

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

LEONARDO LUDVIG SILVA

**Análise de degradação de módulos fotovoltaicos  
utilizando combinação de técnicas de  
Inteligência Artificial**

São José - SC

março/2025

# **ANÁLISE DE DEGRADAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO COMBINAÇÃO DE TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL**

Projeto de Trabalho de conclusão de curso  
apresentado à Coordenadoria do Curso de  
Engenharia de Telecomunicações do campus  
São José do Instituto Federal de Santa Cata-  
rina

Orientador: Prof. Ramon Mayor Martins,  
Dr.

São José - SC

março/2025

*A nossa maior glória não reside no fato de nunca cairmos, mas sim em levantarmo-nos  
sempre depois de cada queda.*

*Oliver Goldsmith*

# RESUMO

A crescente demanda por energia limpa e sustentável impulsionou a expansão da geração de energia solar fotovoltaica. No entanto, a durabilidade e o desempenho dos módulos fotovoltaicos em condições reais de operação ainda geram questionamentos. O objetivo deste trabalho é analisar o desempenho em campo de diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos, comparando os resultados com as projeções dos fabricantes.

A metodologia empregada consiste na coleta de dados de módulos fotovoltaicos instalados em diferentes condições ambientais, utilizando o equipamento PV-Check para obter parâmetros como tensão, corrente, irradiação e temperatura. Os dados coletados são utilizados para acumular condições específicas para alimentar uma base de dados e classificar o funcionamento dos módulos. Além disso, é possível gerar curvas I-V e calcular a eficiência real dos módulos, comparando-a com os dados fornecidos pelos fabricantes. Por conseguinte, técnicas de Inteligência Artificial (IA) são utilizadas para analisar os dados e detectar padrões de degradação.

Os resultados preliminares de campo, revelam uma diferença substancial no desempenho entre módulos monocristalinos e policristalinos. Os módulos monocristalinos apresentaram maior estabilidade e eficiência, enquanto os policristalinos exibiram maior variabilidade e, em alguns casos, isso resulta em degradação acentuada.

Dessa forma, para constatação, propõe-se formas de análise dos módulos fotovoltaicos para realizar uma avaliação do desempenho eficiente e verificar diferenças entre tipos de módulos. Esta análise justifica-se pois a avaliação do desempenho em campo dos módulos fotovoltaicos é um passo crucial para garantir a confiabilidade e a eficiência dos sistemas de geração de energia solar.

Desse pressuposto, espera-se que a utilização de ferramentas adequadas como o PV-Check e técnicas de IA possam contribuir para uma análise mais precisa e completa, auxiliando na identificação de problemas e na otimização do desempenho dos sistemas fotovoltaicos.

**Palavras-chave:** Energia Solar. Degradação. Módulo fotovoltaico. Análise.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Células Mono e Policristalinas . . . . .	12
Figura 2 – Efeito voltaico . . . . .	13
Figura 3 – Equipamento de análise PV-Check . . . . .	14
Figura 4 – Módulo com degradação avançada . . . . .	20

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros coletados . . . . .	19
Tabela 2 – Cronograma de atividades . . . . .	21

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**IA** Inteligência Artificial.

