

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
TELECOMUNICAÇÕES**

**CARACTERIZAÇÃO DE UM CIRCUITO BASEADO EM  
CÉLULAS FOTOVOLTAICAS PARA UM SISTEMA DE  
POSICIONAMENTO INDOOR**

**VITORIA ALVES MONTEIRO**

**ALEGRETE - RS, 2024**

VITÓRIA ALVES MONTEIRO

CARACTERIZAÇÃO DE UM CIRCUITO BASEADO EM CÉLULAS  
FOTOVOLTAICAS PARA UM SISTEMA DE POSICIONAMENTO  
INDOOR

Proposta apresentada junto ao curso de **Engenharia de Telecomunicações** da **Universidade Federal do Pampa**, como requisito parcial à obtenção do título de **Bacharelado em Engenharia de Telecomunicações**.

**Orientador:**

Prof. Dr. Alessandro Gonçalves Girardi.

**Coorientador:**

Prof. Dr. Crístian Müller.

Alegrete-RS, Dezembro 2024

**VITÓRIA ALVES MONTEIRO**

**CARACTERIZAÇÃO DE UM CIRCUITO BASEADO EM CÉLULAS FOTOVOLTAICAS PARA  
UM SISTEMA DE POSICIONAMENTO INDOOR**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Graduação  
em Engenharia de Telecomunicações  
da Universidade Federal do Pampa,  
como requisito parcial para obtenção  
do Título de Bacharel em Engenharia  
de Telecomunicações.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 12 de dezembro de 2024.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Alessandro Gonçalves Girardi

Orientador  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Cristian Müller

Coorientador  
UNIPAMPA

---

Prof. Me. Fabiano Tondello Castoldi

UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Lucas Compassi Severo

ITA



Assinado eletronicamente por **ALESSANDRO GONCALVES GIRARDI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/01/2025, às 17:33, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Lucas Compassi Severo, Usuário Externo**, em 11/01/2025, às 09:04, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **FABIANO TONDELLO CASTOLDI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/01/2025, às 08:52, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CRISTIAN MULLER, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/01/2025, às 16:11, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1617663** e o código CRC **4EDA77BD**.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

M775c Monteiro, Vitória Alves  
Caracterização de um Circuito Baseado em Células  
Fotovoltaicas para um Sistema de Posicionamento Indoor /  
Vitória Alves Monteiro.  
70 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES, 2024.  
"Orientação: Alessandro Gonçalves Girardi".

1. Sistema de Posicionamento Indoor. 2. Caracterização das  
Células Fotovoltaicas. 3. Algoritmos de Posicionamento . 4.  
Tecnologias de Posicionamento. I. Título.

*Dedico essa homenagem a todas as pessoas  
que dê alguma forma passaram na minha vida  
sendo luz no meu caminho...*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ser minha força e meu refúgio em diversos momentos, quando mais desacreditei de mim ele sempre vinha e me mostrava que eu estava no caminho certo e que era isso que ele sonhou para mim. Ele foi fiel comigo todo tempo.

Agradeço a minha mãe Laura Daiane, sempre fostes minha âncora e minha maior inspiração de força e calma para não desistir, lutou incansavelmente para que eu estivesse aqui sempre fazendo qualquer coisa para a realização dos meus sonhos, teve uma caminhada difícil me criando sozinha, por isso hoje quero ser seu maior motivo de orgulho. E a minha família que foi sempre meu maior apoio emocional fazendo eu criar forças da onde não tinha para não desistir desse sonho, obrigada Vô Paulo, Vó Marlene, Tia Paola, Jeferson e nosso pequeno Ravi que me dá ainda mais força.

Nesses anos todos, passaram pessoas incríveis em meu caminho tanto na faculdade como em minha Cidade Natal que me ajudaram de diversas formas, fizeram eu me reerguer, se tornaram mais que família, realizei diversos sonhos com as ajudas dos mesmos e eu sou muito grata a Deus por isso e pela vida deles.

Hoje dedico a vocês esse agradecimento por me ajudarem a ter chegado tão longe, foram muito mais que uma família e graças a vocês estou aqui. Obrigada Dindo Giovane e Dinda Magda e toda sua família desde o início estarem comigo, Rogério e família e seu amigo Feijão que fizeram eu chegar até a cidade de Alegrete quando tudo era apenas um sonho mesmo, minha amiga Tamara e família por todo suporte, Eduarda Garcia e família por todo apoio sempre, minha Gracinha e seu Jorge por se tornarem meus avós de coração, meus amigos que viraram minha família em Alegrete e meu refúgio quando mais precisei de um ombro amigo, Herick e Luana.

Não poderia deixar de agradecer o laboratório LEMA e o GAMA em que faço parte, tive sempre todo o suporte técnico e criei amizades que levarei para o resto da vida, criei momentos especiais e muitas viagens que ficarão nas memórias, além de todo aprendizado passado pelos professores, meu muito obrigada. Dedico minha última homenagem ao meu orientador, Alessandro Girardi, que desde o início me incentivou, fez eu crescer muito durante minha graduação com todo seu ensino e sempre me fez acreditar no potencial da pesquisa. Por isso estou aqui hoje, obrigada por não deixar eu desistir e nem se quer deixar eu não enviar algum artigo rsrs.

*"Hoje eu só vim agradecer por tudo que Deus me fez  
Quem me conhece sabe o que vivi e o que passei,  
O tanto que ralei pra chegar até aqui  
E cheguei, cheguei*

*Lembro de vários veneno  
Eu, ainda menor, nunca sonhei pequeno  
A minha coroa me criou sozinha.  
Levantando sempre no raiar do dia, bem cedo*

*Sempre aprendi com ela  
A ser grata pelo que ainda vem  
Hoje tu só vê os close, nunca viu meus corre  
Mas pra quem confia em Deus, o sonho nunca morre, é, é...*

*(IZA)*

## RESUMO

Neste trabalho, são discutidas análises acerca das células fotovoltaicas (PV) para serem empregadas como receptoras de um sistema por luz visível para posicionamento indoor. Entende-se que as células fotovoltaicas convertem energia de luz natural ou artificial e a transformam em energia elétrica, podendo também ser empregadas como receptoras por luz visível, em ambientes indoor, por se tratar de um método bastante acessível e sem fio. O sinal luminoso não atravessa paredes, limitando a área de recepção. Ter um bom modelo elétrico de célula fotovoltaica é crucial para a criação e simulação de um sistema de posicionamento interno, tanto em termos de DC quanto de AC. A extração exata dos parâmetros do modelo é imprescindível para uma estimativa precisa da tensão e corrente geradas em função do nível de luz incidente. Por essa razão, os modelos elétricos equivalentes são empregados para a estimativa. O presente trabalho apresenta a técnica de medir e modelar os parâmetros de pequenos sinais a partir do procedimento de extração de parâmetros DC de uma célula fotovoltaica. Em pequenos sinais, são consideradas as regiões de máxima potência (MPP), circuito aberto (OC) e curto-circuito (SC). É descrita uma configuração para avaliação da resposta das células fotovoltaicas, e os resultados são submetidos a um procedimento de extração de parâmetros analíticos. Diante disso, é proposta uma abordagem para empregar luz visível em um sistema de posicionamento indoor utilizando uma célula fotovoltaica como receptora. Realizamos alguns testes de verificação dos dados do transmissor utilizando a célula fotovoltaica para fins de caracterização. A metodologia do projeto utiliza tecnologias de posicionamento como o Indicador de Intensidade do Sinal Recebido (*RSSI*) e Impressão Digital/Análise de Cena (*Fingerprinting/Scene Analysis*). Essas tecnologias são essenciais para a caracterização e avaliação do desempenho do sistema proposto. O sistema apresentado fornece dois tipos de dados: variações de amplitude e frequência de cada transmissor, além da relação de potência dos transmissores. A partir da variação na intensidade do sinal recebido, é possível determinar a distância entre o transmissor e o receptor. A frequência pode ser empregada para determinar qual transmissor está em comunicação no momento. Os resultados demonstram que a abordagem proposta é viável e eficaz para posicionamento indoor, com potenciais aplicações em diversos ambientes.

**Palavras-chave:** células fotovoltaicas, sistema de posicionamento indoor, modelo elétrico, extração de parâmetros, *RSSI*, impressão digital, análise de Cena.

## ABSTRACT

In this work, analyses of photovoltaic (PV) cells to be used as receivers of a visible light system for indoor positioning are discussed. It is understood that photovoltaic cells retain energy from natural or artificial light and transform it into electrical energy, and can also be used as visible light receivers, in indoor environments, as it is a very accessible and wireless method. The light signal does not pass through walls, which limits the reception area. Having a good electrical model of a photovoltaic cell is crucial for creating and simulating an indoor positioning system, both in terms of DC and AC. The exact extraction of the model parameters is essential for an accurate estimate of the voltage and current generated as a function of the level of incident light. For this reason, equivalent electrical models are employed for estimation. The present work presents the technique of measuring and modelling small signal parameters based on the procedure for extracting DC parameters from a photovoltaic cell. In small signals, the regions of maximum power (MPP), open circuit (OC) and short circuit (SC) are considered. A configuration for evaluating the response of photovoltaic cells is described, and the results are subjected to an analytical parameter extraction procedure. Therefore, an approach is proposed to employ visible light in an indoor positioning system using a photovoltaic cell as a receiver. We carried out some tests to verify the transmitter data using the photovoltaic cell for characterization purposes. The project methodology uses positioning technologies such as the Received Signal Strength Indicator (*RSSI*) and *Finger Printing/Scene Analysis*. These technologies are essential for characterizing and evaluating the performance of the proposed system. The presented system provides two types of data: amplitude and frequency variations of each transmitter, in addition to the power ratio of the transmitters. From the variation in the intensity of the received signal, it is possible to determine the distance between the transmitter and the receiver. Frequency can be used to determine which transmitter is currently communicating. The results demonstrate that the proposed approach is viable and effective for indoor positioning, with potential applications in different environments.

**Keywords:** photovoltaic cells, indoor positioning system, electrical model, parameter extraction, *RSSI*, digital printing, scene analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Junção P-N típica da Célula Fotovoltaica de Silício. . . . .	19
Figura 2.2 – Princípio Básico de uma Célula Fotovoltaica. . . . .	20
Figura 2.3 – Tipos de Células Fotovoltaicas. . . . .	21
Figura 2.4 – Modelo elétrico da célula fotovoltaica 1D2R. . . . .	21
Figura 2.5 – Modelo elétrico da célula fotovoltaica 1D2R de pequenos sinais. . . . .	23
Figura 3.1 – Diagrama de blocos da configuração de medição I-V da célula fotovoltaica. . . . .	24
Figura 3.2 – Configuração experimental para medição I-V de células fotovoltaicas. . . . .	25
Figura 3.3 – Diagrama de blocos para configuração de medição AC de células fotovoltaicas. . . . .	26
Figura 3.4 – Circuito amplificador do LED. . . . .	26
Figura 3.5 – Configuração de medição das características AC da célula fotovoltaica. . . . .	27
Figura 4.1 – Características de corrente-tensão. . . . .	29
Figura 4.2 – Medidas de frequência de corte em função da iluminância para três diferentes condições de polarização. . . . .	32
Figura 5.1 – Exemplo prático do Indicador de Intensidade do sinal Recebido . . . . .	37
Figura 5.2 – Exemplo prático da técnica de impressão digital. . . . .	38
Figura 5.3 – Diagrama de blocos com o Circuito Transmissor. . . . .	39
Figura 5.4 – Sistema de Posicionamento Indoor. . . . .	40
Figura 6.1 – Trilateração. . . . .	42
Figura 6.2 – Trilateração com uma Posição Real x Posição Estimada. . . . .	43
Figura 6.3 – Distância lateral do receptor ao transmissor ( $d$ ). . . . .	43
Figura 6.4 – Distância em linha reta do receptor ao transmissor ( $r$ ) com os três transmissores (T1, T2 e T3). . . . .	44
Figura 6.5 – Distância lateral do receptor ao transmissor ( $d$ ) com os três transmissores (T1, T2 e T3). . . . .	45
Figura 6.6 – Multilateração. . . . .	46
Figura 7.1 – Configuração experimental para sistema de posicionamento indoor com 2 transmissores. . . . .	49
Figura 7.2 – Tensão pico a pico recebida em relação à distância obtida na luz ambiente. . . . .	50
Figura 7.3 – FFT na posição (0;0) cm . . . . .	51
Figura 7.4 – FFT na posição (0;35) cm. . . . .	51
Figura 7.5 – Intensidade do sinal recebido. . . . .	52
Figura 7.6 – Relação de potências T2/T1. . . . .	52
Figura 7.7 – Configuração experimental para sistema de posicionamento indoor com 3 transmissores. . . . .	54

Figura 7.8 – Resposta de frequência do sinal recebido na posição (10, 10). A intensidade do sinal é calculada integrando os compartimentos em torno das frequências fundamentais dos transmissores. . . . .	54
Figura 7.9 – Intensidade luminosa no plano gerada pelo transmissor T1. . . . .	55
Figura 7.10–Intensidade luminosa no plano gerada pelo transmissor T2. . . . .	56
Figura 7.11–Intensidade luminosa no plano gerada pelo transmissor T3. . . . .	56
Figura 7.12–Funções de ajuste para os três transmissores. Os pontos são valores medidos e as linhas são estimadas por regressão linear. . . . .	57
Figura 7.13–Posição estimada ( $X$ ) e real ( $O$ ) para cada nó na matriz. As linhas tracejadas cinza indicam os pares reais e estimados correspondentes. Quadrados vermelhos representam a posição dos transmissores. . . .	59
Figura 7.14–Erro de estimativa de posição (em cm) na região avaliada. . . . .	60
Figura 7.15–Configuração experimental para sistema de posicionamento indoor com 4 transmissores. . . . .	61
Figura 7.16–Resposta de frequência do sinal recebido na posição (20, 140). A intensidade do sinal é calculada integrando os compartimentos em torno das frequências fundamentais dos transmissores. . . . .	62
Figura 7.17–Intensidade luminosa no plano gerada pelo transmissor T1. . . . .	62
Figura 7.18–Intensidade luminosa no plano gerada pelo transmissor T2. . . . .	63
Figura 7.19–Intensidade luminosa no plano gerada pelo transmissor T3. . . . .	63
Figura 7.20–Intensidade luminosa no plano gerada pelo transmissor T4. . . . .	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Parâmetros do modelo DC 1D2R extraídos para diferentes níveis de iluminância. . . . .	31
Tabela 4.2 – Parâmetros do modelo de célula fotovoltaica AC extraídos para diferentes níveis de iluminância em três condições de polarização. . . . .	33
Tabela 7.1 – Coeficientes para as linhas de ajuste da Fig. 7.12. . . . .	57

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>AC</b>	<i>Alternating Current</i>
<b>AOA</b>	<i>Angle-of-Arrival</i>
<b>DC</b>	<i>Direct Current</i>
<b>FFT</b>	<i>Fast Fourier Transform</i>
<b>GNSS</b>	<i>Global Navigation Satellite Systems</i>
<b>IoT</b>	<i>Internet of Things</i>
<b>LED</b>	<i>Light Emitting Diode</i>
<b>LOS</b>	<i>Line-of-Sight</i>
<b>MPP</b>	<i>Maximum Power Point</i>
<b>OC</b>	<i>Open Circuit</i>
<b>PV</b>	<i>Photovoltaic Cell</i>
<b>PDOA</b>	<i>Phase Difference of Arrival</i>
<b>RF</b>	<i>Radio Frequency</i>
<b>RSSI</b>	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
<b>RTTOF</b>	<i>Round-Trip Time of-Flight</i>
<b>SC</b>	<i>Short Circuit</i>
<b>TOF</b>	<i>Time of Flight</i>
<b>TOA</b>	<i>Time of Arrival</i>
<b>TDOA</b>	<i>Time Difference of Arrival</i>
<b>VLC</b>	<i>Visible Light Communication</i>
<b>1D2R</b>	Um diodo e dois resistores

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\tau$  Letra grega Tau

$\phi$  Letra grega phi

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>16</b>
1.1	Motivação . . . . .	17
1.2	Objetivo Geral . . . . .	17
1.2.1	Objetivo Específico . . . . .	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . . . .</b>	<b>19</b>
2.1	Introdução às Células Fotovoltaicas . . . . .	19
2.2	Modelo Elétrico 1D2R . . . . .	21
2.3	Modelo Elétrico 1D2R de Pequenos Sinais . . . . .	22
<b>3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA . . . . .</b>	<b>24</b>
3.1	Medições das Curvas Características I-V . . . . .	24
3.2	Medições da resposta AC . . . . .	25
<b>4</b>	<b>PROCEDIMENTO DE EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS . . . . .</b>	<b>28</b>
4.1	Extração de Parâmetros DC . . . . .	28
4.2	Extração de Parâmetros AC . . . . .	31
<b>5</b>	<b>TECNOLOGIAS DE POSICIONAMENTO . . . . .</b>	<b>34</b>
5.1	Indicador de Intensidade do Sinal Recebido (RSSI) . . . . .	36
5.2	Impressão Digital (Fingerprinting) . . . . .	37
5.3	Dispositivo de Transmissão e Recepção . . . . .	38
<b>6</b>	<b>ALGORITMOS DE POSICIONAMENTO . . . . .</b>	<b>41</b>
6.1	Trilateração . . . . .	41
6.1.1	Distância Lateral . . . . .	43
6.2	Multilateração . . . . .	45

7	METODOLOGIA DO PROJETO E RESULTADOS . . . . .	47
7.1	Testes, Avaliações e Resultados com dois Transmissores . . . .	48
7.2	Testes, Avaliações e Resultados com três Transmissores . . . .	53
7.3	Testes, Avaliações e Resultados com quatro Transmissores . .	60
8	CONCLUSÃO . . . . .	65
	REFERÊNCIAS . . . . .	67

# 1 INTRODUÇÃO

A energia proveniente das ondas eletromagnéticas, como a luz, é uma fonte ambiental amplamente utilizada para a coleta de energia. As células fotovoltaicas, do inglês, *Photovoltaic Cell* (PV), representam transdutores comuns empregados para a conversão de energia luminosa em energia elétrica, podendo capturar não apenas a luz solar natural, mas também a luz proveniente de *lasers*, leds no inglês (*Light Emitting Diode* (LED)) e outras fontes de iluminação, as condições de luz desempenham um papel importante na estimativa dos níveis de energia disponíveis para sistemas de captação de energia luminosa ambiente. Todavia, nem sempre esses níveis de iluminância são significativamente altos. Daí a necessidade de um bom coletor de energia, para que, mesmo em baixos níveis de iluminância, é possível coletar energia para alimentar um circuito de potência ultrabaixa (MA, 2021).

Em um ambiente indoor, os LEDs estão dominando o mercado de iluminação residencial e de escritórios e atualmente podem ser consideradas a principal fonte de luz artificial. Tem-se observado um crescente interesse no uso de células fotovoltaicas em ambientes indoor para alimentar dispositivos eletrônicos da Internet das Coisas no inglês *Internet of Things* (IoT). Além disso, as PV são adequadas para funcionar como receptores em sistemas de comunicação por luz visível no inglês *Visible Light Communication* (VLC) ou em um sistema de posicionamento indoor, uma tecnologia sem fio que utiliza a luz visível. Essa abordagem, além de ser economicamente vantajosa ao compartilhar a infraestrutura de iluminação existente, oferece benefícios em termos de segurança, uma vez que o sinal luminoso não atravessa paredes, limitando a área de recepção. O posicionamento indoor abre caminho para o desenvolvimento de novas aplicações para IoT (DAS et al., 2021).

Além disso, ao considerar a aplicação de células fotovoltaicas em ambientes fechados, servindo como receptora para um sistema de posicionamento indoor, é essencial garantir uma compreensão precisa dos sinais captados. A captura eficaz de energia luminosa nestes cenários requer não apenas adaptação às variações na intensidade da luz ambiente, mas também otimização contínua para maximizar a conversão de energia. Para atingir este objetivo, é essencial ter modelos elétricos precisos de células fotovoltaicas, capazes de capturar tanto as nuances da corrente contínua como da corrente alternada. Estes modelos não só facilitam a estimativa adequada da energia gerada em resposta à intensidade da luz incidente, mas também permitem desenvolver estratégias para confiabilidade dos sistemas de recolha de energia indoor.

