PV. **Canal Solar**. Campinas, mar. 2019. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/entendendo-as-curvas-iv-e-pv-dos-modulos-fotovoltaicos/>. Acesso em: 15 jun. 2022.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Érica, 2012.

YAMASOE, M. A. **Apostila da Disciplina Meteorologia Física II**. Instituto de astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, 2006.