**LSTM** *Long Short-Term Memory*.

**M-Si** Silício Monocristalino.

**MLP** *Multilayer Perceptron*.

**P-Si** Silício Policristalino.

**RNA** Rede Neural Artificial.

**Si** Silício.

**STC** *Standard Test Conditions*.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>8</b>
1.1	Objetivo geral	9
1.2	Objetivos específicos	9
1.3	Justificativa	10
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>11</b>
2.1	Energia solar	11
2.2	Módulos fotovoltaicos	11
2.3	Célula fotovoltaica	12
2.4	PV-Check	13
2.5	Técnicas de IA para análise e comparação	14
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>16</b>
3.1	Estudo sobre módulos fotovoltaicos e IAs	16
3.2	Coleta e Geração de Dados	16
3.3	Comparação entre os Dados e Ensaios Laboratoriais	17
3.4	Cálculo da Eficiência Real	17
3.5	Desenvolvimento de modelos de Inteligência Artificial (IA)	17
3.6	Ferramentas e Tecnologias	17
<b>4</b>	<b>PROPOSTA</b>	<b>19</b>
4.1	Coleta e Processamento de Dados	19
4.2	Implementação da Inteligência Artificial	19
4.2.1	Comparação de Eficiência com MLP	19
4.2.2	Análise das Curvas I-V com LSTM	20
4.3	Avaliação e Validação dos Modelos	20
4.4	Cronograma de Atividades	20
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>22</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica gerada por meio de usinas fotovoltaicas, também conhecida como energia solar, representa uma alternativa de geração limpa que tem se consolidado no setor energético. De acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (SOLAR, 2024) em 2023 a fonte solar representou 36GW de geração de energia, cerca de 16% da matriz elétrica do país. Em 2024, a energia solar respondeu por mais da metade da expansão da matriz elétrica brasileira (SOLAR, 2024). O aumento da popularidade dessa tecnologia é impulsionado pela queda nos custos de produção, tornando-a acessível a diferentes segmentos socioeconômicos. Atualmente, essa fonte é empregada tanto em pequenos sistemas residenciais para consumo próprio quanto em grandes usinas destinadas à comercialização no mercado livre de energia (SOLAR, 2024). Embora apresentem diferenças significativas na infraestrutura, como a potência dos inversores, capacidade dos dispositivos de proteção e a dimensão dos condutores, ambos os modelos de geração dependem dos módulos fotovoltaicos, componentes fundamentais na conversão da luz solar em energia elétrica.

Com o desenvolvimento tecnológico, surgiram duas principais variantes de células fotovoltaicas feitas de Silício (Si): as policristalinas (P-Si) e as monocristalinas (M-Si). As células policristalinas são produzidas com silício de diferentes graus de pureza, resultando em formações cristalinas irregulares, o que implica menor eficiência e maior sensibilidade a variações de temperatura. Em contrapartida, as células monocristalinas são fabricadas com silício de alta pureza, apresentando uma estrutura mais uniforme e maior eficiência energética. Entretanto, essa última tecnologia possui custo mais elevado (CARVALHO; MESQUITA; ROCIO, 2014).

O funcionamento dos módulos fotovoltaicos baseia-se na excitação de suas células de silício pela radiação solar. O silício, sendo um semicondutor, é combinado com elementos como boro e fósforo para criar camadas com polaridades opostas – positiva e negativa. Quando os fótons da luz solar atingem essas camadas, provocam o deslocamento de elétrons, gerando uma corrente elétrica contínua entre as camadas. Esse processo se mantém constante, com os fótons preenchendo as lacunas deixadas pelos elétrons, permitindo a geração ininterrupta de energia (CARVALHO; MESQUITA; ROCIO, 2014).

Em termos de desempenho, os fabricantes projetam que, após 25 anos de operação, os módulos fotovoltaicos manterão cerca de 80% de sua capacidade nominal (SOLAR, 2025b). No entanto, verificou-se que sistemas instalados há aproximadamente cinco anos já apresentam uma degradação superior à prevista (JORDAN; KURTZ, 2013). A alta temperatura de operação é uma das principais causas dessa queda de desempenho, impac-

tando especialmente os módulos policristalinos, cuja estrutura menos uniforme os torna mais vulneráveis ao superaquecimento (HUDIŞTEANU et al., 2024). Embora outros fatores, como erros de instalação e dimensionamento inadequado, possam contribuir para a degradação dos módulos, este trabalho se concentrará primariamente nos efeitos das condições climáticas.

Estudos recentes mostram que, mesmo em condições consideradas adequadas, alguns módulos já apresentam sinais visíveis de degradação, como manchas cinzentas nas células, causadas pela infiltração de umidade sob exposição à radiação ultravioleta (GEBHARDT et al., 2024). Além disso, algumas degradações não perceptíveis a olho nu são causadas por altas temperaturas e exposição prolongada ao clima. Essas falhas são mais comuns nos módulos policristalinos, que podem ter sua eficiência reduzida para 70% da capacidade nominal em apenas cinco anos, um resultado 10% abaixo da projeção de 80% estipulada para 25 anos (JORDAN; KURTZ, 2013). Dessa forma, dada a complexidade e o custo elevado das análises de desempenho desses sistemas, o presente estudo propõe o desenvolvimento de modelos de uma *Inteligência Artificial (IA)* para identificar se os módulos estão operando abaixo da eficiência esperada. A *IA* será alimentada com dados obtidos em laboratório, em condições ideais de fabricação, e comparará esses resultados com o desempenho real dos módulos em campo. Serão consideradas variáveis como tensão e corrente máxima de operação, irradiação solar, temperatura ambiente e a curva característica I-V do módulo. Com essa solução, pretende-se fornecer uma ferramenta eficiente para o monitoramento em tempo real dos sistemas fotovoltaicos, assegurando que eles mantenham a performance prometida e funcionem dentro dos parâmetros previstos.