O modelo elétrico mais comumente utilizado para PV é o 1D2R, baseado em

um diodo e dois resistores. Embora existam estudos sobre métodos de avaliação para extrair e estimar os parâmetros de corrente contínua, do inglês *Direct Current* (DC) deste modelo, há uma lacuna em relação ao modelo equivalente de corrente alternada, do inglês *Alternating Current* (AC), para modelo de pequenos sinais, sendo de grande interesse para aplicações de comunicação. Diferentes tipos de modelos de células fotovoltaicas são apresentados na literatura e, embora o circuito equivalente de diodo seja relativamente simples, sua natureza não linear e implícita torna a estimativa de seus parâmetros uma tarefa desafiadora. Isso levou a numerosos estudos propondo e avaliando diferentes métodos para extrair e estimar parâmetros do modelo de diodo DC e AC, como os apresentados por (CUBAS et al., 2013), (KHURSHEED et al., 2021), (BADER et al., 2019), (HAMADANI; CAMPANELLI, 2020).

## 1.1 MOTIVAÇÃO

O desenvolvimento de um sistema de posicionamento indoor utilizando células fotovoltaicas como receptoras apresenta uma abordagem inovadora e promissora. Este método oferece um excelente custo-benefício e é especialmente adequado para ambientes fechados, onde a luz artificial é a principal fonte de iluminação. Uma característica interessante da luz emitida por é que, a partir de uma frequência de 60 Hz, seu piscar se torna imperceptível ao olho humano, abrindo inúmeras possibilidades para sua utilização como transmissores em sistemas de posicionamento indoor.

A integração de células fotovoltaicas neste contexto não só aproveita a infraestrutura já existente de iluminação LED, como também proporciona uma solução eficiente e econômica. Estas células podem converter a luz ambiental em sinais úteis para a determinação de posição, oferecendo uma alternativa aos métodos tradicionais, como, por exemplo, o GNSS, no inglês, (*Global Navigation Satellite Systems* (GNSS)), que podem ser menos preciso em um ambiente indoor como menciona (KOUHINI et al., 2021). Diversas aplicações podem ser exploradas com esta tecnologia. Neste trabalho é proposta a utilização das células como receptoras, reduzindo os custos operacionais, além de facilitar a implementação em ambientes já equipados com iluminação LED.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

O propósito geral deste estudo é desenvolver e avaliar a utilização de células fotovoltaicas como receptoras em um sistema de posicionamento indoor, visando o estudo do comportamento delas tanto no domínio DC quanto AC, além de aplicar as técnicas de trilateração e impressão digital para localização indoor.

### 1.2.1 Objetivo Específico

O objetivo específico deste estudo é projetar e implementar um sistema de posicionamento indoor utilizando células fotovoltaicas como receptoras. Várias lâmpadas LED posicionadas em locais pré-determinados transmitem sinais luminosos, cada um com uma frequência diferente. Os sinais captados pela célula fotovoltaica devem ser processados para identificar as potências recebidas dos transmissores, as quais são correlacionadas à distância. Assim, através dos valores obtidos é possível calcular a posição do receptor em um espaço. Este trabalho deve propor um circuito transmissor de luz com LEDs capaz de variar a frequência do sinal transmitido, e um circuito receptor composto por uma placa solar de pequenas dimensões.

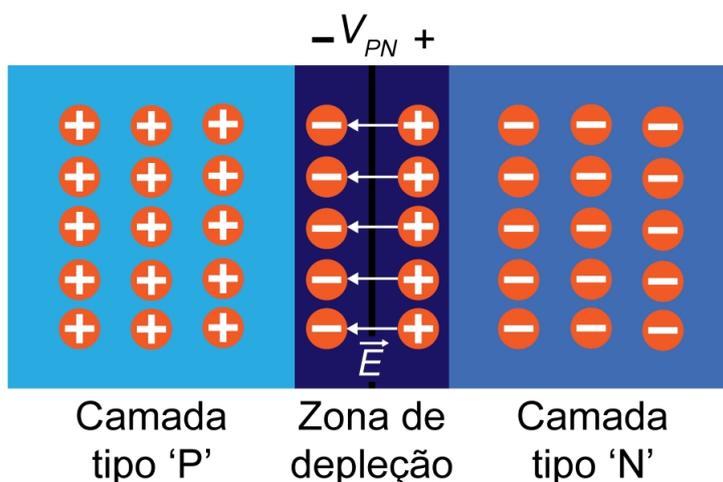
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo discute os conceitos teóricos envolvidos no desenvolvimento deste trabalho. Nesta revisão são estudadas a funcionalidade das células fotovoltaicas, tipos de células fotovoltaicas e modelos elétricos, estimando seu desempenho em um ambiente fechado, são apresentadas as configurações de medições para o procedimento de extração de parâmetros, visando analisar sua utilização em tecnologia de posicionamento indoor. Estas análises são implementadas através das pesquisas de (MONTEIRO et al., 2022) e (MATTOS et al., 2024).

### 2.1 INTRODUÇÃO ÀS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

A célula fotovoltaica é um equipamento elétrico que transforma a energia luminosa em energia elétrica por meio de um efeito fotovoltaico. Sabe-se que as células fotovoltaicas tradicionais de silício são constituídas de materiais semicondutores. No estudo de (MORAES, 2020) ele explica o processo que ocorre em materiais semicondutores dopado positiva e negativamente, como o silício formando as camadas P-N, ou seja, o acúmulo de cargas positivas do tipo 'P' e negativas do tipo 'N' dá a origem a um campo elétrico e consequentemente a uma diferença de potencial ( $V_{pn}$ ). Essas junções são separadas por uma região de depleção que surge devido à recombinação de elétrons e lacunas e a tensão consiste numa barreira impedindo a circulação de elétrons em dois materiais. Pode-se ver na Figura 2.1, como funciona uma junção P-N típica de uma célula fotovoltaica de silício.

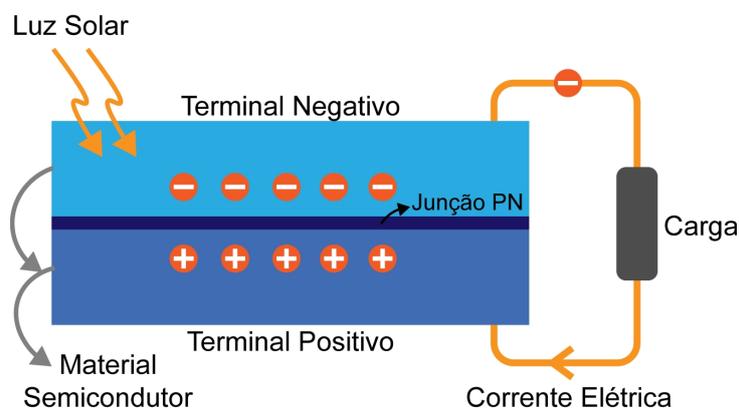
Figura 2.1 – Junção P-N típica da Célula Fotovoltaica de Silício.



Fonte: Disponível em: <<https://eletronicadepotencia.com/celula-fotovoltaica/>>. Acesso em 20 de maio 2024.

Quando a luz solar incide sobre esses materiais, os fótons da luz são absorvidos pelos átomos do material, gerando a liberação de elétrons livres e conseqüentemente a criação de uma corrente elétrica como está na Figura 2.2, e quando em equilíbrio só haverá deslocamento de elétrons da camada 'N' para a 'P' se receberem energia suficiente de um meio externo. No caso das células fotovoltaicas, essa energia é proveniente dos fótons presentes na luz solar, que ao exercitar os elétrons faz com que eles passem da camada de valência para condução, ou seja, por meio de um circuito externo em que se conectam as camadas, surgindo um fluxo de elétrons (corrente elétrica) onde se manterá enquanto a luz incidir sobre a célula como se pode ver na figura 2.2.

**Figura 2.2 – Princípio Básico de uma Célula Fotovoltaica.**

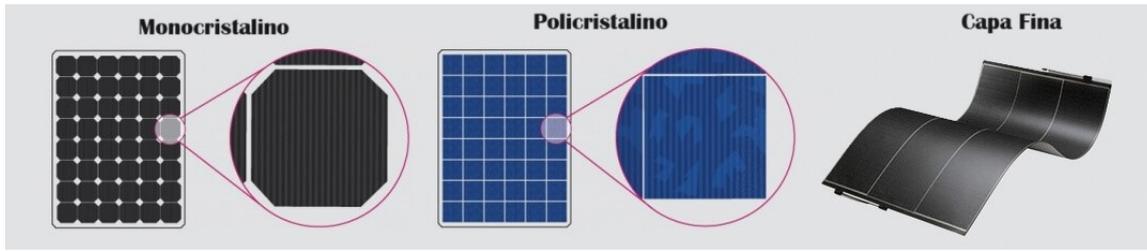


Fonte: Disponível em: <<https://eletronicadepotencia.com/celula-fotovoltaica/>>. Acesso em 20 de maio 2024.

Existem diferentes tipos de células fotovoltaicas como mostra na figura 2.3, no qual são utilizadas para analisar as características de células e painéis fotovoltaicos, assim como para prever seu comportamento I-V, nessa proposta foi utilizada uma célula fotovoltaica policristalina. Em sua maioria, os métodos de modelagem são baseados no circuito equivalente de um diodo. Embora sejam realizadas diversas pesquisas sobre a aplicação e avaliação desses métodos em condições externas comuns como no estudo de (LORRIERE et al., 2020), seu desempenho sob iluminação indoor ainda é pouco conhecido.

Portanto, este estudo investiga de maneira sistemática os métodos para extrair parâmetros de modelos elétricos de células fotovoltaicas em condições indoor. Foram selecionados, revisados e implementados métodos frequentemente utilizados e seu desempenho foi comparado em diferentes níveis de iluminação.

Figura 2.3 – Tipos de Células Fotovoltaicas.



Fonte: Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/placa-solar-fotovoltaica/tipos>>. Adaptado e acessado em 21 de maio 2024.

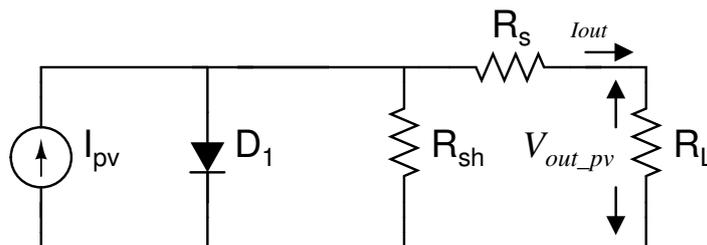
## 2.2 MODELO ELÉTRICO 1D2R

O modelo elétrico mais comum é chamado de modelo 1D2R e consiste em dois resistores e um diodo, conforme mostrado na Fig. 2.4. Existe um estudo de (KENNERUD, 1969) sobre a estimação dos parâmetros desse modelo. Considera-se que este modelo elétrico apresenta o melhor compromisso entre número de parâmetros e precisão (ARAÚJO et al., 2020). A corrente de saída  $I_{out}$  pode ser calculada por análise de circuito como:

$$I_{out} = I_{pv} - I_s \left( e^{\frac{q(V+R_s I_{out})}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I_{out}}{R_{sh}} \quad (1)$$

Existem cinco parâmetros livres que dependem do processo de fabricação da célula fotovoltaica.  $I_{pv}$  é a fonte de corrente equivalente que modela a corrente gerada pelo efeito fotovoltaico,  $I_s$  é a corrente de saturação do diodo,  $n$  é o fator de idealidade do diodo,  $R_s$  é a resistência em série do fotovoltaico células e  $R_{sh}$  é a resistência shunt da célula fotovoltaica. Os outros parâmetros são constantes, como a constante de Boltzmann  $k$  e a carga do elétron  $q$ . Existe também uma dependência da temperatura, modelada pelo parâmetro  $T$ . O atual  $I_{out}$  está implícito na Eq. 1, portanto é necessário implementar um solucionador numérico para estimá-lo em função da tensão de saída ( $V$ ) e dos parâmetros livres.

Figura 2.4 – Modelo elétrico da célula fotovoltaica 1D2R.



Fonte: (MATTOS et al., 2024).

### 2.3 MODELO ELÉTRICO 1D2R DE PEQUENOS SINAIS

O modelo elétrico de pequenos sinais é obtido através da análise do modelo elétrico 1D2R visto no capítulo 2.2. Considere que a célula fotovoltaica é polarizada em DC e um pequeno componente AC ( $i_{pv}$ ) é aplicado representando um sinal recebido. Se  $i_{pv} \ll I_{pv}$ , o diodo  $D_1$  pode ser substituído pelo seu modelo dinâmico, que compreende uma resistência dinâmica  $r_d$  em paralelo com uma capacitância equivalente  $C_{eq}$ , conforme mostrado na Figura 2.5, algumas coisas sobre este modelo encontra-se nos estudos de (LORRIERE et al., 2020) e (KIM et al., 2013).

A capacitância equivalente é uma associação paralela da capacitância de difusão  $C_d$  e da capacitância de junção  $C_j$  que determina as propriedades dinâmicas da célula fotovoltaica como apresenta (HERMAN et al., 2013). A capacitância de difusão  $C_d$  ocorre devido à carga armazenada de elétrons minoritários e lacunas minoritárias próximas à região de depleção.  $C_d$  é, portanto, proporcional à vida útil da transportadora minoritária. A capacitância da junção  $C_j$  na junção pn polarizada diretamente depende da concentração de dopagem, das propriedades do material e da geometria. Ambas as capacitâncias são não lineares em relação à tensão de polarização, resultando em uma variação para diferentes níveis de iluminância e cargas.

A resistência dinâmica pode ser estimada a partir dos seguintes parâmetros estáticos:

$$r_d = \frac{n \cdot V_t}{I_{pv}} \quad (2)$$

Essa dependência resulta em uma variação de  $r_d$  com a iluminância, reduzindo o valor à medida que a iluminância aumenta.

A vida útil efetiva da transportadora minoritária  $\tau$  é dada por:

$$\tau = r_d \cdot C_{eq} \quad (3)$$

O modelo de pequenos sinais revela um circuito unipolar cuja resistência equivalente  $r_0$  pode ser estimada como:

$$\frac{1}{r_0} = \frac{1}{r_D} + \frac{1}{R_{sh}} + \frac{1}{R_s + R_L} \quad (4)$$

Pode ser relacionado a um filtro passa-baixa equivalente de primeira ordem cuja frequência de corte de -3 dB  $f_c$  é dada como:

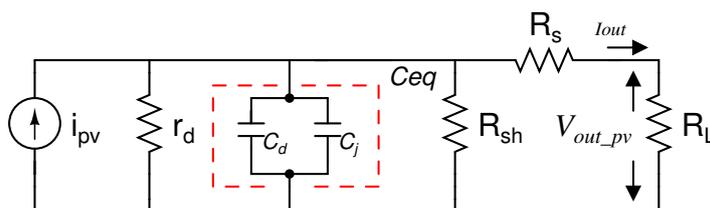
$$f_c = \frac{1}{2\pi r_0 C_{eq}} \quad (5)$$

Portanto, a capacitância equivalente do diodo pode ser estimada da seguinte forma:

$$C_{eq} = \frac{1}{2\pi f_c r_0} \quad (6)$$

A resistência  $r_d$  está na mesma ordem de magnitude que  $R_s$  é muito menor que  $R_{sh}$ . Pode-se observar que a localização do poste depende da carga aplicada à célula fotovoltaica. Em circuito aberto ( $R_L$  muito alto), a resistência equivalente de saída se aproxima do valor de  $r_d$ . Por outro lado, se a célula fotovoltaica estiver operando em curto-circuito ( $R_L$  muito pequeno),  $r_0$  se aproxima de  $r_d || R_s$ . A largura de banda depende da temperatura e do nível de injeção, ao ser completamente determinada pelo tempo de vida do portador minoritário  $\tau$ . De acordo com (LORRIERE et al., 2020), uma vez que a eficiência de uma célula solar (em termos de captação de energia) aumenta com o tempo de vida do portador minoritário, não se pode esperar obter um fotorreceptor de alta largura de banda a partir de uma célula fotovoltaica eficiente operando no máximo ponto de energia, no inglês, *Maximum Power Point* (MPP).

Figura 2.5 – Modelo elétrico da célula fotovoltaica 1D2R de pequenos sinais.



Fonte: (MATTOS et al., 2024).

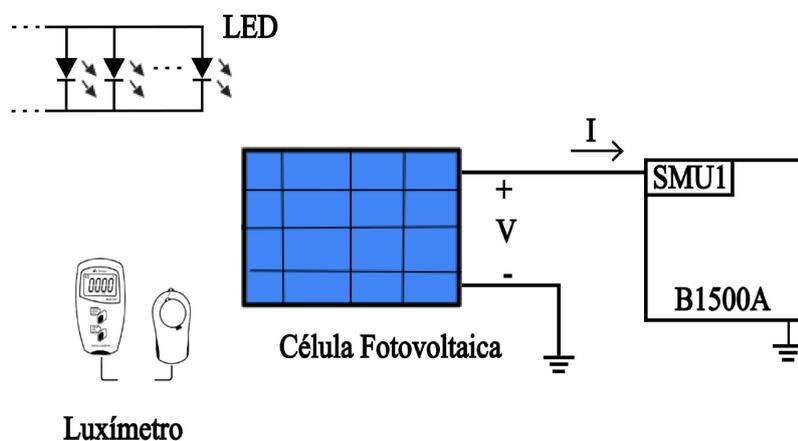
### 3 CARACTERIZAÇÃO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

Para obter uma estimativa real da largura de banda de uma célula fotovoltaica para fins de utilização em um ambiente indoor, foi realizada uma série de medições elétricas para caracterização tanto no domínio DC quanto AC, essas análises foram demonstradas nos estudos de (MONTEIRO et al., 2022) e (MATTOS et al., 2024). O alvo é uma célula de silício policristalino, como comentado no capítulo 2.1 iluminada por um conjunto de LEDs emitindo luz branca convencionais. A iluminância está entre 50 e 500 lux, correspondendo a uma iluminância típica de uma sala de escritório com luz artificial. As próximas seções a seguir detalham as configurações de medição para caracterização de DC e AC.

#### 3.1 MEDIÇÕES DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS I-V

A medição I-V foi realizada para uma pequena célula fotovoltaica de 20x40 mm iluminada por uma lâmpada LED fria (mini holofote modelo MTX 50 W). A temperatura ambiente era de aproximadamente 27°C. A Fig. 3.1 representa o diagrama de blocos da configuração completa da medição. Para garantir a medição precisa das características I-V para diferentes cargas, a saída da célula foi conectada a uma SMU de um analisador de parâmetros semicondutores B1500A, que atuou como fonte de tensão variando de 0 a 1 V. Com esta configuração é possível emular uma resistência de carga variável ( $R_L$ ) variando de 0 ohms a infinito. Um luxímetro Instrutherm LD-550 foi colocado próximo à célula fotovoltaica alvo para medir o nível de iluminância. A Fig. 3.2 mostra uma imagem da configuração de teste implementada.

Figura 3.1 – Diagrama de blocos da configuração de medição I-V da célula fotovoltaica.



Fonte: Modificado de (MATTOS et al., 2024).

Figura 3.2 – Configuração experimental para medição I-V de células fotovoltaicas.



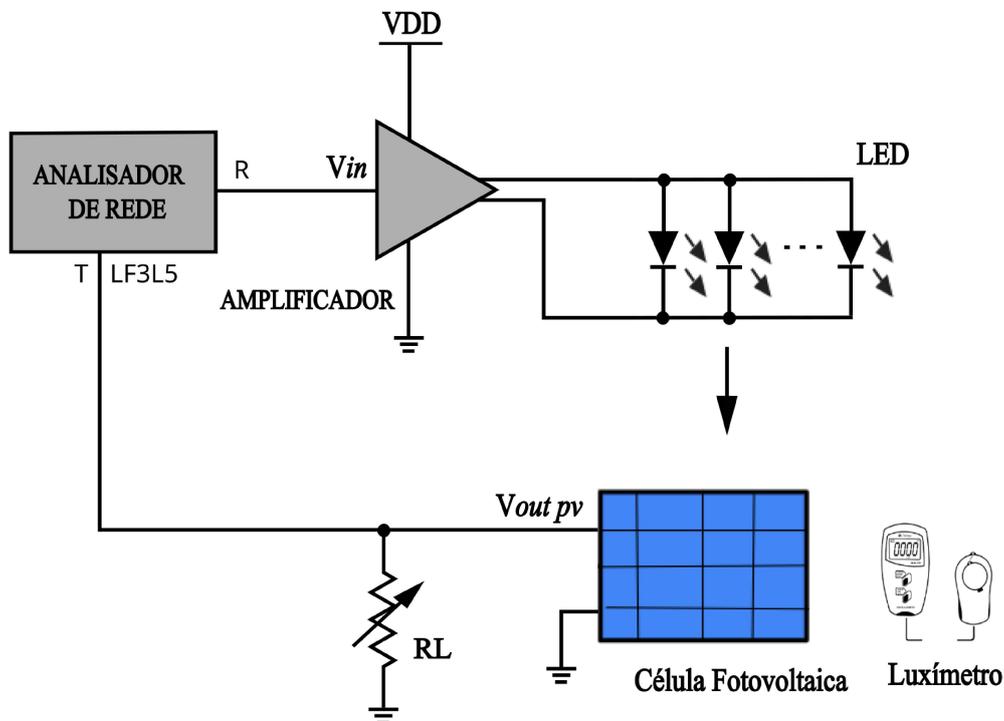
Fonte: (MONTEIRO et al., 2022).

### 3.2 MEDIÇÕES DA RESPOSTA AC

A configuração para realização de medições é ilustrada pelo diagrama de blocos mostrado na Fig. 3.3. Para este propósito, o módulo de função de transferência de baixa frequência LF3L5 do analisador de rede Agilent E5061B é usado para gerar um sinal de varredura de frequência e para medir a função de transferência AC do sistema de caracterização proposto. O sinal AC gerado é amplificado e combinado com um nível DC para finalmente acionar uma série de LEDs. Esta amplificação é realizada pelo amplificador mostrado na Figura 3.4. Variando o resistor  $R_B$ , a corrente DC do coletor do transistor pode ser ajustada diretamente proporcional à corrente DC de base ( $I_b$ ), controlando assim a intensidade da luz emitida pelos LEDs. A célula fotovoltaica está localizada a uma curta distância de 45 cm do conjunto de LED num compartimento fechado, garantindo que a iluminância não pode ser afetada por flutuações externas. Ao lado da célula fotovoltaica está um luxímetro digital (modelo MLM-1020), utilizado para medir a iluminância. Para obter uma avaliação abrangente, a tensão de saída gerada pela célula fotovoltaica é conectada de volta ao analisador de rede, criando um circuito fechado que permite medir o ganho do sistema. Ao varrer a frequência do sinal AC de entrada, a resposta AC geral da célula solar pode ser medida. Ao alterar a resistência de carga  $R_L$ , a célula fotovoltaica

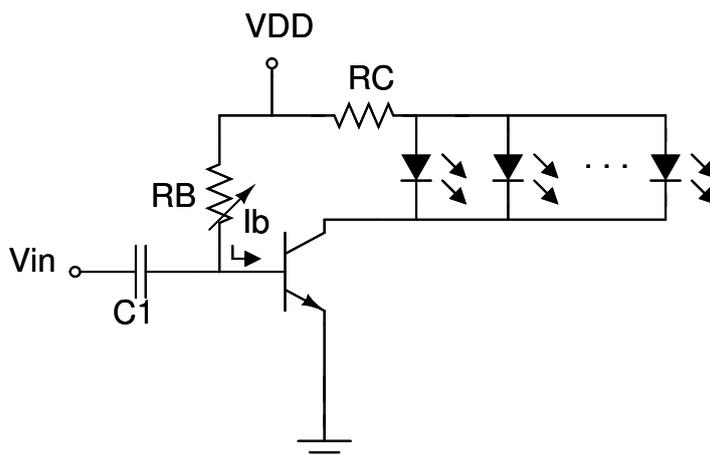
pode ser polarizada em diferentes condições operacionais. Uma representação visual da configuração de medição implementada pode ser encontrada na Fig. 3.5.

Figura 3.3 – Diagrama de blocos para configuração de medição AC de células fotovoltaicas.



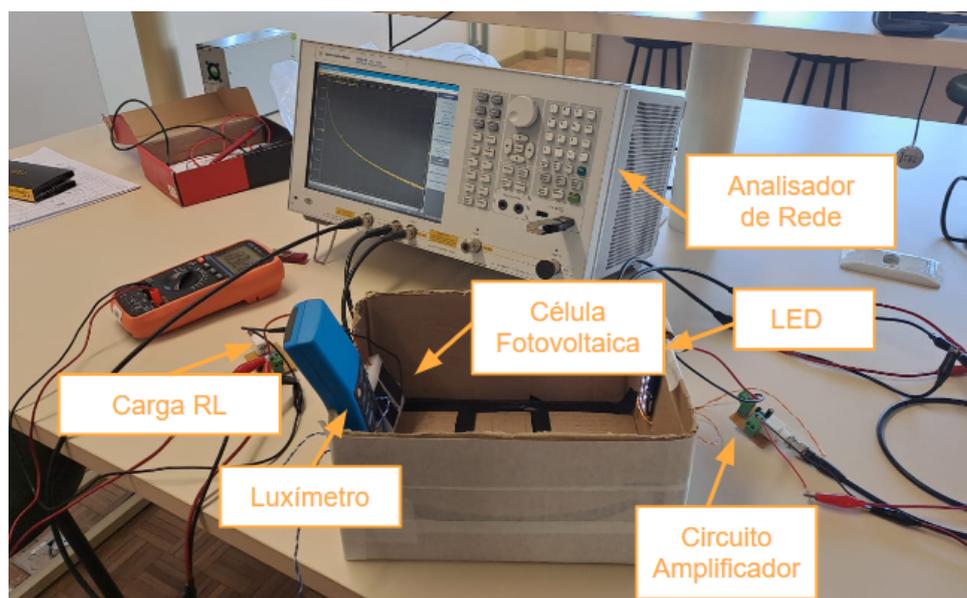
Fonte: Modificado de (MATTOS et al., 2024).

Figura 3.4 – Circuito amplificador do LED.



Fonte: (MATTOS et al., 2024).

Figura 3.5 – Configuração de medição das características AC da célula fotovoltaica.



Fonte: Modificado de (MATTOS et al., 2024).

## 4 PROCEDIMENTO DE EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS

Em seu estudo (CUBAS et al., 2013) comenta que a energia solar fotovoltaica está se expandindo e se tornando cada vez mais acessível para um número maior de pessoas. Entretanto, é fundamental compreender o comportamento das células e painéis solares para maximizar a captação de energia. Esse entendimento é geralmente obtido por meio da modelagem do circuito equivalente dessas células e painéis com base em dados experimentais ou fornecidos pelos fabricantes. O processo de extração desses parâmetros do circuito pode ser complexo já que os métodos numéricos existentes para essa extração são iterativos e indiretos.

O objetivo deste estudo é desenvolver um novo método analítico e direto que possa calcular de forma simples os parâmetros do circuito equivalente a partir dos dados do fabricante. Esse método analítico proposto pode ser uma ferramenta valiosa para diversas aplicações, como a otimização da captação de energia, a seleção de painéis solares e o desenvolvimento de novos métodos. Com base na representação de medições obtidas, é possível extrair os parâmetros AC do modelo elétrico de pequenos sinais da célula fotovoltaica, para fazer isso primeiro precisamos extrair os parâmetros DC para o modelo de célula fotovoltaica Um diodo e dois resistores (1D2R). Implementamos o método de extração descrito em (MONTEIRO et al., 2022) considerando as mesmas iluminâncias usadas nas medições AC e extraímos os valores de  $n$ ,  $I_S$ ,  $I_{PV}$ ,  $R_S$  e  $R_{SH}$  que modelam o circuito equivalente da Fig. 2.4.

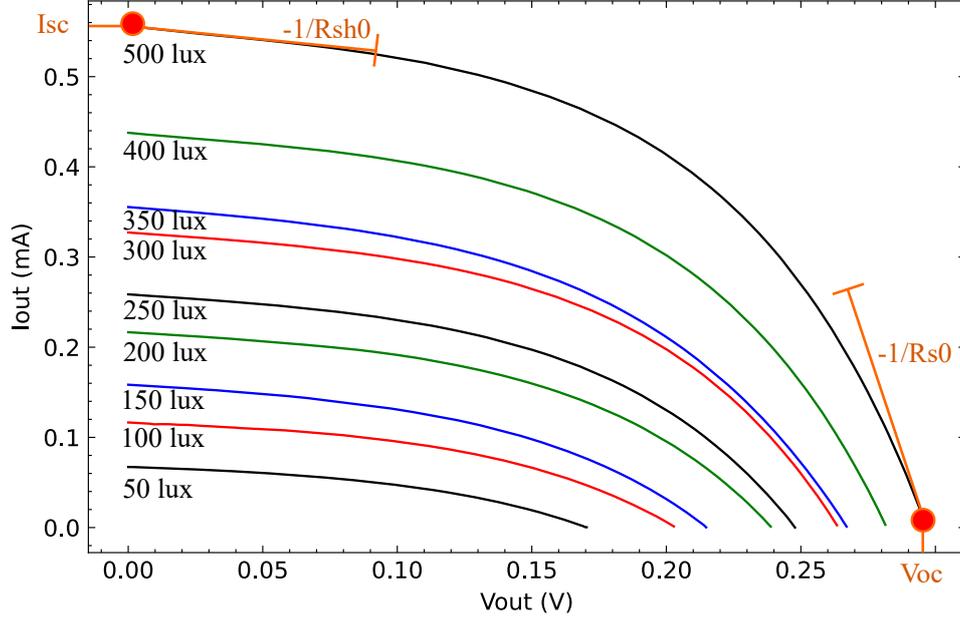
### 4.1 EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS DC

Existem vários métodos para extrair parâmetros do modelo de célula fotovoltaica. Isso pode ser feito por meio de procedimentos de otimização, nos quais um algoritmo de otimização busca no espaço de projeto os parâmetros que melhor se ajustam às características I-V medidas. No entanto, esta abordagem pode levar a valores de parâmetros que não têm necessariamente um significado físico. O procedimento analítico utiliza as equações do modelo da célula fotovoltaica sob certas condições para extrair os parâmetros do modelo. Estas condições diferem de método para método e um procedimento padrão ainda não está bem definido.

O procedimento de extração de parâmetros analíticos abaixo é adaptado do método proposto por (CELIK; ACIKGOZ, 2007). Existem 6 pontos característicos importantes que podem ser extraídos das curvas medidas. A tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), extraída nos pontos onde  $I = 0$ . A corrente de curto-circuito  $I_{sc}$  também pode ser estimada a partir

das curvas características I-V nos pontos onde  $V = 0$ , como mostra na Fig. 4.1.

**Figura 4.1 – Características de corrente-tensão.**



Fonte: (MATTOS et al., 2024).

Os recíprocos das inclinações no ponto de circuito aberto e no ponto de curto-circuito são  $R_{s0}$  e  $R_{sh0}$ , respectivamente, dados por:

$$R_{s0} = -\left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=V_{oc}} \quad (7)$$

$$R_{sh0} = -\left. \frac{dV}{dI} \right|_{I=I_{sc}} \quad (8)$$

A corrente de curto-circuito  $I_{sc}$  ocorre quando a tensão de saída é zero. Então, de (1) e  $V = 0$  temos:

$$I_{sc} = I_{pv} - I_s \left[ e^{\frac{R_s I_{sc}}{n V_t}} - 1 \right] - \frac{R_s I_{sc}}{R_{sh}} \quad (9)$$

Esta equação pode ser simplificada se considerarmos o segundo termo muito pequeno:

$$I_{pv} = \frac{R_{sh} + R_s}{R_{sh}} I_{sc} \quad (10)$$

A corrente de saída no ponto de potência máxima é dada por:

$$I_{mp} = I_{pv} - I_s \left[ e^{\frac{(V_{mp} + R_s I_{mp})}{n V_t}} - 1 \right] - \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{R_{sh}} \quad (11)$$

A corrente de saída é zero quando a saída está aberta:

$$0 = I_{pv} - I_s \left[ e^{\frac{V_{oc}}{nV_t}} - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (12)$$

É conveniente usar a derivada de  $I$  em relação a  $V$ :

$$\frac{dI}{dV} = -I_s \left( \frac{1}{nV_t} \left( 1 + \frac{dI}{dV} R_s \right) e^{\frac{V+IR_s}{nV_t}} \right) - \frac{1}{R_{sh}} \left( 1 + \frac{dI}{dV} R_s \right) \quad (13)$$

Substituindo (7) em (13):

$$\frac{1}{R_{s0}} = I_s \left( \frac{1}{nV_t} \left( 1 - \frac{R_s}{R_{s0}} \right) e^{\frac{V_{oc}}{nV_t}} \right) + \frac{1}{R_{sh}} \left( 1 - \frac{R_s}{R_{s0}} \right) \quad (14)$$

Substituindo (8) em (13) temos:

$$\frac{1}{R_{sh0}} = I_s \left( \frac{1}{nV_t} \left( 1 - \frac{R_s}{R_{sh0}} \right) e^{\frac{I_{sc}R_s}{nV_t}} \right) + \frac{1}{R_{sh}} \left( 1 - \frac{R_s}{R_{sh0}} \right) \quad (15)$$

A energia gerada pela célula fotovoltaica é  $P = IV$ . Ao diferenciá-lo em relação a  $V$ :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = \frac{dI}{dV}V + \frac{dV}{dV}I = \frac{dI}{dV}V + eu \quad (16)$$

No ponto de potência máxima,  $\frac{dP}{dV} = 0$ , de modo que (16) se torna

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{P=I_{mp}V_{mp}} = -\frac{I_{mp}}{V_{mp}} \quad (17)$$

Substituindo (17) em (13):

$$\frac{I_{mp}}{V_{mp}} = I_s \left( \frac{1}{nV_t} \left( 1 - \frac{I_{mp}}{V_{mp}} R_s \right) e^{\frac{V_{mp}+I_{mp}R_s}{nV_t}} \right) - \frac{1}{R_{sh}} \left( 1 - \frac{I_{mp}R_s}{V_{mp}} \right) \quad (18)$$

Com essas equações, (BADER et al., 2019) propõe um procedimento simples para extrair os 5 parâmetros do modelo 1D2R. A resistência shunt é estimada em  $R_{sh0}$ :

$$R_{sh} = R_{sh0} \quad (19)$$

O valor de  $n$  pode ser extraído de (18) como:

De (18) temos:

$$n = \frac{V_{mp} + I_{mp}R_{s0} - V_{oc}}{V_t \left( \ln\left(I_{sc} - \frac{V_{mp}}{R_{sh}} - I_{mp}\right) - \ln\left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}\right) + \frac{I_{mp}}{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}\right)} \quad (20)$$

Substituir (10) em (12) leva a:

$$I_s = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}\right) e^{\frac{-V_{oc}}{nV_t}} \quad (21)$$

Os resultados obtidos para a extração dos parâmetros DC para o modelo 1D2R são apresentados na Tab. 4.1. É possível notar o aumento de  $I_{pv}$ ,  $I_s$  e  $n$  com a iluminância, e o efeito oposto para  $R_s$  e  $R_{sh}$ . A coluna RMSE indica a raiz do erro quadrático médio da corrente de saída analítica em relação às medições.

**Tabela 4.1 – Parâmetros do modelo DC 1D2R extraídos para diferentes níveis de iluminância.**

Illuminance (lux)	$I_{pv}$ (mA)	$I_s$ ( $\mu$ A)	$n$	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_{sh}$ (k $\Omega$ )	RMSE (mA)
50	0.0708	0.0748	1.0382	373.6491	6.9897	0.0014
100	0.1202	0.2164	1.3123	195.5369	6.5076	0.0014
150.4	0.1620	0.4592	1.5107	98.9600	4.6656	0.0022
200	0.2206	0.4778	1.5770	82.9531	4.8232	0.0021
250	0.2624	0.6964	1.6907	57.9388	4.3668	0.0026
300	0.3320	0.6788	1.7078	57.2898	4.2135	0.0021
350	0.3623	0.8041	1.7611	65.9515	3.6991	0.0034
400	0.4429	0.8858	1.8078	41.2964	3.8660	0.0024
500	0.5622	0.8758	1.8282	32.1803	3.1983	0.0029

## 4.2 EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS AC

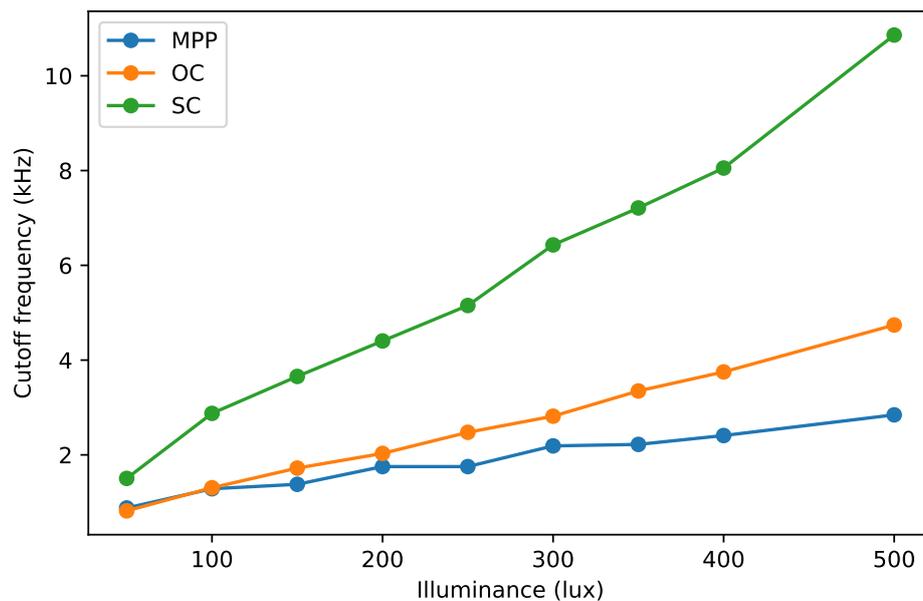
A partir das medidas obtidas é possível extrair os parâmetros do modelo elétrico de pequenos sinais da célula fotovoltaica mostrado na figura 2.5. Para isso, primeiro é necessário extrair os parâmetros DC para o modelo de célula fotovoltaica 1D2R. Implementamos o método de extração descrito em (MONTEIRO et al., 2022), considerando os mesmos níveis de iluminância usados nas medições DC, e extraímos os valores de  $n$ ,  $I_s$ ,  $I_{PV}$ ,  $R_S$  e  $R_{SH}$  que modela o circuito equivalente na figura 2.4. Conhecendo os valores

de  $n$  e  $I_{PV}$  extraímos  $r_d$  usando a eq. 2. Para as três regiões de polarização, ponto de máxima potência MPP, circuito aberto, no inglês, *Open Circuit* (OC) e curto-circuito, no inglês *Short Circuit* (SC), a resistência de saída equivalente  $r_0$  foi calculada usando a eq. 4. Com os valores medidos de  $f_c$ , o valor da capacitância equivalente do diodo  $C_{eq}$  pode ser estimado usando a eq. 5.

Os parâmetros AC extraídos estão resumidos na Tab. 4.2. A resistência de carga  $R_L$  foi ajustada para polarizar a célula fotovoltaica em MPP para o cenário de potência máxima entregue, para circuito aberto,  $R_L$  foi fixado em  $100 \text{ M}\Omega$ . Para emular o cenário SC,  $R_L$  foi ajustado para o valor mínimo que se aproximava de  $V_{out}$  de zero (embora não atingindo exatamente  $0 \text{ V}$  devido a limitações no equipamento de medição).

Os gráficos de frequências de corte versus iluminância são mostrados na Fig. 4.2. Pode-se observar que  $f_c$  apresenta um aumento linear com a iluminância, embora em taxas diferentes dependendo do ponto de operação da célula fotovoltaica. A menor largura de banda é observada em MPP, onde  $f_c$  varia de  $880 \text{ Hz}$  a  $2,8 \text{ kHz}$  e aumenta a uma taxa de  $4,4 \text{ Hz/lux}$ . Enquanto isso, em OC, a frequência de corte aumenta a uma taxa de  $8,8 \text{ Hz/lux}$ , enquanto em SC aumenta ainda mais rápido para  $20,9 \text{ Hz/lux}$ . Isso leva a um pico de  $f_c$  de  $10,8 \text{ kHz}$  a  $500 \text{ lux}$  no cenário SC. Como mostra na Tab. 4.2, a região próxima ao SC apresenta o melhor resultado para uso simultâneo da célula fotovoltaica para geração de energia e para fins de comunicação.

**Figura 4.2** – Medidas de frequência de corte em função da iluminância para três diferentes condições de polarização.



Fonte: (MATTOS et al., 2024).