## 1.1 Objetivo geral

Como objetivo geral, procura-se desenvolver um modelo de *IA* para avaliar o desempenho de módulos fotovoltaicos e identificar se estão operando abaixo da eficiência esperada, considerando as condições climáticas e comparando dados de laboratório. Também será desenvolvido um modelo *IA* para analisar as curvas I-V dos módulos e encontrar padrões de degradação.

## 1.2 Objetivos específicos

- Coletar dados de desempenho de módulos fotovoltaicos em condições de laboratório, incluindo tensão, corrente, irradiação solar e temperatura ambiente;
- Coletar dados de desempenho de módulos fotovoltaicos em campo, sob diferentes condições climáticas;

- Desenvolver um modelo de IA capaz de analisar os dados coletados em laboratório e em campo;
- Avaliar a influência da temperatura, umidade entre outros fatores do ambiente no desempenho dos módulos fotovoltaicos.
- Identificar os módulos fotovoltaicos que apresentam desempenho abaixo do esperado e as possíveis causas, considerando as condições climáticas.

### 1.3 Justificativa

No cenário atual da energia solar, observa-se uma crescente migração para os módulos monocristalinos, embora ainda não haja certeza absoluta sobre sua superioridade em relação aos policristalinos. Este estudo visa identificar padrões de degradação em módulos fotovoltaicos, avaliar o desempenho e ser capaz de discernir qual dos dois tipos de módulos apresenta maior durabilidade e mantém a eficiência esperada ao longo do tempo.

Para possibilitar a detecção de padrões de degradação, e viabilizar a análise e comparação do desempenho desses módulos, o estudo propõe o desenvolvimento de modelos de IA. Atualmente, mesmo com equipamentos de medição como o PV-Check, a verificação e comparação dos dados com os ensaios de laboratório são realizadas manualmente, demandando tempo e esforço consideráveis.

As *Inteligência Artificiais (IAs)* a serem desenvolvidas neste trabalho auxiliarão na automatização da análise das degradações que possam causar anomalias e permitirão, posteriormente, uma avaliação mais rápida e eficiente dos módulos fotovoltaicos.

# 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

## 2.1 Energia solar

A energia solar é uma fonte de energia renovável e limpa que utiliza a luz do sol para gerar eletricidade. Um sistema de geração de energia solar, também conhecido como sistema fotovoltaico, é composto por dois elementos principais, os módulos fotovoltaicos e o inversor (PINHO; GALDINO, 2014). Estes sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em dois tipos principais, os conectados à rede elétrica (*on-grid*), que permitem o consumo da energia solar e da rede, e os isolados (*off-grid*), ideais para locais remotos, onde a energia é armazenada em baterias (SOLAR, 2025b). Além dos painéis e do inversor, um sistema fotovoltaico pode incluir outros componentes como controladores de carga, baterias, estruturas de fixação e fiação. Porém, o que há em comum entre estes tipos de sistemas são os módulos fotovoltaicos, sendo considerados a parte vital de toda a operação.

## 2.2 Módulos fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos, foco deste estudo, são fabricados de diversas formas, porém a tecnologia dominante no mercado atual são as células de Silício cristalino. Esses módulos possuem cerca de 20% de eficiência e garantia de manter até 90% da capacidade em 10 anos de uso e até 80% da capacidade nominal em 25 anos (NASCIMENTO; RÜTHER, 2014).

A potência nominal de um módulo geralmente corresponde à sua capacidade máxima de geração de energia em condições laboratoriais padronizadas, conhecidas como *Standard Test Conditions* (STC) (PINHO; GALDINO, 2014). Essas condições, porém, não refletem os cenários reais de aplicação. Por esse motivo, ao analisar a eficiência de um módulo, não basta verificar apenas a potência atual gerada, mas sim calcular a fração da irradiação solar que está sendo efetivamente convertida em energia elétrica, levando em consideração fatores ambientais como temperatura de operação, irradiação e angulação.