**Tabela 4.2 – Parâmetros do modelo de célula fotovoltaica AC extraídos para diferentes níveis de iluminância em três condições de polarização.**

Bias	Illum. (lux)	$r_d$ ( $\Omega$ )	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_{sh}$ ( $\Omega$ )	$R_L$ ( $\Omega$ )	$r_0$ ( $\Omega$ )	$C_{eq}$ (nF)	$\tau$ ( $\mu$ s)	$f_c$ (kHz)
MPP	50	378.98	373.65	6989.75	2402.59	318.28	568.44	180.92	0.88
	100	282.24	195.54	6507.59	1602.10	235.13	526.71	123.84	1.29
	150	241.06	98.96	4665.63	1276.12	196.47	587.57	115.44	1.38
	200	184.78	82.95	4823.15	1011.15	153.06	593.17	90.79	1.75
	250	166.58	57.94	4366.81	893.03	137.29	661.32	90.79	1.75
	300	132.97	57.29	4213.48	744.79	111.05	654.53	72.69	2.19
	350	125.67	65.95	3699.14	695.41	104.81	683.76	71.67	2.22
	400	105.52	41.30	3865.98	594.82	88.44	747.38	66.10	2.41
	500	84.07	32.18	3198.29	488.15	70.78	790.53	55.95	2.84
OC	50	378.98	373.65	6989.75	100 M	359.49	541.39	194.63	0.82
	100	282.24	195.54	6507.59	100 M	270.51	450.31	121.81	1.31
	150	241.06	98.96	4665.63	100 M	229.22	403.42	92.47	1.72
	200	184.78	82.95	4823.15	100 M	177.96	440.45	78.38	2.03
	250	166.58	57.94	4366.81	100 M	160.46	400.60	64.28	2.48
	300	132.97	57.29	4213.48	100 M	128.90	438.41	56.51	2.82
	350	125.67	65.95	3699.14	100 M	121.55	391.06	47.53	3.35
	400	105.52	41.30	3865.98	100 M	102.72	413.10	42.43	3.75
	500	84.07	32.18	3198.29	100 M	81.92	409.82	33.57	4.74
SC	50	378.98	373.65	6989.75	824.86	276.54	382.80	105.86	1.50
	100	282.24	195.54	6507.59	458.88	191.40	289.17	55.35	2.88
	150	241.06	98.96	4665.63	337.11	150.24	289.80	43.54	3.66
	200	184.78	82.95	4823.15	241.90	114.97	314.33	36.14	4.40
	250	166.58	57.94	4366.81	201.92	99.20	311.38	30.89	5.15
	300	132.97	57.29	4213.48	158.31	80.67	306.78	24.75	6.43
	350	125.67	65.95	3699.14	146.00	77.25	285.73	22.07	7.21
	400	105.52	41.30	3865.98	117.62	62.39	316.77	19.76	8.05
	500	84.07	32.18	3198.29	92.46	49.43	296.48	14.66	10.86

## 5 TECNOLOGIAS DE POSICIONAMENTO

Existem inúmeras tecnologias de localização sem fio baseadas em rádio. Entre elas está o sistema de posicionamento global (GNSS), o qual é amplamente conhecido como um sistema de navegação para ambientes externos. No entanto, o GNSS não é aplicável nem suficientemente preciso em ambientes indoor, uma vez que os sinais de radiofrequência dos satélites sofrem graves atenuação ao entrar nos edifícios. Portanto, há necessidade de um sistema de comunicação sem fio para fornecer posicionamento preciso em ambientes internos.

Em posicionamento indoor a luz visível pode ser uma tecnologia complementar à radiofrequência, podendo superar alguns dos desafios mencionados acima. As vantagens da utilização da luz para o posicionamento indoor estão relacionadas às melhores características de propagação de luz, resultando em maior precisão e resiliência contra interferência. Ao contrário da RF, a luz se propaga principalmente através da linha de visão, no inglês *Line-of-Sight* (LOS), enquanto o multi-caminho desempenha um papel insignificante porque a maioria das reflexões são difusas e não especulares. Conseqüentemente, não há interferência e há uma probabilidade muito alta de que um sinal significativo é devido a um LOS entre Tx e Rx. Além disso, a luz não se propaga através das paredes e não pode sofrer interferência EMI. Em todos esses pontos, onde o uso de *Radio Frequency* (RF) para posicionamento é problemático, posicionamento indoor por luz tem vantagens claras como uma solução potencial.

Desafios para sistemas de posicionamento indoor por luz são a cobertura necessária e eficiência energética, em particular para dispositivos móveis. Para permitir a localização em um ambiente industrial, a cobertura total é obrigatório. Este é um desafio devido à área limitada que o posicionamento indoor por luz pode cobrir. O posicionamento indoor por luz visível exigirá significativamente mais front-ends em comparação com um sistema baseado em RF. Portanto, descreveremos algumas técnicas de posicionamento.

- **Ângulo de chegada (AOA):** A técnica do ângulo de chegada, no inglês *Angle-of-Arrival* (AOA), determina a posição com base no ângulo de chegada estimado dos LEDs e luz no receptor. As vantagens são o ângulo constante sobre tempo, nenhuma sincronização necessária entre LEDs, e apenas duas e três medições para posicionamento 2D e 3D. O Ângulo de chegada refere-se ao ângulo incidente no qual o sinal de luz atinge o dispositivo receptor. Esta abordagem pode ser implementada em sistemas baseados em fotodiodo e em câmera. Em sistemas baseados em fotodiodo, o ângulo de chegada é calculado resolvendo o modelo de canal discutido na seção

anterior. Em sistemas baseados em câmera/sensor de imagem, o ângulo de chegada é calculado usando processamento de imagem. Vários algoritmos podem ser aplicados para estimar a posição do receptor com base nas propriedades do LED, propriedades da câmera e características da imagem.

- **Diferença de Fase de Chegada (PDOA):** A abordagem da diferença de fase de chegada, no inglês *Phase Difference of Arrival* (PDOA), estima a distância entre LEDs e o receptor com base nas diferenças de fase entre os sinais. Cada sinal chegando na célula, experimenta um atraso de tempo diferente dependendo do valor da distância. Portanto, diferentes tempos de atraso pode ser estimado a partir de diferenças de fase de sinusoides pelas quais o sinal óptico é modulado. Para o PDOA, a vantagem é que pode ser combinado com outros posicionamentos técnicas como RSSI e *Time of Flight* (TOF)/*Time Difference of Arrival* (TDOA) onde pode melhorar significativamente a precisão.
- **Tempo de voo (TOF):** A técnica do tempo de voo, no inglês TOF, é muito semelhante aos sistemas baseados em RF. Considerando que a velocidade da luz no ar é constante, a distância do alvo móvel até a referência os pontos serão proporcionais ao tempo de viagem da luz. TOF é também designado por alcance unilateral. No receptor, o pacote chega no horário de chegada (TOA).
- **Tempo de voo de ida e volta (RTTOF):** A técnica *Round-Trip Time of-Flight* (RTTOF) ou intervalo é uma técnica que utiliza TOF em um sistema bidirecional. Igual a RF, cada estação é equipada com um transceptor (LED+Fotodiodo(PD)). A primeira estação envia um pacote para a segunda estação, então a segunda estação envia um pacote de volta para a estação primeira estação. Além disso, o resto do processo é semelhante ao baseado em TOF.
- **Tempo de Chegada (TOA) / Diferença de Tempo de Chegada (TDOA):** A abordagem do tempo de chegada, no inglês *Time of Arrival* (TOA), determina a distância entre o transmissor e o receptor medindo o tempo que o sinal de luz levou para chegar ao receptor:

$$Distância = Velocidade \times Tempo \quad (22)$$

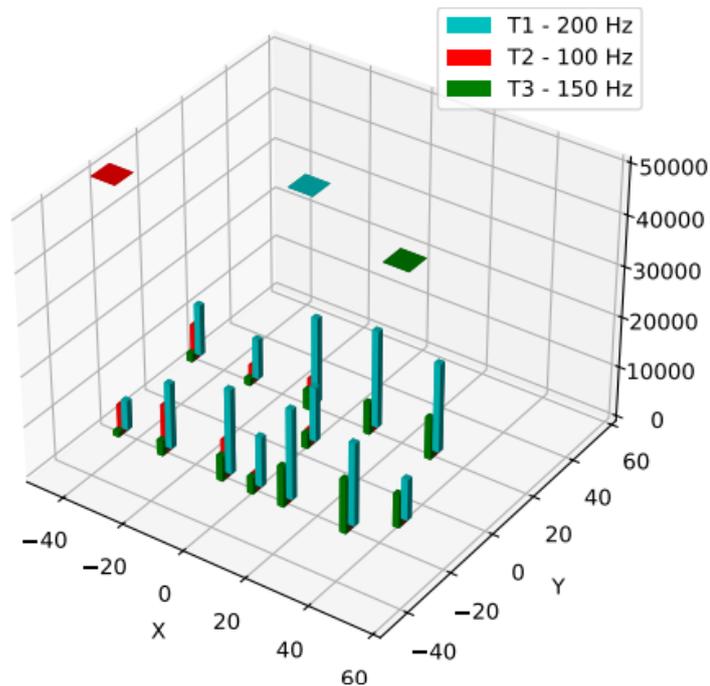
onde a velocidade é a velocidade da luz. Uma vez que as distâncias entre o receptor e vários transmissores são calculadas usando o TOA, um algoritmo de trilateração é aplicado para determinar a localização do receptor. Embora seja teoricamente

possível realizar a localização do receptor usando a abordagem TOA, a localização é muito difícil de ser alcançada na realidade devido à velocidade muito alta da luz. Para medir com precisão o tempo que cada sinal de luz levou para chegar ao receptor, a sincronização de tempo precisa deve ser estabelecida entre todos os transmissores e o receptor. Por isso TDOA é um método para melhorar o TOA. Este método requer apenas sincronização de tempo entre os LEDs transmissores e a sincronização de tempo precisa entre os LEDs e o receptor não é essencial. O método TDOA mede a diferença no tempo de voo entre o receptor e os LEDs e então a converte na distância. Ao transmitir vários pacotes de vários APs para o receptor ao mesmo tempo, a posição do receptor pode ser estimada explorando os diferentes atrasos de sinal. Isto requer sincronização entre todas as estações. A diferença da distância entre cada estação e os receptores, onde pode ser calculado multiplicando o TDOA pela velocidade da luz. Com base na diferença constante de distância, uma hipérbole de posições possíveis pode ser determinada. Medições de TDOA de pelo menos três estações devem ser obtidas em um ambiente 2D.

### **5.1 INDICADOR DE INTENSIDADE DO SINAL RECEBIDO (RSSI)**

A técnica baseada em indicador de intensidade de sinal recebido, no inglês, *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) é a técnica mais amplamente estudada para ambientes indoor de posicionamento usando luz visível. No receptor, a luz é convertida em um sinal elétrico. A distância entre transmissor e o receptor é calculado a partir da potência do sinal conhecida, potência do sinal recebido e o modelo de atenuação. A técnica RSSI depende da intensidade da luz recebida no receptor e uma intensidade de luz pré-calculada em uma determinada distância de calibração.

Figura 5.1 – Exemplo prático do Indicador de Intensidade do sinal Recebido

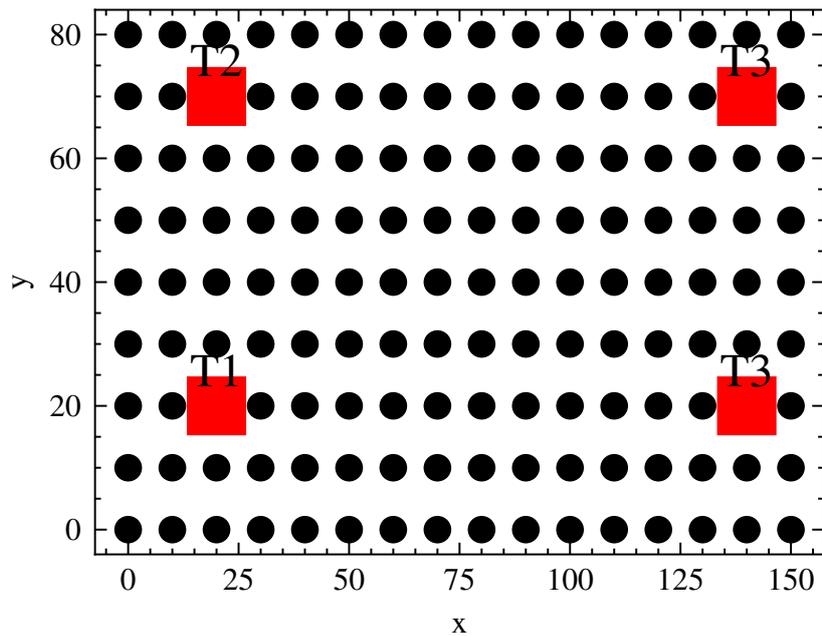


Fonte: O autor.

## 5.2 IMPRESSÃO DIGITAL (FINGERPRINTING)

A impressão digital também pode ser chamada de análise de cenário, pois geralmente utiliza características ou impressões digitais do ambiente ou objeto para identificar sua localização. A figura 5.2 mostra um exemplo prático em que foi feita uma impressão digital a cada 10 cm para 81 posições em  $(x, y)$  em um certo cenário. Mais especificamente, a localização relativa é determinada pela comparação de dados de recursos monitorados em tempo real com vários recursos do ambiente, os quais são coletados e armazenados. A impressão digital estima geralmente o posicionamento através da coleta da potência do sinal com base no indicador de intensidade do sinal recebido RSSI.

Figura 5.2 – Exemplo prático da técnica de impressão digital.

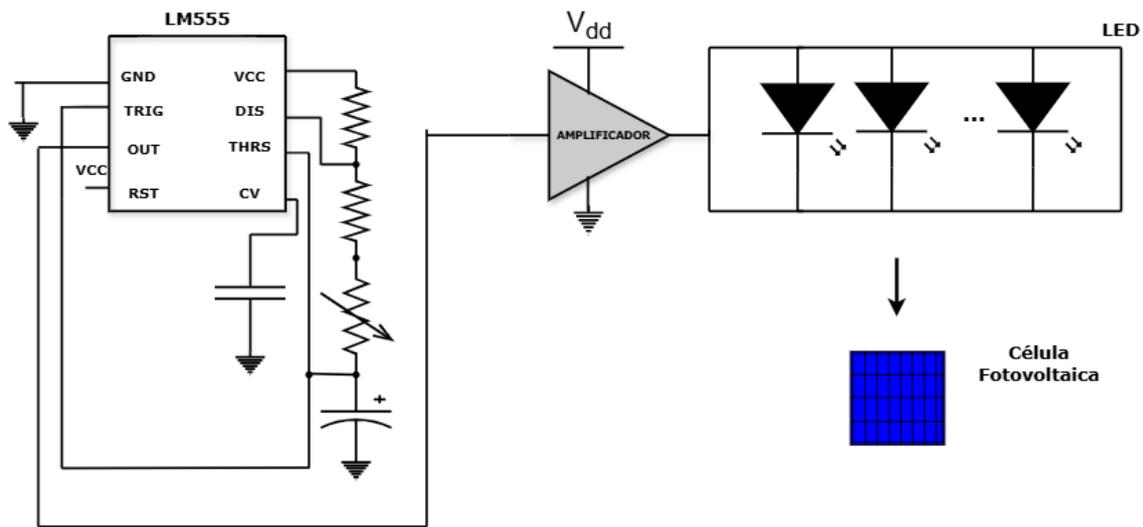


Fonte: O autor.

### 5.3 DISPOSITIVO DE TRANSMISSÃO E RECEPÇÃO

Para obter uma estimativa real da largura de banda de uma célula fotovoltaica para fins de posicionamento indoor, utilizamos um painel solar iluminado por um LED branco convencional. O circuito transmissor é ilustrado no diagrama de blocos 5.3. Um oscilador LM555 é usado para gerar o sinal a ser transmitido. O circuito básico montado para acionar o LM555 possui configuração astável, capaz de emitir pulsos em sua saída com frequência regulada pelo resistor variável. A saída do gerador de frequência está diretamente conectada à entrada do amplificador. A amplificação do sinal é realizada pelo amplificador cujo circuito está na figura 3.4. A variação do resistor RB permite a regulação do nível da corrente contínua no terminal base do transistor ( $I_b$ ), gerando uma corrente proporcional no terminal coletor. Como a corrente do coletor é igual à corrente que flui nos LEDs, ela controla a intensidade da luz emitida pelos LEDs. A célula fotovoltaica é colocada a uma distância variável dos LEDs e gera em sua saída uma tensão cujo valor pico a pico é proporcional a esta distância.

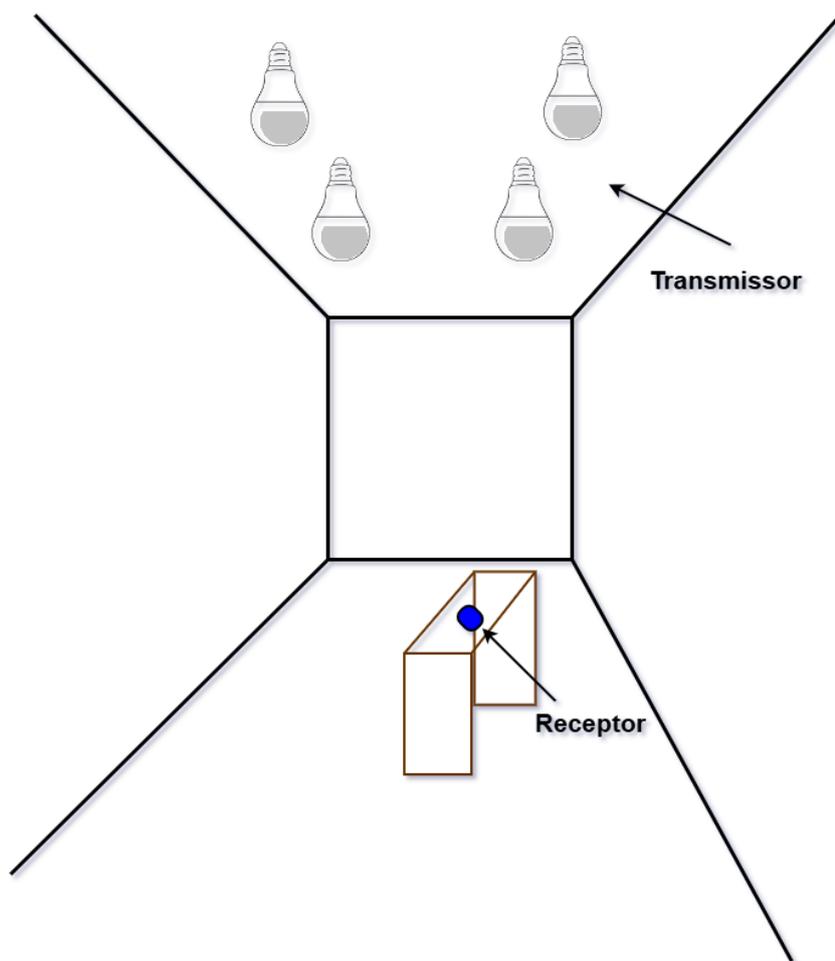
Figura 5.3 – Diagrama de blocos com o Circuito Transmissor.



Fonte: O autor.

A ideia do dispositivo de transmissão e recepção é criar um sistema de posicionamento indoor para utilizar em um ambiente fechado como mostra na figura 5.4, onde há vários transmissores localizados no teto e uma célula fotovoltaica como receptora. Diante disso, é possível utilizar diversas tecnologias de posicionamento como mostra no capítulo 5. Cada transmissor opera com uma frequência diferente, permitindo ao receptor identificar múltiplas fontes de luz simultaneamente. Os transmissores são colocados em locais arbitrários no ambiente indoor de forma que toda a área seja coberta pela luz emissora. A frequência do sinal recebido pode ser usada para distinguir o transmissor, e a intensidade do sinal pode ser correlacionada com a distância entre o receptor e a fonte (KOUHINI et al., 2021) (AFTAB et al., 2016).

Figura 5.4 – Sistema de Posicionamento Indoor.



Fonte: O autor.

## 6 ALGORITMOS DE POSICIONAMENTO

Neste capítulo são apresentados algoritmos de posicionamento como trilateração e multilateração, os quais são amplamente utilizados em sistemas de posicionamento interno baseados em luz. A trilateração é uma técnica que calcula a posição de um receptor a partir das distâncias medidas entre o receptor e três transmissores cujas posições são conhecidas. Este cálculo utiliza dados de distância, possibilitando desenhar círculos (ou esferas, no caso tridimensional) ao redor de cada transmissor. A intersecção destes círculos indica a posição estimada do receptor.