Esse cálculo é realizado a partir da relação entre a potência de entrada e a potência de saída do módulo fotovoltaico, expressa pelas equações (SIKIRU et al., 2022):

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100 \quad (2.1)$$

$$P_{\text{in}} = G \times A \quad (2.2)$$

Onde:

- $\eta$  representa a eficiência do módulo (%);
- $P_{\text{out}}$  é a potência de saída do módulo (W);
- $P_{\text{in}}$  é a potência de entrada (W), o produto obtido da irradiação solar incidente ( $G$ , em  $\text{W}/\text{m}^2$ ) e da área do módulo ( $A$ , em  $\text{m}^2$ ).

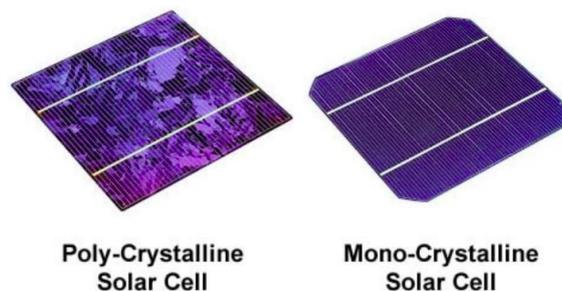
## 2.3 Célula fotovoltaica

A célula fotovoltaica é a unidade básica de um módulo fotovoltaico e é responsável por converter a luz solar em eletricidade. Quando os fótons (partículas de luz solar) colidem com os átomos do material do painel solar, provocando assim o deslocamento dos elétrons, esse fluxo de elétrons gera uma corrente elétrica contínua. Esse fenômeno tem o nome de “efeito fotovoltaico” (SOLAR, 2025a). Existem dois tipos principais de células fotovoltaicas, classificadas de acordo com o processo de fabricação do silício (B'UHLER; SANTOS; GABE, 2018):

**Silício Monocristalino (M-Si):** As células monocristalinas são fabricadas a partir de um único cristal de silício de alta pureza. Esse processo resulta em células com estrutura uniforme e maior eficiência energética, porém, seus custos de produção são mais elevados.

**Silício Policristalino (P-Si):** As células policristalinas são fabricadas a partir de vários cristais de silício de diferentes graus de pureza. Esse processo resulta em células com estrutura menos uniforme e menor eficiência energética em comparação com as monocristalinas, porém com custo de produção mais baixo.

Figura 1 – Células Mono e Policristalinas

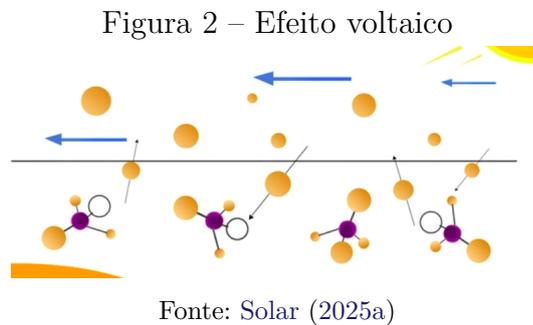


Fonte: Solar (2025)

Para que ocorra o efeito fotovoltaico, é necessário haver uma diferença de potencial nas células, ou seja, elas devem conter uma carga negativa e uma carga positiva. No

silício, isso é obtido ao combiná-lo com boro, um elemento que possui menos elétrons que o silício. Essa combinação faz com que o silício fique com falta de elétrons, gerando uma carga positiva. Já para criar uma carga negativa, o silício é combinado com fósforo, um elemento que possui mais elétrons que ele. Essa combinação faz com que o silício fique com excesso de elétrons, criando uma carga negativa (UFC, 2025).

As células fotovoltaicas são construídas sobrepondo camadas de silício carregado positivamente e silício carregado negativamente. A junção desses dois tipos de silício forma uma barreira de potencial, uma região onde os elétrons não podem fluir livremente. Quando a luz solar incide sobre a célula, os fótons fornecem energia suficiente para que os elétrons "saltem" essa barreira de potencial (PINHO; GALDINO, 2014).