Esta parte considera o cálculo da distância lateral, que se refere à projeção da distância entre o transmissor e o receptor no plano horizontal. Este cálculo é importante para corrigir a posição estimada em sistemas onde a altura entre os dispositivos pode introduzir erros na determinação da posição horizontal. Esta abordagem é essencial para sistemas de posicionamento baseados em luz porque permite uma localização mais precisa, considerando a intensidade do sinal para calcular as distâncias envolvidas.

A multilateração é uma técnica que utiliza quatro ou mais transmissores para estimar a posição do receptor, considerando a diferença nas distâncias medidas entre o receptor e cada transmissor. Assim como a trilateração, a multilateração é amplamente utilizada em sistemas de localização que exigem mais precisão e confiabilidade na estimativa de posição.

### 6.1 TRILATERAÇÃO

Trilateração é uma técnica de posicionamento onde a localização do alvo  $(x, y)$  é estimada medindo suas distâncias de múltiplos transmissores de referência. No trabalho de (MAHEEPALA et al., 2020) esta técnica é apresentada com três transmissores. Para estimar a distância entre o receptor e os três transmissores, foi utilizado o algoritmo de trilateração, uma vez que a intensidade do sinal recebido é previamente conhecida (PARK; LEE, 2021).

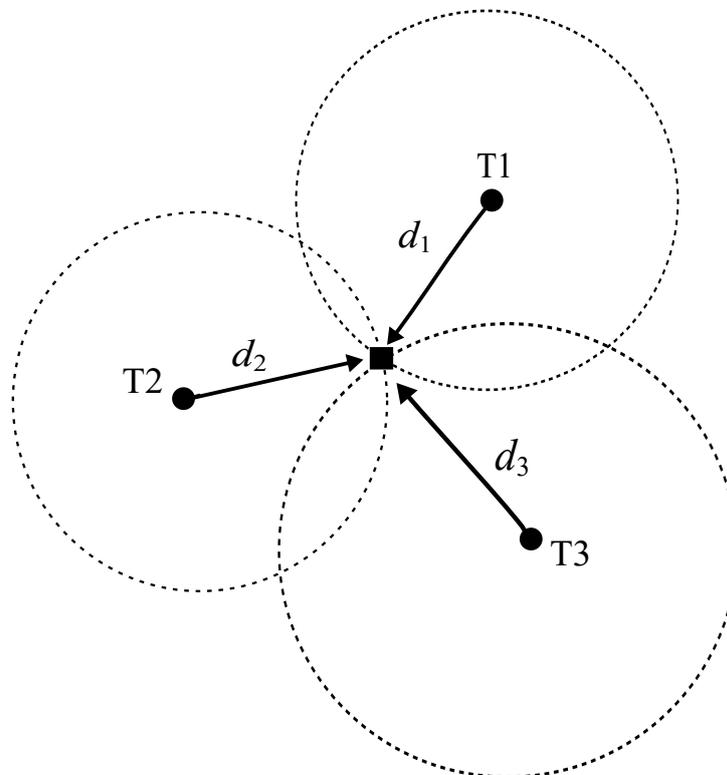
Para estimar a distância entre o receptor e os três transmissores, o algoritmo de trilateração foi usado, uma vez que a intensidade do sinal recebido é conhecida antecipadamente. Esta é uma técnica de posicionamento na qual a posição do alvo  $(x, y)$  é estimada medindo as distâncias para vários transmissores de referência. A versão 2D da trilateração é ilustrada na Fig. 6.1. Assumindo três transmissores (T1, T2 e T3) e um receptor, círculos com um raio igual à distância entre cada transmissor e o receptor

se cruzam em um ponto que é a localização do receptor. O seguinte sistema de equações pode ser derivado para os três transmissores:

$$\begin{cases} (x - x_{T1})^2 + (y - y_{T1})^2 = d_1^2 \\ (x - x_{T2})^2 + (y - y_{T2})^2 = d_2^2 \\ (x - x_{T3})^2 + (y - y_{T3})^2 = d_3^2 \end{cases} \quad (23)$$

Aqui,  $x_{T1}$ ,  $x_{T2}$ ,  $x_{T3}$ ,  $y_{T1}$ ,  $y_{T2}$  e  $y_{T3}$  são os pontos de coordenadas dos três transmissores,  $d_1$ ,  $d_2$ , e  $d_3$  são as distâncias horizontais entre os transmissores e o receptor, e  $(x, y)$  é a posição do receptor, que pode ser determinada resolvendo o sistema de equações.

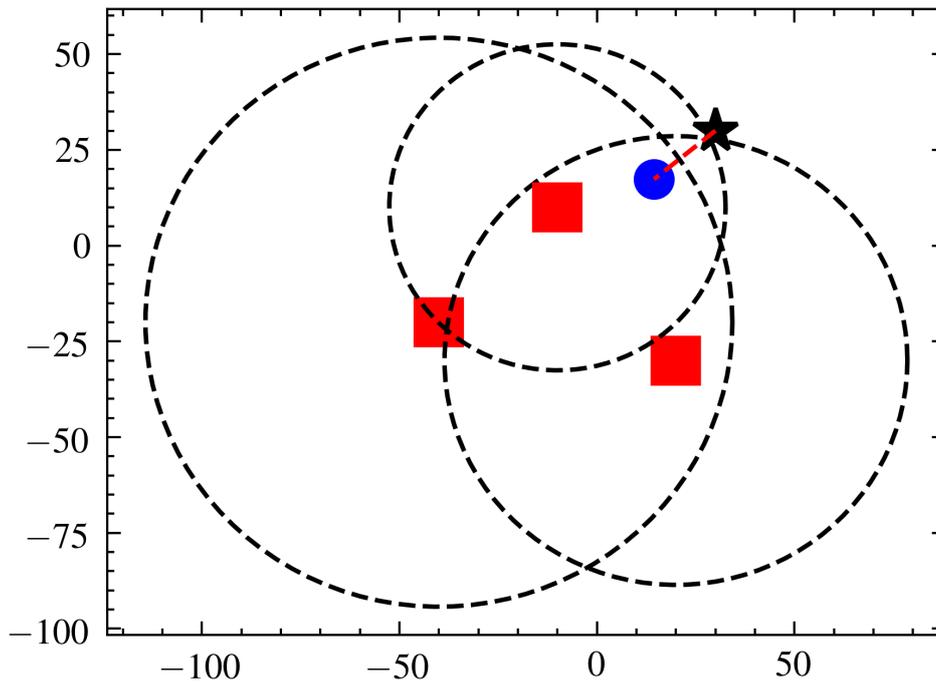
**Figura 6.1 – Trilateração.**



Fonte: O autor.

A figura 6.2 mostra um exemplo prático da técnica trilateração. Uma posição real conhecida é marcada com o ponto azul e os transmissores estão marcados com quadrados vermelhos. A partir da técnica é possível obter a posição estimada do receptor, marcada na figura como um estrela. Seria esperado encontrar um único ponto como intersecção dos três círculos, porém os erros de estimativa de distância em relação a cada transmissor individual fazem com que o cálculo resulte em um pequeno erro.

Figura 6.2 – Trilateração com uma Posição Real x Posição Estimada.

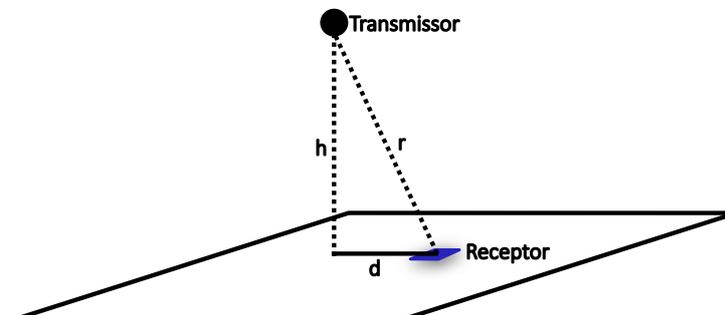


Fonte: O autor.

### 6.1.1 Distância Lateral

A distância lateral real do receptor ao transmissor ( $d$ ) é calculada conforme mostrado na Fig. 6.3, uma vez que as coordenadas  $(x_T, y_T)$  do transmissor são conhecidas. Isso permite que a impressão digital da intensidade do sinal seja determinada para toda a área. A iluminância ambiente é removida do sinal, uma vez que os componentes de baixa frequência são filtrados na análise do domínio da frequência.

Figura 6.3 – Distância lateral do receptor ao transmissor ( $d$ ).



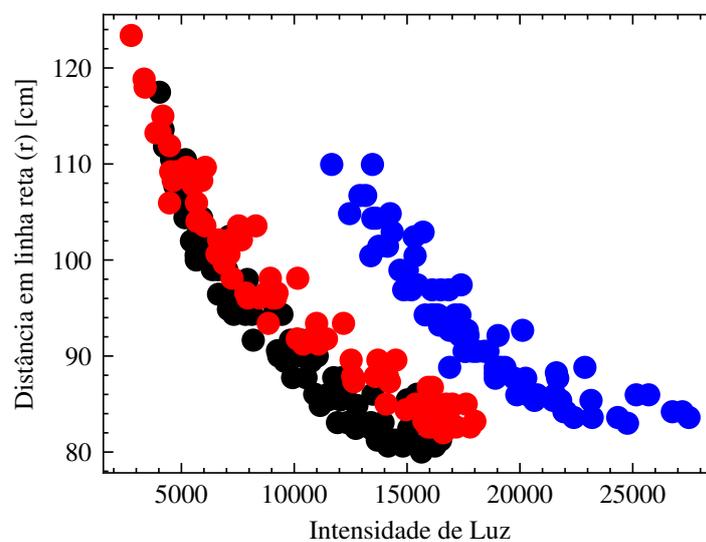
Fonte: O autor.

Para justificar a escolha da distância lateral ( $d$ ) na análise de intensidade de sinal, podemos comparar dois gráficos que mostram a relação entre a intensidade do sinal e a

distância, como pode ser visto nas figuras 6.4 e 6.5. Na figura 6.4, ao observar a relação em função da distância em linha reta ( $r$ ) ao transmissor e receptor, é possível notar que a curva tem um comportamento logarítmico. Isso ocorre porque, na prática, a intensidade do sinal diminui rapidamente com a distância em relação ao ponto de transmissão, levando a uma redução não-linear, especialmente em intervalos maiores de distância. Essa variação em escala logarítmica pode dificultar a análise direta da intensidade do sinal para localizar a posição do receptor.

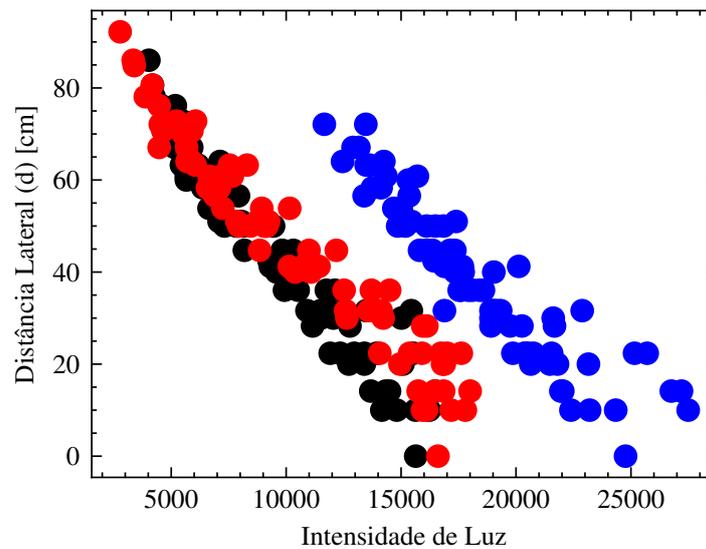
Na figura 6.5, ao utilizar a distância lateral em relação ao transmissor e receptor, a relação entre a intensidade do sinal e a distância se aproxima de uma reta. Esse comportamento linear simplifica a interpretação da intensidade do sinal, por facilitar a identificação de padrões mais previsíveis de atenuação à medida que o receptor se desloca. A escolha pela distância lateral, portanto, favorece a criação de um modelo mais linear e consistente para a “impressão digital” da intensidade do sinal. Isso torna o processo de localização mais preciso e prático, especialmente em sistemas que dependem de medições de distância direta para determinar a posição do receptor.

**Figura 6.4 – Distância em linha reta do receptor ao transmissor ( $r$ ) com os três transmissores (T1, T2 e T3).**



Fonte: O autor.

Figura 6.5 – Distância lateral do receptor ao transmissor ( $d$ ) com os três transmissores (T1, T2 e T3).

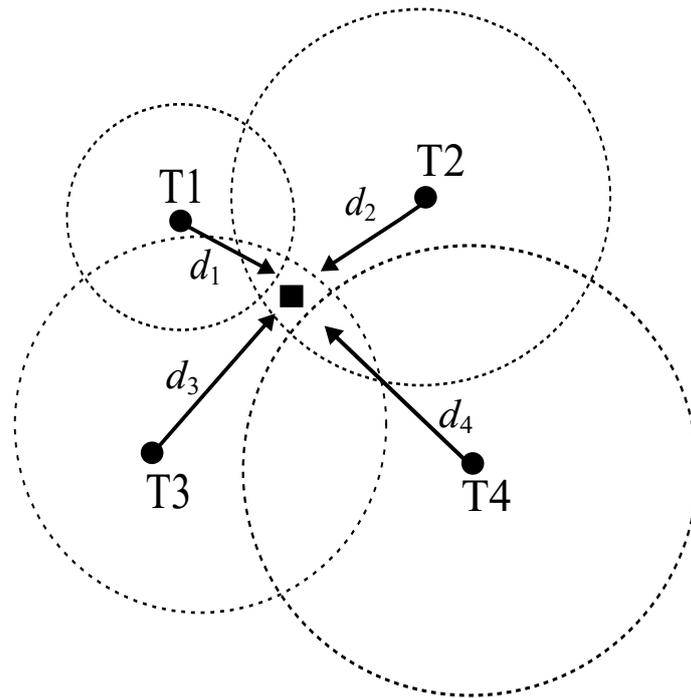


Fonte: O autor.

## 6.2 MULTILATERAÇÃO

A multilateração é uma técnica de posicionamento amplamente utilizada em sistemas de posicionamento e é essencial para ambientes onde é necessário um cálculo preciso da posição, como em redes de comunicação, navegação aérea e sistemas de posicionamento interno. A técnica é uma extensão da trilateração, mas com uma abordagem que aproveita múltiplos sinais para melhorar a precisão da localização como mostra na figura 6.6. Na multilateração, em vez de calcular a posição de um objeto com apenas três transmissores (como na trilateração), são utilizados quatro ou mais transmissores, ou pontos de referência. Quanto mais transmissores são usados, mais preciso tende a ser o cálculo da posição, porque os erros individuais são diluídos em diversas medições.

Figura 6.6 – Multilateração.



Fonte: O autor.

## 7 METODOLOGIA DO PROJETO E RESULTADOS

Neste capítulo, detalham-se as tecnologias e métodos empregados no desenvolvimento do sistema de posicionamento indoor baseado em células fotovoltaicas que utilizam luz visível. Também são apresentados os resultados obtidos durante a implementação e validação do sistema, de forma integrada à metodologia adotada.

Para a determinação da posição, utilizamos dois métodos principais: o indicador de intensidade do sinal recebido (*RSSI*), que serviu como base para a criação da impressão digital (*fingerprint*) do ambiente em estudo, conforme descrito no Capítulo 5. A análise do *RSSI* permitiu mapear a distribuição espacial da intensidade luminosa recebida, essencial para a estimativa da posição do receptor.

Durante o desenvolvimento, foram realizados testes com diferentes configurações do sistema, variando o número de transmissores: dois, três e quatro. Inicialmente, avaliamos o sistema com dois transmissores, o que evidenciou limitações na determinação da posição exata do receptor, devido à menor quantidade de informações disponíveis. Em seguida, expandimos para três transmissores, o que possibilitou a aplicação da técnica de trilateração, resultando em uma melhora significativa na precisão da localização. Por fim, utilizamos uma configuração com quatro transmissores, permitindo a adoção da técnica multilateral. Essa abordagem, por considerar mais pontos de referência, mostrou-se ainda mais robusta, reduzindo o erro nas estimativas de localização.

Os testes experimentais foram conduzidos em ambiente controlado, com coletas de dados sistemáticas para cada configuração. A análise dos resultados permitiu observar a influência direta do número de transmissores na precisão do sistema de posicionamento. Foram obtidas estimativas de localização mais confiáveis à medida que o número de transmissores aumentava, validando a hipótese de que a densidade de emissores de luz impacta diretamente a acurácia do sistema.

A seguir, são apresentados em detalhes os resultados obtidos para cada uma das configurações testadas. Também é realizada uma comparação entre as abordagens, destacando suas vantagens, limitações e o potencial de aplicação em diferentes cenários de sistemas de posicionamento indoor.

## 7.1 TESTES, AVALIAÇÕES E RESULTADOS COM DOIS TRANSMISSORES

Primeiramente foi feita uma análise do receptor em relação à distância ao transmissor, para avaliar se atendia aos requisitos para posicionamento indoor. Pode-se analisar através disso a transferência de potência em sistemas de posicionamento por luz visível, podendo ser calculada usando o modelo de perda de caminho (MIRANDA et al., 2023):

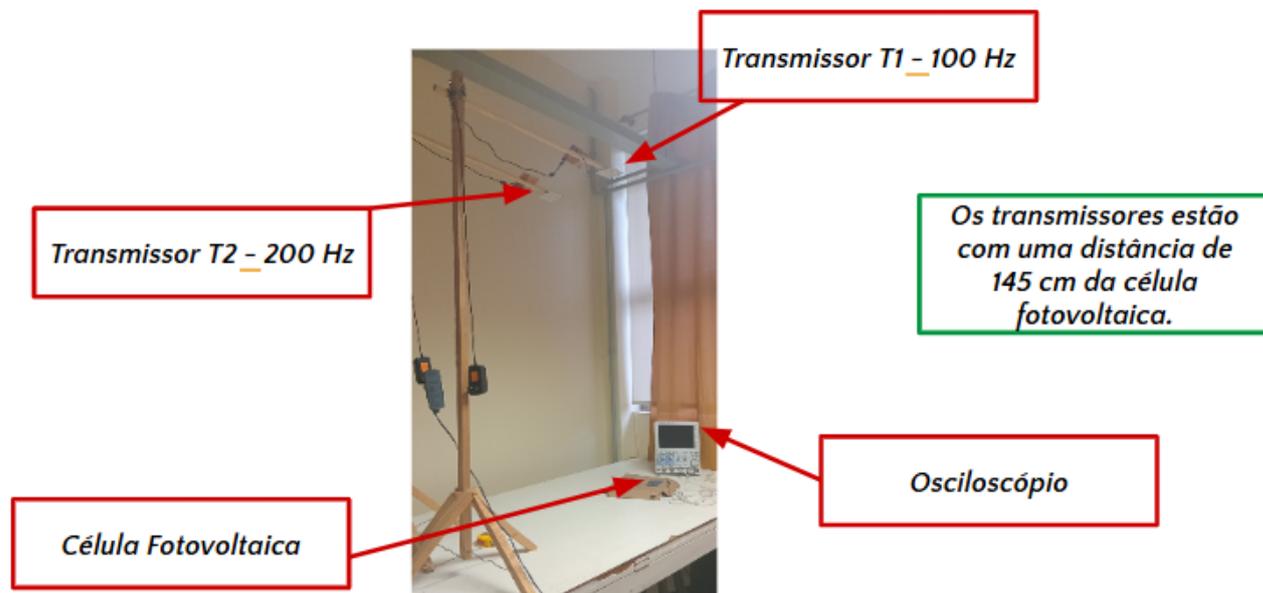
$$P_r = \frac{(m + 1)A_d(h/d)^m \cos^m(\phi)P_t}{2\pi d^2} \quad (24)$$

onde  $P_r$  representa a potência óptica recebida,  $A_d$  a área física do detector,  $h$  a diferença de altura entre o transmissor e o receptor,  $d$  a distância transmissor-receptor,  $\phi$  o ângulo de irradiação,  $m$  a ordem lambertiana e  $P_t$  a potência óptica transmitida. Embora esta equação se refira a um receptor de fotodiodo, ela pode ser expandida para células fotovoltaicas. Confirmados os resultados experimentais, nos quais a amplitude do sinal recebido diminuiu quadraticamente com a distância, utilizamos um procedimento de ajuste de curva para determinar a amplitude da tensão medida  $V$  em função da distância  $d$ . Os pontos da Fig. 7.2 podem ser modelados como:

$$V = \frac{0,133}{d^2} \quad (25)$$

A partir dessa análise, foram feitas as medições com dois transmissores com frequências fixas do circuito mostrado no diagrama de blocos da figura 5.3 já em placa PCB. Então, o LED é acionado utilizando a célula fotovoltaica como receptora onde os transmissores estão com uma distância de 145 cm da célula fotovoltaica como mostra na Fig.7.1. Através do fingerprinting com marcações a cada 10 cm, encontra-se o transmissor T1 na posição (0,0) cm e o transmissor T2 na posição (0,35) cm. Os transmissores foram colocados lado a lado em um ambiente interno. A célula fotovoltaica atuando como um receptor e converte a luz modulada em sinais elétricos que podem ser processados para recuperar os dados transmitidos. Os dados foram adquiridos utilizando um osciloscópio Yokogawa, com acoplamento AC. A célula fotovoltaica foi colocada 12 posições diferentes dentro do cenário.