## 2.4 PV-Check

Para realizar a medição dos dados dos módulos e coletar os parâmetros de desempenho, como a curva característica I-V, será utilizado o equipamento PV-Check Figura 3. Essa ferramenta é específica para uso em módulos fotovoltaicos e é conectada diretamente ao módulo. Utilizando um sensor auxiliar de angulação e outro sensor de irradiação, o PV-Check realiza um ensaio de desempenho do módulo, fornecendo dados precisos sobre sua eficiência e saúde (AMPERI, 2025).

Os parâmetros medidos e coletados pelo PV-Check são:

- Potência máxima de operação  $P_{max}$
- Tensão de circuito aberto  $V_{oc}$
- Tensão de máxima potencia  $V_{mpp}$
- Corrente curto-circuito  $I_{sc}$
- Corrente de máxima potencia  $I_{mpp}$
- Irradiação incidente na superfície do módulo

Figura 3 – Equipamento de análise PV-Check



(a) Medição dos módulos usando PV-Check



(b) PV-Check

- Temperatura de operação do módulo
- Fator de Preenchimento  $FF$
- Coeficiente de temperatura de tensão  $\alpha$
- Coeficiente de temperatura de corrente  $\beta$

## 2.5 Técnicas de IA para análise e comparação

A aplicação de [Inteligência Artificial](#) no estudo dos módulos fotovoltaicos permite uma avaliação mais precisa e eficiente do desempenho desses sistemas ao longo do tempo ([ROMERO et al., 2022](#)). Neste estudo, serão utilizadas duas abordagens de IA para a análise dos dados coletados.

A primeira abordagem utilizará uma *Multilayer Perceptron* (MLP) para comparar os dados operacionais dos módulos fotovoltaicos com os valores esperados fornecidos pelos fabricantes. O MLP é um tipo de *Rede Neural Artificial* (RNA) composta por múltiplas camadas de neurônios interconectados, sendo amplamente utilizado para tarefas de regressão e classificação ([RINCY; GUPTA, 2020](#)). O modelo será treinado utilizando dados obtidos em laboratório sob condições ideais e será capaz de identificar se o módulo está operando com eficiência abaixo do esperado para seu tempo de uso. Essa abordagem permitirá uma avaliação rápida e eficiente, pois irá comparar diretamente a eficiência do módulo.

A segunda abordagem será baseada em uma Rede Neural Recorrente do tipo *Long Short-Term Memory* (LSTM) para a análise das curvas características I-V. Esse tipo de rede neural é especialmente indicado para o tratamento de dados sequenciais e temporais,

pois possui mecanismos que permitem armazenar informações de longo prazo e capturar padrões ao longo do tempo (SHERSTINSKY, 2018). A LSTM será responsável por comparar as curvas obtidas em medições de campo com as curvas ideais esperadas, identificando desvios que possam indicar falhas nos módulos fotovoltaicos, como degradação acelerada, perda de eficiência ou mau funcionamento dos componentes. Devido à sua capacidade de detectar variações e tendências nos dados, esse modelo contribuirá para uma análise mais robusta, pois, além de identificar padrões de degradação nos módulos, poderá indicar sua possível causa com base na deformação da curva I-V característica.

Com essas soluções, as IA auxiliarão na interpretação dos dados coletados pelo PV-Check, permitindo detectar padrões de degradação e perdas de desempenho sutis, assim contribuindo para uma maior agilidade na análise dos módulos fotovoltaicos.

# 3 METODOLOGIA

Neste capítulo, é apresentada a metodologia a ser utilizada no desenvolvimento do trabalho, descrevendo as etapas do processo e as ferramentas que serão empregadas na pesquisa.

## 3.1 Estudo sobre módulos fotovoltaicos e IAs

A etapa inicial da metodologia consiste em uma revisão bibliográfica abrangente sobre módulos fotovoltaicos, explorando os diferentes tipos de células, seus princípios de funcionamento, características de desempenho, fatores de degradação e vida útil. Além disso, serão abordadas as fundamentações de [Inteligência Artificial](#), investigando os conceitos básicos, os tipos de técnicas de aprendizado de máquina, as estratégias de treinamento e validação, as métricas de avaliação e as aplicações de [IA](#) em sistemas fotovoltaicos. Por fim, será estudada a curva característica I-V, incluindo seus fundamentos, importância, parâmetros extraíveis e os efeitos de diferentes condições sobre seu comportamento.

## 3.2 Coleta e Geração de Dados

A coleta de dados será realizada utilizando o equipamento PV-Check, que permite obter as seguintes variáveis:

- Tensão e corrente de operação
- Azimute e elevação do módulo
- Irradiação solar incidente
- Temperatura de operação do módulo
- Curva característica I-V de cada módulo

Também será gerada uma base de dados sintética para os casos em que não for possível coletar dados de módulos em campo, simulando módulos em bom funcionamento, em mau funcionamento e nenhum funcionamento. Essa base de dados sintética será criada utilizando modelos matemáticos e/ou simulações computacionais que representem o comportamento de módulos fotovoltaicos em diferentes condições de operação e com diferentes níveis de degradação. Além disso, será gerada uma base de dados sintética específica para a análise das curvas I-V características, simulando variações típicas das

curvas I-V em diferentes cenários, garantindo que os modelos de IA sejam treinados corretamente para identificar anomalias, mesmo em condições em que a coleta de dados em campo seja limitada.

### 3.3 Comparação entre os Dados e Ensaios Laboratoriais

Os valores obtidos em campo serão comparados com parâmetros de pleno funcionamento fornecidos pelos fabricantes nos respectivos *datasheets* e resultados de ensaios laboratoriais realizados em condições ideais, caso estejam disponíveis.

Essa comparação permitirá identificar possíveis desvios no desempenho dos módulos em relação aos valores esperados.

### 3.4 Cálculo da Eficiência Real

A eficiência real de cada módulo será calculada pela relação entre a potência de saída (obtida a partir da curva I-V) e a potência incidente (calculada com base na irradiação solar). Esse cálculo permitirá determinar a porcentagem da energia solar que é efetivamente convertida em eletricidade pelo módulo.

### 3.5 Desenvolvimento de modelos de Inteligência Artificial (IA)

Será desenvolvido dois modelos de IA para analisar os dados coletados e identificar módulos com desempenho abaixo do esperado. Um modelo será treinado com dados de módulos em condições ideais STC e dados de módulos em campo ou da base sintética para verificar se o módulo está realmente abaixo do esperado e quanto seria sua eficiência, o outro modelo fará a comparação das curvas I-V em busca de padrões de degradação.

Os modelos de IA deverão ser capazes de:

- Comparar o desempenho real dos módulos em campo com os dados de referência.
- Identificar padrões de degradação e possíveis causas.
- Gerar alertas sobre módulos com desempenho abaixo do esperado.

### 3.6 Ferramentas e Tecnologias

Serão utilizadas as seguintes ferramentas e tecnologias:

- Equipamento PV-Check para coleta de dados em campo.

- Ferramentas de análise de dados (e.g., Python com bibliotecas como Pandas e NumPy).
- Bibliotecas de aprendizado de máquina (e.g., Scikit-learn, TensorFlow ou PyTorch).
- Ambiente de desenvolvimento para a IA (e.g., Google Colab ou Jupyter Notebook).

# 4 PROPOSTA

Neste capítulo é descrita a proposta do projeto a ser desenvolvido, bem como suas principais etapas e funcionamento, além do cronograma planejado para o desenvolvimento do trabalho.

## 4.1 Coleta e Processamento de Dados

Inicialmente, os módulos fotovoltaicos serão avaliados utilizando o equipamento PV-Check, que permitirá a obtenção de dados essenciais para a análise de desempenho. Os parâmetros coletados incluirão tensão, corrente, irradiação solar, temperatura de operação, curva característica I-V e coeficientes de temperatura [Tabela 1](#).

Os módulos testados serão de diferentes tecnologias, como silício [Silício Monocristalino \(M-Si\)](#) e [Silício Policristalino \(P-Si\)](#), possibilitando a comparação de seu desempenho em diferentes condições ambientais. Os dados serão coletados em campo e super amostrados utilizando uma base sintética, simulando diferentes condições de ambiente, e comparados com valores de referência obtidos em ensaios laboratoriais.

Tabela 1 – Parâmetros coletados

Módulo	Pmax[W]	Voc[V]	Vmpp[V]	Impp[A]	Isc[A]	Irrad.[W/m <sup>2</sup> ]	Temp.[°C]	FF[%]	$\alpha$ [%/°C]	$\beta$ [%/°C]
340W										
Medição	223,90	40,01	32,10	6,98	7,56	939	47,3	74	0,05	-0,37
STC	261,85	43,48	35,66	7,34	7,92	1000	25,0	76	0,05	-0,37
Nominal	340,00	45,78	37,37	9,10	9,47	1000	25,0	78	0,05	-0,37

Fonte: Elaborada pelo autor.