Figura 7.1 – Configuração experimental para sistema de posicionamento indoor com 2 transmissores.



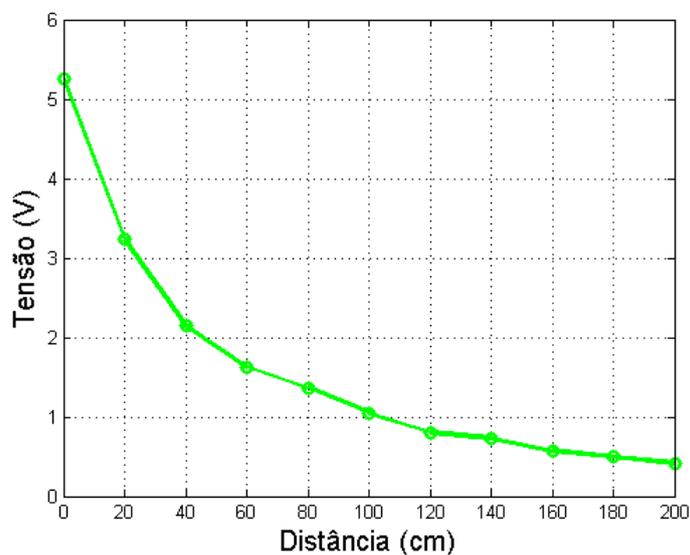
Fonte: O autor.

Diante disso, pode-se analisar os resultados obtidos da FFT, no inglês *Fast Fourier Transform* (FFT), que foi aplicada para converter os sinais recebidos do domínio do tempo para o domínio da frequência. As componentes de frequência dos sinais foram analisadas para determinar a intensidade dos sinais em diferentes posições. Como exemplo, está os resultados exatamente onde está posicionado os transmissores em relação à célula fotovoltaica, obtidos através da impressão digital/análise de cena, como mostra nas figuras 7.3 e 7.4. Para a análise dos outros sinais recebidos, foram realizadas várias FFTs a partir dos dados coletados, visando representar graficamente a intensidade dos sinais. Foram realizadas várias medidas para diferentes posições da célula fotovoltaica. Cada posição foi analisada individualmente utilizando a FFT para obter a distribuição de frequências dos sinais recebidos. A ideia é mostrar como as diferentes posições influenciam a potência dos sinais recebidos.

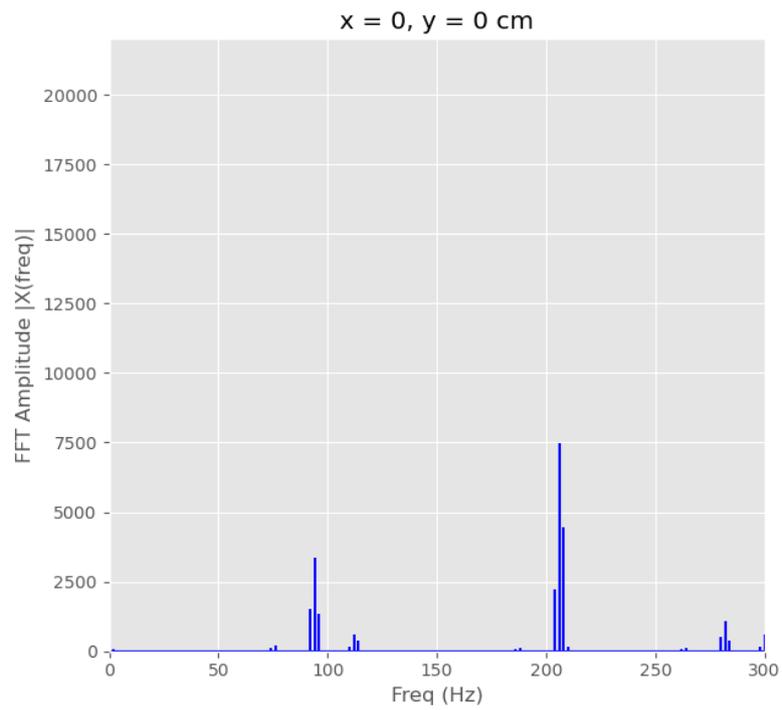
Os resultados apresentados na Figura 7.5 mostram as intensidades dos sinais através das potências recebidas conforme a célula fotovoltaica era posicionada. A partir disso os resultados foram obtidos através da soma de todos os bins da FFT da banda de interesse. O eixo z representa a potência recebida. A metodologia consiste em medir as amplitudes das componentes de frequência do sinal recebido e correlacioná-las com a distância do receptor aos transmissores, definindo assim sua posição sobre os eixos x e y.

Na Figura 7.6 pode-se analisar a relação entre as potências, dividindo a potência recebida de T2 pela de T1. As estrelas azuis mostra as posições dos transmissores. Obtemos um gráfico de superfície que permite uma análise detalhada da relação de potência dos sinais. Essa análise é crucial para determinar com precisão a posição do receptor no espaço tridimensional, utilizando as diferenças de potência como uma métrica confiável para o cálculo de distâncias. Esses resultados são essenciais para validar a eficácia do sistema de posicionamento indoor proposto, demonstrando que mesmo com variações na distância e nas condições de iluminação, o receptor consegue fornecer dados precisos para a localização.

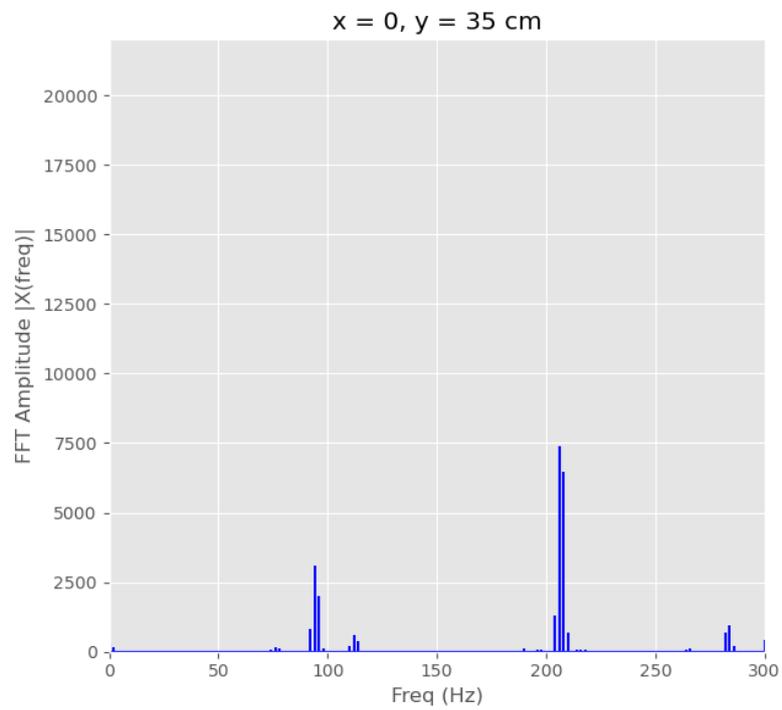
**Figura 7.2 – Tensão pico a pico recebida em relação à distância obtida na luz ambiente.**



Fonte: O autor.

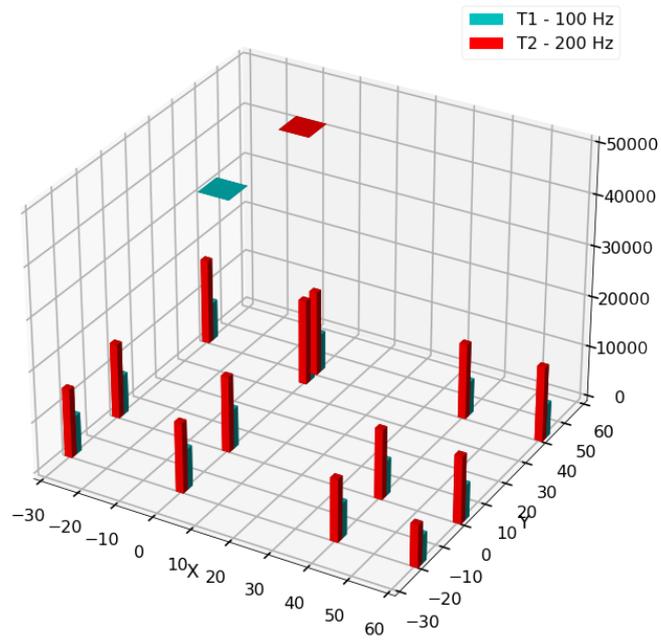
**Figura 7.3 – FFT na posição (0;0) cm**

Fonte: O autor.

**Figura 7.4 – FFT na posição (0;35) cm.**

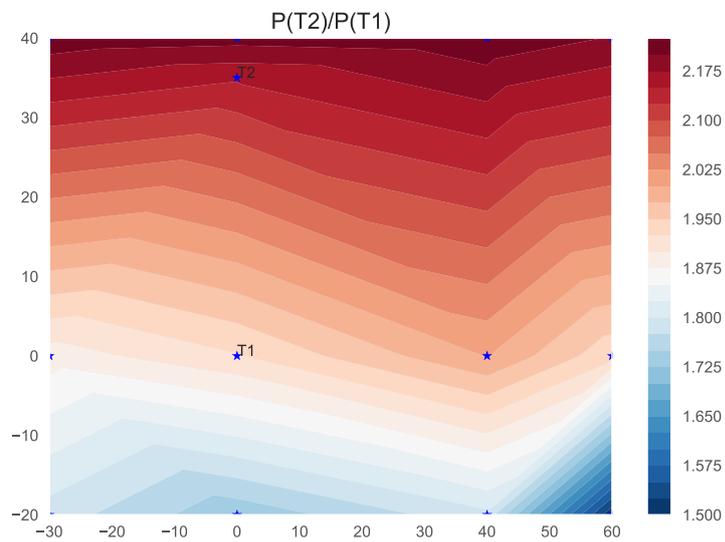
Fonte: O autor.

Figura 7.5 – Intensidade do sinal recebido.



Fonte: O autor.

Figura 7.6 – Relação de potências T2/T1.



Fonte: O autor.

## 7.2 TESTES, AVALIAÇÕES E RESULTADOS COM TRÊS TRANSMISSORES

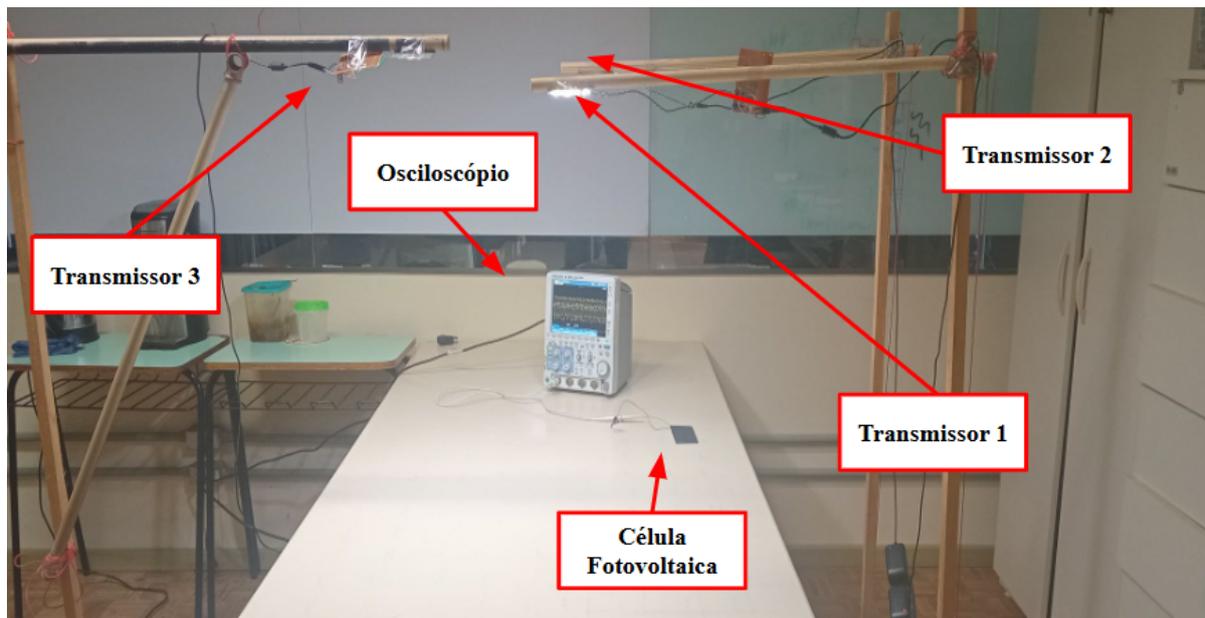
A partir da análise feita com dois transmissores, foram feitas as medições com mais um transmissor com frequências fixas. Propomos implementar um protótipo de um sistema de posicionamento de luz visível com 3 transmissores e uma célula fotovoltaica como receptor. O transmissor continua o mesmo do teste anterior, que consiste em uma matriz de LEDs que emitem pulsos de luz em uma frequência específica. Cada transmissor opera em uma frequência diferente para o receptor poder detectar a intensidade de várias fontes de luz simultaneamente. Os transmissores são colocados em locais arbitrários no ambiente interno para que toda a área seja coberta pela luz emitida.

A análise considera a avaliação da intensidade da luz sob diferentes condições usando a impressão digital que, como mencionado, também pode ser chamada de análise de cena, pois geralmente usa características do ambiente para determinar sua localização. Neste caso, a cena foi montada em uma mesa, conforme mostrado na Fig. 7.7, com marcações a cada 10 cm em uma área de 80 x 80 cm. Uma característica importante para um sistema de posicionamento é a intensidade do sinal, baseada no (RSSI).

A intensidade do sinal para cada transmissor foi calculada a partir da resposta de frequência do sinal recebido, conforme mostrado na Fig. 7.8. A partir da FFT do sinal recebido, a intensidade da luz correspondente a cada transmissor foi calculada integrando as faixas de frequência em torno das frequências fundamentais (frequências nominais dos transmissores) em uma janela de 50 Hz. A distância lateral real do receptor ao transmissor ( $d$ ) é calculada conforme mostrado na Fig. 6.3, uma vez que as coordenadas ( $x_T, y_T$ ) do transmissor são conhecidas. Isso permite que a impressão digital da intensidade do sinal seja determinada para toda a área. A iluminância ambiente é removida do sinal, uma vez que os componentes de baixa frequência são filtrados na análise do domínio da frequência.

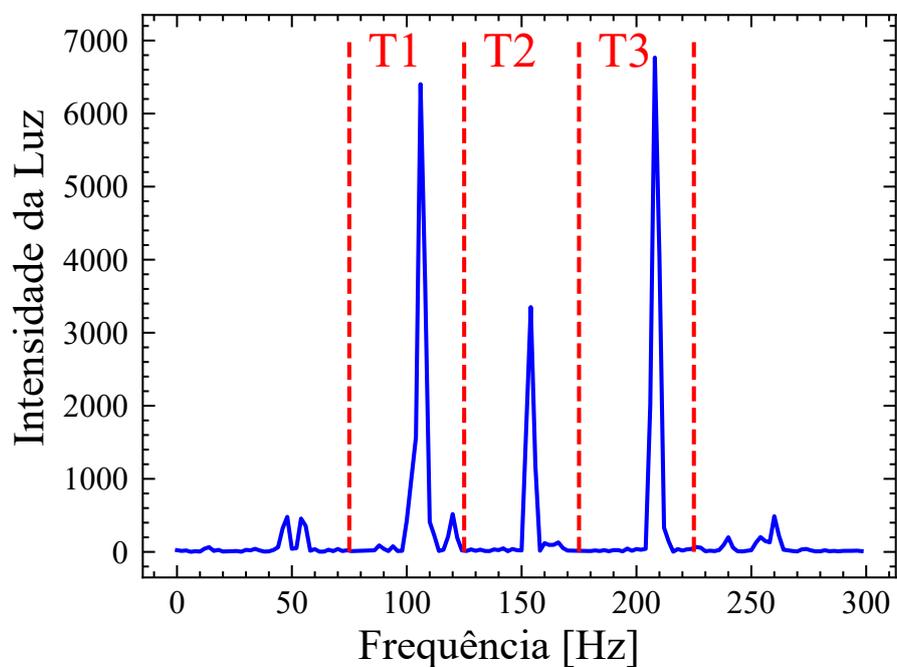
Como mostra a configuração completa de medição na Fig. 7.7, ela consiste em três transmissores colocados em posições diferentes, cada um emitindo pulsos de luz em frequências diferentes. O transmissor T1 é configurado com uma frequência de 100 Hz e montado na posição (10, 30) cm e uma altura de 80 cm acima da mesa; o transmissor T2 tem uma frequência de 150 Hz na posição (70, 20) cm e uma altura de 82 cm; e o transmissor T3 tem uma frequência de 200 Hz na posição (40, 60) cm e uma altura de 83 cm.

Figura 7.7 – Configuração experimental para sistema de posicionamento indoor com 3 transmissores.



Fonte: O autor.

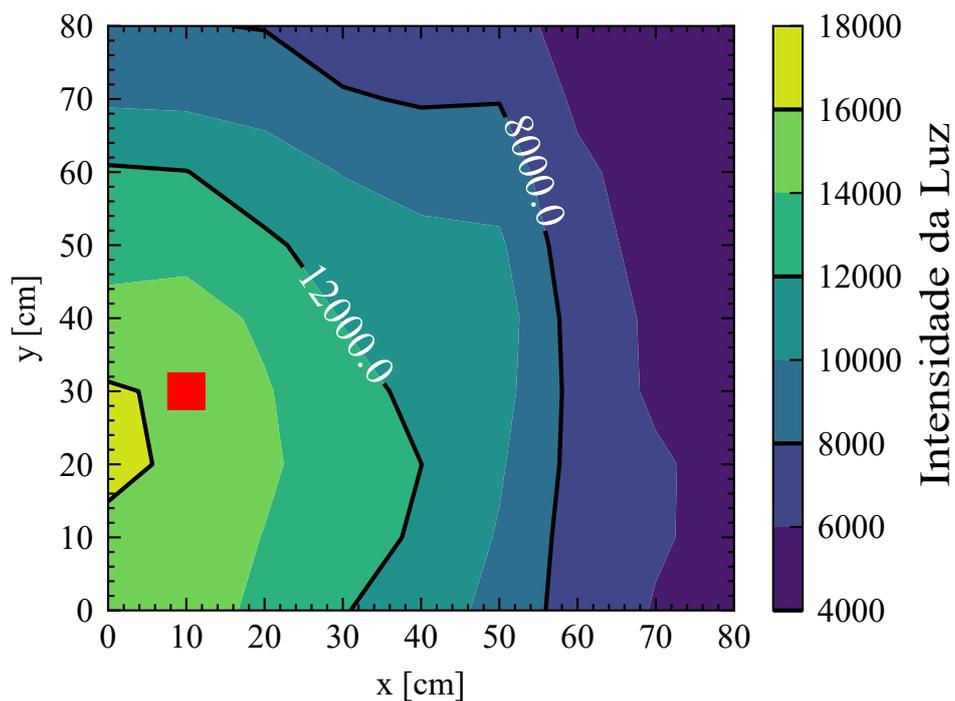
Figura 7.8 – Resposta de frequência do sinal recebido na posição (10, 10). A intensidade do sinal é calculada integrando os compartimentos em torno das frequências fundamentais dos transmissores.



Fonte: O autor.

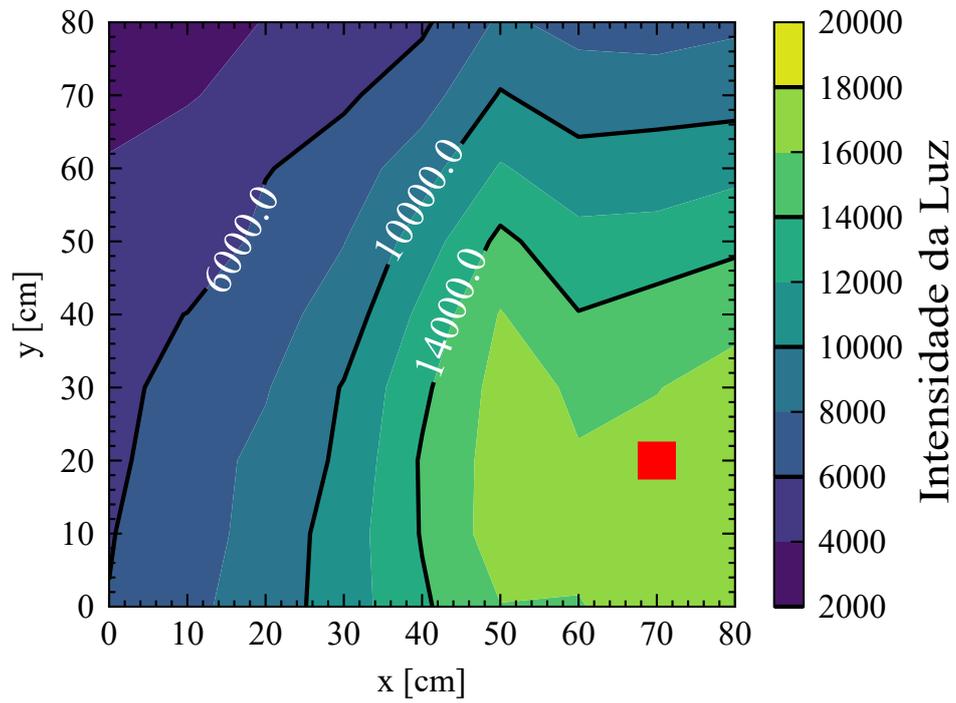
Os gráficos de contorno gerados mostrados nas Fig. 7.9, 7.10 e 7.11 determinam a distribuição da intensidade do sinal de luz (intensidade do sinal) para cada transmissor como uma função da posição do receptor no plano bidimensional. As linhas de contorno são sobrepostas para destacar regiões de mesma intensidade de sinal. A posição de cada transmissor é marcada com um ponto vermelho. A barra colorida ao lado de cada gráfico representa a escala de intensidade da luz, com valores mais altos indicando maior intensidade.

Figura 7.9 – Intensidade luminosa no plano gerada pelo transmissor T1.



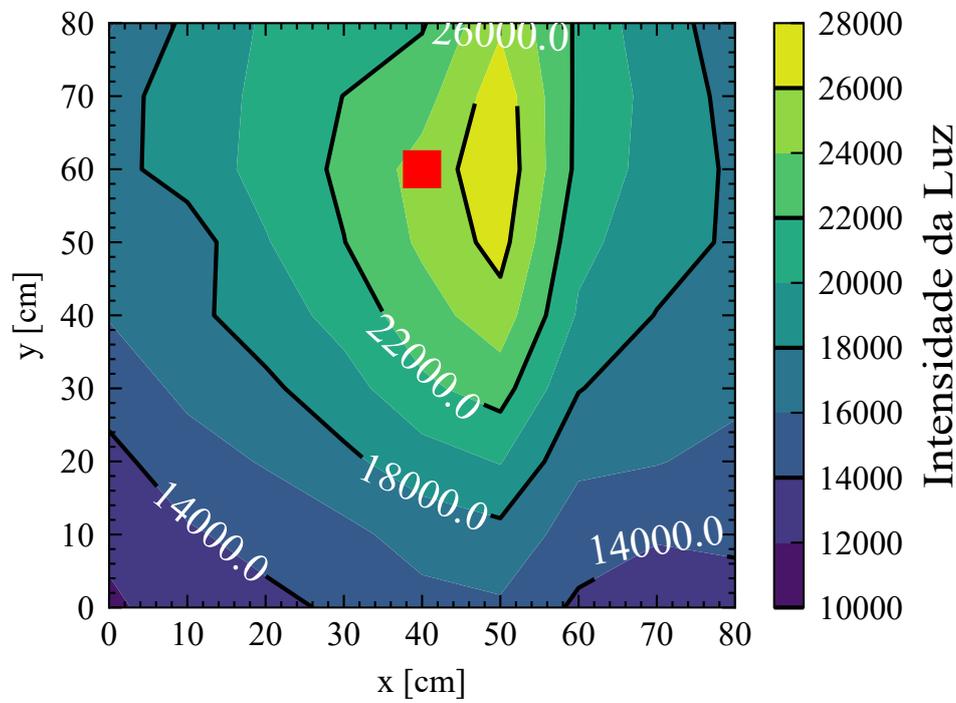
Fonte: O autor.

Figura 7.10 – Intensidade luminosa no plano gerada pelo transmissor T2.



Fonte: O autor.

Figura 7.11 – Intensidade luminosa no plano gerada pelo transmissor T3.



Fonte: O autor.

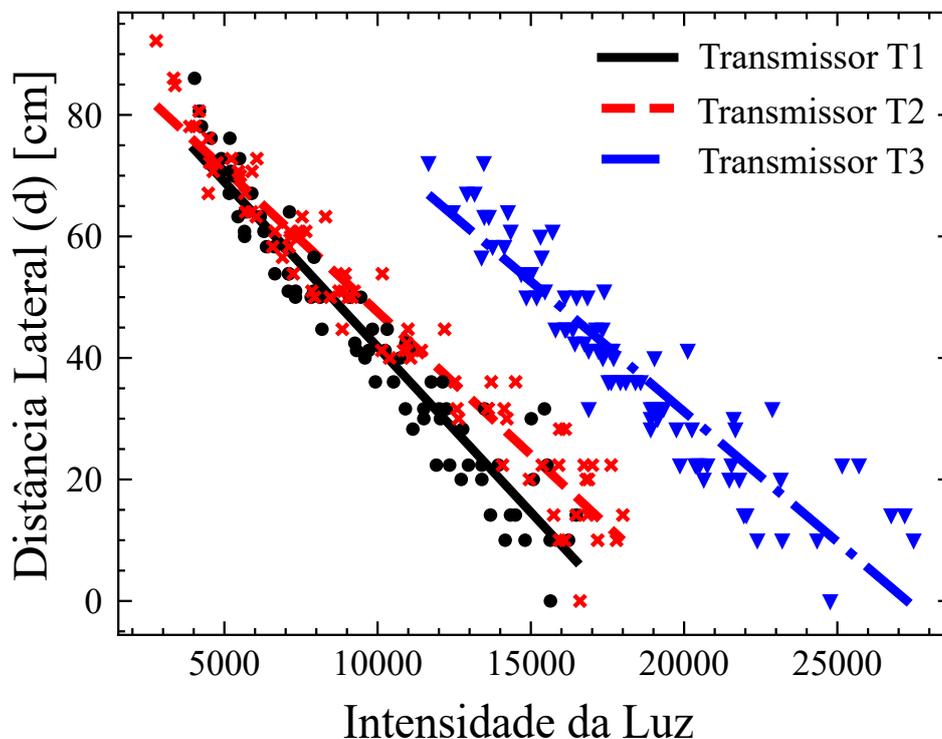
Tabela 7.1 – Coeficientes para as linhas de ajuste da Fig. 7.12.

Transmissor	$a$	$b$
T1	$-5.4388 \times 10^{-3}$	96.188
T2	$-4.6996 \times 10^{-3}$	94.571
T3	$-4.2844 \times 10^{-3}$	116.852

O próximo passo é estimar a correlação entre a distância lateral e a intensidade da luz. A Fig. 7.12 mostra a relação entre a intensidade do sinal e a distância lateral ( $d$ ) para os três transmissores diferentes. O gráfico de dispersão representa a intensidade da luz medida. Cada transmissor mostra uma linha de tendência indicando a diminuição da intensidade do sinal com o aumento da distância. Com a regressão linear é possível estimar os coeficientes lineares e angulares ( $a$  e  $b$ , respectivamente) das linhas que melhor se ajustam aos pontos medidos usando uma equação de primeira ordem ( $y = a \cdot x + b$ ).

A concordância entre os pontos experimentais e a linha ajustada nos permite inferir a qualidade do modelo linear para descrever a variação da intensidade do sinal em diferentes distâncias. Os coeficientes obtidos para as linhas são mostrados na Tabela 7.1. Esses resultados mostram que, como esperado, a intensidade do sinal para cada transmissor diminui com o aumento da distância a uma taxa aproximada por ( $a$ ).

Figura 7.12 – Funções de ajuste para os três transmissores. Os pontos são valores medidos e as linhas são estimadas por regressão linear.

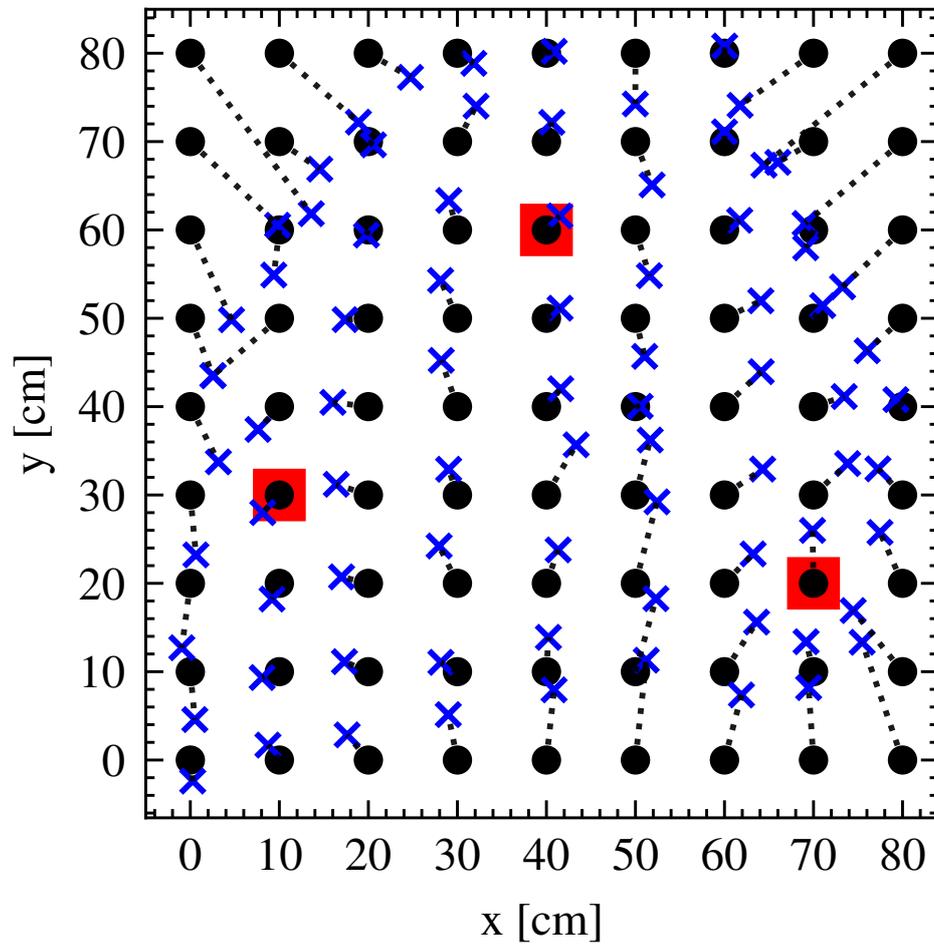


Para avaliar a precisão da localização com a abordagem proposta, os sinais medidos para cada ponto na matriz foram processados de acordo com as seguintes etapas:

- Calcular a FFT do sinal recebido.
- Calcular a intensidade da luz dos transmissores integrando os bins em torno da frequência fundamental (Fig. 7.8).
- Estimar a distância lateral para cada transmissor segundo as linhas de ajuste (Fig. 7.12).
- Calcular a posição  $(x, y)$  usando o algoritmo de trilateração (eq. 23).

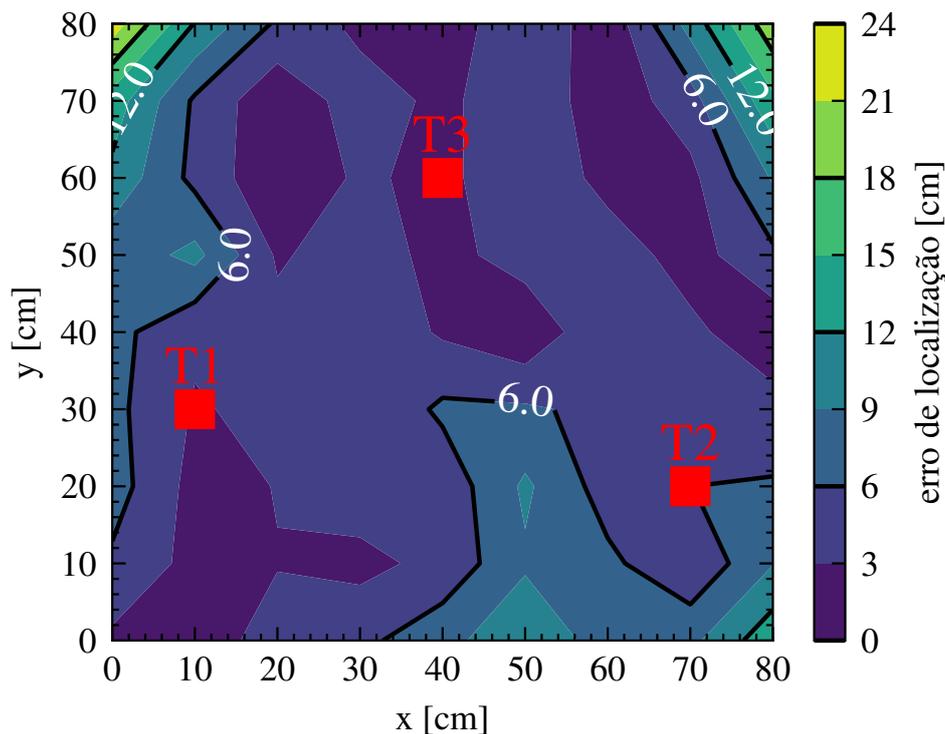
As posições estimadas foram comparadas com as posições reais e os erros foram calculados, conforme mostrado na Fig. 7.13. A Fig. 7.14 mostra o gráfico de contorno do erro de estimativa. Pode-se ver que os erros são menores nas regiões próximas aos transmissores e aumentam nas regiões mais distantes, como os cantos e as partes mais baixas da grade. Isso era esperado, pois a precisão da estimativa da intensidade da luz diminui com o aumento da distância do transmissor. O erro máximo de posição é de 22,7 cm e o mínimo é de 0,53 cm. O erro médio é de 5,52 cm, com desvio padrão de 4,05 cm. Isso corresponde a um erro médio de 6,9% em relação à área avaliada, demonstrando a boa qualidade dos resultados obtidos com o método de posicionamento proposto. Além disso, a precisão é 7 vezes maior do que o trabalho descrito em (SEE et al., 2016), onde foi obtido um erro médio de estimativa de 39,4 cm. Neste caso, o receptor foi implementado com um fotodiodo, que tem uma melhor resposta de frequência, mas sofre de uma baixa abertura, limitando o ângulo de incidência da luz.

Figura 7.13 – Posição estimada ( $X$ ) e real ( $O$ ) para cada nó na matriz. As linhas tracejadas cinza indicam os pares reais e estimados correspondentes. Quadrados vermelhos representam a posição dos transmissores.



Fonte: O autor.

Figura 7.14 – Erro de estimativa de posição (em cm) na região avaliada.



Fonte: O autor.

### 7.3 TESTES, AVALIAÇÕES E RESULTADOS COM QUATRO TRANSMISSORES

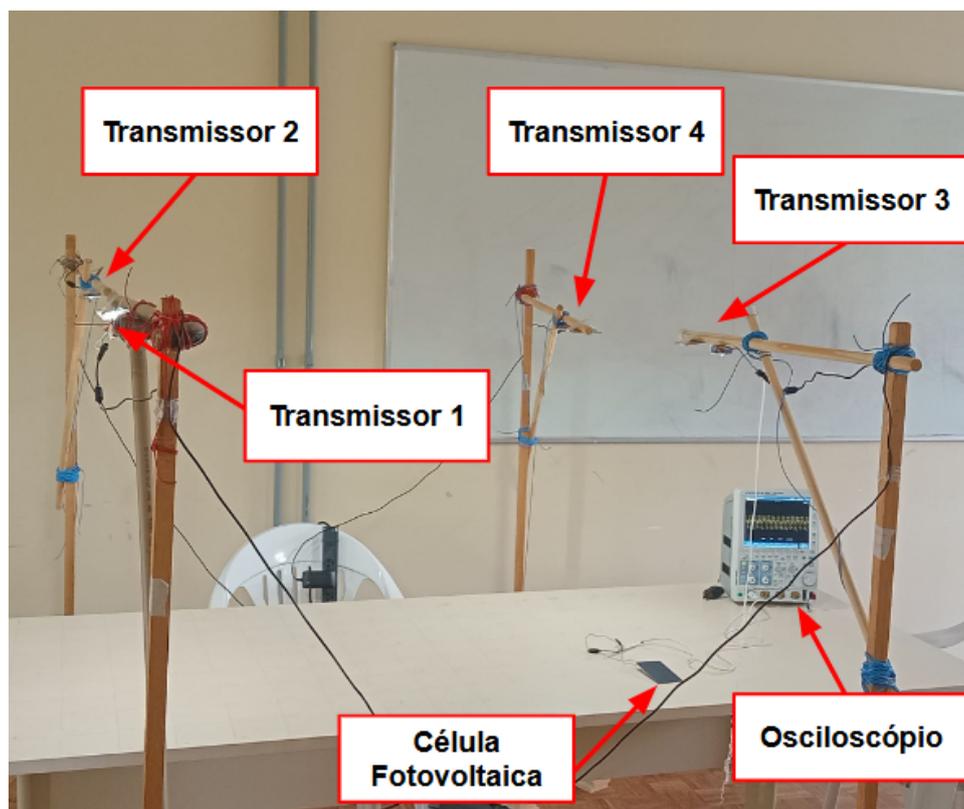
Dando continuidade da análise feita com dois e três transmissores, foram feitas as medições com quatro transmissores, todos emitindo luz em diferentes frequências. Propomos implementar um protótipo de um sistema de posicionamento de luz visível agora com 4 transmissores e uma célula fotovoltaica como receptor. O transmissor continua o mesmo que feito anteriormente, que consiste em uma matriz de LEDs que emitem pulsos de luz em uma frequência específica. Cada transmissor opera em uma frequência diferente para o receptor poder detectar a intensidade de várias fontes de luz simultaneamente. Os transmissores são colocados em locais arbitrários no ambiente interno para que toda a área seja coberta pela luz emitida. A célula fotovoltaica converte a luz modulada em sinais elétricos que podem ser processados para recuperar os dados transmitidos.

Ainda continuamos usando a impressão digital, que considera características do ambiente para determinar sua localização. Neste caso, a cena foi montada em uma mesa, conforme mostrado na Fig. 7.15, com marcações a cada 10 cm em uma área de 80 x 150 cm. A intensidade do sinal é bastante importante, baseada no (RSSI), pois mesmo com quatro transmissores coletamos informações RSSI para cada ponto na matriz para calibrar

nosso procedimento de posicionamento, assim como feito com três transmissores.