## 4.2 Implementação da Inteligência Artificial

Duas abordagens de [Inteligência Artificial \(IA\)](#) serão empregadas para a análise dos módulos fotovoltaicos:

### 4.2.1 Comparação de Eficiência com MLP

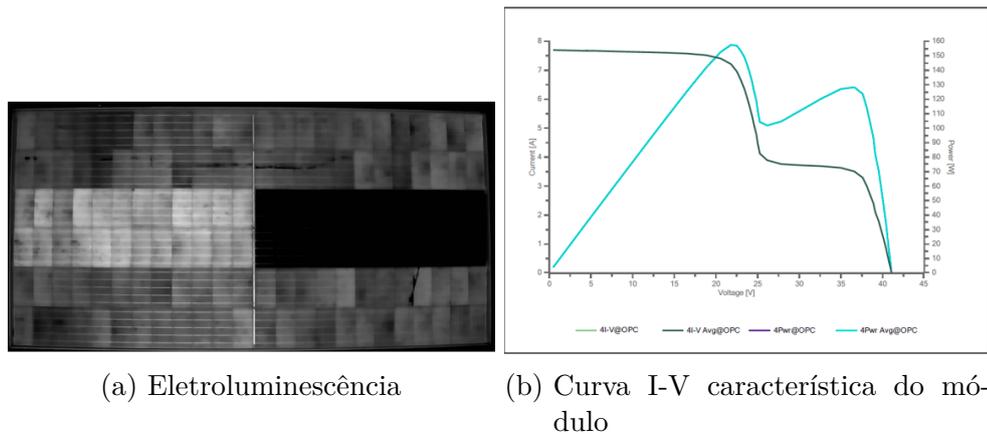
A primeira abordagem utilizará uma Rede Neural [MLP](#) para avaliar a eficiência dos módulos. O modelo será treinado com dados de laboratório sob condições ideais [STC](#) e comparará os valores obtidos em campo ou, em caso de poucas medições, com a base sintética, identificando se os módulos estão operando dentro da eficiência esperada, classificando em bom funcionamento, mau funcionamento ou nenhum funcionamento.

Essa rede neural será capaz de comparar a eficiência atual do módulo com a eficiência nominal, auxiliando na detecção de degradações.

#### 4.2.2 Análise das Curvas I-V com LSTM

A segunda abordagem será baseada em uma Rede Neural Recorrente do tipo LSTM para analisar as curvas I-V Figura 4b. Esse modelo permitirá identificar padrões na deformação destas curvas, correlacionando anomalias com possíveis causas de degradação, como superaquecimento, sombreamento ou falhas internas nos módulos.

Figura 4 – Módulo com degradação avançada



Ambas as redes neurais serão treinadas e validadas com um conjunto de dados coletados em laboratório, em campo e gerados sinteticamente, garantindo a robustez dos modelos antes da aplicação em situações reais. O trabalho conjunto dos dois modelos de IA permitirá, primeiro, identificar anomalias no funcionamento e, posteriormente, refinar a identificação em busca do padrão de degradação que a fez perder eficiência/desempenho.

### 4.3 Avaliação e Validação dos Modelos

Após o treinamento das IAs, será realizado um processo de validação para garantir a precisão dos modelos desenvolvidos. Os dados obtidos em novas medições serão inseridos nas redes neurais para verificar a taxa de acerto das previsões e identificar possíveis ajustes necessários.

### 4.4 Cronograma de Atividades

<b>Mês</b>	<b>Atividade</b>
Março/2025	Coleta de dados dos módulos em laboratório e em campo
Abril/2025	Pré-processamento e organização dos dados
Maió/2025	Desenvolvimento da IA (MLP e LSTM) e treinamento inicial
Junho/2025	Ajustes nos modelos e validação com novos dados
Julho/2025	Testes finais e otimização das redes neurais
Agosto/2025	Análise dos resultados e escrita do relatório
Setembro/2025	Preparação da apresentação e apresentação final

Tabela 2 – Cronograma de atividades

# REFERÊNCIAS

- AMPERI. *HT PVChecks: Ideal para fazer os testes de comissionamento de usinas fotovoltaicas*. 2025. Acesso em: 12 fev. 2025. Disponível em: <https://amperi.com.br/canais/energia-solar/ht-pvchecks-ideal-para-fazer-os-testes-de-comissionamento-de-usinas-fotovoltaicas/>. 13
- B"uHLER, A. J.; SANTOS, F. H. dos; GABE, I. J. Uma revisão sobre as tecnologias fotovoltaicas atuais. *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*, 2018. Gramado, 17 a 20 de abril de 2018. 12
- CARVALHO, P. S. L. d.; MESQUITA, P. P. D.; ROCIO, M. A. R. A rota metalúrgica de produção de silício grau solar: uma oportunidade para a indústria brasileira? *Metalurgia*, v. 40, p. 205–234, 2014. 8
- GEBHARDT, P. et al. *Reliability of Commercial TOPCon PV Modules – An Extensive Comparative Study*. 2024. 9
- HUDIȘTEANU, V.-S. et al. Impact of temperature on the efficiency of monocrystalline and polycrystalline photovoltaic panels: A comprehensive experimental analysis for sustainable energy solutions. *Sustainability*, v. 16, n. 23, 2024. ISSN 2071-1050. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/23/10566>. 9
- JORDAN, D. C.; KURTZ, S. R. Photovoltaic degradation rates—an analytical review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 21, n. 1, p. 12–29, 2013. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pip.1182>. 8, 9
- NASCIMENTO, L. R. do; RÜTHER, R. A avaliação de longo prazo de um sistema fotovoltaico integrado à edificação urbana e conectado à rede elétrica pública. *Revista Brasileira de Energia Solar*, Associação Brasileira de Energia Solar (ABENS), V, n. 1, p. 73–81, 2014. 11
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Revisada e atualizada. Rio de Janeiro, Brasil: CEPTEL – CRESESB, 2014. 11, 13
- RINCY, T. N.; GUPTA, R. A survey on machine learning approaches and its techniques. In: *IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science*. Bhopal, India: [s.n.], 2020. p. 1–6. 14
- ROMERO, M. H. F. et al. Applications of artificial intelligence to photovoltaic systems: a review. *Applied Sciences*, MDPI, v. 12, n. 19, p. 10056, 2022. 14
- SHERSTINSKY, A. Fundamentals of recurrent neural network (RNN) and long short-term memory (LSTM) network. *CoRR*, abs/1808.03314, 2018. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1808.03314>. 15
- SIKIRU, T. D. S. et al. Recent advances and impact of phase change materials on solar energy: A comprehensive review. *The Journal of Energy Storage*, v. 53, p. 105200, 09 2022. 11

SOLAR, A. A. B. de E. *2024: O Ano da Energia Solar no Brasil*. 2024. Acesso em: 12 fev. 2025. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/https-www-modaisemfoco-com-br-noticias-2024-o-ano-da-energia-solar-no-brasil/#~:text=De%20acordo%20com%20a%20Associa%C3%A7%C3%A3o,45%2C5%20GW%20para%202024.> 8

SOLAR, C. *Silício mono ou policristalino: quem vence o duelo?* 2025. Acesso em: 12 fev. 2025. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/silicio-mono-ou-policristalino-quem-vence-o-duelo/>. 12

SOLAR, P. *Energia solar foi a fonte que mais cresceu no Brasil em 2024*. 2024. Acesso em: 12 fev. 2025. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/operacao-e-expansao/oem/energia-solar-foi-a-fonte-que-mais-cresceu-no-brasil-em-2024.> 8

SOLAR, P. *Como funciona placa solar?* 2025. Acesso em: 12 fev. 2025. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/como-funciona-placa-solar.> 12, 13

SOLAR, W. *Saiba o que é eficiência de painéis solares e veja como calculá-la*. 2025. Acesso em: 12 fev. 2025. Disponível em: <https://www.weg.net/solar/blog/saiba-o-que-e-eficiencia-de-paineis-solares-e-veja-como-calcula-la/>. 8, 11

UFC, P. Q. *A química por trás dos painéis solares e o funcionamento de um sistema fotovoltaico*. 2025. Acesso em: 12 fev. 2025. Disponível em: <http://www.petquimica.ufc.br/a-quimica-por-tras-dos-paineis-solares-e-o-funcionamento-de-um-sistema-fotovoltaico/>. 13