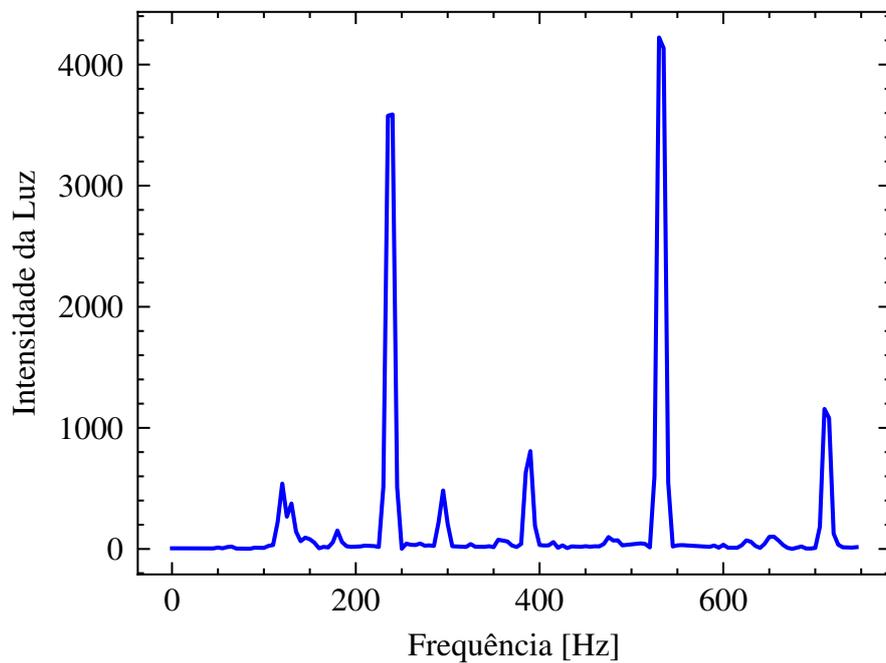
Realizamos a medição do sinal recebido do painel solar para todos os nós assim como para o caso dos três transmissores, no caso com quatro transmissores as intensidades de sinal para cada transmissor foram calculadas a partir da resposta de frequência do sinal recebido, conforme mostrado na Fig. 7.16. A partir da FFT do sinal recebido, a intensidade da luz correspondente a cada transmissor foi calculada integrando as faixas de frequência em torno das frequências fundamentais (frequências nominais dos transmissores). O transmissor T1 é configurado com uma frequência de 220 Hz e montado na posição (20, 20) cm e uma altura de 75 cm acima da mesa; o transmissor T2 tem uma frequência de 530 Hz na posição (70, 20) cm e uma altura de 74 cm; o transmissor T3 tem uma frequência de 130 Hz na posição (20, 140) cm e uma altura de 72 cm; e o transmissor T4 tem uma frequência de 370 Hz na posição (70, 140) cm e uma altura de 70 cm.

**Figura 7.15 – Configuração experimental para sistema de posicionamento indoor com 4 transmissores.**



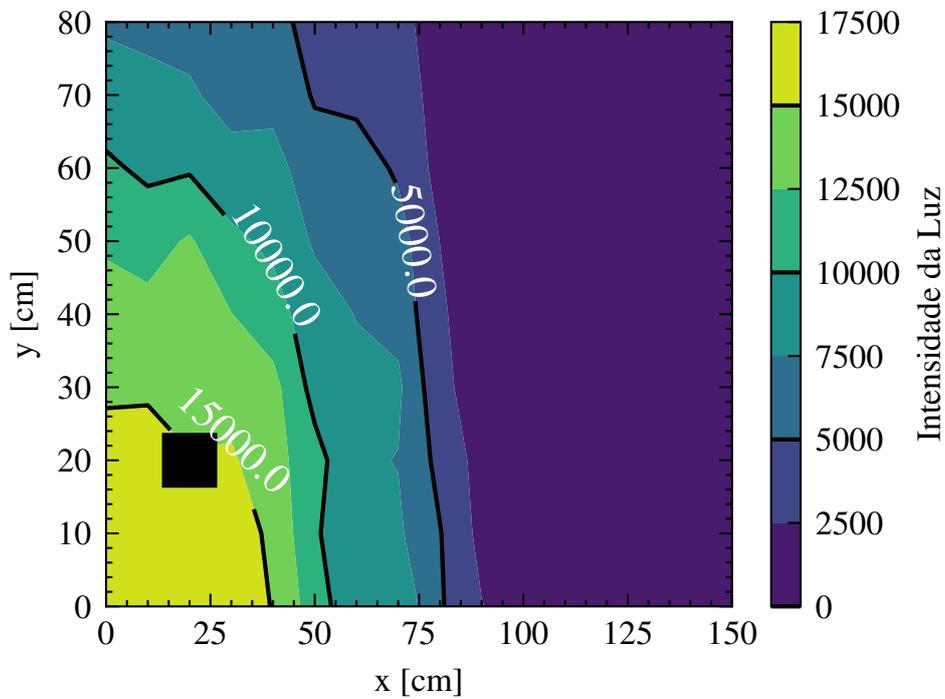
Fonte: O autor.

Figura 7.16 – Resposta de frequência do sinal recebido na posição (20, 140). A intensidade do sinal é calculada integrando os compartimentos em torno das frequências fundamentais dos transmissores.



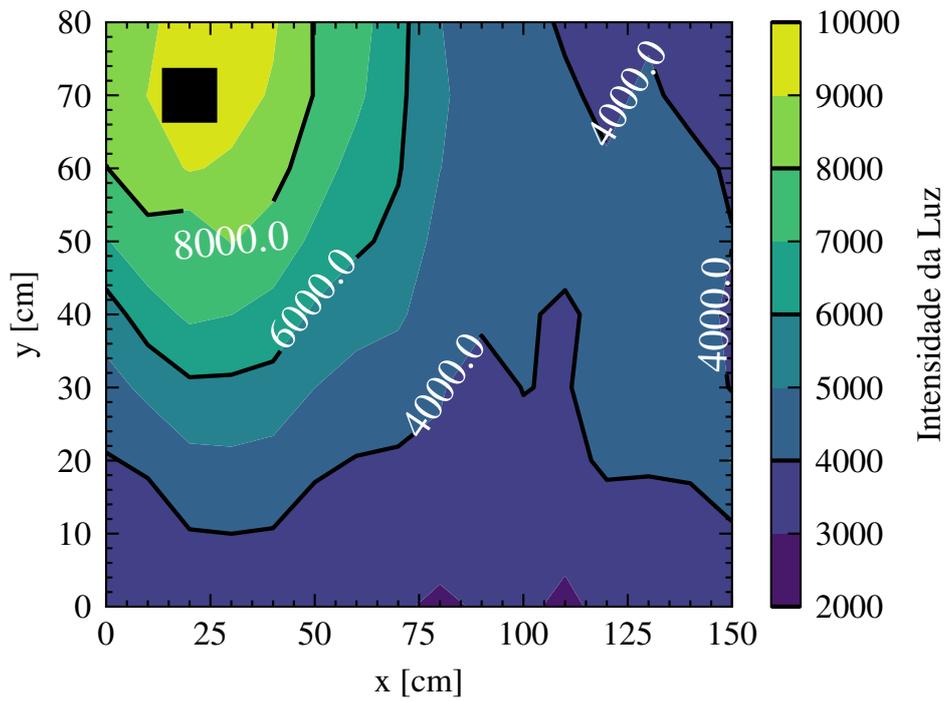
Fonte: O autor.

Figura 7.17 – Intensidade luminosa no plano gerada pelo transmissor T1.



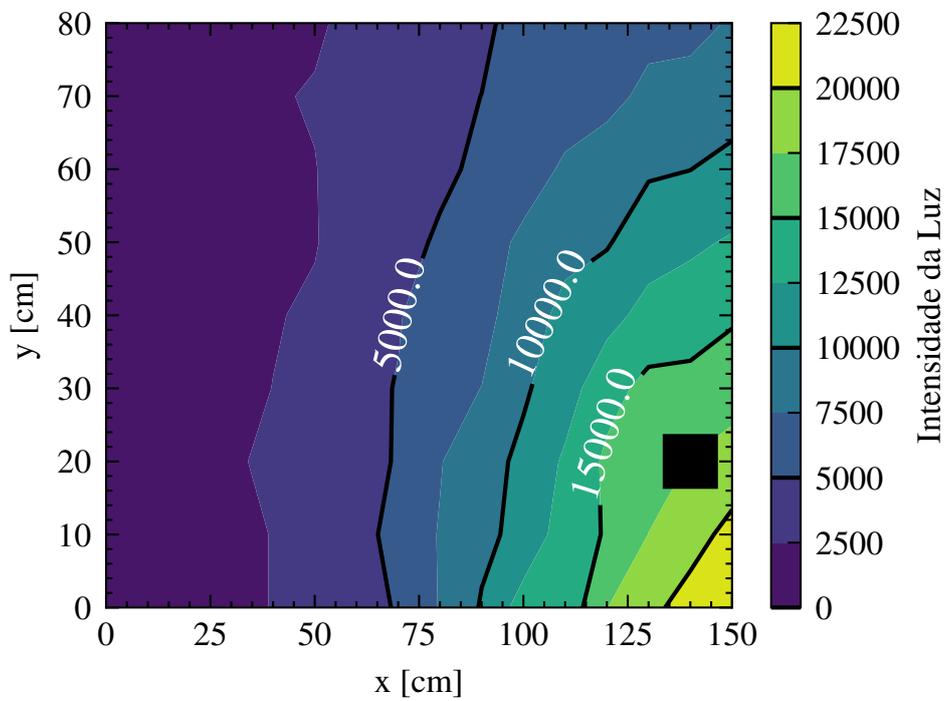
Fonte: O autor.

Figura 7.18 – Intensidade luminosa no plano gerada pelo transmissor T2.



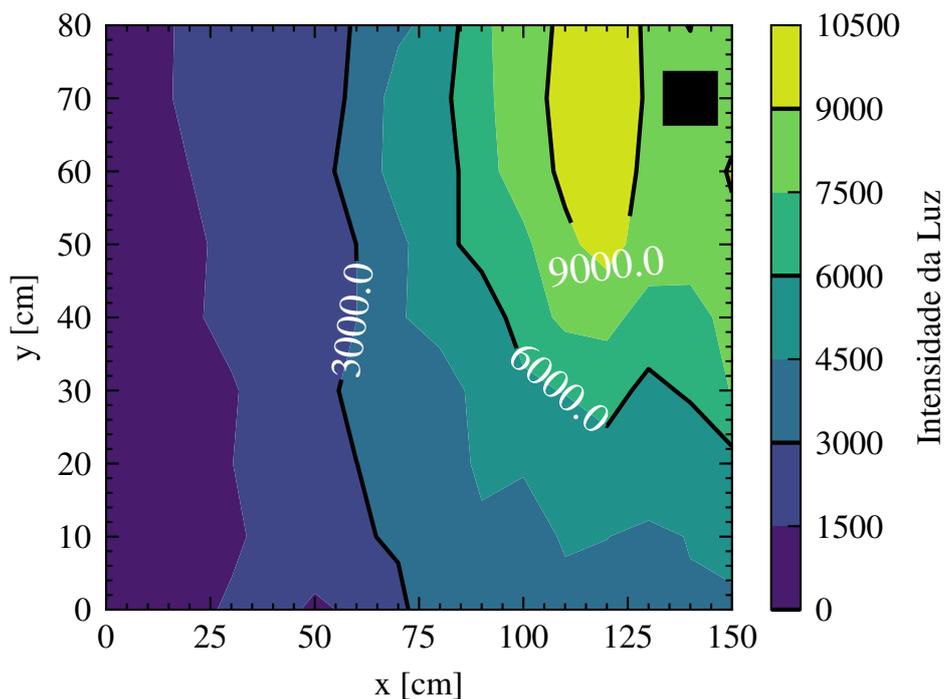
Fonte: O autor.

Figura 7.19 – Intensidade luminosa no plano gerada pelo transmissor T3.



Fonte: O autor.

Figura 7.20 – Intensidade luminosa no plano gerada pelo transmissor T4.



Fonte: O autor.

Os gráficos de contorno gerados mostrados nas Fig. 7.17, 7.18, 7.19 e 7.20 determinam a distribuição da intensidade do sinal de luz (intensidade do sinal) para cada transmissor como uma função da posição do receptor no plano bidimensional, assim como foi feito para três transmissores, onde as linhas de contorno são sobrepostas para destacar regiões de mesma intensidade de sinal. A posição de cada transmissor está marcada com um quadrado preto. A barra colorida ao lado de cada gráfico representa a escala de intensidade da luz, com valores mais altos indicando maior intensidade. Esses resultados são importantes para entender como a intensidade do sinal varia com a posição e permitem uma avaliação do alcance de cada transmissor no ambiente de posicionamento interno. A sobreposição dos contornos ajuda a visualizar regiões de maior e menor intensidade de luz e fornece informações valiosas sobre o comportamento de propagação do sinal.

## 8 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um sistema de posicionamento indoor baseado em luz visível utilizando células fotovoltaicas como receptores. Desde o início, o objetivo foi projetar uma solução eficiente, acessível e escalável, explorando novas tecnologias para ambientes onde o GNSS não é aplicável. O circuito transmissor foi desenvolvido com dispositivos discretos, enquanto as células fotovoltaicas demonstraram excelente desempenho como receptoras, captando sinais com frequências fixas e amplitudes diretamente relacionadas à distância entre transmissor e receptor.

A primeira fase de testes com dois transmissores revelou que o sistema responde conforme o esperado, confirmando a capacidade das células fotovoltaicas em detectar e interpretar os sinais transmitidos. Com base nesses resultados, foram realizadas avaliações sistemáticas com diferentes configurações de transmissores: dois, três e quatro. Cada configuração fornece informações importantes sobre o desempenho do sistema, incluindo precisão de posição e erros associados a cada método.

Durante o teste com três transmissores, foi aplicada trilateração para estimar a posição do receptor. Este método mostrou resultados consistentes, com erros limitados a limites aceitáveis para ambientes controlados. A análise detalhada dos dados mostrou que a intensidade do sinal, medida em função da distância, apresentou uma relação clara e consistente, permitindo à trilateração estimar a posição com precisão. A intensidade do sinal para toda a região de interesse foi mapeada e uma impressão digital foi gerada, o que melhorou a precisão do sistema de localização ao determinar um modelo para a distância lateral entre o receptor e os transmissores. Os resultados experimentais mostraram que as células PV podem detectar efetivamente a intensidade do sinal, levando a estimativas de posição confiáveis. A trilateração calculada mostrou que os erros de estimativa de posição podem ser baixos, com uma média de 6,9%. Estes resultados mostram que o sistema consegue operar com confiabilidade em cenários onde a distribuição do transmissor é favorável e as condições ambientais são controladas.

A introdução de um quarto transmissor não só ajudou a corrigir potenciais erros criados por reflexos, mas também proporcionou maior estabilidade para posicionamento com uma área mais ampla. Nesse caso também foi feita uma análise detalhada dos dados e mostrado que a intensidade do sinal, medida em função da distância, apresentou uma relação clara e consistente.

A introdução de uma abordagem com multifrequências, com cada transmissor

operando em uma frequência separada, mostrou-se promissora para melhorar ainda mais a diferenciação do sinal e a estabilidade do sistema. Os resultados até agora não só demonstram a viabilidade do sistema proposto, mas também destacam o seu potencial para aplicações práticas. A utilização de luz visível para posicionamento indoor, combinada com células fotovoltaicas como receptores, proporciona uma solução inovadora e sustentável. Comparada às tecnologias convencionais, esta abordagem apresenta vantagens como baixo custo, segurança e possibilidade de integração com sistemas de iluminação já existentes.

A continuação deste trabalho terá como foco a expansão do sistema para cobrir áreas e cenários maiores, avaliando sua adaptabilidade. A integração com algoritmos avançados também será explorada para melhorar a estimativa de posição, reduzindo ainda mais os erros, como, por exemplo, a multilateração. Por fim, o desenvolvimento deste sistema contribui significativamente para o avanço das tecnologias de posicionamento indoor, abrindo caminho para novas aplicações em automação residencial, logística, navegação predial e outros setores. Utilizando a luz visível como meio de transmissão e células fotovoltaicas como receptor, este trabalho constitui um passo importante no desenvolvimento de soluções inovadoras, eficientes e sustentáveis para enfrentar os desafios da localização em ambientes fechados.

## REFERÊNCIAS

- AFTAB, F.; KHAN, M. N. U.; ALI, S. Light fidelity (li-fi) based indoor communication system. **International Journal of Computer Networks and Communications**, v. 8, p. 21–31, 2016. ISSN 09749322.
- ARAÚJO, N. M. F. T. S.; SOUSA, F. J. P.; COSTA, F. B. Equivalent models for photovoltaic cell – a review. **Revista de Engenharia Térmica**, v. 19, p. 77, 2020. ISSN 1676-1790.
- BADER, S.; MA, X.; OELMANN, B. One-diode photovoltaic model parameters at indoor illumination levels – A comparison. **Solar Energy**, Elsevier, v. 180, n. January, p. 707–716, 2019. ISSN 0038092X.
- CELIK, A. N.; ACIKGOZ, N. Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models. **Applied Energy**, v. 84, n. 1, p. 1–15, 2007. ISSN 03062619.
- CUBAS, J.; PINDADO, S.; FARRAHI, A. New method for analytical photovoltaic parameter extraction. **Proceedings of 2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2013**, IEEE, n. October, p. 873–877, 2013.
- DAS, S.; SPARKS, A.; POVES, E.; VIDEV, S.; FAKIDIS, J.; HAAS, H. Effect of sunlight on photovoltaics as optical wireless communication receivers. **Journal of Lightwave Technology**, IEEE, v. 39, p. 6182–6190, 2021. ISSN 15582213.
- HAMADANI, B. H.; CAMPANELLI, M. B. Photovoltaic characterization under artificial low irradiance conditions using reference solar cells. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 10, p. 1119–1125, 2020. ISSN 21563403.
- HERMAN, M.; JANKOVEC, M.; TOPIČ, M. Optimisation of the i-v measurement scan time through dynamic modelling of solar cells. **IET Renewable Power Generation**, v. 7, p. 63–70, 1 2013. ISSN 17521416.
- KENNERUD, K. L. Analysis of Performance Degradation in CdS Solar Cells. **Ieee Transactions On Aerospace And Electronic Systems**, AES-5, n. 6, p. 912–917, 1969.
- KHURSHEED, M. U. N.; ALGHAMDI, M. A.; Nadeem Khan, M. F.; KHAN, A. K.; KHAN, I.; AHMED, A.; KIANI, A. T.; KHAN, M. A. PV Model Parameter Estimation Using Modified FPA with Dynamic Switch Probability and Step Size Function. **IEEE Access**, v. 9, p. 42027–42044, 2021. ISSN 21693536.
- KIM, K. A.; XU, C.; JIN, L.; KREIN, P. T. A dynamic photovoltaic model incorporating capacitive and reverse-bias characteristics. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 3, p. 1334–1341, 2013. ISSN 21563381.
- KOUHINI, S. M.; KOTTKE, C.; MA, Z.; FREUND, R.; JUNGNICHEL, V.; MULLER, M.; BEHNKE, D.; VAZQUEZ, M. M.; LINNARTZ, J. P. M. Lifi positioning for industry

4.0. **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics**, v. 27, 2021. ISSN 15584542.

LORRIERE, N.; BETRANCOURT, N.; PASQUINELLI, M.; CHABRIEL, G.; BARRERE, J.; ESCOUBAS, L.; WU, J. L.; BERMUDEZ, V.; RUIZ, C. M.; SIMON, J. J. Photovoltaic solar cells for outdoor lifi communications. **Journal of Lightwave Technology**, v. 38, p. 3822–3831, 2020. ISSN 15582213.

MA, X. **Power Estimation for Indoor Light Energy Harvesting Systems**. Tese (PhD Thesis) — Mid Sweden University, 2021.

MAHEEPALA, M.; KOUZANI, A. Z.; JOORDENS, M. A. Light-based indoor positioning systems: A review. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, v. 20, n. 8, p. 3971–3995, 2020.

MATTOS, D.; MONTEIRO, V.; AGUIRRE, P. C. de; SEVERO, L.; GIRARDI, A. Small-signal modeling and parameter extraction method for photovoltaic cell integration in indoor visible light communication systems. **Journal of Integrated Circuits and Systems**, v. 19, n. 1, p. 1–10, 2024.

MIRANDA, R. F.; BARRIQUELLO, C. H.; REGUERA, V. A.; DENARDIN, G. W.; THOMAS, D. H.; LOOSE, F.; AMARAL, L. S. A review of cognitive hybrid radio frequency/visible light communication systems for wireless sensor networks. **Sensors**, v. 23, n. 18, 2023. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/23/18/7815>>.

MONTEIRO, V.; DUTRA, L. F. M.; De Aguirre, P. C.; COMPASSI-SEVERO, L.; GIRARDI, A. Parameter Extraction Methodology of 1D2R PV Cell Electrical Model for Indoor Applications. In: **36th Symposium on Microelectronics Technology, SBMICRO 2022 - Proceedings**. [S.l.]: IEEE, 2022. ISBN 9781665487146.

MORAES, C. **Célula Fotovoltaica: Tudo o que você precisa saber**. 2020. Acessado em 20 de maio, 2024. Disponível em: <<https://eletronicadepotencia.com/celula-fotovoltaica/>>.

PARK, Y.-B.; LEE, Y. H. A novel unified trilateration method for rssi based indoor localization. In: **2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1628–1631.

SEE, Y.; NOOR, N. M.; Y.M, C. T. Investigation of indoor positioning system using visible light communication. In: **2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 186–189.